

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO PESQUISA E ENSINO – PROESPE

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS
ADEQUADAS NA DESIDRATAÇÃO DO MINÉRIO DE
GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA
RECICLÁVEL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNICAP
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR

LEONARDO BARBOSA CAVALCANTI

Orientador:

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Orientador externo:

Prof. Dr. Mohand Benachour

RECIFE, 15 DE MARÇO DE 2006

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO PESQUISA E ENSINO – PROESPE

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES ADEQUADAS
OPERACIONAIS NA DESIDRATAÇÃO DO MINÉRIO DE
GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA
RECICLÁVEL**

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

RECIFE, 15 DE MARÇO DE 2006

C376d

Cavalcanti, Leonardo Barbosa

Determinação de condições operacionais adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável / Leonardo Barbosa Cavalcanti ; orientadores Valdemir Alexandre dos Santos, Mohand Benachour, 2006.

69 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino, Pesquisa e Extensão 2006.

1. Gesso. 2. Gesso – Reaproveitamento. 3. Materiais de construção. I. Título.

CDU 691.55

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
PERNAMBUCO**

**PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO PESQUISA E ENSINO – PROESPE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO
DE MESTRADO DE

LEONARDO BARBOSA CAVALCANTI

**“DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS
ADEQUADAS NA DESIDRATAÇÃO DO MINÉRIO DE
GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA
RECICLÁVEL”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Tecnologia dos Materiais

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

Recife, 31 de março de 2006

Banca Examinadora:

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

DEDICATÓRIA

A Deus pela força, por não perder o caminho,
aos meus pais por sempre acreditarem em mim,
a Kelly por me apoiar sempre
e aos amigos que estavam sempre por perto.

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.

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

Ao Co-orientador Mohand Benachor que deu todo auxílio necessário para confecção deste trabalho.

Aos professores do Mestrado de Engenharia Civil da UNICAP Arnaldo Cardim, Maria da Graça “tia Graça”, Eliane Barreto e o Coordenador Romilde Alves, que me apresentaram novos conhecimentos para o longo de minha vida.

Aos laboratórios e Laboratoristas do Departamento de Química e Meio Ambiente da UNICAP e o Laboratório de Tecnologia Habitacional do ITEP, com especial atenção ao Professor Sérgio Paiva que sempre que possível auxiliou nas atividades compartilhando sua experiência.

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

À Associação Latino Americana de Educação – ALAE por subsidiar, financeiramente, além de apoiar em todos os momentos a realização deste trabalho.

Aos Amigos Fernando Medeiros e Jorge Melo, o primeiro por me apoiar a fazer o Mestrado em Engenharia Civil dando todo apoio e suporte na fase inicial, e o segundo por dar cobertura na ALAE em momentos cruciais do curso, para maior dedicação ao Mestrado.

A meus pais, Dinairam e Cida, pela dedicação e incentivo sobrenatural a minha formação pessoal, acadêmica e profissional, com valorosos conselhos, que me levaram

sempre a decisões coerentes e acertivas. A minhas irmãs, Marjorye e Samara, pelos debates cada um com sua visão dos problemas. A minha companheira Kelly, pelo apoio em todos os sentidos e formas durante todo Mestrado.

A todos os meus familiares que moram em Brasília que de certa forma contribuíram com a minha formação, mesmo que distantes fisicamente, mas sempre torcendo e orando por mim. Em especial aos meus avós de Caruaru-PE, Sr. João Poção, que não pode ver seu neto nesta nova formação e, Dona Maria, que me apóia incondicionalmente. Aos meus tios Dilsom, Dilvam e Tereza, a meus primos, sobrinhos, afilhados, cunhados e amigos que estavam sempre presentes em todos os momentos e que de alguma forma se privaram de momentos comigo.

EPÍGRAFE

Se esta rua fosse minha,
eu mandava ladrilhar,
não para automóvel matar gente
mas para criança brincar.

Se esta mata fosse minha,
eu não deixava derrubar.
Se cortarem todas as árvores
onde os pássaros vão morar?

Se este rio fosse meu
eu não deixava poluir.
Joguem esgotos noutra parte,
que os peixes moram aqui.

Se este mundo fosse meu,
eu fazia tantas mudanças
que ele seria um paraíso
de bichos, plantas e crianças.

José Paulo Paes

PAES, J. P.. **Poemas para Brincar.**
4 ed. São Paulo: Ática, 1991.

RESUMO

Foram determinadas condições operacionais de temperatura e pressão sob as quais ocorre desidratação térmica do minério de gipsita que dá origem a um tipo de gesso beta reciclável. Com a resolução do CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, o resíduo de gesso proveniente 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 e consideram que ainda não foi desenvolvida tecnologia para sua reciclagem. Neste trabalho foi elaborado e confeccionado um reator batelada em escala de laboratório para produção de gesso beta a partir do minério de gipsita e sob pressão manométrica acima da pressão atmosférica. Esse excedente de pressão foi obtido retendo-se parte do vapor produzido com a desidratação do minério, por meio de uma válvula do tipo alívio automático. A desidratação do minério de gipsita nessas condições dá origem a um gesso beta com características mecânicas superiores ao gesso convencionalmente produzido pela maioria dos processos produtivos existentes no Pólo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. Sob pressão controlada a 0,65 atm acima da pressão atmosférica e a aproximadamente 150 °C, os cristais do gesso devem apresentar-se isentos de esfacelamentos, provocados pela saída abrupta da água combinada da molécula de gipsita ou di-hidrato do sulfato de cálcio. Foram testadas algumas importantes propriedades do gesso beta produzido sob a pressão manométrica proposta e comparadas aquelas obtidas de um gesso obtido sob condições convencionais de fabricação. Os testes verificaram valores da água de hidratação para confirmar a obtenção da conversão da reação e de propriedades como massa unitária, módulo de ruptura à flexão, dureza e tempo de pega. Os gessos beta produzidos sob pressão foram testados em dois ciclos de vida e em ambos apresentaram características de um gesso com cristais bem formados, homogeneamente dispostos e de baixas porosidades inter- e intracristalina. Sua comparação com gessos convencionais mostraram superioridade quanto às propriedades mecânicas, principalmente em relação a ambos em seus segundos ciclos de vida. Obteve-se um índice de reciclagem de 100 %. Dessa forma, acredita-se que os processos produtivos industriais praticados no Pólo Gesseiro necessitam de intervenções técnicas, caso se deseje a reciclagem de parte dos gessos originados em resíduos das construções e demolições, tais como, placas para tetos, blocos para divisórias, gessos acartonados, etc., e aqueles também originados nos próprios processos de fabricação desses pré-moldados.

Palavras-chave: Gesso Beta, Ciclo de vida, Condições Operacionais, Índices de reciclagem, RCD.

ABSTRACT

Operational conditions of temperature and pressure had been determined under which the thermal dehydration of the gypsum ore occurs producing a type of recyclable beta plaster. With the resolution of the CONAMA n° 307, of July 5th of 2002, the plaster waste proceeding from the civil building became one waste of difficult discarding, a time that this material is considered such as contaminante for the excessively component ones of a rubbish and considers that technology for its recycling still was not developed. In this work it was elaborated and confectioned a batch reactor in laboratory scale for beta plaster production from the ore gypsum and under pressure above of the atmospheric pressure. This excess of pressure was gotten holding back part of the water vapor produced with the dehydration of the ore, by means of a valve of the automatic relief type. The dehydration of the gypsum ore in these conditions gives origin to a beta plaster with superior mechanical characteristics to the plaster conventionally produced by the majority of the existing productive processes in the Polar Region Plasterer of the Araripe - Pernambuco. Under controlled pressure of 0.65 atm above of the atmospheric pressure and approximately 150 °C, the plaster does not present breaked crystals, provoked for the abrupt exit of the dehydration water of the calcium sulphate di-hydrate. Some important properties of the beta plaster, produced under pressure had been tested and compared with plaster produced under conventional conditions of manufacture. The tests had verified values of the dehydration water, to confirm the final conversion of the dehydration reaction, and properties as unitary mass, flexion rupture modulus, hardness and setting time. The beta plasters produced under pressure had been tested in two life cycles and in both they had presented characteristics of a plaster with well formed crystals, homogeneously distributed and of low inter- and intra-crystals porosities. Its comparison with conventional plasters had shown superiority how much to the mechanical properties, mainly in relation to both in its second life cycles. The recycling index was of 100 %. So is given credit that the industrial productive processes practiced in the Polar Region Plasterer need technique adaptations, if it desires to the recycling of part of plasters originated in building and demolition, such as waste of the plates, blocks, plaster walls, and so on, and the wastes also originated in the proper processes of manufacture of these plaster premoldeds.

Keyword: Beta plaster, Life Cycles, Operational conditions, Recycling index, CDR.

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	16
2	<i>OBJETIVOS</i>	19
2.1	Geral	19
2.2	Específicos	19
3	<i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	20
3.1	Preliminares	20
3.2	Classificação dos Resíduos Sólidos	21
3.3	Reciclagem e Reutilização	21
3.4	Resíduo de Construção e Demolição	23
3.5	Gesso como Resíduo	24
3.6	Gesso Reciclado	25
3.7	Gesso Aditivado	27
3.8	Meio Ambiente	27
3.9	Síntese do Levantamento	30
4	<i>MATERIAL E MÉTODOS</i>	31
4.1	Descrição Geral dos Experimentos	31
4.2	Concepção do Reator	32
4.2.1	Autoclave	33
4.2.2	Batelada fechada	33
4.2.3	Reator batelada com alívio manual	33
4.2.4	Reator com alívio automático	34
4.3	Concepção do Arranjo Experimental	35

4.4	Produção de Gesso Beta a Pressões Acima da Atmosfera	38
4.5	Ajustes das Condições Experimentais	40
4.5.1	Condições de temperatura e pressão	40
4.5.2	Relação água/gesso	42
4.6	Confecções dos Corpos-de-prova	44
4.6.1	Obtenção da Matéria-Prima	44
4.6.2	Procedimento de Preparo das Pastas de Gesso	47
4.7	Testes de Caracterização dos Gessos	48
4.7.1	Massa Unitária	48
4.7.2	Ensaio de umidade e água de cristalização	49
4.7.3	Determinação dos tempos de início e fim de pega	51
4.7.4	Resistência à abrasão	51
4.7.5	Resistência à compressão	52
4.7.6	Resistência à flexão	53
5	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	55
5.1	Conversão do Gesso Beta Sob Pressão	55
5.2	Caracterizações dos Materiais dos Corpos de Prova	56
5.2.1	Massa unitária	56
5.2.2	Dureza	57
5.2.3	Tensão de Ruptura à flexão	59
6	<i>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</i>	62
	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	64
	<i>ANEXOS</i>	69

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4-1 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICO UTILIZADOS NO CÁLCULO DA TEMPERATURA DE REAÇÃO	41
TABELA 5-2 - VALORES DE CONVERSÃO DOS GESSOS PRODUZIDOS CALCULADOS	55
TABELA 5-3 -- VALORES DE TEMPO ÚTIL PARA DIFERENTES TIPOS DE GESSO PRODUZIDOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.4.1 - FORMAS UTILIZADAS NAS CONFECÇÕES DOS CORPOS-DE-PROVA DE ENSAIOS DE DUREZA	47
FIGURA 4.4.2 - APARELHO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA	49
FIGURA 4.4.3 - ANALISADOR DE UMIDADE POR TÉCNICA DE RADIAÇÃO POR INFRA-VERMELHO	50
FIGURA 4.4.4 - BOLACHA PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PEGA	51
FIGURA 4.4.5 - DURÔMETRO.....	52
FIGURA 4.4.6 - ESQUEMA ADOTADO PELO MÉTODO PARA MEDIR A RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE UMA BARRA	54

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 o de melhor qualidade no mundo, apresentando um teor que varia de 88% a 98% de pureza (BALTAR et al., 2004). Junte-se a isto que o Brasil possui também a maior reserva mundial de gipsita, com 1,2 bilhão de toneladas de minério e a céu aberto.

Vinte e seis empresas mineradoras, 72 calcinadoras e 234 fábricas de pré-moldados compõem a estrutura de um pólo industrial situado nos municípios pernambucanos de Araripina, Trindade, Ipubi, Ouricuri e Bodocó - o Pólo Gesseiro do Araripe. Esse Pólo Gesseiro gera mais de 12 mil empregos diretos e 60 mil indiretos, com Pernambuco produzindo 90% do gesso consumido no País, e sendo o estado nordestino com maior destaque nesse setor (LYRA, 2001).

O Pólo Gesseiro surgiu na década de 60 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 revolução. Tal mudança deveu-se a financiamentos da extinta Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE); o que possibilitou a utilização de novas tecnologias e a contratação de técnicos estrangeiros para o local.

O beneficiamento da gipsita para a produção de gesso, na região do Araripe, envolve as seguintes operações básicas: britagem; rebritagem; peneiramento (usado apenas em algumas empresas); encilamento; calcinação; estabilização térmica em silos; moagem (de acordo com as especificações de mercado para o produto); encilamento e ensacamento (BENACHOUR, PERES e SANTOS, 2001). Entre tais etapas, aquela considerada como as mais críticas são as de calcinação e cominuição, ou moagem, responsáveis diretas pelo tipo de gesso produzido, podendo resultar em um produto de baixa qualidade, ou um produto capaz de atender aos mais rígidos critérios de qualidade; inclusive com características de um material reciclável, permitindo que o gesso ocupe posição de destaque entre os materiais de construção civil mais utilizados.

O gesso é o produto da desidratação térmica da gipsita e sua posterior moagem. A temperaturas relativamente baixas (150°C - 170°C), a gipsita perde parte de sua água de composição resultando no semi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). O gesso, ou semi-hidrato, produzido da desidratação térmica da gipsita pode ser classificado em gesso beta ou gesso alfa. Obtém-se industrialmente o semi-hidrato beta, desidratando-se parcialmente o minério

de gipsita a pressões próximas à pressão atmosférica. O semi-hidrato 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 em função da forma final dos cristais produzidos. Calcinações conduzidas sem controle dos parâmetros responsáveis pela saída da água de hidratação (Pressão e Temperatura), podem dar origem a gessos de características indesejáveis como de baixa resistência mecânica. Neste caso, como o gesso alfa (Figura 1.1) é produzido em condições favoráveis ao controle de parâmetros operacionais como temperatura e pressão, os cristais do gesso alfa apresentam-se bem formados e conferem a esse tipo de semi-hidrato uma maior resistência que a do gesso beta. Um fator determinante da opção para a produção de uma dessas duas formas, alfa ou beta, na prática, tem sido o custo, pois o processo de produção gesso alfa é sensivelmente mais caro que o de produção do beta.



Figura 1.1 - Micrografia Mostrando Cristais Formados na Produção do Gesso Alfa

Quando se pensa em reciclagem de gesso, deve-se pensar, a princípio, de como esse gesso foi originado. 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. Isto por que, o processo de hidratação de um gesso resulta, no máximo, em um produto com composição exatamente igual ao do material que o originou.

O uso do resíduo de gesso atende à Resolução 307/02 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que enquadra o gesso como material na classe C, na qual está toda a sobra da construção civil que ainda não dispõe de tecnologia para a reciclagem. Com o desenvolvimento de mais um método de reciclagem o resíduo de gesso passará a ser reutilizado em vez de atulhar os lixões e aterros sanitários, além de permitir a criação de empresas e empregos a partir de indústrias de reciclagem do gesso. Essas empresas podem ser instaladas bem próximo aos grandes centros urbanos, em função da redução do custo de transporte da matéria-prima original (gesso), em vez de minério de gipsita, este último disponível em abundância somente a 700 km de Recife, capital do Estado de Pernambuco.

A reciclagem de resíduos de gesso como aglomerante demanda, além da moagem, a remoção de impurezas como o papel, colas, entre outras, uma calcinação em condições adequadas e, principalmente, uma matéria-prima de qualidade, da qual deve-se gerar o gesso reciclado com características muito próximas às desse material de origem. Segundo a experiência internacional atual é possível reciclar, inclusive, gesso acartonado que contém outros compostos, produzindo aglomerantes, desde que sejam removidos contaminantes incorporados no processo de geração de resíduos (CAMPBELL, 2003; MARVIN 2000; HUMMEL, 1997).

