

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

**P**

**P**

**E**

**Q**

PPEQ - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia  
Química

CEP. 50740-521 – Cidade  
Universitária- Recife - PE

Telefaxes: 0-xx-81- 21267289



**TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
PRODUÇÃO DE GESSO RECICLADO A PARTIR  
DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Aluno:** Abrahão Severo Ribeiro

**Orientador:** Prof. Dr. Mohand Benachour

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos  
Santos

**Recife/PE**

**DEZEMBRO/2011**

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GESSO  
RECICLADO A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Abrahão Severo Ribeiro

Recife

2011

**ABRAHAO SEVERO RIBEIRO**

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
GESSO RECICLADO A PARTIR DE RESÍDUOS DA  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Tese de Doutorado a apresentar ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Área de concentração: Desenvolvimento de  
processos químicos

Orientadores: Prof.Dr.Monhand Benachour

Prof. Dr. Valdemir Alexandre  
dos Santos

Recife

2011

Catlogação na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

**R484e**

**Ribeiro, Abrahão Severo.**

Estudo e otimização do processo de produção de gesso reciclado a partir de resíduos da construção civil / Abrahão Severo Ribeiro. - Recife: O Autor, 2011.

xxv, 311 folhas; il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Co-Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Graduação em Engenharia Química, 2011.

Inclui Referências.

**1. Engenharia química. 2. Resíduos da construção civil. 3. Calcinação. 4. Forno rotativo contínuo. 5. Gesso reciclado. I. Benachour, Mohand (Orientador). II. Santos, Valdemir Alexandre dos (Co-Orientador). III. Título.**

**660.2 CDD (22. ed.)**

**UFPE/BCTG/2012-34**



Tese de doutorado defendida e aprovada em 29 de dezembro de 2011 a Banca Examinadora constituída pelos professores:

---

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

---

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

---

Prof.Dr. Cesar Augusto Moraes de Abreu  
Departamento de Engenharia Química da UFPE

---

Prof.Dr. Augusto Knoechelmann  
Departamento de Engenharia Química da UFPE

---

Prof.Dr. Pedro Luiz Gazzo  
Departamento de Engenharia de Minas da UFPE

---

Prof.Dr. Osvaldo Souto Barbosa  
Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP

---

MSc. Luciano dos Santos Peres (membro convidado)  
Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco - ITEP

A minha mãe, pelo amor incondicional. A minha esposa e filhos e irmãos, amigos constantes e leais. A meu pai José Severo (in memorian) e Elon Severo, irmão e Cleodon Tenório, primo (in memorian).

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelo apoio imprescindível e força, que sempre me concedeu. Não poderia deixar de agradecer e mostrar minha gratidão a todos que contribuíram para essa grande conquista. Ao professor Monhand Benachour pelo profissionalismo, determinação, amizade e solicitude durante todas as etapas deste trabalho. Ao professor Valdemir Alexandre, pela capacidade de me proporcionar momentos de grande compreensão durante um período de trabalho. A todos os colegas, professores e funcionários do DEQ, UFPE, e equipe do gesso alunos graduandos, pela amizade e apoio. Aos Pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP, **Luciano Peres** e **Katarzyna Michalewicz**, que durante todo o processo de pesquisa foram incansáveis em colaborar atentamente, mostrando serem verdadeiros amigos, sempre presentes nos momentos mais difíceis e há quem muito devo esta etapa de minha formação acadêmica.

A todos os professores do Departamento de Minas e Energia e ao técnico de laboratório Marcelo que estiveram sempre presentes e contribuíram com valiosos conhecimentos para a conclusão desse trabalho. A **Cleandro Alencar**, da Lajeiro Gesso, pelo apoio técnico e material durante o período de realização deste trabalho e pela contribuição nas tarefas práticas.

## **ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GESSO RECICLADO A PARTIR DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Resumo:** Foram realizados estudos da viabilidade técnica de obtenção de gesso beta a partir de resíduos provenientes de duas principais aplicações do mencionado gesso na construção civil: revestimento de alvenarias e instalação de forro. Um estudo preliminar da calcinação do dihidratado em um forno rotativo contínuo em escala piloto de 5,45m de comprimento e 0,90m de diâmetro interno foi efetuado utilizando a técnica de simulação numérica por via de fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) com auxílio do software comercial FLUENT12. 0. Foi adotado o modelo de turbulência k- $\epsilon$  para simular a combustão do gás natural ocorrida na câmara de combustão. Foram então elaborados os perfis das distribuições de temperatura de combustão e de velocidade dos gases na zona de injeção do combustível, assim como a simulação da energia cinética ao longo do comprimento do forno rotativo. Os ensaios experimentais de calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e gesso de placa foram realizados obedecendo a um Planejamento Fatorial Completo do tipo  $3^{3-1}$  avaliando-se os efeitos de três fatores: velocidade de rotação do cilindro, temperatura de controle da combustão e vazão de alimentação de sólidos. As condições ótimas de calcinação do dihidratado foram a temperatura de controle da combustão de 500°C, a velocidade de rotação do cilindro de 3 rpm e a vazão de alimentação de sólido de 120 kg/h. Os gessos oriundos da calcinação em condições de calcinação ótima de calcinação da gipsita (A) e dos resíduos de gesso de revestimento (B) e de placa (C) tiveram a consistência 0,70, como condição ótima, pós-calcinação. As análises químicas dos gessos mencionados apresentaram teores de água de cristalização próximos ao do Hemidrato, 4,2% a 6,2%, estabelecidos em norma. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, à flexão e a aderência à tração do revestimento e a dureza superficial, encontrados para os blocos preparados, com os gessos (A), (B) e (C) obtiveram consistência e tempo de secagem ótima, respectivamente de 0,70 e 7 dias. As pastas preparadas com os gessos (A), (B) e (C) na condição pós-calcinação de 0,70 de consistência e 7 dias de secagem foram caracterizadas adotando técnicas complementares: TG, DTA, BET, IR, DRX, MEV as quais apresentaram resultados que reforçaram a possibilidade de produção de gesso a partir dos resíduos de gesso de revestimento e de placa e reutilização e comercialização dos resíduos de gesso gerados pela construção civil após o devido tratamento, passando a representar uma alternativa economicamente interessante para os geradores deste tipo de resíduo.

**Palavra chaves:** Resíduo Construção civil, Calcinação, Forno rotativo contínuo, Gesso Reciclado, CFD.

## STUDY AND OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION PROCESS OF PLASTER FROM RECYCLED WASTE OF CONSTRUCTION

**Abstract:** Studies were conducted on the technical feasibility of obtaining beta gypsum waste from two main applications in construction, masonry coating and lining boards. A preliminary study of the calcination of the dihydrate in a continuous rotary kiln pilot scale length of 5.45 m and 0.90 m internal diameter was performed using the technique of numerical simulation by computational fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics - CFD) with the aid of commercial software FLUENT 12.0. Model was adopted k- $\epsilon$  turbulence to simulate the combustion of natural gas occurred in the combustion chamber. We then developed the profiles of temperature distributions and velocity combustion gases in the area of the fuel injection as well as the simulation of the kinetic energy along the length of the rotary kiln. Experimental tests of calcination of gypsum and waste gypsum board and plaster coating were carried out following a full factorial design of type  $3^{3-1}$ , evaluating the effects of three factors: speed of rotation of the cylinder temperature control combustion and flow rate of solids. The optimum conditions of calcination of the dihydrate were the control of temperature of the combustion of 500 ° C, the speed of rotation of the cylinder 3 rpm and the solid flow rate of 120 kg / h. Plasters from the optimal calcination conditions of gypsum (A) and waste plaster coating (B) and block (C) had the consistency of 0.70 as optimal condition, post-calcination. Chemical analysis of mentioned gypsum had water contents close to the crystallization hemihydrate, (4.2% to 6.2%), set by standard. The test results of compressive strength, flexural tensile strength and adhesion of the coating and surface hardness, found for the blocks prepared with Plasters (A), (B) and (C) obtained consistency and optimal drying time, respectively 0.70 and 7 days. The pastes prepared with Plasters (A), (B) and (C) in the post-calcination consistency of 0.70 and 7 days of drying were characterized by adopting complementary techniques: TG, DTA, BET, IR, XRD, SEM results which showed that reinforced the possibility of production of gypsum from waste plaster coating and board and re-use and marketing of gypsum waste generated by construction after appropriate treatment, to represent an economically interesting alternative for generators this type of waste.

**Keywords:** Construction Waste, Calcination, continuous rotary furnace, Recycled Gypsum, CFD.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características dos produtos da reação de calcinação da gipsita em função da temperatura	47
Tabela 2.2	Características do forno tipo panela produzindo gesso Beta	49
Tabela 2.3	Características do forno tipo marmita produzindo gesso Beta	51
Tabela 2.4	Características do forno tipo rotativo com aquecimento diretor, produzindo gesso Beta	53
Tabela 2.5	Informações gerais sobre os fornos em operação no Araripe	53
Tabela 2.6	Características do forno tipo marmita rotativo produzindo gesso Beta	55
Tabela 2.7	Propriedades do gás natural utilizado neste trabalho ( $T=20^{\circ}$ e $P=1\text{ atm.}$ )	75
Tabela 2.8	Constantes Físicas dos Hidrocarbonetos	76
Tabela 2.9	Dados sobre a produção mundial de gipsita	77
Tabela 2.10	Atribuições dos softwares ANSYS - CFD	90
Tabela 3.1	Instrumentação do sistema de medição e monitoração de ar e combustível no forno piloto rotativo	114
Tabela 3.2	Sugestões para misturas de gases	123
Tabela 3.3	Fatores e níveis adotados para o planejamento experimental empregado	128
Tabela 3.4	Matriz do Planejamento Experimental adotada	129
Tabela 3.5	Propriedade física do pó na determinação do módulo de finura, massa unitária (Apêndice)	139
Tabela 4.1	Fatores e níveis utilizados nos experimentos	163
Tabela 4.2	Matriz do Planejamento Experimental Fatorial Completo	164

Tabela 4.3	Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação – gesso oriundo de placa de gesso	165
Tabela 4.4	Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação – gesso oriundo de placa de gesso	165
Tabela 4.5	Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação – gesso oriundo de revestimento	166
Tabela 4.6	Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do Hemidrato oriundo de gipsita (G.H <sub>Hemidrato-gipsita</sub> )	168
Tabela 4.7	Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do Hemidrato oriundo de gesso placa (G.H <sub>Hemidrato-placa</sub> )	168
Tabela 4.8	Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do Hemidrato oriundo de gesso revestimento (G.H <sub>Hemidrato-revestimento</sub> )	169
Tabela 4.9	Análise de variância (ANOVA): Hemidrato beta	177
Tabela 4.10	Análise de variância (ANOVA): Hemidrato placa	178
Tabela 4.11	Análise de variância (ANOVA): Hemidrato revestimento	178
Tabela 4.12	Concentração Adimensional do traçador em função do tempo residência no reator(Apêndice)	180
Tabela 4.13	Evolução da água de hidratação e temperatura da gipsita e dos resíduos de (revestimento e placa) em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional (Tc = 500°C, N= 3 rpm e Qs kg/h) (Apêndice)	181

Tabela 4.14	Valor do diâmetro médio de Sauter na análise granulométrica do gesso oriundo da calcinação da gipsita e resíduos (revestimento e placa). (Apêndice).	183
Tabela 4.15	Resultados da análise química para amostras de gesso oriundos da calcinação da gipsita, resíduos de gesso revestimento e placa e resíduo de gesso não calcinados	185
Tabela 4.16	Resultados da determinação da água livre e de cristalização para os gessos oriundos da gipsita e resíduos de gesso revestimento e placa	186
Tabela 4.17	Penetração do cone em relação à consistência (água/pó) dos materiais estudados (Apêndice)	188
Tabela 4.18	Interferência fator água/pasta no tempo de pega (Apêndice)	189
Tabela 4.19	Resistência à compressão dos percentuais a 100% de gesso oriundo de resíduo revestimento e placa adicionados a gipsita calcinada em relação à consistência (Apêndice)	190
Tabela 4.20	Resistência à Flexão dos percentuais a 100% de gesso oriundo de resíduo revestimento e placa adicionados a gipsita calcinada em relação à consistência (Apêndice)	192
Tabela 4.21	Dureza dos percentuais a 100% de resíduos revestimento e placa adicionados a gipsita calcinada em relação à consistência (Apêndice)	193
Tabela 4.22	Influência do tempo de secagem dos corpos de prova em relação à resistência à compressão e densidade aparente (Apêndice)	195
Tabela 4.23	Resistência de aderência à tração em parede de alvenaria cerâmica com gesso oriundo da calcinação da gipsita, com 7mm de espessura (Apêndice)	198



Tabela 4.24	Resistência de aderência à tração em parede de alvenaria cerâmica com resíduo revestimento, com 7mm de espessura (Apêndice)	198
Tabela 4.25	Resistência de aderência à tração em parede de alvenaria cerâmica com resíduo placa, com 7 mm de espessura (Apêndice )	198
Tabela 4.26	Resultado de área superficial e porosidade das amostras de gessos (A), (B) e( C )	206
Tabela 4.27	Correlação entre a frequência de vibração na região do infravermelho e a espécie química	211

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Resíduos de placas e gesso ao final do dia de trabalho	32
Figura 1.2-	Paredes construídas com blocos de material reciclado	32
Figura 1.3	Resíduos de gesso no aterro da Muribeca/Recife/PE	33
Figura 2.1	a) Pedra ruim, b) rapadura, c) alabastro branco, d) alabastro rosa, e) pedra branca, f) cocadinha	38
Figura 2.2	Lavra da gipsita	39
Figura 2.3	Fluxograma básico do processo de produção de gesso	44
Figura 2.4	Fluxograma de um Forno tipo Panela	48
Figura 2.5	Fluxograma Forno Marmita Vertical	50
Figura 2.6	Fluxograma típico de Forno Rotativo	52
Figura 2.7	Fluxograma típico de um Forno de Moinho calcinador/sistema Flash Dryer	54
Figura 2.8	Fluxograma forno Marmita Rotativo	55
Figura 2.9	Fluxograma de produção de gesso alfa em autoclave aquecido com vapor	56
Figura 2.10	Fluxograma de produção de gesso alfa por desidratação em meio líquido	57
Figura 2.11	Cadeia produtiva do gesso	62
Figura 2.12	Localização da região Nordeste do Brasil maior produtor de gipsita gesso e seus derivados do País	79
Figura 3.1	Esquema do forno rotativo piloto do DEQ-UFPE	105
Figura 3.2	Forno rotativo piloto para calcinação com Gás Natural- DEQ - UFPE	106

Figura 3.3	Extremidade da saída dos materiais do forno piloto destacando-se as abas axiais e o conduto que serve de suporte para os cabos dos termopares	106
Figura 3.4	Conjunto eletromecânico responsável pelo movimento de rotação do cilindro do forno	107
Figura 3.5	Mecanismo responsável pelo rolamento e apoio do cilindro do forno rotativo piloto	107
Figura 3.6	Elevador de canecas e tremonha responsável pela alimentação de sólidos	109
Figura 3.7	Transportador helicoidal responsável pela coleta do gesso produzido no forno rotativo piloto	110
Figura 3.8	Ciclone instalado na saída dos gases do forno rotativo piloto	110
Figura 3.9	Coluna de lavagem dos gases e efluentes do forno piloto	111
Figura 3.10	Forno rotativo piloto com isolamento térmico	111
Figura 3.11	Sistema utilizado na monitoração e controle das condições de combustão para o forno piloto	113
Figura 3.12	Sistema de alimentação do ar de combustão e queimador	113
Figura 3.13	Tela do software de acompanhamento e controle das variáveis do forno rotativo piloto	115
Figura 3.14	Sistema de medidas do forno através de software	115
Figura 3.15	Esboço Cotado da região de interesse do Forno Piloto Rotativo Disponível n Departamento de Engenharia Química da UFPE	117
Figura 3.16	Domínio e malha do forno rotativo usado nas simulações. Detalhe da malha utilizada na simulação. Região central	118
Figura 3.17	Malha utilizada na simulação – Regiões de entrada e saída	118

Figura 3.18	Malha utilizada na simulação – Visão total	118
Figura 3.19	Queimador do forno com respectivas entradas de saída dos fluidos	119
Figura 3.20	Separação de partícula acima de 2 mm	138
Figura 3.21	Jogo de Peneiras seriado (ou padrão)	138
Figura 3.22	Funil de ensaio	139
Figura 3.23	Balança eletrônica	139
Figura 3.24	Teste de compressão em corpos de prova	142
Figura 3.25	Teste de tração a flexão em corpos de prova	143
Figura 3.26	Equipamento de medida de resistência de aderência da pasta de gesso	144
Figura 3.27	Arrancamento do resíduo de revestimento e placa e gesso oriundo da calcinação da gipsita	145
Figura 3.28	Durômetro Shore C	147
Figura 3.29	Analizador de Área Superficial e Tamanho de Poros da Micromeritics modelo ASAP 2420, do CETENE	150
Figura 3.30	Espectrofotômetro NIRMID spectrum 400da marca Perkin Elmer	153
Figura 3.31	Espectrofotômetro NIRMID spectrum 400da marca Perkin Elmer [ a), b), c) ]	153
Figura 4.1	Distribuição da temperatura no plano horizontal eixo-z, de giro do forno rotativo. Condições do gás natural: 0,000981 kg/s	158
Figura 4.2	Distribuição da temperatura em diferentes coordenadas do eixo – z. Condições do gás natural: 0,000981 kg/s	159
Figura 4.3	Distribuição da temperatura no plano horizontal eixo-z na	

	câmara de combustão	160
Figura 4.4	Distribuição do fluxo de velocidade do forno. Condições do gás natural: 0,000981 kg/s	161
Figura 4.5	Distribuição do fluxo de velocidade na zona de ejeção. Condições do gás natural: 0,000981 kg/s	161
Figura 4.6	Distribuição da energia cinética. Condições do gás natural: 0,000981 kg/s	162
Figura 4.7	Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemihidrato oriundo de gipsita (G.H. <sub>hemidrato-gipsita</sub> )	166
Figura 4.8	Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemihidrato oriundo de placa de gesso (G.H. <sub>hemihidrato-placa</sub> )	167
Figura 4.9	Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemihidrato oriundo de revestimento de gesso (G.H. <sub>hemihidrato-rev.</sub> )	167
Figura 4.10	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H. (%) do Hemihidrato Beta, em função de Tc versus N. 110 kg/h	170
Figura 4.11	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H. (%) do Hemihidrato Placa, em função de Tc versus N. Condições: Qs=110 kg/h	170
Figura 4.12	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H. (%) do Hemihidrato Revestimento, em função de Tc versus N. Qs=110 kg/h	171
Figura 4.13	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso, em função de Tc versus Qs. 2,00 rpm	172
Figura 4.14	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, do gesso Placa, em função de Tc versus Qs.	

2,00rpm 172

Figura 4.15	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de revestimento, em função de $T_c$ versus $Q_s$ . 2,00 rpm	173
Figura 4.16	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso em função em função de $N$ versus $Q_s$ . Condições: $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	174
Figura 4.17	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de placas em função de $N$ versus $Q_s$ . Condições: $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	174
Figura 4.18	Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de revestimento, em função de $N$ versus $Q_s$ . Condições: $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	175
Figura 4.19	Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo do Hemihidrato Beta para a resposta Grau de Hidratação. Condições: $Q_s = 110\text{ kg/h}$ , $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $N = 2,00\text{ rpm}$	175
Figura 4.20	Valores experimentais versus previstos pelo modelo do Hemihidrato Placa para a resposta Grau de Hidratação. Condições: $Q_s = 110\text{ kg/h}$ , $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $N = 2,00\text{ rpm}$	176
Figura 4.21	Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo Hemihidrato Revestimento para a resposta Grau de Hidratação. Condições: $Q_s = 110\text{ kg/h}$ , $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $N = 2,00\text{ rpm}$	176
Figura 4.22	Distribuição do tempo de residência no forno rotativo	180
Figura 4.23	Evolução da água de hidratação e temperatura da gipsita em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional $T_c = 500^{\circ}\text{C}$ , $N = 3\text{rpm}$ e $Q_s = 120\text{ kg/h}$ , $T_r = 17,2$ (min.)	181
Figura 4.24	Evolução da água de hidratação e temperatura do resíduo revestimento em calcinação, na saída do reator, em função	182

do tempo operacional  $T_c=500^{\circ}\text{C}$ ,  $N=3\text{rpm}$  e  $Q_s= 120 \text{ kg/h}$ ,  
 $T_r+17,2(\text{min.})$

Figura 4.25	Evolução da água de hidratação e temperatura do resíduo placa em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional $T_c=500^{\circ}\text{C}$ , $N=3\text{rpm}$ e $Q_s= 120 \text{ kg/h}$ , $T_r=17,2(\text{min.})$	182
Figura 4.26	Curva de distribuição granulométrica	184
Figura 4.27	Ensaio em amostras do gesso calcinadas na penetração do cone em relação à consistência (água/pó) dos materiais estudados	188
Figura 4.28	Influência do fator água/ gesso calcinado, resíduo (revestimento e placa) a 100%, no tempo de pega dos materiais	189
Figura 4.29	Influência da proporção água/pó de gesso e resíduos sobre a resistência a compressão dos materiais	191
Figura 4.30	Influência da proporção água/pó de gesso e resíduos sobre a resistência a flexão dos materiais	192
Figura 4.31	Influência do fator água/ gesso calcinado e percentual Resíduo revestimento e Placa, na Dureza Shore C	194
Figura 4.32	Influência do tempo de secagem sobre a resistência a compressão e densidade aparente Gesso (A)	197
Figura 4.33	Influência do tempo de secagem sobre a resistência a compressão e densidade aparente Gesso (B)	197
Figura 4.34	Influência do tempo de secagem sobre a compressão e densidade aparente Gesso (C)	198
Figura 4.35	Resistência de aderência à tração em parede de alvenaria cerâmica com Gesso a) Gesso (A) b) Gesso (B) e c) Gesso (C)	199
Figura 4.36	Análise Térmica do Gesso Beta	202
Figura 4.37	Análise Térmica do Resíduo Revestimento calcinado	203

Figura 4.38	Análise Térmica do Resíduo Placa (forro), calcinado	204
Figura 4.39	Isotermas de adsorção/dessorção das composições de resíduo revestimento com granulometria media de 45µm (Gesso (B))	207
Figura 4.40	Isotermas de adsorção/dessorção das composições gesso Beta com granulometria de 45µm (Gesso (A))	207
Figura 4.41	Isotermas de adsorção/dessorção das composições resíduo placa com granulometria média de 45µm(Gesso (C))	208
Figura 4.42	Espectro na região do infravermelho do gesso Beta e Resíduo; Revestimento e Placa (forro) sendo observados os picos	210
Figura 4.43	Difratograma de R-X das amostras de gesso Beta	212
Figura 4.44	Difratograma de R-X das amostras de Resíduo GessoRevestimento 100%	212
Figura 4.45	Difratograma de R-X das amostras de Resíduo Placa 100%.	213
Figura 4.46	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó de gesso Beta 100% (A)	214
Figura 4.47	MEV dos resíduos de revestimento - a) 50%, b) 75%, c) 100%	215
Figura 4.48	MEV dos resíduos de Placa - a)50%, b) 75%, c) 100%.	215



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agencia Nacional do Petróleo
ANOVA	Análise de Variância
ASA	Análise de área superficial
ATD	Análise Termodiferencial
BDDT	Braunauer, Deming e Teller
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BJH	Barret-Joyner-Halenda
CFD	Computação Fluido Dinâmica
CETENE	Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPU	Central Processing Unit
CV	Cavalo Vapor
BPF	Óleo Combustível Derivado de Petróleo
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
COPERGÁS	Companhia Pernambucana de Gás
DES	Detached Eddy Simulation
DO	DiscreteOrdinates (Modelo das Ordenadas Discretas)
DRX	Difratometria de Raios X
DTR	Determinaçãodo Tempo de Residência
EAA	Espectroscopia de Absorção Atômica
EDM	Eddy DissipationModel
FM	FlameletModel
FRCM	Finite Rate CombustionModel
GH	Grau de Hidratação
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo

GN	Gás Natural
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
Hg	Mercúrio
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
ITEP	Instituto Tecnológico de Pernambuco
KBr	Brometo de potássio
LAC	Laboratório de Análise de Combustíveis
LES	Large Eddy Simulation
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
MW	Megawatt
N	Newton
NBR	Normas Brasileiras
P1	Radiação I em séries ortogonais de harmônicos esféricos
PDF	ProbabilityDensityFunction
RANS	Reynolds AveragedNavier-Stokes
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
Re	Número de Reynolds
RK	Redlich-Kwong( fator de correção gás natural)
RNG	RenormalizationGrouptheory
RPM	Rotações por minuto
RSM	Reynolds Stress Model
St	Medida para lenha (Estéreo)
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SST	Shear – Stress-Transport

TG	Termogravimétrica
Torr	Unidade mmHg
u.s.c	Unit Shore C
UV	Ultravioleta

## VARIÁVEIS E SÍMBOLOS EM LETRAS LATINAS

A	Área da pastilha	(mm)
$C(t)$	Concentração do traçador na saída do reator	(mg/g)
$E(t)$	Função distribuição do tempo de residência	(min. <sup>-1</sup> )
GH	- Grau de hidratação	(%)
kcal	Quilocalorias	( - )
k	energia cinética turbulenta	( - )
MU	- Massa unitária	(kg/m <sup>3</sup> )
N	- Velocidade de rotação do cilindro	(rpm)
P	- Carga de ruptura para os corpos de prova	(N)
P/Po	Pressões relativas	(%)
Qs	- Vazão de alimentação de sólidos	(kg/h)
R <sup>2</sup>	- Coeficiente de determinação	(%)
Ra	Resistência de aderência à tração	(MPa)
RM	- Resistência mecânica à compressão	(MPa)
S	- Seção transversal de aplicação da carga	(mm <sup>2</sup> )
Tc	- Temperatura de controle da combustão	(°C)
X	- Variáveis independentes	(-)
Y	- Variáveis respostas	(-)

## VARIÁVEIS E SÍMBOLOS EM LETRAS GREGAS

$\alpha$	Indica ter água de cristalização	( - )
$\varepsilon$	Proporção da umidade relativa	( - )
$\rho$	Densidade	Kg/m <sup>3</sup>
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta dinâmica	kg/m s
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker	( - )
$\bar{\rho} u_i'' u_j''$	Tensores de Reynolds	( - )
$\dot{\bar{\omega}}_k$	Taxa de reação das espécies químicas	( - )
$\overline{\Phi''} = 0$	Unidade media escalar	( - )
$\overline{\rho' u_i'}$	Flutuações de densidade e velocidade	( - )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>37</b>
2.1	O Minério Gipsita	37
2.2	Gipsita e suas transformações	40
2.3	Produção industrial de gesso	44
2.4	Plantas de Fabricação de Gesso	48
2.5	Hidratação e pega do gesso	57
2.6	Principais usos da gipsita e do gesso	59
2.7	Propriedades de Gesso para Construção Civil	63
2.7.1	Prescrições Normativas	63
2.7.2	Isolamento térmico e resistência ao fogo	64
2.7.3	Isolamento acústico	65
2.7.4	Aderência a substratos	66
2.7.5	Trabalhabilidade e moldabilidade	66
2.7.6	Resistência mecânica	67
2.8	Resíduos da Construção	68
2.9	Gás Natural	72
2.10	Mercado da gipsita e gesso	77
2.11	Fundamentos Combustão Gasosa	80
2.12	Fluidodinâmica Computacional para a Engenharia das Reações Químicas	83
2.12.1	Modelagem Computacional	83
2.12.2	Forno Rotativo Continuo	87
2.12.3	Métodos de Volumes Finitos	90
2.12.4	Equações Governantes	92
2.12.5	Desenvolvimento dos Modelos Apropriados	94

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>103</b>
3.1	Gipsita	103
3.1.1	Resíduo de gesso	104
3.2	Descrição da planta piloto de calcinação	104
3.2.1	Forno rotativo contínuo	105
3.2.2	Sistemas auxiliares	112
3.3	Métodos	116
3.3.1	Simulação do forno piloto utilizando a Fluidodinâmica computacional	116
3.3.2	Condições de contorno	119
3.3.3	Tomada de pressão	120
3.3.4	Contorno das paredes	120
3.3.5	Modelos	120
3.3.6	Abordagem numérica	122
3.3.6.1	Solver	122
3.3.6.2	Sugestões	122
3.3.6.3	Solução (Controle)	123
3.3.6.4	Discretização	123
3.3.6.5	Etapas para solução	124
3.3.6.6	Convergência	124
3.4	Planejamento Experimental	125
3.5	Determinação da Distribuição do Tempo de Residência - DTR	130
3.5.1	Definição	130
3.5.2	Preparação do traçador	132
3.5.3	Medição da concentração do traçador na saída do reator	133
3.6	Seleções de Materiais	134
3.6.1	Determinação da água livre e de cristalização dos gessos e resíduos	136
3.7	Caracterização das Amostras (gesso e resíduos de gesso)	137
3.7.1	Análise granulométrica dos resíduos de gesso	137
3.7.2	Massa unitária	139
3.7.3	Ensaio Físicos e Mecânicos Normalizados	139
3.7.3.1	Ensaio físicos	140

3.7.3.1a	Consistência da pasta	140
.7.3.1b	Tempo de pega	140
.7.3.2	Ensaio Mecânicos	141
3.7.3.2a	Resistência à Compressão	141
3.7.3.2b	Resistência à Flexão	142
3.7.3.2c	Resistência à Aderência	143
3.7.4	Dureza	146
3.7.5	Análises Complementares	147
3.7.5.1	Análise Química	148
3.7.5.2	Análise Térmica Diferencial-ATD	148
3.7.5.3	Análise Termogravimétrica-ATG	148
3.7.5.4	Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)	149
3.7.5.5	Espectroscopia de Infravermelho	152
3.7.5.6	Difratometria de raios X	154
3.7.5.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	155
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>156</b>
4.1	Simulação Numérica do Gás no Forno Rotativo Contínuo em Escala Piloto	157
4.1.1	Modelos utilizados na simulação de combustão usando o FLUENT	157
4.2	Distribuição das Temperaturas	158
4.2.1	Distribuições de fluxo do contorno de velocidade no campo do reator	160
4.2.2	Turbulência	162
4.3	Estudo paramétrico do processo da calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e placa	163
4.4	Distribuição de Tempo de Residência - DTR	179
4.5	Processo de Calcinação da Gipsita e dos Resíduos de Gesso	180
4.5.1	Determinação do tempo de funcionamento do regime permanente do forno	180
4.5.2	Análise granulométrica dos diferentes gessos produzidos	183
4.5.3	Análise química	184



4.5.4	Determinação da umidade e de água de cristalização	185
4.5.5	Estudos para determinação da consistência ideal para formulação de pastas do Gesso	187
4.5.5.1	Penetração do cone	188
4.5.5.2	Tempo de pega	189
4.5.5.3	Resistência à compressão	190
4.5.5.4	Resistência à flexão	192
4.5.5.5	Dureza	193
4.5.5.6	Conclusões Parciais	194
4.5.5.6.1	Tempo de Secagem dos corpos de prova e Aderência de revestimento em paredes de cerâmica	195
4.5.5.6.2	Tempo de secagem dos corpos de prova	195
4.6	Aderência	198
4.7	Caracterização dos materiais	200
4.7.1	Ensaio de DTA e DTG	201
4.7.2	Área superficial e porosidade (Método BET)	205
4.7.3	Espectroscopia de Infravermelho	209
4.7.4	Difratometria de Raios X (DRX)	211
4.7.5	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	214
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b>	<b>217</b>
5.1	Conclusões	217
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	223
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>224</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES</b>	<b>239</b>

## CAPÍTULO 1

---

### 1 - INTRODUÇÃO

A reciclagem é uma das alternativas para a diminuição do volume produzido de lixo urbano, contribuindo diretamente para a preservação do meio ambiente, Sato (2003: p. 55), reciclar significa transformar materiais usados em novos produtos para o consumo. Esta necessidade foi despertada pelos seres humanos, a partir do momento em que se verificaram os benefícios que este procedimento trás para o planeta Terra, principalmente com a diminuição da extração de recursos naturais.

O desenvolvimento sustentável requer uma redução do consumo de matérias-primas naturais não renováveis, disciplinando ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais. O fechamento do ciclo produtivo, gerando novos produtos a partir da reciclagem de resíduos, é intrínseco a esse processo. É necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias para a reciclagem de resíduos de forma eficiente e segura, que resultem em produtos com desempenho adequado para cada fim, e que sejam economicamente competitivos nos diferentes mercados e é um desafio do ponto de vista tecnológico (CAMPOS *et al.*, 1994). A ideia de investir em pesquisas na área de reciclagem de resíduos é uma emergência global.

A Construção Civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, e, por outro lado, comporta-se, ainda, como grande geradora de impactos ambientais, quer seja pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem ou pela geração de resíduos (SANTOS 2007). O setor tem um grande desafio de como conciliar uma atividade produtiva, em

condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável, consciente e menos agressivas ao meio ambiente.

A Construção Civil no Brasil apresenta baixos índices de produtividade em relação a outros países, principalmente no desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir o desperdício de materiais, aliados à baixa qualificação profissional. Enquanto em países desenvolvidos a média de resíduos desperdiçados em novas construções é de  $100,0 \text{ kg/m}^2$ , no Brasil gira em torno de  $300,0 \text{ kg/m}^2$ . Em termos quantitativos, esses resíduos correspondem a 50,0% da quantidade em massa de resíduos sólidos urbanos coletados em cidades com mais de 500 mil habitantes, segundo Monteiro et al. (2001).

O mais preocupante quando se fala de geração de resíduos versus preservação do meio ambiente, é o seu crescimento, enquanto a taxa de natalidade da população brasileira aumenta em média 1,0% ao ano, os resíduos ou lixos urbanos aumentam 6,6% ao ano (ABRELPE/2009).

O uso do gesso na construção civil brasileira vem crescendo gradativamente ao longo dos últimos anos. Ganhou impulso a partir de meados da década de 90, com a introdução da aplicação de blocos de gesso nas vedações horizontais, revestimentos aplicados diretamente nas paredes e tetos, utilizando placas para forro, sancas e moldura e outras peças de acabamento e ornamentação (Relatório SINDUSGESSO/2009). Em todos esses usos são gerados resíduos em pequenas ou grandes proporções, e a gestão desses, da mesma forma que ocorre com outros materiais empregados nos canteiros de obras, passou a demandar atenção cada vez maior das construtoras e produtores em razão da Resolução do CONAMA de nº 307/2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar

os impactos ambientais baseado nas seguintes considerações: *“Da necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil; da disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados o que contribui para a degradação da qualidade ambiental; que os resíduos da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas; que os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos; a viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil; e que a gestão integrada de resíduos da construção civil deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental”*.

Os problemas com os resíduos de gesso não estão localizados apenas nos grandes centros urbanos, onde a Construção Civil emprega esses produtos, começam nas empresas que fabricam os pré-moldados e geram toneladas desses entulhos sem destinação própria, na maioria dos casos deixados à beira de estradas e rodovias federais e estaduais e no entorno das fábricas como entulho indesejado. A maioria dessas empresas não tem informações técnicas de como esses resíduos podem e devem ser reaproveitados ou reciclados. São poucas as empresas que têm a conscientização sobre a preservação do meio ambiente. O único trabalho de reaproveitamento desses resíduos dentro das empresas consiste em recolher o material refogado, sobras e quebras após o dia de trabalho para a confecção de pequenos tijolos artesanais, sem nenhuma qualidade ou especificação técnica, e são distribuídos aos próprios funcionários para construções ou reforma de suas próprias casas. Esse

material não tem valor agregado, já que esteticamente não chama a atenção dos consumidores, ficando assim apenas para consumo interno local (ITEP/2005);

Figuras 1.1e 1.2.



**Figura 1.1** - Resíduos de placas e gesso ao final do dia de trabalho.



**Figura 1.2** - Paredes construídas com blocos de material reciclado.

O atual cenário econômico da Construção Civil é muito benéfico, principalmente quando avaliamos as perspectivas de crescimento nesta área. Nota-se principalmente o aquecimento por meio de programas de incentivo da construção criados pelo Governo, com investimentos e financiamentos, como o projeto 'Minha Casa, Minha Vida', além da proximidade da Copa do Mundo e Olimpíadas, que serão realizadas no Brasil nos próximos anos, demandando crescimento constante do mercado imobiliário.

Diversos estudos sobre o assunto apontam diretamente para a necessidade de qualificação da mão-de-obra, devido, principalmente, ao grande índice de desperdícios de material, atraso no cronograma da obra e serviços de má qualidade. Observa-se o crescente aumento de construções versus quantidade de entulhos e chega-se à conclusão de que não haverá espaço suficiente em aterros e lixos para depósito desses resíduos. A Figura 1.3 apresenta o exemplo do aterro da Muribeca, Recife/PE, usado como local de depósito dos resíduos de gesso e de construção, que não é o adequado para esse fim, em virtude de não ter a preparação do terreno com impermeabilização para essa atividade.



**Figura 1.3** – Resíduos de gesso no aterro da Muribeca/Recife/PE.

Com a visão geral dos problemas existentes a respeito dos resíduos da construção, principalmente os ocasionados pelo gesso, é necessário um desdobramento de ações de forma efetiva e eficiente, com o objetivo de minimizar os danos ambientais futuros que poderão ser irreversíveis ao longo do tempo. Desde o final da década de 90 do século passado, vêm sendo pesquisadas metodologias para a reciclagem do gesso de forma significativa e economicamente viáveis, limpas e separadas de outros contaminantes que podem ser utilizados em:

**Matéria prima.** Os resíduos de gesso oriundos da construção civil podem ser reutilizados, como matéria prima, para a produção de gesso ou pré-moldado;

**Indústria da transformação.** Os resíduos podem ser reaproveitados na própria obra como carga misturada ao gesso e aditivos usados para revestimento de paredes e tetos (Baltar, Alencar e Miranda, 2008).

**Setor agrícola.** Os resíduos podem ser utilizados na correção de solos alcalinos e deficientes em enxofre, potássio e nitrogênio substâncias de grande importância para o desenvolvimento das plantas.

Entre as possibilidades de reciclagem, a utilização como matéria prima para produção de gesso dos resíduos de gesso da construção, e mais especificamente os resíduos de placas de forro e de revestimento de paredes, motivou esse estudo.

O estudo baseou-se na otimização da etapa de calcinação desses resíduos em um forno piloto, contínuo e rotativo, utilizando como fonte energética o gás natural. O forno para a calcinação desses produtos está instalado no Departamento de Engenharia Química - DEQ da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

Assim o presente estudo tem como objetivo geral estudar e aperfeiçoar o processo de produção de gesso a partir dos resíduos oriundos de obras de revestimento de paredes e execução de forro de gesso. Os objetivos específicos deste trabalho foram definidos em 4 etapas, a saber:

- i) Elaborar previamente a modelagem e a simulação da combustão do gás natural, no queimador do forno piloto, com obtenção dos perfis de temperatura, pressão e espécies químicas ao longo do comprimento do forno rotativo, adotando a técnica de Fluidodinâmica Computacional – CFD (Computational Fluid Dynamics), pela aplicação do código comercial FLUENT<sup>TM</sup>;
- ii) Caracterizar os resíduos de gesso gerados pela Construção Civil na Região Metropolitana de Recife – RMR;
- iii) Identificar condições experimentais para a calcinação dos resíduos de gesso, como forma de definir condições otimizadas de operação, para o forno rotativo piloto, com auxílio da técnica de planejamento experimental e posterior análise dos resultados através da metodologia de superfícies de respostas (MSR);
- iv) Comparar os resultados encontrados para gesso produzido a partir de resíduos com ênfase nas propriedades químicas, físicas e mecânicas, com os valores preconizados pelas Normas Técnicas da ABNT referentes ao gesso produzido a partir da gipsita, que definem o comportamento desejável do gesso em pó, da pasta obtida quando misturado com água e finalmente após a sua reidratação e secagem;



Na estratégia de elaboração deste estudo foram eleitos cinco capítulos, cujas descrições sucintas podem ser vistas a seguir:

Capítulo 1 – Introdução da temática do trabalho de pesquisa que foi desenvolvida;

Capítulo 2 – Apresentação de uma visão da literatura pesquisada e os diferentes elementos bibliográficos utilizados para o embasamento das tarefas realizadas;

Capítulo 3 – Descrição dos materiais empregados e a metodologia utilizada na modelagem e simulação teórico-computacional da etapa de combustão na operação de calcinação e nas diferentes etapas experimentais do trabalho;

Capítulo 4 – Apresentação do conjunto dos resultados obtidos, com comentários e discussão;

Capítulo 5 – Apresentação das conclusões obtidas nesse estudo, e propostas para estudos futuros.

## CAPÍTULO 2

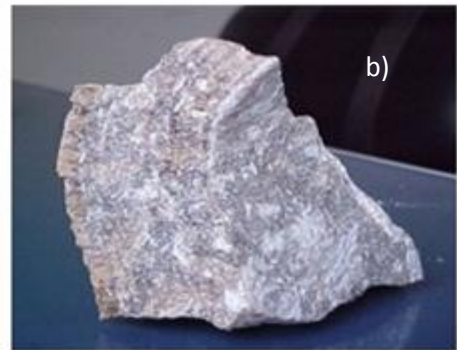
---

### 2 – REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 Minério gipsita

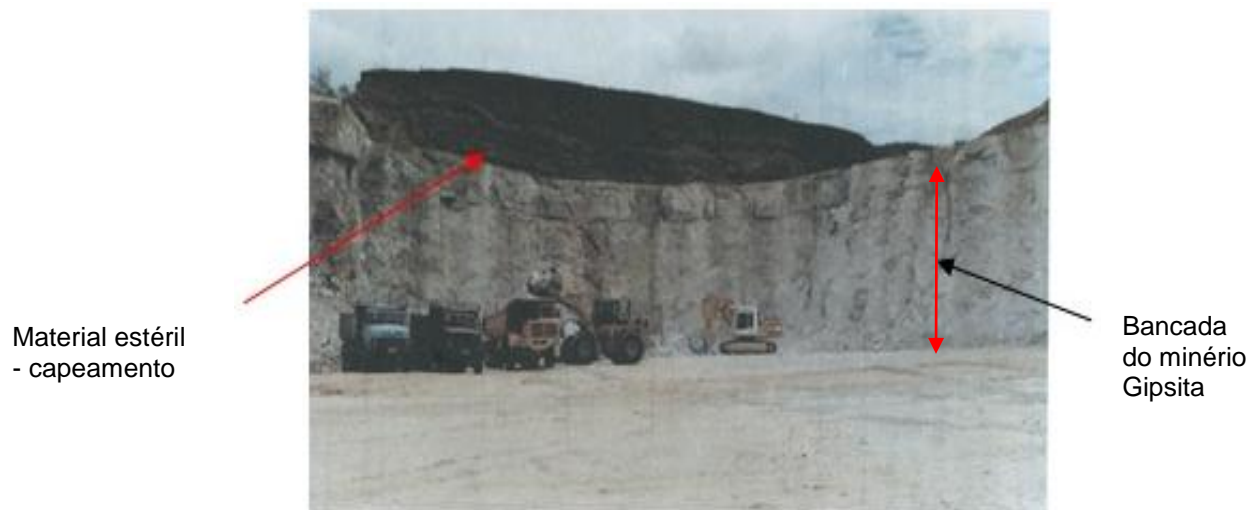
A gipsita *in natura* é um mineral constituído basicamente por sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Em alguns tipos de afloração do minério, podem ter contaminantes, provenientes do próprio solo, mas que não influenciam nas características do produto final, o gesso. Na Figura 2.1 pode-se observar os principais tipos de minérios encontrados nas minas do Pólo Gesseiro de Araripe/PE, a saber, (BALTAR *et al.*, 2003; CANUT, 2006):

- Anidrita ou pedra ruim (Figura 2.1- a): variedade com coloração Incolor, branco, azul, violeta, cinza-escuro;
- Rapadura, (Figura 2.1- b); variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde;
- Alabastro (Figura 2.1-c-d): maciça e transparente, muito utilizada em esculturas. Tipo que se caracteriza por apresentar problemas na calcinação devido ao seu carácter fibroso que promove anisotropia;
- Pedra branca, ou Estrelinha (Figura 2.1-e), variedade mais pura, com a coloração branca, gipsita que apresenta cristais radiados em forma de estrela;
- Cocadinha (Figura 2.1-f): um tipo de gipsita estratificada com raros filmes de argila verde;



**Figura 2.1** – a) Pedra ruim, b) rapadura, c) alabastro branco, d) alabastro rosa e) pedra branca, f) cocadinha (Fonte ITEP, 2005).

A lavra da gipsita consiste basicamente na remoção do capeamento, camada estéril de material argiloso com cobertura vegetal acima da bancada de gipsita, como pode ser visto na Figura 2.2. Obedecendo a um “plano de fogo” são feitos vários furos no corpo mineral, furos esses preenchidos com uma carga explosiva (dinamite) e se procede à detonação operação conhecida como desmonte de bancada. Os blocos de minério são desprendidos da bancada após o desmonte. Os blocos podem ter tamanhos que variam milímetros a metro cubico. Os blocos maiores necessitam ser reduzidos a pedaços menores com ajuda de rompedores ou com nova detonação. Só depois podem ser embarcados em caminhões caçamba e enviados para a planta de calcinação ou para as fabricas de cimento.



**Figura 2.2** – Lavra da gipsita a “céu aberto” na Região do Aripe em Pernambuco.

A gipsita em seu estado natural se caracteriza por apresentar cristais geminados do sistema monoclinico (DANA, 1976) com célula unitária cúbica de face centrada (CFC) e seus cristais podem ser prismáticos, tubulares ou lenticulares. Sua estrutura é composta por duas camadas de grupos sulfatos que estão unidos entre si por íons de cálcio (ALBATA apud CANUT, 2006). As moléculas de água formam ligações de

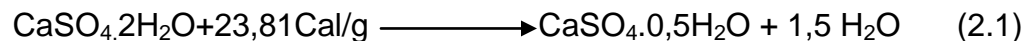
hidrogênio com os oxigênios dos grupos sulfatos, e cada cátion de cálcio é composto por duas moléculas de água e por seis oxigênios dos grupos do sulfato, (KLOPPROGGE e FROST, 2000).

## 2.2 Gipsita e suas transformações

Quando se aquece o minério de gipsita da temperatura ambiente a 1250 °C distinguem-se cinco fases de ree-gipsitação do sulfato de cálcio di-hidratado:

1 - Na temperatura ambiente o minério é essencialmente sulfato de cálcio di-hidratado.

2 - Ao alcançar 60°C inicia-se a perda de água de cristalização presente na gipsita com formação do semi-hidrato. É possível, entretanto, admitir a existência de mais de um tipo de semi-hidrato, dependendo da temperatura e pressão do processo, com teor de água que varia entre 0,15 e 0,66 moles; sendo o hemidrato, caracterizado pela presença de meio mol de molécula de água (ver equação estequiométrica abaixo), uma forma particular intermediária de grande interesse comercial pela sua estabilidade química. Os graus de hidratação e cristalinidade do produto estão associados ao processo de obtenção e condições de tratamento térmico de desidratação.



GIPSITA	GESSO
(DI-HIDRATADO)	(HEMIDRATO)

A reação acima pode ser observada experimentalmente a temperaturas superiores a 60°C, mas nesta faixa de temperatura ocorre uma cinética muito lenta, tornando a

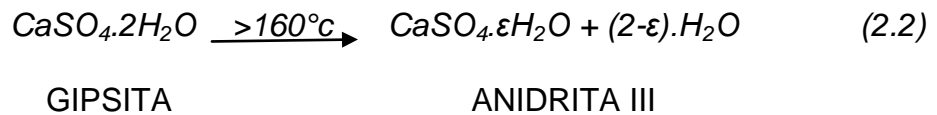
reação imperceptível. Em processos industriais, a velocidade requerida de produção é conseguida operando-se em uma faixa de temperatura entre (120 e 140) °C.

Quando a desidratação é realizada em autoclave, a pressões acima de uma atmosfera, um produto caracterizado por cristais bem formados dá origem a um semi-hidrato denominado de gesso alfa ( $\alpha$ ). De acordo com a literatura científica, o gesso alfa cristaliza na forma monoclinica (BUSHUEV E BORISOV apud SINGH, 2007). Os cristais são compactos e facilmente solúveis em água, resulta em formatos predefinidos, originando pastas de alta fluidez e peças com alto desempenho mecânico (PERES, BENACHOUR; SANTOS, 2008).

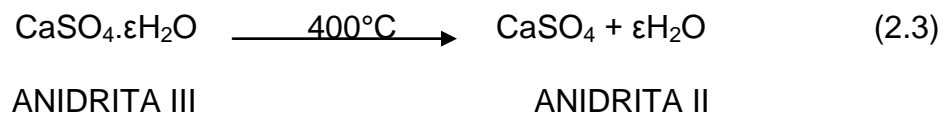
Se a retirada da água dos cristais de gipsita é realizada à pressão atmosférica forma-se o gesso beta ( $\beta$ ). A má formação destes cristais é atribuída à saída relativamente brusca da água de cristalização no decorrer da reação. O gesso beta cristaliza na forma trigonal (BUSHUEV e BORISOV apud SINGH, 2007) e apresenta morfologia caracterizada por cristais pontiagudos, desordenados com interfaces relativamente fracas (REYNAUD *et al.*, 2006). A pedra branca, mais pura e com menos contaminantes externos, é usada na produção do gesso alfa e os tipos alabastro e anidrita são empregados na fabricação de gesso beta, cimento e na agricultura (é apenas o minério moído e não calcinado). A gipsita tipo “cocadinha” é utilizada na produção dos gessos tipo beta e alfa. (BALTAR *et al.*, 2003).

3 - A *anidrita III* ( $\text{CaSO}_4$ ) é obtida entre 160°C e 200°C. Nessa condição alcança o semi-hidrato perde quase toda sua água e obtém-se uma anidrita solúvel e instável. A anidrita solúvel, de fórmula,  $\text{CaSO}_4 + \alpha \text{H}_2\text{O}$  indica que este produto pode conter água de cristalização, embora em baixo teor, variável entre 0,06 a 0,11 moles de água. A

anidrita III, sendo muito reativa, transforma-se em semi-hidrato em contato com a umidade do ar. Esta hidratação tem sido verificada após 12 horas de armazenamento do produto em atmosfera com umidade relativa em torno de 80% (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS, 1982).



