



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO - UNICAP**  
Pró-Reitoria Acadêmica  
Coordenação Geral de Pós-Graduação  
Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais



ROMUALDO PARAIZO MACIEIRA

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITO DO TIPO GESSO-POLÍMERO PARA  
APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS EXTERNOS EM  
EDIFICAÇÕES**

Recife  
2011

ROMUALDO PARAIZO MACIEIRA

PRODUÇÃO DE COMPÓSITO DO TIPO  
GESSO-POLÍMERO PARA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE  
PAINÉIS EXTERNOS EM EDIFICAÇÕES

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

**Área de Concentração:** Desenvolvimento em Processos Ambientais.

**Linha de Pesquisa:** Modelagem de Processos.

**Orientador :** Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

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

M152p Macieira, Romualdo Paraizo  
Produção de compósito do tipo gesso-polímero para  
aplicação na fabricação de painéis externos em edificações /  
Romualdo Paraizo Macieira ; orientador Valdemir Alexandre  
dos Santos ; co-orientador José Edson Gomes de Souza, 2011.  
96 f. : il.

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

1. Gesso beta. 2. Estireno. 3. Revestimentos. 4. Resistência de  
materiais. 5. Materiais compostos. I. Título.

CDU 574.6



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO - UNICAP**  
**Pró-Reitoria Acadêmica Coordenação Geral**  
**de Pós-Graduação Mestrado em**  
**Desenvolvimento de Processos**  
**Ambientais**



## FOLHA DE APROVAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

### PRODUÇÃO DE COMPÓSITO DO TIPO GESSO-POLÍMERO PARA APLICAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE PAINÉIS EXTERNOS EM EDIFICAÇÕES

**Professor Orientador :** Dr. Valdemir Alexandre dos Santos  
**Área de concentração :** Desenvolvimento em Processos Ambientais.  
**Mestrando :** Romualdo Paraizo Macieira

**TRABALHO APRESENTADO EM BANCA E APROVADO PELA COMISSÃO  
EXAMINADORA COMPOSTA PELOS PROFESSORES ABAIXO:**

---

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Eliane Cardoso de Vasconcelos

---

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Conceito final: "Aprovado com distinção"

Recife, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho :

A minha família, especialmente a minha mãe, pelos seus ensinamentos de vida com sabedoria e pela compreensão da minha temporária dificuldade por não passarmos muito tempo juntos.

“Nunca confunda conhecimento com sabedoria. O primeiro o ajuda a ganhar a vida; a segunda o ajuda a criar uma vida.”

(G. TYLER MILLER JR.)

“Se um dia já homem feito e realizado, sentires que a terra cede a teus pés, que tuas obras desmoronaram, que não há ninguém a tua volta para te estender a mão, esquece a tua maturidade, passa pela tua mocidade, volta à tua infância e balbucia, entre lágrimas e esperanças, as últimas palavras que te restarão na alma; Minha Mãe, Meu Pai.”

(Rui Barbosa)

Agradeço:

A meus pais, pela minha existência e conhecimentos adquiridos neste tempo....

Aos meus filhos: Luciana e André Luiz, por darem forças para continuar nesta caminhada de crescimento constante...

Ao meu neto, Lucas, por me dá a alegria necessária do dom da vida....

A minha esposa Sônia de A. Macieira, pela tolerância dos dias que estamos pelo avesso, pela compreensão de ter muitas vezes trocado horas de lazer por trabalho.

Ao orientador Valdemir A . dos Santos, pela amizade e a confiança depositada, bem como, pelo provimento do conhecimento ao trabalho, pelos conhecimentos técnicos transmitidos, por auxiliar ao planejamento, a realização e interpretação dos resultados dos experimentos.

Ao co-orientador José Edson G. de Souza, pela inestimável ajuda ao trabalho...

Aos professores, que me passaram os ensinamentos básicos, desde o início dessa caminhada...

A FACEPE pela bolsa a mim concedida....

Aos funcionários do Departamento de Química pela ajuda quando solicitados...

A Universidade Católica de Pernambuco, pelos espaços cedidos para execução dos experimentos...

A amizade e companheirismo da minha turma de mestrado...

Em especial ao funcionário André, técnico do laboratório de Engenharia Civil, que colaborou com a obtenção dos resultados comparativos deste trabalho...

## Resumo

A localização do Pólo Gesseiro do Araripe é muito privilegiada. Situado no alto Sertão do Estado de Pernambuco, dista cerca de 800 km de 8 importantes capitais do Brasil (Recife, Salvador, Fortaleza, Aracaju, Maceió, João Pessoa, Natal e Teresina), gera 13200 mil empregos diretos e 66 mil indiretos que fazem do Pólo Gesseiro do Araripe um importante pólo de atividades sócio-econômicas da Região Nordeste. No Brasil, métodos produtivos e construtivos tradicionais estão sendo substituídos gradativamente pelos sistemas industrializados de construção. Este trabalho teve o objetivo de desenvolver um processo produtivo para obtenção de um novo material compósito do tipo gesso-polímero, com alta resistência mecânica e à umidade. Com esse propósito foram investigadas condições de temperatura, pressão e tempo, necessárias à obtenção de um compósito que servirá para fazer do gesso um material de revestimento externo, hidrófobo e com reduzida produção de rejeitos sólidos durante o transporte e sua aplicação. O monômero utilizado para os testes experimentais foi o estireno pela relativa disponibilidade de mercado. O compósito produzido foi obtido por polimerização em massa do estireno em corpos de prova pré-moldados em gesso. Obedecendo a um delineamento composto central rotacional (DCCR) foram realizados 20 experimentos distribuídos em  $2^3$  fatoriais completos, 6 pontos centrais e 6 pontos axiais. As variáveis-resposta foram as resistências à tração na flexão, à compressão, à absorção de água e à conversão polimérica. O valor mínimo da absorção de água (1,03%) e valores máximos da resistência de tração na flexão (9,89 MPa) e de compressão (24,80 MPa), que caracterizam o compósito gesso-polímero obtido, apresentaram-se superiores aos valores obtidos do gesso puro, o que habilita a utilização do compósito em painéis externos, possibilitando, também, considerável redução de rejeitos sólidos no manuseio desse material.

**Palavras-chave:** Gesso beta; Estireno; Compósito; alta resistência; Revestimento externo.

## **Abstract**

The Plaster Pole of Araripe localization is more than privileged. Situated in the state of Pernambuco high hinterlands, about 800 km equidistant of 8 Brazilian capitals (Recife, Salvador, Fortaleza, Aracaju, Maceió, João Pessoa, Natal and Teresina), it generates 13,200 direct jobs and 66,000 indirect jobs, making an important center for social-economic activities out of the Plaster Pole of Araripe on the Northeast of the country. In Brazil, traditional methods of production and building are gradually being replaced by industrialized construction systems. This study aimed to develop a production process for obtaining a new type of composite plaster-polymer with high mechanical strength and humidity resistance. Considering that purposes were investigated: temperature, pressure and timing needed to obtain a composite which would make an external coating material out of plaster, such material would be hydrophobic and with reduced production of solid waste during transport and application. The monomer used for the experimental tests was the styrene for the availability of it on the market. The composite produced was obtained by bulk polymerization of styrene in samples pre-cast in plaster. Following a central composite design (CCRD) were performed 20 experiments distributed in complete factorial, six central points and six axial points. The response variables were the tensile strength in bending, compression, water absorption and polymer conversion. The minimum water absorption (1.03%) and maximum tensile strength in bending (9.89 MPa) and compression (24.80 MPa), those characteristics of the composite plaster-polymer showed themselves superior to the values found on the pure plaster, allowing the usage of this composite in external panels, enabling also a considerable reduction of solid waste on the handling of this material.

**Keywords:** Beta plaster; Styrene; Composite; High strength; External Coating.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	-	Análise de Variância APL
	-	Arranjo Produtivo Local.
CETEM	-	Centro de Tecnologia Mineral
CONAMA	-	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DCC	-	Planejamento Composto Central
DCCR	-	Planejamento Composto Central Rotacional
DIEESE	-	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio econômicos
DNPM	-	Departamento Nacional de Produção Mineral
GEE	-	Gases de Efeito Estufa
IARC	-	International Agency for Research on Cancer
ITEP	-	Instituto Tecnológico de Pernambuco
ISO	-	International organization for Standardization
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	-	Ministério de Minas e Energia
MQ	-	Média quadrática
MQR	-	Média quadrática do erro
MSR	-	Metodologia de Superfície de Resposta
NBR	-	Normas Brasileiras
SECTMA	-	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1.1	(a) Planejamento $(2^2)$ com um ponto central e; (b) Planejamento $(2^3)$ com um ponto central	28
FIGURA 1.2	Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 2 fatores independentes	28
FIGURA 1.3	Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 3 fatores independentes	28
FIGURA 1.4	Regiões de rejeição e não rejeição para a distribuição F	33
FIGURA 1.5	Fórmula estrutural da cadeia de poliestireno	46
FIGURA 1.6	Relação monômero – polímero	47
FIGURA 1.7	Esquema das propriedades físicas que caracterizam os materiais	51
FIGURA 2.1	Foto do reator: (a) vista parcial; (b) vista superior sem a tampa e com corpo de prova; (c) tampa com acessórios do reator de polimerização	67
FIGURA 2.2	Reação do p-TBC com NaOH	68
FIGURA 2.3	Testes na resistência: (a) compressão; (b) flexão	71
FIGURA 2.4	Prensa hidráulica universal de Ensaio (Contenco – Pavitest) utilizada nos testes de compressão do compósito gesso-polímero	72
FIGURA 2.5	Diagrama de Pareto para a resistência à compressão	77
FIGURA 2.6	Diagrama de Pareto para a resistência na flexão	77
FIGURA 2.7	Diagrama de Pareto para absorção de água	77
FIGURA 2.8	Diagrama de Pareto para o grau de conversão polimérica	77
FIGURA 2.9	Superfície de resposta para a resistência à compressão	79
FIGURA 2.10	Curvas de níveis para a resistência à compressão	80
FIGURA 2.11	Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão	81
FIGURA 2.12	Curvas de níveis para a resistência à tração na flexão	81
FIGURA 2.13	Superfície de resposta para a absorção de água	82
FIGURA 2.14	Curvas de níveis para a absorção de água	82
FIGURA 2.15	Superfície de resposta para o grau de conversão polimérica	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1	Matriz de planejamento experimental fatorial $2^3$	22
Quadro 1.2	Alguns valores de $\alpha$ para diferentes valores de k	26
Quadro 1.3	ANOVA para um planejamento fatorial $2^2$	31
Quadro 2.1	Valores dos fatores codificados do DCCR utilizado	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Reservas brasileiras de gipsita em 2000	36
Tabela 1.2	Reserva e Produção Mundial de Gipsita	37
Tabela 1.3	Distribuição das Minas no Brasil em 2007	38
Tabela 1.4	Distribuição da Reserva de Gipsita em 2007	38
Tabela 1.5	Exigências físicas do gesso para construção civil	44
Tabela 1.6	Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil	45
Tabela 2.1	Valores obtidos e normatizados	73
Tabela 2.2	Testes de Resistências efetuados no Compósito (Gesso – Polímero) Fator água/gesso de 0,70	75
Tabela 2.3	Valores Obtidos pela ANOVA para a resistência à compressão	75
Tabela 2.4	Valores Obtidos pela ANOVA para a resistência à tração na flexão	75
Tabela 2.5	Valores Obtidos pela ANOVA para Absorção de água	76
Tabela 2.6	Valores Obtidos pela ANOVA para o grau de conversão Polimérica	76
Tabela 2.7	Comparações das resistências	84
Tabela A1	Grau de conversão Polimérica	88

<b>RESUMO</b>	<i>vii</i>
<b>ABSTRACT</b>	<i>viii</i>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	x
<b>LISTA DE QUADOS E TABELAS</b>	xiii
<b>SUMÁRIO</b>	xiv

## **CAPÍTULO 1**

<b>1.1</b>	<b>Introdução</b>	16
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
<b>1.3</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	22
1.3.1	Delineamento Composto Central Rotacional	22
1.3.1.1	<i>Planejamento experimental</i>	22
1.3.1.2	<i>Delineamento Composto Central</i>	24
1.3.1.3	<i>Metodologia de Superfície de Resposta</i>	26
1.3.1.4	<i>Análise de Variância dos Efeitos do Experimento Fatorial <math>2^k</math></i>	30
1.3.2	<b>Gesso</b>	33
1.3.2.1	<i>Generalidades</i>	33
1.3.2.2	<i>História do Gesso</i>	35
1.3.2.3	<i>Produção da Gipsita no Mundo</i>	36
1.3.2.4	<i>Processo de Produção do Gesso</i>	38
1.3.2.5	<i>Aplicações do Gesso</i>	42
1.3.3	<b>Água de cristalização</b>	45
1.3.4	<b>Monômeros</b>	46

<b>1.3.5</b>	<b>Polímeros</b>	47
<b>1.3.6</b>	<b>Compósitos</b>	52
<b>1.4</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	56
<b>CAPÍTULO 2</b>		
	<b>RESUMO</b>	64
	<b>ABSTRACT</b>	65
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	65
<b>2.2</b>	<b>Material e Métodos</b>	67
2.2.1	Descrição do arranjo experimental	67
2.2.2	Planejamento experimental	69
2.2.3	Testes de caracterização do gesso convencional e do compósito	70
<b>2.3</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	73
<b>2.4</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	85
<b>2.5</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	86
<b>2.6</b>	<b>Apêndices</b>	88
<b>2.7</b>	<b>Anexo 1</b>	90
	Descrições de Materiais e Procedimentos	90
	<i>Procedimento do ULTRA X</i>	90
	<i>Procedimento para calcular a compressão e a tração na flexão</i>	91
	<i>Determinação da massa unitária</i>	91
	<i>Procedimentos para calcular a massa unitária</i>	92
	<i>Formas utilizadas – atendem a ABNT NBR 12129</i>	93
	<i>Procedimentos para determinação do fator água/gesso</i>	93
	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV</i>	94
	<i>Propriedades Físico-Químicas do Estireno</i>	95

## **CAPÍTULO 1**

# CAPÍTULO 1

## 1.1 Introdução

Existe uma progressiva busca pela racionalização dos processos construtivos visando baixar custos de construções e aumentar a produtividade. Os meios encontrados são as inovações tecnológicas de materiais e de sistemas construtivos tradicionais. A criação de elementos pré-fabricados propicia a produção em escala industrial reduzindo os desperdícios de materiais, o tempo na execução de edifícios, a mão de obra, os custos finais de construção que atendam à legislação de preservação do meio ambiente. Essas tendências, embora não sejam inexoráveis, tendem a ganhar espaço em certos segmentos da indústria sem, entretanto, mudar por completo o padrão construtivo do setor(DIEESE, 2001). Para se conseguir mudar verdadeiramente o processo de produção, ou seja, para se adquirir melhor desempenho e, ao mesmo tempo, menores custos, é necessário uma verdadeira incorporação das novas tecnologias construtivas ao sistema produtivo das empresas, o que implica alterar o seu processo de gestão, incluindo dentre muitas outras questões importantes, uma abordagem dos recursos humanos (BARROS, 1998 apud HOLANDA, 2003).

No Brasil já é notado uma mudança crescente. Estruturas são efetuadas com aço e lajes pré-fabricadas; em concreto de vigas, pilares e lajes pré-moldadas; painéis em aço ou alumínio com vidros nas fachadas de grandes edifícios comerciais; painéis divisórias com gesso acartonado (drywall); divisórias Eucatex etc.. Estudos mostram que os métodos tradicionais estão gradativamente sendo substituídos pelos sistemas industrializados de construção. Estudos também mostram que adotar métodos de construção enxuta é menos oneroso que investir na melhoria da produtividade de um sistema pouco produtivo (MALAFAIA, 2002).

Em países industrializados como: Estados Unidos, Canadá e Suécia casas são erguidas completamente em painéis pré-moldados de madeira e aço. São exemplos:

OSB (Oriented Strand Board): pré-moldados em madeira e aço.

A tendência mundial prova que a industrialização dos métodos construtivos é um caminho sem volta. Palavras como: modulação, construção seca, painéis e

revestimentos sintéticos entraram definitivamente para o nosso dicionário construtivo (MALAFAIA, 2002). Apesar do Brasil possuir a maior área de reflorestamento do mundo, o destino da mesma contempla somente a produção de celulose e carvão vegetal. Esse fato estimula a investigação sobre o tema e contribui para a formação de uma cultura relacionada à busca de soluções para os problemas ambientais e de novas alternativas para o setor da construção civil (SANTOS, 2007).

As novas tecnologias são vistas, em todos os setores da economia, principalmente na construção civil, como responsáveis pela geração de altos custos, na escolha do material e na qualificação da mão de obra, no entanto, não representa bem a realidade. Desse modo, se faz necessário mostrar que os benefícios da tecnologia trazem uma economia muito maior, tanto nos custos de execução como nos custos de produção, principalmente, quando atendem ao princípio do equilíbrio ambiental. (MACHADO e MORAES, 2008)

Ao se atentar para o princípio básico que rege a sociedade brasileira, a Constituição Federal em seu **Art. 255**, no “caput” dispõe:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

Observa-se que o bem maior é a vida e que a qualidade de vida está ligada diretamente ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (CF, 1988). É baseado neste espírito que este trabalho foi desenvolvido sobre uma região (polo gesseiro do Araripe) que apresenta um cenário com grandes problemas ambientais.

Sabe-se que o Protocolo de Kyoto impõe um teto nas emissões para a atmosfera de CO<sub>2</sub> e outros gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa (GEE) e que contribuem para o aquecimento global. Cada Estado signatário do Protocolo obrigou-se a tomar as medidas necessárias para limitar a produção de GEE no seu território. Para isso, impõe-se a criação de mecanismos de atuação e a definição de políticas de curto e médio prazo que reduzam as emissões daqueles gases, de tal modo que os níveis de emissão no período de cumprimento 2008-2012 sejam os de 1990. Este grande objetivo é, portanto, um compromisso nacional que tem de envolver toda a sociedade,

sob a liderança da Administração, a quem compete coordenar todas as ações que levem ao resultado desejado (EUROPA, 2007).

O Pólo Gesseiro do Araripe, uma região situado no epicentro do semi-árido brasileiro, com localização privilegiada, no alto Sertão do Estado de Pernambuco, dista cerca de 800 km de oito importantes capitais do Brasil (Recife, Salvador, Fortaleza, Aracaju, Maceió, João Pessoa, Natal e Teresina), extremo oeste do Estado, região nordeste do país, responsável por 94% da exploração de minério gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) no Brasil, representando a maior reserva nacional disponíveis a céu aberto e o minério de melhor qualidade do mundo, com excelentes condições de mineração (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

A importância do licenciamento ganha maior amplitude quando se considera que neste Estado, especificamente, na região do Araripe, são desenvolvidas atividades integrantes da cadeia produtiva de gesso e que a natureza deste ramo de atividade tem potencial indicativo de degradação ou poluição ao meio ambiente (SECTMA e CPRH, 2002).

A busca de informações que retratem o mais fielmente possível a realidade de setores críticos da economia nacional vem se tornando, ao longo das últimas décadas, imperativo para toda a sociedade preocupada com a melhoria das condições de vida de sua população (LINS, 2002). A visão de um país em desenvolvimento como o Brasil, com índices de desemprego em torno de 10,4%, levantado pelo Dieese em janeiro de 2011 (EXAME.com, 2011), e com uma distribuição de renda abaixo dos padrões de países desenvolvidos, é notório que haja carência de moradias para a população pobre. Há necessidade de se encontrar novos materiais que supram as deficiências dos atuais e contribuam com mais acessibilidade à construção de imóveis.

Segundo Salles da **Folha Online** (2009), a questão da habitação é um dos grandes problemas sociais do Brasil. O déficit habitacional para a população de baixa renda era estimado em 7,964 milhões de residências em 2006. Em 2010, o Ministro das Cidades, Marcio Fortes de Almeida, anunciou durante o Fórum Urbano Mundial 5 no Rio de Janeiro, a redução do déficit habitacional brasileiro para 5,8 milhões de domicílios conforme estudo elaborado pela Fundação João Pinheiro, com ano referência em 2008 (FUM5, 2010). Outra dificuldade para a erradicação desse problema, além do alto número de moradias a serem construídas, é o custo elevado das obras da construção civil.

A edificação habitacional deve reunir características que atendam às exigências de conforto térmico dos usuários, considerando-se a região de implantação da obra, as respectivas características bioclimáticas definidas na ABNT NBR 15220-3 e considerando-se que o desempenho térmico do edifício dependa do comportamento interativo entre fachada, cobertura e piso (SOUZA, 2006). Atendendo estas características da edificação e levando-se em consideração as propriedades do gesso, deveremos encontrar um material que junto ao mesmo melhore suas características: maior resistência a compressão; maior resistência a flexão; maior dureza; menor absorção a água; ótima aderência ao substrato, eficiente isolante térmico e melhor custo-benefício com o aumento do ciclo de vida do gesso. Materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas, propriedades e que estão separados por uma interface são definidos como compósitos. A necessidade de se produzir compósito é de tentar encontrar, através de combinações de diferentes materiais, um único com propriedades superiores às dos componentes unitários (SOUZA, 2006).

Adicionalmente, do ponto de vista ambiental, o gesso também apresenta a vantagem de emitir menos gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) que o cimento Portland ou a cal durante seu processo industrial de obtenção. Potencialmente a aplicação do revestimento de gesso é um processo de grande produtividade, visto que é feito em camada única, dispensando o chapisco (CARDOSO et al., 2006).

Os grandes problemas construtivos em uma edificação residem nos desperdícios, nos custos de manutenção e nas infiltrações em fachadas. A utilização de polímeros dispersos em gesso pode contribuir de forma significativa em muitas propriedades, além da colaboração efetiva do polímero nas interfaces polímero-matriz. Para minimizar esses fatos deve-se encontrar um novo material, um compósito gesso-polímero, que tenha as características citadas acima e que sirva para aplicações nas edificações: em revestimentos externos, móveis, louça sanitária e utensílios de gesso entre outras aplicações (BASTOS e BALTAR, 2003).