Nosso roteiro de trabalho baseou-se em uma revisão do Estado da Arte apresentado no Capítulo 2. No Capítulo 3 transcreve-se, em detalhes, as etapas de construção de um reator de desidratação térmica, em escala de laboratório e operando à pressão acima da pressão atmosférica e, sob controle dessa mesma pressão e relata-se os testes experimentais realizados em busca de condições de laboratórios adequadas, sem que fossem esquecidas condições produtivas visando a manutenção de critérios de produtividade industrial. No Capítulo 4 faz-se a apresentação e discussão dos resultados, necessários à caracterização dos gessos reciclados produzidos a partir de gessos convencionais e de gessos obtidos a partir de condições especiais propostas para o desenvolvimento deste trabalho. No Capítulo 5 são elaboradas as conclusões de acordo com os objetivos do trabalho e são também apresentadas sugestões de se modificar os processos produtivos existentes no Pólo Gesseiro do Araripe e para um novo trabalho.

A reciclagem do gesso beta pode se tornar uma importante etapa para o ciclo de vida desse material, até que se apresentem processos alternativos, desde que certas condições operacionais, como as propostas por este trabalho, sejam adotadas pelos processos produtivos em vigor no Pólo Gesseiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar condições operacionais para a produção de gesso beta, necessárias a uma possível reciclagem desse material por desidratação do resíduo de gesso hidratado, provenientes das fábricas de pré-moldado ou da construção civil.

2.2 Específicos

- Fazer o levantamento das ações empreendidas na reciclagem do gesso;
- adaptar instalações laboratoriais para produção de gesso beta em batelada, com características de um material reciclável;
- realizar testes preliminares para definir condições de um material reciclável;
- produzir gesso beta para a realização de testes de reciclabilidade e;
- repetir os testes anteriores para análise do 2º e 3º ciclos de vida.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Preliminares

A produção de rejeito na construção civil é algo inevitável podendo ser amenizado e tirado proveito da situação. 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 (SOUZA 1999; 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 e o Brasil entre 230 a 760 kg/hab.ano. Estes dados são entre 40% e 70% maior 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% (AGOPYAN, 1998), enquanto os fabricantes de gesso em pó estimam perdas em torno de 30% da massa de gesso. Na região da grande São Paulo estima-se um consumo de gesso para revestimento de aproximadamente 20.000 toneladas/mês, parte das perdas permanecem na parede como excesso de espessura e será incorporada aos resíduos de construção quando da demolição do edifício. Outra parte se torna resíduo de construção (JOHN, 2003).

Nos países já desenvolvidos, onde as atividades de renovação de edificações, infraestrutura e espaços urbanos são mais intensos, os resíduos provenientes de demolições são muito mais frequentes; dados da E.D.A. – European Demolition Association projetou para o ano 2000 a geração de 215 milhões de toneladas na Europa Ocidental, das quais 175 milhões (80%) são provenientes de demolições e 40 milhões de novas construções (PERA, 1996).

A disponibilidade de dados no Brasil é para construções residenciais em edifícios, havendo carência de informação em outras tipologias de construção, como: reformas, construções industriais, obras viárias, demolição etc (PINTO, 1999).

3.2 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 o resíduo de gesso ficou classificado como classe C, para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem / recuperação.

Na resolução do CONAMA 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).

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.

3.3 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 (SANTOS, 1975).

Entretanto, foram as grandes catástrofes deste século, 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 o pós 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 nas últimas décadas (LIMA, 1999): super-exploração de jazidas de agregados, disposição dos

resíduos sem tratamento e a geração de um volume maior de entulho do que a construção de estradas pode absorver e sobrecarga de aterros (CUR, 1986), estes aterros são uma forma de desperdício de recursos, sendo necessário 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). *“Os estudos de soluções práticas que apontem para a reutilização do entulho na própria construção civil, contribui 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”* (ZORDAN, 1999).

Existem algumas alternativas para amenizar o aumento da geração de entulho, 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 - Alguns exemplos de utilização: como aglomerado miúdo para assentamentos e argamassas, para execução de contrapisos de conjuntos habitacionais, em fundações, pilares e vigas de baixa solicitação, enchimentos de caixões perdidos, regularização de vias, preenchimento de buracos, contrapiso 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 - Compartilhamos tudo, passado, presente e futuro, necessidades e anseios, sobrevivemos neste universo, que é único, e assim como fazemos

parte do todo, o todo também faz parte de cada um de nós. Somos a cidade, e ela só é quem nela habita, pois sem o homem é apenas ruína, fantasma (JOHN, 2000).

Alguns benefícios gerados pela reciclagem na construção civil:

- redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
- redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem;
- redução do consumo de energia durante o processo de produção, e;
- redução da poluição.

3.4 Resíduo de Construção e Demolição

O setor da construção brasileiro apresenta uma significativa taxa de desperdício de materiais, gerando grandes quantidades de resíduos, em obras novas ou demolições, estes resíduos representam em torno de 2/3 (em massa) do total dos resíduos coletados em cidades de médio e de grande porte no País. Foi realizada uma pesquisa com o objetivo de quantificar o desperdício de materiais em uma obra de aproximadamente 3.650 m², tendo-se chegado à conclusão de que 20 % (em massa) do material empregado foi desperdiçado. A pesquisa foi além dos 20 % desperdiçados. Aproximadamente a metade sai da obra na forma de entulho e a outra metade fica incorporada à construção. Para chegar às conclusões o pesquisador comparou a massa estimada da obra com a massa dos materiais adquiridos para a sua construção, este desperdício de materiais leva a um aumento de custo da edificação de aproximadamente 6 % (PINTO,1997).

Segundo PEC (2002), o desperdício de gesso nas construções residenciais na Austrália chega a 12% do volume total da obra, sendo o corte das peças no canteiro de obra o maior responsável por esta quantidade de desperdício.

A imensa maioria dos resíduos gerados, em qualquer localidade, é formada por parcelas recicláveis (PINTO, 1999), sendo uma presença média de 45% de componentes de alvenaria e vedação, 40% de concreto, 8% de madeira, 4% de metal e 3% de papel, plásticos e outros materiais, com o predomínio dos resíduos de procedência mineral na maioria dos países. A tendência mundial é aumento da participação dos resíduos de embalagens de materiais e componentes industrializados, em substituição aos resíduos de natureza mineral.

Dado disponível para a Catalunha indica que a composição desses resíduos em peso é de 75% de madeira, 16% de plásticos, 8% de papel e cartão, e 1% de metais (ITEC, 1995a).

O desperdício pode ocorrer em diferentes fases do processo de uma obra (SOUZA et al., 1998):

- na concepção, quando o projetista não utiliza bem os procedimentos de cálculo e informações sobre materiais, o que leva à indicação de condições inadequadas para os serviços (traços com altos consumos, por exemplo);

- na execução, compreendendo as várias etapas por que o material passa na obra: recepção, estocagem, transporte, manuseio e aplicação e;

- na utilização, quando são necessários serviços de manutenção antes do prazo previsto, por má qualidade do serviço original.

3.5 Gesso como Resíduo

Perdas de materiais em massa detectadas em obras brasileiras são grandes, devido o baixo custo do gesso, seu desperdício é em torno de 30%, sendo 10% maior que os eletrodutos e o dobro que blocos, tijolos e placas de cerâmicas (SOUZA et al., 1998).

Em grande parte dos dados estatísticos não encontramos o gesso relacionado nos itens de resíduo da construção (TCPO, 1996; SOIBELMAN, 1993; PINTO, 1989), estando ele incorporado em outras formas de resíduo, como: alvenaria e reboco.

A contaminação do entulho de gesso pode dar-se por duas maneiras diferentes, a física ou a química. A física ocorre através de produtos necessários para a aplicação do gesso *in loco*: massas para o tratamento das juntas, fitas para reforçar os cantos e reparos de fissuras, fitas de papel Kraft, oxidação de suportes e parafusos (TANIGUTI, 2000), além do papelão no gesso acartonado e gesso de revestimento aderido à alvenaria. O canteiro de obra pode ser um grande contaminador do resíduo, caso não haja planejamento (DEGANI, 2002), através de uma política de triagem e armazenamento adequado (CARDIM, 2003).

A contaminação química pode ser através de manuseio em obra ou aplicação de aditivos. No canteiro de obra, o pó é colocado na água de forma a preencher toda a masseira por igual, sendo necessária uma quantidade de pó que absorva quase toda água da superfície (ANTUNES, 2000). A água precisa ter boa qualidade para não influenciar as propriedades químicas, físicas e mecânicas do gesso, podendo haver contaminação através de substâncias orgânicas, altas concentrações de sulfatos e sais solúveis (LYRA 2001).

Devido às dificuldades em obter informações na bibliografia sobre aditivos utilizados, sua verdadeira composição, fica difícil analisar o comportamento dos resíduos, sendo necessário uma análise em laboratório com amostras de diferentes produtos do gesso: revestimento, blocos, argamassa, gesso acartonado, forro, chapa hidrófoba e resistente a fogo, somente a partir daí é possível qualificar o resíduo para poder respeitar suas propriedades gerando sub-produtos de acordo com as normas (JOHN, 2002).

A reciclagem do entulho da construção civil em sua maioria se torna agregado para confecção de concretos reciclados, sendo o resíduo de gesso um dos materiais mais prejudiciais nesta mistura, podendo levar à ocorrência de expansão no concreto ou argamassa e corrosão de armaduras, devido seu alto teor de sulfatos, em praticamente todas as normas de reciclado são estabelecidos limites rigorosos ao conteúdo de sulfatos (LIMA, 1999).

3.6 Gesso Reciclado

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 analisando o ciclo de vida (ALVES, 2004).

Existem publicações com ensaios de resultados sobre formas de reutilização para diversos segmentos, como (MAVIN, 2000; CIWMB, 2003; CAMPBELL, 2003): corretivo para solo, aditivo para compostagem, forração para animais, absorvente de óleo, controle de odores em estábulos, secagem de lodo de esgoto e papel.

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. Estima-se que entre 10 a 12 % do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção nos EUA (CAMPBELL, 2002).

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 (CAVALHO, 2003), foram obtidas dos resíduos de revestimentos secando e triturando o material. Sabendo que o entulho encontra uma quantidade de água, que torna o resíduo saturado impedindo novas reações de hidratação, o teste foi realizado com base empírica a experiência do gesseiro.

O resíduo de gesso é submetido à secagem em estufa até a constância de massa. Posteriormente 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.

Tijolos de gesso (CAVALHO, 2003) foram produzidos 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, sobra uma quantidade de gesso preparado, que antes do final da pega pode ser reaproveitado. Este resíduo é depositado em uma fôrma para a fabricação de tijolos, o gesso em estado fresco é nivelado e depois de aproximadamente 2 minutos é retirado da fôrma 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.

Empresas de países do primeiro mundo, afirmam utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho (CAMPBELL, 2003), sendo uma tecnologia já comprovada no mercado externo. A necessidade de limpeza do produto, inclusive o próprio papel do gesso acartonado, depois moagem e uma calcinação a baixa temperatura. Além de ser uma tecnologia onerosa é preciso mão-de-obra para limpeza do produto.

Estes modelos de reutilização são válidos para o entulho homogêneo 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).

3.7 Gesso Aditivado

A guerra comercial entre empresas para obtenção de um melhor produto faz com que as fórmulas utilizadas como aditivos sejam segredo, por esse motivo a escassez de bibliografia específica sobre o assunto.

Para comprovar a melhoria do desempenho quanto às características estudadas foram realizados ensaios, que indicaram melhorias nas propriedades mecânicas com a adição de aditivos à base de silicone (GOMES e BORGES, 1997) e a base de amida de graxa e melamina (SELMO, 1997). Esses estudos indicam que com o decorrer dos anos a utilização de aditivos no gesso de construção, será uma prática comum, para que esse material possa concorrer com outros produtos.

As melhorias nas propriedades dos gessos aditivados são bastante atrativas, pois o ganho em desempenho, a curto e médio prazo, é incontestável. Os problemas podem ocorrer após o seu uso, devido a pouca informação do composto utilizado e como estes produtos atuam na microestrutura do material (CASPAR, 1996) dependendo da influência e do grau de contaminação. A presença de aditivos de ação física, dispersante e tensoativos, no gesso, podem gerar modificações no processo de hidratação, aumentando o diâmetro e encurtando os cristais de gipsita (SELMO, 1997).

Os aditivos em sua maioria variam em torno de 0,50% do produto em massa, esta pequena quantidade é devido ao alto custo, inviabilizando sua utilização em grande quantidade. Os podem ser: aceleradores e retardadores da pega, retentores de água, reforçadores de aderência e fluidificantes (PERES, 2001). Quando adicionada alguma carga na emulsão como fibras vegetais, minerais ou poliméricas, lã de vidro, resinas, cria-se um composto, variando em torno de 20% do total (SANTOS, 2003), gerando assim um novo produto.

3.8 Meio Ambiente

A entidade dedicada a promover a modernização da construção civil dos Estados Unidos, Civil Engineering Research Foundation (CERF), realizou uma pesquisa entre 1500 construtores, projetistas e pesquisadores de todo o mundo, sendo a "questão ambiental" a segunda mais importante tendência para o futuro (BERNSTEIN, 1996).

Houve importantes marcos, para a conscientização Ambiental (ALVES, 2004), onde, a partir da conferência de Estocolmo 1972, pela primeira vez introduziu na agenda política

internacional a dimensão ambiental como condicionadora e limitadora do modelo tradicional de crescimento econômico e do uso dos recursos naturais.

Em 1980, Nova York, foi publicado o documento “A Estratégia Mundial para Conservação”, esse documento introduz pela primeira vez o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”.

Em 1987, foi publicado o documento conhecido como “Relatório Brundtland“, conceitua como sustentável o modelo de desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades.

Em 1992, aconteceu talvez o marco mais importante no que diz respeito ao Meio Ambiente e ao Desenvolvimento Sustentável, a Eco 92, sendo produzida a Agenda 21 constituindo um programa a ser implementado ao longo do século XXI, que culmina em um processo de 20 anos de iniciativas e ações de âmbito local, regional e internacional, para deter e reverter a constante degradação dos ecossistemas vitais para a manutenção da vida, bem como alterar as políticas que resultaram em brutais desigualdades entre os países e, no seio das sociedades nacionais, entre as diferentes classes sociais.

A série de normas ISO 14000 de 1996, versa sobre o meio ambiente. São regras internacionais para a administração voltada à diminuição do impacto ambiental, significando o que a organização faz para reduzir ao máximo o impacto de suas atividades ao meio ambiente, durante a produção ou disposição, e ainda a respeito de poluição e esgotamento de fontes de recursos naturais (DEGANI, 2002).

Segundo Degani (2002), a legislação brasileira abrange vários aspectos relativos ao meio ambiente e ligados à atividade de construir, sendo abordados os seguintes documentos:

- *Constituição da República;*
- Código Civil; Lei 3824, de 23 de novembro de 1960 (Dispõe sobre a obrigação de destoca de açudes ou lagos artificiais e dá outras providências);
- Lei 4591, de 16 de dezembro de 1964 (Regulamenta a relação dos condomínios com o meio que está inserido e normativa as construções e demolições);
- Decreto-lei 1413, de 14 de agosto de 1975 (Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocado por atividades industriais);
- Decreto 76389, de 3 de outubro de 1975 (Dispõe sobre as Medidas de Prevenção e Controle da Poluição Industrial);

- *Lei 6938, de 31 de agosto de 1981* (Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus Fins e Mecanismos de Formulação e Aplicação, e dá outras Providências);
- Decreto 88351, de 1 de junho de 1983 (Regulamentou áreas de proteção ambiental, que diferem das demais categorias de unidades de conservação por contornarem os problemas de desapropriação de terras);
- *Lei 7347, de 24 de julho de 1985* (Disciplina a Ação Civil Pública de Responsabilidade Por Danos Causados ao Meio Ambiente, ao Consumidor, a Bens e Direitos de Valor Artístico, Estético, Histórico, Turístico e Paisagístico (Vetado) e dá outras Providências);
- *Lei do Uso e Ocupação do Solo do Município* (regulamenta a relação das construções com o meio em que estão inseridas);
- *Código de Obras do Município*.

A partir de janeiro de 2005, entrou em vigor a lei de responsabilidade do resíduo gerado pela construção civil, CONAMA.

Devido aos sérios problemas ambientais globais, a *Análise do Ciclo de Vida (ACV)* se torna uma importante ferramenta para arquitetos, projetistas, construtores, químicos e engenheiros de materiais, os quais deverão especificar materiais pensando em todo ciclo, com consciência ambiental empregando os recursos naturais e o meio ambiente não apenas e benefício do presente, mas também das gerações futuras. O objetivo final de um estudo de durabilidade é estimar a vida útil, definida como período de tempo durante o qual o produto vai apresentar desempenho satisfatório, nas diferentes condições de uso (CARDIM, 2001).