4 - Ao se alcançar uma temperatura de 400°C, a anidrita III transforma-se em anidrita II, sendo esta última de hidratação lenta:



Quando a temperatura de reação aumenta acima de 400 °C, a velocidade de re-hidratação do produto obtido é cada vez mais lenta. A 500 °C necessita-se de mais de quatro dias, em média, para re-hidratar metade da anidrita. A 600 °C é necessário mais de 10 dias para re-hidratar metade da anidrita e, a 800 °C, o produto é considerado de difícil re-hidratação (o produto armazenado em atmosfera com umidade relativa em torno de 80%).

A Anidrita II, também chamada de Anidrita solúvel, ou ainda Anidrita supercalcinada de fórmula  $\text{CaSO}_4$ , pode ser obtida entre 350°C e 800°C. Entre 700°C – 800°C é denominada de gesso calcinado insolúvel ou gesso morto.

5 - Quando se atinge temperaturas de calcinação acima de 1250°C, a anidrita se decompõe em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

Segundo Hincapié e Cincotto, 1997, as seguintes propriedades específicas do gesso, obtido em um processo controlado, garantem um excelente desempenho na sua aplicação:

- Elevada plasticidade da pasta;
- Pega e endurecimento rápido ou lento (dependendo de sua utilização);
- Finura equivalente ao cimento;
- Pequeno poder de retração;
- Estabilidade volumétrica.

A propriedade de absorver e liberar umidade confere aos revestimentos de paredes em gesso uma elevada capacidade de promover, ao ambiente, um adequado equilíbrio higroscópico, além de funcionar como inibidor de propagação de chamas, liberando moléculas d'água quando em contato com o fogo, dificultando a sua propagação.

Por outro lado, devido à solubilidade do gesso (1,8 g/l), a utilização deste material puro fica restrita a ambientes interiores e onde não haja contato direto e constante com água (áreas molhadas, percolação e contatos externos).

No entanto, já se utilizam gesso e artefatos impermeabilizados conhecidos como materiais hidrofugados que na sua fabricação são adicionados compostos químicos que inibem a absorção de água, e podem ser utilizados em áreas molhadas e com percolação de água.

Alguns fatores devem ser observados quando da utilização do gesso na construção civil, tais como:

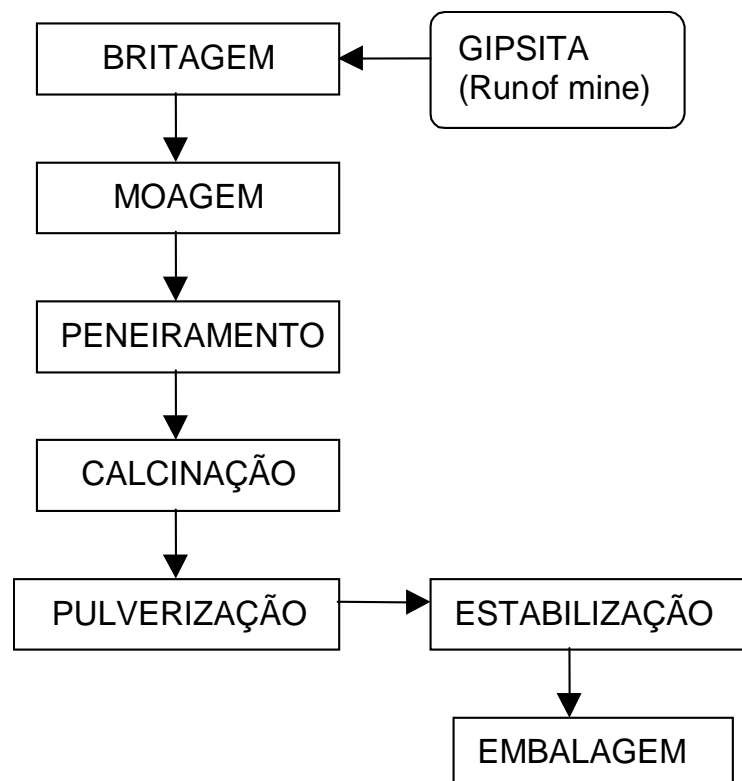
- Alto poder oxidante do gesso quando em contato com componentes ferrosos;



- Alto poder expansivo das moléculas de etringita, formada quando misturado o gesso com o cimento em fase de hidratação.

### 2.3 Produção industrial de gesso

O beneficiamento refere-se a um processo físico-químico, térmico e/ou mecânico ao qual um determinado material é submetido para que este assuma outras características propícias para seu uso. No caso da gipsita, o beneficiamento origina um produto final com propriedade específica, para um uso determinado. O processo de produção do gesso, de forma geral, compreende as operações unitárias mostradas no diagrama da Figura 2.3.



**Figura 2.3** - Fluxograma básico do processo de produção de gesso  
Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

A britagem consiste na fragmentação ou cominuição de blocos do minério de gipsita (matacões), em tamanhos adequados para uso na calcinação, normalmente são utilizados para essa atividade britadores de mandíbulas.

Na moagem, em função do tipo de forno a ser utilizado, a gipsita britada pode ser moída usando moinhos de martelo antes de ser enviada para a etapa seguinte. A forma de peneiramento depende da existência de plantas de calcinação com diferentes tipos de fornos. A gipsita moída pode ser peneirada com uso de peneiras vibratórias e separadas em frações para aplicações específicas.

A operação de calcinação, na qual a gipsita se transforma em gesso pela ação do calor, pode ser realizada a pressão atmosférica, para obtenção do gesso beta ( $\beta$ ), ou em autoclaves, para obtenção do gesso alfa ( $\alpha$ ).

A calcinação, a pressão atmosférica, é normalmente, realizada em fornos rotativos tubulares com diâmetros na faixa de (1,0 a 3,0) m e comprimento na faixa de (12,0 a 20,0) m. A unidade de beneficiamento é alimentada por 7,5 toneladas/dia de minério com dimensão maior em torno de 60 cm. A gipsita moída é introduzida logo após a câmara de combustão e é levada pelas chicanas do forno até a outra extremidade. Essa condição é utilizada para a produção de gesso tipo beta ( $\beta$ ).

Em países da Europa e nos Estados Unidos, têm-se outros tipos de fornos rotativos diretos e contínuos, como por exemplo: Fornos de 02 e 03 tubos da Monterde e fornos tipo Flash Dryer da Babcock.

A calcinação, a pressão atmosférica, é normalmente, realizada em fornos tubulares com duplos tubos, onde os gases quentes transitam pela capa interna, e o *minério a ser aquecido pela capa externa ou por tubos inseridos nessa segunda capa, a chama não entra em contato com o produto a ser calcinado*. Essas condições são

utilizadas para a produção de gesso tipo beta ( $\beta$ ). Um forno desse tipo se encontra em operação na Indústria de Gesso Trevo, em Trindade-PE e foi fabricado no Brasil pela Furlan.

No Polo Gesseiro do Araripe predomina a calcinação realizada em fornos tipo marmita horizontal (rotativa) ou vertical (estática) que variam nas dimensões e de capacidade de produção a depender de cada fabricante. No Brasil, existem equipamentos importados da França (Greblex) ou produzidos na região do Araripe/PE por metalúrgicas locais (Metalúrgica Menkaura e SM Tanques). Essas condições são utilizadas para a produção de gesso tipo beta ( $\beta$ ). Fornos Marmitas rotativas importadas estão em operação nas plantas do Grupo Lafarge e GE/Supergesso, e marmitas nacionais, fabricadas pela SM-Tanques, para várias empresas do Pólo Gesseiro do Araripe.

No Brasil, a exemplo da Europa e dos Estados Unidos, se utiliza o processo autoclavado, que consiste na desidratação da gipsita em meio úmido, com injeção de vapor ou aquoso. Esse segundo processo permite a produção de gesso com formato do cristal predefinido. Essas condições são utilizadas para a produção de gesso tipo alfa que é produzido no Pólo Gesseiro, por exemplo, pelas empresas Mineradoras São Jorge e na Indústria de Gessos Especiais - IGE.

De forma geral, a calcinação da gipsita sob diversas temperaturas permite a obtenção de produtos com características físicas e químicas diferentes. Na Tabela 2.1, são descritas as características dos produtos da reação de aquecimento da gipsita em função da temperatura.

**Tabela 2.1** - Características dos produtos da reação de calcinação da gipsita em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Produto obtido / aplicação
110 - 150	A Gipsita perde uma parte da água combina para se transformar em hemidrato de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) - Gesso para fundição.
170 - 250	O hemidrato de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) se transforma em Anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) instável e muito ávida por água - Anidrita ativa ou solúvel - normalmente utilizada para elaboração de misturas na produção de gesso rápido para a diminuição do tempo de pega das pastas.
300 - 600	Nessa faixa de temperatura se obtém a Gipsita totalmente desidratada anidrita e com tempo de pega muito longo - Anidrita insolúvel utilizada para elaboração de misturas na formulação de gesso para revestimento (30% de Anidrita + 70% de hemidrato)
600 - 900	A essa temperatura se obtém um produto inerte e que não apresenta o fenômeno da pega – Utilizado como carga para polímeros e tintas.

Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008)

O gesso, obtido após a calcinação do minério, é normalmente moído em moinho de martelos com peneiras na faixa de 0,6mm a 0,8mm de abertura, para uma moagem fina, de acordo com as especificações da ABNT.

Após a calcinação, em algumas empresas o gesso passa por um período de ensilamento ou estabilização com a finalidade de esfriar o material antes de ser ensacado para preservação de suas propriedades, normalmente o gesso quando sai do forno é conduzido através de elevador de canecas até um silo, onde o material é moído novamente e ensacado ainda quente.

O gesso é normalmente embalado em sacos com 2 ou 3 folhas de papel, contendo 20kg ou 40 kg, sendo destinados a construção civil. Opcionalmente, o gesso pode ser comercializado em “*Big Bags*”, com capacidade de 1000 kg, ou ainda podem ser embalados em sacos de rafia com 30 kg, sendo destinados às pequenas empresas

produtoras de artefatos nas localidades próximas às fábricas. Outras embalagens podem se utilizadas, dependendo da necessidade de cada cliente.

## 2.4 Plantas de Fabricação de Gesso

Encontram-se, atualmente, no Pólo Gesseiro do Araripe, vários tipos de plantas que são caracterizadas pelo tipo de forno e equipamento principal do processo de calcinação. Podendo-se observar os seguintes tipos de fornos: panela, marmita vertical, marmita rotativa e fornos rotativos tubulares, para a fabricação do gesso beta ( $\beta$ ) e autoclaves para a fabricação do gesso alfa ( $\alpha$ ).

A calcinação em forno tipo panela foi utilizada em grande quantidade no Araripe até o final da década de 90 do século passado e atualmente existem apenas em algumas empresas, normalmente empregando lenha como combustível de aquecimento. Um fluxograma de um tipo panela está apresentado na (Figura 2.4).

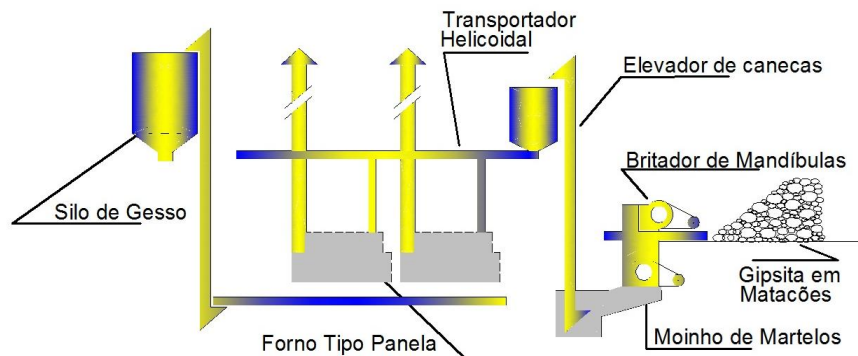


Figura 2.4 - Fluxograma de Forno tipo panela. Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

As suas vantagens são:

- Possibilidade de operação sem instrumento para controle da temperatura;
- Possibilidade de obtenção de praticamente todos os tipos de gesso beta;

- Simplicidade de manutenção;
- Baixo custo de reposição de peças.

Os fornos tipo Panela ainda são confeccionados na região por algumas oficinas, localizadas nos municípios de Araripina e Trindade. No passado eram também produzidos pelos fabricantes de gesso em suas próprias empresas.

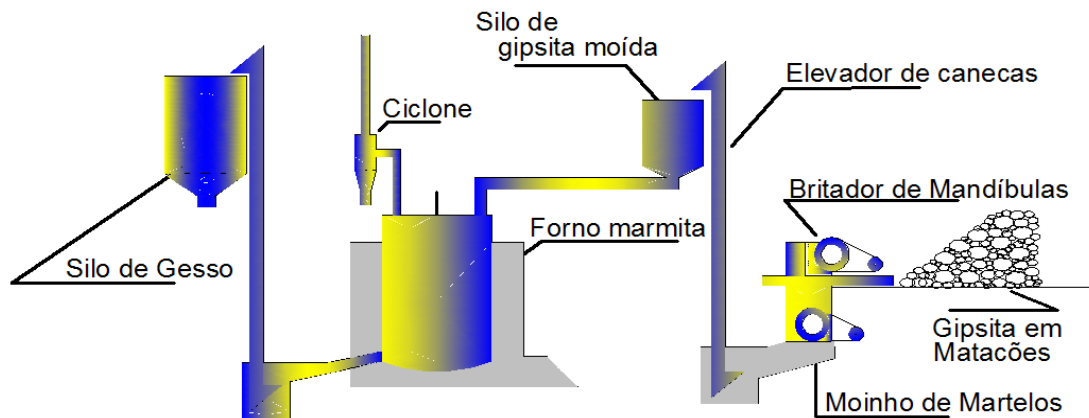
As características do forno Panela e os coeficientes técnicos e de consumo, estão apresentados na (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2** – Características do forno tipo Panela produzindo gesso beta.

Características	Unidade	Lenha
Consumo de combustível	kg (lenha) /ton. (gesso)	525,00
Poder calorífico da lenha (inferior)	kcal/kg	3.131,20
Consumo de calorías por tonelada de gesso	kcal/ton.	1.643.800,00
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	154.000,00
Eficiência térmica	%	45,0

\* Lenha - Densidade Volumétrica = 350 kg/St (estéreis); Umidade = 20% m/m. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

O forno marmitta vertical foi introduzido na região do Araripe, na década de 80, com o apoio do Instituto Tecnológico de Pernambuco - ITEP. Uma grande parte desse tipo de forno ainda opera atualmente, consumindo óleo BPF (óleo preto) ou lenha como combustível. Um fluxograma típico desse tipo forno está apresentado na Figura 2.5, onde se podem distinguir as seguintes operações: britagem, moagem, calcinação ou desidratação, moagem fina e embalagem.



**Figura 2.5** - Fluxograma típico de um forno marmitta vertical. Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

O forno tipo marmitta apresenta como vantagens:

- Aumento da produtividade - utiliza menos operários por tonelada de gesso produzida;
- Permite uma maior uniformidade - produz de uma só vez o que produziriam cerca de cinco fornos tipo panela (bateladas maiores);
- Permite a utilização de combustível alternativo - pode utilizar tanto a lenha como o óleo preto (BPF) sem necessidade de grandes modificações nas fornalhas;
- Maior rendimento do combustível - consome uma quantidade menor de lenha por tonelada de gesso produzida;
- Diminui a poluição do ambiente de trabalho - o pó liberado, em cada forno, durante a calcinação é normalmente retido em filtros de manga.

Esse tipo de equipamento, ainda é fabricado na região do Araripe pela Metalúrgica MENKAURA em Araripina, e produz cerca de 700 kg/h de gesso com ciclo de calcinação em torno de 3 horas.

As características dos fornos tipo marmita vertical, quando operando com lenha ou óleo preto (BPF) para produzir gesso, estão apresentadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** - Características do forno tipo marmita produzindo gesso beta.

Características	Unidade	Lenha*	Óleo**
Consumo de combustível	kg/t	350	45
Poder calorífico dos combustíveis	kcal/kg	3.131	9.770
Consumo de energia por tonelada de gesso	kcal/t	1.095.950	439.650
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/t	154.000	154.000
Eficiência térmica	%	14,0	35,0

\* Lenha - Densidade volumétrica = 350 kg/St Umidade= 20% m/m.

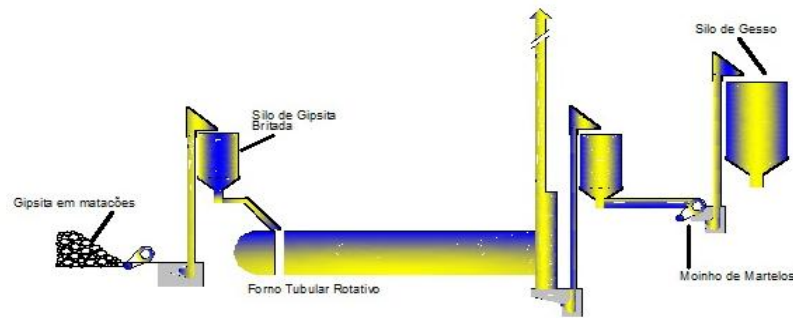
\*\* Óleo Preto (BPF) - Densidade = 0,974 kg/l Enxofre= 4,8% pp. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

O primeiro forno Tubular Rotativo a operar no Araripe foi o da empresa São Miguel, fabricante do gesso Gypsum, utilizando óleo BPF como combustível. Com o passar do tempo, outras empresas começaram a utilizar fornos rotativos acoplados a gaseificadores de lenha e carvão.

Vários desses fornos foram utilizados nas décadas de 80 e começaram a perder importância a partir da década de 90 porque as empresas passaram a optar por fornos com aquecimento indireto como o tipo Marmita Rotativo. Atualmente, existem alguns fornos rotativos em operação na região, em empresas como Gesso Trevo e Calmina. Esses fornos, bastante parecidos, produzem cerca de 3 a 4 toneladas de gesso por hora.

O fluxograma típico de um forno rotativo está apresentado na Figura 2.6 onde podem ser observadas as seguintes operações: Britagem, Calcinação ou Desidratação, Moagem e Embalagem.





**Figura 2.6** - Fluxograma típico de um forno rotativo. Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

Esse tipo de forno, quando opera com minério moído fino, necessita de mecanismos para retenção de poeira como labirintos, ciclones ou filtros de manga. O forno tipo rotativo, apresenta como vantagens:

- Produção contínua - facilita a obtenção de um gesso com características uniformes;
- Maior rendimento térmico - por utilizar o aquecimento direto (contato da chama com o minério), pode ser facilmente isolável;
- Fornalha Independente - essa independência permite que se façam as manutenções necessárias com pequenas paradas;
- Facilidade de automação - por ser um processo contínuo, pode ser automatizado com os consequentes ganhos de qualidade e diminuição de custos.

As características dos fornos tipo rotativo, quando utilizando óleo preto (BPF) para produzir gesso, estão apresentados na (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4** - características do forno tipo rotativo com aquecimento diretor, produzindo gesso beta.

Características	Unidade	Óleo BPF
Consumo de óleo	kg/t	35
Poder calorífico do óleo	kcal/kg	9.495
Consumo de caloria por tonelada de gesso	kcal/t	332.320
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/t	154.000
Eficiência térmica	%	45,0

\* Óleo Preto (BPF) - Densidade = 0,974 kg/litro Enxofre = 4,8% m/m. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

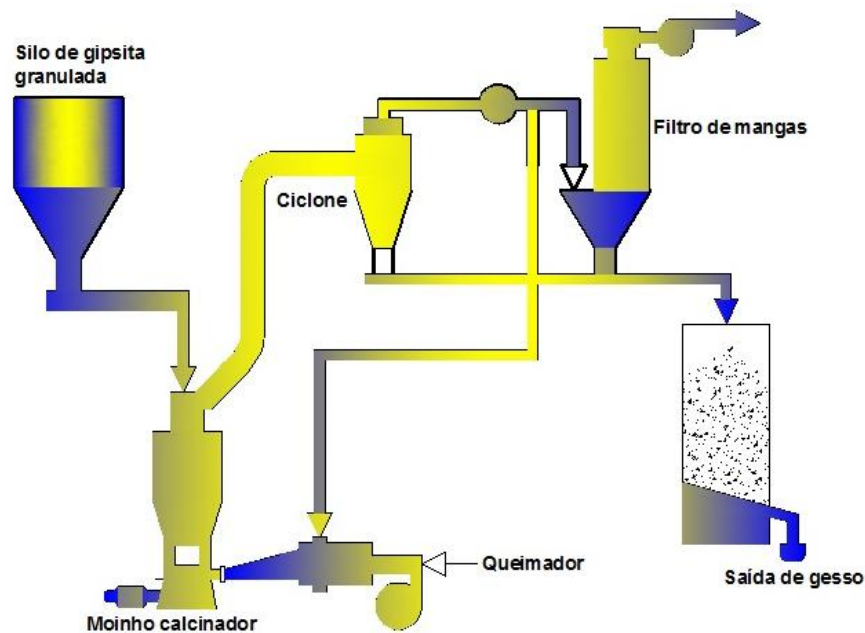
Um resumo das características mais importantes dos vários tipos de fornos em operação no pólo gesseiro do Araripe está apresentada na Tabela 2.5, essas informações permitem avaliar de forma mais ampla as vantagens e desvantagens do funcionamento de todos os fornos em operação.

**Tabela 2.5-** Informações gerais sobre os fornos em operação no Araripe.

Características	Rotativo tubular	Marmitta vertical	Panela
Tipo de gesso produzido	Fundição	Fundição e revestimento	Fundição e revestimento
Facilidade de controle do tempo de pega	não	sim	sim
Tendência a formar supercalcinado ou cru	sim	não	não
Poluente do ambiente interno	pouco	pouco	muito
Combustível utilizado	BPF	lenha ou BPF	lenha
Consumo combustível (kcal/t de gesso)	332	1.096/440	1.643
Investimento	grande	médio	pequeno
Capacidade produtiva (t/h)	2,5 - 3,5	0,6 – 0,8	0,1 - 0,2
Manutenção	média	média	grande
. Durabilidade (anos)	ND	ND	0,5 -0,6

ND: Não Determinada. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008)

Algumas plantas para calcinação no Brasil já contam com outros tipos de fornos, como a associação do moinho calcinador com o sistema flash dryer, utilizados preferencialmente para produção de gesso para acartonado, como mostrado na Figura 2.7. Plantas desse tipo estão em funcionamento nas fábricas da KNAUF e PLACO no Brasil.



**Figura 2.7** - Fluxograma típico de um forno de moinho calcinador/sistema Flash Dryer.  
Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

A partir da década de 90 do século foram introduzidos no Pólo Gesseiro do Araripe os fornos marmita rotativos esses equipamentos, inicialmente fabricados pela GREBLEX (Empresa Francesa, fabricantes de equipamentos para indústria de gesso), passaram a ser produzidos por uma empresa local a SM-Tanques. Esses fornos são fabricados com capacidades de produção de 60 e 120 toneladas por dia e utilizam praticamente todos os tipos de combustíveis disponíveis no Araripe como lenha, coque,

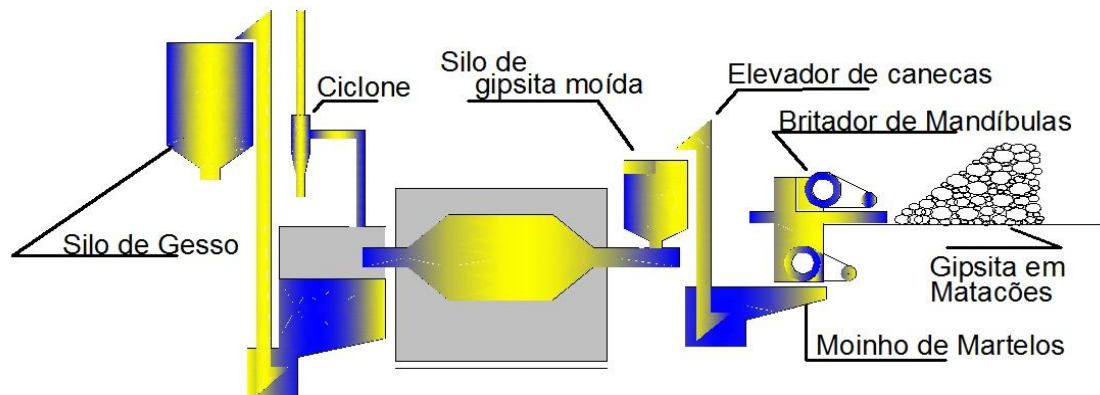
óleo BPF e côco de babaçu entre outros. A planta é semi-automatizada, supervisores gerenciam as operações de carregamento e descarregamento dos silos e do forno monitorando as temperaturas e tempos de residência do material.

**Tabela 2.6-** Características do forno tipo marmita rotativo produzindo gesso beta.

Características	Unidade	Lenha	Coque
Consumo de combustível	kg/ton.	350	35
Poder calorífico dos combustíveis	kcal/kg	3.131	-
Consumo de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	1.095.950	-
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	154.000	154.000
Eficiência térmica	%	14,0	35,0

\* Lenha - Densidade volumétrica = 35 kg/St Umidade= 20% p.p. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

O fluxograma do forno marmita rotativo está apresentado na Figura 2.8, onde podem ser observadas as seguintes operações: Britagem, Calcinação ou Desidratação, Moagem e Embalagem.

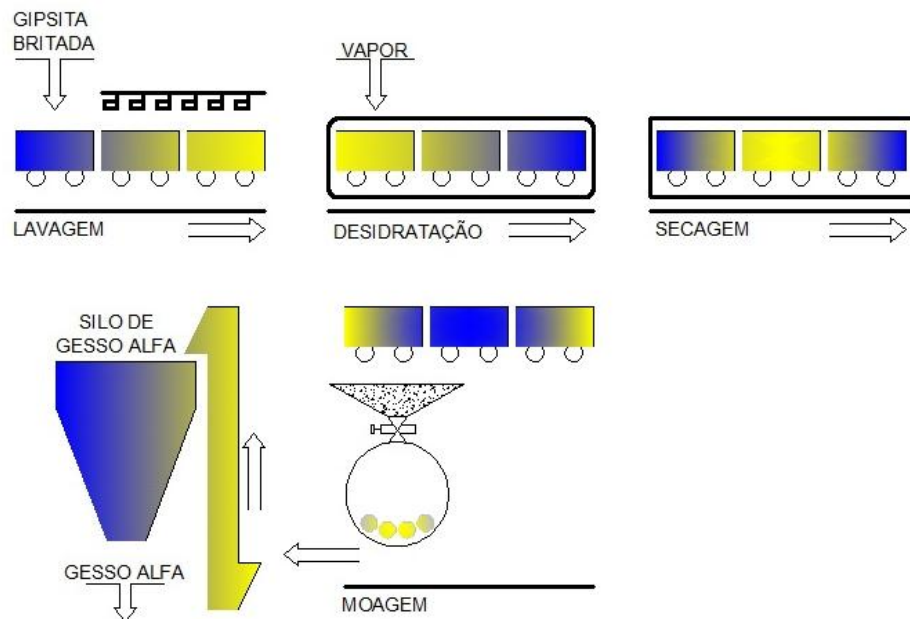


**Figura 2.8** - Fluxograma típico de um forno marmita rotativo.

Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

Atualmente se produz gesso alfa ( $\alpha$ ) por dois processos o primeiro por aquecimento da gipsita em autoclaves sob pressão de vapor (com matações) e o segundo por aquecimento da gipsita em meio líquido (material moído).

A produção de gesso alfa utilizando vapor, como pode ser vista no fluxograma da Figura 2.9, consiste basicamente na britagem do minério para redução de seu tamanho a pedaços de 50 cm a 70 cm de diâmetro, o material é lavado e colocado na autoclave em carrinhos com rodízio. A autoclave é aquecida com vapor e onde acontece a reação de desidratação, sob temperatura e pressão. Após a conclusão do processo, os matacões são retirados e secos em ambiente aberto, para só depois serem britados, moídos e ensacados em sacos plásticos adequados.

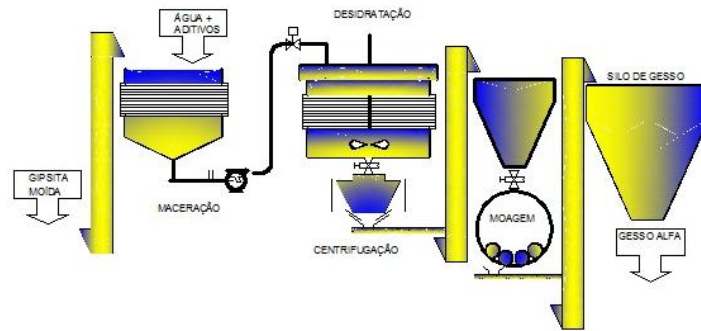


**Figura 2.9** – Fluxograma de produção de gesso alfa em autoclave aquecida com vapor.

Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

A produção de gesso alfa nesse processo, como mostrada na (Figura 2.10), consiste basicamente na moagem da gipsita em pequenas partículas com diâmetro médio de 2 polegadas, o material é imerso em água para maceração, bombeamento para um reator fechado e aquecido com camisa de vapor onde se processa a reação de

desidratação. A suspensão do gesso alfa é então centrifugado e secado, após esse processo e transferido para o silo de estocagem, e empacotamento.



**Figura 2.10-** Fluxograma de produção de gesso alfa por desidratação em meio líquido.

Fonte: adaptado de Peres, Benachour e Santos (2008).

O mais importante nesse processo é que os cristais do gesso alfa podem ter formatos predefinidos e assim se consegue uma pasta de alta fluidez e peças de gesso de alto desempenho mecânico.

## 2.5 Hidratação e pega do gesso

A hidratação do gesso ocorre a partir do momento que o gesso entra em contato com a água. Este se dissolve e forma uma solução supersaturada de íons  $\text{SO}_4^{-2}$  e  $\text{Ca}^{+2}$ , ocorrendo uma reação química exotérmica, e formando assim, os cristais de di-hidrato (CANUT, 2006). A hidratação do gesso pode ser observada através da reação química expressa pela Equação (2.4):



Os cristais di-hidratados crescem em forma de agulhas entrelaçadas. Com o entrelaçamento dos cristais que precipitaram da solução saturada, começa o endurecimento da pasta e esta passa a ganhar resistência mecânica (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997).

A velocidade da pega do gesso está diretamente ligada a outros fatores como:

- Temperatura e tempo de calcinação: Elevados tempos e temperaturas de calcinação produzem um gesso de pega mais lenta e de maior resistência até o limite de temperatura e tempo que possibilita a formação de quantidades significativas de anidrita insolúvel, após esse limite o gesso é considerado morto ou super calcinado (BAUER, 2001).

- Finura: Partículas mais finas tornam o gesso mais reativo na preparação com a água, originando um material de pega mais rápida. Entretanto, com o aumento da área superficial, maior quantidade de água é exigida para envolver as partículas de gesso (CANUT, 2006);

- Quantidade de água de amassamento: A relação água/gesso é o parâmetro de maior influência na cinética da reação de hidratação e, conseqüentemente, na pega do gesso. Quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior o intervalo de tempo necessário para saturar a solução (ANTUNES, 1999);

- Presença de impurezas: As impurezas podem ser incorporadas através da água de amassamento, e/ou por resíduos de outras misturas ou propositalmente. Estas impurezas podem acelerar ou retardar a pega por atuarem como núcleos de cristalização (CLIFTON apud ANTUNES, 1999);

- Aditivos: Os aditivos controladores de pega são produtos orgânicos (ácidos carboxílicos e proteínas) ou inorgânicos (fosfatos e boratos) que, adicionados em pequenas quantidades (<10%) atuam com finalidade de retardar ou acelerar o tempo de pega das pastas (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997).

## **2.6 Principais usos da gipsita e do gesso**

A gipsita natural, matéria-prima básica, é o ponto de partida para a obtenção dos produtos resultantes. A gipsita dá origem ao gesso, com variação de temperatura pode se obter gesso tipo beta ( $\beta$ ) de fundição e revestimento e acrescido de variação da pressão, gesso tipo alfa ( $\alpha$ ), e quando in natura sem nenhum processamento térmico, gesso agrícola (DANA, 1969). A transformação da gipsita no produto in natura se constitui na etapa mais elementar dentre as três relacionadas. A sua utilização resultante encontra-se no setor agrícola no qual é empregada para a correção de solos alcalinos, garantindo melhorias na produtividade. Em virtude da expansão da agricultura no país, tal segmento vem ganhando importância no bojo da atividade. No caso da Construção Civil, o gesso retarda o tempo de pega do cimento, permitindo maior tempo de trabalhabilidade em seu uso (BAUER, 1999 e NEVILLE, 1997).

Outros dois subprodutos do gesso resultam do processo de calcinação e são aonde os investimentos em tecnologia e melhoria técnica vêm se concentrando. O gesso tipo  $\beta$ , segundo Lyra Sobrinho (2002a), resulta da calcinação realizada à pressão atmosférica. O gesso tipo  $\alpha$  é o mais nobre de todos. Resulta da calcinação em sistema de autoclave, com injeção de vapor, ou por desidratação da gipsita em meio aquoso (LYRA SOBRINHO, op. cit.). É exigente em termos de tecnologia e investimentos,



necessitando de um maior investimento, de tecnologia mais complexa e maior controle de qualidade da matéria-prima e do produto final.

O consumo de gipsita e gesso, já consolidado em algumas regiões, desponta no Brasil de forma crescente e continuada nos últimos dez anos. O crescimento do consumo tem se evidenciado principalmente nos setores da construção civil e agrícola Canut (2006),

Construção Civil – São utilizados produtos pré-fabricados como pranchas, blocos e placas, sancas, roda teto, e gesso acartonado e para paredes e tetos;

Fabricação do cimento - A indústria cimenteira é uma das maiores consumidoras da gipsita, ela é adicionada ao cimento Portland na etapa de moagem do clínquer para diminuir o tempo de pega instantânea do  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminato tricálcico) durante a desidratação do cimento, ou seja, a gipsita é responsável pelo retardo da pega de materiais confeccionados à base de cimento (CANUT, 2006).

**Gesso de revestimento** - O gesso apresenta propriedades extremamente atraentes para o uso como revestimento, entre elas, a aderência em vários tipos de substratos, rapidez de endurecimento na execução dos serviços e proporcionar um excelente acabamento final nas paredes e tetos de construções, dispensando o uso de outro material de acabamento como massa corrida (SATO *et al.*, 2001), valendo lembrar que sua aplicação em ambientes externos não é recomendada, devido à sua relativa alta solubilidade na presença de água, a não ser se o gesso for aditivado com produtos hidrofugos (não absorventes de água).

**Pré-moldados:** o gesso é principalmente usado na produção de artefatos de placas para forro e chapas acartonadas. As placas para forro destacam-se por proporcionarem um fechamento rápido, de fácil execução, e que permite acesso para a manutenção das

instalações elétricas e hidráulicas e variações da configuração para ajuste do nível de desempenho final (SILVA; SILVA, 2004).

**Agricultura** - Utiliza-se a gipsita moída, conhecida como gesso agrícola, para neutralizar os solos alcalinos, para melhorar a permeabilidade dos solos argilosos, para contribuir com a disponibilização do enxofre em sua composição.

**Química** - A gipsita pode ser utilizada como matéria-prima para produção de enxofre, ácido sulfúrico, cimento, em ração animal e sulfato de amônio.

**Papel** - O gesso pode ser utilizado como carga na produção de papel.

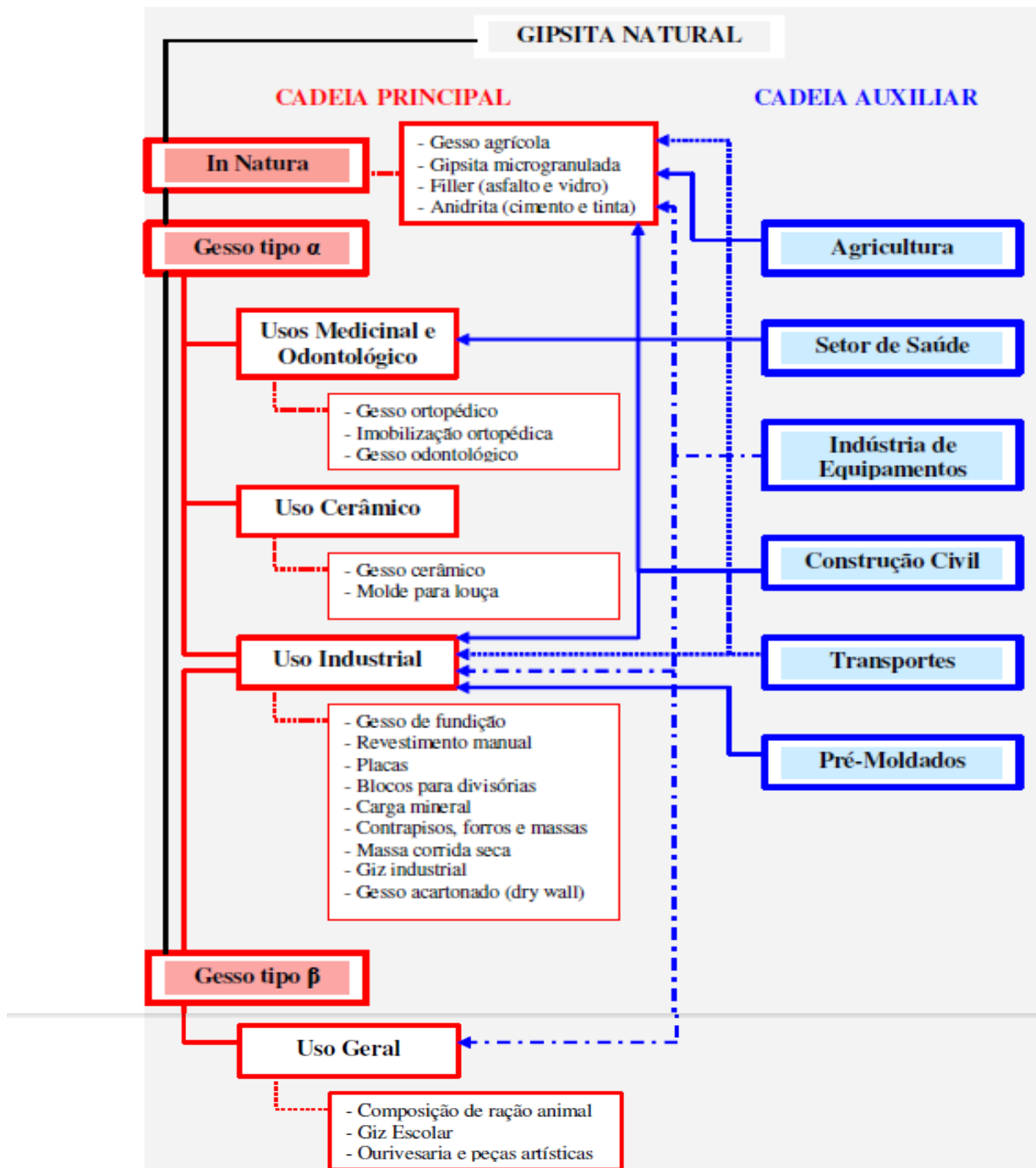
**Tintas** - O gesso pode ser utilizado como carga para tintas.

**Tratamento de água** - O gesso pode ser utilizado para modificar a qualidade da água principalmente na correção da dureza.

**Cerâmica** - O gesso é utilizado na indústria cerâmica principalmente para a confecção de moldes para a fabricação de louças sanitárias e o processo de prensagem como as fabricantes de louças de mesa.

**Medicina** - O gesso é utilizado na elaboração de próteses moveis (odontologia), ataduras pré-gessadas (ortopedia), ataduras corretivas (clínicas de estética).

A (Figura 2.11) resume as principais aplicações do gesso *in natura*, gesso alfa ( $\alpha$ ) e gesso beta ( $\beta$ ) em diferentes cadeias de uso.



Fonte: Nordeste 2002 – Competitividade Auto-Sustentada. FGV Consulting.

**Figura 2.11 - Cadeia produtiva do gesso.**

## **2.7 Propriedades de Gesso para Construção Civil**

A seguir serão relatadas as propriedades intrínsecas do gesso que viabilizam a sua aplicação como material na construção civil tais como: isolamento térmico e acústico; a aderência ao substrato; a trabalhabilidade, a moldabilidade e a resistência mecânica.

### **2.7.1 Prescrições Normativas**

Dentre as prescrições normativas brasileiras propostas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é possível encontrar NBR (Normas Brasileiras de Referência) que estabelecem critérios a serem seguidos para execução de testes e ensaios relativos à obtenção de medidas de propriedades do gesso para utilização na construção civil:

- NBR 12127 – Gesso para construção: determinação das propriedades físicas do pó.
- NBR 12128 – Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta.
- NBR 12129 – Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas.
- NBR 12130 – Gesso para construção: determinação da água livre de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.
- NBR 13207 – Gesso para construção civil - Especificação.

Outras NBR's mais específicas quanto à aplicação do gesso na construção também são encontradas, no entanto, sua discussão abrange somente características

físicas das peças confeccionadas para placas e instruções sobre o método de aplicação.

- NBR 12775 – Placas lisas de gesso para forro: determinação das dimensões e propriedades físicas.
- NBR 13867 – Revestimento interno de paredes e tetos com pasta de gesso: materiais preparo, aplicação e acabamento.
- NBR 14715 – Chapas de gesso acartonado: requisitos.
- NBR 14716 – Chapas de gesso acartonado: verificação das características geométricas.
- NBR 14717 – Chapas de gesso acartonado: determinação das características físicas.

Portanto, é notória a escassez de normas para o gesso e seus termos derivados, em 2010 o ITEP, revisou todas as normas existentes na ABNT para o gesso e derivados, bem como novas propostas para novas normas, usando como parâmetro internacional com as normas da UE – União Européia. Para o ano de 2011 é pretendido a publicação de mais 8 novas normas.

### **2.7.2 Isolamento térmico e resistência ao fogo**

O isolamento térmico é uma estrutura que dificulta a dissipação de calor, usado na construção e caracterizado por sua alta resistência térmica. Estabelece uma barreira à passagem do calor entre dois meios que naturalmente tenderiam rapidamente a igualarem suas temperaturas.

A condutibilidade térmica do gesso pode variar com a sua densidade, e é aproximadamente igual a  $0,3 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$  (PETRUCCI, 1992), e se comparado a outros materiais de construção.

Além disso, o gesso é um dos materiais de construção com melhor resistência a deterioração pela ação do fogo. A resistência ao fogo em edificação é relacionada à estabilidade e dos elementos que a constituem quando sujeitas à elevação de temperatura decorrente de sua ação (CINCOTTO *et al*, 1985a). O fato de o gesso (mesmo depois de calcinado) possuir água no interior de suas moléculas faz com que o calor gerado pela elevação da temperatura durante um incêndio seja inicialmente consumido pela evaporação destas moléculas de água, o que retarda a transmissão de calor, para áreas circunvizinhas.

### **2.7.3 Isolamento acústico**

É o processo pelo qual se objetiva impedir a transmissão sonora de um ambiente para o outro, eliminando os ruídos prejudiciais à saúde, onde requer critérios bem definidos, garantindo a eficácia e segurança do isolamento. O desempenho acústico proveniente de elementos confeccionados em gesso depende basicamente de sua capacidade de isolar, absorver ou descontinuar caminhos para a transmissão do som (pontes acústicas). A dissipação de energia sonora processa-se, principalmente, pelo atrito gerado pela passagem do ar através dos poros do material absorvente, o qual deve ser leve, poroso e de baixa densidade (SILVA e SILVA, 2004). Por isso, a alta porosidade dos materiais confeccionados com gesso está diretamente ligada a sua eficiência a ponto de ser considerado um excelente isolante acústico.

#### **2.7.4 Aderência a substratos**

Segundo Oliveira (2004), a aderência é significativamente influenciada pelas condições da base (substrato), como porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução do assentamento dos componentes da base.

Nos trabalhos em superfícies verticais e teto, é comum a prática do uso do gesso, devido à boa ligação entre este material e os diferentes tipos de substrato, tais como tijolos, pedras naturais e ferro, entre outros. No caso de sua aplicação sobre superfícies metálicas, atenção especial deve ser dada à proteção dos metais contra a corrosão, pois o pH (potencial hidrogeniônico) do gesso associado à umidade local pode provocar oxidação do ferro e causar manchas na superfície do gesso.

#### **2.7.5 Trabalhabilidade e moldabilidade**

Argamassa tem boa trabalhabilidade quando se distribui com facilidade ao ser assentada, preenchendo todos os vazios. Não se separa ao ser transportado, e permanece plástica por um bom tempo.

A plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a Trabalhabilidade, sendo que a avaliação dessas propriedades em alguns métodos de ensaio ocorre em simultâneo. A plasticidade é influenciada pelo teor de ar, pela natureza do aglomerante e pela intensidade de mistura da argamassa. Já a consistência é a propriedade pela qual a pasta tende a resistir às deformações que lhe são impostas no estado fresco (CINCOTTO *et al*, 1995).

### 2.7.6 Resistência mecânica

É a força resultante da aplicação de um esforço sobre um material. É a deformação do material que gera a força resultante, na medida direta de seu módulo de elasticidade.

Canut (2006) define a resistência dos pré-moldados e produtos a base de gesso como a manutenção de integridade nas mesmas quando submetidas a esforços, sejam eles de tração, compressão, cisalhamento ou até mesmo impacto e desgaste.

Hincapié e Cincotto (1997) relacionam a resistência mecânica dos produtos à base de gesso com o crescimento cristalino das agulhas da pasta de gesso. Segundo os autores, o crescimento cristalino do gesso pode ser crítico, ou seja, com poucos núcleos, resultando em cristais de tamanho grande, ou no caso de cristais formados a partir de numerosos núcleos, resultando assim pequenos cristais.

As propriedades mecânicas são influenciadas pela relação água/gesso, na medida em que aumenta a quantidade de água à porosidade dos produtos confeccionados com gesso existe uma diminuição da resistência mecânica. Além disso, o uso de aditivos tenso-ativos reduz a quantidade necessária de água de amassamento, aumentando a resistência mecânica das pastas endurecidas de gesso (CANUT, 2006).



## **2.8 Resíduos da Construção**

Os resíduos da construção e demolição – RCD podem ser definidos como as sobras e rejeitos de materiais provenientes de obras de construções novas ou de reformas e de demolições. (CONAMA, 2002).

A quantidade de entulhos gerados nas construções que são realizadas nas cidades Brasileiras demonstra um enorme desperdício de material. O custo desse desperdício é distribuído por toda uma sociedade, não só pelo aumento do custo final das construções como também pelos custos de remoção desses entulhos.

A geração de resíduos na construção civil provenientes do revestimento de paredes, colocação de forros e ornamentação geram uma quantidade de material residual nas obras. Os principais problemas são a qualidades dos materiais adquiridos e principalmente a falta de pessoal qualificado para esse trabalho, aumentando o desperdício.

Para aproveitamento desse material descartado há necessidade de uma disposição adequada para secagem e reuso na própria obra, bem como metodologias definidas para sua reutilização.

Pode-se verificar que são várias as fontes geradoras de resíduos da construção e demolição, mas não é só a geração de resíduos que preocupa o setor. À medida que o tempo passa, tornam-se cada vez mais escassas as fontes de recursos naturais não renováveis, próximo aos grandes centros urbanos, como de agregados a serem utilizados no setor da construção civil. Aliado a isto, os problemas com o gerenciamento dos resíduos gerados, a escassez de áreas de disposição e a limpeza urbana, entre

outros, são pontos de grande relevância e que precisam ser avaliados na análise do impacto ambiental causado por um determinado setor.

Em países desenvolvidos a reciclagem do resíduo da Construção Civil tem uma média de resíduos provenientes de novas construções de  $100,0 \text{ kg/m}^3$ , no Brasil este índice gira em torno de  $300,0 \text{ kg/m}^3$ . (MONTEIRO, 2001). A reciclagem desponta como a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria-prima e a geração desenfreada de resíduos.

É importante ressaltar a técnica de minimização de resíduos, pois a reciclagem de resíduos de construção e demolição resultará em uma diminuição do impacto ambiental nos grandes centros e uma elevada contribuição no gerenciamento dos problemas causados pelo alto volume que diariamente é produzido.

Quanto ao aspecto físico, deve-se levar em consideração que um dos maiores problemas dos resíduos da construção e demolição é a heterogeneidade dos materiais, pois a sua composição pode variar, podendo apresentar alto teor de material cerâmico, durante a execução de alvenaria de tijolo cerâmico, ou de argamassa na fase de revestimentos, ou ainda de concreto na fase estrutural. Com relação às propriedades químicas, é necessário avaliar qualitativa e quantitativamente os impactos ambientais que podem ser causados com a utilização desse produto, tais como as possíveis contaminações químicas das águas subterrâneas e superficiais e as interações deste produto com o solo (fosfogesso, tintas, vernizes, seladores, entre outros).

**Gesso como Resíduo** - Os resíduos de gesso gerados na construção civil representam 60% e todo o lixo urbano da sociedade e, desse total, 5% correspondem aos restos de gesso, que, ao serem manipulados de forma incorreta, emitem gás sulfídrico no ambiente, que é inflamável e altamente tóxico.

A reciclagem do gesso é um fator fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade e da construção civil por ser uma forma importante de tratamento dos resíduos ao preservar os recursos minerais e energéticos, permitindo também o aumento da vida útil dos aterros sanitários e lixões.

No Brasil, mesmo com as recomendações da resolução do CONAMA nº. 167/2002 é sabido que o volume de resíduo de construção e demolição depositado clandestinamente é muito grande, incluindo os resíduos de gesso, merecendo assim, estudos que viabilizem o emprego deste material, tanto na sua forma virgem como após ser reciclado, estabelecendo também uma política de gestão adequada para os resíduos de gesso e possibilitando entre outros benefícios, geração de empregos e renda.

Segundo John e Cincotto (2003), o desperdício estimado de gesso na construção civil é de 30%, enquanto os fabricantes de gesso em pó estimam perdas maiores. A indústria de gesso acartonado já recicla seus próprios resíduos industriais, cerca de 3 a 5% (CAMPBELL, 2003; CIWMB, 2003), com composição controlada e perfeitamente conhecida.

Aguiar (2004) afirma que a presença de gesso em resíduos de concreto e de argamassa poderá ser aproveitada futuramente com estudos iniciados recentemente. O sulfato, presente no gesso, em presença de compostos de aluminato tricálcico como o C3A, por exemplo, podem levar a formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais. A maioria das normas limita o teor de sulfatos nos agregados a um valor máximo de 1,0% (JOHN e CINCOTTO, 2003). Sendo assim, o resíduo a base de gesso deve ser separado e ter destinação própria.

É importante salientar que a Resolução 307/02 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002) e a NBR 10004/04 – *Resíduos Sólidos – Classificação*, classificam o gesso como resíduo não inerte e que, deste modo, não pode ser simplesmente depositado nos aterros de construção (CANUT, 2006).