Observar os experimentos efetuados sobre compósitos para desenvolver meios de concepção de novos materiais e aplicabilidade na construção civil, estudar um novo processo de formação de compósito gesso-polímero na obtenção de alta resistência mecânica e à umidade, testar o monômero de estireno na formação de combinações de gesso – polímero e realizar caracterizações físico-químicas levam à realização de

um trabalho que venha a contribuir com o desenvolvimento de um novo tipo de material à base de gesso, voltado para características com alta resistência mecânica e à umidade, e que venha, também, a contribuir na solução de problemas construtivos, em particular, de revestimento externo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Desenvolver um processo produtivo com obtenção de novo material derivado do gesso, com alta resistência mecânica e à umidade, com conseqüente redução da geração de resíduos na produção e aplicação de pré-moldados de gesso, como por exemplo, painéis de revestimento externo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Produzir, com auxílio de planejamento experimental, um compósito do tipo gesso-polímero;
- Testar as características mecânicas do compósito como material de construção;
- Definir as condições operacionais otimizadas para produção do material proposto.

## 1.3 Revisão da Literatura

### 1.3.1 Delineamento composto central rotacional

#### 1.3.1.1 Planejamento experimental

Um planejamento experimental com  $k$  fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado um planejamento fatorial  $2^k$  (SARAMAGO et al., 2008). Consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental para, em seguida, analisar e interpretar os efeitos principais e de interação entre os fatores investigados. Assim, podem-se identificar as melhores condições de obtenção do produto ou de realização do processo sob estudo. Para exemplificar esse tipo de procedimento considera-se um planejamento fatorial de três fatores ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ) e dois níveis (+1 e -1). A matriz de planejamento para um planejamento fatorial  $2^3$  é apresentada no Quadro 1.1 a seguir (DEVOR et al, 1992; RODRIGUES e IEMMA, 2005):

Quadro 1.1 – Matriz de planejamento experimental fatorial  $2^3$

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

Conforme o Quadro 1.1, na matriz de planejamento as colunas representam o conjunto de fatores investigados e as linhas representam diferentes níveis ou combinações desses fatores. Devor, Chang e Sutherland (1992) definem essa disposição de organização da matriz de planejamento por ordem padrão (*standard order*).

O planejamento experimental foi desenvolvido por Ronald Aylmer Fisher na Inglaterra por volta de 1920 (LOGOTHETIS e WYNN, 1989). Nessa época o planejamento experimental era utilizado, principalmente, em pesquisas agrícolas. Mas foi a partir do ano de 1950, que o planejamento experimental começou a ser amplamente utilizado em estudos tecnológicos, na indústria, em biologia, em medicina, em química etc. Atualmente, ele é amplamente considerado como uma das mais importantes técnicas utilizadas para o desenvolvimento de novos produtos. Esses planejamentos foram desenvolvidos inicialmente para estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, onde o erro experimental, em geral, é bem pequeno, e as condições do experimento são mais facilmente controláveis (BOX e WILSON, 1951; MATEUS et al., 2001).

Muitos pesquisadores e profissionais discutiram como analisar e usar o planejamento experimental na prática (LIM, 1990; LOCHNER & MATAR, 1990). No entanto, existe de fato uma diferença entre a técnica de planejamento experimental e sua prática. Segundo Carlsson (1996) a conscientização, o conhecimento e o uso de modelos de planejamentos experimentais ainda eram muito poucos, mesmo nas mais bem sucedidas empresas.

Um planejamento experimental é uma estratégia utilizada por empresas concorrentes nas batalhas da concepção de novos produtos, reduzindo tempo, melhorando a qualidade e confiabilidade e reduzindo os custos dos ciclos de vida desses produtos (MATEUS, 2001). A principal vantagem para a adoção de um planejamento experimental é a obtenção de uma grande quantidade de informações sobre um novo produto com um número limitado de experimentos. Através da análise das informações obtidas a partir desses experimentos, diversos parâmetros relativos a um novo produto podem ser facilmente determinados com considerável precisão. Os principais passos para a utilização de um planejamento para desenvolvimento de um novo produto podem ser resumidos da seguinte forma:

- Identificação de fatores que possam influenciar no desempenho de um novo produto;
- seleção adequada dos níveis fatoriais;
- desenvolvimento da matriz de delineamento experimental;
- realização de experimentos e coleta dos dados experimentais;
- análise das variâncias dos dados experimentais e;

- determinação dos valores ótimos dos fatores.

### **1.3.1.2 Delineamento Composto Central**

Os planejamentos ou delineamentos compostos centrais (DCC) vêm constituindo-se em um forte competidor dos planejamentos fatoriais completos e dos planejamentos fatoriais fracionários. Esses DCC's são bastante flexíveis, possibilitando aos pesquisadores, para um número determinado de fatores, escolherem entre várias alternativas, a que mais lhe convier: dependendo do valor de  $\alpha$  escolhido, é possível obter-se ortogonalidade, rotacionalidade ou ambas. A ortogonalidade propicia a estimação independente para os coeficientes do modelo e a rotacionalidade proporciona variâncias idênticas para pontos situados à mesma distância do centro, em qualquer direção. Dependendo do número de pontos centrais é feita uma distribuição conveniente, sendo possível dividir o delineamento em dois, três ou mais blocos, ortogonalmente, sem perder as características anteriormente mencionadas (CONAGIN, 1999). Nessas condições é comum repetir apenas um tratamento, no caso, o relativo ao ponto central. Posteriormente, foram adaptados a outros ramos da ciência. Várias modificações têm sido propostas, tendo como base os delineamentos centrais e não centrais.

Dentre os delineamentos padrões, o DCC é considerado um excelente delineamento. De acordo com Lucas (1976) e Atikison e Donev (1992) os delineamentos composto pertencem a uma família de delineamentos eficientes, os quais requerem poucos ensaios para sua realização. De acordo ainda com Atikison e Donev (1992) os efeitos dos pontos centrais fazem diminuir a eficiência dos delineamentos como medida de otimização. Os delineamentos que os autores chamam de *Box Draper*, por terem as características de rotacionalidade e um número de 2 a 4 pontos centrais, tem reduzidas as bordas da região experimental. Isso permite a redução do efeito de viés dos termos de maior ordem que são omitidos do modelo, o que, segundo esses autores, apesar de diminuir os custos, reduz a eficiência das medidas de otimização da região experimental, pelo menos para os modelos lineares. Conforme Mateus et al (2001) um delineamento composto central (DCC) possibilita ao pesquisador, para um determinado número de fatores, escolher entre os tipos ortogonal e/ou rotacional, permitindo ainda sua divisão ortogonalmente em blocos, bem como se pode trabalhar com um número bem menor de combinações entre fatores com seus respectivos níveis do que os fatoriais completos.

As duas características mais desejáveis de um projeto experimental são ortogonalidade e rotabilidade. Ortogonalidade garante que o principal efeito e interação das estimativas de interesse sejam independentes umas das outras (ATIKISON e DONEV, 1992). Em outras palavras, quanto mais ortogonal a concepção é, mais informações independentes podem ser extraídas a partir dos resultados sobre os efeitos. Por outro lado, a forma de rotabilidade permite que se extraia o máximo de informações. Ortogonalidade e rotabilidade dependem do número de pontos no centro, da concepção e da chamada distância axial  $\alpha$ , que é a distância máxima da estrela de pontos a partir do centro do modelo.

Embora haja flexibilidade quanto ao número de pontos centrais é necessário pelo menos um. Multiplicar este ponto é fortemente recomendado nos três tipos de delineamentos indicados por ele. Os pontos centrais melhoram as estimativas dos efeitos quadráticos e possibilitam graus de liberdade adicionais para o erro. Além disso, os pontos centrais permitem informação extra quanto à região experimental, onde os melhores valores-resposta estão frequentemente localizados (MATEUS, 2001).

A escolha de um planejamento fatorial adequado é função direta do número de fatores a serem estudados, da disponibilidade de matéria-prima, do número de ensaios que têm viabilidade de serem realizados e do custo desses ensaios (MONTGOMERY, 1991). Contudo, existe um número mínimo de experimentos a serem realizados para que a discussão dos resultados e a interpretação estatística não fiquem comprometidas. No caso de 2 (presente estudo) ou 3 variáveis independentes recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR). Para 4 fatores pode-se fazer opção por um DCCR ou inicialmente um planejamento fracionário do tipo  $2^{4-1}$ , como uma investigação inicial em relação aos efeitos das variáveis independentes estudadas sobre as respostas desejadas. Cinco fatores resultam em um número elevado de ensaios  $2^k + 10$  pontos axiais + 3 repetições no ponto central. Neste caso, o processo ainda está longe das condições otimizadas, não compensando investir diretamente num planejamento fatorial completo.

O ajuste das respostas experimentais a um modelo de primeira ou segunda ordem tem a forma seguinte:

$$y = \beta_0 + \sum_j \beta_j \cdot x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_j \beta_{jj} x_j^2 + e \quad (1)$$

em que os  $\beta$ 's são coeficientes de regressão do modelo de variáveis independentes  $x_i$  e  $x_j$ . É uma das vantagens do uso de um DCCR. Em geral, num DCCR com dois níveis originais, tem-se:  $2^k$  pontos fatoriais +  $2.k$  pontos axiais + um número arbitrário de pontos centrais.

Alguns valores para  $\alpha$  são mostrados no Quadro 1.2, a seguir.

Quadro 1.2 – Alguns valores de  $\alpha$  para diferentes valores de k

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

O valor de cada variável codificada pode ser estimado de acordo com:

$$c_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta} \quad (2)$$

Em que:

$c_i$  - valor codificado da variável independente no nível i

$x_i$  - valor da variável independente no nível i

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

$\delta$  - espaçamento entre as variáveis independentes vizinhos ao ponto central

### 1.3.1.3 Metodologia de Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas para desenvolvimento, melhoria e otimização de produtos e processos (MONTGOMERY e BETTENCOURT JR, 1977). Essas técnicas são orientadas à análise de experimentos planejados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem das respostas de interesse através de superfícies n-dimensionais. Após a construção de modelos para a resposta, o interesse recai na busca do ajuste ótimo, ou seja, na busca de regiões que conduzam a um valor mínimo, máximo ou nominal, conforme a característica da resposta em questão.

As maiores aplicações da MSR são encontradas em situações particulares da Engenharia, onde diversas variáveis de entrada influenciam potencialmente o desempenho ou características da qualidade do processo, também denominadas de

respostas. As variáveis de entrada são chamadas de variáveis independentes e estão sujeitas ao controle do pesquisador. O objetivo principal da MSR consiste da estratégia experimental para estudar as influências dessas variáveis independentes, do desenvolvimento de um modelo estatístico empírico que correlacione a resposta e variáveis do processo e de métodos de otimização para encontrar os valores das variáveis de processo que produzam valores desejáveis dessas respostas, principalmente quando essas variáveis controláveis, ou fatores, são a níveis contínuos. Após a construção de modelos para a resposta, o interesse do pesquisador recai na busca do ajuste ótimo, ou seja, na busca de regiões que conduzam a um valor mínimo, máximo ou nominal, conforme a característica desejável da resposta em questão.

A proposta da MSR é responder questões gerais referentes ao comportamento da resposta dentro de um intervalo de interesse e, em particular, mapear regiões de alto desempenho. Os estudos envolvem três etapas principais (WU e HAMADA, 2000): i) planejar o experimento, distribuindo adequadamente os pontos experimentais; ii) estimar os coeficientes da equação da superfície de resposta e; iii) explorar a superfície de resposta encontrando o ajuste dos fatores que otimiza a resposta. Segundo ainda Wu e Hamada (2000) a estratégia de análise supõe que a resposta  $Y$  possa ser representada por uma função polinomial das variáveis independentes  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Entre os modelos possíveis estão o modelo linear, o modelo quadrático, ambos contidos na Equação (1) e, também, modelos não lineares. Os coeficientes dos modelos podem ser estimados mais eficientemente se for usado um planejamento experimental adequado para a coleta de dados. Por exemplo, para ajustar modelos lineares, toda a classe de experimentos  $2^k$  é particularmente eficiente. Permitem fracionamento, blocagem e a suposição de linearidade que podem ser testadas acrescentando-se alguns pontos centrais (Fig.1.1).

Para o ajuste de modelos quadráticos, recomenda-se um Delineamento Composto Central Rotacional, o qual tem como base um planejamento do tipo  $2^k$ , exige um número pequeno de ensaios, pode contemplar blocagem, rotacionalidade e ortogonalidade, conforme se exemplifica na Fig. 1.2 (MONTGOMERY, 1991). Como pode ser visto na Fig. 1.2 o DCCR é a soma de um experimento  $2^k$  mais uma estrela, mais pontos centrais. Por isso o nome projeto composto. Os pontos da parte fatorial ( $2^k$ ) permitem a estimativa de termos lineares e interações. Os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos quadráticos puros. Dessa forma, geralmente um DCCR consiste de três partes:

- a) parte fatorial, ou seja  $2^k$  vértices de um cubo k dimensional, (ou uma fração desses vértices) com coordenadas  $\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1$ ;
- b) a parte em estrela,  $2k$  vértices com coordenadas  $0, \dots, \pm\alpha, \dots, 0$ ;
- c) no ponto central, com coordenadas  $0, 0, \dots$

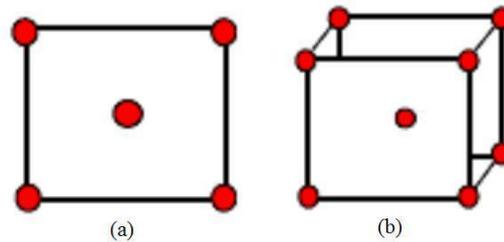


Figura 1.1 – (a) Planejamento  $(2^2)$  com um ponto central e;  
 (b) Planejamento  $(2^3)$  com um ponto central

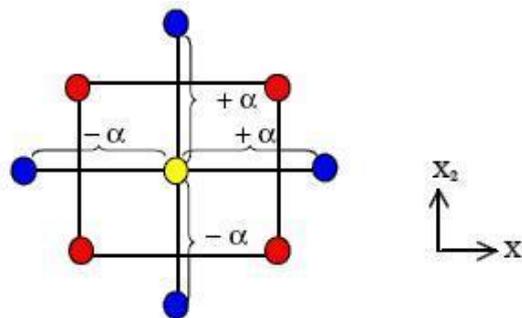


Figura 1.2 – Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 2 fatores independentes

A Figura 1.3 apresenta um DCCR para um experimento de três fatores:

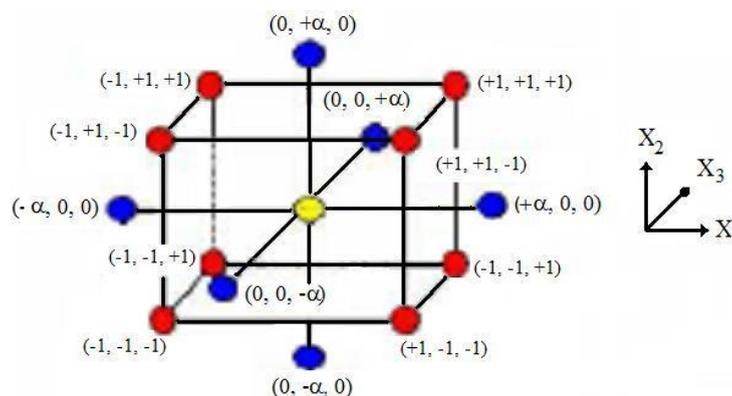


Figura 1.3 – Exemplo de um planejamento do tipo DCCR para 2 níveis e 3 fatores independentes

Caso seja necessário, o planejamento pode contemplar repetições do ponto

central, aumentando os graus de liberdade do termo de erro, ou seja, permitindo uma avaliação mais precisa da variância experimental. O valor de alfa pode ser definido de modo que o projeto tenha algumas propriedades interessantes. Por exemplo, alfa pode ser calculado para atribuir rotacionalidade ou ortogonalidade ao planejamento (OEHLERT, 2000).

Um planejamento rotacional assegura a mesma precisão nas estimativas de Y para todos os pontos do espaço amostral. Para atribuir rotacionalidade ao projeto, o valor de alfa deve ser definido usando (RODRIGUES e IEMMA, 2005):

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (3)$$

Outra possibilidade é atribuir ao projeto a condição de ortogonalidade. Nesse caso, as estimativas dos coeficientes de termos lineares e quadráticos resultam independente, ou seja, essas estimativas não se alteram quando algum termo é eliminado do modelo. Para atribuir ortogonalidade ao projeto, o valor de alfa deve ser definido usando (BOX et al., 2005):

$$\alpha = \left\{ \frac{[(2^k + T)^{1/2} - (2^k)^{1/2}]}{4n^2} \right\} \quad (4)$$

Em que F refere-se ao número de pontos da parte fatorial ( $2^k$ ), T é o número de pontos adicionais (estrela mais pontos centrais), multiplicado pelo número de repetições n. Por fim, os DCCR's são particularmente eficientes quando existe a necessidade de blocagem. Nesse caso, o projeto é normalmente dividido em dois:

- um bloco contendo a parte fatorial e;
- o outro bloco contendo a parte em estrela.

Os pontos centrais são utilizados para assegurar o mesmo número de ensaios em cada bloco. Para assegurar que os blocos sejam ortogonais entre si, o que irá permitir extrair o efeito entre blocos, caso exista, basta ter o mesmo número de ensaios em cada bloco e definir o valor de  $\alpha$  usando:

$$\alpha = \sqrt{2^{k-1}} \quad (5)$$

### 1.3.1.4 Análise de Variâncias dos Efeitos do Experimento Fatorial $2^k$

O objetivo da análise de variância (ANOVA – Analysis of variance) é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos principais e de interação significativos nas respostas de um sistema. Como forma de ilustração considere-se um planejamento fatorial do tipo  $2^2$ . O modelo matemático que define a variação da variável resposta em função das variáveis independentes é dado por (DEVOR et al., 1992):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (6)$$

em que  $\mu$  é a média dos resultados,  $\tau_i$  é o efeito principal do fator A,  $\beta_j$  é o efeito principal do fator B,  $(\tau\beta)_{ij}$  é o efeito de interação dos fatores A e B e  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental. A partir da ANOVA, procura-se verificar se alguns dos coeficientes da Equação (6) são resultados do erro experimental, ou se são realmente efeitos significativos. Dessa forma, a contribuição de qualquer efeito principal ( $E_i$ ) no modelo é dada pela soma de quadrados desses efeitos ( $SS_{E_i}$ ) conforme a equação:

$$SS_{E_i} = \frac{(E_i)^2}{2^k \cdot n} \quad (7)$$

em que n é o número de observações realizadas.

A soma quadrática das interações realizadas é determinada como:

$$SS_{E_{12}} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{y_{ij}^2}{2n} - \frac{T^2}{4n} - SS_{E_1} - SS_{E_2} \quad (8)$$

Em que T é a soma total das observações e  $y_{ij}$  representa as respostas experimentais das interações realizadas.

O somatório dos quadrados das diferenças é estimado por:

$$SS_D = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{y_{ij}^2}{12n} - \frac{T^2}{4n} \quad (9)$$

O somatório quadrático dos erros é então dado por:

$$SS_R = SS_D - SS_{E_1} - SS_{E_2} - SS_{E_{12}} \quad (10)$$

Os resultados da ANOVA são representados no Quadro 1.3. Neste caso, esses resultados representam a análise do planejamento fatorial de dois fatores com dois níveis. As colunas nesse quadro apresentam as fontes de variação, as somas dos quadrados ( $SS_D, SS_{E_1}, SS_{E_2}$  e  $SS_{E_{12}}$ ), os graus de liberdade (gl é a propriedade pela qual quaisquer das  $n-1$  observações de uma amostra determinam a outra observação), os quadrados médios ou variâncias dos parâmetros (MS) e a estatística do teste F.

Quadro 1.3 – ANOVA para um planejamento fatorial  $2^2$

Adaptado de: Montgomery (1991)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F
$E_1$	$SS_{E_1}$	a-1	$MS_{E_1} = SS_{E_1}/a - 1$	$MS_{E_1}/MS_R$
$E_2$	$SS_{E_2}$	b-1	$MS_{E_2} = SS_{E_2}/b - 1$	$MS_{E_2}/MS_R$
Interação $E_{12}$	$SS_{E_{12}}$	(a-1)(b-1)	$MS_{E_{12}} = SS_{E_{12}}/(a-1)(b-1)$	$MS_{E_{12}}/MS_R$
Erro	$SS_R$	abn(n-1)	$MS_R = SS_R/ab(n-1)$	
Total	$SS_D$	abn-1		

O processo apresentado pode ser generalizado para um planejamento fatorial  $2^k$ . Para se estimar a soma dos quadrados para qualquer um dos efeitos, a expressão de cálculo será:

$$SS_{E_{12,\dots,k}} = \frac{(E_{12,\dots,k})^2}{2^k \cdot n} \quad (11)$$

Para analisar e interpretar os efeitos principais e de interação é necessário definir as seguintes propriedades (DEVOR et al., 1992):

- os sinais + e – indicam as direções dos efeitos, isto é, se a resposta aumenta

- ou diminui com a variação de nível de -1 para +1 e;
- a amplitude significa a intensidade do efeito.

A interpretação dos resultados gerados em uma ANOVA segue duas categorias (CALADO e MONTGOMERY, 2003):

- os parâmetros que possuem valores de F (calculado pela ANOVA) maiores que os da estatística F crítica (tabelado) são os que exercem influência sobre o valor da média de resultados e;
- os fatores que possuem valores de F (calculado pela ANOVA) menores que os respectivos valores de F crítica, não causam efeitos significativos sobre a média.

A estatística F crítica, a qual segue uma distribuição com  $\nu_1$  graus de liberdade (numerador) e  $\nu_2$  graus de liberdade (denominador), para um dado nível de significância  $p$  é obtida em tabelas apresentadas na literatura (MONTGOMERY, 1991).

Faz-se necessário ressaltar que um quadro com resultados da ANOVA pode ser obtido através de softwares estatísticos como EXCEL, MINITAB, STATISTICA, entre outros. Também na maioria desses programas encontra-se incluído o valor de  $p$ . Esse valor corresponde à área a qual a estatística F é limite da razão calculada. Com esse parâmetro estatístico é possível concluir sobre as hipóteses nulas sem recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição F. Dessa forma, se o valor de  $p$  for menor que o nível de significância escolhido, a hipótese nula será rejeitada.

Ao se realizar um planejamento experimental deve-se partir de duas hipóteses: a primeira é a hipótese nula ( $H_0$ ), a qual parte do princípio de que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a hipótese testada no experimento; a segunda, ou hipótese alternativa ( $H_1$ ), parte do princípio de que será verdadeira caso a hipótese nula seja considerada falsa (RODRIGUES e IEMMA, 2005).