Entre as principais aplicações de uma análise do ciclo de vida, podemos citar (GUINÉE 1993; HOBBS 1996):

Avaliação da adequação ambiental de uma determinada tecnologia, processo ou produto;

Identificação de possibilidades de melhoria de um processo e/ou produto individualmente, especialmente no que se refere ao uso eficiente de recursos e redução de emissões;

Comparação de alternativas tecnológicas, de processo ou produto diferentes, porém destinadas a uma mesma função;

Geração de informações para os consumidores e o meio técnico que poderão:

Servir de base para rotulagem ambiental;

Facilitar a introdução de um determinado produto no mercado ou, no extremo oposto, sustentar o seu banimento.

3.9 Síntese do Levantamento

Os estudos para diminuir, reutilizar e reciclar o entulho da construção civil estão avançados, tendo como foco principal as questões ambientais. É necessária a melhoria de todo ciclo de vida dos materiais, passando por melhoria na obtenção do produto, mão-de-obra e sua utilização.

Os grandes empecilhos ao estudo de alternativas para a reciclagem de gesso é a falta de informações estatísticas atualizadas sobre este tipo de entulho em construções, demolições e em diversas tipologias construtivas. A utilização do gesso na construção civil vem se diversificando e ganhado mercado como, revestimento, forros e divisórias. Em 1996 consumiu-se 2 milhões de m² de chapas/ano e em 1998 esse consumo foi de 4,5 milhões de m², sendo mais que o dobro em 2 anos (DE LUCA, 1999). Esta tendência de mercado faz com que haja uma política preventiva, sobre o resíduo do gesso.

Os produtores de gesso devido ao baixo custo de extração e jazidas de grandes extensões para exploração (LYRA, 2001), não sentem necessidade ambiental de reciclar, sendo que só a partir da Resolução 307/02 do CONAMA, o entulho foi considerado uma responsabilidade de todos, cada um dando sua contribuição no processo para que os materiais se adequem à referida resolução, porque se não o fizerem esse produto ficará fora do mercado consumidor; a situação já é considerada crítica com o resíduo de gesso sendo considerado material não reciclável, isto é, não possui tecnologia disponível para seu processamento e reciclagem.

O grau de contaminação do entulho de gesso precisa ser mais bem analisado para determinar qual a melhor alternativa para o novo uso, precisando-se da realização de mais pesquisas para se determinar o grau de comprometimento do entulho de gesso, após as contaminações físicas e químicas existentes.

Alguns estudiosos da área de materiais, mas que não possuem trabalhos significativos sobre as condições cinéticas da produção de gesso por desidratação térmica do minério de gipsita afirmam que basta uma redeshidratação para se obter a reciclagem do material. Outros trabalhos, específicos da área de estudos cinéticos (SANTOS, 2003), afirmam que a pressão e a temperatura são parâmetros decisivos na formação de cristais regulares e bem distribuídos, dando origem a um material com características que permitem a reciclagem do gesso beta.

4 MATERIAL E METÓDOS

4.1 Descrição Geral dos Experimentos

O minério de gipsita, ou material de confecção de pré-moldados de gesso hidratado (placas e/ou blocos) é triturado e levado a um forno em escala de laboratório para ser submetido a uma desidratação térmica. A granulometria desse material permite que o mesmo seja desidratado em regime químico em virtude da espessura da camada de sólidos, obtendo-se assim um tempo de reação da ordem de 60 minutos (semelhante à prática industrial), sob pressão de 0,65 atmosferas manométricas, em regime batelada.

O forno foi confeccionado em chapa de cobre de três milímetros de espessura e tem formato cilíndrico. As extremidades do forno, em escala de laboratório, têm tampas de formatos parabólicos (Figura 3.1). A solda entre o corpo e a base do forno é do tipo amarela para se trabalhar com temperaturas de até 500 °C. A pressão no interior do forno é mantida com a retenção de parte do vapor d'água produzido na própria reação, 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 3.2).



Figura 3.1 – Reator utilizado no arranjo experimental para produção de gesso beta sob pressão acima da pressão atmosférica



Figura 3.2 - 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. Testes de massa unitária, água de empastamento, tempo de pega, umidade, dureza e módulo de ruptura à flexão foram realizados para caracterização do gesso produzido.

O material produzido pelo forno a partir do minério de gipsita, após os testes, é novamente triturado e todo o roteiro anteriormente descrito é aplicado ao mesmo para análise de seu segundo ciclo de vida, ou gesso reciclado. Apenas material proveniente de pré-moldados de gesso não retorna ao processo descrito, uma vez que sua passagem pelo forno desenvolvido neste trabalho já se encontra em um segundo ciclo de vida. Os valores das propriedades utilizadas para caracterização são analisados estatisticamente de acordo com métodos adequados (ANEXO 1).

4.2 Concepção do Reator

Na concepção de um equipamento que promovesse a desidratação do minério de gipsita, sob atmosfera manométrica entre os valores de 0 a 1, foram tentadas algumas configurações básicas:

4.2.1 Autoclave

Pensou-se em um autoclave, desses utilizados para esterilização de materiais microbiológico, para ser utilizado na produção de gesso beta sob pressão. Nesses equipamentos a pressão é produzida pela evaporação de água em contato direto do vapor saturado com o minério de gipsita. Contudo, as temperaturas alcançadas pelos vapores não são suficiente para a desidratação do gesso. Neste caso uma pressão manométrica de 0,45 atm corresponde a uma temperatura de 110 °C, insuficiente para a obtenção do semi-hidrato em um tempo comercialmente favorável – 1 hora.

4.2.2 Batelada fechada

Foi estudada a possibilidade de se obter temperaturas suficientes para promover a reação, mantendo-se o reator hermeticamente fechado no interior de uma estufa a 170°C, para isso fez-se a calibração da temperatura interna do reator frente ao aumento da temperatura externa ao mesmo, obtida pelo controle do termostato da estufa. Preliminarmente obteve-se uma curva do tipo temperatura do reator versus temperatura da estufa, com o reator sem carga (minério de gipsita). Em seguida as temperaturas externas foram correlacionadas com as pressões internas do reator.

Com o reator operando em forno de batelada fechado não se conseguia controlar a pressão no interior do reator a ponto de se obter, temperatura de reação entre 140°C e 180°C e pressão abaixo de 1 atm. Neste caso, a elevação de pressões é provocada pelo aumento de temperatura a volume constante, o que pode ser previsto com o auxílio da lei dos gases perfeitos (SONTNTAG; BORGNAKKE, 2003).

Alem do aumento de pressão em função do aumento de temperatura, existe uma condição adicional para provocar um aumento ainda, maior na temperatura, é a liberação de água de cristalização da gipsita, transformada em vapor.

4.2.3 Reator batelada com alívio manual

Para obtenção de um gesso abaixo de 1 atm pensou-se na estratégia de manter o reator com alívio para o vapor, utilizando-se válvula do tipo esfera aberta (Figura 3.3). Neste tipo de arranjo experimental a pressão obtida no interior do reator ultrapassou de 2 atm, sendo descartada esta hipótese, por não haver condições de controlar com precisão adequada a pressão interna do forno.



Figura 3.3 - Forno com válvula de alívio manual

4.2.4 Reator com alívio automático

A forma atual do reator batelada de calcinação de gipsita com temperatura e pressão controladas, resultou das observações e tentativas experimentais anteriores. Tomando-se o princípio de funcionamento de um autoclave como base fez-se a substituição da fonte de calor deste último, obtido pela evaporação de água em contato direto com o minério de gipsita, pelo calor externo ao reator, produzido por uma estufa com controle digital de temperatura. Dessa forma a temperatura pode ser controlada pelo termostato da estufa, com base em valores correspondentes entre as temperaturas internas e externas do reator, nas condições de operação atuais.

A baixa concentração de vapor de água no interior da estufa é, conseqüentemente, a pressão atmosférica mantida externa ao reator de desidratação, permite que todo vapor de água excedente e motivado pela liberação da água de cristalização da gipsita seja liberada do reator através da válvula de alívio.

Para aumentar ou reduzir a pressão interna ao reator, a haste da válvula que mantém sob pressão um pino que libera os vapores excedentes, responsáveis pelo aumento de pressão no interior do reator tem sua posição calibrada. Essa calibração é possível fazendo-se com o que pode deslizar ao longo do comprimento axial da haste seja movimentado e fixado em uma

posição conveniente. Como a haste possui sua superfície externa em forma de parafuso, os passos internos ao corpo em forma de bolacha cilíndrica permitem um ajuste consideravelmente preciso e pressão no interior do reator (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Mecanismo de ajuste automático da pressão

4.3 Concepção do Arranjo Experimental

Reatores do tipo batelada são estruturas preferidas para a realização de experimentos envolvendo elevados valores de conversão. Outra característica deste tipo de reator é a produção em pequena escala. Como era de interesse do presente trabalho a produção de pequenas quantidades de gesso com altos valores de conversão, um reator batelada foi o tipo de equipamento escolhido como estrutura principal do arranjo experimental.

Um tanque cilíndrico com tampa de 0,19 m de diâmetro por 0,30 m de altura caracteriza o reator utilizado para produção de gesso beta neste trabalho sob pressão entre 0 e 1 atmosfera manométrica. o material de confecção do reator é cobre.

A tampa e a base do reator têm formatos de calotas esféricas. A base é soldada ao corpo do reator por meio de solda amarela. A tampa do equipamento fecha o mesmo com o auxílio de parafusos de porcas do tipo borboleta. A hermeticidade do sistema é conseguida por meio de uma junta do tipo “o-ring” de 0,1902 m de diâmetro por 0,0055 m de espessura. A referida junta é confeccionada de borracha especial (Viton) material com estabilidade

térmica para suportar temperaturas de até 350°C por um período de até 30 minutos e de 250°C de forma permanente.

No topo da tampa do reator existe um condutor para comunicação da parte interna para o exterior. Uma conexão do tipo “T” te permite a instalação na tampa do reator de duas válvulas. Uma do tipo esfera, a qual permite a despressurização do sistema de forma rápida, este equipamento também tem a função de garantir a hermeticidade do conjunto experimental através da colocação de nitrogênio no interior do autoclave e conferência da ocorrência de vazamento através de espuma (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Teste de hermeticidade do arranjo experimental

A outra válvula utilizada é do “tipo alívio” que permite graduação de uma haste para que a pressão no interior do reator seja mantida abaixo de um valor pré-determinado. O reator tem capacidade para produção de 1,2 kg de gesso beta. O minério de gipsita triturado a uma granulometria conveniente foi distribuído em doze bandejas com capacidade para 0,1 kg cada, formando leitos de sólidos compactados com 0,005 m de altura. As bandejas são confeccionadas em alumínio e são arrumadas no interior do reator, uma acima da outra, com auxílio de espaçadores em arame de aço de 0,0014 m de diâmetro.

Foram realizados alguns testes para determinação da temperatura e do tempo de reação, associada à quantidade de material de carga do reator e a altura do leito de sólidos em cada bandeja. Inicialmente fixou-se a quantidade de gipsita em 0,2 kg, operando-se o reator a 140°C com um tempo de operação de 1 hora. Com a obtenção de baixa conversão da ordem

de 10%, passou-se a reduzir a altura do leito compactado de gipsita, chegando-se a uma altura de 0,005 m com uma conversão da ordem de 14%.

Com uma carga de 100g e tempo de reação de 1 hora à 200°C, precisava-se aumentar o número de bandeja para se obter em cada batelada uma produção considerável de gesso. Foi então confeccionada uma estrutura que pudesse permitir o processamento de um número maior de bandejas e aumentar a produção de gesso por batelada. A estrutura de sustentação de múltiplas bandejas foi concebida através da confecção de espaçadores de arame nº 14, as quais, em números de onze, permitem o processamento de 1,2 kg de gipsita (Figura 3.6). Cada espaçador tem forma triangular, podendo ser intercaldos às bandejas, permitindo o processamento simultâneo do conteúdo de doze bandejas.



Figura 3.6 - Bandejas do forno batelada em escala de laboratório

Todo o conjunto, reator fechado e carga, são armazenados no interior de uma estufa com controle digital de temperatura. Ao ligar a estufa com capacidade para produzir uma temperatura interna máxima de 300 °C cede-se calor ao reator, ou forno, o suficiente para elevar a temperatura interna do mesmo a um valor capaz de desidratar totalmente a carga de gipsita, para obtenção do gesso beta, sob condição de pressão pré-definida.

O valor produzido pela desidratação do minério de gipsita, que compõe a carga do reator, tem a quantidade em excesso, em relação à necessária para manutenção da pressão desejada no sistema, expulsa do interior do reator, através da válvula de alívio. A cada

batelada de gesso produzida haste da referida válvula é mantida na posição anterior ou regulada conforme a necessidade de trabalhar em outro nível de pressão.

Para se manter condições reprodutivas de trabalho, cada nova batelada é iniciada à mesma temperatura inicial, cerca de 28°C, temperatura ambiente do Laboratório de Processos da Engenharia do Departamento de Química e Meio Ambiente da UNICAP.

4.4 Produção de Gesso Beta a Pressões Acima da Atmosfera

Ao ser aquecido o minério de gipsita perde água de cristalização em quantidade considerável a partir de 120° aproximadamente. Quando realizada sob pressões abaixo de 1 atm manométrica, o gesso obtido recebe o nome de gesso beta.

O gesso alfa apresenta-se com características diferentes das do gesso beta, como, o beta tem maior energia livre e maior solubilidade que o alfa, o que leva a propriedades diferentes da gipsita reformada pela re-hidratação. Em outras palavras não é simples a diferenciação experimental entre os dois tipos de gesso, especialmente quando não se tem amostras para referência de ambos. As densidades reais em xileno (alfa = 2,75 g/cm³ ; beta = 2,60 g/cm³) poderiam ser usados para diferenciação entre as duas formas; os difratogramas de raios-X são idênticos. As partículas (cristas) do semi-hidrato alfa são prismáticas e as partículas (cristais) do semi-hidrato beta são irregulares e porosos; *segundo Skinner (1978)*, o gesso alfa precisa de menos água do que o beta para ser trabalhado em seus cristais praticamente não desagregam quando colocados em água; o gesso alfa produz peças (de gipsita após re-hidratação) de maior densidade aparente e de maior resistência mecânica à compressão do que as peças a partir do gesso beta; a quantidade de água em excesso, a ser removida das peças é, portanto, menor no gesso alfa. Gesso vem sendo usado em odontologia desde de 1756 para fazer moldes (dental casts) e em uma outra forma (dental impression) desde 1844.

Após um número considerável de recentes estudos utilizando técnicas como as difrações de nêutrons e de raios-X (FOLLNER et al, 2002), as duas formas, alfa e beta, com as quais o semi-hidratado do sulfato de cálcio apresenta-se, dependendo do tipo de processo com o qual foram obtidas, tiveram essas condições de obtenção estabelecidas diferentemente daquelas estabelecidas anteriormente. A forma alfa é produzida pela desidratação do minério de gipsita em uma suspensão aquosa ácida ou, hidrotermicamente, na presença de eletrólitos. A forma beta é produzida pela desidratação da gipsita em atmosfera de vapor d'água e a temperaturas acima de 100°C (FOLLNER et al, 2000).

A justificativa para o comportamento, ou propriedades distintas entre os tipos de gesso alfa e beta é atribuída à forma com que a água de cristalização abandona os cristais de gipsita para dar origem aos cristais de gesso.

Por analogia ao comportamento de uma peça cerâmica submetida a um processo de secagem, procura-se explicar a qualidade dos cristais de gesso alfa e beta obtidos. Quando uma peça cerâmica recém-moldado é levada à secagem sob um elevado gradiente de temperatura, em geral, aparecem rachaduras na superfície da referida peça, motivados por uma saída brusca da água de constituição da massa cerâmica. Para evitar tal comportamento danoso para a peça cerâmica, ela é submetida a um processo de secagem preliminar, caracterizado por um reduzido gradiente de temperatura. Isto induz a uma saída lenta e ordenada da água de constituição do interior da peça evitando-se o aparecimento de rachaduras na superfície da peça.