Experiência Européia de Reciclagem de Gesso - Na Europa, a empresa “Gypsum Recycling International”, com tecnologia e sistema diferenciados, faz a reciclagem dos resíduos do gesso e mostra que este processo de reciclagem tem se transformado em uma solução viável.

De acordo com as informações obtidas no website desta empresa (Gypsum Recycling International), o seu sistema de reciclagem é capaz de utilizar todos os tipos de blocos de gesso e resíduos de gesso acartonado de demolição, e não somente resíduos de novas construções.

São aceitáveis os resíduos provenientes de reformas, demolições, novas construções e sobras de produção nas fábricas. Podem-se utilizar chapas de gesso acartonado de paredes ou forros, chapas de gesso com partes quebradas, ou pedaços de chapas; chapas com pregos, parafusos ou mesmo com papel de parede.

O sistema de reciclagem da “Gypsum Recycling International” contém todos os componentes necessários para assegurar um bom rendimento no sistema de reciclagem:

- Sistema Coletor: onde os resíduos do gesso são depositados e coletados em containers especialmente desenvolvidos para esta atividade;
- Sistema de Logística: os materiais são coletados e levados para os armazéns centrais.
- Unidade de Reciclagem: nesta etapa os materiais são transformados em pó de gesso.

- Clientes: os fabricantes de gesso em pó e gesso acartonado podem utilizar este material de gesso ao invés de gipsita para a fabricação de novas peças.

A unidade de reciclagem é móvel, compacta e fechada, protegendo assim os resíduos do gesso das intempéries.

Para os fabricantes de gesso, vários benefícios foram encontrados com a reciclagem, principalmente diante da concepção do desenvolvimento sustentável. Além disso, eles encontraram uma fonte adicional estável de gesso de boa qualidade, e com um preço muitas vezes abaixo do material original.

## **2.9 Gás Natural**

Pela lei número 9.478/97 (Lei do Petróleo), o gás natural “é a porção do” petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições originais de reservatório, e que permanece no estado gasoso Condições Normais de temperatura e pressão – CNTP (Fonte origem: Wikipédia-pt. [wikipedia.org/wiki/Gás natural](http://wikipedia.org/wiki/Gás_natural)).

A composição do gás natural pode variar muito, dependendo de fatores relativos ao reservatório, processo de produção, condicionamento, processamento e transporte. O gás natural apresenta teor de metano superior a 70%, densidade menor que o ar e poder calorífico superior entre 8.000 e 10.000 kcal/m<sup>3</sup>, dependendo dos teores de pesados (Etano e propano principalmente) e inertes (nitrogênio e gás carbônico). No Brasil a composição do gás para comercialização é determinada pela Portaria de Número 104 de 8 de julho de 2002 da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Se o teor de pesados (fração C3+) for superior a 8,0% o gás é considerado rico, se for menor que 6,0% o gás é considerado pobre, se o referido teor estiver entre (6,0 e 8,0)% o gás é considerado de riqueza mediana. A riqueza é um parâmetro importante na seleção da via tecnológica a ser utilizada no processamento do gás.

A exploração é a etapa inicial dentro da cadeia de gás natural, consistindo em duas fases. A primeira fase é a pesquisa onde, através de testes sísmicos, verifica-se a existência em bacias sedimentares de rochas reservatórias (estruturas propícias ao acúmulo de petróleo e gás natural). Caso o resultado das pesquisas seja positivo, inicia-se a segunda fase, e é perfurado um poço pioneiro e poços de delimitação para comprovação da existência gás natural ou petróleo em nível comercial e mapeamento do reservatório, que será encaminhado para a produção.

Os reservatórios de gás natural são constituídos de rochas porosas capazes de reter petróleo e gás. Em função do teor de petróleo bruto e de gás livre, classifica-se o gás, quanto ao seu estado de origem, em gás associado e gás não associado.

**Gás associado:** é aquele que, no reservatório, está dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás. Neste caso, a produção de gás é determinada basicamente pela produção de óleo. Boa parte do gás é utilizada pelo próprio sistema de produção, podendo ser usada em processos conhecidos como reinjeção e gás lift, com a finalidade de aumentar a recuperação de petróleo do reservatório, ou mesmo consumida para geração de energia para a própria unidade de produção, que normalmente fica em locais isolados. Ex: Campo de Urucu no Estado do Amazonas.

**Gás não associado:** é aquele que, no reservatório, está livre ou em presença de quantidades muito pequenas de óleo. Nesse caso só se justifica comercialmente produzir o gás. Ex: Campo de San Alberto na Bolívia.

O gás natural pode ser armazenado na forma líquida à pressão atmosférica. Para tanto os tanques devem ser dotados de bom isolamento térmico e mantidos à temperatura inferior ao ponto de condensação do gás natural. Neste caso, o gás natural é chamado

de Gás Natural Liquefeito ou GNL. O transporte pode ser feito como Gás Natural Comprimido (GNC) a temperatura  $-162^{\circ}\text{C}$ , gasodutos e gás natural liquefeito.

O gás natural é utilizado diretamente como combustível, tanto em indústrias, casas e automóveis. É considerado uma fonte de energia mais limpa que os derivados do petróleo e o carvão. Alguns dos gases de sua composição são eliminados porque não possuem capacidade energética (nitrogênio ou  $\text{CO}_2$ ) ou porque podem deixar resíduos nos condutores devido ao seu alto peso molecular em comparação ao metano (butano e mais pesados).

#### Vantagens e usos

- **Combustível:** A sua combustão é mais limpa e dá uma vida mais longa aos equipamentos que utilizam o gás e menor custo de manutenção.
- **Automotivo:** Utilizado para motores de ônibus, automóveis e caminhões substituindo a gasolina e o álcool, pode ser até 70% mais barato que outros combustíveis e é menos poluente.
- **Industrial:** Utilizada em indústrias para a produção de metanol, amônia e uréia.

As desvantagens do gás natural em relação ao butano são: mais difícil de ser transportado, devido ao fato de ocupar maior volume, mesmo pressurizado, também é mais difícil de ser liquefeito, requerendo temperaturas da ordem de  $-160^{\circ}\text{C}$ .

Algumas jazidas de gás natural podem conter mercúrio associado. Trata-se de um metal altamente tóxico e deve ser removido no tratamento do gás natural. O mercúrio é proveniente de grandes profundidades no interior da terra e ascende junto com os hidrocarbonetos, formando complexos organo-metálicos.

A Tabela 2.7 resume as principais propriedades do gás natural (GN) oriundo da Companhia Pernambucana de Gás (COPERGÁS), utilizado no presente trabalho de pesquisa como combustível para calcinação da gipsita.

**Tabela 2.7** – Propriedades do gás natural utilizado neste trabalho (T=20°C e P= 1 atm.).

Nome	Valor médio
Poder calorífico superior	9400 kcal/m <sup>3</sup>
Poder calorífico inferior	8500 kcal/m <sup>3</sup>
Massa específica	0,78 kg/m <sup>3</sup>
Peso molecular médio	18,064 g/mol
Fator de compressibilidade R-K	0,9973
Viscosidade	0,010816 cp.
Cp/Cv	1,2816
Ponto de orvalho	56 °C
Ponto de ignição	482 – 632°C
Limite inferior de Inflamabilidade da mistura	5 % vol. Ar
Limite superior de Inflamabilidade da mistura	15 % vol. Ar

Fonte : COPERGÁS, 2009



**Tabela 2.8 – Constante Física dos Hidrocarbonetos.**

Fórmula	Ponto de Vaporização (°C) à 1 atm.	Ponto de Solidificação (°C) à 1 atm.	Temperatura Crítica (°C)	Densidade do Gás à 16 °C e 1 atm.		Calor Específico à 16 °C e 1 atm. [kJ/kg ° C]		Poder Calorífico [MJ/Nm³]		Ar Requerido para Combustão [m³ ar/m³ combustível]	Limites de Inflamabilidade em Mistura com o Ar [% Vol.]	
				Densida de Relativa (Ar=1).	[kg.m³]	Cp		Superior	Inferior		Inferior	Superior
CH <sub>4</sub>	-162	-183	-82,2	0,555*	0,679	2,20	1,67	40	36	9,53	5,00	15,00
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-89,0	-184,0	32,3	1,046*	1,29	1,71	1,45	71	64	16,7	3,22	12,45
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-43,0	-188,0	96,8	1,547*	1,92	1,62	1,44	102	93	23,8	2,37	9,50
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-11,0	-139,0	152,2	2,071*	2,53	1,66	1,51	135	124	31,0	1,86	8,41
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-12,0	-160	135	2,067*	3,05	(-1,62)	1,46	134	123	31,0	1,80	8,41
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	35,0	-130,0	196,0	2,49	3,64	1,66	1,55	170	157	38,1	1,40	7,80
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	68,0	-96,0	235,0	2,98		1,67	1,57	211	195	45,3	1,25	6,90
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	125,0	-57,0	296,1	3,94		1,67	1,60	233	216	59,6	0,84	3,20
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	163,0	-30,0		4,91			(-1,62)	289	268	73,9	0,67	2,60

Obs.: Os números em parêntesis são  
estimados

\* Volumes reais de gás corrigidos para  
desvio

Fonte: GAS ENGINEERS HANDBOOK

## 2.10 Mercado da gipsita e gesso

A produção mundial de gipsita encontra-se sistematizada e é apresentada na Tabela 2.9 (USGS Mineral Commodities, 2008). Como pode ser observado, entre os 12 países considerados como maiores produtores de gipsita em 2007, e que só produzem 86,5% da produção mundial, a China se encontra no 1º lugar com quase 50,0% da extração global e o Brasil na décima posição junto com a Tailândia e o México, produzindo 1,4% do total.

**Tabela 2.9** – Dados sobre a produção mundial de gipsita.

<b>MAIORES PRODUTORES MUNDIAIS DE GIPSITA 2003-2007 (milhões de toneladas)</b>						
<b>País</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>% (2007)</b>
China	813,6	933,7	1.021,8	1.220,8	1.290,0	48,9
Índia	124,5	136,9	146,8	161,7	162,0	5,5
EE.UU.	92,8	97,4	99,4	99,5	96,4	3,3
Japão	73,8	72,4	73,5	73,2	69,9	2,4
Espanha	44,8	46,6	50,3	54,0	50,0	1,7
Rússia	42,6	45,9	49,5	53,9	59,0	2,0
Coréia Sul	59,7	55,8	49,1	51,4	55,0	1,9
Itália	43,5	46,1	45,6	49,0	44,0	1,5
Turquia	38,1	41,3	46,4	47,9	47,8	1,7
<b>Brasil</b>	<b>35,5</b>	<b>36,5</b>	<b>39,2</b>	<b>42,4</b>	<b>44,8</b>	<b>1,4</b>
Tailândia	35,6	36,7	37,9	41,3	40,0	1,4
México	31,9	33,4	36,7	38,6	41,0	1,4
Outros	527	556	580	608	390,0	13,5
Total	1.963	2.138,6	2.276	2.542	2.600	100,0

Fonte: USGS Mineral Commodities (2008)

Os principais produtores de gesso no mundo são, pela ordem de importância: Estados Unidos, China, Iran, Tailândia, Canadá, Espanha, México, Japão e França. Essa produção mundial do gesso é distribuída nos seguintes percentuais: América do Norte (Estados Unidos, Canadá e México) com 32,0% - Ásia com 32,0% - Europa com 16,0% ficando o restante da produção com um conjunto de países como Brasil, Chile e Argentina (20,0%).

**Estados Unidos** – Maior produtor e consumidor de gesso tendo como principal uso a fabricação de chapas de gesso acartonado. A indústria do gesso nesse país tem sido favorecida pelas altas taxas de construção.

**Espanha** – É o maior produtor e exportador de gesso da Europa, comercializa sua produção principalmente com os Estados Unidos e outros países da Europa.

**França** – Utiliza sua produção praticamente para consumo interno como: Revestimento, chapa de gesso acartonado, fabricação de cimento e gesso agrícola.

**China** – Grande parte da produção do gesso é consumida internamente pela indústria de cimento o restante pelas indústrias cerâmicas de produtos para construção civil.

**Japão** - As principais indústrias consumidoras são as de cimento e gesso acartonado, suas importações de gesso são proveniente principalmente da Tailândia.

O gesso está presente em quase todos os países do mundo onde o seu maior produtor e consumidor são seguramente os países do continente Americano. Nesse contexto, o Nordeste do Brasil apresenta-se como um dos mais importantes produtores de gesso e seus derivados, como também, um dos maiores fornecedores do minério gipsita, matéria-prima para produção de gesso. Os depósitos pernambucanos de gipsita fazem parte da sequência sedimentar Cretácea e se localizam no Pólo Gesseiro do Araripe – PGA a 680 km de Recife, capital de Pernambuco, fazendo fronteira com os estados do Ceará e Piauí e localizado na chapada do Araripe (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008). Atualmente, existem 26 minas em operação que produzem aproximadamente 2 milhões de toneladas por ano. O Araripe é formado pelos municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Ouricuri, e Bodocó.

Os 99,9% do minério produzido no Brasil provêm dos estados da Bahia (43,0%), do Pará (35,0%) e de Pernambuco (18,0%), vindo em seguida os Estados do Maranhão (2,7%), de Tocantins (0,6%), do Ceará, (0,3%), do Piauí (0,2%) e do Amazonas (0,1%).

O problema do transporte é ainda uma barreira para o Pólo Gesso de Araripe. O fluxo do transporte do gesso na região até o momento é exclusivamente rodoviário. Devido às precárias condições da malha rodoviária brasileira e a concorrência com as safras de frutas no vale do São Francisco, o custo relacionado a este tipo de transporte é bastante significativo quando agregado ao valor do produto final.



**Figura 2.12** – Localização da região Nordeste do Brasil, maior produtor de gipsita, gesso e seus derivados do País.  
**Fonte:** IBGE, 2002

A maior aplicação do gesso é na indústria da construção civil (revestimento de paredes, placas, blocos, painéis, e outros). É também muito utilizado na confecção de

moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários, e confecção de giz escolar. Por seu desempenho em não propagação do fogo é empregado na confecção de portas corta-fogo. Com uma mistura de gesso e amianto, são confeccionados isolantes para cobertura de tubulações e caldeiras, enquanto isolantes acústicos são produzidos com a adição de material que aumentam a porosidade da pasta de gesso (KARNI; KARNI, 1995).

Na construção civil, o emprego do gesso divide-se em dois grupos básicos: para fundição e para revestimento. O gesso para revestimento é empregado para revestir paredes e tetos de ambientes internos e secos, enquanto que o gesso para fundição é empregado na fabricação de pré- moldados como peças para decoração, placas para forro, blocos reforçados ou não com fibras e chapas de gesso acartonado (*Drywall*).

## **2.11 Fundamentos da Combustão Gasosa**

Consiste na reação química entre dois ou mais reagentes (combustíveis - substancia e comburentes-gases) com grande liberação de energia na forma de calor. Assim, todas as reações de combustão são extremamente exotérmicas (mesmo que necessitem de uma fonte de ignição para ocorrerem).

A combustão é o processo de reações químicas que se produzem durante a oxidação completa ou parcial do carbono, do hidrogênio e do enxofre contidos em um combustível. A análise destas reações é feita através de Balanço de Massas e de Balanço Térmico.

**Balanço de Massas** - Também chamado balanço material é uma aplicação do princípio da conservação da massa para a análise de sistemas físicos, considera a quantidade de ar empregada para a combustão, sendo a referência à quantidade mínima exata para reagir completamente o combustível, chamada estequiométrica.

**Balanço Térmico** - São analisadas as quantidades de calor liberado, a temperatura de combustão e a quantidade de calor perdido na exaustão.

São características importantes da combustão, as suas composições e temperaturas, as pressões em que ocorre, seu estado e o formato da câmara de combustão e que determinam a forma com que ocorrerá o processo, se por detonação ou por deflagração.

Além de sua composição e pureza, são características técnicas fundamentais dos produtos a densidade relativa ao ar, o Poder Calorífico, o índice de Wobbe, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos, o teor de compostos sulfurosos, o teor de  $\text{CO}_2$ , o teor de  $\text{CO}$ , o teor de hidrogênio e o teor de oxigênio.

Lefebvre e Reid (1966) realizaram um estudo sobre a influência do escoamento turbulento sobre o comportamento de chama produzida pela combustão de propano. Realiza-se o levantamento dos campos de velocidade e de temperatura, para caracterizar a propagação da chama. Verifica-se que a turbulência afeta o alcance da chama, dependendo da velocidade inicial do escoamento e da temperatura inicial da mistura ar/combustível no injetor.

Smith et al (1992) realizaram um extenso trabalho experimental para a determinação da estrutura de chama não pré-misturadas com o levantamento da

temperatura da chama para diferentes combustíveis. Definindo os termos relevantes, incluindo a taxa de libertação de calor, calor de combustão, a duração da combustão, altura da chama, chama adiabática, laminar, e as chamas turbulentas.

Borbely et al (2001) realizaram um estudo termodinâmico do processo de queima para diversos combustíveis, bem como forneceram dados empíricos das propriedades física dos combustíveis, segundo a temperatura da chama.

Tomczak et al (2002) descreveram o comportamento da chama na câmara de combustão do tipo tubular operando com combustível formado por diferentes concentrações de hidrogênio e metano. Foi observado que durante o aumento gradativo de hidrogênio na mistura de ignição acarreta uma diminuição do alcance da chama, aumentando a temperatura da chama, e aumento das emissões de CO e CO<sub>2</sub>.

Cozzi e Coghe (2006) analisaram os efeitos do hidrogênio em uma chama produzida pela combustão do gás natural em condições sem pré-mistura em uma câmara de combustão tipo tubular. As concentrações do hidrogênio variam de 0% a 100% em volume e são realizadas medições nas concentrações de NO<sub>x</sub> e CO e o CO<sub>2</sub> pré-definida, bem como o da temperatura utilizada na combustão. Este estudo permite constatar que durante o aumento da concentração do hidrogênio na combustão observa-se:

- a) A chama é mais curta e de cor azulada;
- b) O jato de combustível tem maior penetração na zona de queima
- c) A velocidade do combustível tende a ser maior com a velocidade da chama;
- c) Existe um aumento na estabilidade da chama em condições limites de operação.

Ilbas et al (2006) analisaram os efeitos das misturas ar, hidrogênio e metano no desempenho da câmara de combustão. Foi considerada a chama com escoamento laminar produzida para diferentes razões ar/combustível com 100 % de metano, em temperatura ambiente e razões de equivalência variando entre 0,8 a 3,2. Este estudo verificou a influência da composição química na natureza da estrutura da chama, bem como constatou a diminuição do percentual de hidrogênio nas misturas ar, hidrogênio, e metano, pode ocorrer um aumento na velocidade da chama e aumento no intervalo entre os limites da flamabilidade. O teste experimental revelaram que foi possível elaborar um combustível alternativo competitivo economicamente usando-se misturas com 30% de hidrogênio e 70% de metano.

## **2.12 Fluidodinâmica Computacional para a Engenharia das Reações Químicas**

### **2.12.1 Modelagem Computacional**

Svehla e McBride (1973) desenvolveram um algoritmo conhecido como método Lewis NASA que consiste em um programa interativo capaz de realizar a análise termoquímica para algumas reações de combustão a partir do levantamento do equilíbrio termodinâmico e do equilíbrio de massa dos elementos químicos. Os resultados Svehla e McBride serviram de base para a concepção dos programas para análise química de reações no CHEMKIN<sup>R</sup> e GASEQ<sup>R</sup>

Lee et al (1990) determinaram os campos de velocidade e temperatura em um modelo genérico de câmara de combustão em função do tipo de malha (quantidade de elementos, do modelo de combustão) FRCM ("Fast Rate Chemistry Model") com Modelo PDF ("Probability Density Function) para emissões de NO<sub>x</sub> e FM ("Flamelet



Model”), e dos modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e Reynolds Stress Model (RSM), aplicando o Método de Elementos Finitos.

Siegel e Howell (1992) realizaram a simulação da transferência de calor por radiação nos processos de combustão para turbina a gás. Apresentam o modelo PDF para simular o mecanismo de formação de  $\text{NO}_x$ , bem como propuseram equações semi-empíricas, seguindo conceitos sobre os mecanismos de formação do  $\text{NO}_x$  apresentados por Lefebvre (1993), para estimar as concentrações de  $\text{NO}_x$  em diferentes regiões das câmaras de combustão estimando o tempo de residência.

Fuller e Smith (1994) determinaram o campo de temperaturas e velocidades em duas fases: a primeira contempla o escoamento da chama em um difusor do tipo “Spray” e a segunda fase consiste em uma câmara de combustão tubular. É utilizado um modelo de radiação Discrete Transfer, a um modelo de combustão EDM (“Eddy Dissipation Model”), um modelo de escoamento turbulento RNG  $k-\epsilon$  e modelo de emissão de  $\text{NO}_x$  e  $\text{CO}_y$  na exaustão. Este estudo representa um dos primeiros trabalhos focados nos efeitos tridimensionais de escoamento ao redor de chamas.

Sparlat et al (1997) desenvolveram um trabalho sobre as técnicas de solução das equações de transporte de massa e calor no formato diferencial parcial reunindo em uma única metodologia as características das técnicas RANS (“Reynolds Averaged Navier Stokes”) e LES (Large Eddy Simulation). Esta metodologia, que utiliza uma técnica híbrida entre RANS e LES, é conhecida hoje por DES (Detached Eddy Simulation).

Yadugaroglu et al (1998) realizaram um estudo aerodinâmico, aplicando três modelos de turbulência:  $k-\epsilon$  (Modelo não-linear para escoamento viscoelástico), RNG

k- $\epsilon$  (“Renormalization for k- $\epsilon$ ”) e RSM (“Reynolds Stress Model”). Descreveram a influencia das perdas de carga na emissão dos gases poluentes, concluíram que o tempo de residência dos gases pode ser maior com o aumento da perda de carga. Realizaram a simulação do escoamento de uma câmara tubular dotada de um injetor composto por uma malha de 7320 elementos químicos hexaédricos, demonstrando que os modelos de turbulência RNG k- $\epsilon$  e RSM apresentaram precisão, quando comparados com dados experimentais. Nesse caso não aplicaram o modelo SST (Shear Stress Transport;).

Gosselin et al (2000) aplicaram o cálculo CFD em um modelo em 3D em uma câmara de combustão do tipo Cilíndrico ou Tubular GHOST, fabricada pela Luca Gás Turbines Company. USA, com a finalidade de comparar os campos de temperatura com os resultados experimentais. O modelo adotado em 3D contemplou apenas um setor seccionado por um ângulo de 69° ou 1/6 do equipamento, com 6 injetores distribuídos simetricamente, admitindo que o processo de combustão seja simétrico, livre dos efeitos da convecção, usando Modelo PDF (Probability Density Factor), que consiste em modelo estatístico apto para simular chamas com escoamento turbulento.

Louis et al (2001) realizaram uma simulação em CFD (Computação Fluido Dinâmica) para um modelo, com a finalidade de prever as condições não adiabáticas de uma chama não pré-misturada, turbulenta em uma câmara de combustão cilíndrica resfriada a ar para um modelo de turbina a gás com potência de 16 kW. O fluido de trabalho é um gás combustível constituído por 40% de CO, 40% de H<sub>2</sub> e 20 % de N<sub>2</sub> com poder calorífico inferior de 11,9 MJ/kg. Foram testados dois modelos de turbulência: k- $\epsilon$  e RSM. Desenvolveu-se um código para simular a combustão não adiabática conhecida com FIRS, que é embutido no código CFD, e consiste numa

modificação do código interno usado para definir a variável de acompanhamento da reação durante a combustão, conhecida como FIRS que apresenta satisfatória precisão. Quando comparado aos resultados experimentais sobre as emissões de NO, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, bem como os campos de temperatura, é considerando as perdas de carga no sistema.

Lyckama et al (2002) apresentaram um estudo preliminar sobre a influência da mistura de ignição na eficiência e na estabilidade da chama em uma câmara de combustão usando inicialmente gás natural e adaptado para admitir quantidades progressivas do gás de biomassa. A simulação é executada em CFD com o detalhamento das reações químicas pelo software GRI 3.0. O modelo de combustão usado é FRCM (“Finite Rate Combustion Model”), com conhecimento das taxas de reação das espécies.

Davidson (2003) desenvolveu um extenso trabalho sobre os principais modelos de turbulência utilizados na CFD, apresentando o equacionamento básico para a dedução de alguns modelos de turbulência, com destaque para k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$ , Modelo de tensões de Reynolds-RSM e o Modelo SST k- $\epsilon$  (“Shear StressTransport”).

Parent et al (2004) apresentaram preliminares no desenvolvimento de um projeto de câmara de combustão tubular para micro turbinas a gás, comparando dados experimentais com dados obtidos pelo cálculo da CFD, usando FLUENT com modelos de Turbulência k- $\epsilon$  e RSM, modelos de combustão FRCM e EDM para a reação do metano até 2 etapas, cujo balanço químico para obtenção das concentrações das emissões de NO<sub>x</sub> são obtidos pelo CHEMKIN 3 para domínios 2-D e 3-D.

### 2.12.2 Forno Rotativo Contínuo

O modelo de simulação, atribuído às condições iniciais de um forno, teve seu uso matemático, apesar da simplicidade inicial, já conhecido a preponderância da ação do maçarico sobre o comportamento do sistema fluidodinâmico. Rico & Spalding (1961) desenvolveram correlações empíricas para a taxa de entrada do ar secundário num jato de ar em espaço aberto. Essa entrada lateral de ar ocorre como consequência do balanceamento de forças existentes entre o jato e o fluido ambiente, sendo seu fluxo uma função da distância em relação ao bico ejetor, e da diferença entre as densidades dos fluidos e da vazão do jato. Thring & Newby (2009) desenvolveram correlações empíricas para jatos confinados no interior de uma câmara cilíndrica (BEÉR e CHIGIER, 1972), enfocando as circulações de gases que se desenvolvem nas paredes, apresentando uma concordância razoável com os dados experimentais para a razão de circulação, entretanto, necessitando do conhecimento do ângulo de abertura do jato que caracteriza o bico ejetor. Contudo este modelo derivou-se de casos específicos de entrada livre de ar secundário, ou seja, sem a existência das restrições de fluxos impostos pela parede de uma câmara. Posteriormente Craya e Curter, (2007) através de um procedimento analítico mais rigoroso, a partir das equações de continuidade de fluxo e da quantidade de movimento, também apresentaram resultados de boa concordância com os dados experimentais para a razão de circulação.

Para os trabalhos experimentais foi utilizado um queimador com jato de chama definido. Outra prática comum é a utilização de um conjunto de queimadores para uma mesma câmara, agrupados ou distribuídos. Por outro lado, atualmente ainda é prática comum nas simulações a partir de modelos mais rigorosos, desconsiderarem o queimador, sendo o perfil de entrada estimado através de valores médios ou aproximações que sugerem uniformidade.

Grande parte dos fornos necessitam de um processo de transporte através de seu interior, de forma contínua ou semi-contínua, podendo estar na forma sólida, fluida ou pastosa. E a inclusão destes dispositivos de transporte pode vir a alterar suas

propriedades aerodinâmicas significativamente. Uma descrição geral dos recentes avanços na área de simulação em fornos foi publicada por Correa e Shyy (2003).

A combustão apresenta uma taxa de reação extremamente elevada, que impossibilita a modelagem cinética devido à instabilidade numérica entre os reagentes como fator limitante da reação, a qual se considera instantânea. Neste modelo de combustão através da difusão, ou seja, governada pela fração de mistura médio-temporal, o combustível e o oxidante não podem coexistir no mesmo local ao mesmo tempo, contudo a sua fração mássica média pode. (LIXING, 1993).

A combustão em fornos é essencialmente um fenômeno turbulento. Por outro lado a simulação completa dos inúmeros e caóticos turbilhões que se desenvolvem num escoamento turbulento não apresenta ainda soluções práticas. Diversos modelos de turbulência simplificados passaram a ser propostos, mas como observação por Launder & Spalding (1974) um modelo de turbulência deve ser extensivamente aplicável utilizando o menor número possível de constantes empíricas. Os modelos mais difundidos dentro da engenharia até o presente são aqueles derivados da decomposição de Reynolds.

Para o projeto piloto do forno rotativo para calcinação da gipsita e resíduos, a simulação em fluidodinâmica computacional - CFD foram utilizados modelos matemáticos durante o trabalho. Apresentamos as equações fundamentais da fluidodinâmica no formato como elas são tratadas no pacote comercial computacional FLUENT<sup>TM</sup>. Esse programa apresenta todas as equações fundamentais de transporte: massa, energia e movimento (*momentum*). Também são apresentadas as equações complementares para obter o fechamento do modelo proposto, tais como as equações

de turbulência das espécies químicas envolvidas e o de radiação térmica envolvido no processo de transferência de calor.

O pacote comercial FLUENT, possui um conjunto de softwares que permite a completa elaboração de um problema de CFD. A sequência de resolução de um problema utilizando a metodologia de CFD é a seguinte:

Primeiro é construído o domínio de cálculo onde as equações de conservação são aplicadas. O domínio de cálculo pode possuir duas ou três dimensões e assim como eixos e planos de simetria. Após a construção do domínio é feita sua discretização através da elaboração da malha computacional, onde são definidos os pontos de integração e os limites dos volumes de controle. Os elementos da malha podem ser estruturados ou não estruturados, de acordo com a complexidade geométrica ou modelo matemático a ser utilizado. A terceira etapa é o pré-processamento onde são configurados os modelos matemáticos, propriedades físicas dos materiais, condições de contorno e critérios de resolução numérica. Após o pré-processamento inicia-se a resolução numérica das equações e o acompanhamento da convergência da solução. A última etapa é o pós-processamento que compreende a análise dos resultados através recursos gráficos como planos de corte, iso-superfícies, gráficos X-Y, animações.

Na Tabela 2.10 podem-se observar os softwares da ANSYS nas suas respectivas funções no fluxo de trabalho em CFD.

**Tabela 2.10** – Atribuições dos softwares ANSYS-CFD.

Função	Software
Construção da geometria, GAMBIT.4.0	Desing Modeler
Geração de malha	FLUENT- Mesh
Pré-processamento	FLUENT-Pré
Resolução numérica	FLUENT-Solver
Pós-processamento	FLUENT-Post

Fonte: ANSYS

O método da fluidodinâmica computacional através da CFD para analisar, por via de simulação, a influência de variáveis operacionais da combustão do gás natural sobre o comprimento da chama, a distribuição da temperatura e a fração mássica de  $\text{*OH}$  ao longo do reator.

Foram avaliados os efeitos da razão mássica ar/combustível sobre parâmetros importantes na definição da eficiência do processo, tais como: o comprimento da chama de combustão, a geração de radicais livres hidroxilas e a distribuição de temperatura no reator.

### 2.12.3 Métodos de Volumes Finitos

Os fluidos são regidos pela conservação de massa, quantidade de movimento ou momento linear e momento angular, de energia, e de entropia. A conservação de quantidade de movimento é expressa pelas equações de Navier Stokes (Bird et al. 1960) Estas equações são deduzidas a partir de um balanço de forças/quantidade de movimento a um volume infinitesimal de fluido, também denominado de elemento representativo de volume. Atualmente, o estudo, análise e compreensão dos fenômenos em dinâmica de fluidos e em transferência de calor, são como macro áreas que compõem a dinâmica de fluidos, são desenvolvidos através da Modelagem.

Fluidodinâmica Computacional (Computation Fluid Dynamics — CFD) pode ser descrito de forma generalizada como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento. Nesse trabalho,

um modelo matemático foi desenvolvido, especificamente para o problema considerado. A partir deste modelo, geralmente um sistema de equações diferenciais parciais ou equações diferenciais ordinárias, é desenvolvido um modelo computacional ou utilizado um código computacional comercial, para a execução de simulações numéricas, obtendo-se assim projeções temporais para a solução do problema no tempo e no espaço.

Os métodos numéricos das diferenças dos elementos finitos e, mais recentemente o de volumes finitos, foram empregados neste trabalho. Foi adaptado facilmente aos princípios lógicos do tratamento de dados computacional. Ambos os métodos compreendem alguns procedimentos básicos comuns e que serão discutidos para o método de volumes finitos em malha estruturada: para geração de grade padrão de elementos, integração numérica, obtenção das equações linearizadas, e soluções do sistema de equações resultante.

Em física, o método dos volumes finitos é um método de resolução de equações de derivadas parciais baseado na resolução de balanços de massa, energia e quantidade de movimento em um determinado volume em um meio contínuo. Este método evoluiu das diferenças finitas, baseado no método de resolução de equações diferenciais, e não apresenta problemas de instabilidade ou convergência, por garantir que, em cada volume discretizado, a propriedade em questão (por exemplo, a massa) obedece à lei da conservação. Este método é largamente utilizado na resolução de problemas envolvendo transferência de calor ou massa e em mecânica dos fluidos.



#### 2.12.4 Equações Fundamentais

A descrição de um fluido em movimento obedece a três leis da física que são fundamentais e que regem a fluidodinâmica:

- Lei da Conservação da Massa - Equação da Continuidade,
- Segunda Lei de Newton - Equação de Movimento,
- Primeira Lei da Termodinâmica - Equação da Energia.

Estas três leis básicas fundamentais, de forma análoga, podem ser trabalhadas através de balanços em volumes de controle infinitesimais, de forma a obter a respectiva equação de transporte para cada princípio físico. Tais equações, depois de obtidas, podem ser utilizadas tanto em regime laminar quanto em regime turbulento. Entretanto sabe-se que, para propósitos de cálculos na engenharia, esta equação na forma em que são apresentadas é próximo do impraticável pelo simples fato da tecnologia atual não as resolver com precisão e em tempo computacional satisfatório. Assim, geralmente é introduzido o conceito de decomposição em propriedades médias, sendo mais comum o procedimento convencional de médias temporais (Reynolds Average).

Nas seções seguintes, serão derivadas as equações de conservação média da massa, movimento, energia e as espécies químicas. Primeiramente serão visualizadas as equações para as quantidades instantâneas, passando em seguida para as equações médias pelo método da média temporal (Reynolds Average).

Tradicionalmente, a engenharia dos reatores químicos analisa a mistura de líquidos em termos do grau de segregação (Levenspiel, 2000), a medida da mistura na escala molecular. Nestes termos, dois extremos de mistura molecular são considerados:

o micro fluido admite espécies completamente misturadas numa escala molecular enquanto no macro fluido não há mistura a este nível, mas na escala macromolecular.

Sistemas reais exibem comportamentos intermediários e um modelo detalhado baseado na fluidodinâmica e simulações das interações entre mistura e reação química pode levar a um melhor entendimento e capacidade de aperfeiçoar o desempenho de reatores (RANADE, 2002).

Os processos de escoamento reativos são controlados pela mecânica dos fluídos, mistura, difusão e reações químicas e qualquer modelo matemático útil deve enfatizar todas estas contribuições em suas devidas proporções de importância (RANADE, 2002). Existem diversos métodos para a simulação de escoamentos baseados em modelos experimentais, analíticos ou numéricos. Ensaio experimentais exigem alto custo construtivo e operacional enquanto os métodos analíticos são restritos a escoamentos ideais sujeitos as diversas simplificações teóricas, tais como o escoamento de Couette ou Poiseuille (WILKES, 2000), distantes da realidade das grandes plantas industriais. Com o desenvolvimento de novas teorias, ferramentas em análise numérica e por fim de computadores de alto desempenho, a simulação numérica encontra cada vez mais espaço em diversas áreas especialmente baseando-se na fluidodinâmica computacional - CFD. A CFD combina os frutos da análise numérica em equações diferenciais parciais e álgebra linear com a sempre crescente capacidade de processamento dos computadores modernos para resolver as equações governantes da fluidodinâmica aproximadamente (WILKES, 2000).

A CFD requer relativamente poucas restrições e dá uma completa descrição do campo de escoamento de todas as variáveis. Configurações bastante complexas podem ser tratadas e os métodos são relativamente fáceis de serem aplicados.

Também pode incorporar uma variedade de processos simultaneamente (Ranade, 2002). Por si só, a CFD não é a resposta para todas as questões concernentes a fenômenos termo fluidos complexos, mas tem-se estabelecido firmemente como uma ferramenta indispensável, junto com os métodos teóricos e experimentais tradicionais, na análise, design, otimização e solução de problemas de escoamento não isotérmicos (Wilkes, 2000).

A primeira etapa de qualquer projeto de modelagem por CFD é a identificação dos processos controladores chaves e relacionar estes a fluidodinâmica. Um entendimento claro do papel da modelagem fluidodinâmica no projeto global é essencial (Ranade, 2002). Os elementos básicos do mapeamento de um modelo de escoamento computacional em um computador envolvem:

- Desenvolvimento dos modelos apropriados;
- Geração da modelagem geométrica e da malha;
- Solução numérica das equações dos modelos;
- Análise e interpretação dos resultados;

#### **2.12.5 Desenvolvimento dos Modelos Apropriados**

**Modelagem da Combustão Turbulenta Não Pré-misturada** -Na combustão pré-misturada, o combustível e o oxidante entram na zona de reação em correntes distintas. Uma chama turbulenta, ou difusa não apresenta velocidade de propagação, sendo mais sensíveis a perturbações de velocidade, especialmente as turbulentas. Os problemas com chamas difusas são divididas em duas partes: o processo de mistura entre

combustível/comburente e o processo de combustão (estrutura da chama), uma vez que a mistura é alcançada, pelo processo de combustão.

**Modelagem da Turbulência** - A maior parte dos escoamentos de fluidos em aplicações práticas é turbulenta, para tanto é importante compreender os mecanismos físicos que governam este tipo de fenômeno. Os escoamentos turbulentos são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e da posição no espaço. Entre as características mais importantes dos escoamentos turbulentos, destaca-se a periodicidade de escalas que é caracterizada por: baixas frequências controladas pela geometria, e as altas frequências controladas pela viscosidade do fluido.

O regime turbulento é predominante no regime de escoamento. Isto se deve ao fato que pequenas perturbações injetadas são naturalmente amplificadas, gerando instabilidades que os conduzem à transição. Os parâmetros adimensionais mais comuns que controlam o fenômeno da transição são: os números de Reynolds e de Rayleigh.

Nas verificações das instabilidades presentes nos escoamentos, em uma ou mais dimensão, usualmente utiliza-se uma formulação para um problema linear de um número infinito de ondas de pequenas amplitudes, visando obter informações sobre como determinados comprimentos de onda irão evoluir no decorrer do tempo.

Os primeiros estudos sobre instabilidade e turbulência foram desenvolvidos por Osborne Reynolds e Lorde Rayleigh no século XIX. Reynolds (1883), na sua investigação sobre escoamentos no interior de tubos, estabeleceu claramente a existência de dois regimes fundamentais de escoamentos: laminar e turbulento (denominado “sinuoso”, na sua época). Ele estabeleceu também a existência de um parâmetro de controle da transição à turbulência,

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.5)$$

Sendo: U - escala de velocidade;

d - escala de comprimento;

$\nu$  - viscosidade cinemática do fluido.  $\nu = \mu/\rho$

Este parâmetro se tornou conhecido posteriormente como sendo o número de Reynolds (Re). Ele estabeleceu que um escoamento turbulento no interior de uma tubulação só pode ser sustentado para Re acima de 2300. Abaixo desse critério torna-se um valor crítico. Esse valor depende da forma que o escoamento está sendo perturbado. Outro ponto detectado nas pesquisas realizadas por Reynolds foi a existência de regiões turbulentas intermitentes (*spots*), uma propriedade estabelecida como comum a escoamentos próximos de paredes. Reynolds deixou também outra contribuição importante ao desenvolver as famosas equações médias de Reynolds para os escoamentos turbulentos quando ele introduziu as conhecidas tensões de (REYNOLDS, 1884).

Com base na revisão bibliográfica, verifica-se que a maioria dos artigos apresentados se aplica ao estudo termo aerodinâmico de câmaras de combustão do tipo tubular para fornos rotativos contínuos a gás, existindo poucas referências sobre a aplicação da Dinâmica de Fluidos Computacional aplicada para câmaras do tipo cilíndricas, para fornos tubulares.

Neste contexto, a metodologia necessária para o estudo do comportamento de câmaras de combustão tipo cilíndrica para forno contínuo a gás é apresentada nos

capítulo 3 e 4, a qual permite obter visualização tridimensional das distribuições de velocidade, temperatura, quando a câmara é operada com gás natural em regime permanente e carga nominal.

Em vista do custo computacional proibitivo da simulação numérica direta (DNS), restam duas abordagens a Equações médias de Reynolds (RANS) e Simulação de Grandes Escalas (LES). Ambas introduzem termos adicionais nas equações governantes que precisam ser modelados a fim de se alcançar o fechamento das variáveis. RANS grandemente reduz o esforço computacional necessário e é amplamente adotado em aplicações práticas da engenharia (FLUENT INC., 2006). Além disso, seu custo computacional é cerca de 100 a 1000 vezes menor que a LES que requer também códigos muito precisos e simulações 3D (POINSOT e VEYNANTE, 2005).

As equações Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) não modelam diretamente as flutuações das propriedades e consequentemente o procedimento introduz quantidades não fechadas que devem ser modeladas usando modelos de combustão turbulenta.

O ponto inicial são as equações fundamentais (continuidade, energia e momento), aqui apresentadas em coordenadas cartesianas:

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = 0 \quad (2.6)$$

- Quantidade de Momento:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_j + \frac{\partial P}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

- Espécies químicas:

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i Y_k = - \frac{\partial}{\partial x_i} V_{k,i} Y_k + \dot{\omega}_k \quad k=1..N \quad (2.8)$$

- Conservação de Energia:

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i h_s = \dot{\omega}_T + \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

Sendo i e j = 1,2 ou 3, representam as componentes de propriedades como a velocidade.

Em escoamento a densidade constante, a aplicação da abordagem das médias de Reynolds consiste em dividir qualquer quantidade  $\Phi$  em uma média  $\bar{\Phi}$  e uma flutuação  $\Phi'$  (Baukal Jr., 2000):

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (2.10)$$

A definição da equação 2.10 é aplicada as variáveis das equações 2.6 a 2.9 e assumindo  $\rho$ (densidade de massa);  $\rho = \bar{\rho}$  e  $\rho' = 0$ . Usando-se este procedimento na equação da continuidade, chega-se a:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} u_i = - \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{\rho' u_i'} \quad (2.11)$$

Sendo a quantidade não fechada  $\overline{\rho' u_i'}$  corresponde a correlação entre as flutuações de densidade e velocidade que aparecem e requerem modelagem. Este

termo também atua como um termo fonte para o campo médio do escoamento  $\bar{\rho}, \bar{u}_i$  o qual é difícil de lidar em códigos de CFD. Para evitar esta dificuldade, médias mássicas ponderadas (também chamadas de médias de Favre) são usualmente preferidas e utilizadas no código computacional aplicado no trabalho FLUENT™:

$$\tilde{\Phi} = \frac{\overline{\rho \Phi}}{\bar{\rho}} \quad (2.12)$$

E desta forma qualquer quantidade  $\Phi$  pode ser dividida entre componentes médios e flutuantes segundo:

$$\Phi = \tilde{\Phi} + \Phi'' \quad (2.13)$$

Com  $\overline{\Phi''} = 0$ . Usando esta formulação, as equações de balanço médio tornam-se:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right) + \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \tau_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{V_{k,i} V_k} + \bar{\rho} \tilde{u}_i Y_k'' + \bar{\omega}_k \quad k = 1 \dots N \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s = \bar{\dot{\omega}}_T + \frac{\overline{DP}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i h''_s} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \overline{\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}} \right) + \overline{\tau_{ij} \frac{\partial u_{ij}}{\partial x_j}} \quad (2.17)$$

Sendo:  $DP/Dt$  – derivadas substantivas;



$$\frac{\overline{DP}}{Dt} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \overline{u_i \frac{\partial P}{\partial x_i}} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \overline{u_i'' \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i}} \quad (2.18)$$

Estas equações são formalmente idênticas às equações clássicas das médias de Reynolds para escoamento a densidade constante.

Observe que, a comparação das equações 2.6 a 2.9 com as respectivas equações 2.14 a 2.17 revela o aparecimento de variáveis adicionais que representam os efeitos da turbulência (FLUENT INC., 2006; POINSOT E VEYNANTE, 2005). É preciso ainda propor formas de fechamento para estas quantidades não conservadas nas equações de balanço das médias de Favre:

Tensores de Reynolds  $\overline{\rho u_i u_j}$ : Estes termos são fechados por um modelo turbulento. Este fechamento pode ser feito diretamente ou pela derivação de equações de balanço para os tensores de Reynolds. Adotando a hipótese da viscosidade turbulenta proposta por Boussinesq, os tensores de Reynolds  $\overline{\rho u_i u_j}$  são geralmente descritos usando a expressão dos tensores de Reynolds viscosos  $\tau_{i,j}$  mantida para fluidos newtonianos:

$$\overline{\rho u_i u_j} = \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = -\mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \bar{\rho} k \quad (2.19)$$

Sendo  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta dinâmica e  $\delta_{ij}$  é o símbolo de Kronecker. O último termo da equação (2.19) foi adicionado para recuperar a correta expressão para a energia cinética turbulenta  $k$ :

$$k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \tilde{u}_k'' u_k'' \quad (2.20)$$

A questão é agora avaliar a viscosidade turbulenta. A maioria dos trabalhos de combustão utiliza para tal o modelo clássico da turbulência desenvolvido para escoamento não-reativo chamado modelo  $k$ - $\varepsilon$  simplesmente reescritos em termos das médias de Favre. Nesta abordagem, a viscosidade turbulenta é estimada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

sendo a energia cinética turbulenta  $k$  e sua taxa de dissipação  $\varepsilon$  descritas pelas duas equações de balanço (RANADE, 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho} k + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i k = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \bar{\rho} k \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\rho} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\rho} \tilde{u}_i \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.23)$$

O termo fonte  $P_k$  é dado por:

$$P_k = \bar{\rho} \tilde{u}_i'' u_j'' \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

sendo os tensores de Reynolds  $\bar{\rho} \tilde{u}_i'' u_j''$  determinados usando a expressão de Boussinesq (equação 2.19) e as constantes do modelo usadas no trabalho são  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$  e  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ . Os efeitos da liberação de calor nos

tensores de Reynolds não são geralmente levados em conta explicitamente (POINSOT; VEYNANTE, 2005).

- Fluxos turbulentos de espécies  $\tilde{u}_i \tilde{y}_k$  e entalpia  $\tilde{u}_i \tilde{h}_s$ : esses fluxos são geralmente fechados usando uma hipótese clássica de gradiente:

$$\bar{\rho} u_i \tilde{y}_k = - \frac{\mu_t}{Sc_{kt}} \frac{\partial \tilde{y}_k}{\partial x_i} \quad (2.25)$$

sendo  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta, estimada a partir do modelo da turbulência, e  $Sc_{k,t}$  um número de Schmidt turbulento para a espécie  $k$ .

- Fluxos difusivos laminares para espécies ou entalpia: Estes termos moleculares são geralmente desprezados frente ao transporte turbulento, assumindo um nível de turbulência suficientemente elevado. Eles também podem ser mantidos pela adição de uma difusividade laminar a viscosidade turbulenta na equação (2.25).
- Taxa de reação das espécies químicas  $\bar{\dot{\omega}}_k$ : As bases da abordagem da combustão turbulenta não pré-misturada está nas simplificações impostas para a determinação da taxa de reação das espécies químicas. O código FLUENT<sup>TM</sup> permite a escolha entre três abordagens de mecanismos de reação química: formulação geral da taxa finita, frente pré-misturada e fração de mistura utilizando uma função de densidade de probabilidade. Neste último, utilizado neste trabalho, as equações para espécies individuais não são resolvidas diretamente, ao invés disto, as concentrações são derivadas a partir do campo da fração de mistura conforme abordado mais adiante (Fluent Inc., 2006).

- Correlações de Pressão e Velocidade  $\overline{u_i \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i}}$ : Este termo, encontrado na equação (2.18) é simplesmente desprezado na maioria dos códigos de RANS (POINSOT E VEYNANTE, 2005).
- É claro que estas equações acopladas a modelos *ad-hoc*, permitem apenas a determinação de quantidades médias que podem ser um tanto diferente das quantidades instantâneas (POINSOT; VEYNANTE, 2005).

## CAPÍTULO 3

---

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Gipsita

A gipsita utilizada foi proveniente da uma mina da empresa (SUPERGESSO S.A) localizada em Araripina PE, que foi calcinada no DEQ (Departamento de Engenharia Química de PE). A gipsita se caracteriza pela facilidade de perder ou recuperar água de cristalização. Assim, quando submetida a uma moderada temperatura aproximadamente 160°C, a gipsita é convertida em gesso, hemidrato do sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) que, quando misturado com água, endurece à medida que o sulfato de cálcio volta à sua forma mais estável o dihidrato. Por isso, é largamente utilizada na manufatura de placas pré-moldadas e revestimentos (construção civil). O gesso obtido a partir da gipsita do Araripe foi identificado no presente trabalho como gesso beta (A).

### **3.1.1 Resíduos de gesso**

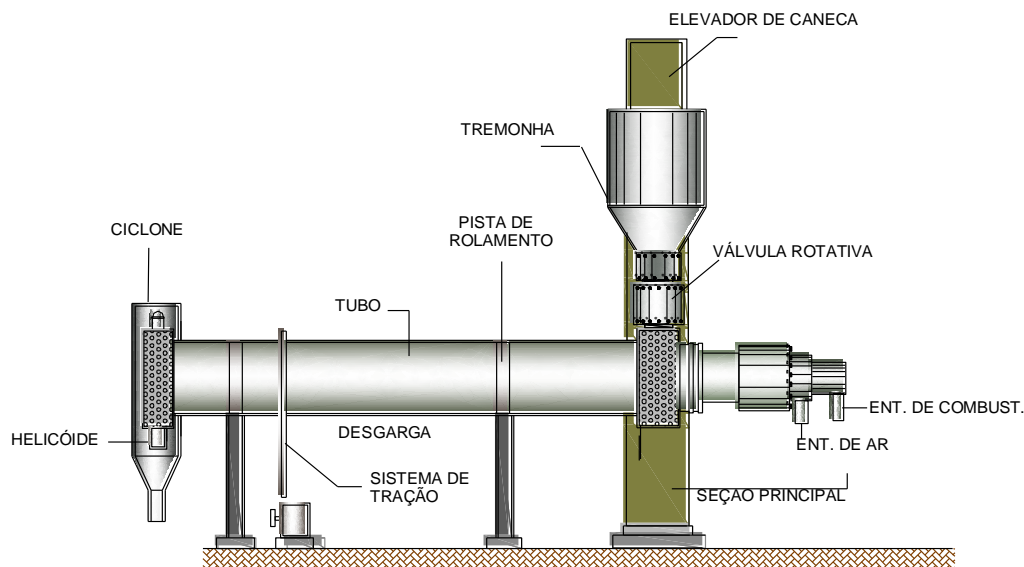
Para o presente trabalho foram utilizados resíduos de gesso coletados de em obras da cidade do Recife executadas pela Lajeiro Gesso. Os resíduos coletados foram gerados na execução de revestimentos de alvenarias e da execução de forro de gesso.