Podem-se cometer dois tipos de riscos na tomada de decisão por meio da metodologia do teste de hipótese. O primeiro tipo de erro (Erro do tipo I) ocorre se a hipótese nula for rejeitada quando ela for verdadeira. O segundo tipo de erro é o de que a hipótese nula não for rejeitada, mesmo sendo falsa (LEVINE et al., 1998). No entanto,

ao se realizar os experimentos podem-se estimar alguns parâmetros que reduzem a probabilidade de errar nas decisões.

Nível de significância – A probabilidade de se cometer um erro do tipo I é o nível de significância do teste estatístico. Pode-se controlar essa probabilidade decidindo pelo nível de risco que se está disposto a tolerar. A literatura recomenda a adoção de níveis em 0,1 ou menos. Com isso os valores críticos que dividem as regiões de rejeição e não-rejeição podem ser determinados de acordo com a Figura 1.4.

Coeficiente de confiança – é o complemento da probabilidade de um erro do tipo I que é identificado como  $(1-\alpha)$ . Quando esse termo é multiplicado por 100 passa a representar o nível de confiança do experimento. Com esse procedimento garante-se um valor pequeno para a probabilidade de erro do tipo II.

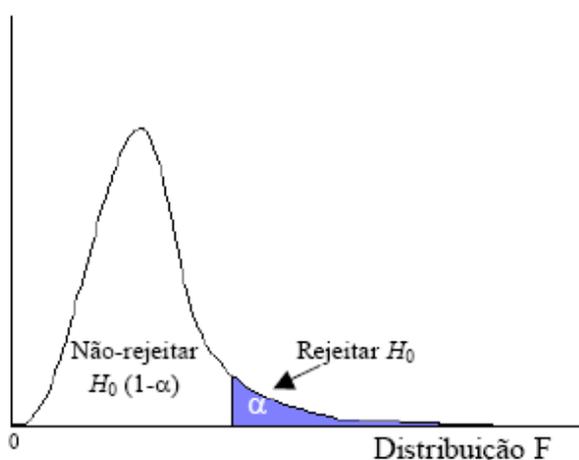


Figura 1.4 – Regiões de rejeição e não rejeição para a distribuição F

Adaptada de: Levine, Berenson e Stephan (1998)

## 1.3.2 Gesso

### 1.3.2.1 Generalidades

Segundo Linhales (2003), os termos “gipsita” ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), “gipso” e “gesso”, são frequentemente usados como sinônimos. Todavia, a denominação gipsita é reconhecidamente a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso é o termo mais apropriado para designar o produto calcinado. A gipsita é uma rocha sedimentar, mineral abundante na natureza, e em sua composição estão presentes, basicamente, a anidrita, sulfato de cálcio anidro  $\text{CaSO}_4$  (de pouca expressão

econômica) e algumas impurezas, geralmente argilo-minerais, calcita, dolomita e material orgânico. Essas espécies minerais são encontradas em depósitos evaporíticos originados de antigos oceanos. A formação geológica desses depósitos é explicada pela ocorrência de precipitação, seguida de evaporação e, conseqüente, concentração dos sais (JORGENSEN, 1994).

Quanto à forma de ocorrência, são conhecidas três variedades de gipsita: como cristais monoclinicos prismáticos ou tabulares, constituem a variedade chamada *selenita*; como agregado de fibras paralelas, mais ou menos longas, é denominada gipsita fibrosa e sob a forma maciça ou compacta de granulação muito fina (a mais frequente e economicamente importante), que quando se apresenta com a cor branca translúcida ou suavemente sombreada é denominada alabastro (JORGENSEN, 1994).

Segundo Sobrinho et al. (2001), a gipsita tem dureza 2 na escala de Mohs, densidade 2,35, índice de refração 1,53, é bastante solúvel e sua cor é variável entre incolor, branca, cinza, amarronzada, a depender das impurezas contidas nos cristais. A sua composição química (ou estequiométrica) média apresenta 32,5% de CaO, 46,6% de  $\text{SO}_3$  e 20,9% de  $\text{H}_2\text{O}$ . Trata-se de um mineral muito pouco resistente que, sob a ação do calor (em torno de  $160^\circ\text{C}$ ), desidrata-se parcialmente, originando um semi-hidrato conhecido comercialmente como gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ).

O mineral gipsita é geralmente encontrado em granulação fina a média, estratificada ou maciça, coloração em tons claros de amarelo e marrom, constituindo as denominadas rochas gipsíferas. Destas, fazem parte também outros minerais, eventuais e sempre em quantidades subordinadas, entre os quais se incluem: *anidrita*, *calcita*, *dolomita*, *halita*, *enxofre*, *quartzo* e *argilas*. Na realidade são essas rochas que constituem o que se costuma designar de minério de gipsita, sempre que os teores de  $\text{SO}_3$  ou de gipsita presentes satisfazem às exigências do mercado consumidor (SOBRINHO et al., 2001).

O mineral gipsita pode ser utilizado na forma natural ou calcinado. A forma natural é bastante usada na agricultura e na indústria de cimento. Na indústria cimenteira a gipsita é adicionada ao clínquer durante a moagem, na proporção de 2% a 5%, para retardar o tempo de pega do cimento. Na agricultura, a gipsita pode atuar como: agente corretivo de solos ácidos, como cálcio; como fertilizante em culturas específicas

como amendoim, batatas, legumes e algodão e como condicionador de solos, aumentando a permeabilidade, a aeração, a drenagem, a penetração e retenção da água (VELHO, et. al., 1998). Enquanto a forma calcinada, conhecida como gesso, encontra várias utilizações: na construção civil (placas, sancas, móveis, revestimentos, cerâmicas, etc.), na medicina (material ortopédico ou dental), etc.

### **1.3.2.2 História do Gesso**

Segundo Le Plâtre (apud GESSO BRASIL, 2010), as primeiras evidências arqueológicas, da utilização do gesso, se deu através das descobertas em ruínas na Síria e na Turquia onde foram encontrados recipientes, pisos e afrescos determinados de 8 mil ano AC e que em ruínas da cidade de Jericó foram encontrados traços de gesso em moldagens e modelagens evidenciados de 6 mil anos AC. Porém, em construções, evidências foram encontradas na pirâmide do Egito erguida no ano de 2800 AC, pelo rei Quéops, onde o gesso foi aplicado nas juntas estanques de precisão, por entre os blocos de aproximadamente 16 toneladas e a técnica utilizada é desconhecida até os dias atuais. Já o primeiro registro em documento encontra-se no tratado de Pedra, subscrito pelo filósofo Theofraste, o qual viveu entre os séculos IV e III AC, onde relata a existência de gesseiras em Chipre, na Fenícia e na Síria citando o emprego do gesso em argamassa utilizada nas ornamentações, nos afrescos, na confecção de estátuas e nos baixos relevos. Entretanto, o emprego em larga escala na decoração se deu no período renascentista, principalmente, na época do barroco, onde foi denominado de gesso estuque. Na construção civil, apesar da fabricação do gesso ser de forma empírica, a grande disseminação, na França, se deu em face de uma lei de Luiz XIV de 1667. Apesar desta, somente em 1768 Lavoisier apresentou o primeiro estudo científico dos fenômenos, que são a base dos estudos da preparação do gesso.

Deve-se aos cientistas Van T'Holf e Lê Chantelier, no século XIX trabalhos científicos que trouxeram uma explicação científica para a desidratação da gipsita (SOUZA, 2010).

A partir da Revolução industrial do século XX, os equipamentos para a fabricação do gesso não mais tiveram um conceito rudimentar, pois, passaram a agregar mais tecnologia e também com essa melhoria da tecnologia dos produtos propiciou uma otimização do emprego do gesso pelo ser humano em benefício da coletividade.

### 1.3.2.3 Produção da Gipsita no Mundo

A exploração de gipsita se dá em oito estados do Brasil, porém, aquelas jazidas mais viáveis economicamente estão situadas na **Bacia Sedimentar do Araripe**, região fronteira dos Estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, com este último apresentando o melhor resultado. A gipsita ocorre sob a forma de duas camadas não contíguas, das quais a superior é sempre mais potente, sobretudo em Pernambuco, onde apenas ela tem sido explorada. No Ceará elas são menos potentes, porém a exploração se estende a ambas. Estas camadas constituem o Membro Ipubi da Formação Santana, de idade cretácea. O **Pólo** tem uma participação da ordem de 20% no total das reservas nacionais (SOBRINHO et al., 2001) conforme mostra a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Reservas brasileiras de gipsita em 2000

UF	MEDIDA	INDICADA	INFERIDA	TOTAL	%
AMAZONAS	357.273	1.395.720		1.752.993	0,1
BAHIA	461.343.861	93.997.000	166.280.000	721.620.861	41,7
CEARÁ	9.944.432	39.000		9.983.432	0,6
MARANHÃO	46.904.580	6.520.355	100.000	53.524.935	3,1
MINAS GERAIS	600			600	0,0
PARÁ	189.619.891	204.119.355	186.739.654	580.478.900	33,6
PERNAMBUCO	177.910.574	72.836.751	96.912.061	347.659.386	20,1
PIAUI	1.817.650	522.000	1.243.000	3.582.650	0,2
TOCANTIS	740.652	4.443.011	5.372.813	10.556.476	0,6
TOTAL	888.639.513	383.873.192	456.647.528	1.729.160.233	100,0

Fonte: DNPM – Anuário Mineral Brasileiro 2001

O Brasil possui as maiores reservas conhecidas, mas não se encontra nem mesmo entre os dez maiores produtores mundiais, em que os Estados Unidos lidera a lista com a sua produção alcançando 22 milhões de toneladas. Em 2007, os EUA se mantiveram na liderança da produção mundial de gipsita, seguido de longe pela Espanha, com 13,2 milhões e pelo Irã, com 13 milhões. O Brasil tem cerca de 98% das suas reservas concentradas na Bahia (42,7%), Pará (30,3%) e Pernambuco (25,1%), ficando o restante distribuído, em ordem decrescente, entre o Maranhão, Ceará, Piauí, Amazonas e Tocantins. As reservas do Pará não têm concessão de Lavra por restrições ambientais, por estar situada no interior de uma floresta nacional; a grande

distância dos centros consumidores; e a dificuldade de transferência do seu controle (SOBRINHO; AMARAL e DANTAS, 2008).

Na Tabela 1.2, a seguir, são apresentados os resultados da produção obtidos em 2006 e 2007 de diversos países:

Tabela 1.2 - Reserva e produção mundial de gipsita

Discriminação	Reservas <sup>(1)</sup> (10 <sup>3</sup> t)		Produção (10 <sup>3</sup> t)			
	Países	2007 <sup>(p)</sup>	%	2006 <sup>(r)</sup>	2007 <sup>(p)</sup>	%
Brasil	1.299.843	-		1.711	1.923	1,5
Estados Unidos		-		21.100	22.000	17,3
Espanha		-		13.200	13.200	10,4
Irã		-		13.000	13.000	10,2
Canadá		-		9.500	9.500	7,5
Tailândia		-		8.355	8.400	6,6
China		-		7.500	7.700	6,1
México		-		7.000	7.400	5,8
Japão		-		5.950	5.950	4,7
Austrália		-		4.000	4.000	3,2
Outros Países		-		33.795	33.927	26,7
Total	Abundantes	-		125.000	127.000	100,0

Fontes: DNPM-DDEM e Mineral Commodity Summaries – 2008

Nota: (p) Dados preliminares um Revisado (1) Reservas medidas + indicadas  
(...) Não disponível

Segundo o MME (2009), as minas no Brasil se apresentam distribuídas conforme a Tabela 1.3 e na Tabela 1.4 onde se apresenta a distribuição das reservas brasileiras. Assim é possível situar-se em dados mais atualizados de que o nordeste através dos estados da Bahia, Pará e Pernambuco juntos detêm cerca de 96,9% do somatório das reservas medidas e indicadas. Embora na Bahia, a jazida de Camamu tenha a vantagem de se situar cerca de 1.000 km mais próxima da região sudeste (principal centro de consumo), a mesma apresenta, como obstáculo, uma grande espessura do capeamento (30 a 60 m) e o seu aproveitamento projetado para implantação de lavra subterrânea. A reserva brasileira de gipsita atinge mais de 1,7 bilhões de toneladas, das quais 1,3 bilhões classificadas no grau de reserva demonstrada (medida + indicada).

Tabela 1.3 – Distribuição das Minas no Brasil (2007)

UF	Número de Minas	Ativas	Paralisadas
AM	1	1	0
BA	3	0	3
MA	11	3	8
PI	2	0	2
PE	55	37	18
CE	4	2	2
TO	2	1	1
PA	0	0	0
TOTAL/BR	78	44	34

Fonte: J. MENDO (2009)

Tabela 1.4 – Distribuição da reserva de gipsita em 2007

UF	Reserva Medida	Reserva Indicada	Reserva Inferida	Total
AM	195.830	1.365.120	0	1.560.950
BA	461.343.861	93.997.000	166.280.000	721.620.861
MA	13.787.974	1.524.951	0	15.312.925
PI	1.872.570	522.000	1.234.000	3.637.570
PE	233.555.140	93.155.977	78.929.249	405.640.366
CE	3.939.783	0	0	3.939.783
TO	658.191	186.211	236.790	1.081.192
PA	189.619.891	204.119.355	186.739.654	580.478.900
TOTAL	904.973.240	394.870.614	433.428.693	1.733.272.547

Fonte: J. MENDO (2009)

### 1.3.2.4 Processos de Produção do Gesso

A gipsita dá origem a três sub-produtos principais: gesso *in natura*, gesso tipo  $\alpha$  e gesso tipo  $\beta$ . Cada um desses tipos de gesso resulta de processo industrial particular, responde também pela maior ou menor agregação de valor ao produto final, formando a cadeia principal de produção (BARROS et al., 2006).

Segundo Xiuchun et al. (1986) (apud Côrte Real (2009)), o gesso é um material frágil que apresenta uma resistência maior na compressão do que na flexão e ao impacto além demonstrar influências em suas propriedades morfológicas e microestruturais devido as suas características após a pega. Esses fatores estão relacionados à natureza do material inicial (gesso -  $\alpha$  ou  $\beta$ ) e ao processo de fabricação: condições de moagem, consistência (razão mássica água/material seco) e da presença de aditivos.

Os percentuais de consumo per capita de gesso na Europa (75 kg/habitante), nos Estados Unidos (103 kg/habitante) e no Brasil (13 kg/habitante), aliados às quantidades de produtos derivados do gesso e da gipsita nesses locais, 450 e 14, respectivamente, são parâmetros através dos quais se pode afirmar que existe uma necessidade premente de desenvolvimentos científico e tecnológico na área gesseira brasileira (JOHN e CINCOTTO, 2003). Além disso, o baixíssimo número de profissionais qualificados para o desenvolvimento tecnológico nas empresas do Pólo Gesseiro do Araripe-PE dificulta a transferência de tecnologia entre esse setor e a Academia.

O minério da região do Araripe é considerado o de melhor qualidade no mundo, apresentando um teor que varia de 88% a 98% de pureza. Nesse minério, observa-se a ocorrência de diferentes variedades mineralógicas de gipsita, conhecidas na região com os nomes de: *cocadinha*, *rapadura*, *pedra Johnson*, *estrelinha*, *alabastro* e *selenita*, além da *anidrita*. A utilização de cada uma dessas variedades depende da utilização industrial a que se destina (BALTAR et al., 2004). As espécies *alabastro*, *selenita* e *anidrita* são utilizadas na fabricação de cimento.

Segundo a Sindugesso de Pernambuco (2010), estão envolvidas com o processo de produção, na região do Araripe, empresas de mineração da gipsita, indústrias de beneficiamento, empresas de transformação, comercialização e distribuição do gesso e produtos derivados, além de empresas do setor de construção civil, indústrias de máquinas e ferramentas, fabricantes de explosivos, transportadoras, oficinas mecânicas, hotéis, indústria química e fabricantes de embalagens, constituindo uma cadeia produtiva do setor, configurando-se assim o APL – Gesso (Arranjo Produtivo Local do Gesso).

O Pólo Gesseiro de Pernambuco possui uma reserva estimada em 1,22 bilhões de toneladas que representa 40% das jazidas mundiais, sendo responsável por 95% da produção brasileira. Do gesso produzido, 61 % é usado na fabricação de blocos e placas, 35% em revestimento e o restante em outros usos. Entre essas utilidades, 800 mil toneladas de gipsita são consumidas pela indústria de cimento e mais de 200 mil toneladas são vendidas como gesso agrícola, cada vez mais usado na agricultura em escalas industriais. Para tanto, a região é contemplada com 80% das minas do país, ou seja, 39 unidades das minas de gipsita, 139 indústrias de calcinação e cerca de 726 indústrias de pré-moldados, contabilizando um número de empregos diretos de 13200

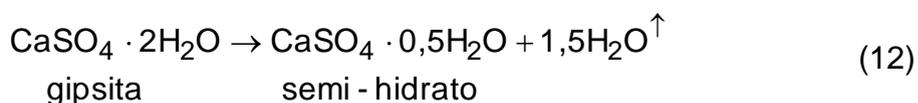
unidades e empregos indiretos de 66.000 unidades, aproximadamente (SINDUGESSO, 2010).

O tratamento que a gipsita recebe, para o beneficiamento por desidratação térmica, inclui o desenvolvimento de algumas operações básicas: britagem; rebritagem; peneiramento; encilhamento; calcinação; estabilização térmica em silos; moagem conforme mercado; encilhamento e ensacamento (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

Dentre elas, existe uma considerada a mais importante: a calcinação, por influenciar diretamente no tipo e qualidade do gesso desejado, podendo ser reciclável ou não, e, ainda, contribuir com uma reclassificação (Resolução 307/02 do CONAMA) e passar a adquirir uma maior aplicabilidade e aproveitamento dentro do universo da construção civil (CAVALCANTI, 2006).

Às temperaturas relativamente baixas (150°C – 170°C), a gipsita perde parte de sua água de composição (14% a 16% massa/peso de água combinada) resultando no semi-hidrato  $\left( \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \right)$  (FOLLNER et al., 2002).

O minério gipsita é transformado em gesso com auxílio de grandes fornos, podendo estes serem dos tipos rotativo, marmitta, a leito fluidizado, ciclones calcinadores entre outros. Um bom contato entre as partículas de gipsita com os gases de aquecimento e/ou superfície de contato e uma granulometria adequada são parâmetros essenciais para uma conversão desejada. Os vapores de água formados durante a reação de conversão (eq. 12):



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

O gesso, um pó fino, que possui uma boa resistência à compressão, baixa resistência à flexão e baixa resistência ao impacto, 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

(SANTOS,1996). O semi-hidrato *alfa*, ou gesso *alfa*, pode ser obtido pela desidratação realizada em autoclave, a pressões acima da pressão atmosférica manométrica, ou desidratando-se o minério de gipsita em uma suspensão aquosa ácida ou em presença de eletrólitos (FOLLNER et al., 2002) sendo caracterizado por cristais bem formados.

Segundo Cavalcanti (2006), o gesso *alfa* apresenta-se com características diferentes daquelas dos gessos *beta* devido a este ter maior energia livre e maior solubilidade que o *alfa*, o que leva a propriedades diferentes da gipsita reformada pela re-hidratação. As partículas (cristais) do semi-hidrato *beta* são irregulares e porosas e as partículas (cristais) do semi-hidrato *alfa* são prismáticas, compactas, regulares e resistentes. O gesso *alfa* precisa de menos água do que o *beta* para ser trabalhado em seus cristais e que 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 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.

Segundo a CETEM (2002), as especificações de mercado exigem que o gesso *beta*, utilizado principalmente na construção civil, tenha 95% de gipsita; o gesso *alfa* (ortopédico ou dental) deve ter no mínimo 98% de gipsita; enquanto a gipsita utilizada na fabricação de cimento deve ter um mínimo de 40%  $SO_3$ .

O processo de hidratação do gesso deve resultar em um produto com composição exatamente igual a que o originou, a gipsita. Entretanto, há uma grande perda deste material que se torna resíduo sólido e pode ir para aterro sanitário ou ser depositado de forma irregular em terreno baldio contaminando o meio ambiente. Por isso, faz-se necessário viabilizar sua reciclagem.

A perda de gesso na construção civil ocorre diariamente em grande quantidade (45% do gesso na construção civil e, para os fabricantes, perdas de 30% na massa de gesso) (HARADA e PIMENTEL, 2009). O gesso é um material tóxico que libera íons  $Ca^{+2}$  e  $SO_4^{-2}$  que alteram a alcalinidade do solo ou água contaminando lençóis freáticos (FIANO e PIMENTEL, 2009).

As técnicas utilizadas, hoje, não permitem que o gesso seja reutilizável. No entanto, já existem processos em estudos que viabilizam o gesso comum *beta* de melhor qualidade preparado para ser reciclado. Para isso, será necessário o controle das condições operacionais que originam o semi-hidrato inicial. Segundo Cavalcanti (2006) a reciclagem de resíduos de gesso como aglomerante demanda, além da moagem, a remoção de impurezas e contaminantes incorporados ao processo de geração de resíduos, uma calcinação em condições adequadas.

#### **1.3.2.5 Aplicações do Gesso**

O hemidrato *beta* é utilizado na indústria da construção civil, indústria cerâmica e indústria de modelagem. Dentre os tipos de gesso *beta*, destacam-se os de fundição e os de revestimento manual, sendo ambos produzidos no Brasil sem a adição de aditivos químicos. Esses produtos são diferenciados pelo tempo de pega, definido como o tempo necessário para que o gesso (ao ser misturado com a água) complete seu ciclo de endurecimento. O tempo de pega do produto é manipulado através do processo de calcinação (BALTAR et al., 2004).

O gesso de fundição é utilizado para a confecção de pré-moldados de gesso. Estão compreendidos, nesse grupo, as placas para execução de forros suspensos e os blocos para divisórias, destinados à construção civil ou para confecção de elementos decorativos como estatuetas e imagens.

O gesso de revestimento de aplicação manual é utilizado para paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento. O gesso de revestimento necessita atingir um grau de calcinação maior do que o gesso de fundição. A maior desidratação da gipsita reduz a velocidade de re-hidratação do gesso, segundo estágio do ciclo de endurecimento, aumentando o seu tempo de pega (BALTAR et al., 2004).