Industrialmente, a maioria dos fornos de produção de gesso beta opera sob pressão manométrica muito próxima de zero, isto é, operam praticamente a pressão ambiente. Como consequência, o gradiente de temperatura estabelecido entre o interior e a superfície do grão de gipsita pode ser responsável por uma saída brusca da água de cristalização do minério de gipsita. Nessa ótica de descrição do mecanismo de desidratação do minério de gipsita, para obtenção do gesso beta, é que se observa o quanto se espera que o valor da pressão nas vizinhanças do grão de gipsita possa interferir na forma de saída da água do interior do grão. Espera-se que pressões acima da pressão atmosférica possam ser utilizadas para controlar a saída da água, aproximando as características do gesso beta às de um gesso alfa, sem onerar de forma considerável, o processo de obtenção do gesso beta.

A metodologia utilizada para identificar que tipo de gesso beta permite a reciclagem, isto é, a obtenção de um gesso reciclado, foi a caracterização do material produzido no primeiro e segundo ciclos de vida do mesmo. Dessa forma foram comparadas as propriedades de três tipos de gessos em seus dois ciclos de vida:

Gesso Beta sob Pressão/ 1º ciclo de vida – gesso produzido da desidratação térmica da gipsita, em condições adequadas de temperatura (200°C) e sob pressão de 0,6 atmosferas manométricas.

Gesso Convencional Reutilizado sob Pressão – gesso convencional produzido da desidratação térmica a pressões muito próximas da pressão atmosférica, placas e/ou blocos divisórias, existentes no comércio. O material passou por todo um processo de pulverização e

desidratação térmica, em condições adequadas de temperatura (200°C) e sob pressão de 0,6 atmosferas manométricas.

Gesso Beta sob Pressão/ 2º ciclo de vida – o resíduo do Gesso Beta sob Pressão/ 1º ciclo de vida foi pulverizado e passou por um processo de desidratação térmica, em condições adequadas de temperatura (200°C) e sob pressão de 0,6 atmosferas manométricas.

Foram então determinadas e comparadas as propriedades dos tipos de gesso citados anteriormente, todos, respectivamente, nos seus ciclos de vida correspondentes.

4.5 Ajustes das Condições Experimentais

4.5.1 Condições de temperatura e pressão

Ao ser aquecido o minério de gipsita libera água de cristalização em forma de vapor, em função da temperatura, a qual é suficiente para evaporar o referido líquido. Esse vapor produzido, em um ambiente fechado, tende a elevar a pressão do forno. Isto acontecendo, a pressão do equipamento tende a aumentar continuamente durante todo transcorrer da reação, dificultando o controle das condições cinéticas em função desse aumento contínuo da pressão e, conseqüentemente, da temperatura.

Com a instalação de uma válvula de alívio no forno desidratador do arranjo experimental, tanto a pressão quanto a temperatura da reação ficaram submetidas ao mesmo mecanismo de controle, uma vez que a temperatura externa (controlada pelo termostato da estufa) é mantida constante. A temperatura no interior do forno desidratador é função da pressão e, caso só exista vapor d'água pela expulsão do ar no interior do forno, a equação de estado dos gases (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000) permite que se possa estimar essa temperatura:

$$T = \frac{P \cdot V \cdot PM}{z \cdot m \cdot R} \quad (3.1)$$

Em que:

T = temperatura absoluta do forno, K.

P = pressão absoluta no forno, N/m²

PM = massa molecular do vapor d'água, kg/mol

m = massa de vapor d'água, Kg

R = Constante dos gases, 8,314 N.m/mol.K.

Z = Fator de compressibilidade, -

Uma vez que a válvula de alívio foi regulada para fazer o descarte automático do excesso de vapor e manter a pressão manométrica em 0,65 atmosferas, para um tempo de 60 minutos na obtenção de uma conversão em torno de 98%, o valor da temperatura no interior do forno, ao se estabilizar as condições de reação (T e P constantes), poderia ser estimada, com base nas seguintes suposições:

- Os volumes dos suportes entre as bandejas foram desprezados;
- Considerou-se que apenas o vapor d'água compunha a atmosfera do reator e;
- O fator de compressibilidade foi estimado com auxílio de um programa computacional em linguagem Matlab apresentado no Anexo 2.

Os dados que poderiam ser utilizados para cálculo da temperatura são apresentados na Tabela 3.1. Contudo, o valor do fator de compressibilidade mostra que nas referidas condições o vapor d'água tem um comportamento muito próximo ao de um gás ideal, ou seja, pode ser descrito pela Equação (3.2).

Tabela 4-1 Parâmetros físico-químico utilizados no cálculo da temperatura de reação

Parâmetro	Valor	Unidade
Volume do forno	0,001	m ³
Carga de gipsita	1,2	Kg
Volume de carga do forno	1,5 x 10 ⁻³	m ³
Volume ocupado pelas bandejas	0,0008	m ³
Fator de compressibilidade médio do vapor d'água	0,991	-
Volume ocupado pelo vapor d'água	0,013	m ³
Pressão de reação	1,65 x 10 ⁵	N/m ²
Temperatura crítica do gás	647	K
Pressão crítica do gás	2,21 x 10 ⁻⁷	N/m ²

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} \quad (3.2)$$

Em que:

P, V e T = pressão, volume e temperatura interior ao forno, respectivamente.

0 e 1 = subscritos que representam condições iniciais e de reação no interior do forno, respectivamente.

Dessa forma, tomando como base que os volumes iniciais e finais de reação são iguais. Que as pressões absolutas iniciais e finais, em atmosferas são respectivamente 1 e 1,65, e que a temperatura ambiente, isto é, inicial do forno é de 30 °C, ou de 300 K, uma estimativa aceitável para a temperatura de reação pode ser dada pela equação:

$$T_1 = T_0 \frac{P_1}{P_0} \quad (3.3)$$

Ou seja, substituindo os valores apresentados anteriormente, chega-se a uma temperatura da ordem de 495 K, o que corresponde a 222 °C. Dessa forma a estufa foi regulada para fornecer um valor de temperatura que mantivesse a temperatura no interior do forno a um valor em torno de 222 °C. Isto foi possível monitorando-se a temperatura ds estufa e a temperatura interna do forno com auxílio de termopares. As temperaturas em uma faixa de valores entre 30°C e 300 °C mantiveram uma relação linear, o que permitiu estabelecer uma calibração entre as temperaturas interna do forno e externa (estufa) ao mesmo.

4.5.2 Relação água/gesso

Para determinação da relação água/gesso na fabricação de corpos de prova para os testes de dureza, com gesso do tipo beta sob pressão a partir do minério de gipsita, foi utilizado um método empírico onde a primeira proporção foi a mais utilizada nos canteiros de obras, água/gesso igual a 0,7; sendo reduzida posteriormente para 0,6 e 0,5.

Após a produção dos corpos-de-prova foram esperadas as pegadas dos mesmos dentro das formas. Foram notados um excessos de água nos interiores das formas com corpos-de-prova de relações água/gesso igual a 0,7 e 0,6; havendo uma sedimentação do componente

sólido da mistura. No caso da relação água/gesso de 0,5 não foi notado este fenômeno (Figura 3.7).

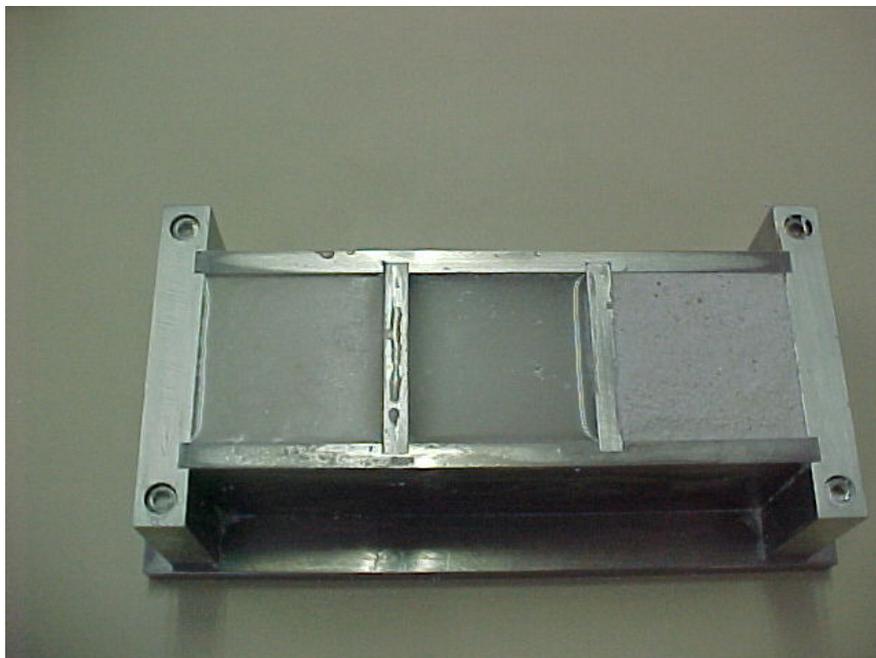


Figura 3.7 - Vista superior do arranjo para confecção de corpos-de-prova com gessos beta sob pressão e a diferentes relações água/gesso

Após 30 minutos da moldagem dos corpos-de-prova, foram retirados os excessos de água e desmoldou-se os referidos corpos, percebendo-se que havia quantidades de água em excesso nos gessos produzidos com relações água/gesso de 0,7 e 0,6. Uma vista frontal dos corpos de prova mostrada pela Figura (3.8) ilustra os efeitos causados pelos excessos de água nos gessos dos corpos de prova.



Figura 3.8 - Vista frontal corpos-de-prova desmoldados, confeccionados a partir de diferentes relações água/gesso

4.6 Confeções dos Corpos-de-prova

4.6.1 Obtenção da Matéria-Prima

Foram utilizadas dois tipos inicialmente de matéria prima para a confecção dos corpos-de-prova, e em um segundo momento o resíduo deste materiais foram reutilizados, havendo uma nova fase de moldagem dos matérias para os testes.

A gipista foi obtida do Pólo Gesseiro do Araripe, através da Supergesso Industria e Comercio LTDA, distrito industrial de Araripina – Pernambuco, segundo padrões de extração, granulometria, armazenamento e transporte.

O gesso para ser reciclado foi obtido através de placas de 500 mm x 500 mm, compradas no comercio local. Através de um esforço mecânico aplicado às placas (Figura 3.9) as mesmas foram reduzidas a tamanhos de cerca de 15 cm de comprimento por 5 cm de largura.

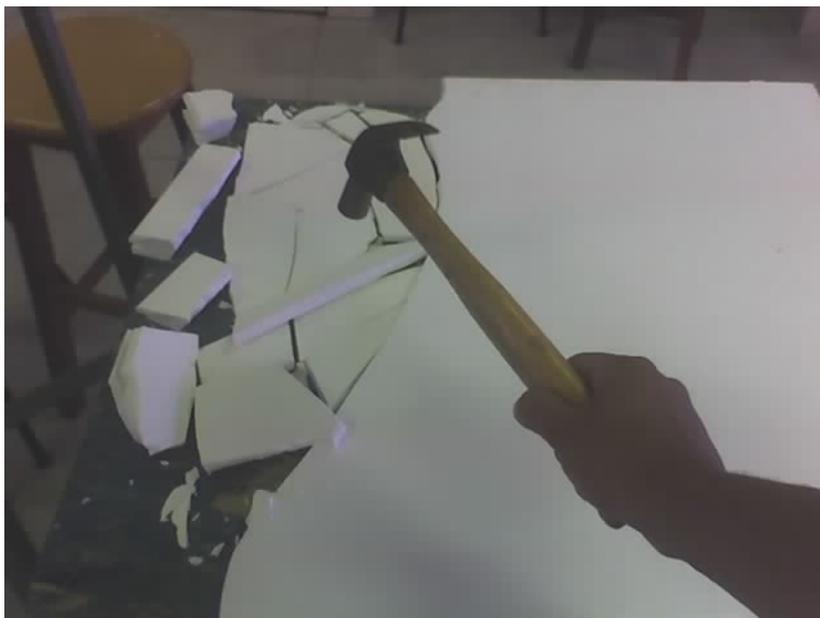


Figura 3.9 - Fragmentação das placas de gesso

A segunda etapa é a diminuição dos pedaços através do moinho de mandíbula (Figura 3.10), deixando o material com medidas inferiores a 25mm. A terceira etapa é a pulverização do material, através do moinho de disco (Figura 3.11), o material passou pela peneira 850mm com auxílio de um pincel e força mecânica, para padronizar o tamanho máximo dos grãos. Todo material depois de peneirado passou por um processo de decantação em recipiente adequado de, no mínimo, dois dias para uma melhor homogeneização, sendo este processo conhecido como estabilização.



Figura 3.10 - Moinho tipo mandíbula



Figura 3.11 - Moinho a disco

Todo material antes de ser utilizado passou por um processo de quarteamento para uma melhor homogeneização das partículas, esta etapa é necessária para a retirada de grãos fora do padrão ou materiais incorporados ao produto em qualquer momento do processo. Após esta etapa a gipsita e o gesso reutilizado passaram por um processo de pesagem e calcinação sob pressão.

4.6.2 Procedimento de Preparo das Pastas de Gesso

O preparo da pasta de gesso neste experimento seguiu os padrões adotados pela NBR 12128 (ABNT, 1991).

A pasta foi preparada utilizando-se um recipiente impermeável, de material não oxidante, limpo, isento de vestígios de gesso endurecido. Uma quantidade de água limpa e potável variando de 50% a 95% da massa de gesso. Após a medição da quantidade gipsita, gesso re-desidratado e água, iniciou-se o processo de fabricação da pasta de gesso para moldar os corpos-de-prova.

Foi colocada a massa de gesso pulverizando-a durante 1 minuto sobre a superfície da água, de modo a uniformizar sua hidratação. A quantidade de pó utilizada é a necessária para que praticamente toda quantidade de água da superfície seja absorvida pelo pó. Seguindo um período de descanso em torno de 2 minutos, para a dissolução do hemidrato, após esta etapa foi feita a mistura da pasta por mais 1 minuto, atingindo a consistência mínima (ATUNES *et al.*, 1999). para começar a moldagem dos corpos-de-prova

Nestes ensaios foram utilizados corpos de prova cúbicos de aresta igual a 50 mm seguindo ABNT (MB-3470) (Figura 3.12). e na moldagem dos corpos de prova foi utilizado estireno como desmoldante, tendo como tempo limite para esta etapa em torno de 2 minutos.



Figura 4.4.1 - Formas utilizadas nas confecções dos corpos-de-prova de ensaios de dureza

Logo após a mistura foram moldados os corpos de prova e através de uma força mecânica na lateral da forma para evitar o aprisionamento de ar no interior pasta de gesso. Depois de 30 minutos, o gesso se hidrata quase que completamente (STAV; BENTUR, 1995) tornando-se sólido e não existindo aderência mesmo que seja adicionada água, podendo desinformar o experimento.

4.7 Testes de Caracterização dos Gessos

4.7.1 Massa Unitária

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 2.13).

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 ± 20) cm³ ou um litro.



Figura 4.4.2 - Aparelho para determinação da massa unitária

Calcula-se a massa unitária aplicando a seguinte equação;

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

Em que:

Mu = massa unitária, Kg/m³

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.

4.7.2 Ensaio de umidade e água de cristalização

Para determinação da água de cristalização retida no gesso foi utilizado um analisador de umidade por infravermelho *GEHAKA IV 200* (Figura 3.14).

Para análise da umidade é colocado uma quantidade de material no interior do equipamento sendo impresso em uma impressora acoplada ao analisador o resultado a cada 1

minuto, o resultado é dado em massa. O procedimento é o mesmo para os ensaios de umidade e água de cristalização sendo necessário para o ensaio de 30 minutos com temperatura de 50°C e 190°C respectivamente.

No cálculo da conversão do material de alimentação do forno do arranjo experimental desse trabalho (gesso convencional desidratado, minério de gipsita ou gesso beta sob pressão) foi utilizado um programa computacional em linguagem Matlab. Os dados de entrada do programa são: a composição química do material alimentado no reator, a umidade residual e a água de hidratação do mesmo. O programa elaborado por Santos (1996) utiliza as diferentes combinações do teor de água e composição química da amostra, para buscar por métodos matemáticos interativos, o valor da conversão sofrida pelo sulfato de cálcio di-hidratado presente na referida amostra.