### **3.2 Descrição da planta piloto de calcinação**

O minério gipsita após a extração na mina e os resíduos da construção civil (revestimento e placa) são britados e rebritados para adequação da granulometria para a alimentação no forno de calcinação. O minério e os resíduos são reduzidos a tamanhos que não ultrapassam os 20 mm de diâmetro médio, mediante a utilização de moinhos de martelo e mandíbulas, muito eficazes para esse trabalho. Depois de trituração a gipsita e resíduos, esses são conduzidos ao forno para calcinação.

O forno piloto rotativo contínuo com aquecimento direto, instalado no DEQ/UFPE (Departamento de Engenharia Química de UFPE.), consiste principalmente de um queimador, uma câmara de combustão e uma câmara de desidratação por contato de gases da combustão com o sólido reacional (minério de gipsita ou resíduos de gesso) triturado. A Figura 3.1 apresenta um esquema representativo da planta piloto usado neste trabalho na produção do gesso e do gesso reciclado.

### 3.2.1 Forno rotativo contínuo



**Figura 3.1** – Esquema do forno rotativo piloto do DEQ-UFPE.

O forno piloto de calcinação possui um diâmetro interno de 0,9 m e um comprimento de 5,46 m (Figura 3.1 e 3.2). É confeccionado em chapa de aço carbono de 0,006 m de espessura e possui internamente quatro chicanas axiais (dispositivo que impede a livre circulação de um fluído ou de um sólido), uniformemente distribuídas. Duas destas chicanas axiais, diametralmente opostas, possuem terminais com inclinação de 90° graus e as outras duas de 120 °C, para promoverem um preenchimento mais uniforme da seção transversal do forno com os materiais, permitindo uma uniformidade na queima dos materiais durante a calcinação. Dentro do cilindro (forno) um conduto em aço inoxidável estão distribuídos três termopares para monitoração da temperatura dos gases (Figura 3.3). O regime de contato dos gases de combustão com o material a ser calcinado é do tipo concorrente, com as alimentações do gás e material sólido sendo realizados em uma mesma extremidade do equipamento. A rotação do cilindro do forno é realizada por meio de um conjunto moto-redutor com potência de 3 cv, conectado ao

cilindro externo do forno via corrente dentada/cremalheira (Figura 3.4). O cilindro rotativo possui dois anéis de rolamento em aço forjado, apoiados sobre rolamentos também confeccionados em aço forjado (Figura 3.5).



**Figura 3.2** – Forno rotativo piloto para calcinação com Gás Natural – DEQ/UFPE.



**Figura 3.3** – Extremidade da saída dos materiais do forno piloto destacando-se as aletas e o conduto suporte para os termopares.



**Figura 3.4** – Conjunto eletromecânico responsável pelo movimento de rotação do cilindro do forno.



**Figura 3.5** – Mecanismo responsável pelo rolamento e apoio do cilindro do forno rotativo piloto.



A alimentação dos materiais no sistema é realizada com auxílio de um elevador de canecas com 6,6 m de altura, que faz a descarga em uma tremonha. Esse reservatório-pulmão, com cerca de 1 m<sup>3</sup> de volume, retém o minério de gipsita e os resíduos de revestimento e placa, previamente triturados acima da câmara de alimentação e controla a vazão desses materiais com auxílio de uma válvula rotativa (Figura 3.6). Os sólidos descem para o forno por meio de uma calha de formato retangular, que guia os sólidos para um contato inicial com os gases quentes na entrada do forno. Os materiais tendem a se depositarem na base do forno, e são colhidos pelas abas axiais (Chicanas) tendo como função possibilitar um maior tempo de permanência dentro do forno. Os materiais são conduzidos à saída do forno com auxílio da inclinação do mesmo e das abas axiais (Chicanas). O calcinado produzido é descarregado por gravidade sobre a calha de um transportador helicoidal (Figura 3.7), o qual transporta o produto até um recipiente de coleta.

Os gases quentes que circulam pelo forno são originados da combustão do Gás Natural (GN). Basicamente são compostos de gás natural não reagido, produtos da combustão do gás natural, componentes do ar em excesso e vapor de água proveniente da desidratação do minério de gipsita. A circulação dos gases é induzida com auxílio de um exaustor de 3 CV, 1720 rpm e capacidade máxima de tiragem de 3100 m<sup>3</sup>/h, instalado na tubulação de saída de gases do forno que ligam o mesmo a uma chaminé. Após ceder calor para a reação no interior do forno os gases quentes saem do sistema na parte superior da mesma extremidade em que o gesso é descarregado. Para evitar problemas de emissão de particulados pelo sistema para a atmosfera, foram instalados na saída dos gases um ciclone (Figura 3.8) e uma coluna

de lavagem destes gases (Figura 3.9). Numa etapa posterior foi projetado o isolamento térmico para o forno, composto de fibra cerâmica suportadas por folhas alumínio corrugadas (Figura 3.10).



**Figura 3.6** – Elevador de canecas e tremonha responsável pela alimentação de sólidos.



**Figura 3.7** – Transportador helicoidal responsável pela coleta do gesso produzido no forno rotativo piloto.



**Figura 3.8** – Ciclone instalado na saída dos gases do forno rotativo piloto.



**Figura 3.9** – Coluna de lavagem dos gases efluentes do forno piloto.



**Figura 3.10** – Forno rotativo piloto com isolamento térmico.

Após a corrida no forno a conversão da reação é determinada, separando-se o material produzido segundo as condições operacionais de temperatura, rotação do forno e vazão mássica da fase sólida reacional. Logo após a calcinação, avaliou-se a perda de água de desidratação através de uma termobalança por técnica de infravermelho. Todo o gesso e resíduos produzidos foram estocados em sacos de ráfia para posterior análise de corpos de prova submetidos a ensaios.

### **3.2.2 Sistemas auxiliares**

O Gás Natural utilizado na combustão é acondicionado em cilindros de 16 m<sup>3</sup>, totalizando 64 m<sup>3</sup>, pressurizados a 200,0 atm. e armazenados em uma cabine, na parte externa do laboratório onde está instalado o forno rotativo piloto. O gasoduto de suprimento de gás foi construído em tubos e conexões de aço de ¾ in. A linha que leva o Gás Natural ao forno opera a pressões em torno de 1,0 atm. As conexões do gasoduto são do tipo rosca. Antes da alimentação do forno foi elaborado um sistema de combustão, responsável pela monitoração e controle das condições de vazão, temperatura e pressão do combustível e do ar de combustão. Uma vista parcial do sistema controle de combustão é mostrada pela Figura 3.11.





**Figura 3.11** – Sistema utilizado na monitoração e controle das condições de combustão para o forno piloto.

Duas tubulações de  $\frac{3}{4}$  in. chegam à entrada do “manifold” que alimenta o sistema de combustão – uma para admissão de Gás Natural e outra GLP. A junção dessas duas tubulações dá origem a um único manifold de 1 in. de diâmetro. No conjunto de dutos que compõe o sistema de medição e controle do fluxo de combustível apresentados pela (Figuras 3.11e 3.12) estão instalados os seguintes acessórios relacionados na Tabela 3.1.

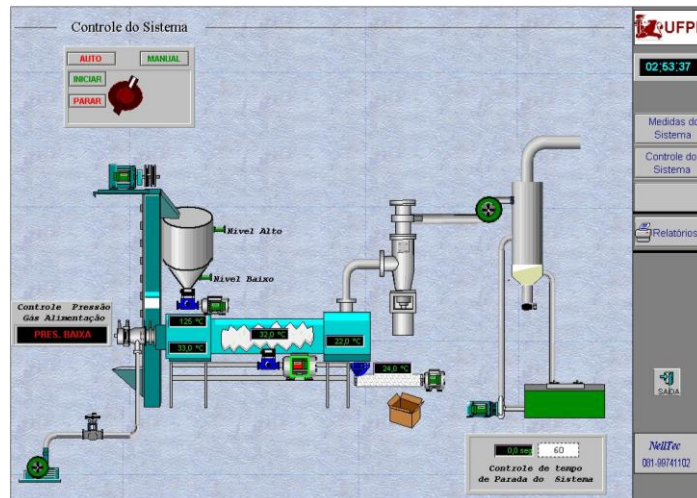


**Figura 3.12** – Sistema de alimentação do ar de combustão e queimador.

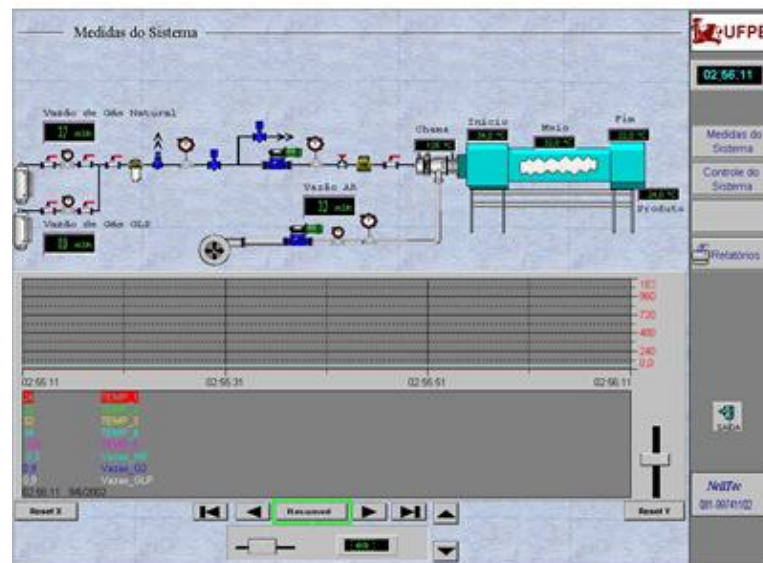
**Tabela 3.1** – Instrumentação do sistema de medição e monitoração de ar e combustível no forno piloto rotativo relativa às figuras 3.11 e 3.12

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS ACESSÓRIOS</b>
1	<i>Válvulas esferas manuais</i>
2	<i>Medidores de vazão de combustível</i>
2a	<i>Medidores de vazão de combustível e comburente</i>
3	<i>Pressostato de baixa</i>
4	<i>Pressostato de alta</i>
5	<i>Manômetro</i>
6	<i>Redutor de pressão</i>
7	<i>Filtro</i>
8	<i>Válvulas solenoides</i>
9	<i>Regulador balanceado</i>
10	<i>Válvula de porte ajustado</i>
11	<i>Válvula de retenção</i>
12	<i>Ventilador</i>
13	<i>Servo motor</i>
14	<i>Medidor de vazão de ar</i>
15	<i>Manômetro da linha de ar</i>
16	<i>Queimador de gás</i>
17	<i>Sensor U.V</i>

Todo o funcionamento do forno piloto foi monitorado por um sistema instrumental e computadorizado. Através de um microcomputador foi possível o acionamento dos principais motores envolvidos, bem como o controle de alguns parâmetros como a velocidade de rotação do cilindro e a taxa de alimentação do sistema com gipsita. Através do mesmo sistema, foi possível o monitoramento da vazão dos gases combustível, e as medições de temperatura na chama e ao longo do comprimento axial do forno (Figuras 3.13 e 3.14).



**Figura 3.13** - Tela do software de acompanhamento e controle das variáveis do forno rotativo piloto.



**Figura 3.14** - Sistema de medidas do forno através de software.



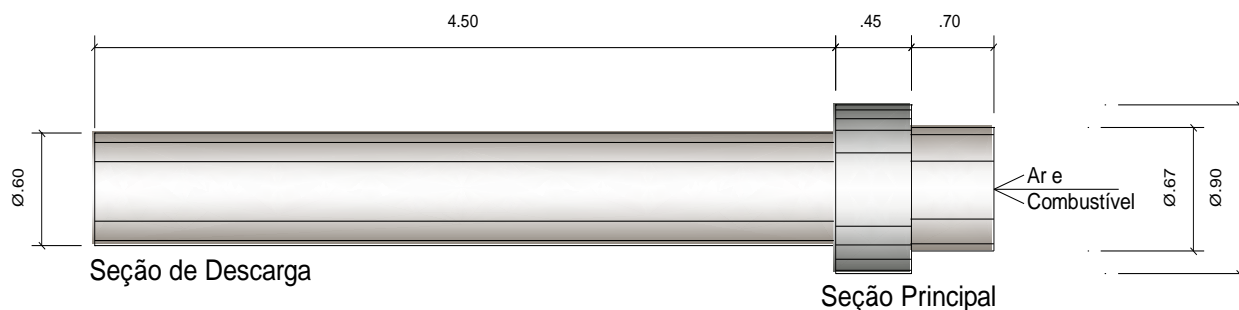
### 3.3 Métodos

#### 3.3.1 Simulação do forno piloto utilizando a Fluidodinâmica Computacional

A modelagem matemática do processo de calcinação no forno rotativo contínuo focou, inicialmente, o desenvolvimento de modelos para a simulação da combustão da chama do gás natural. Em vista da conformação geométrica do queimador, foi utilizado um modelo baseado na combustão não pré-misturada. Por sua vez, a modelagem do escoamento foi baseada nos modelos de escoamento multifásico. Todas estas abordagens basearam-se nas equações fundamentais dos balanços de massa, energia e quantidade de movimento, que representam juntas, princípios fundamentais da dinâmica de fluídos.

No forno piloto, a queima se dá através de gás natural, e o ar é usado como oxidante. O volume nominal da taxa de gás natural é de 4,8 m<sup>3</sup>/h, o que equivale a poder térmico de 1,5 MW (COPERGÁS, 2010). Simplificando o problema para a simulação numérica só é injetado o metano e ar no forno piloto com uma vazão mássica de  $2,12 \times 10^{-2}$  kg/s.

Na Figura 3.15 é apresentada a geometria utilizada na simulação do Fluent. Esta corresponde a uma fornalha cilíndrica em seu domínio computacional, não contempla a seção de descarga. Esta simplificação visa à redução do esforço computacional e do tempo de simulação.



**Figura 3.15.** – Esboço cotado da região de interesse para simulação no Fluent, do forno piloto rotativo disponível no Departamento de Engenharia Química da UFPE.

A espessura do tubo referente a forno rotativo é 6 mm. O domínio computacional foi dividido em 2464804 faces interna triangulares, 1988761 células, 4402480 faces, 604258 nós de controle. A malha utilizada como mostra as Figuras 3.16 a 3.18, é não uniforme, de modo a obter-se uma melhor resolução, próximo às paredes, às entradas de ar e combustível.

Estratégias da elaboração da malha (Critério de qualidade para *tetra-hedral/mix cells*)

*Maximum cell squish*=9.20171e-001

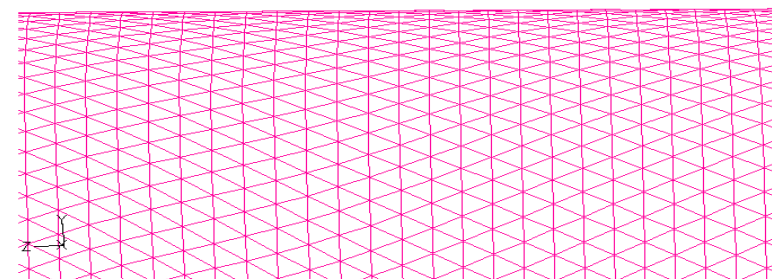
*Maximum cell skewness*=9.28749e-001

*Maximum aspect ratio*=1.35762e-002

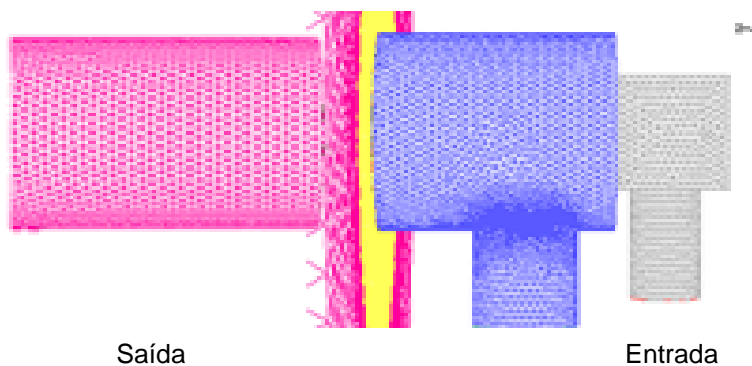
Basicamente, os volumes sólidos do forno rotativo são desenhados com uma grade regular, de elementos hexaédrica em sua estrutura de malha no GAMBIT (Aplicativo de pré-processamento do FLUENT™) (Figuras 3.16 a 3.18).

Como etapa de pré-processamento, define-se as fronteiras do sistema, suas subdivisões, os tipos interface e as faces de contorno. Para esta montagem da unidade virtual empregou-se o software comercial Gambit, versão 4.0.

Inicialmente foi definido o plano de dimensões para a montagem da malha. Optou-se pelo plano tridimensional pela possibilidade do estudo da evolução do escoamento e ainda como diferencial dos trabalhos pesquisados na literatura, que abordam em sua maioria o plano bidimensional.



**Figura 3.16** - Domínio e malha do forno rotativo usado nas simulações. Detalhe da malha utilizada na simulação. Região central.



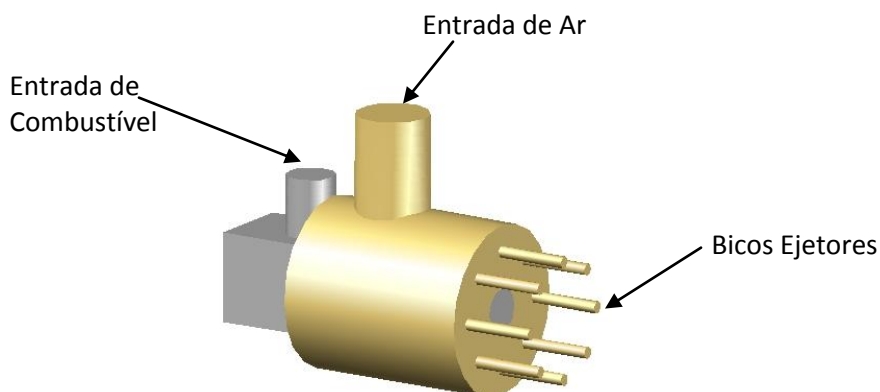
**Figura 3.17** - Malha utilizada na simulação – Regiões de entrada e saída.



**Figura 3.18** - Malha utilizada na simulação – Visão total.

### 3.3.2 Condições de contorno

Entrada de combustível e ar uma geometria simplificada da entrada de ar-combustível do forno é mostrada na Figura 3.19. Nas regiões próximas à parede, a malha foi construída respeitando os critérios exigidos pela formulação utilizada, na simulação.



**Figura 3.19** - Queimador do forno com respectivas entradas de saída dos fluidos.

O metano e o ar são injetados em pequenos tubos perpendiculares ao cilindro Queimador, canalizando radialmente sem pré-mistura para os bicos ejetores com uma taxa de fluxo de massa de 0,0098 kg/h para o metano; o ar é injetado com uma taxa de fluxo de massa de 0,0203 kg/h. Ao mesmo tempo, especificando a condição de contorno para o FLUENT, é necessário conhecer o parâmetro geométrico, facilmente calculado. O diâmetro hidráulico do queimador é definido com valor de 0.060m.

### 3.3.3 Tomada de pressão

As configurações "back flow", na tomada da saída de pressão são importantes, para a estabilidade numérica. Na realidade, o "back flow" deveria ser Ar frio. No entanto para facilitar estabilidade de cálculo, o fluido no "back flow" deve ser configurado semelhante ao fluido no controle de domínio antes da saída de pressão.

### 3.3.4 Contorno das paredes

As paredes externas são especificadas na condição de contorno da radiação externa com a temperatura ambiente. Simulação de resultados mostra que esta condição de contorno é corresponde às paredes externas sendo fixados de 300 °C.

### 3.3.5 Modelos

- Turbulência: os modelos de turbulência utilizados nesse trabalho são os modelos k- $\epsilon$  (Padrão) e o k- $\epsilon$  (RNG). O padrão k-  $\epsilon$  é uma modelo semi-empírico baseado nas equações do modelo de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ). A equação do modelo de transporte para k é derivada da equação de Navier-Stokes. O modelo k- $\epsilon$  é indicado para escoamentos completamente turbulentos com altas escalas de turbulência.

- Continuidade. A equação da continuidade é usada como uma equação para a pressão. Na equação a pressão não aparece explicitamente para os escoamentos incompressíveis, pois a pressão  $p$  não é mais uma função da densidade, que é

constante. Para introduzir a pressão na equação da continuidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Para discretizar as equações da continuidade, assim como suas soluções através do chamado pressure-based solver. Considera-se o Modelo compressível para o gás ideal.

- Energia. A aplicação do teorema de Reynolds à primeira lei da termodinâmica permite-nos formular a equação de conservação de energia. Para uma análise detalhada na simulação, os efeitos do modelo de radiação são considerados. Além disso, em configurações FLUENT há um termo de fonte de energia de difusão de espécies na equação de energia global (energy equation), Apendice III, que pode ser selecionada ou não selecionada. Esta opção pode influenciar numericamente a estabilidade.

- Química: o gás natural é uma mistura de diferentes hidrocarbonetos, dentre eles o metano, etano, propano, butano.

Parte da reação global entre o metano e o oxigênio é adotada na reação química na modelagem,



Neste aplicativo, a mistura turbulenta é o fator principal que afeta a velocidade de reação química em geral. A composição média do gás natural em base volumétrica é apresentada no modelo de dissipação de Eddy (modelo de turbulência) em que é aplicado para simular no FLUENT a interação química na turbulência.

### 3.3.6 Abordagem numérica

#### 3.3.6.1 Solver

FLUENT fornece dois tipos de sugestões. Um é chamado “Segregated solver”, que resolve as equações sequencialmente; a outra é “Coupled solver”, na qual as equações são resolvidas simultaneamente. Ambos “Segregated solver” e “Coupled solver” foram aplicados.

#### 3.3.6.2 Sugestões

Um exemplo de uma sugestão é dado na (Tabela 3.2), começando com produtos de combustão da mistura de ar-metano no domínio. O Modelo PDF com forma assumida (PDF) foi construído em combinação com o modelo de equilíbrio químico para o processo de combustão. Este modelo assume que o processo de combustão é determinado pelo processo de mistura turbulenta e que as reações de combustão são extremamente rápidas. Desta forma assume-se que em cada volume de controle reina equilíbrio químico entre reagentes e produtos. Estando presentes as espécies:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$  e  $\text{N}_2$ . Utilizando-se as rotinas para cálculo de equilíbrio químico do software CHEMKIN-II, faz-se o tabelamento das frações mássicas das espécies, densidade e temperatura em função da fração de mistura. A tabela abaixo determina os valores a serem aplicados no programa computacional do código de computação desenvolvido para a determinação dos estados de equilíbrio dos gases de combustão

**Tabela 3.2:** Sugestões para misturas de gases.

Espécies	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Fração Mássica	0,89	0,012	0,08	0,015	0,003	0.18878	0.81122
Temperatura, K	673,15						
Espécies	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Fração Mássica	0,89	0,012	0,08	0,015	0,003	0.18878	0.81122
Temperatura, K	723,15						
Espécies	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Fração Mássica	0,89	0,012	0,08	0,015	0,003	0.18878	0.81122
Temperatura, K	773,15						

### 3.3.6.3 Solução (Controle)

Os fatores que define "Under relaxation" podem estar muito altos para obtenção da convergência no "Segregated solver". Assim cálculo prévio deve ser configurado com pequenos valores na relaxação. Eles podem aumentar gradualmente conforme a continuidade de cálculo. Da mesma forma, o "Coupled solver" normalmente começa com valores numéricos pequenos no "Courant" que podem ser aumentado passo a passo posteriormente.

É de salientar que na simulação, o Momento deve começar com um fator menor que 0,7 no padrão da "under-relaxation" como também um valor de energia menor do que o padrão 1.0, facilitando assim, a obtenção de valores residuais menores (facilitando a convergência).

### 3.3.6.4 Discretização

O esquema de discretização geralmente usado numa primeira aproximação é o esquema *Upwind* (polinômios de zero, 2ª e 4ª ordem), ou de variante e esquema *QUICK* testados (Apêndice I). O regime de primeira ordem facilita a convergência. No entanto, o regime de segundo ordem torna soluções mais precisas.



### **3.3.6.5 Etapas para solução**

O fluxo decorrente das complexas reações nas simulações segue importantes etapas a seguir:

- O fluxo não reativo é calculado inicialmente. Em seguida, o modelo químico é ativado.
- O cálculo de fluxo isotérmico poderá ser processado primeiramente. Em seguida, a equação de energia será ativada.
- O cálculo pode prosseguir sem o modelo de turbulência. Em seguida, o modelo de turbulência é ativado.

### **3.3.6.6 Convergência**

Normalmente, monitorar os valores residuais é suficiente para julgar se a solução converge ou não. No entanto, isso induz a um desequilíbrio em alguns casos, por exemplo, quando a estimativa inicial é muito boa e está muito próximo da solução real é absolutamente necessário monitorar simultaneamente os coeficientes de resistência do momento e da transferência de calor em pontos críticos nas paredes. Nas simulações, a maneira de como definir animações nas distribuições de parâmetros no fluxo dos fluidos do forno é também uma forma de resposta para convergência.

### 3.4 Planejamento Experimental

Para a identificação das condições ótimas para produção de gesso a partir da gipsita, resíduos de gesso de revestimento e placa, foi adotado um planejamento experimental tendo como variáveis independentes de entrada do sistema: Temperatura de controle da combustão ( $T_C$ ), Velocidade de rotação do cilindro (N) e Vazão de alimentação de sólidos ( $Q_s$ ), e como variável dependente de saída o teor de hidratação do material sólido produzido a partir das três matérias-primas iniciais, constituindo assim três variáveis de resposta. Um atenuante para o problema do rápido crescimento do número dos ensaios a serem efetuados caso seja escolhido o planejamento fatorial completo de 3 níveis e 3 fatores com duas replicas é adoção do planejamento fatorial fracionado  $3^{3-1}$  com adição de um ponto central (1pc) e duas réplicas, totalizando 30 ensaios.

O desenvolvimento do Planejamento de Experimentos seguiu as seguintes etapas:

- Caracterização do problema;
- Escolha dos fatores de influência e níveis;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento
- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

Caracterização do problema: O gesso é o resultado do processo de desidratação que é imposto à gipsita e resíduos de revestimento e placa em que o grau de hidratação está

ligado diretamente à obtenção da conversão em que as exigências químicas segundo NBR 12130 (1991) está entre limites de 4,2 % a 6,2 % da água de cristalização. Essa faixa de valores permite uma previsão para uma boa desidratação do material com preservação das propriedades químicas e físicas do produto. Como a análise de cada variável resposta (variável observada) é o objetivo principal da pesquisa, estudos da influência dos fatores de tratamentos sobre elas é que irá responder às questões formuladas no resultado final.

Escolha dos fatores de influência e níveis: Nesta etapa da experimentação, há uma seleção de fatores e os níveis a serem aplicados ao material experimental. O interesse é avaliar os efeitos desses fatores sobre algumas propriedades desse material. As faixas de valores adotadas das variáveis independentes basearam-se em trabalhos anteriores (Bezerra Filho, 2010). Essas propriedades constituirão as variáveis dependentes ou variáveis respostas do experimento, ou seja, aquilo que se mede no material experimental, após a aplicação dos tratamentos, são as variáveis dependentes ou variáveis respostas, cujos valores contêm os efeitos dos tratamentos. A análise de cada variável resposta (variável observada) é o objetivo principal da pesquisa, uma vez que o estudo da influência dos fatores de tratamentos sobre elas é que irá responder às questões formuladas pelo pesquisador. A Tabela 3.3 apresenta variável ou fator presente nas condições experimentais que afetem os valores da variável resposta e que devem ser controlados para a execução do planejamento.

Seleção das variáveis resposta: Na experimentação, o pesquisador seleciona os fatores e os níveis a serem aplicados ao material experimental. São esses dados que trazem consigo a medida do efeito dos fatores tratamentos sobre as variáveis medidas

ou variáveis respostas. A variável escolhida como resposta foi o grau de hidratação (%) do sólido após a calcinação no forno rotativo piloto. No caso do gesso beta e dos resíduos, o Grau de Hidratação irá representar o percentual de conversão de di-hidrato em hemihidrato.

Determinação de um modelo de planejamento de experimento: Esta é outra das etapas importantes em uma pesquisa, pois se trata da coleta dos dados, obtenção das “observações” que representam os valores das variáveis respostas ou dependentes. São esses dados que trazem consigo a medida do efeito dos fatores tratamentos sobre as variáveis medidas ou variáveis respostas. Assim, na fase de planejamento do experimento deve-se ter bem clara a forma de coleta das observações a serem geradas pela pesquisa, incluindo a escala apropriada de medida da variável dependente.

Condução dos experimentos: O delineamento experimental deve fazer parte de todo e qualquer planejamento de experimento. Este delineamento permite que as hipóteses estatísticas possam ser testadas após obtenção dos resultados. O delineamento deve ser entendido como uma série completa de passos planejados e organizados para assegurar que dados apropriados e de qualidade sejam obtidos, de forma a permitir uma análise objetiva que leve a conclusões válidas em relação ao problema proposto.

Análise dos dados: Após a realização do experimento, coletados os resultados, os dados experimentais devem ser analisados para se testar as hipóteses formuladas, a análise estatística e os testes de hipóteses são necessários. Deve-se lembrar de que o experimento é sempre uma amostra, que se deseja aleatória, de uma população normalmente infinita, e os resultados observados em amostras aleatórias de uma população sempre variam. A partir destes resultados, técnicas estatísticas foram

utilizadas por meio de software estatístico, de modo a criar uma relação entre a dependência do grau de hidratação (%) com as variáveis independentes analisadas (fatores).

Outro aspecto a ser reforçado é que a referência de comparação nos testes de hipóteses estatísticas é a estimativa do erro experimental, normalmente representada pelo “Quadrado Médio do Resíduo” da análise de variância para o grau de hidratação.

Os níveis e fatores estabelecidos no Planejamento Fatorial Completo estão apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** – Fatores e níveis adotados para o planejamento experimental empregado.

Fatores	Níveis		
	-1	0	1
(X <sub>1</sub> ) - Temperatura de controle da combustão (°C)	400	450	500
(X <sub>2</sub> ) - Velocidade de rotação do cilindro (rpm)	2	2,5	3
(X <sub>3</sub> ) - Vazão de alimentação de sólidos (kg/h)	100	110	120

A Tabela 3.4 apresenta a matriz do planejamento com os 30 ensaios realizados (incluindo 01 ponto central + 02 réplicas),

**Tabela 3.4** – Matriz de planejamento experimental adotada.

<b>Réplicas</b>	<b>Tc (°C)</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Qs (kg/h)</b>
1	400	2	100
1	400	3	120
1	400	3	110
1	450	2	120
1	450	3	110
1	450	3	100
1	500	2	110
1	500	3	100
1	500	3	120
1	450	3	110
2	400	2	100
2	400	3	120
2	400	3	110
2	450	2	120
2	450	3	110
2	450	3	100
2	500	2	110
2	500	3	100
2	500	3	120
2	450	3	110
3	400	2	100
3	400	3	120
3	400	3	110
3	450	2	120
3	450	3	110
3	450	3	100
3	500	2	110
3	500	3	100
3	500	3	120
3	450	3	110

### 3.5 Determinação da Distribuição do Tempo de Residência – DTR

#### 3.5.1 Definição

Os fornos rotativos contínuos usados pela indústria de calcinação da gipsita caracterizam-se por terem a forma de um tubo giratório e serem constituídos de aço e material refratário, de grande extensão e com uma pequena inclinação. Nesses equipamentos, o minério moído entra em contato direto com a chama, que sai do maçarico, no lado da alimentação. O minério sendo calcinado percorre, por gravidade, toda a extensão do forno e o tempo de residência é controlado pela velocidade de rotação do tubo.

É evidente que os elementos da corrente do sólido efluente percorrem diferentes caminhos do forno e podem assim passar tempos diferentes para atravessar o recipiente. A distribuição destes tempos para a corrente que deixa o reator é chamada de distribuição do tempo de residência (DTR). Ela representa uma função característica de um reator não ideal e descreve de maneira quantitativa quanto tempo diferentes elementos da fase efluente permanecem no reator durante certo intervalo de tempo. Para calcular a DTR, apresentada por  $E(t)$ , é preciso realizar um experimento em que seja registrada a concentração, por exemplo, de saída de um traçador no reator em função do tempo, expressada por  $C(t)$ . Em posse desses dados, é possível traçar a curva  $E(t)$  *versus*  $t$  do reator.  $E(t)$  é obtida pela sua normalização, que se dá fazendo sua área igual a 1,0 (um).

A expressão da DTR pode ser apresentada conforme a relação abaixo (FOGLER, 1999):

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (3.2)$$

Sendo,

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (3.3)$$

Onde o tempo médio de residência é dado por:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t E(t) dt = \int_0^1 t dF \quad (3.4)$$

Ou em dados discretos:

$$\bar{t} = \sum t_i E(t_i) \Delta t_i \quad (3.5)$$

A dispersão da distribuição é medida pela variância, é dada por:

$$s^2 = \int_0^{\infty} \left( t - \bar{t} \right)^2 E dt = \int_0^{\infty} t^2 E dt - \bar{t}^2 \quad (3.6)$$

Na forma discreta:

$$s^2 = \frac{\sum t_i^2 E(t_i) \Delta t_i}{\sum E(t_i) \Delta t_i} - \bar{t}^2 = \sum t_i^2 E(t_i) \Delta t_i - \bar{t}^2 \quad (3.7)$$

Se a densidade do fluido escoando no reator se mantiver constante

$$\bar{t} = \tau = V / v_o \quad (3.8)$$



Sendo  $\bar{t}$  o tempo espacial,  $V$  o volume do reator e  $v_0$  a vazão volumétrica na entrada do reator.

### 3.5.2 Preparação do traçador

O traçador utilizado foi preparado pela impregnação do sal de cloreto de manganês na superfície do minério, visando, assim, a apresentar as mesmas propriedades físicas do colchão de partículas de gipsita e ser apto a representá-lo durante o escoamento. Este método foi adaptado do trabalho de WES et al. (1975) que utilizaram o mesmo sal impregnado para representação do fluxo de amido de batata.

Experimentalmente embebeu-se o minério numa solução bastante concentrada do sal, durante um longo intervalo de tempo. Posteriormente, o minério foi seco, e denominado traçador. A metodologia detalhada é apresentada a seguir:

- a) Preparou-se uma solução com 190 g de cloreto de manganês dissolvido em 100 g de água;
- b) Embebeu-se a gipsita (1 kg) com a solução do sal em quantidade suficiente (0,5 L) para que todo sólido permanecesse submerso. O contado entre as fases foi de 24 horas;
- c) Separou-se a fase sólida decantada da fase líquida em funil de Büchner usando um filtro de papel;
- d) Colocou-se a fase sólida em estufa, à temperatura de 80°C, até secagem total do material. Durante este período, o sólido úmido foi frequentemente agitado, a fim de homogeneizar a sua temperatura;

- e) A gipsita impregnada foi resfriada em um dessecador a fim de evitar a captação de umidade atmosférica.

### **3.5.3 Medição da concentração do traçador na saída do reator**

O teor de traçador na amostra coletada, na saída do reator, foi obtido determinando-se a concentração de manganês extraído após lixiviar a amostra com uma solução ácida com posterior diluição em água destilada até um determinado volume. Uma amostra da solução assim obtida é levada para análise por espectroscopia de absorção atômica (EAA) para quantificar o teor de manganês contido na solução aquosa. O Espectrômetro de Absorção Atômica usado é disponível no Laboratório de Análise de Combustíveis (LAC), DEQ-UFPE, de Marca AA 220 FS, Modelo EL01075149 ,Fabricante Varian.

A técnica conhecida na quantificação da luz absorvida por certa amostra de átomos submetida a uma vaporização em chama. Sua aplicação qualitativa é conseguida pela leitura da absorção de luz de uma amostra de referência, cuja concentração é conhecida, e posterior comparação com as leituras das demais amostras desconhecidas. A correlação segue um modelo linear (MENDHAM et al., 2002).

As etapas e os procedimentos usados na determinação da concentração do traçador na saída do reator são descritos a seguir:

- a) Da amostra coletada, pesou-se 8,00g de material num becker de 100 ml;
- b) Adicionou-se 10 ml de ácido sulfúrico concentrado (98%);
- c) Após 4 horas completou-se o volume para 40 ml com água destilada e agitou-se o recipiente;

- d) Após mais 20 horas, filtrou-se a suspensão a vácuo lavando o béquer com água destilada;
- e) O filtrado obtido foi diluído com água destilada num balão volumétrico até certo volume que permitia a sua análise por EAA;
- f) A solução obtida foi levada para determinação do teor de manganês por EAA. Seu resultado foi multiplicado pelo fator de diluição e dividido pela massa de amostra (8,00 g). Determina-se então a massa do manganês por unidade de massa da amostra ( $\text{mg.g}^{-1}$ ).

### 3.6 Seleções de Materiais

No estudo dos materiais foram identificados como:

- Gesso oriundo da calcinação de resíduo, revestimento (B) e de placa (C) (desidratação e peneiramento) a partir das seguintes etapas:
  - a) aquecimento até a temperatura de 70°C em um analisador de umidade modelo GEHAKA IV 200, objetivando retirar o excesso de água livre,
  - b) após resfriamento efetuou-se uma separação granulométrica mediante a utilização de peneira com abertura de malha de 0,71 mm (Tyler 24), com intuito de separar apenas os grumos formados, no gesso beta e nos resíduos, de revestimento e placa (forro) coletados em obras.

Os ensaios de análise térmica e difratometria de raios X tratados a temperatura ( $140 \pm 5$ )°C, as amostras de gesso beta (A) e resíduos (B e C), submetidas a diferentes temperaturas de calcinação foram fundamentais para estabelecer a temperatura de 140° C por 1 hora;

A partir do gesso beta e do resíduo gesso coletado e calcinado, foram confeccionadas pasta, nas seguintes proporções:

- Composição da massa para cada amostra na determinação de consistência; gesso beta e resíduos, 1 (uma) parte de água (150 ml) para 200g de amostra.

Os traços referenciados nas composições gesso beta e resíduos foram obtidos a partir do ensaio da pasta de consistência normal, ocasião em que se define a quantidade de água necessária para que uma sonda (agulha de Vicat modificada) tenha uma penetração, no interior do molde, de  $30 \pm 2$  mm. É importante salientar, que as misturas para cada composição, de acordo com o ensaio mencionado, são de diferentes proporções. Cada material e mistura requer uma determinada quantidade de água fixa segundo A norma, NBR-12127 [ABNT, 1997], para que a pasta confeccionada alcance uma boa consistência e trabalhabilidade, viabilizando desta forma uma melhor moldagem. No caso da composição dos resíduos, esta foi definida a partir de valores referenciados em trabalhos de pesquisa, a partir de gesso natural de forma a possibilitar uma análise comparativa de tendências e comportamentos dos resultados encontrados.

As composições de misturas propostas têm como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas das pastas a partir das amostras a 100% de gesso beta (A) e resíduos (B) e (C) de 50% e 75% entre as proporções em estudo.

As pastas foram preparadas conforme os procedimentos propostos pela NBR 12129 - *Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas* (ABNT, 1991c). A primeira etapa consiste no polvilhamento durante 1 minuto da amostra sobre a água destilada a ser utilizada no traço. Após essa etapa a mistura é deixada em repouso

durante 2 minutos e depois a pasta é misturada durante 1 minuto. Para essa etapa foi utilizado um molde com movimentos circulares e contínuos.

A última etapa foi a moldagem dos corpos de prova cúbicos com 50 mm de aresta, utilizando óleo a base vegetal como desmoldante, (referenciado como Rheofinich FR 300), nos moldes.

Os moldes foram preenchidos em 2 camadas de modo a evitar o aprisionamento de ar na pasta, retirado o excesso, nivelado e identificado. Antes dos ensaios de resistência mecânica, os corpos de prova foram colocados em um dessecador contendo sílica gel, para evitar a absorção de umidade, por 24 horas.

Os ensaios físico-químicos bem como os ensaios mecânicos foram realizados no ITEP (Instituto Tecnológico de PE) e nos Departamentos Engenharia Química e Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco.

### **3.6.1 Determinação da água livre e de cristalização dos gessos e resíduos.**

Para se obter os resultados referentes à água livre, as amostras, que possuíam massa de cerca de 50,0g, foram secas em estufa, em uma temperatura de  $(40 \pm 4) ^\circ\text{C}$  e esfriadas em dessecador, até que a massa ficasse constante.

Foram determinadas as águas livre e de cristalização, para as amostras tratadas nas temperaturas específicas de  $85 \pm 5 ^\circ\text{C}$  e  $200 \pm 5 ^\circ\text{C}$  seguindo a norma NBR 12130. Gesso para construção. Os teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico foram tratados seguindo a norma (ABNT, 1991).

Na determinação da água de cristalização, uma pequena alíquota de aproximadamente 2,0g foi retirada das amostras já secas. Essas novas amostras foram colocadas em

uma mufla, em uma temperatura de  $(230 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , esfriadas em dessecador, até que a massa permanecesse constante.

A determinação de água livre e de cristalização foi feita através do equipamento. Analisador de umidade por infravermelho Equipamento Eletrônico: MARTE,( modelo AS 5500 C), faixa de medição (0 a 5000)g, resolução 0,01g.

### **3.7 Caracterização das Amostras (gesso e resíduos de gesso)**

As amostras foram caracterizadas de acordo com ensaios físicos, químicos, térmicos e mecânicos, para comparações de resultados futuros.

#### **3.7.1 Análises granulométricas dos resíduos de gesso**

Este procedimento foi realizado segundo a norma NBR 12127, Gessos para construção: propriedades físicas do pó (ABNT, 1991). Foram analisadas amostras de gessos beta, e resíduos de gesso oriundos da construção civil.

Todas as amostras foram preparadas por quarteamento, de acordo com a NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004). Antes de se realizar a análise granulométrica, as amostras foram secas em estufa, a uma temperatura de  $(40 \pm 4) ^\circ\text{C}$  até peso constante e colocadas em dessecador, para resfriamento sem absorção de umidade.

Após este procedimento, realizou-se a análise granulométrica. Todo material gipsita e resíduos revestimento e placa, foi devidamente peneirado com abertura de 2mm

(Figura 3.20), antes da calcinação. Utilizando-se posteriormente as peneiras de 840  $\mu\text{m}$ , 420  $\mu\text{m}$ , 210  $\mu\text{m}$  e 105  $\mu\text{m}$  para distribuição granulométrica.



**Figura 3.20** – Separação de partícula acima de 2mm.



**Figura 3.21** – Jogo de Peneiras seriado (ou padrão).

A composição granulométrica foi realizada com um jogo de 04 peneiras (Figura 3.21) e o ensaio envolveu a utilização da seguinte aparelhagem:

- a) peneira 0,840mm, peneira de 0,420mm, peneira 0,210mm e peneira. 0,105mm, conforme a EB-22;
- b) fundo de peneira e tampa;
- c) balança com resolução de 0,1g;
- d) estufa de secagem com circulação natural que permita a elevação da temperatura até 200°C;
- e) dessecador.

### 3.7.2 Massa unitária

A aparelhagem necessária para determinação da massa unitária é a que segue:

- a) aparelho constituído de um funil de material não corrosivo sobre um tripé com peneira de 2,0mm ajustada na metade da altura do funil, (Figura 3.22);
- b) recipiente de medida confeccionado de material não oxidável, com capacidade de  $(1000 \pm 20) \text{ cm}^3$ ;
- c) balança. (Figura 3.23).



**Figura 3.22 - Funil de ensaio.**



**Figura 3.23 – Balança eletrônica.**

### 3.7.3 Ensaios Físicos e Mecânicos Normalizados

Os ensaios físicos do gesso foram realizados seguindo as prescrições e metodologia de análise contidas na normalização brasileira proposta pela ABNT.



### 3.7.3.1 Ensaios físicos

#### 3.7.3.1a) Consistência da pasta (na penetração do cone)

A consistência normal da pasta de gesso foi obtida a partir da metodologia de ensaio proposta pela norma NBR 12128 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991b). Esta norma propõe o uso do aparelho de Vicat modificado, acoplado com uma sonda de 10 mm de diâmetro que é adaptada em uma haste de fixação. Uma pasta preparada com a amostra de gesso e água é misturada de acordo com o método de ensaio e colocada no molde. A sonda é colocada em contato com a superfície superior da pasta e solta em seguida. Sob a ação de um peso, a sonda penetra na pasta a uma determinada profundidade. Quando for obtida uma penetração de  $30 \pm 2$  mm, a consistência da pasta é considerada normal. A proporção de água e gesso obtida, através do ensaio de consistência normal, é a ideal para a confecção de uma pasta consistente e trabalhabilidade para posterior confecção de corpos de prova.

#### 3.7.3 1b) Tempo de pega

O ensaio para determinação do tempo de pega foi realizado no ITEP/PE, utilizando o aparelho de Vicat. O início de pega foi determinado segundo a norma NBR 12128 – *Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta* (ABNT, 1991b), através do aparelho de Vicat. Os tempos de pega do gesso foram medidos usando uma agulha circular com diâmetro de  $(1,13 \pm 0,05)$  mm. Essa agulha, sob a ação de um peso específico, é usada para penetrar na pasta de consistência normal colocada num molde especial. O início de pega é caracterizado pelo tempo em

que a agulha estaciona a 1 mm da base, sendo expresso pelo tempo decorrido desde quando o material entra em contato com a água. Segundo a citada norma, o fim de pega é definido pelo momento em que a agulha, aplicada suavemente sobre a pasta, não penetrar mais na superfície do corpo de prova.

### **3.7.3.2 Ensaios Mecânicos**

Para o presente trabalho, as pastas gesso beta e resíduos revestimento e placa foram avaliadas através de ensaios destrutivos de resistência à compressão e de dureza das pastas.

#### **3.7.3.2 a) Resistência à Compressão**

Os ensaios de compressão foram realizados através da confecção de corpos de prova cúbicos 50 mm x 50 mm de acordo com a norma NBR 12129 – *Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas* (ABNT, 1991c). O ensaio deve ser realizado em ambiente com temperatura igual a  $(24 \pm 4^{\circ})\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $(65 \pm 5) \%$ . A água destilada foi utilizada nos ensaios, conforme critérios exigidos pelas prescrições normativas brasileiras. Os ensaios foram conduzidos considerando-se os corpos de prova moldados de acordo com as composições descritas no item 3.6. Para o ensaio foi utilizada a prensa marca SOLOTESTE referência 1509.230, capacidade máxima 20 tonelada e mínima 1 kg, do Departamento de Engenharia de Minas da UFPE, (Figura 3.24). Os resultados foram obtidos em  $\text{Kgf/cm}^2$  e posteriormente transformados em MPa.



**Figura 3.24** – Teste de compressão em corpos de prova.

Os resultados são expressos através da média da resistência à compressão de três corpos de prova, sendo que o resultado individual não deve diferir mais que 15% da média calculada. Com o propósito de se obter resultados de confiabilidade foram testados seis corpos de prova, para cada composição ensaiada, nas idades de sete dias.

### **3.7.3. 2 b) Resistência à Flexão**

Foi utilizado o ensaio destrutivo de flexão simples a três pontos como medida da resistência mecânica à tração segundo ABNT (1992) NBR 12775.

Nesse ensaio, corpos de prova prismáticos são submetidos à flexão simples a três pontos até a ruptura. A resistência mecânica à flexão é definida pela máxima tensão de flexão suportada pelo corpo durante o ensaio.

O ensaio foi realizado em máquina de ensaio universal Soloteste referência 1509.230 capacidade máxima 20 tonelada e mínima 1 kg. com velocidade de travessão constante de 2mm/min, com aquisição do carregamento máximo ( $P_{MAX}$ ), (Figura 3.25).

Os corpos possuem geometria de uma barra de seção transversal retangular como mostra a figura.



**Figura 3.25** – Teste de tração a flexão em corpos de prova.

Os resultados foram obtidos em  $\text{kgf/cm}^2$  que em questão de visualização gráfica se apresenta melhor e posteriormente transformados em Mpa.

### **3.7.3.2 c) Resistência à Aderência**

A resistência de aderência de revestimento da pasta de gesso reciclado foi determinada de acordo com a NBR 13528. (ABNT, 1995). A resistência de aderência é usada para se saber as tensões máximas suportadas pelo revestimento, aplicado em substrato quando submetido a um esforço normal de tração.

Utilizou-se componente de alvenaria de tijolos cerâmicos como substrato ou base e proporções de camadas superficiais. O corte do revestimento de seção quadrada foi feito após colagem das pastilhas, que consiste em uma placa metálica com 100 mm de aresta, não deformável sob carga de ensaio, com um dispositivo no centro para

acoplamento do equipamento de tração. A pastilha deve apresentar a mesma seção do corpo-de-prova de revestimento do resíduo de gesso a ser ensaiado por arrancamento.

Foram ensaiados seis corpos de prova para cada condição,

Espaçados entre si e das extremidades em no mínimo 50 mm. As Figuras 3.26 e 3.27 mostram o equipamento e fases finais do ensaio.