Segundo a empresa Gesso Brasil (2010), o gesso, hoje, não é só utilizado como embelezamento ou por ser exclusivamente barato, mas as peças confeccionadas com este material podem servir como isolamento térmico e acústico, bem como, são utilizados para se manter equilibrada a umidade do ar em ambientes fechados, devido à facilidade que o mesmo tem em absorver água.

A utilização de determinado tipo de gesso se dará de conformidade com o uso das propriedades físicas que a aplicação exigir.

Na construção civil e em decorações de ambientes, onde o gesso encontra as suas maiores aplicações, são utilizados gessos comuns (*stucco*) encontrado nas lojas de materiais de construção. O gesso encontrado sob a forma de pó, blocos ou placas, presta-se a uma grande variedade de aplicações:

- como revestimento de paredes;
- para fundir molduras, na moldagem e fixação de placas para forros;
- fabricar como sancas, molduras para tetos, colunas e placas para composição de paredes e forros rebaixados que permitem embutir caixas de som e *spots* de luz;
- como chapas de gesso acartonado ( compostas, basicamente, por duas folhas de papel recheadas de gesso), além de permitir a construção de paredes divisórias.
- na decoração de ambientes como armários, móveis e objetos decorativos.
- usados na confecção de portas corta fogo através de um compósito com fibra de vidro.

Entretanto, o gesso é também muito utilizado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários; como agente desidratante; como aglomerante do giz e na briquetagem do carvão.

Na medicina são frequentemente utilizados no auxílio do tratamento de fraturas ortopédicas.

Dentre as principais utilizações do gesso alfa estão:

- bandagens de alta resistência;
- matrizes para indústria cerâmica;
- indústria de modelagem (usados por artistas plásticos);
- ortopedia;
- odontologia e
- indústria automobilística.

O gesso odontológico pode ser do tipo III ou do tipo IV. Esse último, um produto mais nobre, obtido a partir de aditivos e que se caracteriza por uma menor consistência, maior resistência mecânica e menor expansão (BALTAR et al., 2004).

O gesso por ser um material considerado altamente biocompatível, com uma longa história clínica abrangendo mais de 100 anos e sendo um dos materiais sintéticos, simples, servindo como enxerto ósseo, é considerado com grande compatibilidade tecidual. Tem sido continuamente usado para tratar doença do periodonto, perda óssea alveolar e aumento do seio maxilar (EI-MAGHRABY et al., 2010).

A fabricação de cada uma dessas variedades de gesso requer condições específicas com relação ao tipo de gipsita, tipo de forno, condições de calcinação e tratamento posterior (BALTAR et al., 2004).

As propriedades físico-mecânicas do gesso exigidas, conforme as normas NBR13207/94-gesso para construção civil – especificações, NBR 12127/91 – gesso para construção – determinação das propriedades física do pó e NBR 12129/91 – gesso para construção – determinação das propriedades mecânicas, são:

#### Exigências físicas e mecânicas da NBR 12127/91

O gesso para construção civil (gesso fino para revestimento, gesso fino para fundição, gesso grosso para revestimento, gesso grosso para fundição) deve atender às exigências indicadas nas Tabelas 1.5 e 1.6.

Tabela 1.5 – Exigências físicas do gesso para construção civil

Determinações físicas e Mecânica	Unidades	Limites
Resistência a compressão (NBR 12129)	MPa	>8,40
Dureza (12129)	N/mm <sup>2</sup>	>30,00
Massa unitária (NBR 12127)	kg/m <sup>3</sup>	>700,00

Tabela 1.6 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil

Classificação do gesso	Tempo de Pega (min) (NBR 12128)		Módulo de Finura (NBR 12127)
	Início	Fim	
Gesso Fino para Revestimento	>10	>45	<1,10
Gesso Grosso para Revestimento	>10	>45	>1,10
Gesso Fino para Fundição	4 – 10	20-45	<1,10
Gesso Grosso PA Fundição	4 – 10	20 – 45	>1,10

Os semi-hidratos e os sulfatos anidros solúveis se combinam com a água através da produção de uma fina malha cristalizada, interpenetrada, responsável pela coesão do conjunto. Tal fenômeno, conhecido pelo nome de pega do gesso, é acompanhado de elevação de temperatura, por ser a hidratação uma reação exotérmica (MILITO, 2001).

As resistências à flexão e ou à compressão são influenciadas pela quantidade de água, bem como a velocidade de reação da pega.

Para se obter uma boa resistência mecânica dos pré-moldados de gesso, onde se consiga uma melhor resistência à flexão e ao impacto, é necessário que se leve em consideração a natureza do gesso utilizado ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) e o processo de preparação: consistência (água/gesso em peso) e a presença de aditivos. A literatura apresenta associações com os pré-moldados de gesso que levaram a melhoramentos em suas propriedades. Podemos citar: testes com fibras naturais ou sintéticas e ou aditivos químicos.

### 1.3.3 Água de cristalização

O uso da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é justificado, principalmente, pela propriedade do sulfato de cálcio, rapidamente, perder ou recuperar a água de cristalização.

A água de cristalização é aquela presente em compostos cristalinos em determinadas proporções. Muitos sais cristalinos formam compostos hidratados contendo 1,2,3... ou mais moléculas de água por molécula de composto e a água pode

ser aprisionada no cristal de várias formas. Assim, as moléculas de água podem simplesmente ocupar posições na rede do cristal ou podem formar ligações com os ânions e os cátions presentes. Não se deve confundir com água higroscópica, pois esta é absorvida à superfície do sólido.

### 1.3.4 Monômeros

A palavra monômero vem do grego mono, único, e mero, parte. Para a química os monômeros são simples unidades moleculares que se ligam covalentemente para formar macromoléculas chamadas de Polímeros.

Os centros reativos presentes no monômero são responsáveis pela formação de novas ligações com outras moléculas, dentro de condições específicas de polimerização. O número desses centros reativos presentes no monômero é o que define a funcionalidade do polímero. Exemplo: o estireno é um monômero bifuncional dentro de condições de reação de poliadição, porque cada dupla ligação tem possibilidade de promover a ligação com outras duas moléculas (AKCELRUD, 2007).

O estireno é um hidrocarboneto aromático não saturado e possui os sinônimos de estírol, feniletileno e vinilbenzeno (INNOVA S.A., 2004). À temperatura ambiente é líquido oleoso incolor e polimeriza com facilidade na presença do oxigênio. A sua fórmula química é  $C_6H_5CHCH_2$  e sua estrutura molecular após a polimerização é mostrada pela Figura 1.5. Pode ser obtido industrialmente a partir de vários processos, entretanto o mais utilizado consiste na desidrogenação do etil-benzeno. O estireno foi adquirido do representante comercial com um grau de pureza superior a 99,8%, e massa do inibidor P-Terc Butil Catecol máximo de 0,01 %.

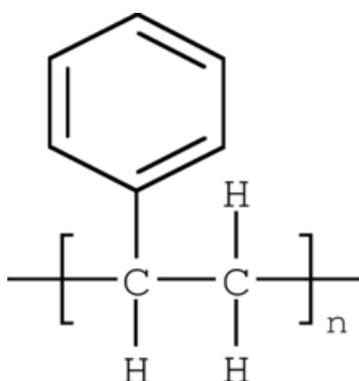


Figura 1.5 - Fórmula estrutural da cadeia de poliestireno

Por se tratar de um material inflamável, na fase líquida e gasosa, e para se manter a estabilidade e a reatividade química do produto, é necessário que se mantenha o nível mínimo de inibidor TBC (p. terc butil catecol) evitando-se, assim, que haja polimerização. Deve-se armazená-lo a temperatura inferior a 32°C porque a temperaturas elevadas pode haver decomposição do produto. Em decomposição pode liberar vapores ácidos, monóxidos de carbono e dióxido de carbono, e a altas temperaturas gera gases tóxicos e irritantes (MAKENI, 2004).

Atualmente já existem tecnologias desenvolvidas para produção de alguns monômeros importantes como o estireno e ácido acrílico através de fontes renováveis como o álcool etílico, a sintetização do bagaço de cana e do óleo de mamona (FIGUEREDO e AGOPYAN, 2006).

### 1.3.5 Polímeros

Alguns materiais produzidos pela química, no Século XX, considerados colóides, consistiam na verdade de moléculas gigantescas que podiam resultar do encadeamento de 10.000 ou mais átomos de carbono e apresentavam repetições de pequenas unidades estruturais (mero) em sua cadeia principal, para formação de cadeias longas de elevado peso molecular, foram denominados de “Polímeros” (Fig.1.6) Palavra Grega – (Poli = muitas, meros = partes) (MANO, 2007). As várias unidades de repetição que reagem para formar o polímero são denominadas de monômeros.

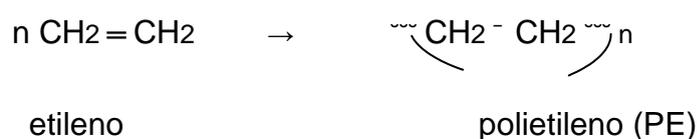


Figura 1.6 - Relação monômero – polímero

Os polímeros podem ocorrer de formas naturais ou sintéticas. Os polímeros naturais apresentam, de um modo geral, estruturas mais complexa que os polímeros sintéticos. Os polímeros sintéticos são obtidos industrialmente, em geral, a partir de moléculas de baixo peso molecular. As características tecnológicas, que impõem diferentes processos tecnológicos, são à base da classificação dos polímeros termoplásticos e termorrígidos. Os polímeros lineares (monômeros em um comprimento contínuo) ou ramificados (estrutura tipo pente com ramificações curtas; longas e dendrítica (ramificações com ramificações)), que permitem fusão por

aquecimento e solidificação por resfriamento, são chamados termoplásticos. Os polímeros que, por aquecimento ou outra forma de tratamento, assumem estrutura tridimensional, reticulada, com ligações cruzadas, tornando-se insolúveis e infusíveis, são chamados termorrígidos (LUCAS et al., 2001).

Das diversas características do processo de preparação de polímeros devem ser analisadas:

- Tipo de reação
- Mecanismo de reação
- Velocidade de crescimento da cadeia
- Formação de subprodutos micromoleculares

Levando-se em consideração a reação pode-se ter poliadições ou reações de adição, onde os polímeros têm, em geral, a cadeia regularmente constituída por apenas átomos de carbono ligados covalentemente (poliestireno) ou policondensações onde os polímeros apresentam, em sua cadeia principal, átomos de carbono e outros elementos (oxigênio, enxofre, fósforo, etc; (poli-tereftalato de etileno)) (LUCAS, 2001).

Quanto ao mecanismo de reação, a poliadição é uma reação em cadeia, apresentando três componentes reacionais: a *iniciação*, a *propagação* e a *terminação*, todos com velocidade e mecanismo diferentes. Essas reações requerem a formação de um centro ativo às quais as moléculas de monômero adicionam-se para formar o polímero final. A policondensação é uma reação em etapas não havendo distinção reacional entre o início da formação do polímero e o crescimento macromolecular, ou a interrupção deste crescimento (AKECELRUD, 2007).

Não há formação de subprodutos na poliadição onde as espécies que reagem têm *centros ativos* que podem ser radicais livres, íons ou sítios de formação de complexos de coordenação. Resultam cadeias de altos pesos moleculares. Na policondensação, as reações são reversíveis e o crescimento da cadeia depende da remoção dos subprodutos (H<sub>2</sub>O, HCl, NH<sub>3</sub>, etc. ) (MANO e MENDES, 2004).

Algumas propriedades são únicas nos polímeros: elasticidade, capacidade de formação de filmes e fibras, além de uma grande variação da resistência mecânica. O

tamanho e a flexibilidade de suas cadeias são responsáveis pelo aparecimento de forças intermoleculares.

A magnitude desse campo de forças depende fundamentalmente de três fatores:

- natureza química dos constituintes da cadeia;
- arquitetura molecular, compreendendo o tamanho da cadeia (massa molar), a configuração, os fatores estéricos e a reticulação;
- empacotamento molecular, compreendendo a conformação, a morfologia e a ordenação.

As interações que ocorrem entre uma cadeia e outra ou entre seus segmentos são as responsáveis pelo aparecimento das propriedades características dos polímeros, e é o tipo de interação intermolecular que diferencia um polímero do outro. (AKCELRUD, 2007).

A polimerização é um processo de conversão onde há uma reação em que as moléculas menores (monômeros) se combinam quimicamente (por valências principais) para formar moléculas longas mais ou menos ramificadas com a mesma composição centesimal.

Atualmente, polímeros são cada vez mais utilizados para os mais diversos tipos de aplicações, dependendo de suas propriedades físicas, mecânicas, elétricas, óticas, etc., nas áreas médicas, alimentícias, de construção civil, mecânica, eletrônica, e muitas outras. Sendo assim, os processos de polimerização representam um aspecto extremamente importante da indústria de processamento químico. Os tipos mais comumente utilizados são os polipropilenos, poliestireno, poliésteres e poliuretanos; que em grande produção são chamados de polímeros commodities. Outras classes de polímeros, como os poliacrilatos, policarbonatos e fluorpolímeros têm tido uso crescente. Vários outros polímeros são fabricados em menor escala por terem uma aplicação muito específica ou devido ao seu custo ainda ser alto e por isso são chamados de plásticos de engenharia (FELIPETTO, 2003).

A qualidade do produto formado e a produção de polímeros com características específicas, de alto valor agregado e de interesse comercial são focos de atenção importantes das pesquisas nesta área. Deve ser enfatizado que a qualidade do produto

em processo de polimerização é um assunto muito mais complexo se comparado com reações de cadeias curtas convencionais, uma vez que as propriedades moleculares e morfológicas de um produto polimérico influenciam fortemente suas propriedades físicas, químicas, térmicas, reológicas e mecânicas que caracterizam os materiais (LUCAS et al., 2001).

Segundo Mano (2007), as propriedades físicas são aquelas que não envolvem qualquer modificação estrutural a nível molecular dos materiais. Dentre elas estão incluídas as propriedades mecânica, térmica, elétrica e ótica que são normatizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) onde se apresenta, ainda, insuficiente para todos os materiais poliméricos, sendo utilizadas normas internacionais, a cargo da International Organization for Standardization (ISO). Podem ser citadas (Fig. 1.7):

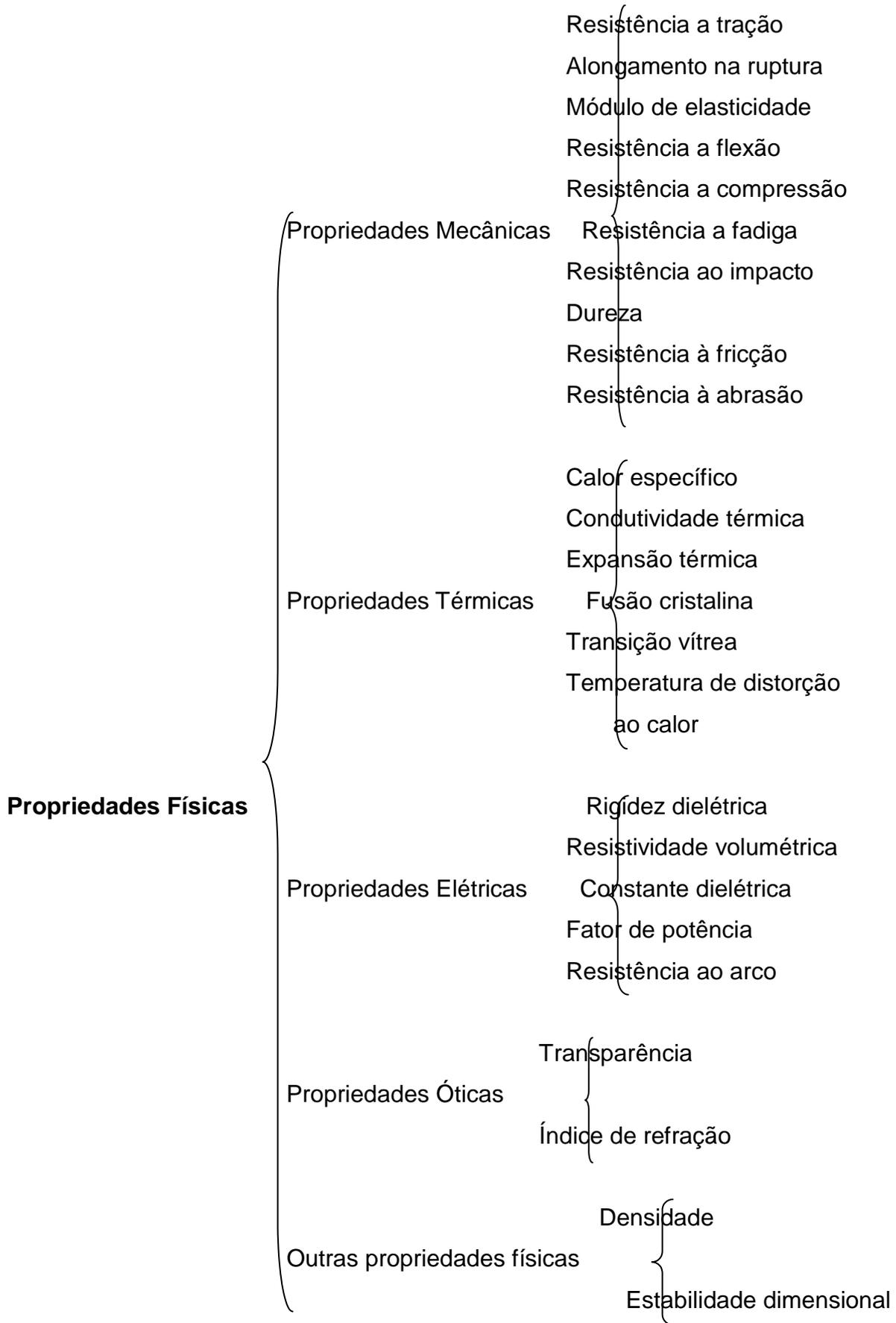


Figura 1.7 - Esquema das propriedades físicas que caracterizam os materiais

Quanto às propriedades químicas, as mais importantes dentre os materiais poliméricos, diretamente relacionadas às suas aplicações, estão à resistência à oxidação, ao calor, às radiações ultravioletas, à água, a ácidos e bases, a solventes e a reagentes. A estabilidade térmica está ligada à resistência ao calor que por sua vez é responsável por modificações químicas no material, como cisão de cadeias, oxidação ou reticulação (AKCELRUD, 2007).

Das propriedades físico-químicas dos polímeros se destacam a permeabilidade a gases e vapores (MANO, 2007).

Se levarmos em consideração a natureza química dos constituintes da cadeia, o Poliestireno, por ser polímero vinílico, apresenta forças que estão relacionadas a formação de espaçadores  $-CH_2-$ , uma em cada mero, chamadas de Forças de Van der Waals, na ordem 2,1 a 21Kj/mol. Por se tratar de uma força fraca é necessário que as cadeias tenham muitos meros (alta massa molar) para se atingir uma alta coesão intermolecular precisando atingir um grau de polimerização em torno de 500. O que nos mostra que quanto maior for a massa molar mais altas serão as propriedades termo-mecânica (AKCELRUD, 2007).

### **1.3.6 Compósitos**

Os compósitos surgiram em meados do século XX. São materiais que tem levado à inovação e aos esforços que se traduzem em aplicações cada vez mais exigentes. Devido à necessidade de se encontrar materiais que supram as deficiências dos existentes e que sejam viáveis economicamente, combinam-se materiais com distintas composições, estruturas e propriedades diversas, separados por uma interface, que quando associados venham a produzir um único dispositivo, com melhores propriedades especiais que nenhum de seus constituintes possui isoladamente. A característica básica dos compósitos é combinar, a nível macroscópico, pelo menos, duas fases distintas denominadas de matriz e reforço, que podem elevar suas propriedades mecânicas (SOUZA, 2006).

O grande interesse pelos materiais compostos está ligado a dois fatores: o econômico e o desempenho. O fator econômico vem do fato de se conseguir materiais mais leves com melhor desempenho nas suas características mecânicas. O custo de fabricação de algumas peças em material composto pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais convencionais. A leveza e as excelentes

características mecânicas fazem com que os materiais compostos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas, aeronáuticas, automobilísticas etc..

A aplicação dos materiais compostos surgiu inicialmente na área aeronáutica devido à necessidade de diminuição de peso, preservando a robustez dos componentes estruturais. Atualmente uma grande variedade de peças em materiais compostos pode ser encontrada nos aviões em substituição aos materiais metálicos: fuselagem, spoilers, portas de trem de aterrissagem, portas internas, etc. (PEREIRA, 2003). Inúmeros tipos de compósitos são conhecidos por apresentarem altos índices de resistência e rigidez por unidade de peso, mesmo quando submetidos a esforços combinados de tração (ou compressão), flexão e tração; elevado amortecimento estrutural; ausência de corrosão em muitos ambientes agressivos aos metais; e boa tenacidade à fratura em muitos casos (NETO e PARDINI, 2006).

Segundo Pereira (2003), a função principal que possui uma matriz é a de transferir, ao reforço, solicitações mecânicas e protegê-las do ambiente externo. As matrizes podem ser resinosas (poliéster, epóxi, etc), minerais (carbono) e metálicas (ligas de alumínio).

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

Diferentes tipos de materiais têm sido misturados ao gesso com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas. Estudos com misturas de polímeros puros, fibras, tem tido uma abordagem de sucesso para se conseguir excelentes resultados.

Nas argamassas de gesso pode-se adicionar agregados leves como a vermiculita ou perita, fibras diversas como pêlos de animais, fibras sintéticas, de vidros e fibras vegetais, favorecidas pelo pH neutro do gesso, aditivos, impermeabilizantes ou hidrofugantes (MAGALHÃES, 2009).

Conforme Pereira (2003) é possível encontrar materiais naturais com propriedades que adicionadas à argamassa de gesso contribuem com a redução da

permeabilidade, aumento da resistência mecânica, melhora a trabalhabilidade e diminui a quantidade de água na mistura.

Magalhães (2009) utilizou-se de um cacto *Opuntia ficus-indica* existente em abundância nas regiões áridas ou semi-áridas do nordeste brasileiro, muito usados como alimentos de animais bovinos e caprinos, para extrair um gel, uma substância viscosa, que permite à planta reter internamente água, aumentando sua resistência às altas temperaturas, chamada de mucilagem. Esta substância quando adicionada às pastas de gesso possibilitou a redução do traço e aumento do tempo de pega, permitindo a elaboração de uma pasta consistente que levou a obtenção de melhores resultados nos ensaios de absorção e flexão.