Figura 4.4.3 - Analisador de umidade por técnica de radiação por infra-vermelho

4.7.3 Determinação dos tempos de início e fim de pega

Para este ensaio do tempo de pega foi adotado o método de espátula proposto pela norma alemã DIN 1168 (1975). Esse método foi selecionado em razão da sua simplicidade, não necessitando de equipamentos mais elaborados. Consiste em moldar uma “bolacha” de pasta com cerca de 5 mm de espessura e 100 mm de diâmetro. Utilizando-se uma espátula reta faz-se cortes na “bolacha” (Figura 3.15).

O Início de pega é o momento em que o corte aberto pela espátula não mais se fecha. O Final de pega é determinado como o momento em que o dedo, quando pressionado sobre a bolacha, não mais deixa impressões sobre a mesma.

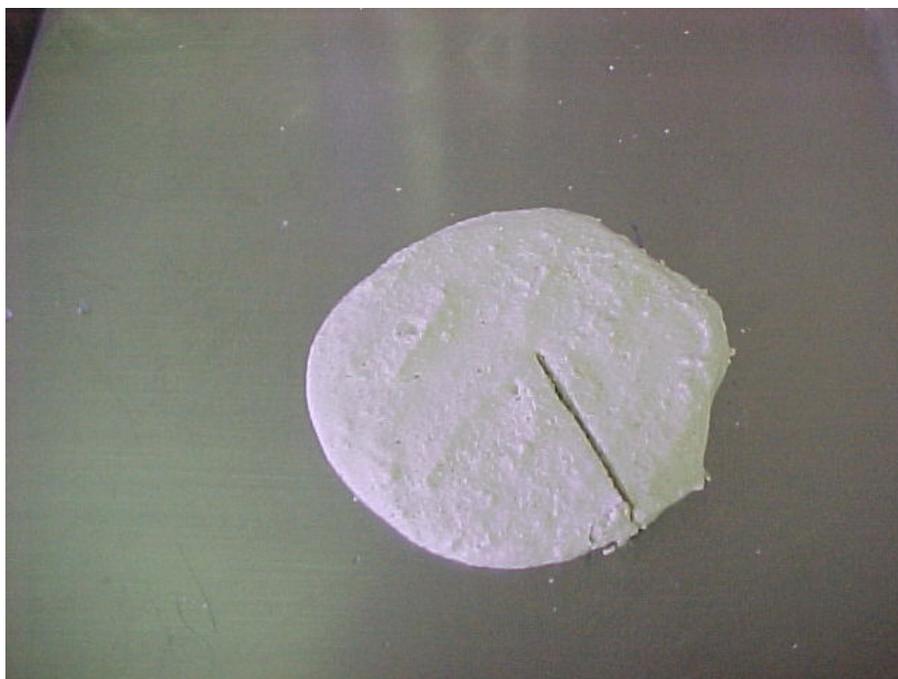


Figura 4.4.4 - Bolacha para determinação do tempo de pega

4.7.4 Resistência à abrasão

Para este ensaio foi utilizado um durômetro *GS709 Shore C (Woltest)* (Figura 3.16), 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/mm².

Foi realizado 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.

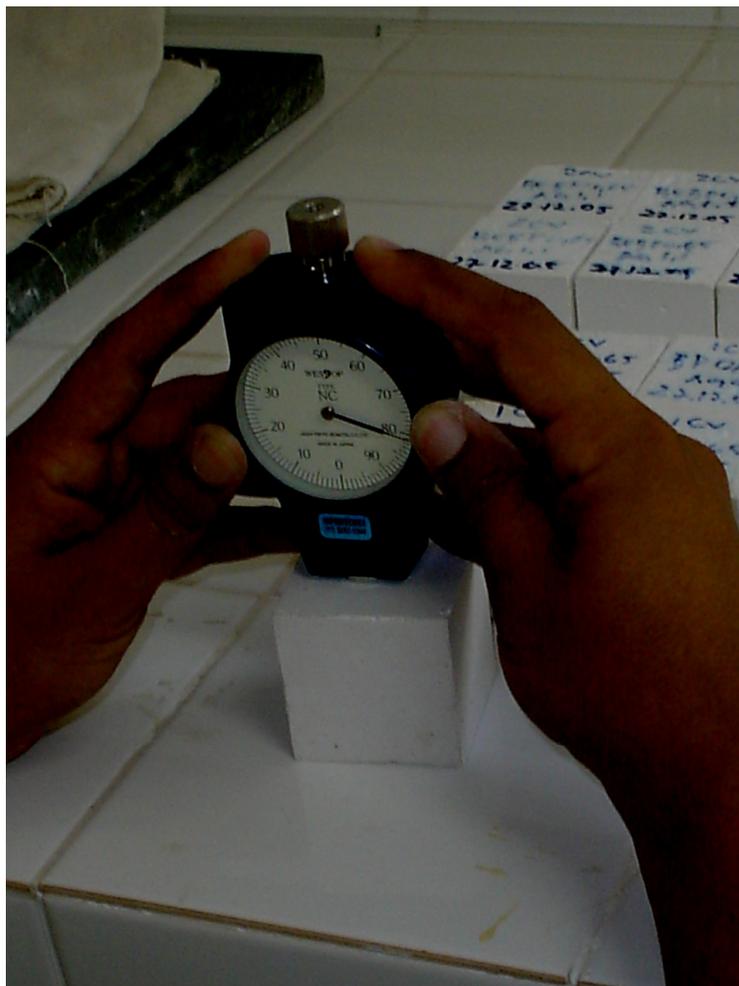


Figura 4.4.5 - Durômetro.

4.7.5 Resistência à compressão

A resistência à compressão é calculada em função da carga de ruptura em corpos-de-prova segundo os procedimentos vigente na norma ABNT (MB-3470). A prensa utilizada para execução do ensaio está dentro dos padrões mínimos exigidos pela norma.

Seguindo os padrões normalizados pela ABNT, foram aproveitados os mesmos corpos-de-prova do ensaio de dureza, sendo utilizado as faces que foram preservadas.

O procedimento para determinar a resistência à compressão foi seguido os padrões, onde a carga aplicada à face do corpo-de-prova foi numa razão de 250N/s a 750N/s até a ruptura dos mesmos. O valor da resistência à compressão é dado pela relação entre a carga aplicada e a área da seção transversal resistente do corpo de prova. A resistência média dos três corpos-de-prova foi considerada como o valor da resistência à compressão, não havendo discrepância no valor individual dos resultados.

O valor da resistência à compressão é dado pela Equação (3.5):

$$R = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

Sendo,

R = Resistência à compressão (MPa)

P = Carga que produziu a ruptura do corpo-de-prova, em N.

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

4.7.6 Resistência à flexão

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 3.17). 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

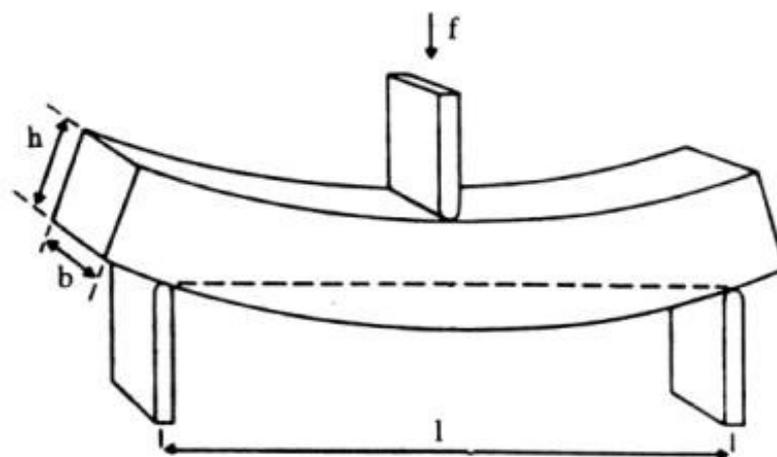


Figura 4.4.6 - Esquema adotado pelo método para medir a resistência à flexão de uma barra

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Conversão do Gesso Beta Sob Pressão

Amostras dos gessos produzidos no reator batelada com alívio automático, submetidas a determinação da conversão do processo de desidratação tiveram essa conversão calculada com auxílio de um programa computacional em linguagem Matlab (SANTOS, 1996), apresentado pelo Anexo 3. Valores da umidade das amostras (ANEXO 4), obtidos por técnica de infravermelho, durante 30 minutos, cada teste, foram introduzidos no programa que calcula a água de cristalização a partir de valores percentuais dos constituintes químicos que compõem o material que serve de carga para o forno, ou reator de desidratação. Foi observada uma baixa dispersão dos dados ($< 1\%$) nos testes realizados com amostras de um mesmo material. A Tabela 5.1 resume os valores médios de conversão da gipsita e para o gesso reciclado nos processos de obtenção utilizados.

Tabela 5-1 - Valores de conversão dos gessos produzidos calculados com auxílio de um programa computacional em Matlab

Material Analisado	Umidade (%)	Conversão (%)
Gesso beta sob pressão (1º ciclo de vida)	0,37	98,0
Gesso convencional reciclado sob pressão	0,95	98,5
Gesso beta sob pressão (2º ciclo de vida)	0,38	98,3
Gesso beta sob pressão (3º ciclo de vida)	0,74	98,4

Ainda com auxílio do aparelho de infravermelho foram realizados testes para determinação de umidade nas amostras, como apresenta a Tabela 4.1. Nesse caso, nota-se uma significativa diferença entre a umidade detectada no gesso beta sob pressão, em ambos os ciclos de vida, e o gesso produzido a partir do material obtido do gesso convencional. É que o gesso convencional deve apresentar uma maior área específica, motivada pela má formação dos cristais e, possivelmente, o esfacelamento do mesmo, quando da saída desordenada da

água de cristalização durante o primeiro processo de desidratação ao qual o minério de gipsita foi submetido.

5.2 Caracterizações dos Materiais dos Corpos de Prova

5.2.1 Massa unitária

A relação entre a massa não compactada de gesso e o volume conhecido de um recipiente recebe a denominação de massa unitária. Basicamente essa propriedade do gesso dá informações acerca do arranjo de cristais na massa de gesso, isto é, cristais mais bem formados dão origem a valores maiores de massa unitária maiores. A Figura 5.1 apresenta um gráfico do tipo barras com valores de massas unitárias determinadas nos gessos produzidos no reator batelada do arranjo experimental deste trabalho (ANEXO 4).

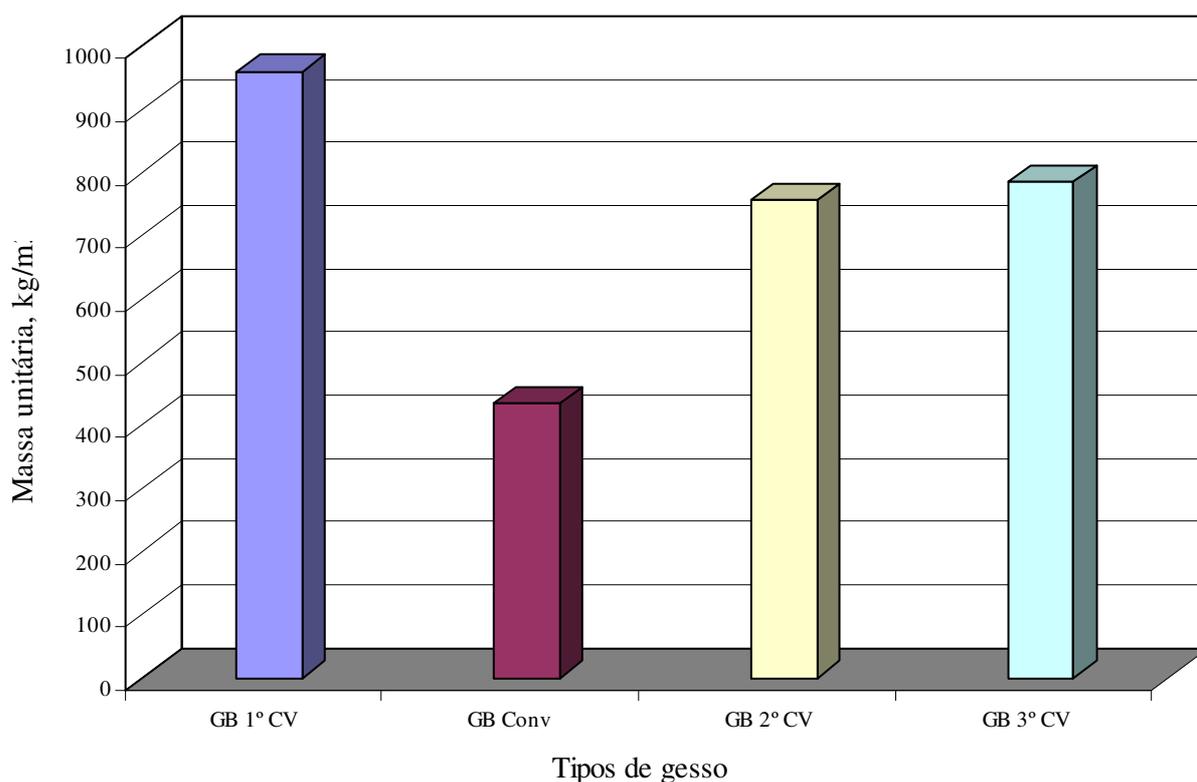


Figura 5.1 - Valores de massa unitária para os diferentes tipos de gesso produzidos

Os valores apresentados na Figura 5.1 indicam, como se esperava, um menor valor da massa unitária para gessos originariamente calcinados a pressões muito próximas da pressão atmosférica. Mesmo redesidratados sob pressão acima da atmosférica a estrutura inicial de cristais esfacelados parece ter predominância, isto é, os cristais deformados pela saída abrupta de água durante o processo de desidratação. A massa de cristais deve por isso apresentar maiores porosidades inter- e intra-cristalina. Uma razão de três vezes maior a massa unitária dos gessos produzidos originalmente sob pressão demonstra a importância desse tipo de condução para o processo, além de um valor esperado ou exigido pela norma para essa propriedade física de um gesso de construção civil (NBR 12127), ser da ordem de $\geq 700 \text{ kg/m}^3$.

5.2.2 Dureza

A dureza mede a resistência à penetração, ou ao risco. O aumento das forças coesivas intermacromoleculares resulta em acréscimo na dureza do material. O critério para utilização de um tipo de gesso está na dependência de seu uso e, como consequência, das propriedades físicas que esta indicação em particular irá exigir. Por exemplo, se é necessário uma peça resistente, não seria correto utilizar-se um gesso que não tenha dureza suficiente, como exige a norma NBR 12129. O aumento da dureza em um gesso é o resultado de cristais bem formados, alinhados e de baixas porosidades inter- e intra-cristalina. A dureza de gessos fabricados para atenderem às especificações da Construção Civil deve atingir valores maiores ou igual a 30 N/mm^2 . A Figura 5.2 apresenta valores de dureza medidos nos corpos de prova confeccionados com gessos produzidos em processos sob pressão acima da pressão atmosférica (ANEXO 4).