Especificação do Equipamento: Aderimetro Digital

Fabricante: CONTENCO

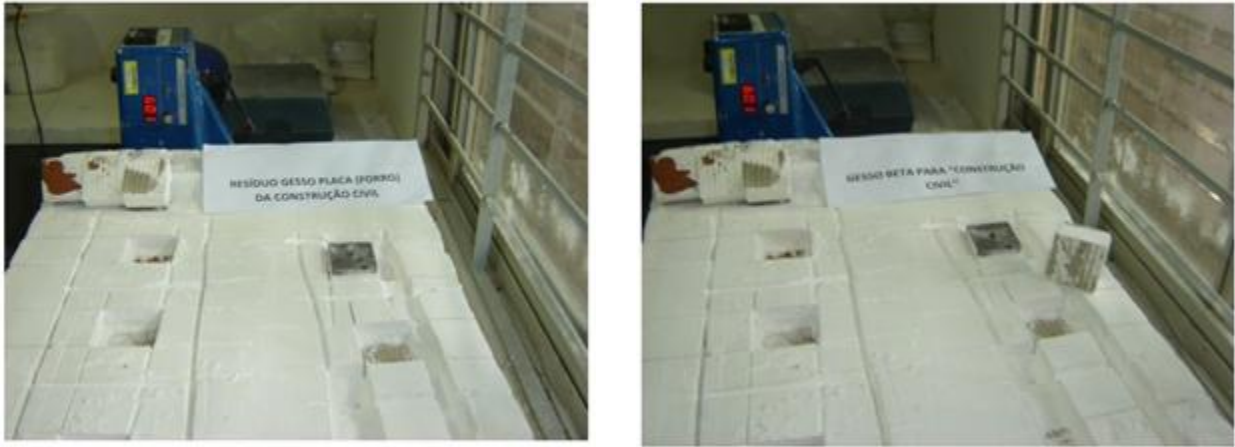
Marca: PAVITEST

Sensibilidade ou menor divisão da escala: 1 kgf

Carga Máxima: 1000 kgf.



**Figura 3.26** - Equipamento de medida de resistência de aderência do revestimento da pasta de gesso.



**Figura 3.27** – Arrancamento do resíduo de revestimento e placa e gesso oriundo da calcinação da gipsita.

A resistência de aderência é dada por:

$$Ra = \frac{P}{A}$$

Ra. = resistência de aderência à tração, em MPa.

P = carga de ruptura, em N.

A = área da pastilha, em mm<sup>2</sup>.

A carga (P) e a área (A) devem ser introduzidas na expressão de cálculo em número inteiro, enquanto que os valores de resistência de aderência à tração devem ser expressos com duas casas decimais. O cálculo da média e do coeficiente de variação da resistência de aderência à tração somente pode ser feito para pastilhas que apresentam a mesma forma de ruptura.

### 3.7.4 Dureza

A dureza de um material é geralmente definida pela resistência que ele oferece a penetração de uma ponta de material, com forma e dimensões padronizadas. Esta ponta padronizada, denominada penetrador, é comprimida sobre a superfície da peça sob a ação de uma determinada carga, que relacionada à impressão produzida indica a dureza superficial.

Para a caracterização da dureza dos sólidos é normalmente utilizado o teste de dureza Shore C, Marca WESTO- P. Resolução- 1,0 u.s.c do ITEP. (Figura 3.28). Os materiais que possuem alto teor de segmentos rígidos segregados são mais duros.

Neste teste, um durômetro mede a resistência, tomada como a medida da dureza, à penetração de um pino pressionado contra a superfície rígida pela ação de uma mola sob carga padronizada. Um ponteiro move-se através de uma escala para mostrar a resistência à penetração, e as escalas nos Durômetro Shore variam de 0 a 100.

A medida de resistência à Dureza Shore-C, para construção civil, devem ser em corpos-de-prova prismáticos de 50 mm x 50 mm, segundo Norma francesa (AFNOR-CENT/TC241, 1991). A serem ensaiadas em duas séries de três corpos-de-prova para cada condição estudada em relação água / gesso.



**Figura 3.28 - Durômetro Shore C.**

### **3.7.5 Análises Complementares**

As análises térmicas são representadas por duas técnicas: termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD).

A TG baseia-se no estudo da variação da massa da amostra em função do tempo ou da temperatura.

A perda de massa da amostra pode-se dar devido à remoção adsorvida, grupos hidroxilas ou substâncias voláteis. O ganho de massa é atribuído ao processo de oxidação (PADILHA E AMBROZIO, (1985)). Já na ATD, comumente são efetuadas medições das diferenças de temperatura entre a amostra e uma substância inerte, tomada como referência, quando ambas são submetidas a um mesmo aquecimento. As mudanças de temperatura da amostra são geradas pelas reações de entalpias, endotérmicas ou exotérmicas, em função da mudança da fase; de reações de desidratação; da decomposição da oxidação e de outras reações químicas (BRANDÃO, 2004).

Para este ensaio foram utilizadas amostras de gesso oriundo da gipsita calcinada e resíduos como recebido. Todas as medidas foram realizadas em um aparelho de



análise térmica diferencial em um Sistema de Análise Térmica Modelo RB-3000-20; Fabricante: BP Engenharia.

#### **3.7.5.1 Análise química**

A análise química do gesso e resíduos como recebido foram realizadas segundo NBR12130 e SMEWW 3500 (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW)) , realizados no laboratório do ITEP.

#### **3.7.5.2 Análise Térmica Diferencial – ATD**

A unidade para Análise Térmica Diferencial é constituída por um bloco de análises, confeccionado em níquel com três câmaras de ensaio, sendo duas preenchidas com material inerte de comparação e uma destina-se ao material a ser analisado. Os acidentes térmicos que diferenciam as duas amostras são apresentados em um gráfico. O fluxo de calor é detectado por sensores encapsulados em íntimo contato com a amostra, de cerca de 1,0 g.

#### **3.7.5.3 Análise Termogravimétrica – ATG**

A unidade para análise termogravimétrica é constituída essencialmente por uma balança eletrônica, funcionando pelo princípio de zero constante, possui tara automática e sensibilidade de 0,01gr. A amostra, cerca de 5,00 g, é condicionada em um cadinho de níquel colocado sobre uma haste de alumina.

A unidade de análise termo gravimétrica , bem como a de análise termo diferencial é composta de um forno tubular com núcleo de alumina, o sistema de aquecimento é feito por resistência metálica solidária a concreto refratário e isolamento em fibra cerâmica.

Para ambas as análises, ATD e ATG, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, e a temperatura máxima de ensaio 1000 °C.

Essas avaliações foram fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho, pois através delas foi possível propor uma temperatura ideal e mais adequada para a realização do beneficiamento gesso oriundo da calcinação da gipsita e resíduos, na etapa de aquecimento.

#### **3.7.5.4 Adsorção e Dessorção de Nitrogênio (Método BET)**

A técnica de adsorção e dessorção de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) é utilizada para a determinação da área superficial específica, volume de poros, tamanho médio de poros e inclusive forma das partículas.

Avaliação da área superficial específica pelo Método de BET.

Esta análise, também conhecida como ASA – (análise de área superficial, mede a área superficial específica por unidade de massa. A análise de BET é um dos modos mais antigos de caracterização e consiste na medida da fisissorção adsorção física de um gás inerte, como N<sub>2</sub> e pode ser feita por um único ponto ou por vários pontos da amostra. Existem varias teorias para a medida da área superficial e porosidade utilizando a sorção de gás.

Os espectros foram obtidos em Analisador de Área Superficial e Tamanho de Poros da Micromeritics, modelo: ASAP 2420, do CETENE (Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste), mostrado na (Figura 3.29).



**Figura 3.29** - Analisador de Área Superficial e Tamanho de Poros da Micromeritics, modelo: ASAP 2420, do CETENE.

A medida de área superficial específica e a isoterma de adsorção foram obtidas por adsorção física de nitrogênio sobre o material, pelo método Brunauer-Emmett-Teller BET. Este método baseia-se na determinação do volume de  $N_2$  adsorvido a diversas pressões relativas, na temperatura do nitrogênio líquido (77K), a pressões relativas ( $P/P_0$ ). Para a realização deste ensaio, foi utilizado um Analisador de Área Superficial e Tamanho de Poros, munido de software para determinar a área superficial ( $S_{BET}$ ), porosidade (tipo de poro e distribuição do tamanho de poro) e volume total de poros (método Barret-Joyner-Halenda, BJH). As amostras foram degaseificadas por 72h a 120°C para remover qualquer material adsorvido no interior dos poros e na superfície do material.

Com as amostras de gesso beta e resíduos calcinados, procedem-se às análises considerando as seguintes condições:

### Preparação:

Pesar aproximadamente 200 mg das amostras em uma balança de precisão;

- 1.1. Transferir esta massa ao *Sample Tube* (Tubo de amostra);
- 1.2. Colocar o tubo em uma das estações de tratamento;
- 1.3. Logo após o tratamento, pesar novamente o conjunto Tubo de ensaio + Amostra, podemos então saber a quantidade de amostra real inserida no tubo (na ausência de qualquer umidade);
- 1.4. Colocar o tubo na estação de análise, e executar o procedimento de medida.

### Análise

Inicia-se a evacuação da amostra (vácuo restrito) a uma taxa de 5 mmHg s<sup>-1</sup> até 5 mmHg; muda-se para vácuo não restrito na mesma taxa até 10 µm Hg, ficando nestas condições por 6 min. Aplica-se então uma programação para 37 pontos de P/P<sub>0</sub> - razão entre pressão aplicada (P) e pressão de vapor de saturação do gás adsorvido (P<sub>0</sub>), neste caso o N<sub>2</sub> - sendo 24 pontos na adsorção e 13 pontos na dessorção.

Em todos os ensaios são obtidos dados de área superficial específica calculada pela equação de BET (Brunauer, Emmett e Teller), diâmetro médio de poros na etapa de adsorção e dessorção e volume médio de poros na etapa de adsorção e dessorção. O volume total de poros e o diâmetro médio de poros fornecidos pelo software do equipamento são calculados utilizando-se o algoritmo do método BJH (Barrett, Joyner e Halenda).

Ressalta-se que a análise de porosimetria por adsorção de N<sub>2</sub> é executada em condições em que o tubo contendo a amostra permanece dentro de um recipiente isolado termicamente (*dewar*) contendo N<sub>2</sub> líquido. Porém, por convenção, a quantidade de gás adsorvido é expressa pelo seu volume em condições normais de temperatura e

pressão (0°C e 760 torr–CNTP), enquanto a pressão é representada pela pressão relativa .

### 3.7.5.5 Espectroscopia de Infravermelho

A espectroscopia de absorção IV tem como objetivo a determinação dos grupos funcionais existentes nas amostras a serem analisadas (COATES, 2000). Cada grupo absorve uma energia em frequência característica de radiação.

Mesmo moléculas simples podem produzir espectros extremamente complexos. Desta forma, geralmente se compara o espectro de um composto desconhecido com o de um conhecido.

Embora o espectro no infravermelho seja característico da molécula como um todo; certos grupos de átomos dão origem a bandas que ocorrem mais ou menos na mesma frequência. É justamente a presença destas bandas características de grupos funcionais que permite a obtenção, através de simples exame do espectro e consulta a tabelas, de informações estruturais úteis para a identificação de substâncias.

Esta técnica trabalha quase que exclusivamente em ligações covalentes, e é de largo uso na química. Espectros bem resolvidos podem ser produzidos com amostras de uma única substância com elevada pureza. Contudo, a técnica costuma ser usada para auxiliar a identificação de misturas bem complexas.

Os espectros na região do infravermelho médio foram registrados utilizando o espectrofotômetro NIR/MID spectrum400 da marca Perkin Elmer (mostrado na Figura 3.30) e o acessório de reflectância total atenuada UATR Figura 3.31. Para o registro dos espectros utilizou-se resolução 8 cm<sup>-1</sup> e foram utilizadas 16 varreduras (SCANS).



**Figura 3.30** - Espectrofotômetro NIR/MID spectrum 400 da marca Perkin Elmer.

A temperatura e umidade relativa da sala são controladas e mantidas em 25°C e 50%, respectivamente.



**Figura 3.31** - Espectrofotômetro NIR/MID spectrum 400 da marca Perkin Elmer.

A quantidade utilizada das amostras do gesso oriundo da calcinação da gipsita (A) e resíduo revestimento (B) e placa ( C ) (forro) foram 0,5 gramas cada amostra. Inicialmente registrou-se o background para em seguida a utilização no espectro da amostra Figura 3.31a depois a mesma foi colocada diretamente sob o acessório Figura 3.31b foi misturada com o suporte o sal KBr que não é absorvido e prensado, formando pastilhas de 1cm de diâmetro com a alavanca (Figura 3.31c).

#### **3.7.5.6 Difractometria de raios X**

Nesta análise, utilizaram-se amostras de resíduos tratados a 140 °C e do gesso oriundo da calcinação da gipsita 140°C. As amostras foram passadas por uma peneira de 45 µm, a fim de se obter um material mais fino e mais adequado para a realização da difratometria.

O equipamento utilizado foi um difratômetro marca SEIFERT, modelo ISODEBYEFLEX 1001, com radiação CuK $\alpha$ .

Para identificar as fases formadas nos resíduos (B e C) e gesso beta (A) foi utilizada a técnica de difratometria de raios X. As amostras, extraídas dos corpos-de-prova, foram moídas manualmente com auxílio de pistilo e almofariz, e na sequência o pó obtido foi disposto no porta-amostra para a execução do ensaio. Assim, para cada um dos corpos de prova com e sem adição de resíduos, realizou-se o ensaio para os mesmos tempos de hidratação, ou seja, 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Com isso, através dos espectros foi possível analisar se o resíduo está interferindo na hidratação do gesso.

De acordo com SOUSA SANTOS (1975), o método da difração de raios-X em relação a outros métodos físicos, como a análise térmica diferencial, ou química, como

a análise química, oferece a vantagem de o difratograma apresentar um número grande de picos, o que facilita a identificação. Isso é ainda mais vantajoso no caso de misturas onde pode haver superposição de picos, mas nunca de todos.

#### **3.7.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Para a análise macroestrutural do material foram utilizados como amostras pequenos fragmentos representativos dos corpos-de-prova de 50 mm x 50 mm, sendo as análises feitas com os mesmos períodos de hidratação para todas as amostras de gesso e resíduo, sendo essas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias.

Para a execução da análise, as amostras foram inicialmente secas por aproximadamente 15 minutos em estufa a temperaturas de aproximadamente 70 °C. Com intuito de avaliar o tamanho e morfologia dos cristais de gesso e resíduos formulados, amostras desses foram depositadas sobre uma fita adesiva de carbono fixada em uma porta amostra. Após sofrer deposição de uma fina camada de ouro, os materiais foram analisados por microscopia eletrônica de varredura empregando-se um aparelho da Jeol modelo *JSM 5600 LV*. As micrografias foram obtidas com ampliações variando com fator de ampliação de 3700 vezes. Esta análise foi realizada no Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais (NPCIAMB) da Universidade Católica de Pernambuco.



## CAPÍTULO 4

---

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos da simulação numérica da combustão do gás natural no forno rotativo contínuo em escala piloto utilizado na produção de gesso beta. As simulações foram realizadas adotando a Fluidodinâmica Computacional – CFD com uso do software FLUENT 12.0.

Serão também apresentados os resultados dos estudos experimentais da calcinação da gipsita pura (A) e dos resíduos de gesso de revestimento (B) e placa (C), com quantificação através de um planejamento fatorial completo do efeito da temperatura de controle da combustão, velocidade de rotação do forno e vazão de alimentação de sólidos. A análise dos resultados foi efetuada por meio de superfície de resposta (MSR), diagrama de Pareto e análise de variância (ANOVA), utilizando o programa computacional Statistica 7.0, adotando como variável de resposta o grau de hidratação.

Foram utilizadas diversas técnicas para caracterização do pó e pastas do gesso oriundo da calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e de placa, tais como: determinação das propriedades físicas do pó e da pasta bem como das determinações da água livre e de cristalização, técnica de distribuição dos tempos de residência, indicando que esta granulometria é adequada para realização de medições DTR, e propriedades mecânicas, análise química, análise térmica, análise mineralógica através de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, além de outras propriedades tais como: área superficial e porosidade, densidade aparente e espectroscopia de infravermelho.

## 4.1 – Simulação Numérica da combustão do Gás no Forno Rotativo Contínuo em Escala Piloto

### 4.1.1 – Modelos utilizados na simulação de combustão usando o FLUENT

Os principais modelos utilizados foram:

- Modelos “k- $\epsilon$ ” de turbulência em duas equações;
- Modelo *DO* de radiação que produz uma solução mais precisa necessitando de uma resposta mais intensiva na capacidade da *CPU*. Dentro os modelos *DO*, usou-se o modelo de radiação *P1* que produz também uma rápida e aceitável solução para este problema;
- Modelo interação química de turbulência “*Eddy –dissipation*”
- Modelos de reação química para quantificação dos teores das espécies químicas envolvidas.

A aplicação desses modelos envolveu também as condições seguintes:

- Manter a seleção padrão de equilíbrio das reações envolvidas e considerando o sistema não adiabático,
- Definir o valor padrão para a pressão de operação,
- Digitar o valor de 0.064 para o fluxo de combustível “*Rich*” limite de Inflamabilidade,
- Definir modelos compactáveis de gás ideal.

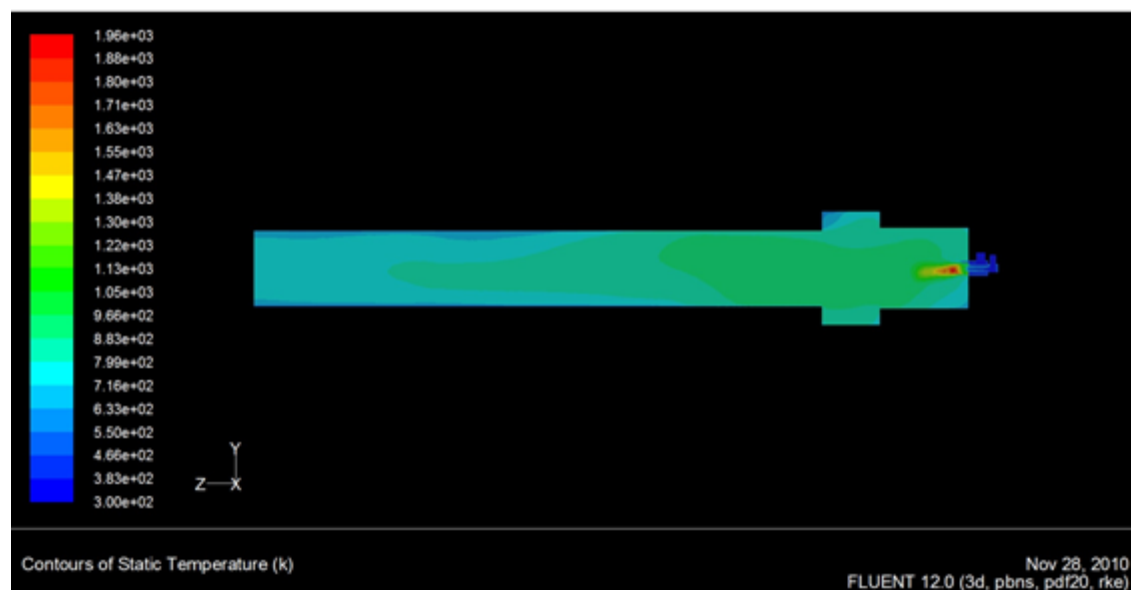
Nesta simulação tridimensional, *Segregated implicit* é usado para definir solução, nos resultados computacionais para a temperatura dos gases, velocidade da corrente fluida, a turbulência e a distribuição das espécies químicas envolvidas durante o processo de combustão do gás natural.

## 4.2 - Distribuição das Temperaturas

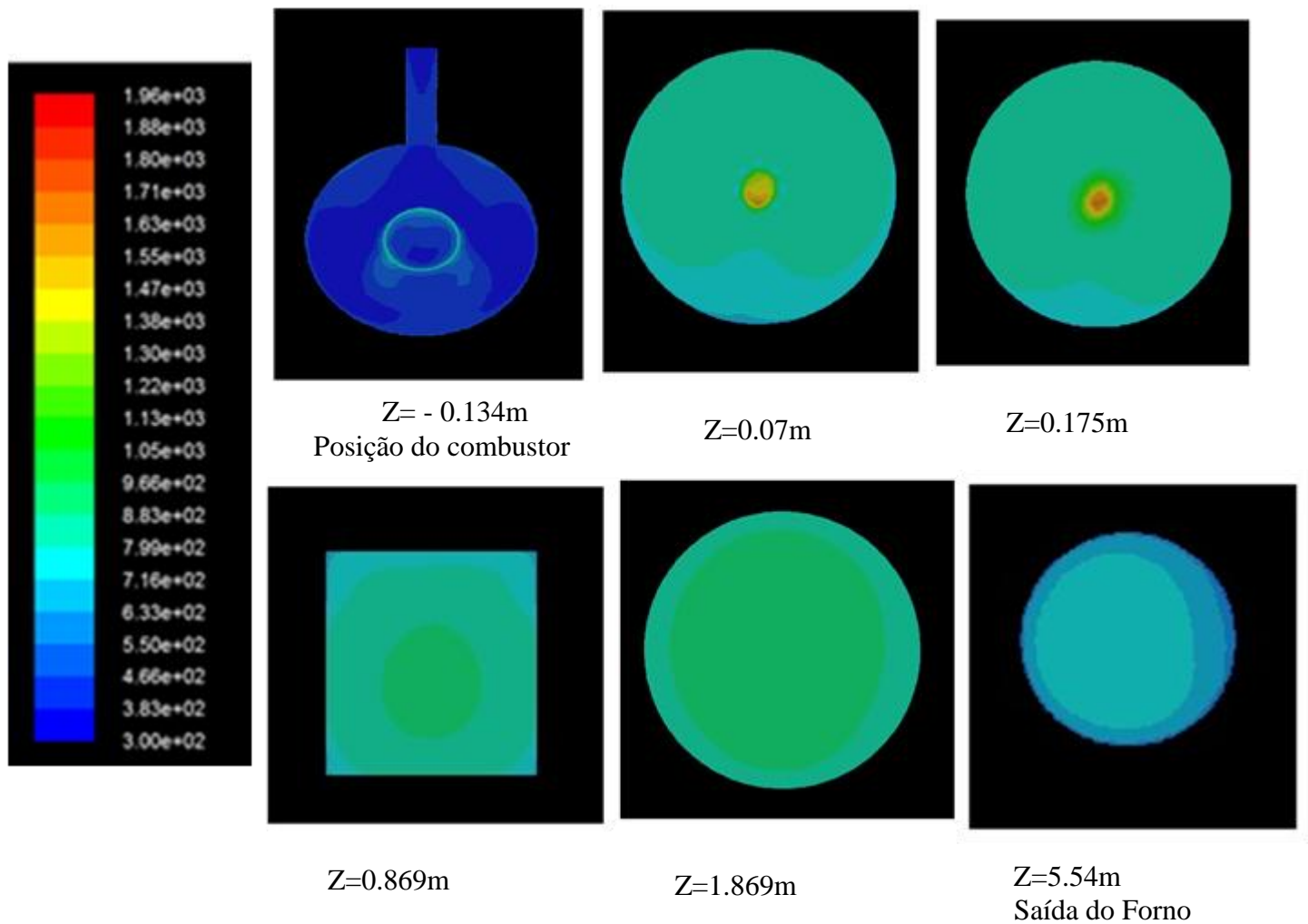
Neste parágrafo, serão apresentados os resultados numéricos provenientes das simulações efetuadas com o auxílio do código computacional FLUENT 12.0. Os estudos foram realizados com transferência de calor sob-regime transientes no forno rotativo contínuo para calcinação de gesso descrito no item 3.1.1.

As distribuições de temperatura num plano horizontal, que cortam o eixo no forno rotativo, são mostradas na Figura 4.1, evidenciando que o comprimento da zona de combustão, com comprimento da chama, é cerca de um terço do comprimento total do forno rotativo de 5,46 m.

As distribuições de temperatura dos gases de combustão no plano perpendicular e ao eixo de forno rotativo são mostradas na Figura 4.2, nas diferentes coordenadas z, que compartilha o mesmo índice de cor quando registrado o desenvolvimento da chama na direção da coordenada- z.



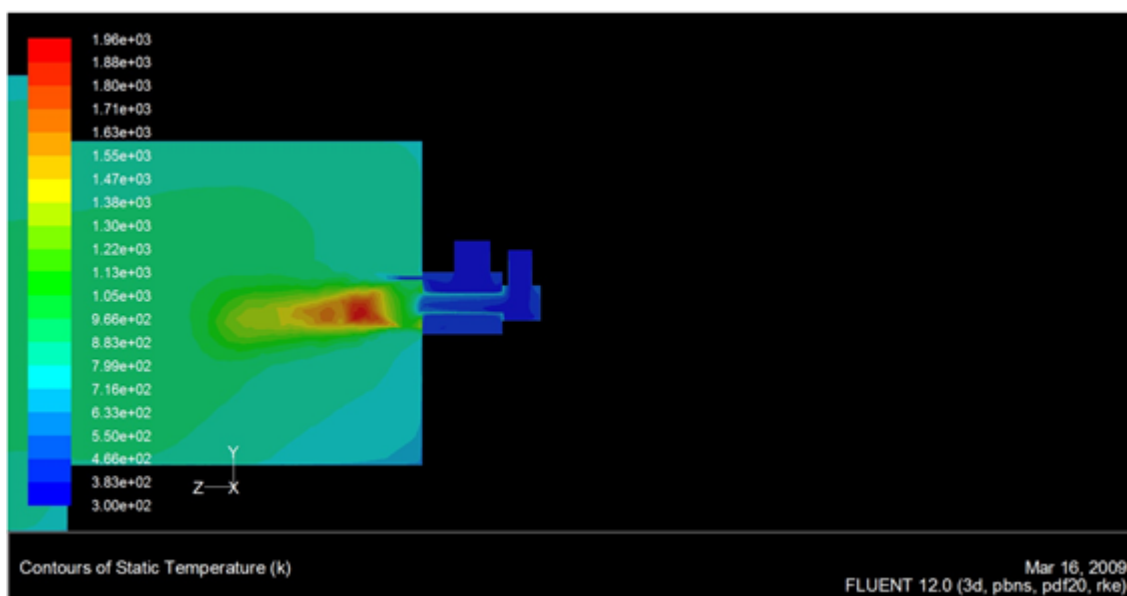
**Figura 4.1** – Distribuição da temperatura no plano horizontal eixo-z, de giro do forno rotativo. Condições do gás natural: 0,000981kg/s.



**Figura 4.2** – Distribuição da temperatura em diferentes coordenadas do eixo-z.  
Condições do gás natural: 0,000981kg/s.

Algumas informações importantes de temperatura são listadas como segue:

- a temperatura máxima da chama é cerca de 1960 K,
- a temperatura média de volume de gás no forno rotativo é cercade 1670 K,
- a temperatura média de gás na saída do forno rotativo é cerca de 420K.

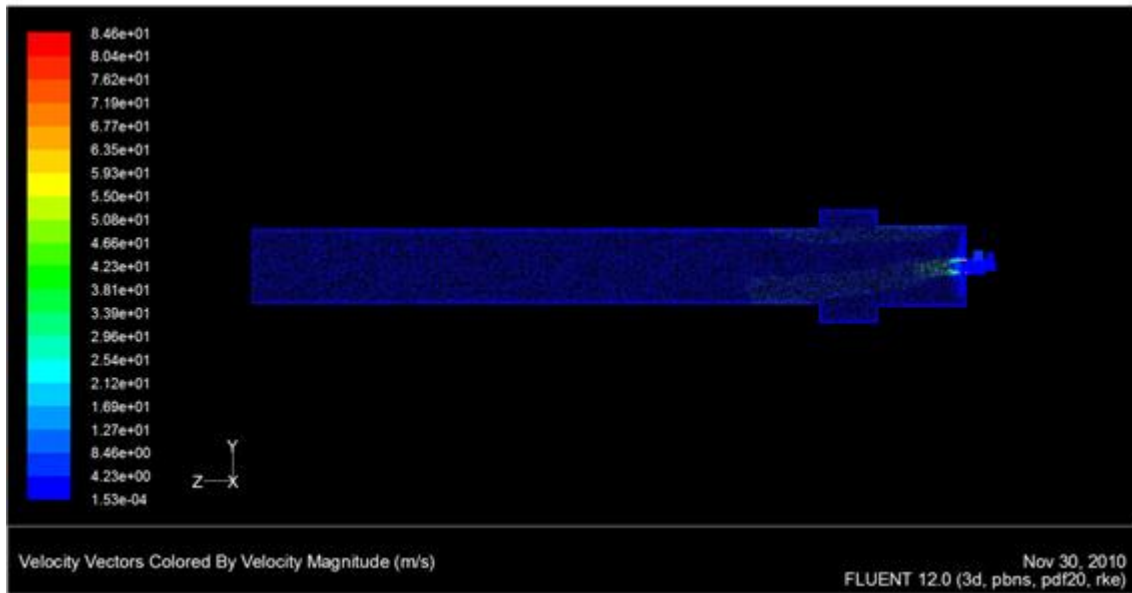


**Figura 4.3** – Distribuição da temperatura no plano horizontal eixo-z, na câmara de combustão.

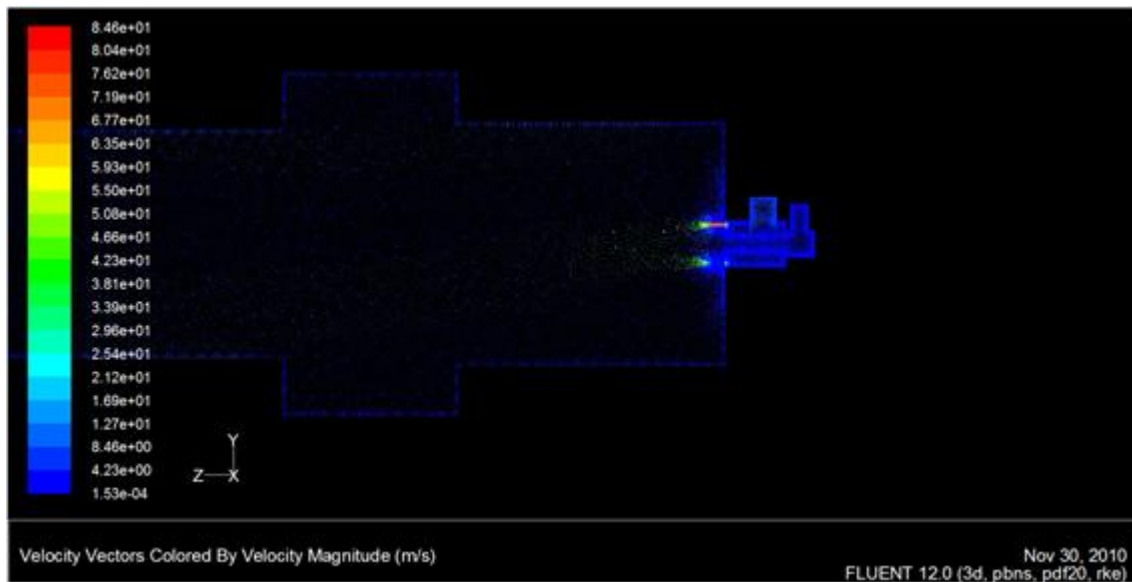
Uma distribuição de temperatura mais detalhada da região de início da combustão é apresentada na (Figura 4.3)

#### 4.2.1 - Distribuições de fluxo do contorno de velocidade no campo do reator.

O campo das velocidades na zona de injeção do combustível é mostrado nas Figuras 4.4 e 4.5. Observa-se que a maior velocidade do jato gasoso registrada é cerca de 85 m/s e o comprimento deste jato aumenta com aumento da vazão do combustível, conforme esperado (Figura 4.5). Uma rápida elevação da vazão do combustível provoca uma assimetria do jato gasoso, o que torna o fluxo na zona do jato bastante complexo. Como mostrado na Figura 4.6, existem grandes vórtices formados por retorno do fluxo ao redor do jato no centro, atribuindo isto a alteração do fluxo gasoso que resulta em vórtices tanto na parte superior e inferior do fluxo principal. A velocidade média na saída do forno ficou em torno de 9 m / s.



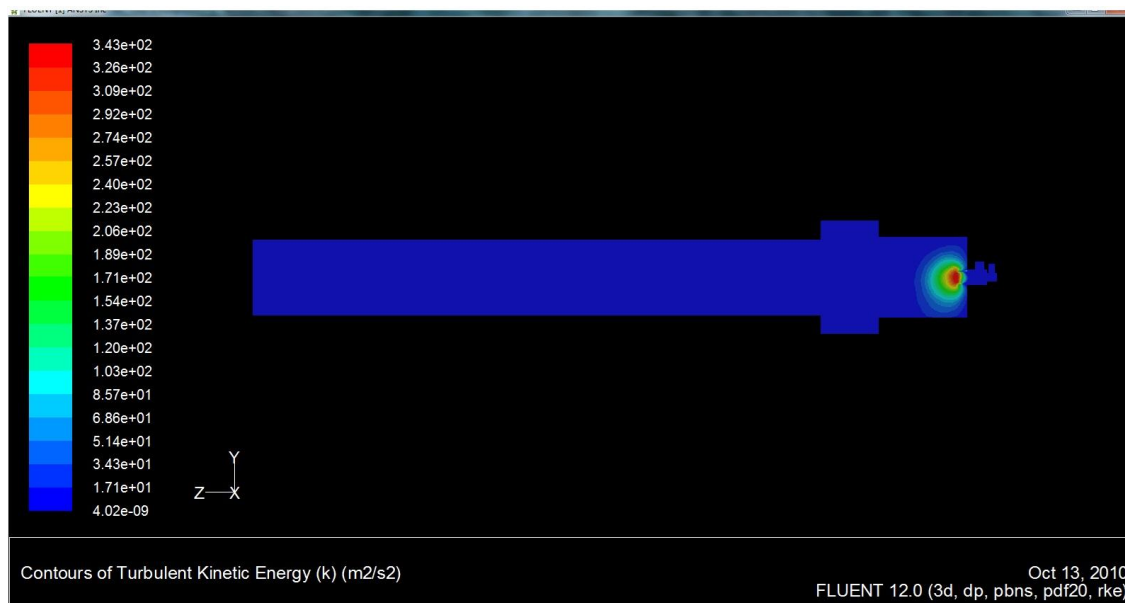
**Figura 4.4** – Distribuição do fluxo de velocidade do forno. Condições do gás natural:  $0,000981 \text{ kg/s}$ .



**Figura 4.5** – Distribuição do fluxo de velocidade na zona de ejeção. Condições do gás natural:  $0,000981 \text{ kg/s}$ .

### 4.2.2 – Turbulência

O padrão de turbulência k- $\epsilon$  de duas equações é adotado na simulação. A distribuição da energia cinética da turbulência é mostrada na Figura 4.6, evidenciando que a turbulência ocorre principalmente na zona de combustão.



**Figura 4.6** – Distribuição da energia cinética. Condições do gás natural: 0,000981kg/s.

O soft permite ter imagens de planos de perfis de radiação, temperatura, o que pode orientar as modificações das condições de combustão para que fique mais homogênea, os quais podem ser confrontados com a qualidade do produto obtido. Quanto mais o perfil de radiação for homogêneo, acarreta uma melhor conversão. O fluxo homogêneo de velocidade e, distribuição da energia cinética, apresenta um melhor destaque no ponto de combustão.

### 4.3 Estudo paramétrico do processo da calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e placa

Para identificar os fatores e suas interações significativas para o processo de calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e placas, e definir as condições otimizadas de calcinação dos mesmos, utilizou-se planejamento experimental fatorial completo do tipo  $3^3$ , com adição de um ponto central (1 pc) e duas réplicas, totalizando 30 ensaios.

Os níveis e quantidade de fatores estabelecidos no Planejamento Fatorial estão apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Fatores e níveis utilizados nos experimentos.

Fatores	Níveis		
	-1	0	1
Temperatura de controle da combustão (Tc), °C	400	450	500
Velocidade de rotação do cilindro (N), rpm	2,0	2,5	3,0
Vazão de alimentação de sólidos (Qs), kg/h	100	110	120

Os resultados foram avaliados por meio de análise de variância (ANOVA), resultando em superfícies de resposta e diagrama de Pareto, compreendendo a MSR, utilizando-se o programa computacional Statistica Versão 7.0. As variáveis independentes selecionadas foram: temperatura de controle da combustão (Tc), velocidade de rotação do cilindro do forno (N) e vazão de alimentação de sólidos (Qs). Foram estudadas três variáveis respostas, a partir do grau de hidratação do semi-hidrato produzido: gesso gerado a partir da gipsita, gesso gerado a partir de resíduos placas e gesso gerado a partir de resíduo revestimento de gesso.

A Tabela 4.2 apresenta a matriz do planejamento com os 30 ensaios realizados (incluindo 01 ponto central + 02 réplicas), e os respectivos resultados obtidos para três variáveis respostas (graus de hidratação).



**Tabela 4.2** – Matriz do Planejamento Experimental Fatorial Completo.

Réplicas	Tc (°C)	N (RPM)	Qs (kg/h)	G.H <sub>hemidrato-gipsita</sub>	G.H <sub>hemidrato-placa</sub>	G.H <sub>hemidrato-revest.</sub>
1	400	2	100	7,25	6,98	7,25
1	400	3	120	4,20	4,30	4,20
1	400	3	110	5,88	5,70	5,88
1	450	2	120	4,90	4,90	4,70
1	450	3	110	6,10	6,10	5,98
1	450	3	100	6,89	6,80	6,58
1	500	2	110	4,22	4,10	4,22
1	500	3	100	4,63	4,73	4,63
1	500	3	120	6,57	6,77	6,57
1	450	3	110	6,18	6,18	6,10
2	400	2	100	7,28	7,28	6,98
2	400	3	120	4,23	4,23	4,25
2	400	3	110	5,81	5,79	5,81
2	450	2	120	4,90	4,89	4,90
2	450	3	110	6,20	6,01	6,20
2	450	3	100	6,91	6,78	6,91
2	500	2	110	4,24	4,12	4,24
2	500	3	100	4,65	4,55	4,65
2	500	3	120	6,59	6,59	5,97
2	450	3	110	6,21	6,21	6,12
3	400	2	100	7,19	7,19	7,05
3	400	3	120	4,25	4,35	4,25
3	400	3	110	5,52	5,62	5,52
3	450	2	120	4,95	4,85	4,95
3	450	3	110	6,23	6,23	5,99
3	450	3	100	6,93	6,92	6,92
3	500	2	110	4,27	4,37	4,37
3	500	3	100	4,67	4,77	4,87
3	500	3	120	6,60	6,55	6,60
3	450	3	110	6,24	5,97	6,05

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 estão indicados os efeitos de cada variável e suas interações (lineares e quadráticas). Observa-se que todos os termos foram estatisticamente significativos ao nível de 5% ( $p\text{-valor} < 0,05$ ), com exceção da interação linear x quadrática entre a temperatura de controle da combustão ( $T_c$ ) e a velocidade de rotação ( $N$ ).

**Tabela 4.3** - Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação - gesso oriundo de gipsita.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	$t_{\text{calc.}(21)}$	p-valor
Média	5,634	0,013	445,360	0,000
$T_c$ (L)	-0,574	0,032	-18,017	0,000
$T_c$ (Q)	0,559	0,026	21,490	0,000
$N$ (L)	0,944	0,032	29,621	0,000
$N$ (Q)	-0,916	0,026	-35,169	0,000
$Q_s$ (L)	-1,049	0,045	-23,262	0,000
$Q_s$ (Q)	1,196	0,034	34,716	0,000
$T_c$ (L) x $N$ (L)	3,119	0,052	59,903	0,000
<b><math>T_c</math> (L) x <math>N</math> (Q)</b>	<b>-0,038</b>	<b>0,048</b>	<b>-0,802</b>	<b>0,432</b>

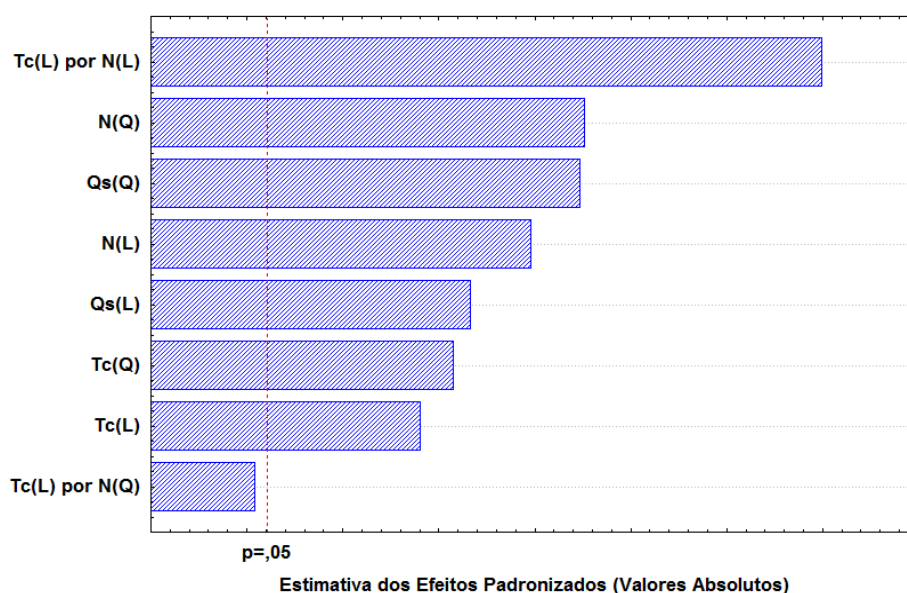
**Tabela 4.4** - Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação - gesso oriundo de placa de gesso.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	$t_{\text{calc.}(21)}$	p-valor
Média	5,610	0,020	280,057	0,000
$T_c$ (L)	-0,543	0,050	-10,761	0,000
$T_c$ (Q)	0,499	0,041	12,114	0,000
$N$ (L)	0,982	0,050	19,453	0,000
$N$ (Q)	-0,869	0,041	-21,075	0,000
$Q_s$ (L)	-0,971	0,071	-13,599	0,000
$Q_s$ (Q)	1,129	0,055	20,699	0,000
$T_c$ (L) x $N$ (L)	3,072	0,082	37,259	0,000
<b><math>T_c</math> (L) x <math>N</math> (Q)</b>	<b>-0,028</b>	<b>0,076</b>	<b>-0,374</b>	<b>0,712</b>

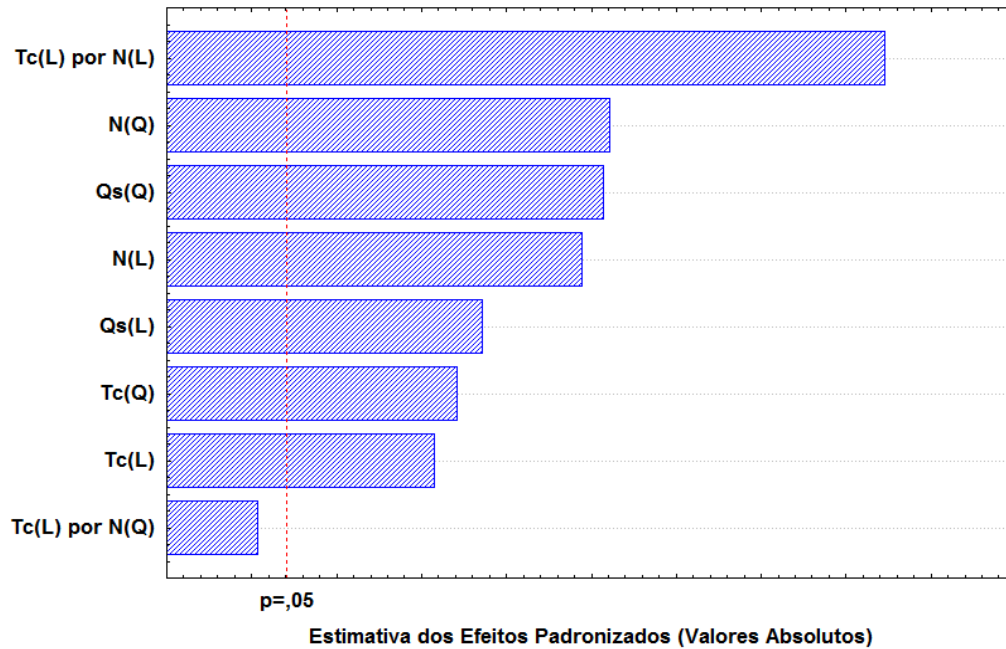
**Tabela 4.5** - Estimativa dos efeitos e teste de hipóteses para a variável resposta grau de hidratação - gesso oriundo de revestimento.

Fatores	Efeitos	Erro Padrão	$t_{\text{calc.}(21)}$	p-valor
Média	5,574	0,031	182,474	0,000
Tc (L)	-0,563	0,077	-7,317	0,000
Tc (Q)	0,503	0,063	7,998	0,000
N (L)	0,900	0,077	11,690	0,000
N (Q)	-0,849	0,063	-13,504	0,000
Qs (L)	-1,053	0,109	-9,674	0,000
Qs (Q)	1,096	0,083	13,174	0,000
Tc (L) x N (L)	2,826	0,126	22,474	0,000
<b>Tc (L) x N (Q)</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,115</b>	<b>-0,043</b>	<b>0,966</b>

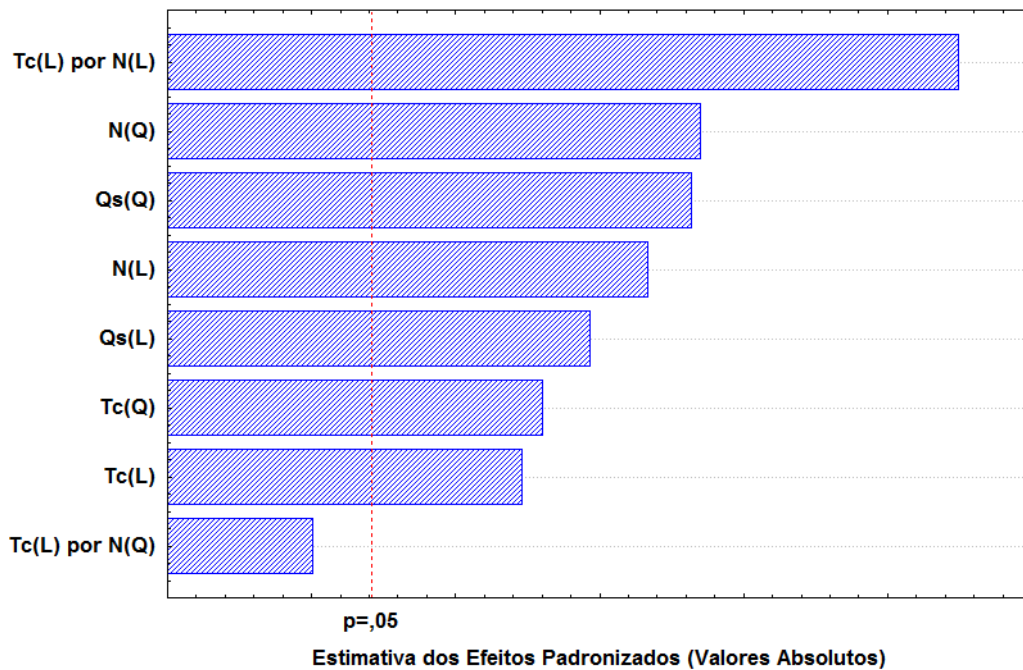
As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam o Diagrama de Pareto dos efeitos e interações padronizados (p-valor igual a 0,05), onde os efeitos que se localizam a direita da linha tracejada são significativos. Desta forma, pode-se visualizar facilmente que a interação linear entre a temperatura (Tc) e a velocidade de rotação (N) é o efeito mais significativo. Em concordância com as Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, observam-se que apenas a interação entre os efeitos Tc (L) x N (Q) mostrou-se não ser significativo.



**Figura 4.7** - Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemidrato oriundo de gipsita (G.H hemihidrato-gipsita).



**Figura 4.8** - Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemidrado oriundo de placa de gesso (G.H<sub>hemihidrato-placa</sub>).



**Figura 4.9** - Diagrama de Pareto para a variável resposta: grau de hidratação para o hemidrado oriundo de revestimento de gesso (G.H<sub>hemihidrato-rev.</sub>).

**Tabela 4.6** - Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do hemidrato oriundo de gipsita  
(**G.H** hemidrato-gipsita).

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t <sub>calc.</sub> (21)	p-valor
Média	-93,122		-8,528	0,000
Tc (L)	0,058	10,919	2,303	0,032
Tc (Q)	-0,0002	0,025	-21,490	0,000
N (L)	-38,537	0,000	-4,460	0,000
<b>N (Q)</b>	<b>2,282</b>	8,641	<b>1,323</b>	<b>0,200</b>
Qs (L)	2,578	<b>1,725</b>	34,008	0,000
Qs (Q)	-0,012	0,076	-34,716	0,000
Tc (L) x N (L)	0,047	<b>0,004</b>	2,456	0,023
<b>Tc (L) x N (Q)</b>	<b>0,003</b>		<b>0,802</b>	<b>0,432</b>

**Tabela 4.7** - Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do hemidrato oriundo de placa de gesso  
(**G.H** hemidrato-placa).

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t <sub>calc.</sub> (21)	p-valor
Média	-80,961	17,292	-4,682	0,000
<b>Tc (L)</b>	<b>0,035</b>	<b>0,040</b>	<b>0,861</b>	<b>0,399</b>
Tc (Q)	0,000	0,000	-12,114	0,000
N (L)	-38,946	13,684	-2,846	0,010
<b>N (Q)</b>	<b>2,456</b>	<b>2,732</b>	<b>0,899</b>	<b>0,379</b>
Qs (L)	2,435	0,120	20,285	0,000
Qs (Q)	-0,011	0,001	-20,699	0,000
<b>Tc (L) x N (L)</b>	<b>0,050</b>	<b>0,030</b>	<b>1,652</b>	<b>0,113</b>
<b>Tc (L) x N (Q)</b>	<b>0,002</b>	<b>0,006</b>	<b>0,374</b>	<b>0,712</b>

**Tabela 4.8** - Coeficientes de regressão para a resposta: grau de hidratação do hemidrato oriundo de gesso revestimento ( $G.H_{\text{hemidrato-rev.}}$ ).

Fatores	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	$t_{\text{calc.}}(21)$	p-valor
Média	-77,433	26,367	-2,937	0,008
Tc (L)	0,037	0,061	0,597	0,557
Tc (Q)	0,000	0,000	-7,998	0,000
N (L)	-40,608	20,864	-1,946	0,065
N (Q)	3,216	4,165	0,772	0,449
Qs (L)	2,358	0,183	12,881	0,000
Qs (Q)	-0,011	0,001	-13,174	0,000
Tc (L) x N (L)	0,055	0,046	1,178	0,252
Tc (L) x N (Q)	0,000	0,009	0,043	0,966

Através das superfícies de resposta e curvas de contorno geradas pelos modelos (Equação 4.1, 4.2 e 4.3) pode-se obter as condições otimizadas de calcinação de dihidrato (gipsita, placa e revestimento) para produzir hemidrato beta, variando os parâmetros Tc e N, com vazão de alimentação de sólidos constante ( $Q_s = 110 \text{ kg/h}$ ).