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

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

Leitão et al. (2006) estudaram o comportamento das propriedades mecânicas e elásticas de compósitos unidirecionais formados com fibra de carbono e matriz epoxídica, com o intuito de se verificar o comportamento da tensão máxima em placas conforme a orientação tomada do reforço. Chegando-se a conclusão de que a

capacidade de resistência mecânica do material está intimamente ligada ao reforço utilizado do compósito, proporcionado pelo elevado desempenho que as fibras apresentam, bem como pela orientação de bobinamento que é dada a mesma na construção do material.

## 1.4 Referências Bibliográficas

ANDRADE, A. F. C. de; TRINDADE FILHO, M. O.; BORJA, E. V. de ; SOUZA JUNIOR, C.F.; SILVA, G.G.da. **Estudo de compósitos cerâmicos com resíduos de gesso da indústria da construção civil**. I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Natal-RN - 2006.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri, SP: Editora Manole, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12127 (MB 3468). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas do pó**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12128 (MB 3469). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas da Pasta**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12129 (MB 3470). **Gesso para construção - determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12130 (MB 3471). **Gesso para construção - determinação da água livre e de cristalização**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13207. **Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto** – Procedimento. Rio de Janeiro: 2007.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. **Diagnóstico do pólo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para fabricação de cimento**. IV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción, Tegucigalpa, Honduras, 2004.

BARROS, M.M.S.B. **O processo de produção das alvenarias racionalizadas.** In: Seminário de Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios: vedações verticais, São Paulo, 1998. p.21-48.

BARROS, M. A. B.; NETO, A. P. N.; VERGOLINO, J. R. . **Fatores competitivos da cadeia produtiva do gesso: o caso do pólo do Araripe em Pernambuco.** XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.

BASTOS, F. F.; BALTAR, C. A. M. **Avaliação dos processos de calcinação para produção de gesso Beta.** In: XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, A03-059, 2003, Ouro Preto. Anais do Congresso. Minas Gerais: 22 a 26 de setembro de 2003.

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

BOX, E. P.; HUNTER, G.; STUART, J.; HUNTER, G. W. **Statistics for experiments.** New Jersey: John Willey and Sons, Inc., 2005.

CALADO, Verônica; MONTGOMERY, Douglas C.. **Planejamento de experimentos usando o estatística,** E-papers Serviços Editoriais Ltda, Rio de Janeiro, 2003. 260p.

CARDOSO, F. A.; AGOPYAN, A. K.; CARBONE\*, C.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.. **Caracterização reológica de revestimentos à base de gesso por squeeze-flow.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

CARLSSON, M., **Conceptual and empirical aspects of TQM implementation in engineering organizations,** The “R&D Management” Conference, Quality and R&D, Twente Quality Center, 6-8 March, Enschede, The Netherlands, 1996, pp. 84-99.

CAVALCANTI, L. B.. **Determinação de condições adequadas operacionais na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável.** Dissertação submetida a UNICAP para obtenção de grau de mestre. 135p. Abril de 2006.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Inovação Tecnológica – CTEC. **Gesso – Mineração São Jorge**. CT2002-179-00 Comunicação Técnica elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Rio de Janeiro, 2002

CF 1988. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Editora Revista dos Tribunais, SP, 2000.

CONAGIN, A. **Discriminative power of the modified Bonferroni's test under general and partial null hypothesis**. Revista de Agricultura, v.74, p.117-126, 1999.

CÔRTE REAL, J. C.. **DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADEQUADAS PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADO DE GESSO DE ALTA RESISTENCIA MECÂNICA**. Dissertação de mestrado apresentado a UNICAP/Recife em 2009.

DEVOR, R. E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J. W. **Statistical quality design and control – Contemporary concepts and methods**. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

DIEESE, Resenha. Estudos setoriais nº 12. **Os trabalhadores e a reestruturação produtiva na construção civil brasileira**. São Paulo, 2001

EI-MAGHRABY, H.F.; GEDEON, O.; ROHANOVA, D.; GREISH, Y.E.. **Compressive strength and preliminary in vitro evaluation of gypsum and gypsum-polymer composites in protein-free SBF at 37° C**. Available online at ScienceDirect 9 March 2010.

EUROPA. **Sínteses da legislação da U.E.** . Protocolo de Quioto relativo às alterações climáticas. 2007. Disponível em: <http://europa.eu/scadplus/leg/pt/lvb/l28060.htm>, Acessado em: 15/05/2009.

EXAME.com. **Desemprego sobe para 10,4% em janeiro**. 23/02/2011. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/brasil/noticias/desemprego-sobe-para-10-4-em-janeiro>. Acessado em: 01/03/2011.

FELIPETTO, E.. **Processamento de polímeros**. Pontifícia Universidade católica do Rio Grande do Sul, 02/2003.

FIANO, M. B. S.; PIMENTEL, Lia L.. Pontifícia Universidade Católica – PUC - Campinas. **Estudo da viabilidade do reaproveitamento do gesso-queima rápida**. Anais do XIV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas - 29 e 30 de setembro de 2009.

FIGUEREDO, A. D.; AGOPYAN, V.. **POLÍMEROS – PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL** Princípios da Ciência dos Materiais Aplicados aos Materiais de Construção Civil. USP, SP, 2006.

FOLLNER, S. et al., **The Settings Behavior of Beta- and Alpha-CaSO<sub>4</sub> x 0,5 H<sub>2</sub>O as Function of Crystal Structure and Morphology**. Cryst. Res. Technol, Vol. 37, Nº 10, 10075-1087, 2002.

FUM5. **Ministro anuncia novo déficit habitacional brasileiro**. Rio de Janeiro 22/03/2010. Disponível em: [http://wuf5.cidades.gov.br/pt-br/noticias/10-03-22/Ministro\\_das\\_Cidades\\_anuncia\\_novo\\_d%C3%A9ficit\\_habitacional\\_brasileiro.aspx](http://wuf5.cidades.gov.br/pt-br/noticias/10-03-22/Ministro_das_Cidades_anuncia_novo_d%C3%A9ficit_habitacional_brasileiro.aspx). Acessado em: 01/03/2011.

GESSO BRASIL. **A História do gesso**. Disponível em [www.gessobr.com.br](http://www.gessobr.com.br) . acessado em 16 de junho de 2010.

HARADA, Éric; PIMENTEL, Lia L.. **Estudo da viabilidade do reaproveitamento de gesso**. Anais do XIV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas - 29 e 30 de setembro de 2009.

HOLANDA, E. P. T. de. **Novas tecnologias construtivas para produção de vedações verticais**: Diretrizes para o treinamento de mão-de-obra. Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia, USP, São Paulo, 2003.

INNOVA S.A.. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ**. Novembro, 2004.

J. MENDO, Consultoria. Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Produto 24 gipsita, relatório técnico 34, perfil da gipsita**. Setembro de 2009.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Alternativa de gestão dos resíduos de gesso. In: **Contribuição apresentada a discussão da reformulação da resolução CONAMA 307: RELATIVA A GESTÃO DO GESSO**, 9., 2003, São Paulo.

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

LE PLÂTRE – **Physico-chimie fabrication** – Emplois – Syndicat National des Industries du Plâtre – EYROLLES-1982 – Paris – FRANCE.

LEITÃO, E. da S.; MARINUCCI, G.; CARVALHO, O.; ANDRADE, A. H. P. de . **Caracterização mecânica de compósitos poliméricos bobinados em diversas orientações do reforço**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 Novembro de 2006, Foz de Iguaçu, PR, Brasil.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística**: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998.

LIM, T. E. Quality Improvement Using Experimental Design, **International journal of quality e reliability management**, Vol. 7, No. 1, pp. 70 e 76, 1990.

LINHALES, F. **Caracterização do gesso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. 2003.

LINS, Fernanda Estelita. **Deficit habitacional e inadequação das moradias no nordeste em Pernambuco em 2000**, XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba – PR, 23 a 25 de outubro de 2002. 8 p.

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

LOGOTHETIS, N.; WYNN, H. P., **Quality through design**: experimental design. Oxford: Clarendon Press, 1989.

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

LUCAS, Elizabete F.; SOARES, Bluma G.; MONTEIRO, Elisabeth E. C.. **Caracterização de Polímeros** determinação de peso molecular e análise térmica. Edit. e-papers, Rio de Janeiro, 2001.

MACHADO, André G. C.; MORAES, Walter F. A. de; **Customização em massa na construção civil**. RBGN – Revista Brasileira de Gestão de Negócio, ISSN 1806-4892, 27 de outubro de 2008.

MAGALHÃES, A.C.T.V. de. **Estudo de fibras vegetais, mucilagem de cacto e gesso em componentes construtivos**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, área de Tecnologia, UNB, Brasília/DF, maio 2009.

MAKENI Chemicals. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos**. Monômero de Estireno, Diadema, SP, 2004.

MALAFAIA, Maurício. Como construir **Casa com frame de madeira e paredes de OSB**. Técnica 69, dezembro, 2002.

MANO, E.B.; MENDES, L.C.. **Introdução a polímeros**. Edit. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 2ª ed. rev. e ampl. – 2004.

MANO, E.B.. **Polímeros como materiais de engenharia**. Edit. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 4ª reimpressão – 2007.

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

MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A.. **Viabilidade de uso do delineamento composto central**. Acta Scientiarum, Maringá, Paraná, Brasil, v23, n.6, p. 1537-1546, 2001.

MILITO, J. A.. **Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento Portland e Sílica ativa para revestimento**. Dissertação de mestrado apresentado a Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, S.P., 2001.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Relatório técnico 34 perfil da gipsita**. Setembro de 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 3rd. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1991. 649 p.

MONTGOMERY, D. C.; BETTENCOURT JR, V. M. Multiple response surface methods in computer simulation. **SIMULATION**, 29(4), 113 – 121, October 1, 1977.

MOTA, M. K. de F.; ANDRADE, A. F. C.; BORJA, E. V.. **Estudo comparativo de blocos cerâmicos em escala reduzida com resíduo de gesso queimado em forno elétrico**. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa – PB, 2007.

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

OEHLERT, G. W. **Design and analysis of experiments: response surface design**. New York: W.H. Freeman and Company, 2000.

PEREIRA, J. C.. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Florianópolis, agosto de 2003

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **Gesso: Produção e utilização na construção civil**. 1.ed. Recife: Sebrae, 2008. 119 p.

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

SALLES, Ygor. WWW.folha.com.br acessado em: 09/05/2009

SANTOS, M. P. dos; AGUILAR, M. T. P..**Painéis de madeira como vedação vertical em construções**. Caderno de Arquitetura e Urbanismo, Belo Horizonte, v.14 – n. 15 – dezembro de 2007.

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

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN Jr., V.; SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. de F. P.. **Planejamento de experimentos e otimização de sistemas mistos**. FAMAT em Revista – número 11, outubro de 2008.

SECTMA (Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente); CPRH (Agência Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos). **Apostila de legislação ambiental SOBRE LICENCIAMENTO E FISCALIZAÇÃO**. Dezembro, 2002.

SINDUGESSO (Sindicato das Indústrias do Gesso do Estado de Pernambuco). Pólo Gesseiro – **Força para o gesso de Pernambuco**. Disponível em: [http://www.sindusgesso.org.br/polo\\_gesseiro.asp](http://www.sindusgesso.org.br/polo_gesseiro.asp). Acessado em: 19/02/2010

SOBRINHO, C. P. de L.; AMARAL, A. J. R. do; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A.. **GIPSITA**, Balanço Mineral 2001. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/BalancoMineral2001/gipsita.pdf>. Acessado em: 10/02/2010.

SOBRINHO, C. P. de L.; AMARAL, A. J. R. do; DANTAS, J. O. C.. **GIPSITA**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/gipsita.pdf>. Acessado em: 07/2010.

SOUZA, F. P. P de. **Manual de materiais dentários**. Disponível em: [http://www.forp.usp.br/matdent/manual\\_materiais.pdf](http://www.forp.usp.br/matdent/manual_materiais.pdf) . Acessado em : 11/2010.

SOUZA, L. M. de. **Compósito a base de gesso e EPS para fabricação de casas populares**, 17º CBECI Mat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

VELHO, J.; GOMES C. e ROMARIZ, C.. **Minerais industriais**. Universidade de Aveiro, 591p. Aveiro -Portugal (1998).

WU, C. F.; HAMADA, M. **Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization**. New York: Wiley – Interscience, 2000.

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

## CAPÍTULO 2

(Manuscrito a ser submetido à revista internacional)

### Análise do processo de produção de compósito do tipo gesso-polímero utilizando DCCR

Romualdo Paraizo Macieira<sup>1</sup>, José Edson Gomes de Souza<sup>2</sup>, Valdemir Alexandre dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduando do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais (UNICAP, Recife). E-mail: romualdo\_paraizo@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Prof. D. Sc. Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Mestrado em desenvolvimento de Processos Ambientais, Rua do Príncipe, 526, Boa Vista, Bloco G4, 8º andar, CEP 50.050-900 Recife (PE). E-mail: vas@unicap.br.

**Resumo** – Foram investigadas condições de temperatura, pressão e tempo, necessárias à obtenção de um compósito do tipo gesso-polímero, para uso como material de revestimento externo, hidrófobo e com reduzida produção de rejeitos sólidos durante o transporte e sua aplicação. O monômero utilizado para os testes experimentais foi o estireno pela relativa disponibilidade de mercado. O compósito produzido foi obtido por polimerização em massa do estireno em corpos de prova pré-moldados em gesso. Obedecendo a um delineamento composto central rotacional (DCCR) foram realizados 20 experimentos distribuídos em 2<sup>3</sup> fatoriais completos, 6 pontos centrais e 6 pontos axiais. As variáveis-resposta foram as resistências à tração na flexão, à compressão, absorção de água e a conversão polimérica. O valor mínimo da absorção de água (1,03%) e valores máximos encontrados da resistência de tração na flexão (9,89 MPa) e de compressão (24,80 MPa), que caracterizam o compósito gesso-polímero obtido, apresentaram-se superiores aos valores obtidos do gesso puro, o que habilita a utilização do compósito em painéis externos, possibilitando, também, considerável redução de rejeitos sólidos no manuseio desse material.

**Palavras-chave:** Gesso beta; Estireno; Compósito; alta resistência; Revestimento externo.

Analysis of the production process of composite type  
gypsum-polymer using CCRD

**Abstract** - Considering that purposes were investigated: temperature, pressure and timing needed to obtain a composite which would make an external coating material out of plaster, such material would be hydrophobic and with reduced production of solid waste during transport and application. The monomer used for the experimental tests was the styrene for the availability of it on the market. The composite produced was obtained by bulk polymerization of styrene in samples pre-cast in plaster. Following a central composite design (CCRD) were performed 20 experiments distributed in complete factorial, six central points and six axial points. The response variables were the tensile strength in bending, compression, water absorption and polymer conversion. The minimum water absorption (1.03%) and maximum tensile strength in bending (9.89 MPa) and compression (24.80 MPa), those characteristics of the composite plaster-polymer showed themselves superior to the values found on the pure plaster, allowing the usage of this composite in external panels, enabling also a considerable reduction of solid waste on the handling of this material.

**Keywords:** Beta plaster; Styrene; Composite; High strength; External Coating.

## 2.1 Introdução

O Pólo Gesseiro do Araripe, uma região situada no epicentro do semi-árido brasileiro, com localização privilegiada, no alto Sertão do Estado de Pernambuco, dista cerca de 800 km de oito importantes capitais do Brasil (Recife, Salvador, Fortaleza, Aracaju, Maceió, João Pessoa, Natal e Teresina), extremo oeste do Estado, região nordeste do país, responsável por 94% da produção de minério gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) no Brasil, representando a maior reserva nacional disponível a céu aberto e o minério de melhor qualidade do mundo, com excelentes condições de mineração (PERES et al., 2008).

A grande quantidade da matéria-prima que dá origem à obtenção do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), através da desidratação térmica - a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), é abundante e de fácil disponibilidade na Região do Araripe, entre os Estados de Pernambuco, Piauí e Ceará (BAJAY e SANT'ANA, 2010). As características de material aglomerante hidráulico, facilmente moldável, isolante térmico e acústico fazem do

gesso um material de grande importância na construção civil, além da abundância do mesmo levar à sua obtenção com baixo custo. Em contrapartida, a atividade de produção de pré-moldados e aplicação como revestimento de paredes geram grandes quantidades de resíduo, chegando a perdas de até 40% do material quando aplicado como revestimentos de alvenaria (BORJA et al., 2006). Porém, Gusmão (2008) cita que, quando efetuado levantamento em três obras na cidade do Recife, este percentual é elevado a 47%.

Com a tendência de se pesquisar meios para a obtenção de novos materiais que tornem mais viável a maneira de produção, baixando custos e aumentando a produtividade, com melhora da qualidade do produto final, foi utilizado um segundo material – o estireno. Através da polimerização em massa, o gesso forma um compósito com o poliestireno como um material rígido e transparente (semelhante ao acrílico).

## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 Descrição do arranjo experimental

O reator em escala de laboratório utilizado foi da marca “Karl Kolb” (Scientific Technical Supplies), confeccionada em chapa de aço carbono de 10,5 mm de espessura de parede e formato cilíndrico, com um diâmetro de 99 mm e uma altura de 200 mm (Figura 2.1a). O reator tem tampa de vedação com auxílio de metal espelhado (Figura 2.1b), o que garante a execução dos experimentos com temperaturas em torno de 230°C. Possui entrada para gases utilizados no controle da pressão e sensores de pressão e temperatura, um registro para fechamento e saída dos gases e um local para o fio do Termopar, que serviu aos estudos iniciais do comportamento da troca de calor do reator com o ambiente interno da estufa (Figura 2.1c).

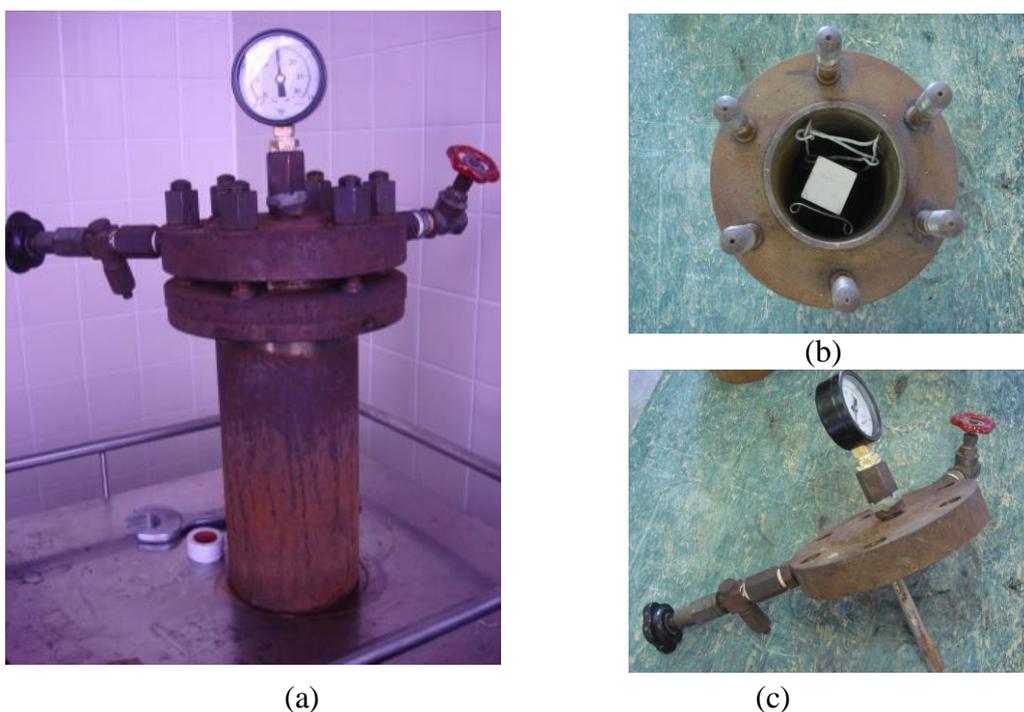


Figura 2.1 – Foto do reator: (a) vista parcial; (b) vista superior sem a tampa e com o corpo de prova; (c) tampa com acessórios do reator de polimerização

O reator de obtenção do compósito foi confeccionado para operar em batelada, de modo a se programar o tempo necessário na obtenção de uma conversão elevada para a reação de polimerização. Opera-se o reator, em função das condições de pressão e temperatura de reação, contendo apenas um corpo de prova. A temperatura de reação é obtida colocando-se o reator no interior de uma estufa com controle digital

de temperatura. Para isso foram realizados vários experimentos de forma a se estimar a temperatura interna do reator a partir da temperatura no interior da estufa e externa ao reator.

A pressão de reação foi estimada a partir da equação básica de Clayperon (ATKINS, 2003) da variação de pressão em função de temperatura, mantido o volume constante:

$$PV=nRT \quad (2.1)$$

Em que:

P = pressão do ar aplicado

V = volume do reator

n = n° de moles de moléculas do gás (ar)

R = constante universal dos gases

Inicialmente o corpo de prova tem sua moldagem a partir de uma pasta básica de gesso *beta* (comercial) em água. Após secagem em estufa, o referido corpo de prova é pesado e levado para contato direto com o monômero estireno, sem a presença do anti-polimerizante, para se efetuar a impregnação do bloco de gesso. Para isso o estireno é separado do inibidor TBC (p. terc butil catecol) através de um filtro com a utilização do hidróxido de sódio a 5% para lavagem, sob agitação, apresentando um corpo líquido na cor rosa, com estireno, como uma reação de separação (Figura 2.2). Após a separação, utilizando-se um funil de decantação, leva-se o monômero a uma proveta com um volume calculado baseado no volume da matriz. A polimerização se inicia logo após a retirada do inibidor na presença da luz e do ar. O estireno não pode conter resíduos de água para que o corpo de prova não venha a absorver a mesma, sob pena de formar partes que não possam absorver estireno e fiquem isentas da condição necessária para formação do compósito.