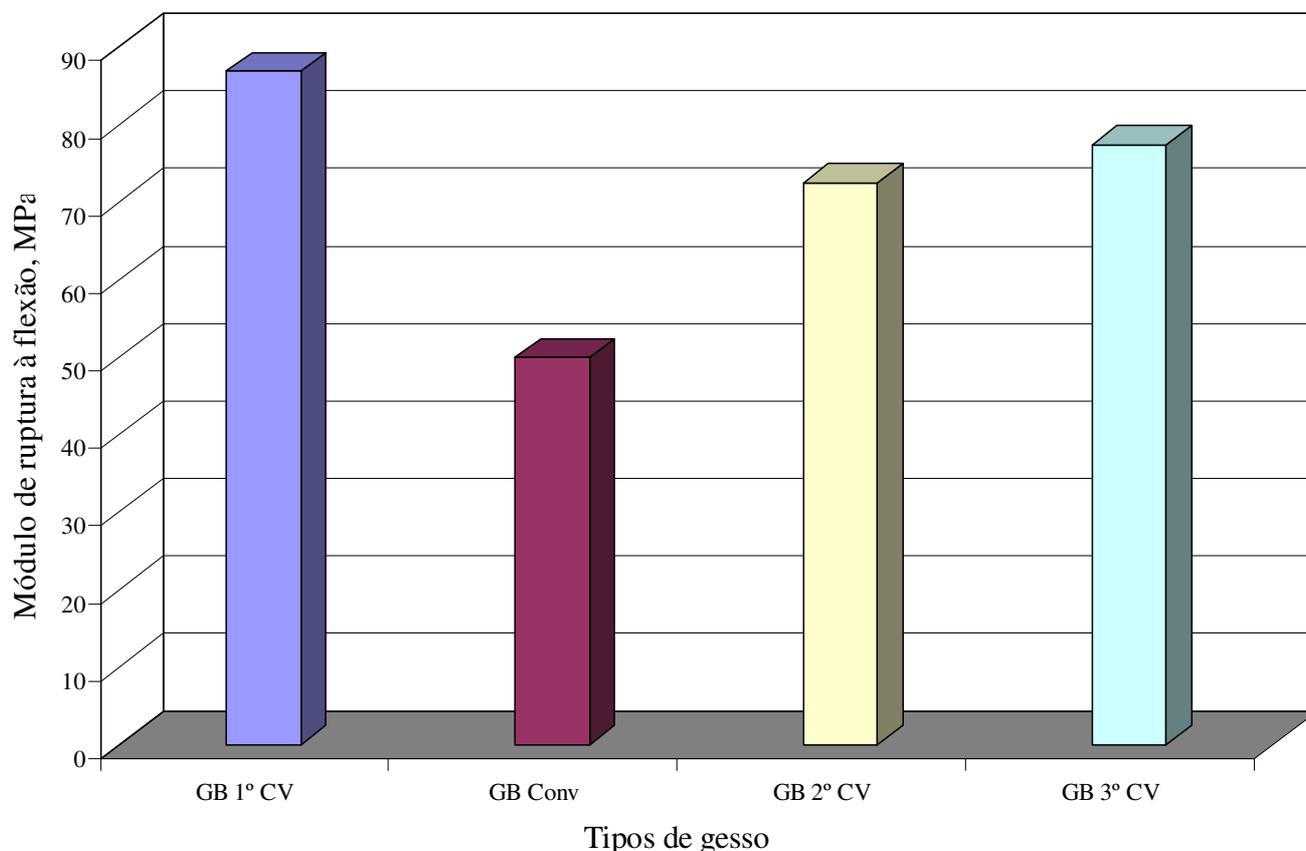


Figura 5.2 Valores de dureza para diferentes tipos de gesso produzidos

Os valores de dureza superficial apresentados pela Figura 5.2 reiteram as características anteriores mostradas pelos gessos produzidos sobre pressão de 0,6 atmosferas acima da pressão atmosférica. Novamente o gesso de onde se espera que se tenha formado cristais não esfacelados alcança valores bem superiores de propriedades que demonstram uma maior resistência mecânica. A dureza apresentada por um gesso que foi originalmente produzido nessas condições, isto é, com uma pressão de vapor d'água mantendo a saída ordenada da água combinada, dos cristais, é praticamente duas vezes a de um gesso que originalmente foi produzido com a saída de água de forma desordenada.

5.2.3 Tensão de Ruptura à flexão

Por se encontrar em muitas de suas aplicações, submetidos a situações onde a resistência à flexão é uma propriedade importante (placas divisórias e revestimento de teto), o gesso tem limites determinados pela NBR 13207 definidos para esta propriedade mecânica. Valores iguais ou maiores a 4 MPa são aceitos como recomendáveis. A Figura 5.3 apresenta valores dessa tensão de ruptura à flexão relativos aos gessos produzidos neste trabalho (ANEXO 4).

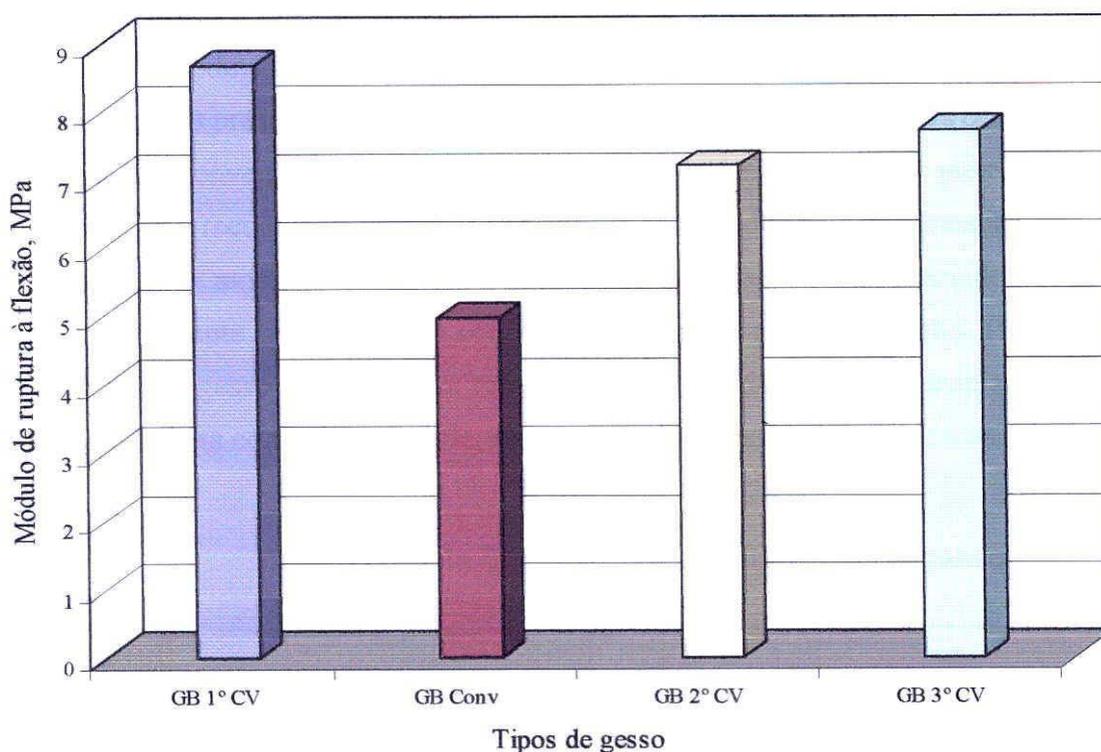


Tabela 5.3 - Valores de módulo de ruptura à flexão para os diferentes tipos de gesso produzidos

Um valor relativamente elevado para a tensão de ruptura à flexão demonstra uma estrutura. Como o material em teste é considerado rígido, isto é, não vergam excessivamente sob a ação de uma carga, essa resistência à flexão acusa, no mínimo, cristais bem formados e ordenados. Cristais fragilizados, como aqueles que se espera sejam formados pelos gessos beta produzidos a pressões próximas da atmosférica, quebram antes de defletirem por uma quantidade considerável. Novamente a Figura 4.3 mostra que um gesso, mesmo re-desidratado sob pressão, mas que já passou por uma desidratação violenta e desordenada,

prática comumente utilizada por considerável número de empresas no Pólo Gesseiro do Araripe, perde consideravelmente sua resistência á flexão. Essa redução de resistência, como mostra a referida tabela, chega a variações em torno de 60 %.

A formação de gessos com cristais de alta porosidade leva a uma superfície específica alta. As anomalias, ou seja, as fissuras provocadas pela saída abrupta da água de hidratação do interior dos cristais de gipsita aumentam essa superfície, aumentando a área de um possível contato entre o gesso produzido e a água de empastamento necessária.

A relação água-gesso para os gessos produzidos neste trabalho de dissertação é mostrada pela Tabela 4.2. Observa-se que o valor dessa relação cresce consideravelmente de um gesso produzido sob pressão, a partir do minério de gipsita e de um gesso também produzido sob pressão, a partir da reciclagem de placas confeccionadas com auxílio de gessos produzidos convencionalmente. É que mesmo re-desidratado sob pressão, essa forma de operação não recupera os formatos dos cristais esfacelados pela desidratação original. Valores dessa relação mostram que a superfície específica dos cristais destruídos pode ter sofrido aumento durante o processo de cominuição do gesso após calcinação. Por isso, o valor de relação água gesso aumentou em relação ao valor original que é padronizado para a maioria dos gessos beta como 0,5 na teoria, nas obras brasileiras a média é em torno de 0,75.

Tabela 5-2 - Valores da relação água/gesso

Material Analisado	Relação A/G
Gesso beta sob pressão (1º ciclo de vida)	0,5
Gesso convencional reciclado sob pressão	1,1
Gesso beta sob pressão (2º ciclo de vida)	0,7

O tempo de pega é relacionado ao tempo necessário para que os cristais de gipsita estejam em número suficiente, capaz de suportar tensões. Estes resultados são importantes por dar o tempo útil de utilização da pasta de gesso, sendo este valor a diferença entre o início e o

final do tempo de pega Figura 4.4. o gesso reciclado foi quem obteve o menor tempo de trabalhabilidade - 9,73 minutos, em média (ANEXO 4).

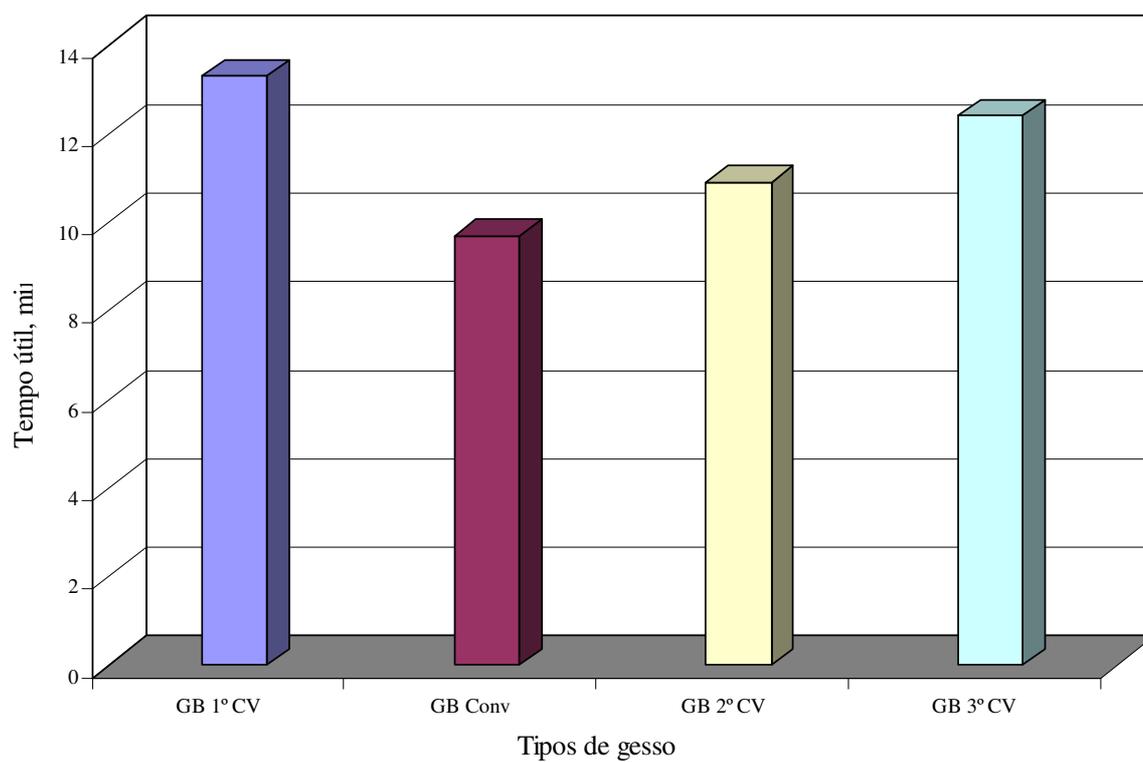


Tabela 5-3 — Valores de tempo útil para diferentes tipos de gesso produzidos

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A resolução do CONAMA nº 307/02 classificou em material do tipo C o resíduo de gesso oriundo da construção civil. Isso trouxe preocupações aos produtores de gesso do Pólo Gesseiro do Araripe que vêem uma das riquezas em potencial do nosso Estado, como é o gesso, com dificuldades de acesso ao mercado de materiais da construção civil. Essa preocupação dos empresários deverá permanecer até que sejam desenvolvidas tecnologias que auxiliem a mudar este panorama, contrário à cultura de uso de gesso que, no Brasil, ainda encontra-se incipiente.

No presente trabalho foi elaborado e construído um forno desidratador de minério de gipsita em escala de laboratório, para produzir gesso em regime de batelada e sob pressão de vapor d'água proveniente da própria água de desidratação do minério. A análise das propriedades dos gessos produzidos pelo referido equipamento, em diferentes ciclos de vida demonstra que é possível reciclar gesso, obtendo-se novamente gesso, a partir de mecanismos simples, os quais podem ser incorporados aos processos de fabricação convencionais. Outras importantes conclusões adicionais a que se chegou são listadas a seguir.

- i) Os resultados desse trabalho demonstram que é possível, a partir de tecnologia simples e de baixo custo, tornar o gesso obtido da desidratação térmica da gipsita um material reciclável.
- ii) O percentual de gesso reciclado pode ser considerado máximo, isto é, chega a 100%.
- iii) O gesso obtido no segundo ciclo de vida, pela desidratação do material de confecção de pré-moldados apresenta propriedades que denunciam a fragilidade e esfacelamento dos cristais, associado a uma estrutura desarrumada. Todas as propriedades usadas para caracterizarem as amostras originadas pelo gesso produzido desta forma, demonstraram estas condições.
- iv) Mesmo que um processo de desidratação térmica seja conduzido sob controle de pressão, mas, se o minério de gipsita foi submetido preliminarmente a uma desidratação sem esse tipo de controle, as propriedades do gesso final estarão distanciadas daquelas próximas ao que as normas classificam como um bom material;

- v) É imprescindível que os processos de fabricação de gesso beta sejam projetados para que haja um controle do nível da pressão de desidratação, em valores que possibilitem a manutenção das boas propriedades do material final, pela boa formação de cristais do semi-hidrato final – pressões acima da pressão atmosférica que permitam a formação de cristais inteiros e de mínima porosidade.

- vi) Uma sugestão para um próximo trabalho é a definição de parâmetros cinéticos para as condições apresentadas por este trabalho, em fornos do tipo rotativo, a pressões da ordem de 0,65 atmosferas manométricas e temperatura de 222 °C.

BIBLIOGRAFIA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas MB-3468. **Gesso para construção-Determinação das Propriedades físicas da Pó.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas MB-3469. **Gesso para construção-Determinação das Propriedades físicas da Pasta.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas MB-3470. **Gesso para construção-Determinação das Propriedades Mecânicas.** Rio de Janeiro: 1991.

AGOPYAN, V. *et all.* **Alternativas para redução 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.** Rio de Janeiro: Latec/UFF, 2004.

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

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

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

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

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

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

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

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

CAMPBELL, Steve. **Lead by Example Walls and Cieling.** www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features_BNP_featuresItem/03299,93761,00.html . Acesso em 20 de nov. 2004, 22:35:00.

CARDIM, Arnaldo; OLIVEIR, Maria Antonieta. **Resíduo da Construção e Demolição**, Recife, 2003.

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

CARVALHO, Michele T. M., TUBINO Rejane M., **Estudo do Reaproveitamento dos Resíduos do Gesso na Confecção de Tijolos e suas Aplicações na Construções Civil do Estado de Goiás.** São Paulo: IBRACON, 2003.

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

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

DANA - HURLBUT. **Manual de Mineralogia.** Editora da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1976.

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. **Sumário Mineral. Gipsita.** P. 80-81 São Paulo, 2003. p.p. 80-83.

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

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

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

FOLLNER, S Et al., **The Settings Behavior of a –and b-CaSO₄ x 0,5 H₂O as Function of Crystal Structure and Morphology.** Cryst. Res. Technol, Londres: 2002.

GOMES, A. M., BORGES, P. H. **Argamassas e Concretos Aditivados com Produtos à Base de Silicone.** Relatório Técnico - Dow Corning - Comunicação Privada, Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

_____. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. Tese de Livre Docência, 2000.

_____. **Resíduos de Construção e Demolição**. São Paulo: Escola Politécnica, USP. <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> acesso em: 13 de out de 2004, 14:25:20.

_____; CINCOTTO, Maria Alba. **ALTERNATIVAS DE GESTÃO DOS RESÍDUOS DE GESSO**, São Paulo: Universidade Politécnica de São Paulo, 2003.

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

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. Acesso em: 14 de fev. de 2005, 16:50:10.

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.

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

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

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

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

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

_____, **State of the art – use of waste materials in construction in Western Europe**. In: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997.

PERES, Luciano; BENACHOUR, Mohand; SANTOS, Valdemir. **O GESSO: Produção e Utilização na Construção Civil**. Bagaço, Recife, 2001.

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

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

_____. **Perda de materiais em processos construtivos tradicionais**. São Carlos: Pesquisa de campo. Departamento de Arquitetura e Planejamento, USP, São Paulo, 1989.