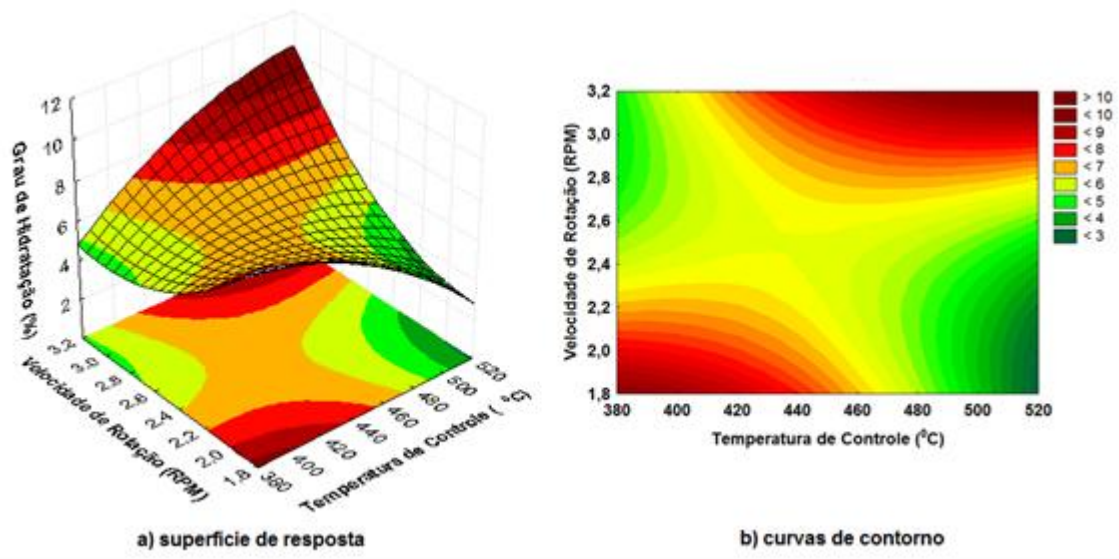
$$GH_{\text{hemidrato-gipsita}} = 45,78 + 58,36 \cdot 10^{-3} T_c - 22,38 \cdot 10^{-5} T_c^2 - 38,54 \cdot N + 2,282 \cdot N^2 + 47,04 \cdot 10^{-3} T_c \cdot N + 30,67 \cdot 10^{-4} T_c \cdot N^2 \quad (4.1)$$

$$GH_{\text{hemidrato-placa}} = 50,24 + 34,54 \cdot 10^{-3} T_c - 19,98 \cdot 10^{-5} T_c^2 - 38,94 \cdot N + 2,456 \cdot N^2 + 50,11 \cdot 10^{-3} T_c \cdot N + 22,67 \cdot 10^{-4} T_c \cdot N^2 \quad (4.2)$$

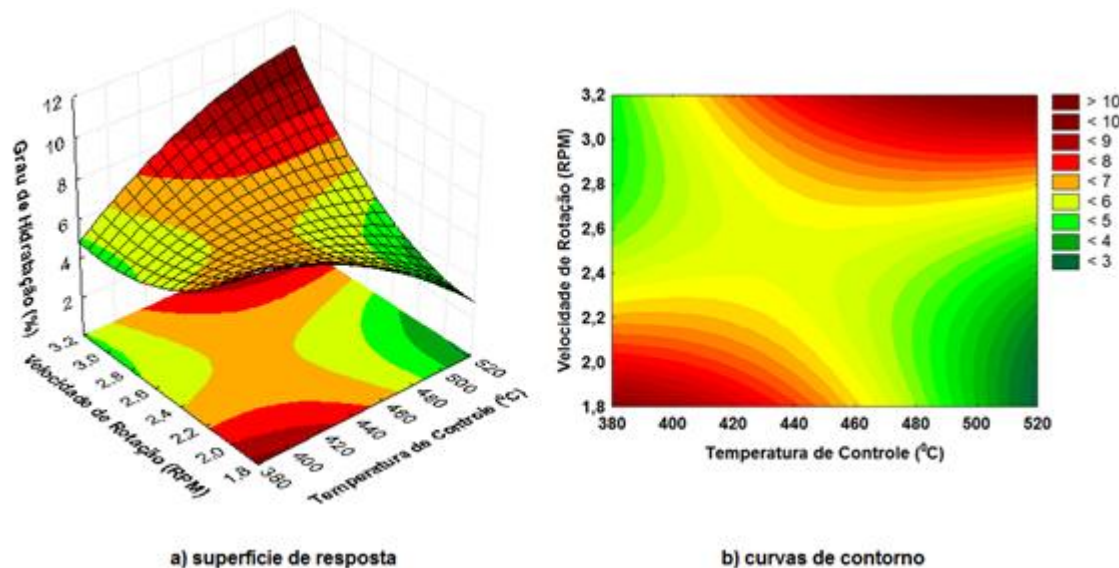
$$GH_{\text{hemidrato-revest.}} = 49,37 + 36,52 \cdot 10^{-3} T_c - 20,11 \cdot 10^{-5} T_c^2 - 40,61 \cdot N + 3,216 \cdot N^2 + 54,51 \cdot 10^{-3} T_c \cdot N + 4 \cdot 10^{-4} T_c \cdot N^2 \quad (4.3)$$

As superfícies de respostas e curvas de contorno apresentadas nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 foram obtidas com vazão de alimentação de sólidos constante ( $Q_s = 110 \text{ kg/h}$ ). Observou-se que os maiores valores obtidos para a variável resposta foram encontrados em duas regiões: primeiramente, operando com baixas temperaturas de

controle (iguais ou menores do que 450 °C) e baixa velocidade de rotação (iguais ou menores do que 2,2 rpm); e posteriormente, funcionando com maiores temperaturas (acima de 450 °C) e velocidades de rotação maiores (acima de 2,2 rpm).

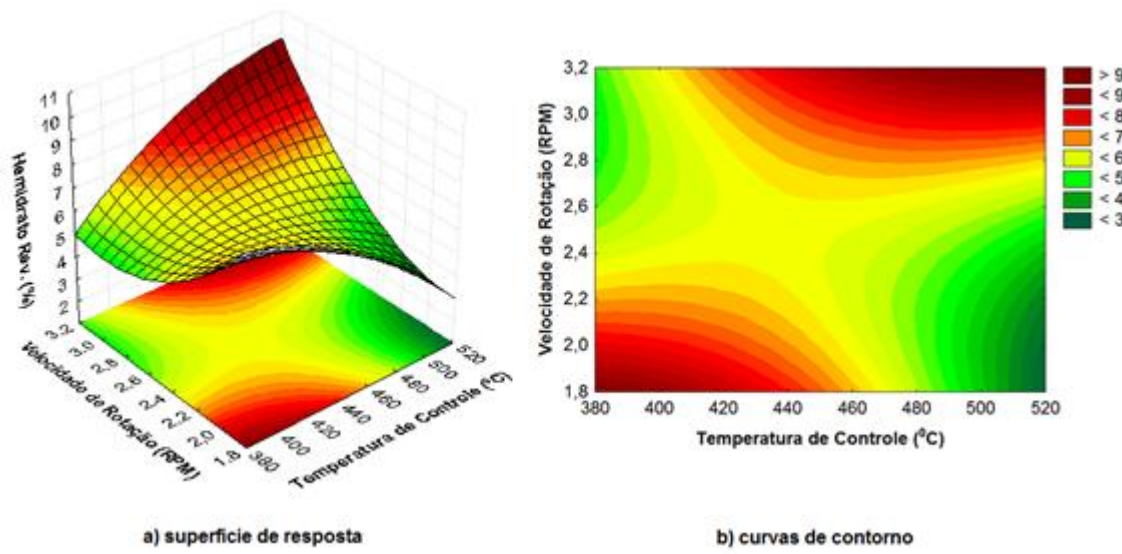


**Figura 4.10** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H (%) do Hemihidrato Beta, em função de Tc versus N. Condições: Qs=110 kg/h



**Figura 4.11** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H (%) do Hemihidrato Placa, em função de Tc versus N. Condições: Qs=110 kg/h





**Figura 4.12** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação, G.H (%) do Hemidrato Revestimento, em função de Tc versus N. Condições: Qs=110 kg/h

Verificam-se também dois efeitos importantes: aumentando-se a velocidade de rotação, reduz-se o tempo de residência e aumenta-se o grau de mistura/contato do material no interior do forno. Desta forma, verifica-se que menores valores para o grau de hidratação serão obtidos com menores tempos de residência e maior grau de mistura/contato do material.

Através das superfícies de resposta e curvas de contorno geradas pelos modelos (Equação 4.4, 4.5 e 4.6) pode-se obter as condições otimizadas de calcinação de dihidrato (gipsita, gesso de revestimento e placa) para produzir hemidrato beta, variando os parâmetros Tc e Qs, com velocidade média de N=2 rpm.

$$GH_{\text{hemidrato-gipsita}} = -175,20 + 58,37 \cdot 10^{-3} T_c - 22,38 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 2,578 Q_s - 11,96 \cdot 10^{-3} Q_s^2 \quad (4.4)$$

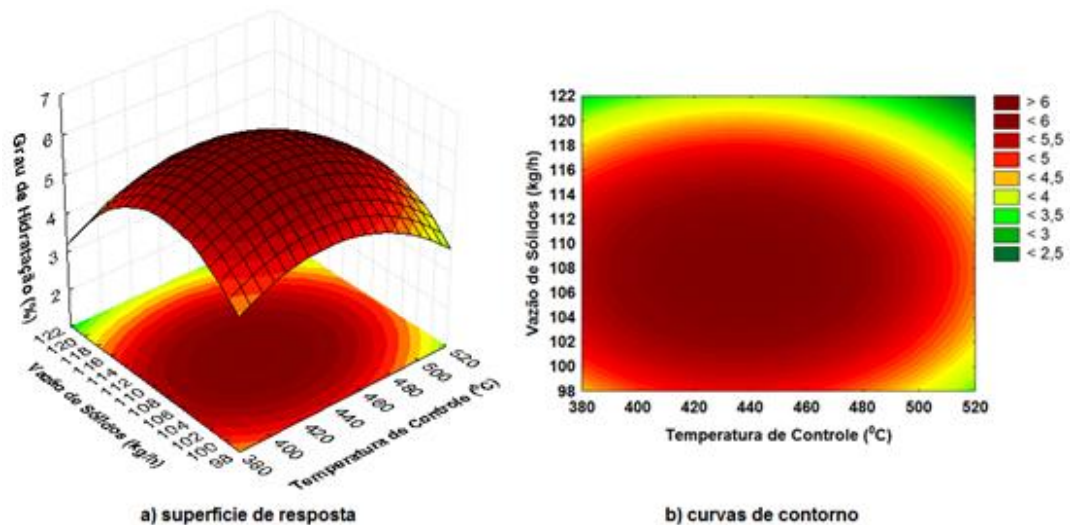
$$GH_{\text{hemidrato-placa}} = -162,98 + 34,54 \cdot 10^{-3} T_c - 19,98 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 2,435 Q_s - 11,29 \cdot 10^{-3} Q_s^2 \quad (4.5)$$

$$GH_{\text{hemidrato-revest.}} = -158,85 + 36,52 \cdot 10^{-3} T_c - 20,11 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 2,358 Q_s - \quad (4.6)$$

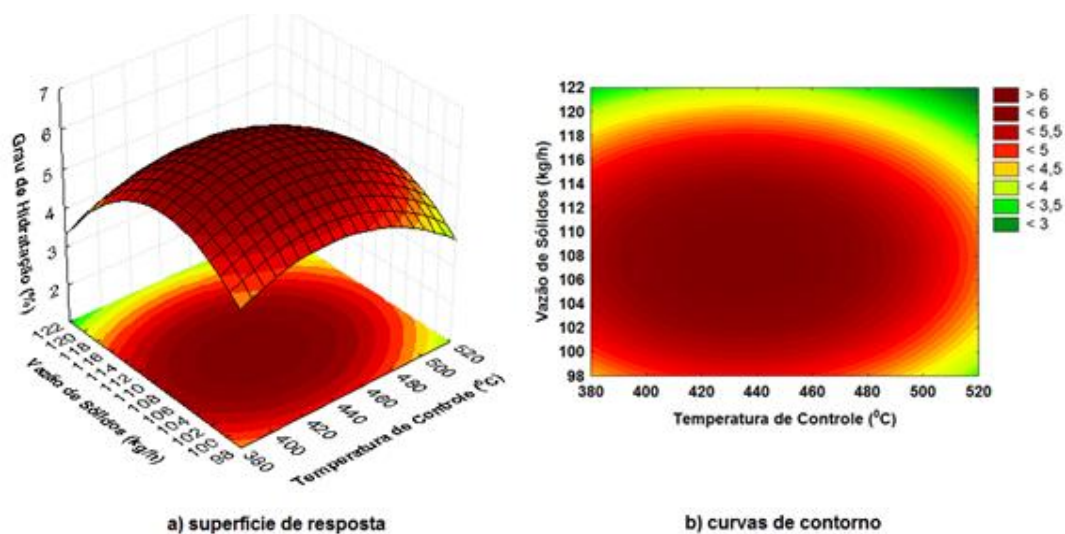


$$10,96 \cdot 10^{-3} Q_s^2$$

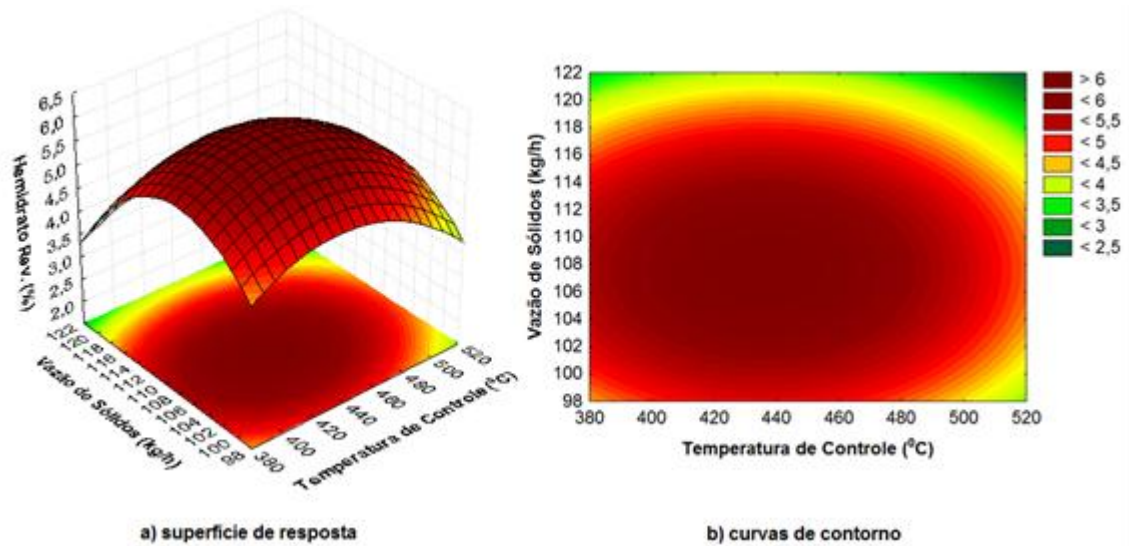
As superfícies de respostas e curvas de contorno apresentadas nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 foram obtidas com velocidade de rotação constante ( $N=2\text{rpm}$ ). Observa-se que os maiores valores obtidos para a variável resposta foram encontrados entre as temperaturas 420 e 460 °C, e entre as vazões 104 e 112 kg/h. Condições: 2,00 rpm.



**Figura 4.13** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso em função de Tc e Qs a  $N=2,00\text{ rpm}$



**Figura 4.14**– Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de Placa em função de Tc e Qs a  $N = 2,00\text{ rpm}$



**Figura 4.15–** Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de revestimento em função de Tc e Qs a N= 2,00 rpm

Através das superfícies de resposta e curvas de contorno geradas pelos modelos (Equação 4.7, 4.8 e 4.9) pode-se obter as condições otimizadas de calcinação de dihidrato (gipsita, placa e revestimento) para produzir hemidrato beta, variando os parâmetros N e Qs, com temperatura de controle de combustão constante ( $T_c = 450$  °C).

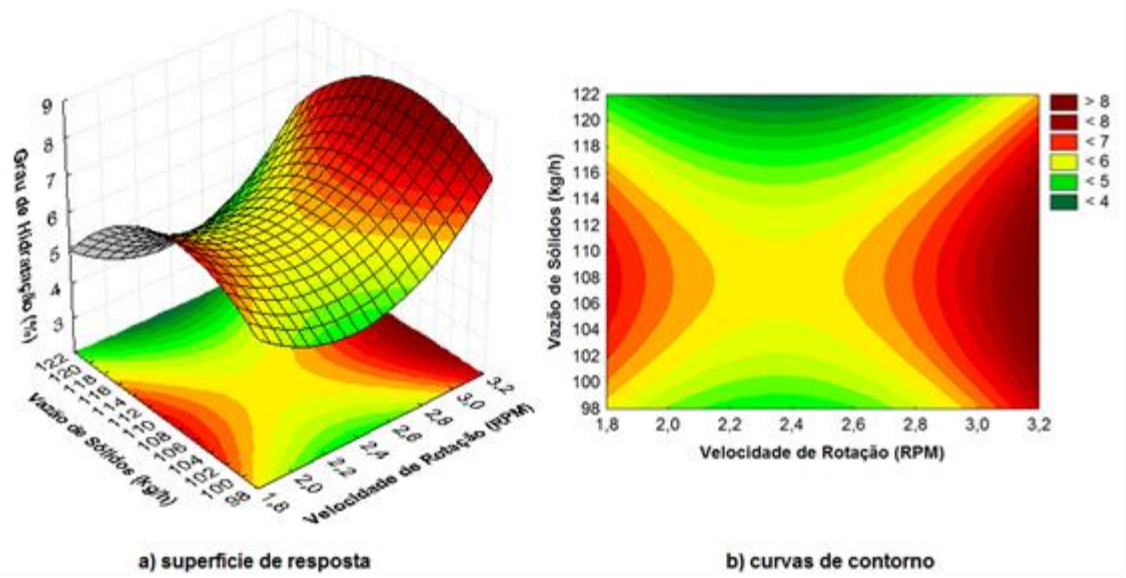
$$GH_{\text{hemidrato-gipsita}} = -111,17 - 17,37 N + 3,662 N^2 + 2,578 Q_s - 11,96 \cdot 10^{-3} Q_s^2 \quad (4.7)$$

$$GH_{\text{hemidrato-placa}} = -105,87 - 16,39 N + 3,476 N^2 + 2,435 Q_s - 11,29 \cdot 10^{-3} Q_s^2 \quad (4.8)$$

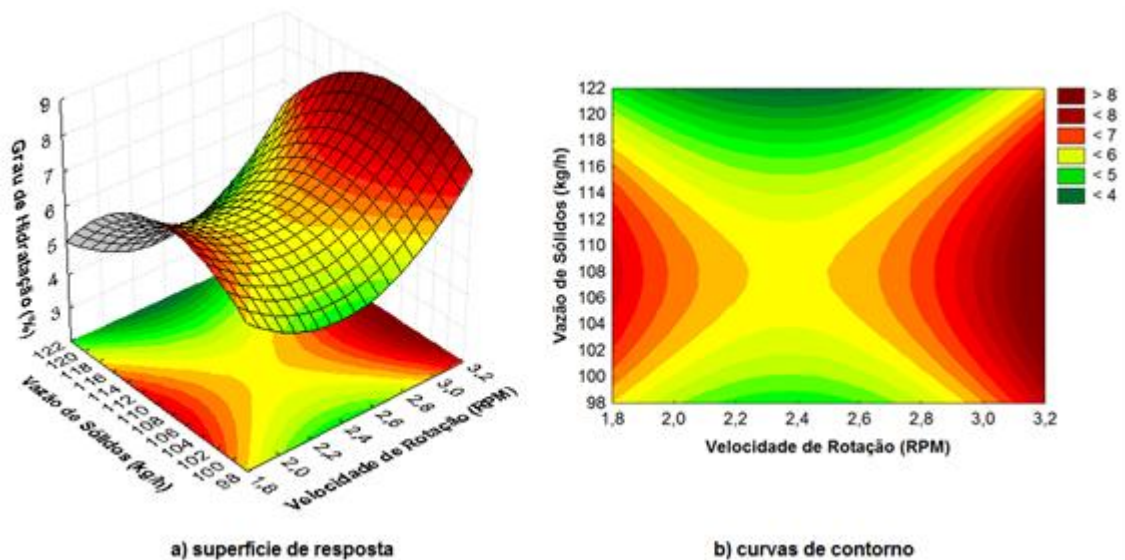
$$GH_{\text{hemidrato-revest.}} = -101,72 - 16,08 N + 3,216 N^2 + 2,358 Q_s - 10,96 \cdot 10^{-3} Q_s^2 \quad (4.9)$$

As superfícies de respostas e curvas de contorno apresentadas nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, foram obtidas com a temperatura de controle da combustão constante ( $T_c = 450$  °C). Observa-se que os maiores valores obtidos para a variável resposta foram encontrados em duas regiões: na primeira, operando com mínima velocidade de

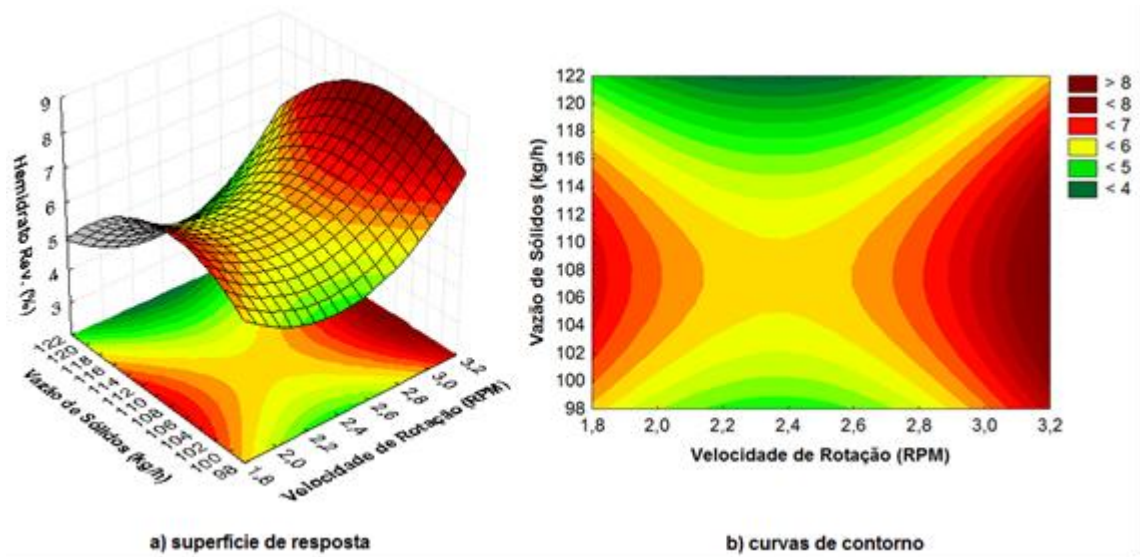
rotação e vazão de alimentação de sólidos num intervalo de 104 a 110 kg/h; e na segunda, com altas velocidades de rotação e num intervalo de 100 a 116 kg/h.



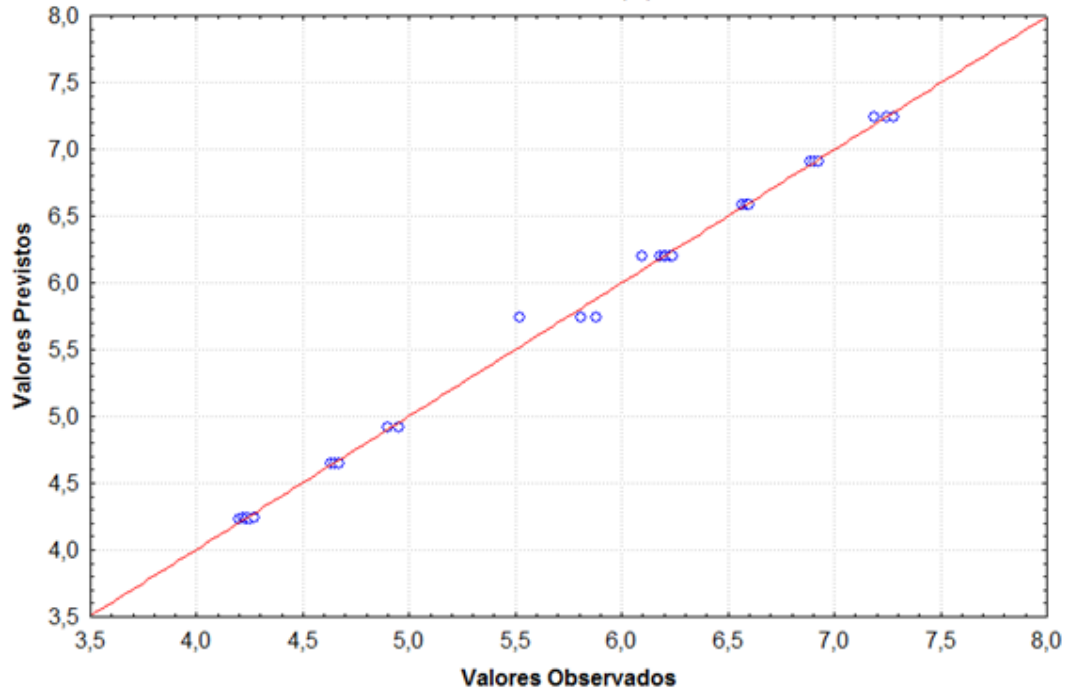
**Figura 4.16**– Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso em função de N e Qs a  $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$



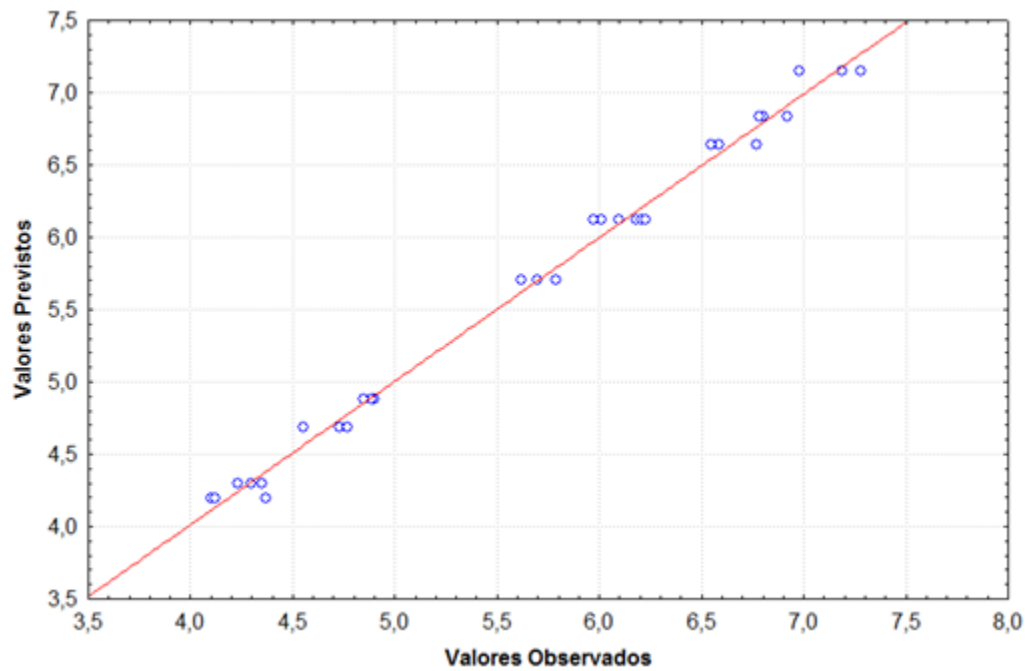
**Figura 4.17** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de placas em função de N e Qs  $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$



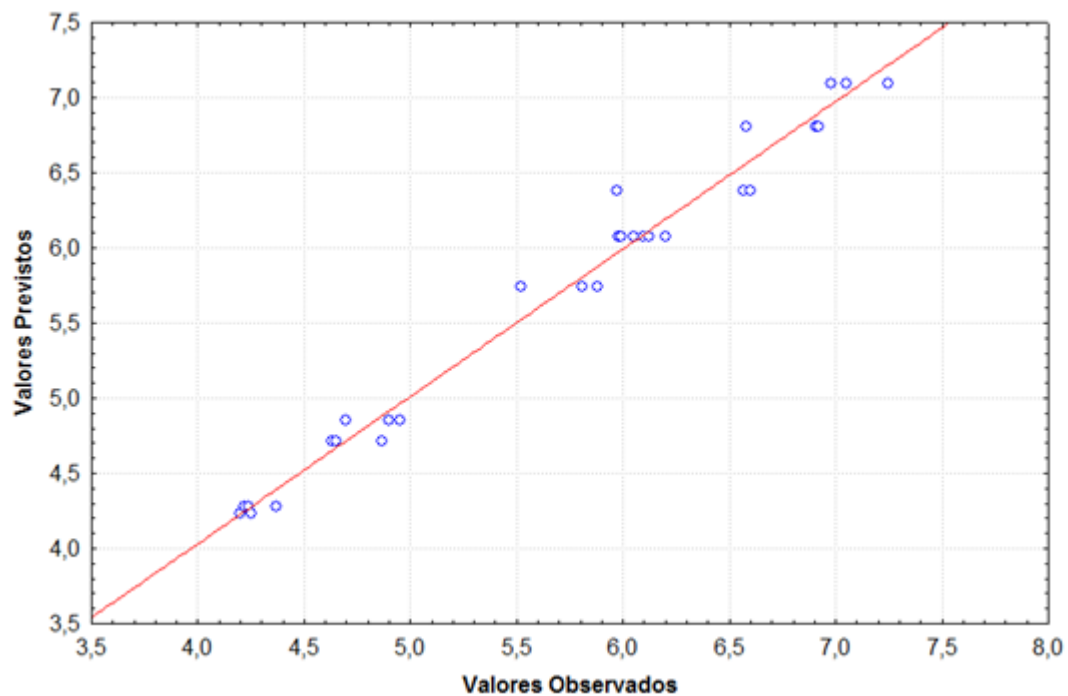
**Figura 4.18** – Superfície de resposta e curva de contorno para o Grau de Hidratação do gesso de revestimento em função de N e Qs a  $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$



**Figura 4.19** - Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo do Grau de Hidratação - Condições:  $Q_s = 110\text{ kg/h}$ ,  $T_c = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2,00 rpm.



**Figura 4.20** - Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo do Grau de Hidratação. Condições:  $Q_s=110$  kg/h,  $T_c= 450$  °C, 2,00 rpm.



**Figura 4.21** - Valores experimentais *versus* valores previstos pelo modelo do Grau de Hidratação. Condições:  $Q_s=110$  kg/h,  $T_c= 450$  °C, 2,00 rpm.

**Tabela 4.9 – Análise de Variância (ANOVA): hemidrato beta.**

Fontes de Variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma Quad. (SQ)	Média Quad. (QM)	F <sub>Calc.</sub>	p-valor	R <sup>2</sup>	Adj.
Tc (L)	1	1,485	1,485	324,605	0,000	-	-
Tc (Q)	1	2,113	2,113	461,811	0,000	-	-
N (L)	1	4,014	4,014	877,429	0,000	-	-
N (Q)	1	5,658	5,658	1236,858	0,000	-	-
Qs (L)	1	2,475	2,475	541,113	0,000	-	-
Qs (Q)	1	5,513	5,513	1205,180	0,000	-	-
Tc (L) x N (L)	1	16,415	16,415	3588,312	0,000	-	-
Tc (L) x N (Q)	1	0,003	0,00294	0,642	0,432	-	-
Resíduo	21	0,096	0,00457	-	-	-	-
Total	29	33,449	-	-	-	98,11	97,40



**Tabela 4.10 – Análise de Variância (ANOVA): hemidrato placa.**

Fontes de Variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma Quad. (SQ)	Média Quad. (QM)	F <sub>Calc.</sub>	p-valor	R <sup>2</sup>	Adj.
Tc (L)	1	1,328	1,328	115,789	0,000	-	-
Tc (Q)	1	1,684	1,684	146,758	0,000	-	-
N (L)	1	4,341	4,341	378,403	0,000	-	-
N (Q)	1	5,096	5,096	444,176	0,000	-	-
Qs (L)	1	2,122	2,122	184,945	0,000	-	-
Qs (Q)	1	4,916	4,916	428,441	0,000	-	-
Tc (L) x N (L)	1	15,928	15,928	1388,262	0,000	-	-
Tc (L) x N (Q)	1	0,002	0,002	0,140	0,712	-	-
Resíduo	21	0,241	0,011	-	-	-	-
Total	29	31,864	-	-	-	99,24	98,96

**Tabela 4.11 – Análise de Variância (ANOVA): hemidrato revestimento**

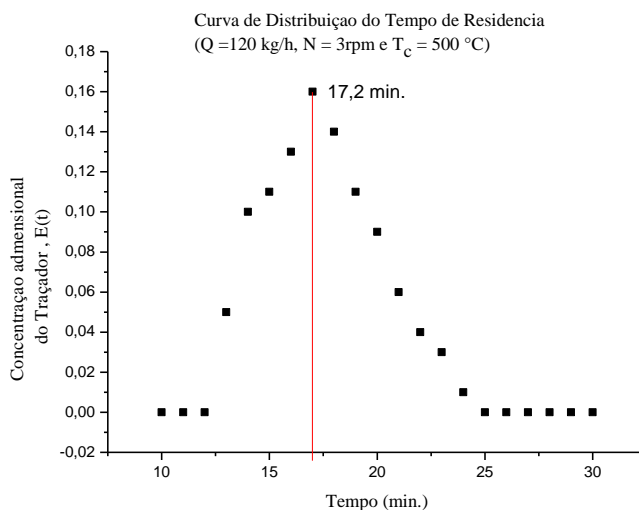
Fontes de Variação	Graus de Liberdade (GL)	Soma Quad. (SQ)	Média Quad. (QM)	F <sub>Calc.</sub>	p-valor	R <sup>2</sup>	Adj.
Tc (L)	1	1,428	1,428	53,539	0,000	-	-
Tc (Q)	1	1,706	1,706	63,971	0,000	-	-
N (L)	1	3,645	3,645	136,655	0,000	-	-
N (Q)	1	4,864	4,864	182,362	0,000	-	-
Qs (L)	1	2,496	2,496	93,593	0,000	-	-
Qs (Q)	1	4,630	4,630	173,565	0,000	-	-
Tc (L) x N (L)	1	13,473	13,473	505,102	0,000	-	-
Tc (L) x N (Q)	1	0,000	0,000	0,002	0,966	-	-
Resíduo	21	0,560	0,027	-	-	-	-
Total	29	29,688	-	-	-	98,11	97,40

Os modelos de previsão obtidos para a calcinação e explicar o Grau de Hidratação (%) em função da velocidade de rotação do cilindro, temperatura de controle da combustão e vazão de alimentação de sólidos apresentaram variâncias explicadas ( $R^2$ ) satisfatórias. Variações da ordem de 98,11% para o semi-hidrato obtido da calcinação da gipsita, 99,24 % para o hemidrato obtido do resíduo de placas e 98,11 % de semi-hidrato do resíduo de revestimento são explicadas por esses modelos. Adicionalmente os coeficientes de ajuste de 95,40%; 98,86 e 97,40 confirmam a validade dos referidos modelos.

#### **4.4 – Distribuição de Tempo de Residência – DTR**

A medição da distribuição do tempo de residência foi efetuada adotando o procedimento descrito no item 3.4.1. O reator foi operado em regime de estado permanente, sua taxa de alimentação da gipsita e resíduo revestimento (B) e resíduo placa (C) foi de 120 kg/h, com rotação de 3 rpm e com uma temperatura de chama de 500 °C. Os resultados obtidos através das equações (3.2 a 3.8) são listados na forma normalizada, na Tabela 4.12, e apresentados na forma de curva na Figura 4.22, sendo as concentrações de cloreto de manganês medidas listadas na Tabela 4.12 do Apêndice-C.





**Figura 4.22** – Distribuição do tempo de residência no forno rotativo.

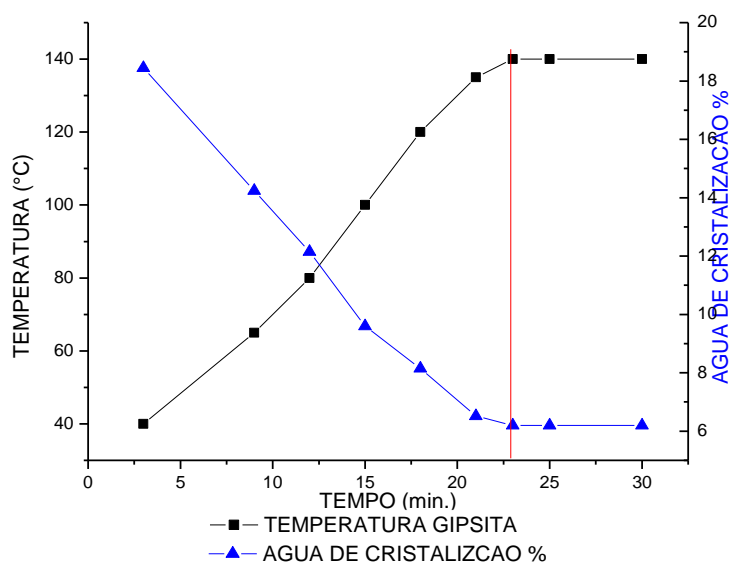
Dessa forma, o tempo de residência médio foi avaliado em 17,2 min e o desvio padrão da função DTR em relação ao tempo médio de 1,16 min.

## 4.5 - Processo de Calcinação da Gipsita e dos Resíduos de Gesso

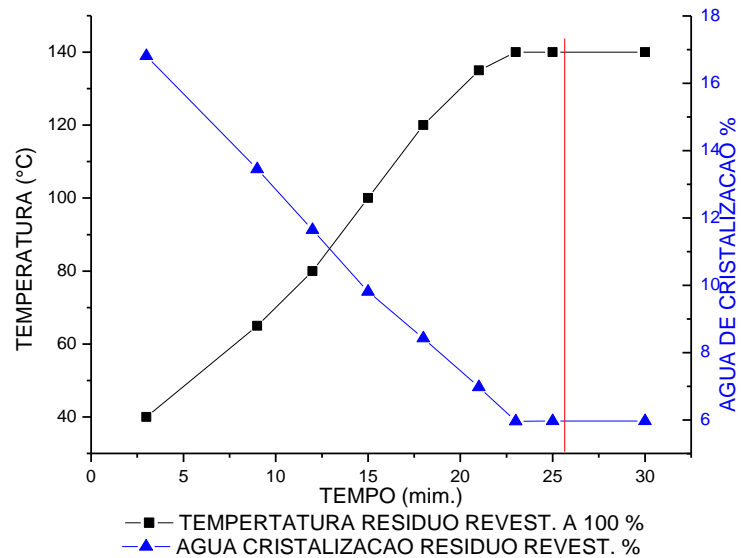
### 4.5.1 Determinação do tempo de funcionamento do regime permanente do forno

Os estudos de calcinação do gesso beta e de resíduos de gesso (revestimento e placa) foram baseados nos resultados de investigação da influência de variáveis: temperatura de calcinação, velocidade de rotação do forno e vazão mássica da fase sólida reacional, tendo como variável o grau de hidratação. Foram adotadas as condições operacionais seguintes: temperatura de controle de combustão:  $500^\circ\text{C}$ , velocidade de rotação do forno: 3 rpm e vazão de alimentação da fase sólida: 120 kg/h.

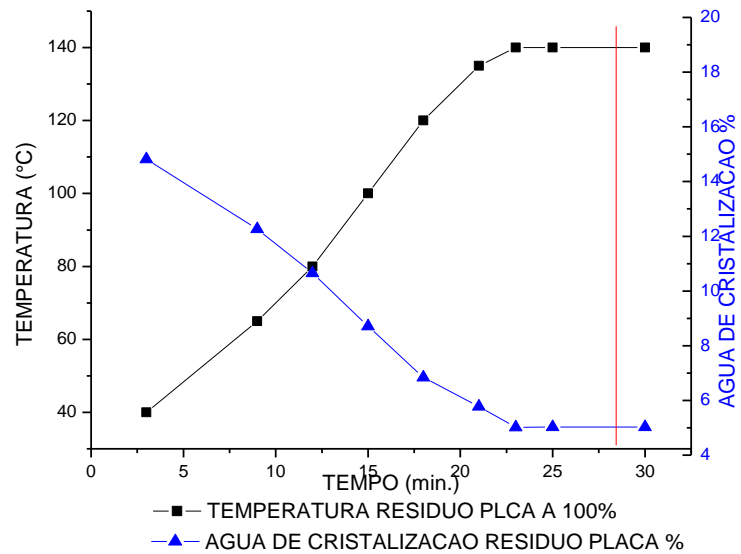
Visando a determinação do tempo de obtenção do regime permanente de funcionamento do forno, foram realizados ensaios registrando o grau de hidratação e temperatura da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e placa em calcinação, na saída do reator, em função do tempo, sendo os resultados listados na Tabela 4.13 do APÊNDICE-D e representados nas Figuras 4.23 a 4.25.



**Figura 4.23** – Evolução da água de hidratação e temperatura da gipsita em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional. Condições:  $T_C=500^\circ\text{C}$ ,  $N=3$  rpm e  $Q_s=120$  kg/h,  $T_r=17,2$  (min.)



**Figura 4.24** - Evolução da água de hidratação e temperatura do resíduo revestimento em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional, Condições:  $T_C=500^\circ\text{C}$ ,  $N=3$  rpm e  $Q_s=120$  kg/h,  $T_r=17,2$  (min.)



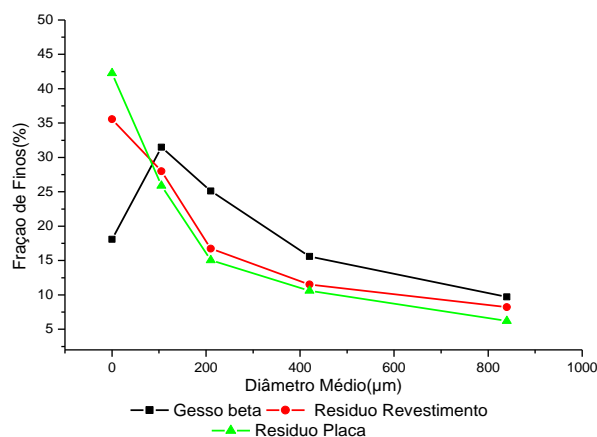
**Figura 4.25** - Evolução da água de hidratação e temperatura do resíduo placa em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional, Condições:  $T_C=500^\circ\text{C}$ ,  $N=3$  rpm e  $Q_s=120$  kg/h,  $T_r=17,2$  (min.).

A análise das Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 permite identificar um tempo de regime permanente de 21 min, 26 min e 28 min, para calcinação da gipsita, resíduo de gesso de revestimento e resíduo de gesso de placa, respectivamente. Uma vez o regime permanente estabelecido, quantificam-se valores de grau de hidratação de 6,20%, 5,97 e 5,02 para calcinação da gipsita, resíduo de gesso de revestimento e resíduo de gesso de placa, respectivamente, porém valores que respondam à norma NBR13207, considerando assim os gessos produzidos com diferentes matérias-primas estudadas podem ser comercializados e usados na construção civil.

#### **4.5.2 - Análise granulométrica dos diferentes gessos produzidos**

Os resultados da distribuição granulométrica, realizada conforme descrito no item. 3.6.1, do gesso obtido a partir da gipsita pura (A), dos resíduos de gesso de revestimento (B) e dos resíduos de gesso de placa (C) estão resumidos na Tabela 4.15 do APÊNDICE- D e apresentados na Figura 4.26.

A partir da distribuição granulométrica das amostras de gesso da gipsita (A), gesso de resíduos de revestimento (B) e resíduos de placa (C), pode se observar que o gesso proveniente da calcinação dos resíduos de gesso de revestimento e placa possuíam diâmetros médios das partículas iguais (Cálculo, Modelo de Sauter) a 260,86 $\mu$ m e 285,01 $\mu$ m, respectivamente, maiores que a do gesso decorrente da calcinação da gipsita, 213,57  $\mu$ m.



**Figura 4.26** - Curvas da análise granulométrica dos materiais

Com os ensaios de granulometria, foi escolhida uma faixa de tamanho ótimo para a realização dos ensaios físicos e mecânicos para avaliação dos materiais produzidos. Para o gesso oriundo da gipsita (A) foi adotada a faixa de 420  $\mu\text{m}$ , enquanto que para o gesso proveniente da calcinação dos resíduos de revestimento e de placa (B e C) foi adotada a faixa de 210  $\mu\text{m}$ , Tab. 14 do APÊNDICE-D; em face da massa retida em análise que melhor caracterizou as amostras dos resíduos (B e C) e gipsita (A).

#### 4.5.3 – Análise química

Foi realizada a análise química dos diferentes materiais sólidos envolvidos neste trabalho, a saber: gesso oriundo da calcinação da gipsita (A), resíduos de gesso de revestimento (B) e resíduos de gesso de placa (C) em condições de calcinação a 140°C, assim como dos resíduos de gesso de placa e revestimento em estado bruto,

sem ter sofrido nenhuma calcinação. Os ensaios de análise química foram efetuados no Laboratório do ITEP. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 4.12

**Tabela 4.15** - Resultados da análise química para amostras de gesso oriundas da calcinação da gipsita, resíduos de gesso de revestimento e placa, e resíduos de gesso não calcinados.

Elementos	Gesso (A) (%)	Resíduos Calcinados		Resíduos não calcinados	
		Revest (B) (%)	Placa (C) (%)	Revest (%)	Placa (%)
Umidade (50°)	0,52	0,87	0,98	5,66	6,01
AC (200°C)	5,84	5,98	5,99	19,67	19,68
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,03	0,35	0,09	0,04	0,10
Cálcio (CaO)	38,83	43,97	39,42	30,63	31,00
Magnésio (MgO)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Manganês (MnO)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfito (SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	54,77	48,73	44,60	43,90	43,21

A análise química foi realizada para comparar as características do gesso natural com os resíduos utilizados para estudo. Verifica-se que tanto o gesso oriundo da gipsita (A) quanto os gessos provenientes dos resíduos de revestimento (B) e placa (C), apresentaram resultados semelhantes quanto as suas composições químicas.

#### 4.5.4 - Determinação da umidade e da água de cristalização

A Tabela 4.16 apresenta os resultados encontrados na determinação da umidade e de água de cristalização, usando a termobalança conforme descrito no item 3.5.3.1, para as amostras de gesso oriundo da calcinação da gipsita (A), gesso proveniente da calcinação dos resíduos de gesso de revestimento (B) e gesso decorrente da calcinação

dos resíduos de gesso de placa (C), assim como dos resíduos de gesso de placa e revestimento em estado bruto, sem ter sofrido nenhuma tratamento.

**Tabela 4.16** - Resultados da determinação da água livre e de cristalização para os resíduos de gessos oriundos da gipsita e resíduos de gesso revestimento e placa.

TIPO	ÁGUA LIVRE 85±5°C	ÁGUA DE CRISTALIZAÇÃO 200±5°C
Resíduo de gesso de revestimento não tratado	27,6	20,02
Resíduo de gesso de placa não tratado.	28,7	19,98
Material decorrente da calcinação da gipsita (A) a 140°C	0,86	5,20
Material decorrente da calcinação dos Resíduos de revestimento a 140°C	0,84	5,97
Material decorrente da calcinação do Resíduo de placa a 140°C	0,92	5,77

Com a análise dos resultados da Tabela 4.16 pode se observar em primeiro que os resíduos de gesso (revestimento e placa) nos tratados apresentam teores de água livre bem mais elevados em comparação aos dos gessos produzidos por calcinação da gipsita (A), resíduos de gesso de revestimento (B) e placa (C). Isto se deve possivelmente ao fato de que os resíduos de gesso de revestimento ou placa, oriundos da hidratação e expostos por muito tempo ao ar úmido, concentraram, ao longo desses processos, altos teores de umidade, enquanto os gessos (A), (B) e (C) que não foram ainda hidratados e com limitada exposição ao ar livre, tiveram consequentemente pouca absorção de umidade mantendo assim baixos os teores de água livre.

Pode-se evidenciar, também, que água de cristalização dos resíduos de gesso de revestimento e placa apresentaram valores próximos a 20,00 %, caracterizando-se assim o dihidrato, o qual é decorrente, obviamente, da hidratação do gesso. Todavia, com os gessos (A), (B) e (C), como era esperado, se obteve valores de

teor de água de cristalização próximos aos de gesso não reciclados, 4,2 a 6,2% segundo a NBR 13207, mostrando que foram utilizadas condições adequadas para calcinação.

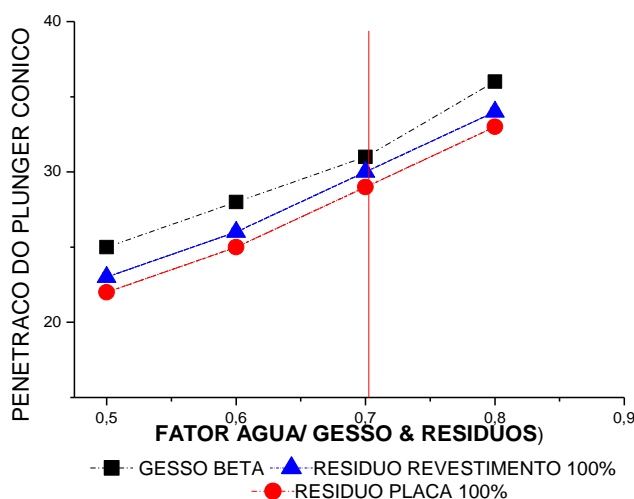
#### **4.5.5 – Estudos para determinação da consistência ideal para formulação de pastas do Gesso**

A razão entre a quantidade d'água e massa de gesso beta de gipsita (A) e dos calcinados dos resíduos de gesso de revestimento (B) e de placa (C) que entram na formulação das pastas, denominado fator água/gesso ou consistência, interfere substancialmente nas propriedades físico-mecânicas das mesmas. Estudos para determinação da consistência ideal para formulação das pastas de gesso cujas propriedades atendem a norma NBR 12128 foram realizados analisando as características seguintes: profundidade da penetração de cone, tempo de pega, resistência a compressão, resistência a flexão, dureza e aderência em função da proporção água/pó de gesso. As misturas água/pó de gesso foram preparadas usando água destilada e gesso oriundo da calcinação da gipsita (A), ou de resíduos (B), ou de (C). A seguir estão apresentados os resultados obtidos dessas investigações.



#### 4.5.5.1 Penetração do cone

Os ensaios de avaliação da penetração do cone foram realizados adotando o procedimento descrito na Tabela 4.17.do APÊNDICE- D e apresentados na Figura 4.27.