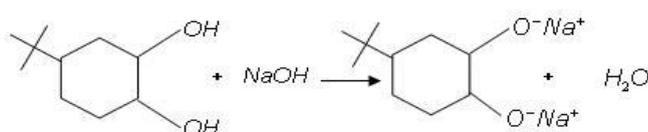


Figura 2.2 - Reação do p-TBC com NaOH

Após a retirada do inibidor se utiliza de um pré-polímero e catalisador para se fazer baixar a energia de ativação e sob agitação, promovendo um mecanismo molecular diferente para a reação, sem ser consumido, durante o processo, estimulando uma polimerização a pressões e temperaturas bem menores. O abaixamento da energia de ativação é que determina o aumento da velocidade da reação. O catalisador utilizado para o monômero de estireno foi o VBEX –BUTANOX - 50, adquirido no comércio. A impregnação do bloco de gesso no estireno, com polimerização iniciada, se deu durante duas horas. Concluído o tempo de impregnação, o corpo de prova tem seu peso avaliado antes de ser colocado no interior do reator. Posteriormente, ar comprimido é admitido para o interior do reator até se obter uma pressão desejada, medida em um monômetro instalado na tampa hermeticamente fechada. O reator é levado para submissão a calor através de estufa, a qual tem sua temperatura de reação programada. A reação tem então seu tempo registrado a partir do momento em que a temperatura da mesma é alcançada e adquire estabilidade. As condições mínimas de temperatura e pressão, programadas, foram de 46°C e 0,46 atm, enquanto que as condições de máximo foram de 114°C e 1,14 atm.

Após o término da batelada o corpo de prova é retirado do reator, onde alcança a temperatura ambiente. Despressuriza-se o reator e leva-se o corpo de prova a uma estufa, onde o mesmo permanece a uma temperatura de 45°C por um tempo de 48 horas. Os corpos de prova são então pesados e, de posse de seus novos pesos, são calculados os percentuais de conversão do polímero além dos percentuais de perda desse mesmo polímero (Tabela A1 do Apêndice).

### 2.2.2 Planejamento experimental

Um dos aspectos favoráveis à utilização de um DCCR foi a realização de poucos experimentos (CALADO e MONTGOMERY, 2003). As variáveis independentes de interesse são apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Valores dos fatores codificados do DCCR utilizado

Fator	Níveis				
	-1,68	-1	0	1	1,68
Temperatura °C	46	60	80	100	114
Pressão (atm)	0,46	0,6	0,8	1	1,14
Tempo (h)	4,6	6	8	10	11,4

As variáveis dependentes, para identificação da qualidade dos corpos de prova produzidos a partir do compósito gesso-polímero, foram definidas pelas propriedades do módulo de resistência a compressão, módulo de resistência à flexão, absorção de água e o grau de conversão polimérica.

A análise estatística dos valores de resposta testou um modelo matemático do tipo quadrático, o qual pode ser representado por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (2.2)$$

Em que:

$x_1$  e  $x_2$  são variáveis independentes;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{22}, \beta_{11}$  e  $\beta_{33}$  são parâmetros do modelo de regressão.

### 2.2.3 Testes de caracterização do gesso convencional e do compósito

Os testes foram efetuados com corpos de prova em forma de blocos paralelepípedicos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, para testes de resistência à flexão e 5 cm x 5 cm x 5 cm, preparados nas formas normatizadas pela NBR 12129. O gesso proveniente do Pólo Gesseiro do Araripe, cedido pela Supergesso Indústria e Comércio S. A., teve suas características como: água livre, água de cristalização, massa unitária, início de pega e final de pega, fator água/gesso, resistência a tração na flexão, resistência a compressão e absorção em água, efetuados de conformidade com os procedimentos descritos nas NBRs 9778, 13207, 12130, 12127, 12129, 12128. O bloco de gesso é pesado após a conclusão do tempo determinado para a polimerização do estireno e secagem.

Na realização dos testes de caracterização, tanto do gesso convencional, quanto do compósito gesso-polímero, foram utilizados os seguintes equipamentos e técnicas:

- Ultra X (UX 70 construído em 1974) é um equipamento utilizado na determinação da água livre a  $(40 \pm 4)^\circ\text{C}$  e o analisador de umidade por infravermelho na determinação da água de cristalização (IV2002 da GEHAKA) atendendo às normas e procedimentos da ABNT NBR12130 com os gráficos mostrados no apêndice pelas Figuras (A1 e A2) e procedimentos no Anexo 1.
- Aparelho para determinação da massa unitária (Solotest – Ref. 1.121.015) com

procedimentos especificados na norma ABNT NBR12127 mostrados no Anexo 1 juntamente com a figura do aparelho (Figura A4).

- Utilizou-se do aparelho de Vicat e Vicat modificado (Solotest – Ref. 1.111.001 e 1.111.035) constante na norma ABNT NBR12128 conforme Figuras (A7 e A8), seus procedimentos para a determinação da relação água/gesso e do início e final de pega apresentados no Anexo 1.

- Nas determinações das resistências a compressão e a tração na flexão do gesso foi utilizado um equipamento (Solotest – Prensa CBR) mostrado na Figura 2.3 com adaptadores (Soloteste – Ref. 1.108.444 e 1.108.416), dispositivo de Rilen para Tração na Flexão em forma prismática medindo 4x4x16 cm para ensaios de tração na flexão em argamassa, construído em aço com tratamento anti-corrosivo e superfície com baixa rugosidade atendendo às normas e procedimentos *EN 196/ NBR 11222 e NBR 13279-05*, mostrado na Figura A6 do Anexo 1 .

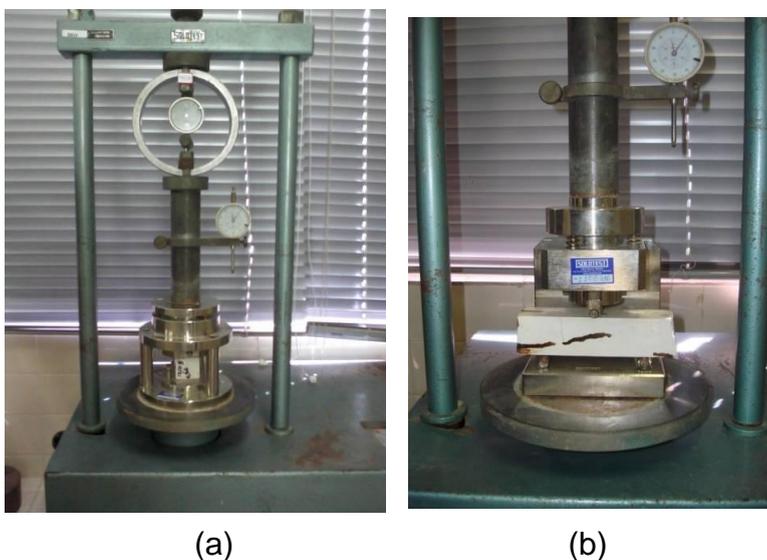


Figura 2.3 – Testes na resistência: (a) compressão; (b) flexão

- A Resistência à compressão dos compósitos foi obtida em um equipamento, com os adaptadores para o gesso, utilizado para rompimento de corpos de prova de concreto, devido à semelhança de valores das resistências a compressão do compósito (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Prensa hidráulica universal de Ensaaios (Contenco – Pavitest) utilizada nos testes de compressão do compósito gesso-polímero

- Para a verificação da absorção de água, utilizou-se de uma adaptação da norma da ABNT NBR 9778. Após as pesagens dos compósitos, os corpos de prova foram mergulhados em um recipiente contendo água por um período de 48 horas. Concluído o tempo de imersão os corpos de prova foram retirados e pesados. Os resultados em termos percentuais estão na Tabela 2.2.

- Análise microestrutural foi efetuada em um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), um aparelho da Jeol modelo *JSM 5600 LV*, equipamento que faz uma varredura, na superfície escolhida, através de bombardeamento de elétrons capaz de produzir imagens de alta resolução com aparência tridimensional (Fig. A9 e A10 no Anexo 1)

## 2.3 Resultados e Discussão

O gesso utilizado para produção dos corpos de prova ficou caracterizado pela Tabela 2.1

Tabela 2.1 – Valores obtidos e normalizados

Descrição	Valor obtido	Equip. utilizado	Normas ABNT	Valor NBR
Umidade	1,20%	Ultra X	NBR 12130 e 13207	1,3%
Água de Cristalização	6,68%	Analizador de umidade por infravermelho	NBR 12130 e 13207	4,2 a 6,2%
Massa Unitária	620kg.dm <sup>-3</sup>	Aparelho det. massa unitária	NBR 12127 e 13207	>700kg.dm <sup>-3</sup>
Fator a/g	Em peso ±58%	Aparelho de Vicat modificado	NBR 12128	Utilizado 70%
pega - Inicial e Final	8 min e 25 min	Aparelho de Vicat	NBR 12128 e 13207	4-10 20-45
Resistência à compressão	9,27 MPa	Prensa hidráulica	NBR 12129 e 13207	>8,4 MPa
Resistência à tração na flexão	5,23 MPa	Prensa CBR com adaptador Soloteste – Ref. 1.108.444 e 1.108.416	NBR 11222;13279-05 e 15845/2010	5 – 15 MPa
Absorção em água	36,2%	--	NBR 15270-3	--

A matriz de planejamento com os valores das variáveis respostas é apresentada na Tabela 2.2. Pode-se observar nessa tabela que os valores mais significativos das variáveis respostas foram: pressão (P)=0,80atm, temperatura (T)= 80°C e tempo (t)= 8h na corrida de número 12. Os valores menos significativos para a produção do compósito gesso-polímero foram os obtidos na corrida de número 5, isto é: P =0,60atm, T = 100°C e t = 6h. Estudou-se cada linha da Tabela 2.2 e verificou-se que aumentando o tempo de reação, sem alterar a pressão e a temperatura, ocorreram diminuições nas variáveis respostas. Bem como, aumentando a pressão, sem variações na temperatura e no tempo, ocorreram diminuições nas variáveis respostas, justificado pela maior evaporação e, portanto, maior formação dos polímeros fora dos poros da matriz.

Para melhor visualização do que ocorre, aplicou-se a metodologia da superfície de resposta sobre os dados experimentais. A aplicação desta metodologia de análise deu origem a tabelas e gráficos com os quais se passou a analisar o processo de obtenção do compósito gesso-polímero proposto neste trabalho.

A análise para definição de cada modelo de previsão das variáveis dependentes estudada foi possível a partir de valores resultantes da Análise de Variância, mostradas pelas Tabelas 2.3 a 2.6.

Na Tabela 2.3 pode-se observar que, a exceção do termo linear correspondente ao tempo, os demais termos são significativos na composição do modelo de previsão para o valor da compressão a partir das variáveis independentes. O erro experimental representado pelo erro puro é da mesma ordem do erro por falta de ajuste, sendo este último não significativo, a falta de ajuste é pequena e, por isso, o modelo de previsão composto pelos valores com os termos de vapor de  $p$  menor que 0,05 (ou valor da constante  $F$ , Fisher e Snadecor) é válido porque explica cerca de 98,32 % das variações do processo de obtenção de um compósito com a resistência à compressão desejada.

A Tabela 2.4 apresenta valores resultantes da ANOVA para a resistência à flexão. Uma análise desses valores mostra características parecidas para o modelo de previsão da resistência à compressão do compósito. Os termos lineares de pressão e tempo não são significativos para o modelo de previsão, o qual, apesar de estar associado a um erro puro da mesma ordem do erro por falta de ajuste, sendo este último não significativo, demonstrados pelos valores de  $F_{calc}$  e  $p$ , que dessa forma o modelo de previsão é válido porque explica 98,16 % da variação de resistência à flexão pretendida.

TABELA 2.2 - Testes de resistências efetuados no compósito (gesso/polímero)  
fator água/gesso de 0,70

Teste N	Fatores de controle			Respostas			
	X <sub>1</sub> Temperatura (° C)	X <sub>2</sub> Pressão (atm)	X <sub>3</sub> Tempo (h)	Tração (MPa)	Compre. (MPa)	Absor (%)	Gr_Poli (%)
1	60,0000	0,600000	6,00000	7,95	19,05	3,82	96,50
2	60,0000	0,600000	10,00000	7,58	18,72	3,41	96,60
3	60,0000	1,000000	6,00000	8,30	21,20	2,32	97,30
4	60,0000	1,000000	10,00000	6,35	16,30	3,90	96,40
5	100,0000	0,600000	6,00000	6,20	14,00	4,11	96,70
6	100,0000	0,600000	10,00000	7,20	17,80	2,15	97,00
7	100,0000	1,000000	6,00000	7,40	18,60	1,96	97,10
8	100,0000	1,000000	10,00000	7,10	17,40	2,62	96,84
Pontos Axiais	46,3641	0,800000	8,00000	7,15	17,45	5,30	95,40
	113,6359	0,800000	8,00000	6,79	16,58	4,33	95,80
	80,0000	0,463641	8,00000	7,80	20,24	1,52	98,30
	80,0000	1,136359	8,00000	8,40	22,45	1,18	99,02
	80,0000	0,800000	4,63641	7,25	17,90	1,98	98,07
	80,0000	0,800000	11,36359	6,86	16,90	1,82	98,17
Pontos Centrais	80,0000	0,800000	8,00000	9,89	24,73	1,10	99,12
	80,0000	0,800000	8,00000	9,36	24,50	1,26	99,10
	80,0000	0,800000	8,00000	9,29	23,50	1,38	99,09
	80,0000	0,800000	8,00000	9,81	23,71	1,06	98,90
	80,0000	0,800000	8,00000	9,56	24,75	1,15	99,08
	80,0000	0,800000	8,00000	9,72	24,80	1,03	99,08

Tabela 2.3 – Valores obtidos pela ANOVA  
para a resistência à compressão

Fatores	Soma Quad. (SQ)	Grau Lib. (GL)	Média Quad. (MQ)	F <sub>95%</sub> (calc)	p-valor
T(L)	5,8433	1	5,8433	17,6058	0,008523
T(Q)	102,0931	1	102,0931	307,6051	0,000011
P(L)	4,2816	1	4,2816	12,9004	0,015680
P(Q)	18,4258	1	18,4258	55,5168	0,000687
t(L)	1,3613	1	1,3613	4,1017	0,098706
t(Q)	91,9178	1	91,9178	276,9471	0,000014
T(L)x P(L)	2,4976	1	2,4976	7,5253	0,040636
T(L)x t(L)	7,6636	1	7,6636	23,0904	0,004861
P(L)x t(L)	11,4481	1	11,4481	34,4930	0,002031
Lack of Fit	2,0289	5	0,4058	1,2226	0,415411
Pure Error	1,6595	5	0,3319		
Total SQ	219,7326	19			

Tabela 2.4 – Valores obtidos na ANOVA  
para a resistência à Tração na flexão

Fatores	Soma Quad. (SQ)	Grau Lib. (GL)	Média Quad. (MQ)	F <sub>95%</sub> (calc)	p-valor
T(L)	0,60964	1	0,60964	10,2375	0,024006
T(Q)	12,39300	1	12,39300	208,1108	0,000029
P(L)	0,11061	1	0,11061	1,8575	0,231085
P(Q)	4,01490	1	4,01490	67,4206	0,000436
t(L)	0,37928	1	0,37928	6,3690	0,052935
t(Q)	11,60278	1	11,60278	194,8409	0,000034
T(L)x P(L)	0,49005	1	0,49005	8,2292	0,035049
T(L)x t(L)	1,14005	1	1,14005	19,1444	0,007185
P(L)x t(L)	1,03680	1	1,03680	17,4106	0,008717
Lack of Fit	0,21633	5	0,04327	0,7266	0,632755
Pure Error	0,29775	5	0,05955		
Total SQ	28,04392	19			

A Tabela 2.5 apresenta resultados da ANOVA para a variável dependente de absorção de água. Uma análise desses valores mostra, como nas análises anteriores, a pouca significância dos termos lineares do tempo e da interação pressão e temperatura, para o modelo de previsão. Neste caso o erro experimental continua da mesma ordem do erro por falta de ajuste, contudo, uma variância explicada de 98,35 %, habilita o modelo de previsão da absorção de água pelo compósito.

Os resultados da ANOVA para o grau de conversão polimérica, mostrados pela Tabela 2.6, volta a sinalizar a pequena significância dos termos lineares do tempo e interações entre pressão e temperatura. Contudo, com 96,14% da variação do processo de fabricação explicado pelo modelo de previsão, habilita esse mesmo modelo para a produção de compósito gesso-polímero.

Tabela 2.5 – Valores obtidos pela ANOVA para a absorção de água

Fatores	Soma Quad. (SQ)	Grau Lib. (GL)	Média Quad. (MQ)	F <sub>95%</sub> (calc)	p-valor
T(L)	1,31721	1	1,31721	74,056	0,000350
T(Q)	26,06871	1	26,06871	1465,632	0,000000
P(L)	0,77905	1	0,77905	43,800	0,001185
P(Q)	0,20716	1	0,20716	11,647	0,018987
t(L)	0,01166	1	0,01166	0,656	0,454884
t(Q)	1,42405	1	1,42405	80,063	0,000291
T(L)x P(L)	0,05611	1	0,05611	3,155	0,135865
T(L)x t(L)	0,76261	1	0,76261	42,876	0,001244
P(L)x t(L)	2,65651	1	2,65651	149,354	0,000065
Lack of Fit	0,44922	5	0,08984	5,051	0,049984
Pure Error	0,08893	5	0,01779		
Total SQ	32,67900	19			

Tabela 2.6- Valores obtidos pela ANOVA para o grau de conversão polimérica

Fatores	Soma Quad. (SQ)	Grau Lib. (GL)	Média Quad. (MQ)	F <sub>95%</sub> (calc)	p-valor
T(L)	0,16756	1	0,16756	25,791	0,003839
T(Q)	25,93883	1	25,93883	3992,637	0,000000
P(L)	0,30799	1	0,30799	47,407	0,000989
P(Q)	0,97217	1	0,97217	149,642	0,000065
t(L)	0,02565	1	0,02565	3,948	0,103664
t(Q)	2,92669	1	2,92669	450,491	0,000004
T(L)xP(L)	0,01620	1	0,01620	2,494	0,175146
T(L)x t(L)	0,08820	1	0,08820	13,576	0,014225
P(L)x t(L)	0,30420	1	0,30420	46,824	0,001018
Lack of Fit	1,10966	5	0,22193	34,161	0,000719
Pure Error	0,03248	5	0,00650		
Total SQ	29,59786	19			

Todas essas análises oferecidas pelos parâmetros da ANOVA podem ser confirmadas com auxílio dos diagramas de Pareto, mostrados pelas Figuras de 2.5 a 2.8. Esses diagramas mostram ainda que para as resistências a compressão e flexão os termos quadráticos dos fatores são os mais estatisticamente significativos. Para a absorção de água e o grau de conversão polimérica, o termo quadrático da temperatura assume o lugar de mais significativo estatisticamente.

Podemos observar, ainda, na Figura 2.5, a confirmação da tabela 2.3 da ANOVA que o termo linear do tempo é estatisticamente insignificante e o termo linear da interação entre a Pressão e a temperatura é de baixíssima significância no resultado da resistência à compressão, podendo não serem levados em consideração no modelo matemático. Os termos quadráticos da temperatura e do tempo se apresentam como os de maiores significância podendo inclusive provocar um efeito negativo no resultado.

O diagrama de Pareto, para a resistência à tração na flexão (Figura 2.6), confirma os dados da tabela 2.4 da ANOVA. Os termos lineares do tempo e da pressão são insignificantes, estatisticamente, e podem não serem levados em consideração no modelo matemático apresentado a seguir. A interação entre os termos lineares da temperatura e pressão, mesmo sendo de baixa significância, resulta, em interferência de um fator no outro. A temperatura, o tempo e a pressão quadrática podem provocar um efeito negativo no resultado.

Nos diagramas de Pareto, das Figuras 2.7 e 2.8, os termos lineares de interação da Temperatura versus Pressão e do tempo não demonstram ser estatisticamente muito significativos para uma confiança de 95% ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) e apresentam os menores efeitos sobre o experimento. Por isso, podem ser considerados insignificantes ao modelo, vindo a confirmar o que foram mostrados nas tabelas da ANOVA 2.5 e 2.6.

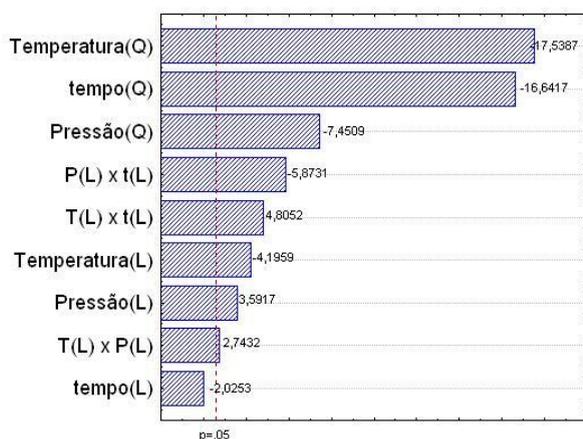


Figura 2.5 - Diagrama de Pareto para a resistência à compressão

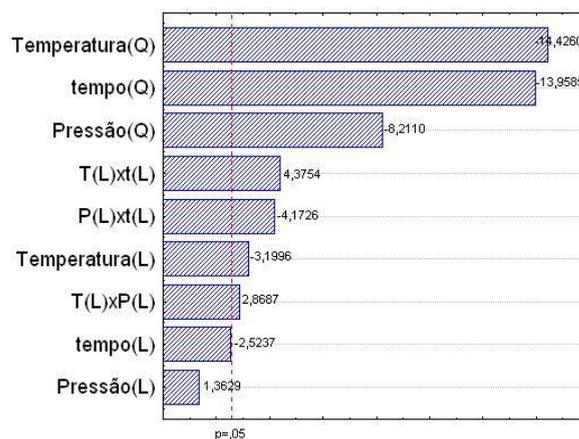


Figura 2.6 - Diagrama de Pareto para a resistência à Tração na flexão

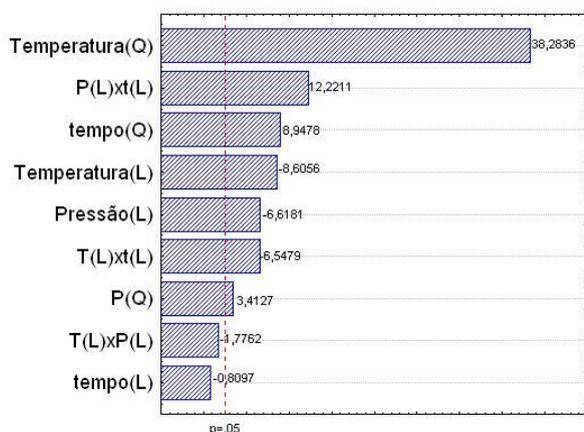


Figura 2.7 - Diagrama de Pareto para a absorção de água

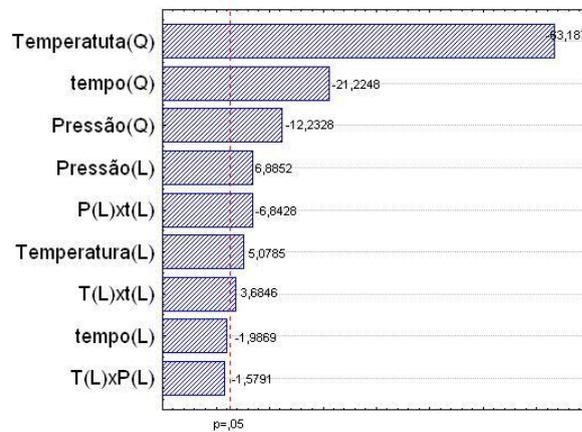


Figura 2.8 - Diagrama de Pareto para o grau de conversão polimérica

Os modelos matemáticos associados às previsões estatísticas de resistência à compressão (RC), resistência à tração na flexão (RF), absorção em água (Abs\_H2O) e grau de conversão polimérica (Gr\_Poli ) foram calculados com auxílio das Equações 2.3 a 2.6:

$$RC = - 69,6431 + 0,7244T + 60,7791P + 10,3792t + 0,1397 \cdot T \cdot P + 0,0245 \cdot T \cdot t - 2,9906 \cdot P \cdot t - 0,0067T^2 - 28,2685P^2 - 0,6314t^2 \quad (2.3)$$

$$RF = -22,6429 + 0,2354T + 23,8128P + 3,4708t + 0,0619 \cdot T \cdot P + 0,0094 \cdot T \cdot t - 0,9000 \cdot P \cdot t - 0,0023T^2 - 13,1955P^2 - 0,2243t^2 \quad (2.4)$$

$$Abs\_H2O = 34,8768 - 0,4750T - 15,8400P - 1,8070t - 0,0209 \cdot T \cdot P - 0,0077 \cdot T \cdot t + 1,4406 \cdot P \cdot t + 0,0034T^2 + 2,9974P^2 + 0,0786t^2 \quad (2.5)$$

$$Gr\_Poli = 63,21760 + 0,53018T + 15,94002P + 1,96092t - 0,01125 \cdot T \cdot P + 0,00263 \cdot T \cdot t - 0,48750 \cdot P \cdot t - 0,00335T^2 - 6,49322P^2 - 0,11266t^2 \quad (2.6)$$

As Equações de 2.3 a 2.6 geram gráficos de superfícies de respostas que podem auxiliar na interpretação dos fenômenos analisados como respostas. As Figuras 2.9, 2.11, 2.13 e 2.15 mostram essas superfícies, enquanto as Figuras 2.10, 2.12, 2.14 e 2.16 apresentam as respectivas curvas de níveis, onde se podem identificar as interações mais importantes entre os fatores que geram tais superfícies.