_____. **Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil. Situação atual**. In: reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. São Paulo: *Anais*, EPUSP/ANTAC, 1997.

SANTOS, P.S., **Tecnologia das argilas aplicada às argilas brasileiras**. Universidade de São Paulo , São Paulo, 1975.

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.

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

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

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

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

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

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

SONNTAG, R; BORGNACK, C. **Introdução à Termodinâmica para Engenharia.** LTC, Rio de Janeiro, 2003.

SOUSA, M. O argumento da leveza. **Revista Técnica**, São Paulo: ed. PINI, v.15, p23-26, nov/dez de 1995.

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

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

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

TCPO 10, **Tabelas de Composições de Preço para Orçamento.** Pini, 1a. Edição, São Paulo, 1996.

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

ZORDAN, Sérgio Eduardo. **Entulho da indústria da Construção civil.** “site”- <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em: 05 de Mai de 1999.

ANEXO 1 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS EXPERIMENTAIS

3 1 Introdução

Um aspecto importante da Biologia, Física, Química, Engenharia, assim como outras disciplinas experimentais, é que elas são quantitativas, isto é, suas teorias fundamentam-se na medição de grandezas. Medir uma grandeza física significa comparar esta grandeza com uma outra grandeza do mesmo tipo escolhida como termo de comparação ou padrão. A medida de muitas grandezas é expressa por um valor numérico seguido de uma unidade como, por exemplo, 6370 km para o raio médio terrestre, $1,67 \times 10^{-27}$ kg para a massa do próton, ou 127 Volts para a diferença de potencial usualmente fornecida pela rede elétrica. Estas grandezas chamam-se dimensionais. Outras medidas constam apenas de um valor numérico desacompanhado de uma unidade: o índice de refração de um vidro é aproximadamente 1,50 e a densidade do mercúrio metálico é 13,6. Nestes casos as grandezas são ditas adimensionais.

Medida

Entende-se por *medida direta* o valor obtido por comparação da grandeza física a medir com outra de mesma espécie de valor conhecido (por exemplo, o comprimento de uma mesa). A *medida indireta* é quando o valor obtido é por meio de uma equação física (leis, definições ou modelos) a qual relaciona valores conhecidos de outras grandezas, como por exemplo, a área da superfície de uma mesa.

Uma medida pode ser expressa através da seguinte relação:

$$G = X u \tag{1}$$

Onde G é a grandeza física; X é o valor numérico (limitado pelo número de algarismos significativos) e u é a unidade de medida. Esta maneira de escrever estaria correta se não houvesse incerteza (erros) na medida. Mas sempre há. Sendo assim, o sinal de igualdade na Eq. 1 pode sofrer críticas. Melhor seria escrever

$$G = (X \pm \text{incerteza}) u \tag{2}$$

onde o sinal \pm se impõe porque nunca se sabe se o erro cometido foi por excesso ou por falta. Mas, também, essa maneira de escrever sofre críticas quando não se conhece o erro cometido. Só resta contornar o problema da seguinte maneira:

Para uma única medida - Faz-se a medida avaliando-se o desvio cometido (ou incerteza na medida), o qual também recebe o nome de *desvio avaliado* ou *resolução* (R). Nos sistemas de medição (SM) de indicação ou registro analógico toma-se como sendo $R = k(DE)$, onde k é um fator multiplicativo e DE é a divisão de escala (menor divisão). O valor de k pode variar de 1, 1/2, 1/5, e 1/10, para SM de qualidade baixa, regular, boa e ótima, respectivamente. Em um SM de indicação digital, R corresponde ao incremento digital.

Para uma série de medidas:

- i) Mede-se várias vezes a grandeza;
- ii) Determina-se o seu valor mais provável, ou seja o seu *valor médio* (M).
- iii) Calcula-se o *desvio padrão do valor médio* ($\sigma_{\bar{x}}$).

2 Tipos de Erros

Os diversos tipos de erros que podem ser cometidos em uma medição costumam ser dividido em três categorias: erros grosseiros (ou enganos); erros sistemáticos (ou constantes) e erros acidentais (ou fortuitos).

Erros grosseiros: decorrem da falta de cuidado ou falta de experiência do observador, como, por exemplo, erros de cálculo, erros de leitura, erros oriundos de um manuseio incorreto do sistema de medição, erros de paralaxe. De um modo geral os erros grosseiros podem ser evitados pela repetição cuidadosa das medições.

Erros sistemáticos: decorrem de imperfeições do observador, do instrumento de medição e do método utilizado na medição.

a) erros induzidos pelo observador:

- atraso ou adiantamento ao acionar um cronômetro.

- erro cometido por deficiência de visão.
- b) erros introduzidos pelo instrumento:
 - utilização de uma escala em temperatura diferente daquela em que foi aferida.
 - deslocamento do zero do instrumento.
- c) erros introduzidos pelo sistema:
 - determinação do peso de um corpo no ar, em lugar de fazê-lo no vácuo (o empuxo do ar falseia o resultado).

Para eliminar os erros pessoais devemos substituir, quando possível, o observador humano por outro mecânico, elétrico, fotoelétrico ou fotográfico, etc. Os erros instrumentais variam geralmente ao longo da escala do instrumento. Por essa razão, antes de usá-lo, deve-se calibrá-lo (compará-lo com outro padrão).

Erros acidentais: decorrem de várias causas, conhecidas ou não, que se superpõem de maneira imprevisível. Os erros acidentais não podem ser evitados, nem corrigidos, nem ao menos diminuídos. Ocorrem sempre inteiramente ao acaso, qualquer que seja o observador, o instrumento e o método. Erros acidentais são também chamados de erros casuais, erros estatísticos, erros estocásticos ou erros aleatórios.

3 Valor Mais Provável e Precisão

Tendo-se em conta a impossibilidade de se conhecer o valor exato de uma grandeza física, estamos diante da seguinte questão: Que valor deve-se adotar para tal grandeza?

Considerem-se as medidas sucessivas diferentes x_1, x_2, \dots, x_n , que são obtidas para uma grandeza física e o valor médio (média aritmética) dessas medidas:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

Admitindo-se que os erros grosseiros e sistemáticos tenham sido eliminados, espera-se que, quanto maior o número de medidas obtidas, mais próximo estará o valor médio assim obtido do "valor verdadeiro" da grandeza. Na prática, como não se efetuará um número infinito de

medições, dentro do universo de medidas obtidas, o valor médio dessas será o valor mais provável da grandeza.

A dispersão do conjunto de medidas em relação ao valor mais provável pode ser quantificada procedendo-se da seguinte forma. Calculam-se os erros absolutos (também chamados desvios absolutos ou incertezas absolutas) de cada uma das medidas, definidas pelas diferenças entre essas medidas e o valor mais provável da grandeza:

$$\Delta x_1 = x_1 - \bar{x}, \Delta x_2 = x_2 - \bar{x}, \dots, \Delta x_n = x_n - \bar{x} \quad (4)$$

e, em seguida pode-se obter o erro médio absoluto, definido pela média aritmética dos valores absolutos desses últimos:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_1 |\Delta x_i| \quad (5)$$

O erro absoluto médio é um valor positivo expresso na mesma unidade da grandeza a que se refere. O conhecimento do valor mais provável x de uma grandeza e do erro médio absoluto Δx nos traz a informação de que o valor verdadeiro da grandeza, com base no conjunto de medidas obtido, está situado no intervalo $[\bar{x} - \overline{\Delta x}, \bar{x} + \overline{\Delta x}]$.

A precisão de uma medida pode ser dada pelo erro relativo, definido pelo quociente do erro absoluto pela própria medida:

$$\Delta r_r = \Delta x / x. \quad (6)$$

O erro relativo assim definido fornece a precisão da medida: quanto menor o erro relativo, maior a precisão e vice-versa. O erro relativo é um número adimensional. O conhecimento de erros relativos obtidos em diferentes processos de medição nos permite comparar as precisões das medidas obtidas por tais processos.

O grau de reprodutibilidade de uma medida pode ser expresso calculando-se o erro relativo médio, definido pelo quociente entre o erro médio absoluto e tal valor:

$$\overline{\Delta x_r} = \overline{\Delta x} / \bar{x}$$

O número de algarismos com que uma medida é expressa deve refletir a precisão da mesma, como se verá com mais detalhe a seguir.

Exemplo. Considere as seis medidas abaixo mostradas, obtidas para a massa de um corpo, expressa em gramas: 13,62; 13,63; 13,64; 13,63; 13,60; 13,61.

O valor mais provável da massa do corpo será:

$$\bar{m} = (13,62 + 13,63 + 13,64 + 13,63 + 13,60 + 13,61) \text{g} / 6 = 81,73 \text{ g} / 6 = 13,621 \text{ g}.$$

Com quantos algarismos deve-se escrever o resultado acima? A resposta dependerá do valor obtido para o erro médio absoluto, uma vez que este fornece a incerteza do valor mais provável. Calculando os desvios Δm_i de cada uma das medidas obtém-se:

$$+0,001; -0,009; -0,019; -0,009; +0,021; +0,011.$$

Assim o erro médio absoluto (valores absolutos ou positivos dos desvios) será:

$$\overline{\Delta m} = (0,001 + 0,009 + 0,019 + 0,009 + 0,021 + 0,011) / 6 = 0,070 \text{ g} / 6 = 0,0118 \text{ g},$$

isto é, a incerteza no valor mais provável da medida se manifesta a partir da segunda casa decimal (casa dos centésimos). Portanto, é inútil manter tanto no erro médio como no valor mais provável algarismos que estão situados além da casa dos centésimos. O valor final para a massa do corpo será escrita como:

$$m = [\bar{m} \pm \overline{\Delta m}] \text{ unidades de massa.}$$

Neste exemplo, obtém-se $m = (13,62 \pm 0,01) \text{ g}$. O erro relativo da medida acima será:

$$\overline{\Delta m_r} = 0,01 \text{ g} / 13,62 \text{ g} = 0,0007 \text{ (ou } 0,07 \% \text{)}$$

Sempre que se calcula o valor mais provável, é apropriado fazer a operação até uma casa decimal além da última casa já existente nas medidas, apenas para o propósito de se efetuar um arredondamento: se o algarismo desta casa decimal for maior ou igual a 5 ele deve ser abandonado depois de aumentar de 1 o anterior; se for menor que 5 ele deve ser desprezado sem alterar o precedente.

4 Algarismos Significativos

Como foi mencionado anteriormente, o número de algarismos com que deve ser apresentada uma medida dependerá do erro absoluto associado à mesma.

Muito comumente adota-se a prática de expressar a incertezas em uma grandeza com apenas um algarismo, aquele correspondente à casa decimal de mais alta ordem do mesmo, fazendo um arredondamento, se necessário. Esta prática fundamenta-se na idéia de que tal algarismo informa com maior importância a magnitude da incerteza, e será a prática adotada neste curso.

Em qualquer medida, o algarismo de mesma ordem decimal que o de mais alta ordem no erro absoluto é sempre duvidoso ou incerto, sendo comumente chamado de algarismo duvidoso. Apesar deste caráter, tal algarismo ainda possui um significado e sempre deve estar presente em qualquer medida. O algarismo duvidoso e os algarismos anteriores, isto é, de ordem decimal mais alta, chamam-se algarismos significativos da medida. Esta terminologia reflete o conceito de que os algarismos à direita do algarismo duvidoso não transmitem informação a respeito da magnitude da grandeza, sendo ao contrário ilusórios, e devem, portanto, ser abandonados.

Ao se adotar o valor mais provável de uma medida, obtém-se um número com algarismos em excesso, isto é, com algarismos sem significado, os algarismos situado à direita do algarismo duvidoso (Depara-se frequentemente com esta situação quando usa-se uma calculadora eletrônica). Como mencionado acima, estes algarismos devem ser abandonados, após se fazer uso da seguinte regra de arredondamento: se o algarismo da casa decimal seguinte à do algarismo duvidoso for maior ou igual a 5 abandone-o depois de

aumentar de uma unidade o algarismo anterior (duvidoso); se for menor que 5 despreze-o sem alterar o precedente.

Exemplos: Se a média aritmética vale 327,44 e o erro é 1, o arredondamento fornece 327 ± 1 , ou na notação científica, $(3,27 \pm 0,01) \times 10^2$. Se a média aritmética é 0,0586 e o erro é 0,003, o arredondamento dá $0,059 \pm 0,003$.

Toda grandeza experimental deve em princípio ser acompanhada de uma indicação explícita da incerteza. Entretanto, nem sempre se tem uma indicação da precisão com que o valor foi determinado, isto é, muitas vezes seu erro não é indicado. Esta situação é típica da resolução de problemas, cujos enunciados dificilmente mencionam os erros dos valores fornecidos. Também não há registros dos erros em muitas tabelas de constantes físicas. Mesmos nestes casos deve-se admitir a existência de erros e estimá-los, fazendo uso da seguinte regra:

Quando não houver indicação explícita da incerteza, o último algarismo será considerado como duvidoso e sujeito a uma incerteza absoluta de uma unidade naquela casa decimal

Exemplos:

- 1) O calor específico do alumínio é $c = 0.23 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$. Deve-se considerar o algarismo 3 como duvidoso e a medida estará sujeita a uma incerteza de $0,01 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$, ou seja, $c = (0,23 \pm 0,01) \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$.
- 2) O módulo da rigidez para o aço é $7,9 \times 10^{10} \text{ newtons}/\text{m}^2$. Aqui o algarismo duvidoso é 9 e neste caso assume-se incerteza de $0,1 \times 10^{10} \text{ newtons}/\text{m}^2$. Assim o valor para a rigidez será $(7,9 \pm 0,1) \times 10^{10} \text{ newtons}/\text{m}^2$.

É fácil compreender que ao se considerar duas ou mais medidas de uma mesma grandeza, a mais precisa será aquela que apresentar um maior número de algarismos significativos. Antes de se concluir esta seção, destaca-se alguns pontos, com o objetivo de esclarecer o conceito de algarismos significativos. Em primeiro lugar, é importante salienta

que o número de algarismos significativos em uma medida não tem relação alguma com o número de casas decimais. Como exemplo, a espessura típica de uma página de papel, 0,1 mm, pode ser apresentada como 0,01 cm ou 0,0001 m. Em qualquer uma das formas apresentadas, a grandeza possui um algarismo significativo, o 1.

Também aproveita-se o exemplo anterior para observar que os zeros à esquerda do primeiro algarismo não nulo de uma medida não são significativos, uma vez que eles não transmitem informação do ponto de vista da precisão da medida. De fato, tal conjunto de zeros apenas indica a posição da vírgula, podendo ser eliminados através de uma transformação de unidades da grandeza.

A forma com que o valor de uma grandeza é apresentada pode ser enganosa no que diz respeito a algarismo significativos. Aqui nos referimos especificamente ao caso em que aparecem zeros à direita do último algarismo (isto é, de ordem decimal mais baixa) não nulo da grandeza. Considere, por exemplo a medida da distância entre a Terra e o Sol, 150.000.000 km. Em princípio, de acordo com a regra acima, a medida possui nove algarismos significativos e a ela seria atribuída uma incerteza de 1 km. Observe, entretanto, que poderia ocorrer de o erro ser da ordem de milhões de quilômetros. Neste caso os seis últimos zeros não seriam significativos e, mesmo assim a medida seria apresentada da mesma forma (150.000.000 km). Esta ambiguidade é eliminada fazendo-se uso da notação científica. Ela consiste em escrever os valores numéricos das medidas e de seus erros como o produto de um número entre zero e dez, que contenha apenas algarismos significativos, por uma potência de dez. Usando tal notação, as medidas mencionadas acima seriam apresentadas como:

$1,50000000 \times 10^8$ km (substituindo a notação 150.000.000 km com sete zeros significativos)

$1,50 \times 10^8$ km (substituindo a notação 150.000.000 km com um zero significativos)

Tendo em vista o exposto anteriormente, a notação científica deve sempre ser preferida e a resolução da escala levada em consideração.