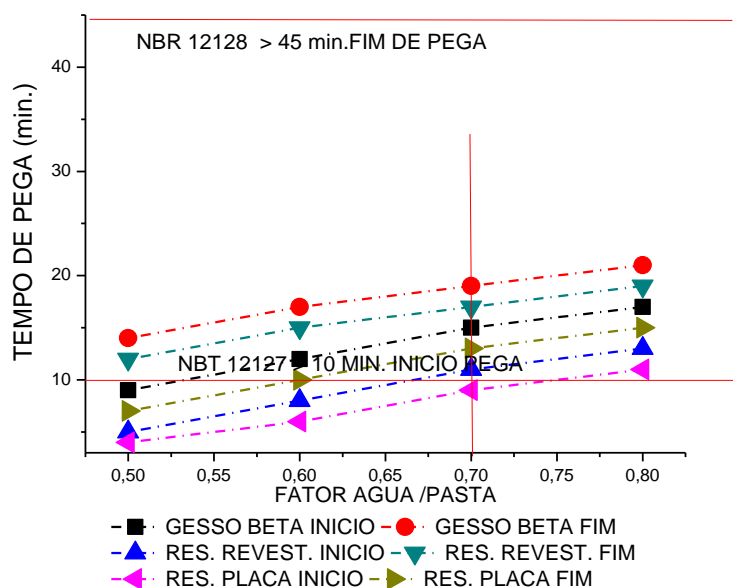


**Figura 4.27** – Ensaio em amostras do gesso calcinadas na penetração do cone em relação à consistência (água/pó) dos materiais estudados.

Conforme a Figura 4.27, a penetrabilidade do cone aumenta, como era esperado, com aumento da razão mássica água/gesso. Observa-se também que para o mesmo valor da consistência, a penetrabilidade do cone para as pastas estudadas evolui segundo a ordem crescente seguinte: Gesso(C), Gesso (B) e Gesso (A). Conclui-se também que em todas as amostras, a faixa de 0,50 a 0,80 da consistência se mostrou adequada por permitir evitar, de um lado, uma penetração total na pasta para o seu maior valor experimentado (0,80) e uma penetração nula para o seu menor valor testado (0,50).

#### 4.5.5.2 Tempo de pega

Os tempos de pega dos diferentes gessos estudados foram determinados em função da consistência, conforme o procedimento descrito no item. Os resultados são resumidos na Tabela 4.18 do APÊNDICE- D e apresentados na Figura 4.28. Uma análise desta última permite constatar que o tempo de início de pega e o tempo de fim de pega aumentam, com era esperado, com aumento da relação água/pó de gesso, independentemente da origem de obtenção do hemidrato.



**Figura 4.28** – Influência do fator água/ gesso calcinado, resíduo (revestimento e placa) a 100%, no tempo de pega dos materiais.

No caso do gesso de pega rápida, a norma NBR 13207- *Gesso para construção civil* (ABNT, 1994) propõe que o tempo de início de pega deve estar compreendido entre 4 e 10 minutos, e o fim de pega entre 20 a 45 minutos. Já no caso do gesso de pega lenta a prescrição é de início de pega maior que 10 minutos, e o fim de pega

maior que 45 minutos. Baseando-se também na norma NBR 12127 e observando os resultados obtidos para o tempo de pega (Figura 4.28), pode se concluir que a consistência de 0,70 é o valor que mais se adequa para atender as recomendações das normas NBR 13207 e NBR 12127.

Vale ressaltar também que a introdução de retardadores de pega é praticamente imprescindível para a execução do revestimento quando se trata de empregar argamassas revertidas, uma vez que os tempos de início e fim de pega são significativamente reduzidos. Esta, certamente, é uma etapa que necessita bastante precisão na execução de mistura em repouso e fator de consistência.

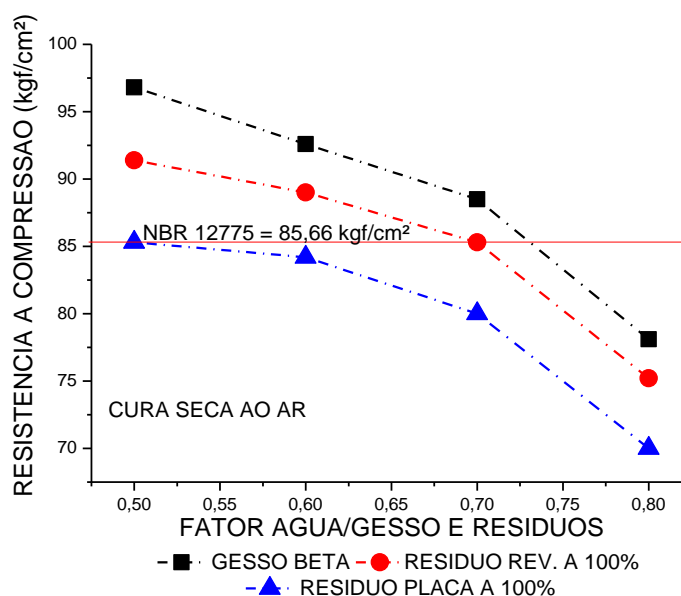
#### **4.5.5.3 Resistência à compressão**

A resistência à compressão axial do gesso obtido por calcinação da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e placa foi determinada utilizando-se corpos de prova cúbicos de 50,0 mm de aresta adotando o procedimento descrito no parágrafo 3.7.3.2 a). Sabe-se que a quantidade de água de amassamento representada pelo fator água-massa de gesso, com as condições ambientais de endurecimento (referida no processo de cura), interfere substancialmente na resistência das pastas de gesso preparadas.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova, obtidos através das composições, nas idades de 7 dias (tempo de secagem no ar ambiente), estão listados na Tabela 4.19 do APÊNDICE-D.

Ressalta-se que para cada composição estudada, foram avaliados 6 corpos de prova com determinação da média aritmética da resistência compressão dos mesmos,

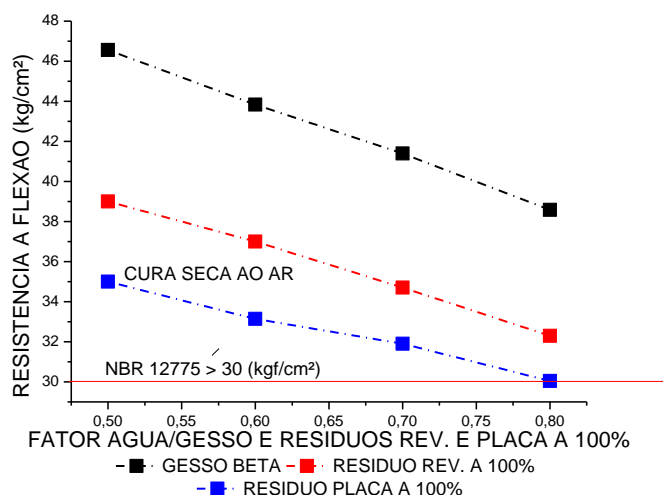
sendo os resultados apresentados na Figura 4.29. Analisando esta última, evidencia-se, de um lado, que a resistência a compressão diminui, com era esperado, com aumento da proporção água /pó de gesso, e de outro lado, a resistência a compressão ficou abaixo do valor mínimo previsto pela Norma NBR 12775 ( $85,66 \text{ kgf/cm}^2$ ) a partir da relação água/pó de gesso de consistência 0,70, independentemente da origem da produção do gesso (gipsita, resíduos de gesso de revestimento e placa). A resistência mecânica do gesso é relacionada à coesão entre cristais cujos seus entrelaçamentos se tornam menores quanto maior a proporção água-gesso.



**Figura 4.29** – Influência da proporção água/pó de gesso e resíduos sobre a resistência a compressão dos materiais.

#### 4.5.5.4 - Resistências à flexão

A determinação da resistência à flexão das pastas de gesso (A), (B) e (C) foi realizada utilizando-se corpos de prova de dimensões seguintes: comprimento de 120 mm, espessura de 20 mm e largura de 26 mm, adotando o procedimento descrito no parágrafo 3.7.3.2.b.



**Figura 4.30** - Influência da proporção água/pó de gesso e resíduos sobre a resistência a flexão dos materiais.

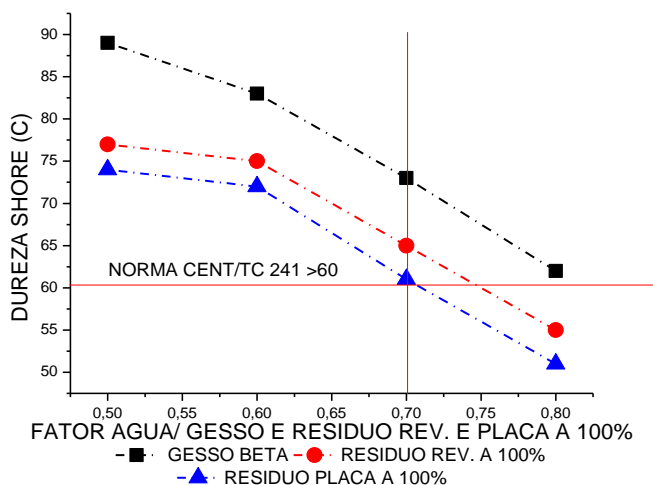
De acordo com os resultados observados na Figura 4.30 acima, verifica-se que os gessos (A), (B) e (C) tiveram comportamentos semelhantes, a saber: a resistência a flexão diminua com aumento da consistência das pastas e que em todas as circunstâncias a resistência da flexão ficou acima do valor mínimo previsto pela norma NBR 12775 ( $30,59 \text{ kgf/cm}^2$ ). Assim, pode se concluir que mesmo em traços mais pobres, consistência de 0,8, todos os gessos formulados apresentaram desempenho satisfatório

do ponto de vista da resistência mecânica, os resultados estão listados na tabela 4.20 APENDICE-D.

A resistência mecânica do gesso e resíduos após o tempo de cura depende da quantidade da água usada, pois o excesso de líquido acima do necessário estequiométrico de hidratação passa a ocupar a rede da pasta, reduzindo assim as propriedades mecânicas de flexão dos moldes.

#### **4.5.5.5 – Dureza**

O ensaio para determinação da dureza realizado nas pastas de gesso (A), (B) e (C) tem como objetivo avaliar as resistências a deformações permanentes diretamente relacionadas com a força de ligação dos átomos em cada amostra em separado. Os resultados dos ensaios de dureza para as composições de gesso e resíduos de gesso estão listados na Tabela 4.21 do APÊNDICE- D e apresentados na Figura 4.31. É possível efetuar um comparativo entre as impressões registradas na superfície dos corpos de prova pelo durômetro SHORE C e os valores correspondentes das durezas propostas pela Norma CEN/TC -241. (Comitê Europeu de Normalização/ Comitê técnico).



**Figura 4.31** – Influência do fator água/ gesso calcinado e percentual Resíduo revestimento e Placa, na Dureza Shore C, dos materiais.

Conclui-se que os valores da dureza superficial se encontram acima do valor mínimo 60 estabelecido pela norma CENT/TC 241 para uma relação água/pó de gesso inferior a 0,70, independentemente da origem do hemidrato. Para o gesso oriundo da calcinação da gipsita (A), o valor da dureza ainda responde ao valor normatizado mesmo para uma consistência maior de 0,80.

#### 4.5.5.6 Conclusões Parciais

Com base das caracterizações físicas e mecânicas realizadas nas amostras de gesso beta (A), de gesso de resíduo de revestimento (B) e gesso de resíduo de placa (C), concluiu-se que a relação água/pó de gesso ou consistência de 0,70 responde as normas NBR relativas a aplicação de gesso, sendo assim foi adotado o referido valor para avaliação do tempo de secagem dos corpos de prova e a aderência do revestimento em paredes de cerâmica.

#### **4.5.5.6.1 - Tempo de Secagem dos corpos de prova e Aderência de revestimento em paredes de cerâmica**

Usando a relação ótima água/pó de gesso de 0,70, previamente identificada, foi analisado, numa primeira etapa, o efeito do tempo de secagem dos corpos de prova na estimativa da resistência a compressão e da densidade aparente dos moldes de gesso preparados a partir do gesso (A), (B) e (C). Foi avaliada numa segunda etapa a aderência do revestimento em paredes de cerâmica dos referidos gessos adotando sempre a consistência de 0,70. Os valores da compressão, densidade aparente e aderência foram comparados com aqueles previstos pelas suas respectivas normas NBR.

#### **4.5.5.6.2 Tempo de secagem dos corpos de prova**

Os resultados da análise do efeito do tempo de secagem, de 1 a 7 dias, nas condições de temperatura (em torno de 30°C) e umidade relativa (ao redor de 60%) ambiente, sobre a resistência a compressão e a densidade aparente dos moldes de gesso (A), (B) e (C), para uma relação ótima água/pó de gesso de 0,70, estão listados na Tabela 4.22 do APÊNDICE-D e apresentados nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34. A análise destas últimas permite de concluir que :

Para o gesso oriundo da calcinação da gipsita (A): a densidade aparente e a resistência a compressão das pastas aumentam, como era esperado, com aumento do tempo de secagem. Ressalta-se também que os valores da densidade aparente sempre ficaram acima do valor mínimo previsto pela norma 12127 (0,70 g/cm<sup>3</sup>)



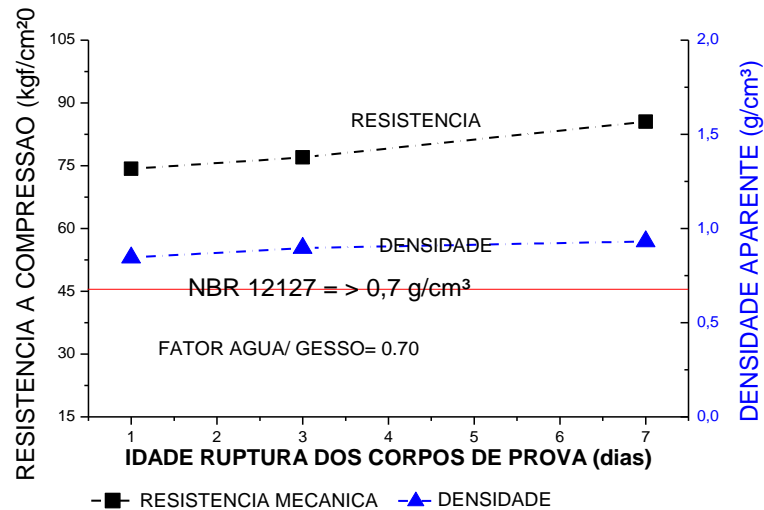
independentemente do tempo de secagem, enquanto que a resistência a compressão atinge o limite mínimo desejado ( $85,66 \text{ kgf/cm}^2$  segundo a norma 12775) só após 7 dias de secagem (Figura 4.33);

- Para o gesso oriundo da calcinação dos resíduos de gesso de revestimento (B): o comportamento da densidade aparente e da resistência a compressão das pastas é o mesmo daquele observado com o gesso (A) quando se aumenta o tempo da secagem de 1 a 7 dias. Todavia, com a aplicação do gesso (B), a sua densidade aparente fica próxima daquela estabelecida pela norma NBR12127 ( $0,7 \text{ g/cm}^3$ ) somente a partir do terceiro dia de secagem, enquanto a sua resistência à compressão atinge o valor de limite mínimo previsto pela norma NBR 12775 ( $85,66 \text{ kgf/cm}^2$ ) quando a secagem é realizada durante 7 dias (Figura 4.33)

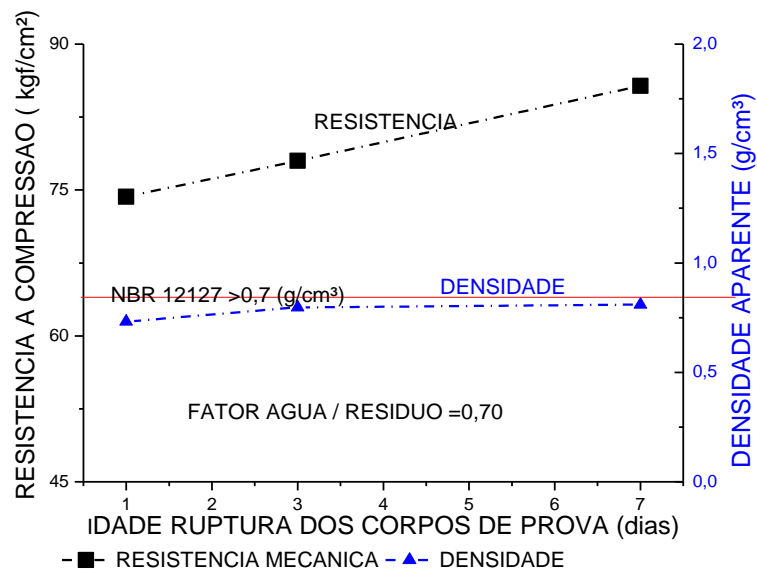
- Para o gesso oriundo da calcinação dos resíduos de gesso de placa (C): com elevação do tempo de secagem de 1 a 7 dias, a densidade aparente e a resistência a compressão das pastas de gesso (C) apresentaram comportamentos idênticos daqueles observados com os gessos (A) e (B). Contudo, com as pastas de gesso (C), a sua resistência a compressão ficou abaixo do valor exigido pela norma NBR 12775 ( $85,66 \text{ kgf/cm}^2$ ) mesmo após 7 dias de secagem, bem que, no mesmo tempo, a sua densidade aparente atingiu o valor normatizado ( $0,70 \text{ g/cm}^3$ ) num período de 3 dias de secagem (Figura 4.35).

O aumento da densidade aparente e da resistência a compressão das pastas de gesso com aumento do tempo de secagem, independentemente de sua origem, se deve ao fato que no processo de cura, quanto menor a água livre entre cristais, maior será a coesão dos mesmos. Igualmente, não havendo mais perda de água nas pastas de

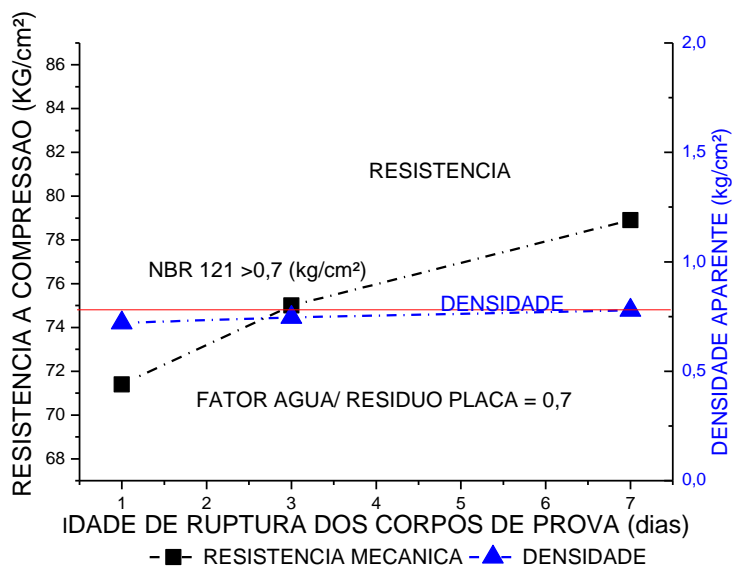
gesso, a resistência mecânica se estabelece devido possivelmente à solidificação completa entre os cristais do hemidrato.



**Figura 4.32** – Influencia do tempo de secagem sobre a resistência a compressão e densidade aparente do Gesso (A).



**Figura 4.33** – Influencia do tempo de secagem sobre a resistência a compressão e densidade aparente Gesso (B).

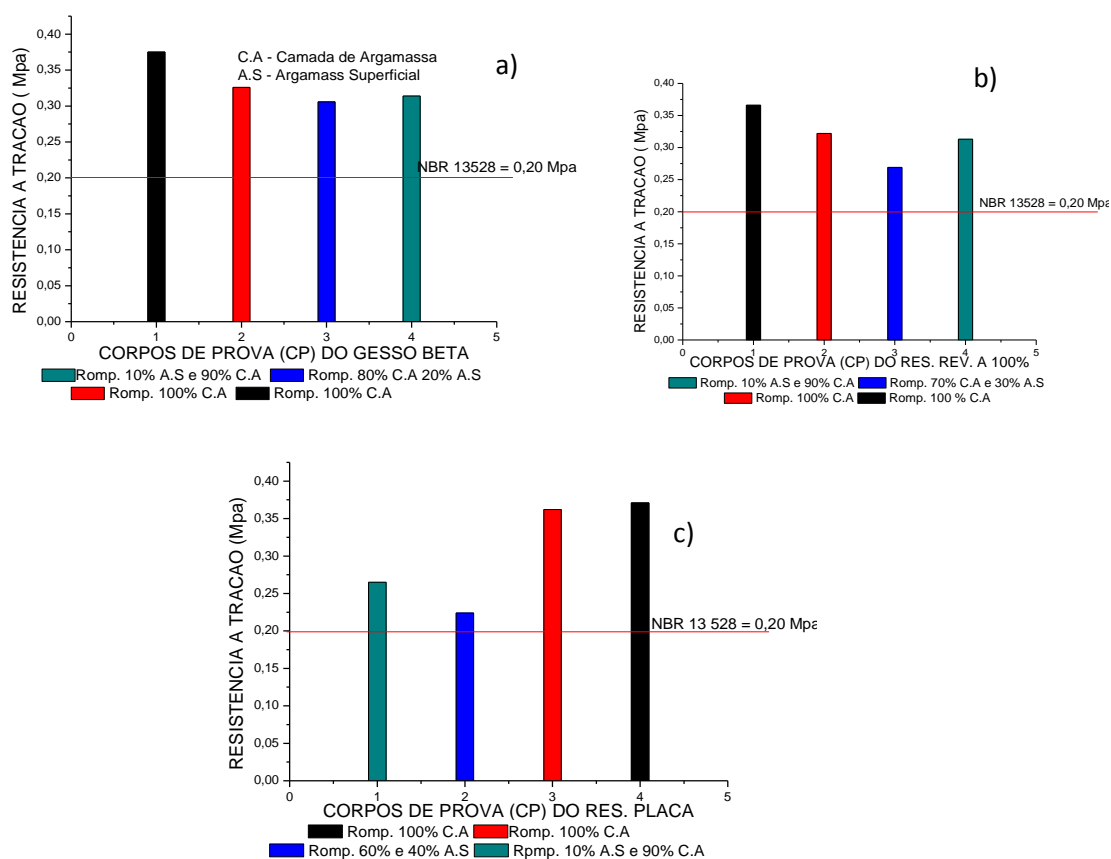


**Figura 4.34** – Influência do tempo de secagem sobre a resistência a compressão e densidade aparente Gesso (C).

#### 4.6 Aderência

A determinação da resistência de aderência foi efetuada sobre substratos de base em alvenaria de tijolo cerâmico medindo 1 m<sup>2</sup> de superfície, revestidos com uma base de 7 mm de camada superficial de gesso (A), ou (B) ou (C), sem acabamento, e antes do final de pega do gesso foram aplicados os corpos de prova com 25 cm<sup>2</sup> de área projetada em uma base metálica para fixação no substrato. Os ensaios foram realizados com um valor da consistência de 0,70 e um tempo de secagem de 7 dias. O procedimento detalhado está descrito no parágrafo 3.6.3.2 c.

Os resultados dos valores médios obtidos na avaliação da aderência estão listados nas Tabelas 4.23, 4.24 e 4.25 do APÊNDICE-D e apresentados nas Figuras 4.35a, 4.35b e 4.35c, respectivamente para o gesso (A), (B) e (C)



**Figura 4.35** – Resistência de aderência à tração em parede de alvenaria cerâmica com Gesso. a):Gesso (A); b):Gesso (B) e c): Gesso (C).

Analisando a Figura 4.36, evidencia-se que todas as diferenças de valores estão dentro do limite permitido pela norma NBR 13528, adaptada para ensaios com gesso. As resistências de aderências foram superiores ao valor de 0,20 MPa exigido pela norma, independentemente da origem do gesso avaliado.

A menor média de resistência de aderência de todos os ensaios efetuados foi em torno de 0,29 MPa, obtida com o traço 1:4, aplicado sobre base de blocos cerâmicos secos e com trabalhabilidade elevada. Este valor é 45 % superior à resistência de aderência mínima de 0,20 MPa especificada pela norma NBR 13528 (ABNT 1995) para revestimentos.

#### 4.7 – Caracterização dos materiais

A fim de se obter dados quantitativos a respeito da composição de uma amostra, é necessário comparar os resultados da análise da amostra gesso beta (A), de gesso de resíduo de revestimento (B) e gesso de resíduo de placa (C), com base na análise térmica e análise mineralógica. As análises térmicas de DTG e DTA são apresentados na forma de gráficos mostrando o comportamento da amostra com a variação da temperatura e na forma de dados numéricos relacionados a eventos térmicos identificados nos gráficos (etapas de variação de massa, eventos endo- ou exotérmicos).

A análise de Porosidade através da adsorção, e dessorção física pelo método BET é empregada, neste estudo, visando complementar as informações de distribuições de poros das massas de tamponamento ao longo do tratamento térmico.

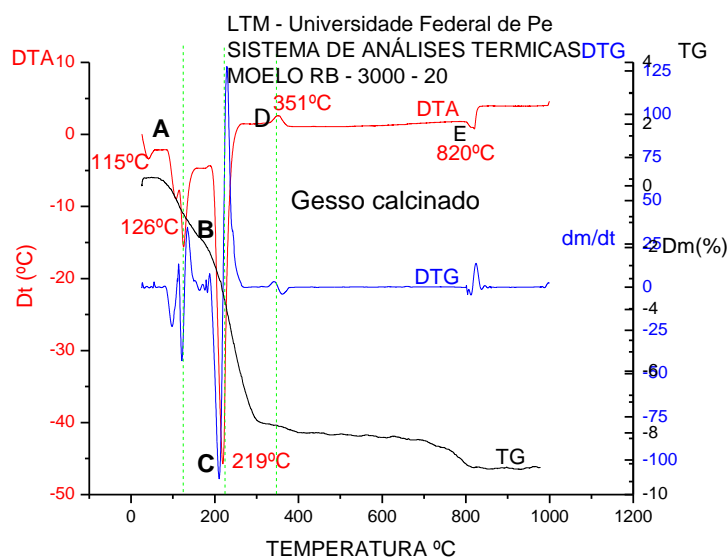
A partir dos espectros do infravermelho, podem-se analisar os grupos funcionais presentes nas amostras de gesso beta (A) e resíduos de gesso (B) e (C). A técnica da espectroscopia de Infravermelho é muito utilizada para fornecer informações a respeito da identidade, pureza e presença de grupos funcionais característicos em compostos inorgânicos à base de cálcio e fósforo, sílica; tais como Ca, SO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O. Também é particularmente importante, porque é a única análise sensível na determinação dos grupos de OH. Através dos resultados da espectroscopia de infravermelho por transmitância é possível analisar se tanto o gesso beta (A) quanto os resíduos (B) e (C) apresentam praticamente as mesmas bandas, algumas maiores e/ou mais deslocadas que as outras.

A difração de raios X é uma das técnicas mais utilizadas na determinação de fases cristalinas em diferentes tipos de materiais. Isto é possível porque na maioria dos cristais os átomos estão ordenados em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Os resultados são apresentados através de Figuras contendo espectro de difração o nome do mineral codificado.

A partir da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar a morfologia das partículas do gesso através das fotomicrografias. Para isso, foram utilizadas amostras na forma de pó, no caso do gesso (A), (B) e (C). Os compostos identificados pela MEV, e registrados em microfractografias, são mostrados nas Figuras 4.46, e 4.47, 4.48. Nelas podemos verificar pela geometria em forma de agulhas se há em sua formação grandes quantidades de enxofre e cálcio muito provavelmente devido sua composição mineralógica que tem como origem a gipsita, cujo principal componente é o  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (sulfato de cálcio hidratado).

#### **4.7.1 - Ensaio de DTA e DTG**

Os resultados das análises térmicas de TG e DTA realizados são apresentados nas Figuras de 4.36 a 4.37, para os gessos oriundo da calcinação da gipsita (A) e dos resíduos de gesso de revestimento (B) e dos Resíduos de Placa (C) beneficiado, respectivamente.



**Figura 4.36** – Análise Térmica do Gesso Beta.

Em relação a Figura 4.36, foi possível observar que:

- os picos endotérmicos “A” (115°C); “B” (126°C) e “C” (219°C), gerados a partir dos resultados da análise térmica diferencial, representam a reação de formação da bassanita e anidrita III. SEBAHI *et al* (1997) interpreta esses picos como sendo modificações da estrutura cristalina do material. O primeiro pico corresponde à perda de água estrutural na temperatura de 115°C (“A”) e 126°C (“B”). Já o pico “C” 219°C corresponde à perda de água estrutural mais acentuada;

- o pico “D” (351°C) exotérmico se dá devido à transformação da anidrita solúvel (anidrita III) em insolúvel (anidrita II); - a partir dos resultados obtidos pela análise termogravimétrica pode-se observar uma perda de 0,95% da massa da amostra de gesso que se dá entre os limites considerados de temperaturas (23°C - 86°C e 86°C - 348°C); perda de massa 7,14% que se justificam estequiometricamente pela reação di-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )  $\rightarrow$  hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ). Essa perda de massa se dá

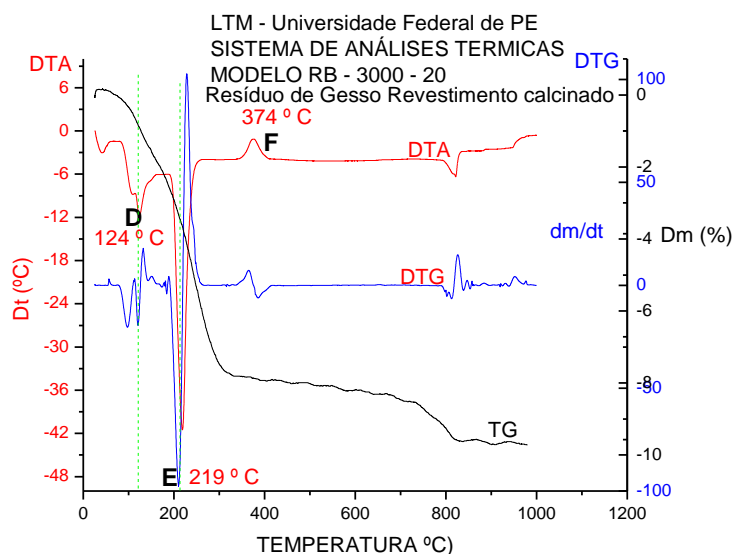
devido à perda de água livre e estrutural e/ou algum componente volátil da massa total da amostra que é de 9,19%;

- a curva correspondente à derivada da curva termogravimétrica (DTG) (a curva em azul), fornece os picos obtidos na curva da análise térmica diferencial.

A partir dos resultados de análise térmica definiu-se a temperatura a ser adotada no beneficiamento do gesso, no caso 126°C, viabilizando a obtenção da bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ), que é o mineral presente no gesso normalmente consumido pela indústria da construção civil.

A partir da Figura 4.37, para o resíduo revestimento beneficiado observa-se que:

- o pico “D” (124°C) representa a liberação do restante da água livre existente na amostra de resíduo revestimento. Já o pico referenciado pela letra “E” (219°C) se dá devido à transformação endotérmica de formação da anidrita III; - o pico exotérmico 374°C (“F”) é resultante da transição da anidrita III para Anidrita II;



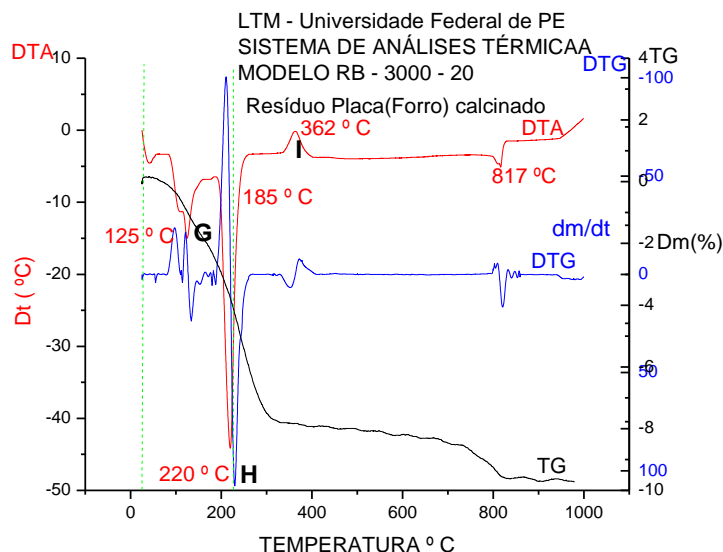
**Figura 4.37** – Análise Térmica do Resíduo Revestimento calcinado.



- perda de massa registrada é de 9,72%, um pouco maior do que no gesso beta, valor muito próximo ao da amostra de gesso.

A partir dos resultados das análises térmicas das amostras de resíduos de placa, Figura 4.38, é possível detectar:

- a presença de dois picos endotérmicos (“G” e “H”) que representam uma desidratação do resíduo de gesso placa (forro). Pelo fato do resíduo ser um produto obtido através de um processo que inclui a sua desidratação o pico “G” é pequeno se comparado com o pico “A” da amostra de gesso observado na Figura 4.36;



**Figura 4.38** – Análise Térmica do Resíduo Placa (forro), calcinado nas condições experimentais ótimas.

- a reação de formação da anidrita II se dá no pico “I” (362°C);
- a perda de massa na amostra de gesso foi de 9.63%, valor muito próximo ao da amostra do gesso beta.

A partir dos resultados obtidos através das análises térmicas (TG e DTA) das amostras foi possível observar a presença de grande concentração de água livre nas

amostras de gesso e resíduo de gesso revestimento e placa, desta forma, viabilizou-se estabelecer a temperatura ideal para efetuar o seu beneficiamento e desidratação em 140°C, já definidas através do código computacional FLUENT 12.0. A caracterização da contaminação dos resíduos por materiais orgânicos tais como desmoldantes, é imprescindível para um bom entendimento da reutilização e reciclagem deste tipo de resíduo e também por ter um papel importante no desempenho mecânico. É importante ressaltar que, a partir de um correto beneficiamento (peneiramento e desidratação), o gesso beta (A) e resíduos (B) e (C) adquirem propriedades que os tornam tecnicamente viáveis a ser reutilizáveis como material na construção civil.

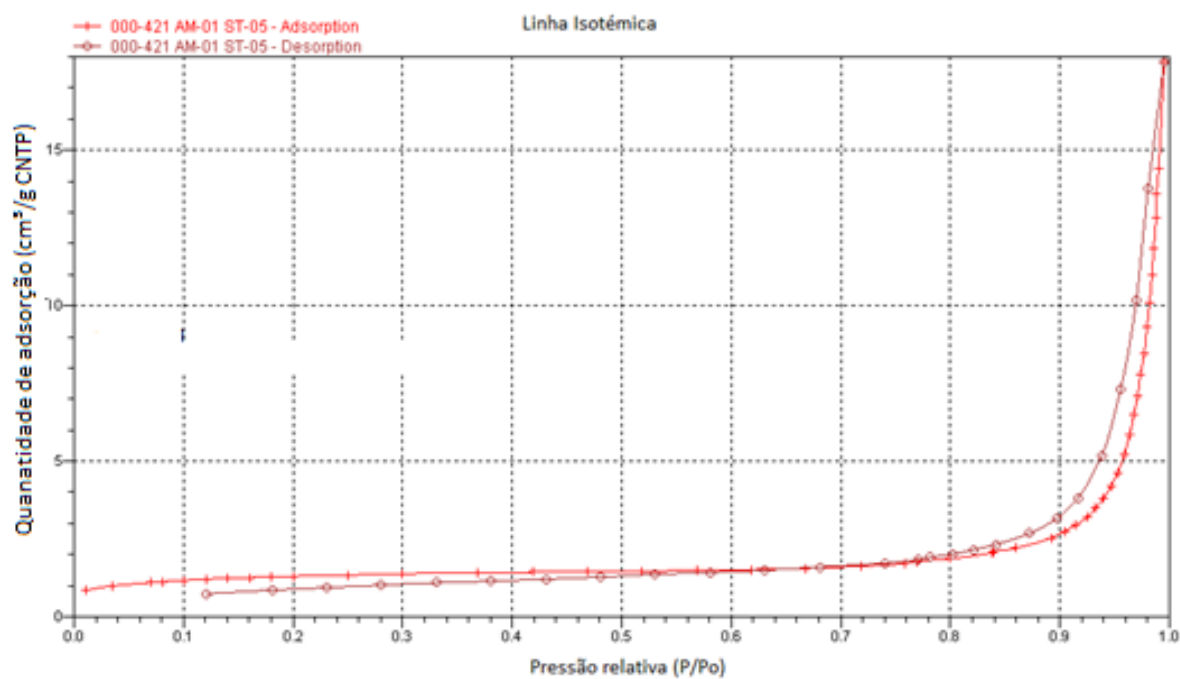
#### **4.7.2 – Área superficial e porosidade (Método BET)**

Os dados experimentais da área superficial, porosidade (tipo de poro e distribuição do tamanho de poro) e volume total de poros das amostras (*AM-2 gesso beta (A)*, *AM-1 resíduo revestimento (B)* e *AM-3 resíduo placa (C)*), foram utilizados adsorção, e dessorção física pelo método BET, cujos resultados estão listados na Tabela 4.26.

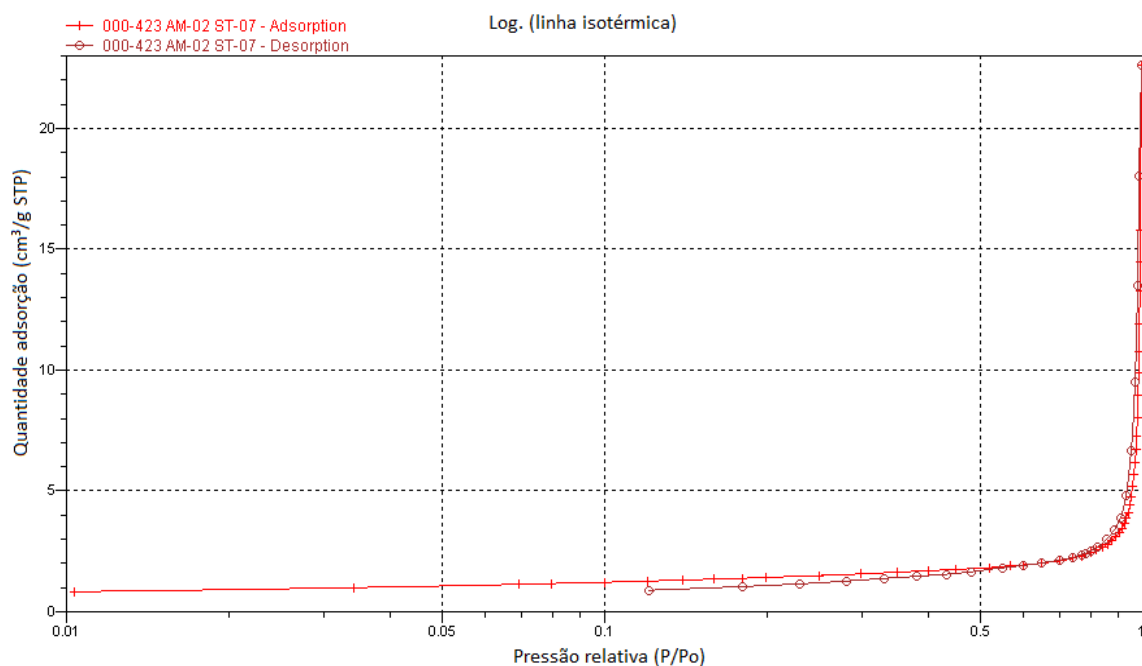
**Tabela 4.26** - Resultado de área superficial e porosidade das amostras de gesso (A), (B) e (C).

Amostras	AM-02 Gesso beta (A)	AM-01 Res. Revestimento (B)	AM-03 Res. Placa (forro) (C)
Área superficial (BET) (m <sup>2</sup> /g)	5.13	4.58	2.95
Área superficial (Langmuir) (m <sup>2</sup> /g)	7.12	6.26	4.08
Área superficial de poros cumulativo (adsorção BJH) (m <sup>2</sup> /g)	3.15	1.94	1.39
Área superficial de poros cumulativo (dessorção BJH) (m <sup>2</sup> /g)	4.71	3.60	2.26
Volume de poros cumulativo (adsorção BJH) (cm <sup>3</sup> /g)	0.023	0.021	0.011
Volume de poros cumulativo (dessorção BJH) (cm <sup>3</sup> /g)	0.028	0.021	0.010
Diâmetro médio de poro (adsorção BET) (Å)	130.01	148.341	122.725
Diâmetro médio de poro (adsorção BJH) (Å)	298.87	435.76	332.279
Diâmetro médio de poro (dessorção BJH) (Å)	237.66	238.29	190.462

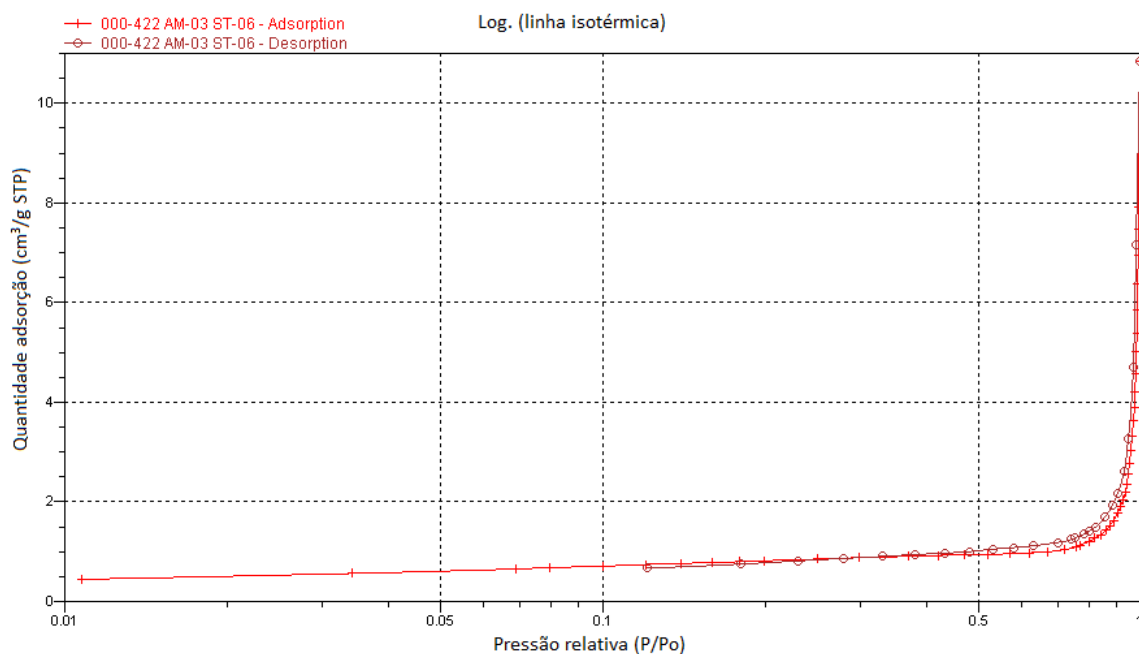
As isotermas das amostras *AM-2 gesso beta (A)*, *AM-1 (B), resíduo revestimento (B)* e *AM-3 (C), resíduo placa*, estão mostradas nas Figuras (4.39, 4.40 e 4.41). O perfil das isotermas permite concluir que as amostras estudadas podem ser classificadas como sendo fundamentalmente do tipo II (classificação BDDT) (BRUNAUER, 1940), que é característica de materiais com poros de tamanho no intervalo de 2,5 a 100nm (mesoporos) independente da volatilização. Todas as amostras apresentaram, também, uma pequena histerese, do tipo H<sub>3</sub> (classificação IUPAC) (SING, 1985), característica de material com poros abertos com formato tipo cone.



**Figura 4.39** - Isotermas de adsorção/dessorção das composições de resíduo revestimento com granulometria media de 45µm (Gesso (B)).



**Figura 4.40** - Isotermas de adsorção/dessorção das composições gesso Beta com granulometria media de 45µm. ( Gesso (A)).



**Figura 4.41.** Isotermas de adsorção/dessorção das composições resíduo placa com granulometria média de 45 $\mu$ m. (Gesso ( C ).

As partículas das amostras de gesso beta e resíduos revestimentos e placas tiveram as suas respectivas áreas superficiais mensuradas via adsorção e dessorção, sendo os valores dos respectivos volumes e diâmetro médio dos poros das amostras e área superficial descritas na Tabela 4.26. Os dados desta última mostram que a amostra de gesso beta (A) possui a maior área dos poros em comparação às outras e que o seu diâmetro dos poros superficial apresenta valores intermediários entre as duas amostras de resíduos estudados.

A Tabela 4.26 fornece outros dados de grande relevância, tais como: a densidade e a porosidade. O que pode se observar é que para se melhorar o resultado nos ensaios, tanto a porosidade quanto a densidade devem ser variadas. Ou seja, a absorção será melhor em materiais cuja densidade é elevada do que em matérias com

densidade baixa. O mesmo para a porosidade, quanto mais poroso o material, mais ele irá absorver, uma vez que a onda sonora penetra nos poros. Porém se o material tem a superfície lisa, ocorre reflexão e não absorção acústica. Porém, deve-se levar em conta que os poros reduzem a área da seção reta através da qual uma carga é aplicada, e atuam também como concentradores de tensão (CALLISTER, 2006). Por estes motivos, podemos concluir que a porosidade exerce um efeito negativo sobre a resistência a flexão. A relação água/gesso e o tipo de material são fatores determinantes na porosidade final das composições.

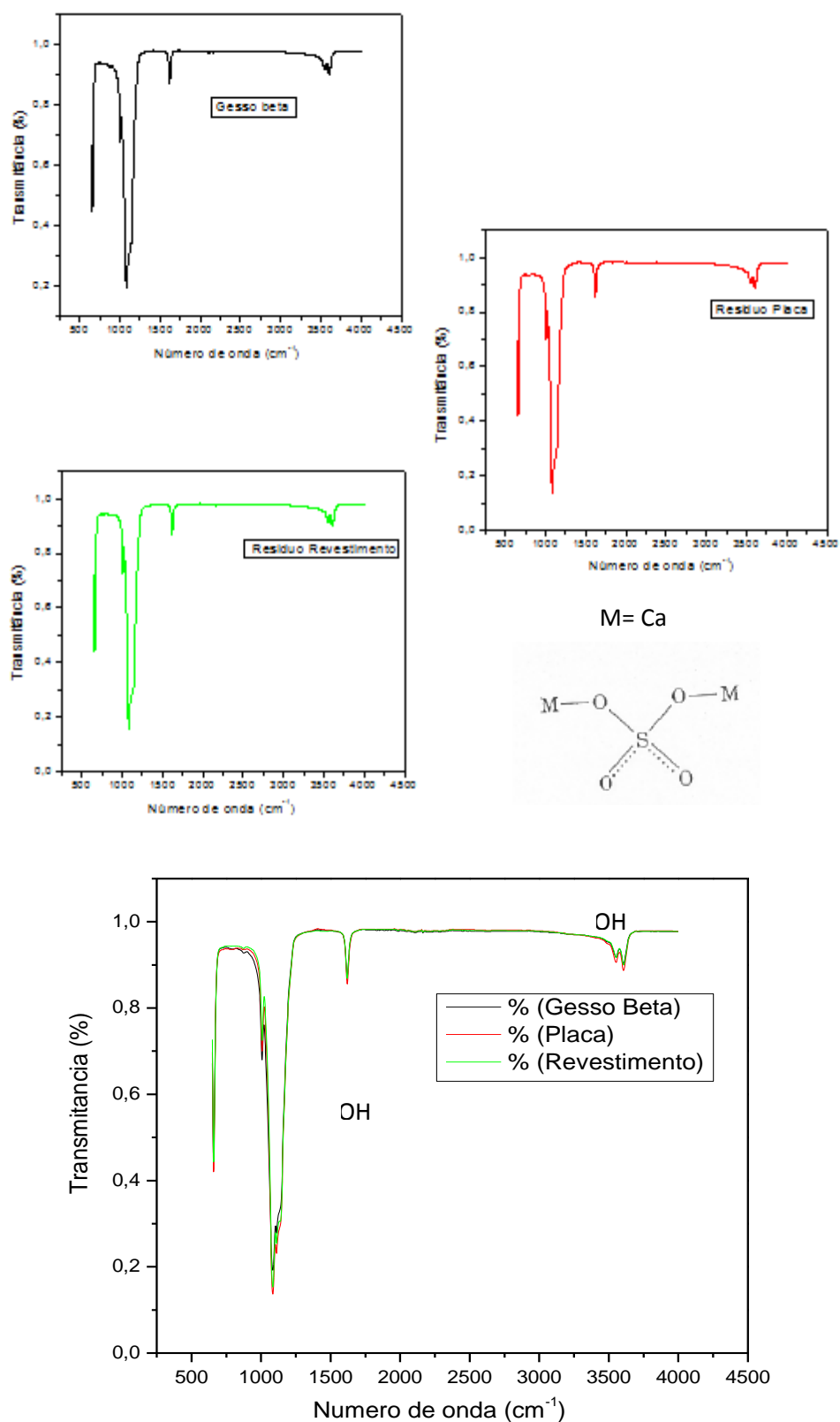
#### **4.7.3 - Espectroscopia de Infravermelho**

A espectroscopia na região do infravermelho permite identificar grupos funcionais presentes nas moléculas, bem como identificar a presença de impurezas e aditivos.

A análise por infravermelho foi utilizada neste trabalho para identificar a estrutura química do gesso beta (A), comparando-o com seus resíduos oriundos do revestimento (B) e resíduo de placa (C).

A Figura 4.42 apresenta bandas características do grupo sulfato e de hidroxila entre bandas de estiramento e deformações em (3608, 3552, 1620, 1084, 1008, 658)  $\text{cm}^{-1}$  (MANDAL E MANDAL, 2002).

Complexo com ponte bidentado:



**Figura 4.42** - Espectro na região do infravermelho do gesso Beta e Resíduos; Revestimento e Placa (forro) sendo observados os picos e superposição .

Através dos resultados da espectrometria de infravermelho por transmitância é possível concluir que tanto o gesso beta quanto os resíduos apresentam praticamente as mesmas bandas, havendo no espectro em destaque acima, quase uma superposição das mesmas.