Observando a superfície de resposta, apresentada na Figura 2.9a, tanto na variação da Temperatura como na variação da Pressão, é verificada a existência de um intervalo em que é possível obter um máximo da resistência à compressão. Este intervalo é mostrado na figura para uma pressão variando de 0,70 atm a 0,90 atm e uma temperatura variando de 70°C a 90°C em um tempo constante de 8 horas. Isto mostra que aumentar a temperatura, além de certos limites, provoca uma evaporação muito maior do monômero, não sendo possível uma retenção pelo aumento da pressão, evitando uma maior polimerização e como consequência provocando uma diminuição da resistência à compressão.

Na superfície de resposta, apresentada na Figura 2.9b, é observada uma variação do tempo e da temperatura aplicados com uma pressão constante de 0,80 atm e chega-se a um máximo da resistência à compressão: o tempo varia entre 7 e 9 horas e

a temperatura variando entre 70°C e 90°C. Observa-se que o aumento da temperatura ou um aumento do tempo de reação provoca uma maior evaporação do monômero evitando a formação de polímeros e tendo como consequência menor resistência à compressão.

Observando, agora, a superfície de resposta apresentada na Figura 2.9c, variando o tempo e a pressão aplicados a uma temperatura constante de 80°C, encontramos um intervalo de máximo da resistência à compressão: o tempo variando entre 7 e 9 horas e a pressão variando entre 0,70 atm e 0,90 atm. Isto confirma o que já foi visto anteriormente, o aumento da pressão ou do tempo de reação pode provocar um aumento de evaporação do monômero provocando uma diminuição da polimerização e como consequência uma diminuição na resistência da compressão.

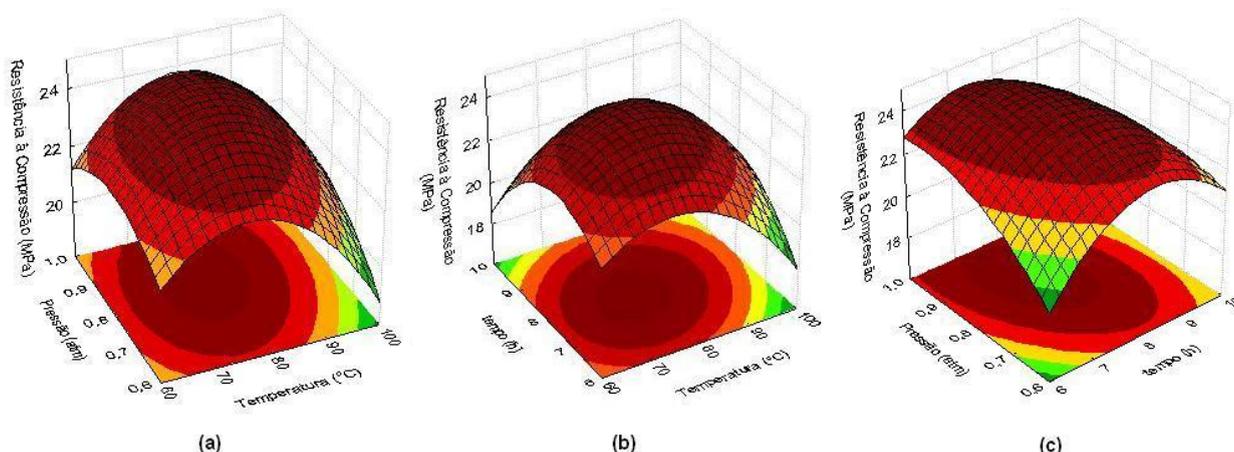


Figura 2.9 - Superfície de resposta para a resistência à Compressão

(a) no tempo de 8h; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80°C

As curvas de níveis das Figuras 2.10a; 2.10b; 2.10c confirmam a previsão dos diagramas de Pareto, da Tabela 2.3 e das superfícies de respostas analisadas anteriormente, para a resistência à compressão. O paralelismo das linhas mostra a fraca ou nenhuma interação existente entre a temperatura e a pressão, o tempo e a temperatura. A Figura 2.10c mostra uma interação da pressão e do tempo a uma temperatura constante de 80°C, com um pouco mais de significância para resistência à compressão. Estas curvas servem, também, para melhor se identificar as faixas dos valores de otimização do processo.

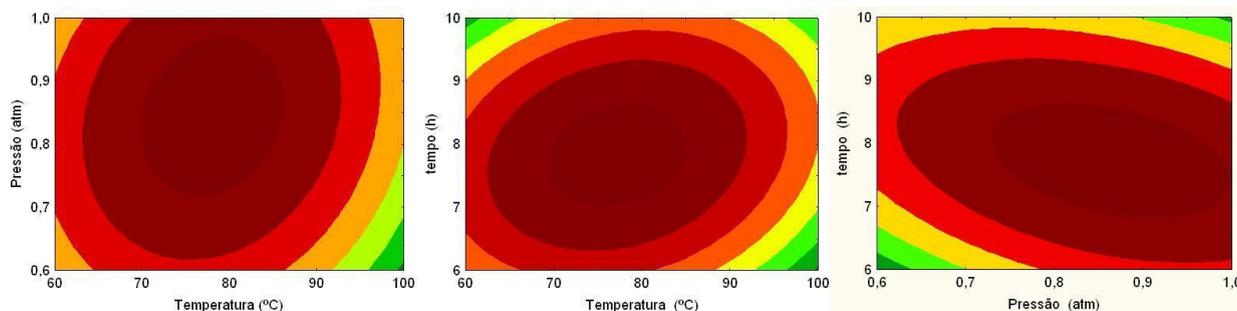


Figura 2.10 - Curvas de níveis para a resistência à compressão

(a) - no tempo de 8 h; (b) – na pressão 0,80 atm; (c) – na temperatura de 80° C

Observando a superfície de resposta, apresentada na Figura 2.11a, tanto na variação da Temperatura como na variação da Pressão, é verificado a existência de um intervalo em que é possível obter um máximo da resistência à tração na flexão. Este intervalo é mostrado na figura para uma pressão variando entre 0,70 atm a 0,90 atm e uma temperatura variando de 70°C a 90°C em um tempo constante de 8 horas.

Na superfície de resposta, apresentada na Figura 2.11b, é observada uma variação do tempo e da temperatura aplicados com uma pressão constante de 0,80 atm. Chega-se a um máximo da resistência à tração na flexão: o tempo variando entre 7 e 9 horas e a temperatura variando entre 70°C e 90°C, para uma pressão de 0,80 atm. Observa-se, também, que o aumento da temperatura ou um aumento do tempo de reação provoca uma maior evaporação do monômero que leva a menor resistência à tração na flexão. O mesmo pode ser visto no gráfico da Pressão versus tempo (Figura 2.11c), onde encontramos uma faixa de variação da pressão entorno de 0,70 a 0,90 atm para uma temperatura de 80 °C.

Ao observar as curvas de níveis da Figuras 2.12(a; b e c), vê-se, mais claramente, a faixa de otimização apresentada pelas superfícies de respostas. As curvas de níveis confirmam a previsão do diagrama de Pareto, da Tabela 2.4 e das superfícies de respostas analisadas anteriormente. Na Figura 2.12a, o paralelismo e a curvatura das linhas, quase perfeitas, mostram uma interação pouco significante, existente entre as variáveis estudadas. As figuras 2.12 (b e c) apresentam pouca curvatura e nos limites centrais vê-se pouco paralelismo das linhas, o que confirma a existência de interações entre temperatura e tempo e pressão versus tempo bem melhores do que a anterior.

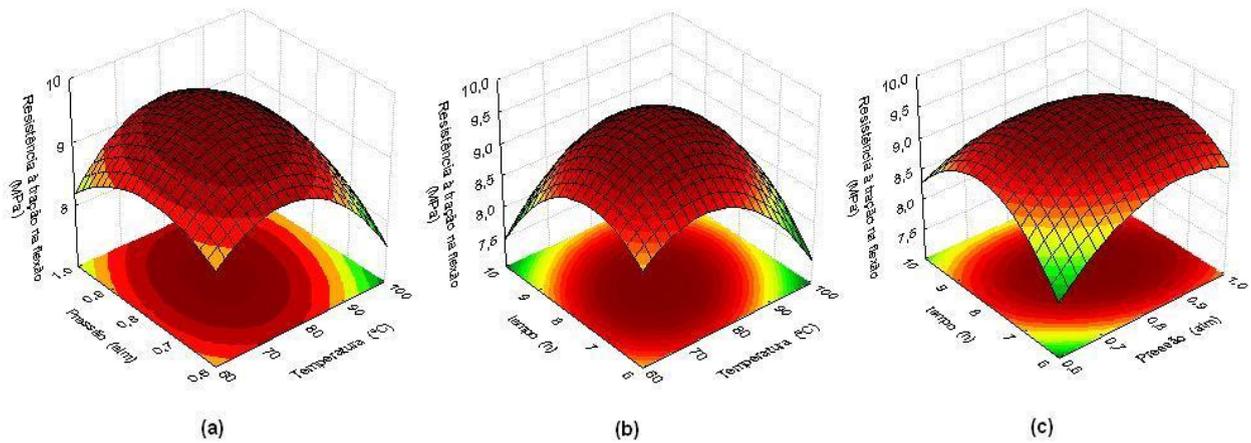


Figura 2.11 – Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão  
(a) no tempo de 8 h; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

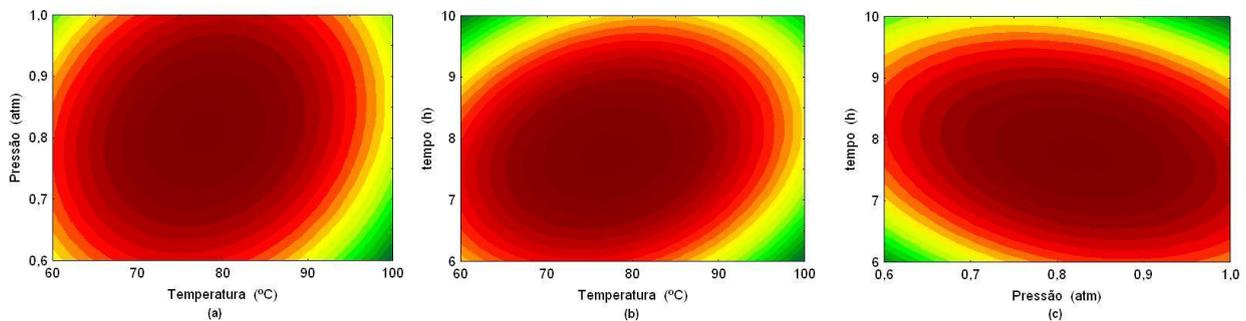


Figura 2.12 - Curvas de níveis para a resistência à Tração na flexão

(a) no tempo de 8 horas; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

Figura 2.13a mostra a superfície de resposta em função da temperatura e da pressão em um tempo de reação constante de 8 horas. É observado um limite onde a absorção de água é mínima, se encontrando no intervalo de temperatura de 70 °C a 90 °C e na pressão variando de 0,70 atm a 1,0 atm. Observa-se que o aumento da temperatura ou um aumento da pressão provoca aumento da absorção d'água e o mesmo acontece quando se diminui a temperatura e a pressão.

Ao estudar a Figura 2.13b vê-se uma variação da absorção de água em função do tempo de reação e da temperatura com uma pressão constante de 0,80 atm. Observa-se a existência de um limite que determina a absorção mínima e este limite se encontra dentro de um intervalo de temperatura que varia de 70°C a 90°C e um tempo de reação entre 7h e 9h.

A Figura 2.13c mostra a menor absorção de água nos limites de pressão entre 0,90 e 1,00 atm e no intervalo de tempo entre 6 e 8h. Observa-se que a absorção

diminui à medida que aumenta a pressão com o menor tempo e temperatura constante de 80°C

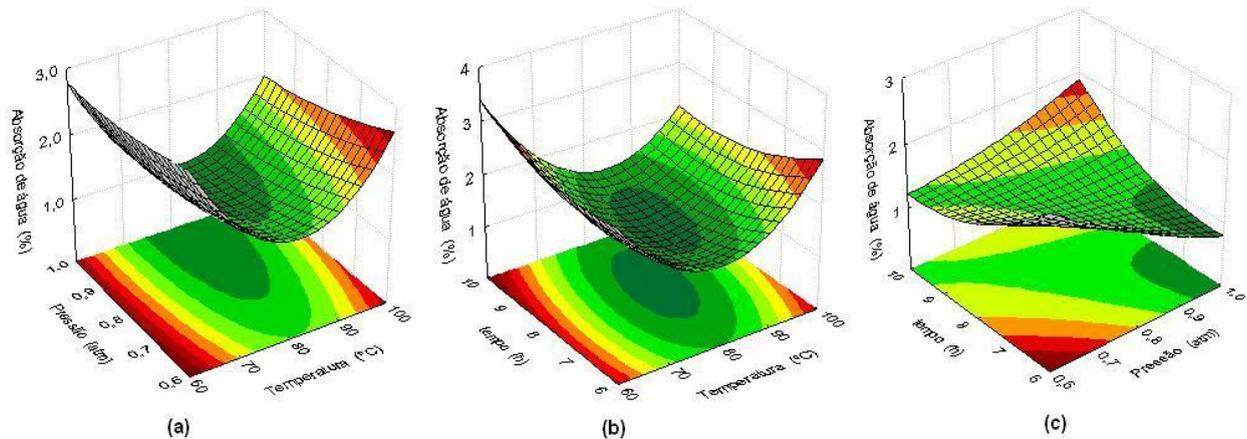


Figura 2.13 - Superfície de resposta para absorção de água

(a) no tempo de 8 horas; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

Ao se analisar as curvas de níveis, para absorção de água, das Figuras 2.14 (a; b; c), observa-se, na Figura 2.14a, que os limites de absorção mínima se encontram variando entre as pressões 0,80 e 1,0 atm e temperaturas compreendidas entre 70 e 90 °C. As curvas de níveis da Figura 2.14b apresentam-se mostrando pouca interação entre as variáveis consideradas e os limites, para o mínimo de absorção, a uma pressão constante de 0,80 atm, de tempo variando de 7 a 9 h e de temperatura variando de 70 a 90 °C. Vê-se, na Figura 2.14c, uma significativa interação da pressão com o tempo a uma temperatura constante de 80°C devido a falta de paralelismo ou curvatura. O que confirma as análises efetuadas, anteriormente, sobre o diagrama de Pareto e sobre a Tabela 2.7. Confirma, também, os limites encontrados na análise da superfície de resposta.

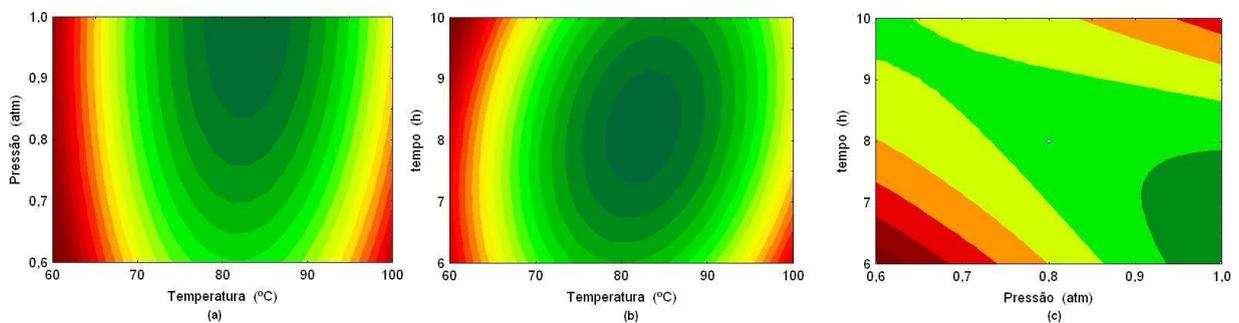


Figura 2.14 - Curvas de níveis para a absorção de água

(a) no tempo de 8 h; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

As Figuras 2.15 (a; b e c) mostram que as superfícies de respostas da conversão polimérica encontram-se com valores máximos nos intervalos: pressão de 0,7 a 0,9 atm; temperatura de 70 a 90 °C; e tempo de 7 a 9 h.

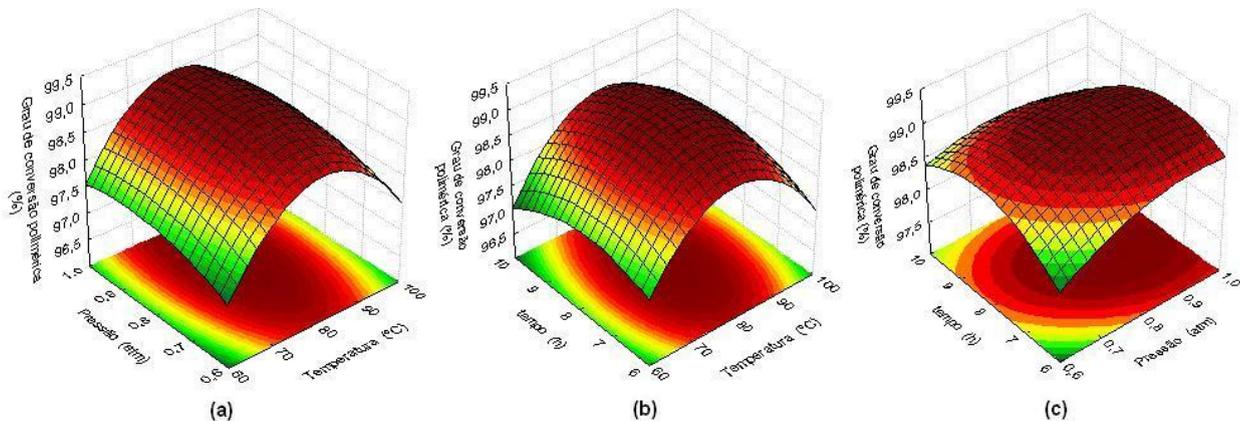


Figura 2.15 - Superfície de resposta para o grau de conversão polimérica  
(a) no tempo de 8 h; (b) na pressão de 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

Analisando a Figura 2.16a observa-se que as curvas de níveis têm poucas curvaturas e um maior paralelismo demonstrando haver pouca ou nenhuma interação entre as variáveis colocadas nos eixos. Na Figura 2.16b é observado boas curvaturas e um paralelismo mostrando pouca ou nenhuma interação entre as variáveis, colocadas nos eixos (tempo e Temperatura) com a pressão constante de 0,80 atm. Deste modo confirma-se a análise do diagrama de Pareto e a Tabela 2.8. Confirma, também, os limites encontrados na análise da superfície de resposta. Na Figura 2.16c, encontra-se com menos curvaturas e menos paralelismos entre as curvaturas indicativos de melhor interação do que as anteriores.