5 Medidas Indiretas e Propagação de Erros

Quando compara-se uma grandeza com sua unidade correspondente, diz-se que foi efetuada uma medição direta da grandeza. Diz-se que a medida de uma grandeza é indireta quando ela é obtida através de relações matemáticas entre ela e outras grandezas, das quais ela depende e que são medidas diretamente. Muitas vezes a medida de uma grandeza só pode ser obtida desta forma. É evidente que isto se refletirá no valor da grandeza subordinada, cuja incerteza dependerá das incertezas das medidas diretas. O estudo quantitativo desta questão é usualmente chamado de Propagação de Erros. Abaixo apresenta-se algumas regras de propagação de erros que, embora não possam abranger todos os possíveis casos, têm utilização bastante ampla:

- I - Se uma grandeza é a soma ou diferença de outras, o erro absoluto do resultado é igual à soma dos módulos dos erros absolutos das parcelas;
- II - Se uma grandeza é igual ao produto de várias outras, ou igual ao quociente de duas outras, o erro relativo do resultado é igual à soma dos erros relativos das grandezas independentes.
- III - Se uma grandeza é potência de outra (seja o expoente positivo ou negativo, inteiro ou fracionário), o desvio relativo do resultado é igual ao produto do módulo expoente pelo erro relativo da base.

Observe que as duas últimas regras são enunciadas em termos de erros relativos, porque, quando os cálculos envolvem multiplicações, divisões e potências, é mais fácil achar primeiro o erro relativo e por meio dele o erro absoluto.

Exemplo: Num determinado experimento a medida da massa específica, ρ , de um material foi obtida a partir de medidas diretas da massa m , da altura h e do lado da base b , de um bloco prismático de base quadrada feito deste material. Obtiveram-se as seguintes medidas e incertezas:

$$m = (1233,4 \pm 0,1) \text{ g}, \quad h = (12,30 \pm 0,02) \text{ cm}, \quad b = (3,35 \pm 0,01) \text{ cm}$$

Tendo-se em conta a relação $\rho = \text{massa} / \text{volume} = m / hb^2$, e as regras II e III acima, obtemos a seguinte expressão para a incerteza $\Delta\rho$ na massa específica:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta b}{b}$$

Substituindo-se os valores, resulta:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,1 / 1233,4 + 0,02 / 12,30 + 2 \times (0,01 / 3,35) = 0,008.$$

A partir das medidas de m , h e b , o valor calculado para a massa específica é $\rho = 9,0076 \text{ g/cm}^3$. O número de algarismos que devem ser mantidos neste resultado será determinado pelo erro absoluto, isto é:

$$\Delta\rho = 0,008 \times 9,0076 \text{ g/cm}^3 = 0,07 \text{ g/cm}^3$$

Observe que o erro absoluto foi arredondado de forma a ser apresentado com um algarismo significativo apenas, conforme regra adotada anteriormente. Tendo em vista que o erro obtido é da ordem de centésimos (de g/cm^3), esta será a ordem da casa decimal correspondente ao algarismo duvidoso na medida da densidade. Consequentemente tal grandeza deverá ser expressa com 3 algarismos significativos, devendo ser desprezados os algarismos 7 e 6 do cálculo inicial, após arredondamento apropriado:

$$\rho = (9,01 \pm 0,07) \text{ g/cm}^3 .$$

As três regras gerais enunciadas acima são úteis não apenas no trabalho de laboratório, como também na resolução de problemas. Como mencionado anteriormente, neste caso temos de fazer cálculos com medidas cujas incertezas são desconhecidas. Neste caso tais regras são adotadas e passam a ter dois objetivos: assegurar valores corretos no final

dos cálculos e evitar calculos desnecessários.

Quando resolvemos problemas, devemos operar não apenas com os valores numéricos fornecidos no enunciado, mas também com constantes físicas obtidas em tabelas, assim como com constantes matemáticas e valores de funções trigonométricas, logaritmos, etc. As regras abaixo permitem lidar coerentemente com todos estes dados. Se várias medidas em uma operação matemática são apresentadas apenas com seus algarismos significativos, a menos precisa, isto é, a que apresentar menor número de algarismos significativos é a que determinará o número de algarismos a ser mantido no resultado final, como veremos abaixo:

Regra 1: Na adição e subtração, arredonda-se o resultado final de tal forma que este terá como algarismo duvidoso aquele correspondente à casa decimal do algarismo duvidoso de ordem decimal mais alta nas parcelas.

Regra 2: Na multiplicação e divisão, arredonda-se o resultado final de tal forma que este apresentará o mesmo número de algarismos que o fator menos preciso.

Regra 3: Na potenciação e radiciação, arredonda-se o resultado de tal forma que este terá o mesmo número de algarismos da base (ou radicando).

6 Erros Instrumentais

Aqui apresentamos algumas regras gerais para leitura de instrumentos, bem como para estimar as incertezas obtidas nessas leituras.

Leitura de Instrumentos

Como regra geral, o resultado da leitura deve incluir todos os dígitos que o instrumento permite ler diretamente mais um dígito que deverá ser estimado pelo observador. Como exemplo, quando se mede uma dimensão de um objeto com uma régua milimetrada, a medida deve incluir um dígito correspondente à casa do décimo de milímetro, e que será estimado pelo observador.

Um outro exemplo seria ler a tensão na rede através de um voltímetro digital. Desde que a escala do instrumento tenha sido escolhida de forma apropriada, será observada uma flutuação apenas no último dígito. O observador deverá estimar este último dígito com base na flutuação observada.

Erro de Calibração

O erro sistemático que mais comumente contribui para a incerteza em uma medida realizada com um instrumento é o erro de calibração. O erro de calibração deve ser fornecido pelo fabricante, que é responsável não apenas pela construção mas também pela calibração do instrumento. Desta forma, tal erro é usualmente encontrado no manual do instrumento.

Exemplo: Usou-se uma balança digital, cuja menor leitura é 0,01g, para medir a massa de uma esfera, tendo-se obtido o valor $m = 54,67$ g. O fabricante informa que na escala utilizada, o erro de calibração é de 0,8 % + 1 dígito (no último algarismo). Neste caso a contribuição do erro de calibração à incerteza da medida será:

$$\Delta m = (0,8 / 100) 54,67 \text{ g} + 0,01 \text{ g} = 0,45 \text{ g}.$$

Algumas vezes, entretanto, especialmente no caso de instrumentos mais simples, o erro de calibração não é fornecido, e neste caso, ele deve ser estimado, a partir da seguinte regra: o erro de calibração de um instrumento de medida pode ser admitido como igual à metade da menor divisão ou da menor leitura que é explicitamente indicada pelo instrumento.

Instrumentos Com Graduação

Muitos instrumentos fornecem a medida de uma grandeza através da leitura de uma graduação, tal como ao determinarmos um intervalo de tempo com um cronômetro de ponteiro, ou uma temperatura com um termômetro de mercúrio, ou ainda um comprimento com uma régua. Efetuar a medição significa ler a posição de um índice ou ponteiro sobre uma escala.

A figura abaixo procura representar a leitura de uma grandeza em uma escala graduada. A leitura correspondente à posição M é algum valor entre 14 e 15 unidades. Nestes caso deve-se fazer uma interpolação, isto é, imaginamos que cada um dos menores intervalos da graduação esteja dividido, por exemplo, em 10 partes iguais e estimamos a posição do índice nesta escala imaginária. Teríamos então obtido para a leitura algo como 14,4 unidades.

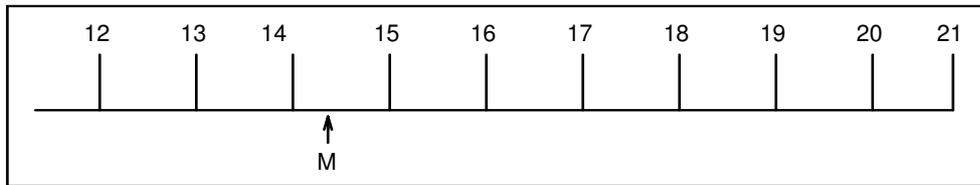


Figura 1

Frequentemente, quando se faz uso de tais instrumentos, a grandeza é medida apenas uma vez, e neste caso, o erro absoluto correspondente não é conhecido. Entretanto existirá uma incerteza no dígito subsequente ao da menor divisão da escala, e esta incerteza deve ser estimada.

Este erro denomina-se erro instrumental de leitura (ou erro avaliado do instrumento). Pode-se estabelecer um limite superior para este erro, com fundamento no fato de que a menor medida que um instrumento com graduação pode fornecer um erro correspondente à menor divisão de sua escala. O erro instrumental de leitura é, no máximo, igual à metade da menor divisão da escala.

Deve-se ter em mente que o erro instrumental de leitura não compreende todos os erros a que estão sujeitas as medidas obtidas com um instrumento com graduação. Como exemplo, este erro é frequentemente inferior ao erro de calibração do instrumento.

Entretanto, sempre que se mede uma grandeza apenas uma vez, por meio de um instrumento com graduação e, caso não haja informações sobre outros erros sistemáticos associados ao uso do instrumento (como o erro de calibração), a leitura deverá ser

acompanhada do erro instrumental correspondente, que será então uma estimativa do erro obtido na utilização do instrumento. No exemplo acima a apresentação completa da medida M seria $M = 14,4 \pm 0,5$.

Instrumentos Digitais

Diferentemente dos instrumentos com graduação, os instrumentos digitais mostram todos os algarismos da leitura correspondente à medida. Entretanto, em geral, ocorre uma flutuação no último algarismo. Neste caso, o último algarismo deverá ser estimado de acordo com a flutuação observada, que também criará uma incerteza na leitura.

Exemplo: Utilizou-se um voltímetro digital para medir a força eletromotriz ε de uma pilha comum. Escolheu-se uma escala em que a menor leitura do instrumento é 0,001 Volt. O resultado obtido foi $\varepsilon = 1,49X$ Volts, onde se observou que o dígito X flutuava entre os algarismos 2 e 6. Neste caso o último algarismo deve ser estimado como 4, que é a média aritmética de 2 e 6. A leitura deve então deve ser apresentada como $\varepsilon = (1,494 \pm 0,002)$ Volts.

Aqui cumpre enfatizar que, também no uso de instrumentos digitais, deve-se sempre tentar conhecer o erro de calibração do instrumento, consultando o manual do mesmo. Este, freqüentemente, é maior que a menor leitura do instrumento, podendo também ser superior à incerteza na leitura decorrente da flutuação no último dígito (erro estatístico de leitura).

Exemplo: Suponha que o erro de calibração do voltímetro do exemplo anterior, na escala escolhida, seja igual a 0,05 % + 4 dígitos (no último algarismo). Neste caso, a contribuição do erro de calibração à incerteza da medida será:

$$\Delta\varepsilon = (0,05 / 100) 1,494 \text{ Volts} + 0,004 \text{ Volts} = 0,004 \text{ Volts}$$

Neste exemplo, o erro de calibração do instrumento é bem superior à menor leitura do instrumento, e também superior ao erro estatístico de leitura, e deverá ser adotado como o valor final para o erro de medida de ε .

Finalmente, aqui cumpre observar que este texto constitui apenas uma primeira introdução à matéria Medidas e Erros. Diversos outros conceitos e resultados concernentes ao tratamento estatístico de dados experimentais não serão aqui tratados e serão objetos de cursos posteriores.

ANEXO 2 - PROGRAMA EM MATLAB PARA ESTIMATIVA DO FATOR DE COMPRESSIBILIDADE DE UM GÁS

```
clear
% Este programa "compress" auxilia no cálculo do fator de compressibilidade
% de um gas a partir de valores de temperatura e pressao
% Dados iniciais:
R=.082054;          % constante geral dos gases, atm.L/g-mol.K
z0=0.0;z=1.0;ZM=0.0;MM=0.0;
Pc=input('Pressao critica do gas, atm: ');
Tc=input('Temperatura crítica do gas, K: ');
T=input('Temperatura absoluta do sistema, K: ');
P=input('Presão absoluta do sistema, atm: ');
M=input('g/mol: ');
Pr=(P/Pc);
Tr=T/Tc;
if abs(z-z0)>0.00001
    z0=z;
    H=0.0867*Pr/(z*Tr);
    z=(1/(1-H))-((4.943*H)/((Tr^1.5)*(1+H)));
end
disp(['Z medio do gas:          ' num2str(z)])
```

ANEXO 3 – LISTAGEM DO PROGRAMA EM MATLAB

```

clear
% Programa "tgfrgn1" para cálculo da conversão na reação de desidratação da gipsita
% DADOS PRELIMINARES:
MSO3=80; % peso molecular do SO3
MCAO=56; % peso molecular do CaO
MCAO4=136; % peso molecular do CaSO4
MSemi=145; % peso molecular do semi-hidrato CaSO4.0,5H2O
MGip=172; % peso molecular da gipsita CaSO4.2H2O
MMgO=40; % peso molecular do MgO
MCO2=44; % peso molecular do CO2
MH2O=18; % peso molecular da H2O
% DADOS DE LABORATÓRIO SOBRE A GIPSITA
GAc=input('Entre com o valor de água combinada na gipsita : ');
GSO3=input('Entre com o valor de SO3 na gipsita : ');
GCAO=input('Entre com o valor CaO na gipsita : ');
GCO2=input('Entre com o valor de CO2 na gipsita : ');
GMgO=input('Entre com o valor de MgO na gipsita : ');
GAl=input('Entre com o valor de água livre na gipsita : ');
%
% INICIALIZANDO OS CÁLCULOS
for i=1:8;
% 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*E1/Acmin; CaOd21=CaOd2*E2/Acmin;
if (CaOd1<(MCAO4/(.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);
R1=0;
elseif (CaOd1>(MCAO4/(.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);
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);
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);
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);
R5=0;
else
% Calcule o teor de Semi-hidrato
H=CaSO4+Acmin; D=0; A=0;
% Cálculo da conversão
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);
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(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);
R9=0;
end
end
end

```

```
x(i)=Aca;
end
% RESULTADOS
disp(['Teor de Semi-hidrato (%) = ' num2str(H)])
disp(['Teor de Anidrita (%) = ' num2str(A)])
disp(['Teor de Di-hidrato (%) = ' num2str(D)])
disp(['Conversão à saída do forno (%) = ' num2str(y)])
end
plot(x,y,'r--')
title('Conversão em função da água combinada no gesso')
xlabel('Água combinada no gesso, %')
ylabel('Conversão no forno, %')
```

ANEXO 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Tabela - Resultados dos Ensaio de Massa Unitária

Material Analisado	Mediadas					Média kg/m ³	Erro médio (%)
	1	2	3	4	5		
Gesso beta sob pressão/1º ciclo de vida	957,8	958,9	959,2	958,8	959,6	958,9	0,1
Gesso convencional reciclado sob pressão	432,1	433,2	434,2	433,3	433,1	433,4	0,3
Gesso beta sob pressão/2º ciclo de vida	754,8	756,9	756,8	757,8	755,6	756,4	0,25

Tabela - Resultados dos Ensaio de Dureza

Material Analisado	Mediadas					Média N/mm ²	Erro médio (%)
	1	2	3	4	5		
Gesso beta sob pressão/1º ciclo de vida	81,2	88,9	87,9	86,8	87,8	86,8	6,2
Gesso convencional reciclado sob pressão	47,1	50,8	50,2	51,8	49,8	49,9	5,8
Gesso beta sob pressão/2º ciclo de vida	68,4	74,8	72,8	74,3	72,0	72,4	5,6

Tabela - Resultados dos Ensaios de Ruptura à Flexão

Material Analisado	Mediadas					Média MPa	Erro médio (%)
	1	2	3	4	5		
Gesso beta sob pressão/1º ciclo de vida	4,3	4,65	4,54	4,38	4,62	4,5	4,4
Gesso convencional reciclado sob pressão	1,78	1,82	1,86	1,88	1,85	1,84	5,5
Gesso beta sob pressão/2º ciclo de vida	4,12	4,26	4,32	4,37	4,12	4,24	5,0

Tabela - Resultados dos Ensaios de Tempo de Pega

Material Analisado		Mediadas					Média (min)
		1	2	3	4	5	
Gesso beta sob pressão/1º ciclo de vida	Início	7:50	7:20	8:40	8:10	8:05	8:01
	Fim	21:00	19:30	21:00	23:30	21:30	21:18
	Tempo útil	13:10	12:10	12:20	15:20	13:25	13:17
Gesso convencional reciclado sob pressão	Início	6:30	8:40	6:20	6:50	7:50	7:14
	Fim	16:20	17:30	18:20	16:30	16:10	16:58
	Tempo útil	9:50	8:50	12:00	9:40	8:20	9:44
Gesso beta sob pressão/2º ciclo de vida	Início	8:10	10:10	9:20	9:15	8:20	9:03
	Fim	21:20	18:30	18:50	19:30	21:10	17:04
	Tempo útil	13:10	8:20	9:30	10:15	12:50	10:49