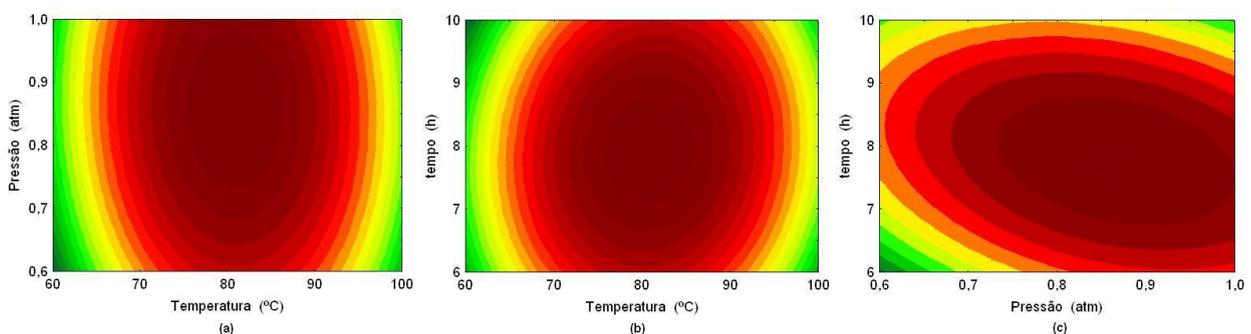


Figura 2.16 - Curvas de níveis para o grau de conversão polimérica

(a) no tempo de 8 horas; (b) na pressão 0,80 atm; (c) na temperatura de 80 °C

A micrografia do gesso puro utilizado para confecções dos blocos para produção de compósito encontra-se mostrada pela Figura 2.17a. O gesso *beta*

convencionalmente produzido no Pólo Gesseiro do Araripe, conforme essa micrografia aumentada de 3700 vezes, são constituídos de cristais fraturados, cujos fragmentos encontram-se dispersos na estrutura do material. Além da descontinuidade entre os cristais fraturados, a estrutura desse gesso mostra espaços grandes representando a porosidade, que também é outro fator responsável pela fragilidade do material.

A Figura 2.17 apresenta a micrografia obtida pela MEV e mostra o preenchimento quase que total da porosidade, entre os cristais, pelo poliestireno. Esse preenchimento foi conseguido desde as regiões de periferia até o centro da peça, envolvendo todos os cristais de gesso e, por esta razão, responsáveis por aumentos consideráveis nas resistências à tração na flexão, à compressão e uma elevada diminuição na absorção de água, quando as condições adequadas de produção do compósito forem utilizadas.

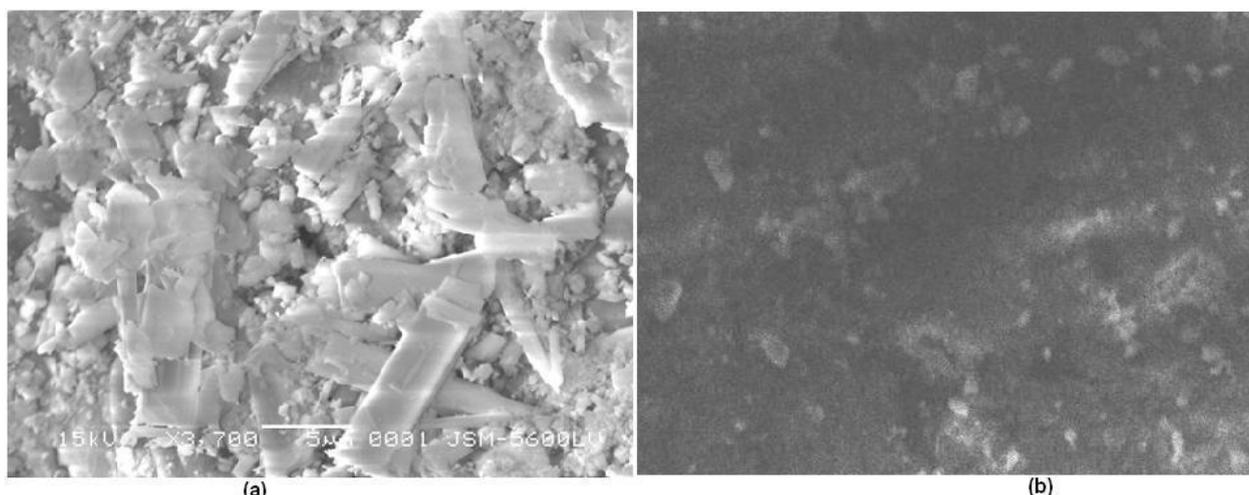


Figura 2.17 – Micrografia dos cristais do gesso utilizado no experimento e observado pelo MEV: (a) gesso puro; (b) compósito gesso-polímero

Para avaliação de três importantes propriedades do compósito gesso-polímero, proposto neste estudo, foi elaborada a Tabela 2.7, a qual permite uma comparação entre propriedades do referido composto e do gesso *beta* produzido no Pólo Gesseiro.

Tabela 2.7 – Comparações das resistências

	Absorção de água (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)
Gesso puro	36,20	5,23	9,27
Compósito	1,10	9,89	24,80

A título de curiosidade, foram calculados resistências à compressão e à tração na

flexão de um concreto com um fator água/cimento 0,70 de um traço 1:2,68:3,68:0,70 produzido no laboratório (UNICAP, 2010) e foram obtidos:

Resistência à tração na flexão      2,07 MPa

Resistência à compressão      18,09 MPa

## 2.4 Conclusões e Perspectivas

Foram definidas condições adequadas para produção de um compósito gesso polímero com propriedades mecânicas que caracterizam um material adequado à aplicação como revestimento externo de edificações.

Semelhante à produção de gessos *beta* de qualidade superior, estabelecido um tempo consistente com as necessidades comerciais, o controle da pressão e da temperatura são decisivos para um produto de qualidade. O valor da pressão pode manter uma determinada quantidade de monômero em determinada região do compósito, favorecendo uma propriedade desejada. A temperatura pode ter seu valor adaptado para manter esse monômero em concentrações desejadas em determinadas regiões do compósito.

Mais uma vez o planejamento fatorial, associado à análise de superfície de resposta, mostrou ser uma ferramenta indispensável à obtenção de um modelo eficiente de previsão, mesmo que seja dentro das condições experimentais dos ensaios realizados.

As condições da região otimizadas, observadas nos gráficos, ficaram com a temperatura de controle do calor cedido num intervalo de (70°C a 90°C), a pressão de reação variou no intervalo de 0,70 atm a 0,90 atm e com a variável tempo de 8 horas.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a proposta de se estimar as variáveis cinéticas para produção do compósito, necessária para o dimensionamento de um reator com capacidade de produção em escala industrial.

## 2.5 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12127 (MB 3468). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas do Pó.** Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12128 (MB 3469). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas da Pasta.** Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12129 (MB 3470). **Gesso para construção - determinação das propriedades mecânicas.** Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12130 (MB 3471). **Gesso para construção - Determinação da Água Livre e de Cristalização.** Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13207. **Gesso para construção civil.** Rio de Janeiro: 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11222. **Materiais refratários densos não conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro: 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13279-05 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – **Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão,** Rio de Janeiro: 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9778 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – **Determinação da absorção de água por imersão- índice de vazios e massa específica,** Rio de Janeiro: 1986.

Atkins, P. W.. **Físico-Química.** Rio de Janeiro, LTC, 7a edição, 2003, (Oxford, Physical Chemistry, Ed. Ox. Univ Press.)

BAJAY, S. Valdir.; SANT'ANA, P. H. de Mello. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria.** Relatório Setorial CAL E GESSO, Confederação Nacional da Indústria, 2010.

BORJA, E.V., ROCHA, M.V., ALVES, M.S.M. **Processo produtivo de revestimento de gesso: análise e estimativa de geração de resíduos.** *In: I CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA*, Natal: CEFET-RN. 1 CD-ROOM. 2006.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. . **Planejamento de Experimentos usando o Statistica.** E-papers Serviços Editoriais Ltda. Rio de Janeiro - Brasil, 2003.

EN 196 . **Methods of testing cement. Determination of strength.** British-Adopted European Standard, 22-Mar-2005, 36 p.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão dos resíduos da Construção Civil**, Camaragibe, PE: CSS Gráfica Editora, 2008.

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

## 2.6 Apêndices

Este grau de conversão polimérica foi avaliado fazendo-se uma correlação com a diferença de peso entre o corpo de prova final do compósito e os pesos isolados do pré-moldado de gesso puro e do polímero adicionado, equivalente à polimerização do monômero, também puro.

TABELA A1- Grau de conversão polimérica

	Bloco de Gesso Puro (g)	Gesso + Mono (g)	Comp. (g)	(%) Da Massa Mono.	(%) da Massa Total Polim.	Valor Evap. (%)	Grau de Polim. (%)
	285,24	384,30	367,01	25,78	22,28	3,50	96,50
	281,50	381,20	364,42	26,15	22,75	3,40	96,60
	286,30	383,30	369,94	25,31	22,61	2,70	97,30
	283,15	380,46	362,91	25,58	21,98	3,60	96,40
	283,44	382,63	366,29	25,92	22,62	3,30	96,70
	284,25	383,55	368,63	25,89	22,89	3,00	97,00
	284,32	382,30	367,95	25,63	22,73	2,90	97,10
	281,93	379,07	363,64	25,63	22,47	3,16	96,84
Pontos Axiais	283,97	380,70	358,59	25,41	20,81	4,60	95,40
	282,05	379,19	358,93	25,62	21,42	4,20	95,80
	285,92	385,52	376,86	25,83	24,13	1,70	98,30
	281,97	380,67	375,71	25,93	24,95	0,98	99,02
	283,07	379,74	370,17	25,46	23,53	1,93	98,07
	279,27	377,63	368,53	26,05	24,22	1,83	98,17
Pontos Centrais	285,66	387,53	382,97	26,29	25,41	0,88	99,12
	282,30	377,31	372,82	25,18	24,28	0,90	99,10
	286,06	383,19	378,59	25,35	24,44	0,91	99,09
	292,22	395,17	389,37	26,05	24,95	1,10	98,90
	286,84	388,29	383,53	26,13	25,21	0,92	99,08
	284,41	381,85	377,20	25,52	24,60	0,92	99,08

O gráfico da Figura A1 mostra a determinação da água livre pela utilização do equipamento Ultra X a uma temperatura  $(40 \pm 4)^\circ\text{C}$ . Retirada da água (1,2%) no tempo no máximo atendendo as especificações da ABNT NBRs 12130 e 13207 apresentando um valor máximo de 1,3%.

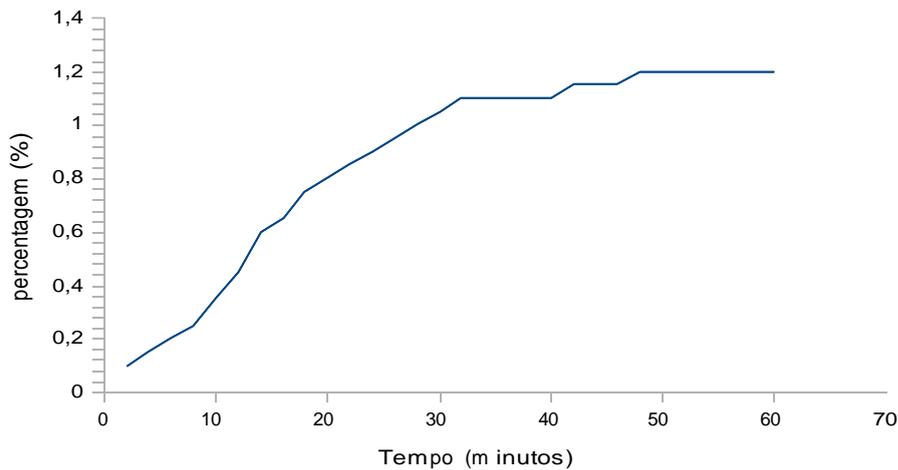


Fig. A1 – gráfico obtido da umidade no Ultra-X

Na figura A2, onde mostra que a água de cristalização apresentou um valor máximo de 6,68% fora da norma ABNT NBR 13207 (limites de 4,2 a 6,2%). Efetuado a retirada da água de cristalização através do Analisador de Umidade por infravermelho e impressora, que só trabalha até 200°. Quando a 230°±10° (NBR 12130) obteríamos o valor limite desejado.

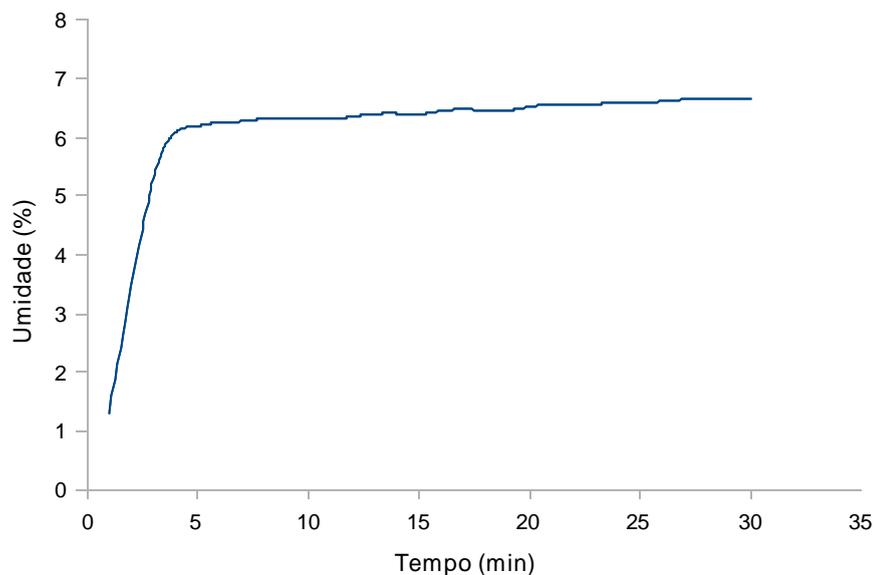


Figura A2 – Gráfico da água de cristalização pelo Analisador por Infravermelho

## 2.7 Anexo 1

### Descrições de Materiais e Procedimentos

#### Procedimentos do ULTRA X

1. Regular a temperatura de conformidade com ABNT NBR 12130 ( $40^{\circ}\pm 4^{\circ}\text{C}$ )
2. Põe-se o prato inox;
3. Trava-se a balança;
4. Põe-se na escala de cor vermelha
5. Ajusta-se o ponteiro a 50%;
6. Destrava-se a balança;
7. Põe-se um peso de 2,5g e espera-se parar a balança no ponto zero;
8. Trava-se a balança;
9. Retira-se o peso;
10. Muda-se para a escala de cor preta;
11. Liga-se o equipamento na tomada;
12. Destrava-se a balança e põe-se ~ 10g do material até zerar;
13. Liga-se o temporizador e dá-se início ao processo;
14. A leitura da escala será feita obedecendo à seguinte ordem :



<u>Cor</u>	<u>Leitura direta</u>
Preto	0 - 25%
Azul	25 - 50%
Amarelo	50 - 75%
Vermelho	75 - 100%

Fig. A3- Ultra X (UX 70)

Procedimento para calcular a compressão e a Tração na flexão flexão:

Onde se desprezou o peso próprio por ser muito pequeno. Os resultados dos cálculos estão na Tabela 2.1.

## Compressão

$$RC = (F / S) \times 0,0981$$

Sendo:

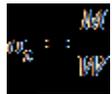
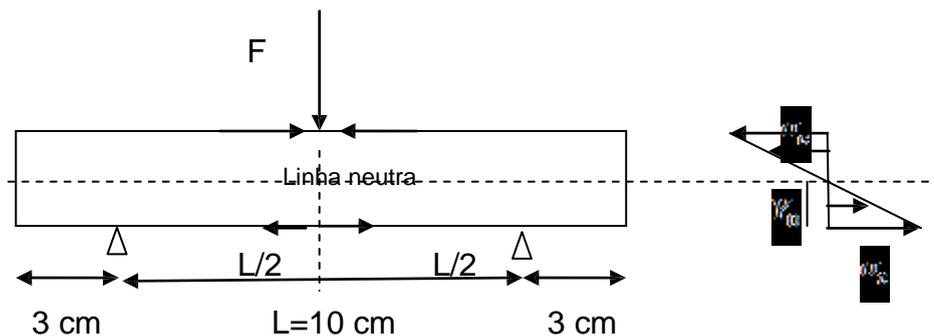
RC = Resistência mecânica à compressão (MPa);

F = Carga de ruptura para os corpos de prova (kgf);

S = Seção transversal de aplicação da carga (cm<sup>2</sup>);

## Flexão

A resistência à tração na flexão aplicou-se uma carga no centro do bloco conforme a Fig. 11 e os procedimentos matemáticos a seguir:



– Tração na flexão x 0,0981 = MPa



– momento fletor



– módulo de resistência

$$M = F \times L/4$$

$$W = \frac{I}{Y_0} = \frac{bh^2}{6}$$

Determinação da massa unitária

Para realizar o ensaio de massa unitária do gesso na forma de pó foi adotado o procedimento da NBR 12127 e EB – 22.

Após passar uma amostra de gesso em uma peneira de  $\varnothing$  2,0 mm, com auxílio de um pincel, com massa suficiente para a determinação de suas propriedades físicas, devemos utilizar o aparelho para determinação da massa unitária ABNT NBR 12127 (Fig. A4).



Fig. A4 Aparelho para determinação da massa unitária

O recipiente de medida foi confeccionado de material não corrosivo e tem a capacidade de  $(1000 \pm 20)$  cm<sup>3</sup> ou um litro.

Para determinação da massa unitária deve-se passar o gesso em pó através da peneira de  $\varnothing$  2,0 mm e do funil. Entretanto, primeiramente, deve-se tarar o recipiente de medida e colocá-lo sob o mesmo, centralizando-o de forma que os eixos verticais coincidam (Fig. 30). Os torrões que não se desfazem com o pincel e as demais impurezas retidas na peneira são descartados. No entanto, se faz necessário que os resíduos antes de serem descartados devam ser pesados e constar em um relatório de ensaio, conforme procedimentos da norma. Com a ajuda de uma régua é necessário rasar a superfície do recipiente de medida, tomando-se o cuidado para não compactar o gesso nele contido, e pesar. Estes procedimentos foram repetidos por três vezes e tirados a média dos valores obtidos.

#### Procedimentos para calcular a massa unitária :

foi aplicada a seguinte equação:

$$UM = M / V$$

Sendo:

UM = massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

M = massa do gesso (g);

V = Volume do recipiente ( $\text{cm}^3$ );

Chegando-se a um valor de  $620 \text{ g}/\text{cm}^3$  abaixo da norma NBR 13207 ( $>700 \text{ g}/\text{cm}^3$ )

#### Formas utilizadas– Atendem a ABNT NBR 12129

Forma prismática medindo  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  para ensaios de tração na flexão em argamassa. Construída em aço com tratamento anti-corrosivo e superfície com baixa rugosidade NBR 13279-05.



Fig. A5 – forma para compressão e dureza NBR12129



Fig. A6 – Fôrma prismática  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  para ensaios de tração na flexão em argamassa EN-196 - NBR 13279-05

#### Procedimentos para determinação do fator água gesso

O fator água/gesso foi determinado através da NBR 12128, utilizando-se de 150 ml de água destilada, polvilhando-se 257g de massa de gesso e aplicando-se o procedimento da norma para se obter uma fluidez da pasta adequada à manipulação:

- 1- Tempo de polvilhamento do pó é de 1 minuto;
- 2- Tempo de espera 2 minutos;
- 3- Tempos de Homogeneização da pasta por 1 minuto

Após estes procedimentos e sem a utilização de um retardador, foi preenchido o molde cônico e utilizou-se do aparelho de Vicat modificado (Fig. A7 e A8) em uma sala a uma temperatura de  $28^\circ\text{C}$ , obtendo-se uma penetração de 30 mm, o que é considerada uma consistência normal. Com isto, foi obtido um fator água/gesso para a amostra no valor de  $\pm 58\%$ . O início e final de pega são, também, verificados e atendem aos limites estabelecidos pelas normas NBRs 12128 e 13207 (limites para início de pega entre (4 - 10) min e para final de pega entre (20 - 45) min ).



Fig. A7 aparelho de Vicat modificado



Fig. A8 – Aparelho de Vicat c/ agulha

No entanto, o fator água gesso utilizado, na formação das amostras de gesso, foi constante e de 70%, que levou a uma melhor trabalhabilidade da massa sem a necessidade de um retardador, porém, é previsto que haja uma diminuição na resistência do gesso com um aumento dos poros. Ou seja, utilizou-se 800g de gesso para 560g de água. No entanto, o que interessa observar é o que a resistência do compósito comparada à resistência do gesso puro pode melhorar. O preparo dos blocos atendeu as demais orientações das NBRs referentes: 12128; 12129.

Após a obtenção dessas características procedeu-se a construção dos blocos de gesso puro com a moldagem nas formas mostradas nas figuras (A5 e A6). Em seguida foram determinadas as resistências a tração e a compressão e absorção de água.

#### Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

As estruturas dos materiais são estudadas pelos seus defeitos e constituintes Microestruturais. Foram feitas fotografias do gesso puro e dos compósitos escolhidos para análise através do microscópio eletrônico de varredura (Fig.A9) pertencente ao laboratório da UNICAP.

No gesso observamos os arranjos dos cristais e formações de porosidades e essas informações são obtidas sobre a amostra através de diversos tipos de elétrons refletidos e elétrons absorvidos utilizados pelo MEV (Fig. A10). No compósito foi escolhida uma superfície de corte transversal interna para observarmos a profundidade de penetração da polimerização e o preenchimento dos poros envolvendo os cristais.

A amostra foi colocada diretamente sobre uma fita dupla face condutora de carbono e depois levada para análise.



Fig. A9 – MEV – Laboratório da UNICAP

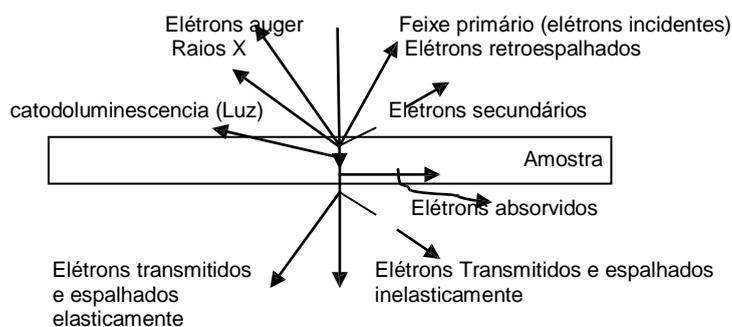


Fig. A10- Interação do elétron e da matéria

### Propriedades Físico-Químicas do Estireno

Líquido incolor com leve odor de éter;

- a) Temperatura específica ou faixas de temperaturas nas quais ocorrem mudanças de estado físico:

Ponto de ebulição: 146°C  
 Ponto de fusão: -31°C  
 Faixa de destilação: não disponível.

- b) Temperatura de decomposição: não disponível  
 c) Ponto de fulgor: 41°C

- d) Temperatura de auto-ignição: 285°C
- e) Pressão de vapor: 6,2mm Hg a 25°C
- f) Densidade do vapor: 2,62
- g) Densidade: 0,96 a 20°C (água=1)
- h) Solubilidade: 100% em água
- i) Taxa de evaporação: 0,56(acetato de butila=1)