**Tabela 4.27** - Correlação entre a frequência de vibração na região do infravermelho e a espécie química.

<b>Espécie química</b>	<b>Frequência de vibração do grupo (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tipo de vibração</b>
O-H (agua)	3608	Estiramento v(OH)
O-H	3552	Estiramento v(OH)
O-H	1620	Deformação δ(OH)
SO <sub>4</sub>	1084	Estiramento v(SO <sub>4</sub> )
SO <sub>4</sub>	1008	Estiramento v(SO <sub>4</sub> )
SO <sub>4</sub>	658	Deformação δ(SO <sub>4</sub> )

A diferença entre as amostras é quase imperceptível nas bandas de absorção de água do espectro de infravermelho. Os resultados apresentados não indicaram que as impurezas contidas nas amostras de resíduos do gesso sejam significativas.

#### 4.7.4 - Difratometria de Raios X (DRX)

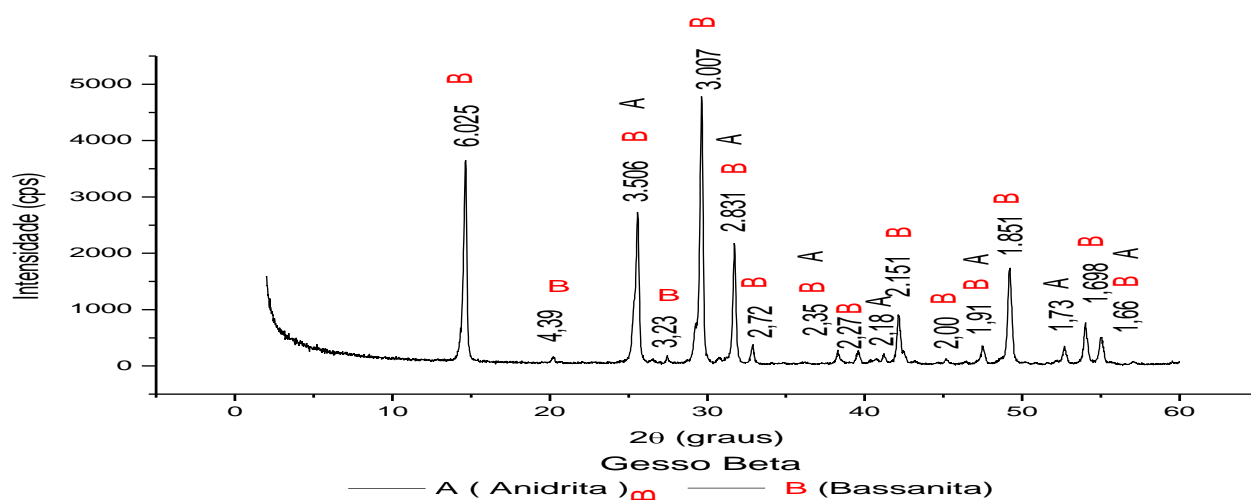
A caracterização mineralógicas das matérias primas realizadas pela técnica de difração de raios X (DRX), para identificação das substâncias cristalinas é apresentada através dos difratogramas nas Figuras 4.43, 4.44 e 4.45.

Ao serem analisadas por difração de raios-X, as substâncias cristalinas apresentam picos com intensidade característica que é função do ângulo de incidência dos raios X. Através destes picos é possível determinar que substâncias estejam

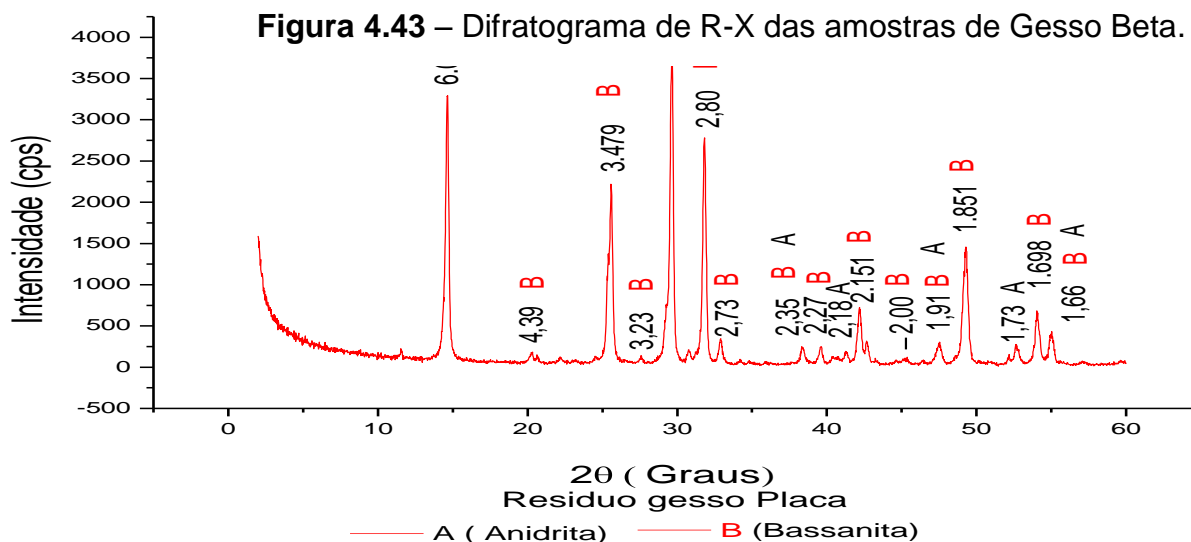


presentes na amostra. A identificação dos minerais foi feita de acordo com a base de dados Power Diffraction File (ICDD, 1995).

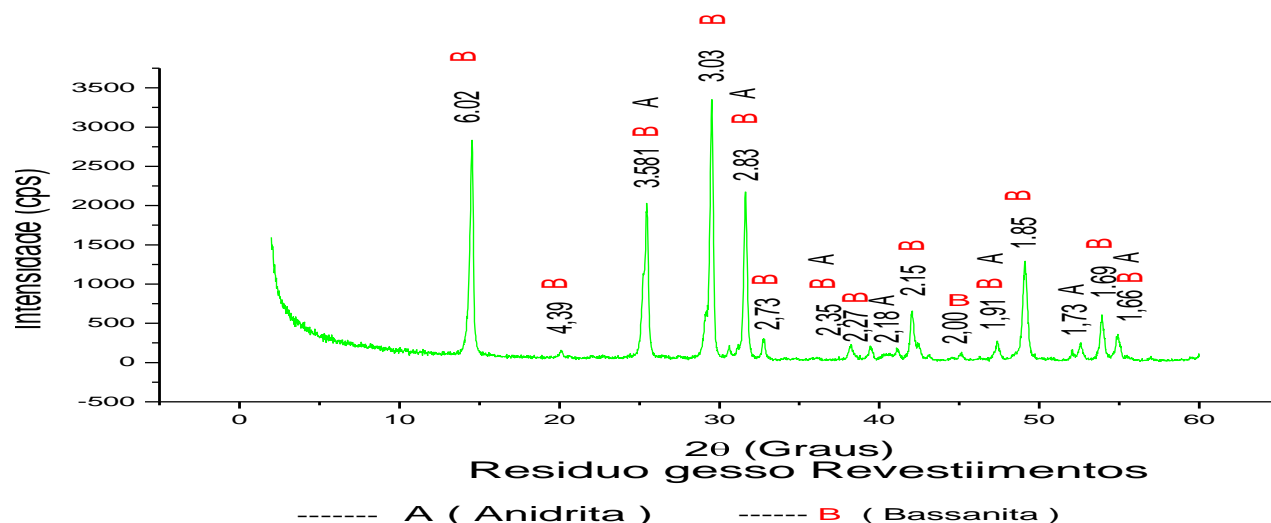
Os difratogramas dos gessos (A), (B) e (C) demonstram que as amostras são compostas essencialmente por hemidratos, pois foram identificados os picos característicos de bassanita, B ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). Também foram detectados traços de anidrita, A ( $\text{CaSO}_4$ ).



**Figura 4.43 – Difratograma de R-X das amostras de Gesso Beta.**



**Figura 4.44 – Difratograma de R-X das amostras de Resíduo Gesso Revestimento 100%.**



**Gráfico 4.45** – Difratoograma de R-X das amostras de Resíduo Placa 100%.

É notório, a partir da obtenção dos Difratoograma de R-X de raios X, apresentaram as mesmas fases compostas pelas das amostras do gesso beta quanto a dos resíduos revestimento e placa (Forro) caracterizam-se pela presença de fases cristalinas, originando, assim, dos minerais bassanita e anidrita (marcadores digitais em preto e vermelho) Figuras 4.43, 4.44, 4.45.

Na amostra do gesso beta (A), pode-se observar a predominância de picos característicos da bassanita  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , mineral na fórmula de sulfato de cálcio hemihidratado, ou seja, composto por meia molécula de água. Em relação às amostras referenciadas como resíduos de gesso beneficiados, submetida a aquecimento em temperatura de  $140^\circ\text{C}$  durante 1 hora, não houve também uma alteração dos picos característicos, com ocorrência do mineral bassanita, composto por 0,5 moléculas de água.

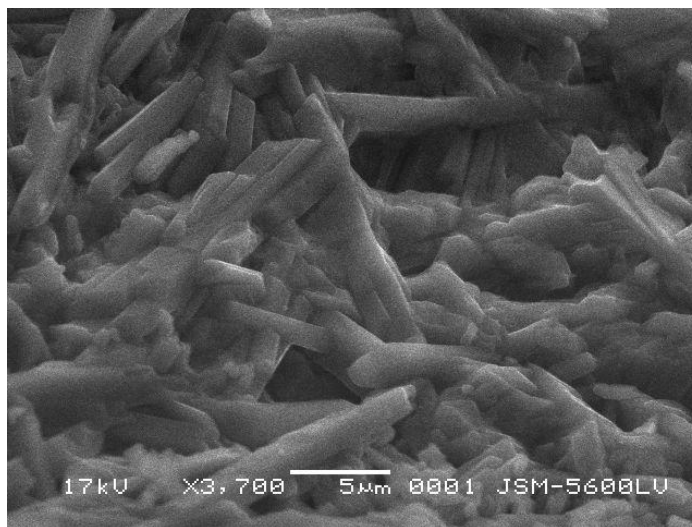
A presença de traços de anidrita  $\text{CaSO}_4$ , (marcadores pretos) pode ser um indicativo de que a temperatura de combustão possa ser ligeiramente superior àquela onde a bassanita é estável.

É importante observar a coincidência dos picos do gesso (A) e resíduos após o beneficiamento (B) e (C). Isso se dá devido à perda de água e, conseqüente, mudança de fase da gipsita, como também para bassanita presente no gesso beta (A) e resíduos beneficiados (B) e (C).

Nos difratogramas do gesso oriundos beta (A) e dos resíduos de revestimento (B) e de placa, (C) pode se constatar que a principal fase cristalina é a bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ).

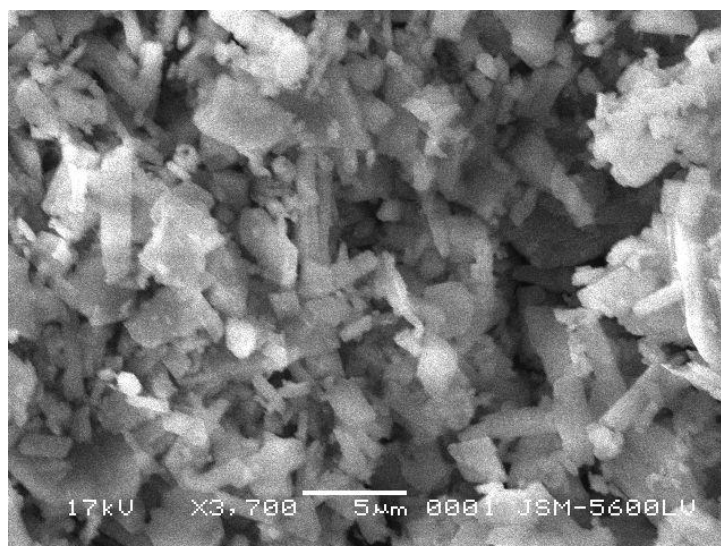
#### 4.7.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) do pó de gesso beta (A), após sua hidratação, apresentou morfologia caracterizada por estruturas lamelares e cristais em formas de agulhas (figura 4.46).

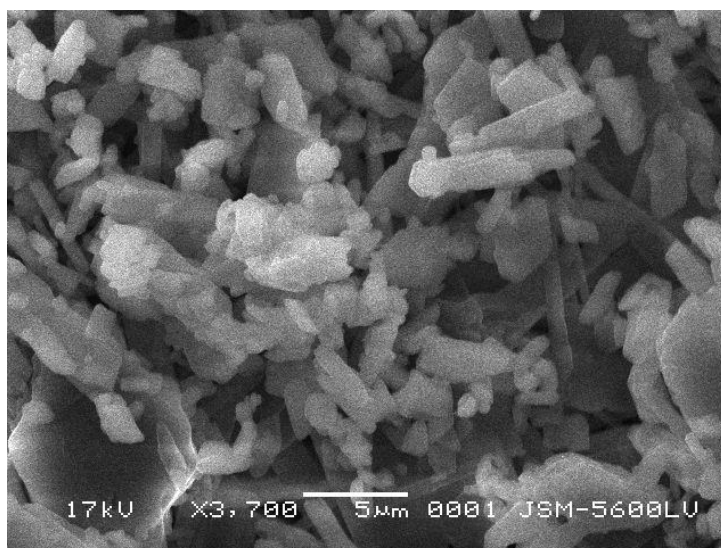


**Figura 4.46** – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó de gesso beta (A).

A fotomicroscopia do gesso beta (A) da Figura 4.46 foi comparada com as fotomicroscopias ampliadas em 3700 vezes, dos gessos oriundos dos resíduos de revestimento (B) e placa (C), representadas nas Figuras 4.47 e 4.48. Observa-se que apesar de se tratar de resíduos, encontra-se características semelhantes entre as micrografias. Alguns cristais de gesso apresentaram-se na forma de agulhas finas, conferindo assim a esse tipo de semi-hidrato um espaço intersticial entre cristais, com melhoria então da resistência mecânica do material produzido.



**Figura 4.47 - MEV dos resíduos de revestimento (B),**



**Figura 4.48 – MEV dos resíduos de Placa (C).**

As composições contendo resíduos apresentam uma maior porosidade e uma superfície mais irregular que as amostras de gesso beta (A) na medida em que seus traços possuem maior proporção de água. Isso se dá pelo fator água/gesso que é proporcional a porosidade, ou seja, com o aumento desse fator, há um aumento da porosidade das amostras. A alta porosidade afeta diretamente a resistência mecânica dos produtos confeccionados com os resíduos de gesso beneficiados.

Verifica-se, ao comparar as micrografias expostas nas Figuras 4.46 gesso beta (A) e Figuras 4.47, 4.48 resíduos revestimento (B) e placa (C), que os materiais são morfologicamente parecidos. A amostra de gesso beta (A) apresenta cristais aglomerados com formas mais definidas e superfícies mais maciças e densas, com aspecto sintetizado após calcinados.

Já os resíduos gesso(B) e gesso (C) apresentam grãos um pouco irregulares com aspecto de superfície estrelada.

Conforme dados das tabelas apresentando as resistências à compressão e flexão, dureza e aderência, nos resíduos de gesso (B) e (C), em comparação com o gesso beta (A), apresentam um bom padrão de comportamento: com a consistência estabelecida, bem como retardos no início e fim de pega.

As fotografias obtidas por meio de microscopia de varredura eletrônica, com um fator de ampliação de 3700 vezes, comprovaram as condições básicas adequadas para produção de resíduos (B) e (C) quando comparados com o gesso (A), em que se atêm as especificações requeridas pela norma de qualidade da ABNT. Os resultados atestam e confirmam as análises anteriormente realizadas, através dos ensaios de análise química.

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 5.1 Conclusões

Os experimentos do presente trabalho de pesquisa foram embasados na hipótese de que resíduos de gesso provenientes da construção civil poderiam ser calcinados e disponibilizados como material novo, sem que os mesmos perdessem características físicas e mecânicas, em relação ao gesso oriundo da gipsita, calcinados uma única vez. Para tanto foram utilizados os recursos disponíveis em matéria de equipamentos, como um forno rotativo contínuo em escala piloto para calcinação do dihidratado, e um conjunto de técnicas de caracterização dos materiais sólidos envolvendo análises químicas, físicas e mecânicas, executadas em equipamentos de última geração.

Numa etapa preliminar, considerando o gás natural como fonte térmica, foram realizados estudos de simulação numérica da combustão deste gás no forno considerando o gás natural como fonte térmica no forno rotativo contínuo, adotando a fluidodinâmica computacional – CFD com uso do software FLUENT 12.0. Com os resultados obtidos, foi possível concluir que a combustão ocorre essencialmente na primeira metade do forno, e que, na segunda, a temperatura das paredes diminui por causa da radiação térmica. Averiguou-se que esta situação é significativamente influenciada por um sistema de arrefecimento, pela evaporação da água através da coluna de lavagem dos gases efluentes do forno, e pela radiação térmica das paredes dos compartimentos.

Numa etapa seguinte, foram abordados estudos de desidratação térmica (sob pressão atmosférica) da gipsita e dos resíduos de gesso de revestimento e resíduos de gesso de placa, na planta piloto. Com os resultados obtidos, é possível concluir que:

- Em relação ao efeito da velocidade de rotação do forno, para uma vazão mássica do sólido reacional de 120 kg/h e uma temperatura de combustão de 500°C, observou-se que o aumento da velocidade de giro do cilindro de 1 a 3 rpm resultou na produção de hemidratos com altos valores percentuais de Grau de Hidratação, em torno de 9%, fora do intervalo de variação previsto pela norma;
- Em relação ao efeito da temperatura no queimador do forno, mantendo a vazão mássica do sólido reacional a 120 kg/h e a velocidade de giro do cilindro a 3 rpm, evidenciou-se que o nível mais baixo da temperatura de combustão (400 °C) não forneceu quantidades suficientes de energia para produção de hemidratos com Grau de Hidratação entre 4,20% e 6,20% (exigências normativas). Para o nível médio e alto, 450°C e 500°C, respectivamente, foram obtidos altos percentuais de conversão, e Grau de Hidratação 5,8%, conforme as exigências normativas;
- Em relação ao efeito da vazão de alimentação de sólido reacional, mostrou-se que o aumento da vazão mássica do sólido de 100 kg/h a 120 kg/h requer o aumento da quantidade de energia fornecida ao sistema de combustão (temperatura de controle da combustão) e/ou diminuição da velocidade de rotação do cilindro;
- Através das superfícies de resposta geradas com a aplicação do software Statistica 7.0, foram identificadas as condições ótimas de calcinação no forno,

ajustando as variáveis de controle com os seguintes valores: temperatura de controle da combustão de 500°C, velocidade de rotação do cilindro de 3 rpm e vazão de alimentação de sólido de 120 kg/h;

- O modelo obtido para otimizar a calcinação e explicar o Grau de Hidratação em função da velocidade de rotação do cilindro, temperatura de controle da combustão e vazão de alimentação de sólidos apresentou coeficiente ( $R^2$ ) satisfatório, obtendo 98,40% da variância nos experimentos, com coeficiente de ajuste de 95,77% para os experimentos;
- A determinação do tempo de residência médio da carga no interior do forno de 17,2 min foi, portanto, adequado para se garantir um processo de calcinação da gipsita e resíduos de gesso de revestimento e resíduos de gesso de placa, permitindo que todas as reações ocorram normalmente;
- O processo de calcinação atinge seu regime permanente de funcionamento do forno na temperatura 140°C após 21min., 26 min. e 28 min., respectivamente para a calcinação da gipsita, dos resíduos de gesso de revestimento e dos resíduos de gesso de placa;
- A análise granulométrica dos materiais produzidos foi expressa em termos do diâmetro médio das partículas permitindo a escolha de tamanhos médios ótimo. Assim o gesso oriundo da gipsita (A) teve faixa granulométrica de 420  $\mu\text{m}$ , enquanto para os gessos provenientes da calcinação dos resíduos de revestimento (B) e dos resíduos de placa (C) foi estabelecido tamanho em peneira de 210  $\mu\text{m}$ . Essas granulometria nas amostras de gesso de resíduos de revestimento (B) e de resíduos de placa (C) enquadram-se na categoria de



gesso fino para revestimento e gesso fino para fundição, visto que teve um módulo de finura igual a 0,541, atendendo assim a exigência da norma regulamentadora NBR 12127;

- Com base nas análises químicas obteve-se o limite de água livre registrado, que se encontra dentro da referência normativa (NBR 13207) com valor máximo de 1,3%. No hemidrato analisado, a quantidade de  $(\text{CaO} + \text{SO}_3)$  é inferior ao limite normativo de 91% (NBR 13207);
- Com vistas à avaliação da consistência do gesso oriundo da gipsita (A), resíduos de revestimento (B) e resíduos de placa (C) foi utilizada a penetração de cone em 31 mm, 30 mm, 29 mm, respectivamente. Conclui-se então que a consistência de 0,70 é o valor que mais se adequa aos resultados obtidos no tempo de início e fim pega na manipulação das amostras, atendendo assim as recomendações das normas NBR 13207 e NBR 12127.
- Os resultados de medição da resistência mecânica à compressão realizada em corpos de prova, obtiveram em suas propriedades mecânicas valores acima de 8,4 MPa (exigido pela NBR 13207). Nenhum resultado encontrado diferiu mais do que 15% da média calculada, de modo que as séries foram consideradas válidas.
- A média da resistência à tração na flexão gerou como resultado um valor de 34,7 kgf/cm<sup>2</sup> enquanto que a norma NBR 12775 estabelece um mínimo de 30,0 kgf/cm<sup>2</sup>, confirmando que os resíduos conferem ductilidade aos corpos de prova na resistência à flexão;

- Os valores da dureza Shore C de 74, 65, 61 para gesso oriundo da gipsita (A), dos resíduos de revestimento (B) e resíduos de placa (C), respectivamente, encontram-se acima do padrão mínimo exigido pela norma CENT/TC 241 que é de 60;
- A resistência de aderência envolveu um valor médio em torno de 0,33 MPa, maior do que aquele exigido pela norma NBR 13528. O citado valor foi obtido com aplicação do revestimento utilizando-se o traço entre água /pasta = 0,70.
- Na sequência dos resultados das análises térmicas (DTG e DTA) das amostras dos materiais foi possível observar a presença de grande concentração de água livre no do gesso oriundo da gipsita (A) e dos resíduos (B) e (C); e desta forma, viabilizou-se estabelecer a temperatura 140°C, ideal para efetuar o seu beneficiamento e desidratação;
- Com a aplicação do método de BET, evidenciou-se que a área superficial 5,13 m<sup>2</sup>/g do gesso oriundo da calcinação da gipsita (A) é maior que aquelas obtidas com os gessos provenientes da desidratação térmica dos resíduos de revestimento (B) e de placa (C);
- A partir dos espectros do infravermelho, a presença de água nas amostras pode ser detectada através do aparecimento das bandas 3608 cm<sup>-1</sup> e 3552 cm<sup>-1</sup>; não se observou diferença significativa entre as amostras das bandas de absorção de água do espectro de infravermelho, havendo quase uma superposição das mesmas; os resultados apresentados não indicaram nenhuma impureza contida nas amostras;

- Nos difratogramas de Raios X (DRX), se observaram coincidência na intensidade dos picos identificados para as fases bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) e anidrita, ( $\text{CaSO}_4$ ), após o beneficiamento;
- Fotografias com microscopia eletrônica de varredura (MEV), sob ampliação de 3700 vezes, evidenciaram que alguns cristais nas amostras analisadas apresentaram-se sob forma de grãos irregulares para resíduos com aspecto de superfície estrelada, e para o gesso beta apresenta cristais aglomerados com formas mais definidas e superfícies mais maciças e densas, com aspecto sintetizado conferindo, assim a esses tipos de hemihidratos um espaço intersticial entre cristais reduzidos, caracterizando a semelhança entre as micrografias, conferindo mesma morfologia dos materiais analisados.

Em suma, com base nos resultados obtidos, foi comprovada a viabilidade técnica de reciclar resíduos de gesso de revestimento e placas da construção civil por meio de uma nova calcinação desses produtos. Destaca-se então como consequência a resolução do CONAMA 307/2002 pode ser modificada, revertendo o enquadramento para resíduos de gesso como passíveis de reciclagem.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando o domínio adquirido no contexto das técnicas de processamento térmico dos materiais estudados são propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver o tratamento de outros tipos de Resíduos de Gesso da Construção (RGC), tais como: bloco, sanca, roda teto entre outros, verificando o custo *versus* benefícios da produção de novo gesso com a variação da matriz energética (BPF estilhas de madeira, pó de hulha entre outros);
- Promover um estudo de desenvolvimento complementar para a utilização dos resíduos de gesso na própria obra como uma carga misturada ao gesso natural sem a necessidade de calcinação, para revestimento e piso;
- Investigar misturas de resíduos de gesso de obras misturados a outros materiais (resina, plásticos entre outros) para obtenção de novos produtos;
- Efetuar comparativos de uma análise quantitativa da geração da gipsita calcinada e resíduos sólidos de gesso em proporções variadas de 25%, 50% e 75%.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2010.

AFNOR - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **CEN/TC 241 123 F: Carreaux de Plâtre: Définitions – Spécifications – Méthodes d'essais**. Paris 1994.

AGUIAR, G. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. 310 f. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ANGELERI, F. B.; CARDOSO, S. R.; SANTOS, P. S. As gipsitas brasileiras e sua aplicação como gesso na indústria cerâmica; Descrição dos métodos utilizados para seu estudo e caracterização, Parte I, - ensaios químicos, **Cerâmica**, São Paulo 28 (156) dez, 1983.

ANTUNES, R. P. N.; OLIVERIA, C. T. A.; JOHN, V. M. Trabalhabilidade em obra, consistência e calor de hidratação das pastas de gesso. *In*: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, III. Vitória, 1999. Anais, Antac, Vitória, 1999 a, v. 1, p. 95-106.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12127: Gesso para construção civil: determinação das propriedades físicas do pó**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12128: Gesso para construção civil: determinação das propriedades físicas da pasta.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12129: Gesso para construção civil: determinação das propriedades mecânicas.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12130: Gesso para construção civil: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13867: Revestimento interno de paredes e tetos com pasta de gesso – Material preparo, aplicação e acabamento.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5734: Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico.** Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004; Resíduos sólidos - classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12775: Placas lisas de gesso para forro – determinação das dimensões e propriedades físicas.**

Rio de Janeiro, 1992.

BALTAR, L.; ALENCAR, C.; MIRANDA, L. F. R. Avaliação da Reciclagem de Resíduos de Gesso em Canteiro de Obra do Recife. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA APLICADA PARA A ARQUITETURA E ENGENHARIA SUSTENTÁVEIS, 2008, Olinda. Anais... Olinda, Sinaenco, 2008.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Diagnóstico do pólo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para a fabricação de cimento.** UFPE - Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia de Minas. 2003. p.1-10.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. Variedades mineralógicas e processos utilizados na produção dos diferentes tipos de gesso. In.: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Anais. Florianópolis, 2004.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2001. 448 p.

BAUKAL, C. E. **The John Zink Combustion Handbook.** Oklahoma: CRC Press, 2000.

BEÉR, M. J., CHIGIER, N. A. **Combustion Aerodynamics.** London: Applied Science Publishers LTD, 1972. 264p.

BEZERRA, H. J. **Tratamento dos resíduos de gesso da construção e da demolição para a produção de gesso beta reciclado.** Dissertação apresentada ao Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE 2010. 103 p.

BIRD, A. L.; BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT; E. N. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons, 780 pg., 1960.

BORBELY, A. M.; KREIDER, J. F. **Distributed Generation**, Washington D. C.: CRC Press, 2001.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases, **J. Amer. Chem. Soc.**, 62, 1723 (1940).

BRANDÃO, P. R. G. **Métodos de Instrumentação e Análise**. Apostila do curso de pós graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, 2004. 127 p.

CALLISTER JR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. P. 91 – 113, 132 – 176.

CAMPBELL, Steve Lead by Example Walls and Ceiling. Posted on: 03/05/2003. [http://www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP\\_Features\\_Item/0,3299,93761,00.html](http://www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,3299,93761,00.html).

CAMPOS, H.K. et al. Programa para correção das deposições e reciclagem de resíduos em Belo Horizonte. **In**: Seminário Reciclagem de resíduos para a redução de custos na Construção Habitacional. Belo Horizonte, 1994. p.56-65.



CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção.** Trabalho do curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. 154p.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de Revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** Boletim do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), n.68. São Paulo: IPT. 1995.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. **O gesso como material de construção – composição química (1ª parte).** In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Tecnologia das Edificações. São Paulo, 1985b. p. 23-26.

CIWMB (California Integrated Waste Management Board) **Drywall Recycling.** 01/09/03 <http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/factsheets/Drywall.htm#Economics>.

CLIFTON, J.R. **Some aspects of the setting and hardening of gypsum plaster.** In: Technical Note n. 755, NBS - National Bureau of Standards. 1973 *apud* ANTUNES, R. P. N. 2002.

COATES J. **Interpretation of infrared spectra, a practical approach.** Encyclopedia of Analytical Chemistry, R.A. Meyers (ed.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.

CONAMA, (Conselho Nacional do Meio Ambiente), Resolução 431, 24 de maio de 2011. *Altera o art. 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso, de Resíduo tipo C para Resíduo tipo B.* Maio, 2011.

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

CORREA, S. M.; SHYY, W. Computational Models and Methods for Continuous Gaseous Turbulent Combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**. Vol. 13. pp. 249 – 292, 1987.

COZZI F., COGHE A. Behavior of Hydrogen-Enriched Non-Premixed Swirled Nature's Gas Turbines, **International of Hydrogen Energy**, Volume 3, Issue 6, pp. 669-677, 2006.

CRAYA, A, CURTER , R. Sur l' evolution d' un jet en espace confine, *Comp. Rend.*, vol 241, 1955.

CUNHA, A. B.; BARBOSA, M. S. C.; FELISMINO, D. C.; DANTAS, I. C. **Consumo da Lenha na calcinação da gipsita e impactos ambientais no pólo gessoeiro da mesorregião do Araripe – PE**. UFPE - Universidade Estadual do Pernambuco, 2005.

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

DANCKWERTS, P. V. CONTINUOUS FLOW SYSTEM: Distribution of Residence Time, **Chemical Engineering Science**, 2, 1-11, 1953.

DAVIDSON, L. **An Introduction to Turbulence Models**, Publication nº 97/2 *Department of Thermo and Fluid Dynamics*, Chalmers University of Technology, Goteborg, Suécia , 48 p, 2003.

FISCHER, B.; HENNING, O. Investigating the relationship between the stiffening and the electrical conductivity of gypsum plaster mixtures with additives. **Zement - Kalk - Gips**, n. 8, p. 452-455, 1994.

Fluent Inc. **User's Guide**. 2006.

FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999. 839P.

FULLER E. J.; SMITH C.E. **CFD Analysis of a Research Gas Turbine Combustor Primary Zone**. AIAA – 94 – 2768, 30<sup>TH</sup> *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, IN, USA, 1994.

GERARD, H. Measurement of temperature and time behavior for evaluating gypsum hydration characteristics. **=HPHQW.DON\*LSV**, n. 8, p. 426-429, 1991.

GOSSELIN P.; DECHAMPLAN A.; KALLA S.; KRETSCHMER, D. Three Dimensional CFD Analysis of a Gas Turbine Combustor, AIAA 2000-3466, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama, USA, 2004.

**Gypsum Recycling International**. Disponível em: <[www.gypsumrecycling.biz](http://www.gypsumrecycling.biz)>. Acesso em: 16 maio. (falta hora) 2006.

HINCAPIÉ, A. M.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Ambiente construído**, São Paulo, 1997. p.7-17. Semestral. ISSN - International Standard Serial Number 1415-8876.

ILBAS, M.; CRAYFORD, A. P.; YILMAZ, I.; BOWEN, P.J.; SYRED, N. Laminar-Burning Velocities of Hydrogen-Air and Hydrogen-Methane-Air Mixtures: an Experimental Study, **International Journal of Hydrogen Energy**, , 2006, p. 1768-1779.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Reciclar para Construir**: alternativas de gestão do resíduo de gesso. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

JOHN, V. M.; ANTUNES, R. P. N. **Argamassas de gesso. “No prelo”**. 1999.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: origin and properties. **Materials and Structure**, n. 28, 1995, p. 92-100.

KLOPROGGE, J.T.; FROST, R.L. Raman microscopy at 77K of natural gypsum  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . J. **Materials science letters**, 19, 229-231, 2000.

LAUNDER , B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computations of turbulent flows, Comput. **Meth. Appl. Mech. And Engeng.**, Vol. 3, pp. 269 – 289, 1974.

LEFEBVRE, A. H.; REID, R. The influence of turbulence on the structure and propagation of enclosed flames. **Combustion and Flame**, 10, 355-366, 1966.

LEE D., YEH C.; TSUEI Y.; JIAG W.; CHUNG, Y. **Numerical Simulation of Gas Turbine Combustor Flame**, AIAA 90-2305, 26<sup>th</sup> AIAA/SAE/ASME/ASEE *joint Propulsion Conference*, July 16-18, Orlando, FL, USA, 1990.

LEVESNPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2000.

LOUIS, J. J.; KOK J. B. W.; KLEIN, S. A. Modeling and Measurements of a 16- KW Turbulent No adiabatic Syngas Diffusion Fame in a Cooled Cylindrical Combustion Chamber , **Combustion and Flame**, Volume 125 , issues 1 - 2, pp. 1012 – 1031, 2001.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster – Part I – The hydration of calcium sulphate hemihydrate. **Journal of Material Science**, v. 29, p. 5279-84, 1994a.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster – Part II – The development of microstructure and strength. **Journal of Material Science**, v. 29, p. 5524-28, 1994b.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster – Part III – The effect of additives and impurities. **Journal of Material Science**, n 29, p. 6085-90, 1994c.

LUDWING, U.; SINGH, N. Hydration of hemidrate of gypsum and its supersaturation. **Cement and Concrete Research**, v. 18, p. 291-300, 1978.

MAGNAN, M. Mecanisme et cinétique de l'hydratation du plâtre. Revue des **Matériaux de Construction**.n. 671, p. 28 -31, 1973.

LINHALES, F. **Caracterização do gesso**. 22 f. Trabalho curso de pós-graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

Lixing, Z. **Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion**, Science Press, 231p, 1993.

LOUIS, J. J.; KOK, J. B. W.; KLEIN, S. A. Modeling and Measurements of a 16-KW Turbulent Nonadiabatic Syngas Diffusion Flame in a Cooled Cylindrical Combustion Chamber, **Combustion and Flame**, Volume 125, Issues 1 – 2, pp. 1012 – 1031, 2001.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A. **Gipsita: balanço mineral brasileiro 2001**. Brasília: DNPM <http://www.dnpm.gov.br/Balanço01/pdf/gipsita.pdf>

LYCKAMA N. J. A. , KOMEN E. J., HERMANNNS R. T. E., GOEY L. P. H., VAN BEEK M. C., VERHAGE A. J. L. ( 2002), “ **CFD Modeling of Biogas Co Firing In A Gas Turbine**”, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, Power for Land, Sea and Air, Amsterdam, The Netherlands, GT 2002 – 30103, June 03-06.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C., DANTAS, J. R. A. **Gipsita - Balanço Mineral Brasileiro 2001**, Ministério das Minas e Energia, Brasília, 2002.

MAGNAN, M. Mecanisme et cinétique de l'hydratation du plâtre. **Revue des Matériaux de Construction**. n. 671, p. 28-31, 1973.

MANDAL, P. K; MANDAL, T. K. Anion water in gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and hemihidrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). **Cement and Concrete Research**, n. 32, p. 313-312, 2002.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 463 p, 2003.

MONTEIRO, J. H. P.; ZVEIBIL, V. Z. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MURAT, M.; PUSZTASZERI, L.; GREMION, M. A preliminary survey of the correlation between the crystalline structure and hardened gypsum plasters. **Materials and Building Research**, p. 254 – 270, 1970.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Engenheiro Salvador E. Giammusso. 2.ed. ver. São Paulo: Pini, 1997.

NOLHIER, M. **Construire em plâtre**. Paris: L'Harmattan, 1986.

OLIVEIRA, C. A. S. **Comportamento físico e avaliação micro estrutural de argamassas produzidas a partir da mistura exaurida gerada na indústria de magnésio metálico**. 2004. 151 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Escola de Engenharia, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 1985.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A., **Gesso: produção e utilização na construção civil** – SEBRAE – Serviço Brasileiro de apoio as micro e pequenas empresas, Recife, 2008.

PARENTE J., ANISIMOV G. M. V. V., CROCE G., Micro Gas Turbine Combustion Chamber Design and CFD Analysis, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, Power for Land , Sea and Air , June 14 – 17, Vienna, Austria, GT 2004 – 54247, 2004.

PETRUCCI, E. **Materiais de construção II**. Documento de apoio nº10. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, IST - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. 1992. p. 1487-1559.

THIERRY, P.; VEYNANTE, D. ***Theoretical Numerical Combustion***. 2nd. Philadelphia: Edwards, 2005.

RANADE, V. **Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering**. Pune: Academic Press, 2002.

RAYLEIGH, L. On the instability of jets. **Proc. London Math. Soc.** 10, 4-13, Scientific papers, Cambridge University Press, Vol.1, pp. 361-371, 1978.

RAYLEIGH, L. **On the stability or instability of certain fluid motions**. Proc. London. 1980.

REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. Philos. Trans. R. Soc., London 186, pp. 123-161, 1984.

RIDGE, M. J. Effect of temperature on the rate of setting of gypsum plaster. **Nature**, v. 184, n. 47, p. 47-48, 1959.

MACMULLIN, R. B.; WEBER, M. The theory of short-circuiting in continuous-flow mixing vessels in series and kinetics of chemical reactions in such systems. **Transactions of American Institute of Chemical Engineers** 31 (2): 409-458, 1935.

REYNAUD, P.; SAÂDAOUI, M.; MEILLE, S.; FANTOZZI, G. Water effect on internal friction of set plaster. **Materials Science and Engineering A** 442, 500-503, 2006.



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

RICOU, F. P; SPALDING, D. B. Measurements of entrainment by axssymetrica turbulent jets. **J. of Fluid Mechanics**. **11**, 25 – 32, 1961.

SANTOS, G. O. **Analise Histórica do Sistema de Gerenciamento de Resíduos de Fortaleza como subsídio às Praticas de Educação Ambiental**. Monografia de Especialização, Universidade Estadual do Ceará – UECE, Centro de Ciências e Tecnologia, Fortaleza, 2007.

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

SATO, N. M. N.; ANTUNES, R. P N.; JOHN, V. M. Influência da porosidade nos processos de fixação e transporte de água em pastas de gesso. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 4., 2001, Brasília. Anais... Brasília: Universidade de Brasília, 2001. p.485 - 497.

SATO, Michele. **Educação Ambiental**. Editor: Santos, J.E., São Carlos: RIMA, 2003.

SEBBAHI, S.; CHAMEIKH, M. L. O.; SAHBAN, F.; ARIDE, J.; BENARAFAL.; BELKBIR, L. Thermal behavior of Moroccan phosphogypsum. **Thermochimica Acta**, n. 302, p.69-75. 1997.

SIEGEL R.; HOWELL J. R. **Thermal Radiation Heat Transfer**", 3<sup>rd</sup> ed., Hemisphere, Washington D.C. ,Chap. 4. 7 e 14, 1998.

SILVA, M. G. DA; SILVA, V. G da. **Painéis de vedação. Painéis de gesso acartonado**. Manual:. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2004. p. 51-59.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, 53 (2007) 57-77.

SMITH, D. A.; COX, G. **Major Chemical Species in Turbulent Flames, Combustion and Flame**, Number 91, pp. 226-238, 1992.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2<sup>o</sup> Edição. São Paulo, EDUSP – editora da Universidade de São Paulo, 1975.

SPALART P. R; JOU W. H.; STRELETS M.; ALLMARAS S. R. **Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach**", 1<sup>st</sup> AFOSR In. Conf. On DNS/LES, Aug. 4-8, Ruston, LA. In Advances in DNS/LES, C. Liu & Z. Liu Eds., Greyden Press, Columbus, OH, 1997.

SPERLING, M.; YIN, X.; WELZ, B. Differential determination of chromium (VI) and total chromium in natural waters using flow injection on-line separation and preconcentration electrothermal atomic absorption spectrometry. **Analyst**. 117, 629-635, 1992.

SVEHLA R. A.; MCBRIDE B. J. Fortran IV – **Computer Program for Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Complex Chemical Systems**”, NASA, TN D-7056, January, 1973.

THING, M.; NEWBY, M. COMBUSTION LENGTH ENCLOSED TURBULENT JET FLAMES. *FOURTH SYPOSIUM ( INTERNATIONAL ) on COMBUSTION*, p. 789 – 796, 1952.

TOMCZAK H.J., BENELLI G., CARRAI L., CECCHINI D. (2002), Investigation of a Gas Turbine Combustion System Fired with Mixtures of Natural Gas and Hydrogen, **IFRF Combustion Journal** , 2002. (páginas)

WILKES, J.O. ***Fluid Mechanics for Chemical Engineering***. Ann Arbor: Prentice Hall, 2000.

YADIGAROGLU G., *et al.* **Numerical and Experimental Study of Swirling Flow in a Model Combustor**, **Heat Mass Transfer Journal**, Vol. 41, No. 11, pp. 1485 – 1497, 1998.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A

#### Roteiro da Simulação no FLUENT

Analysis:

FLUENT Report on Grid

Mesh Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	1988761	4402480	604258	2

1 cell zone, 14 face zones.

FLUENT Report on Materials

FLUENT

Version: 3d, pbns, pdf20, rke (3d, pressure-based, 20 species pdf, realizable k-epsilon)

Release: 12.0.7

Title:

Material Properties

-----

Material: steel-new (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	8030
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	502.48001
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	16.27

Material: steel (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	8030
---------	-------------------	----------	------

Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	502.48
--------------------	--------	----------	--------

Thermal Conductivity	W/m-K	constant	16.27
----------------------	-------	----------	-------

Material: pdf-mixture (mixture)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Mixture Species names	(H <sub>2</sub> , H, O, O <sub>2</sub> , OH, H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , HCN, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , NO, CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> O, CH <sub>2</sub> CO, NH <sub>3</sub> )		
-----------------------	---	--	--

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
---------	-------------------	-----	----

Cp (Specific Heat)	J/kg-K	mixing-law	#f
--------------------	--------	------------	----

Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0454
----------------------	-------	----------	--------

Viscosity	kg/m-s	constant	1.72e-05
-----------	--------	----------	----------

Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
-------------------------------	-----	----------	---

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (NH<sub>3</sub> . pdf-mixture) (fluid)

-----

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
---------	-------------------	-----	----

Cp (Specific Heat)	J/kg-K	polynomial	(200-1000: 2092.4487 -2.2752783 0.010603029 -1.1135352e-05 4.0344089e-09) (1000-6000: 1286.1457 2.7662795 -0.00084354903 1.1652004e-07 -6.140993e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	17.03052
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-45897542
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	192770.33
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (HCN . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 694.96964 3.0922059 - 0.0041076214 3.1048745e-06 -9.2567802e-10) (1000-6000: 1169.7451 0.96798555 - 0.00032709531 5.1130079e-08 -3.0148597e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	27.02564
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.308133e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	201820.45
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CH<sub>2</sub>CO . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 422.43621 3.5836396 -  
 0.0034404187    1.8480975e-06    -3.9845278e-10)    (1000-3500:    892.26657    1.7807758    -  
 0.00082464372 1.8262389e-07 -1.5720701e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    42.03728

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant    -47699025

Standard State Entropy    j/kgmol-k    constant    241883.72

Reference Temperature    k      constant    298.15

Speed of Sound      m/s      none      #f

Material: (CH<sub>2</sub>O . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 1327.392 -2.7436384  
 0.01033454 -1.0502489e-05 3.6488124e-09) (1000-3500: 487.53878 2.5474996 -0.0012246239  
 2.7867763e-07 -2.4474148e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    30.02628

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant    -1.0857778e+08

Standard State Entropy    j/kgmol-k    constant    218759.73

Reference Temperature    k      constant    298.15

Speed of Sound      m/s      none      #f

Material: (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1327.392 -2.7436384 0.01033454 -1.0502489e-05 3.6488124e-09) (1000-3500: 487.53878 2.5474996 -0.0012246239 2.7867763e-07 -2.4474148e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	30.02628
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.0857778e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	218759.73
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 176.02033 4.9823191 0.001151273 -4.1438281e-06 1.7940265e-09) (1000-5000: 1420.5514 3.5583355 -0.0011825488 1.7247612e-07 -9.0198041e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.09652
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.038518e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	270176.3
Reference Temperature	k	constant	298.15



Speed of Sound      m/s      none      #f

Material: (no . pdf-mixture) (fluid)

Property              Units      Method      Value

---



---

Density              kg/m3      pdf      #f

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 1168.8905 -1.2854061  
0.0030593383 -2.5869341e-06 7.7683846e-10) (1000-6000: 903.47575 0.3300411 -  
0.00011891813 1.9245909e-08 -1.1176662e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol      constant      30.0061

Standard State Enthalpy      j/kgmol      constant      91263135

Standard State Entropy      j/kgmol-k      constant      210741.15

Reference Temperature      k      constant      298.15

Speed of Sound      m/s      none      #f

Material: (CH<sub>3</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property              Units      Method      Value

---



---

Density              kg/m3      pdf      #f

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 2031.5161 1.1120676  
0.0031688431 -3.799798e-06 1.4067674e-09) (1000-3500: 1264.0148 4.0037056 -0.0016519071  
3.2941696e-07 -2.5833901e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol      constant      15.03482

Standard State Enthalpy      j/kgmol      constant      1.46897e+08

Standard State Entropy    j/kgmol-k    constant    194004.96

Reference Temperature    k    constant    298.15

Speed of Sound    m/s    none    #f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> . pdf-mixture) (fluid)

---

Property	Units	Method	Value
Density	kg/m3	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1173.3952 -2.2436885 0.016922535 -2.0496732e-05 7.9986085e-09) (1000-3500: 603.44569 4.3404863 -0.0019888849 4.3632705e-07 -3.7255717e-11)

Molecular Weight    kg/kgmol    constant    28.05376

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant    52498927

Standard State Entropy    j/kgmol-k    constant    219318.22

Reference Temperature    k    constant    298.15

Speed of Sound    m/s    none    #f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat) j/kg-k polynomial (200-1000: 258.22569 7.4597462 -  
0.011341243 8.945746e-06 -2.7144283e-09) (1000-3500: 1324.3899 1.903662 -0.00075772301  
1.4925269e-07 -1.1534858e-11)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	26.03788
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.2819533e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	200912.53
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat) j/kg-k polynomial (200-1000: 1186.5911 -1.521192 0.016574637  
-1.9589292e-05 7.4292371e-09) (1000-3500: 296.37825 5.9960375 -0.0027721084 6.1221041e-  
07 -5.2536333e-11)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	30.06964
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-83849830
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	229216.67
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CO<sub>2</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 445.24211 1.6973718 - 0.0013457849 4.645907e-07 -2.7147747e-11) (1000-3500: 728.75215 0.83396369 - 0.0004184231 9.8897868e-08 -8.9186232e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.0098
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-3.9350195e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	213783.11
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CO . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1062.5146 -0.18117157 0.00030182147 2.6922698e-07 -2.6846074e-10) (1000-3500: 805.9498 0.61222097 - 0.00029648192 6.8286741e-08 -6.0448846e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.0104
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.1052774e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	197653.4

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s            none            #f

Material: (N<sub>2</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
---------	-------------------	-----	----

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 979.04296 0.41796388 - 0.001176279 1.6743942e-06 -7.2562943e-10) (1000-5000: 868.62287 0.44162954 - 0.00016872292 2.9967875e-08 -2.0043856e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.0134
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1429.881
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	191509.42
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (CH<sub>4</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
---------	-------------------	-----	----

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2668.981 -7.0851378 0.025488117 -2.512235e-05 8.6391009e-09) (1000-3500: 38.792625 6.9400081 -0.0029711179 6.3379476e-07 -5.2766883e-11)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	16.04276
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-74598474
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	186367.48
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (H<sub>2</sub>O . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1937.7398 -0.93984692 0.0030092699 -2.5327863e-06 8.1779628e-10) (1000-3500: 1400.2361 1.0046825 -7.5722093e- 05 -4.478643e-08 7.7627449e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.01528
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-2.4182106e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	188825.25
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (OH . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 1951.5676 -1.1739267  
0.0022575611 -1.8973609e-06 6.6687168e-10) (1000-3500: 1512.013 0.2681096 6.1844326e-05  
-4.2994039e-08 5.7399124e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    17.00734

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    39346302

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    183735.9

Reference Temperature    k          constant    298.15

Speed of Sound          m/s          none          #f

Material: (O<sub>2</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

-----

-----

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 982.80649 -0.77865003  
0.0025586527 -2.5155187e-06 8.4282725e-10) (1000-3500: 852.91122 0.38535489 -  
0.00019694465 5.4427335e-08 -5.6310406e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    31.9988

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    0.01634309

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    205145.27

Reference Temperature    k          constant    298.15

Speed of Sound          m/s          none          #f

Material: (O . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1646.4399 -1.7041496 0.0034521727 -3.1845461e-06 1.0978769e-09) (1000-3500: 1335.2399 -0.044677801 2.1799177e-05 -5.205897e-09 6.3832461e-13)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	15.9994
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.4916997e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	161057.16
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (H . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	pdf	#f
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 20622.11 5.8181805e-09 - 1.646403e-11 1.8979075e-14 -7.6527194e-18) (1000-3500: 20622.111 -1.9041877e-07 1.3326993e-10 -3.9059534e-14 4.1095524e-18)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	1.00794
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.1799397e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	114715.52
Reference Temperature	k	constant	298.15



Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (H<sub>2</sub> . pdf-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	pdf	#f
---------	-------	-----	----

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 9669.0111 32.915036 - 0.080336116 8.313684e-05 -3.0422222e-08) (1000-3500: 13764.348 -0.20375665 0.0020599706 -7.406076e-07 8.259377e-11)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	2.01588
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0.013281575
-------------------------	---------	----------	-------------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	130678.34
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: flamelet-mixture (mixture)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 892.61098 -0.60268239 0.0089714675 -1.0844408e-05 4.1391519e-09) (1000-6000: 1019.9408 2.2125427 - 0.00079765014 1.2904223e-07 -7.7352473e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.05316
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.661866e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	263946.76
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (ch2cho . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 658.47266 2.0741944 0.00036534852 -1.3827062e-06 5.5384579e-10) (1000-5000: 1154.2223 1.5704531 - 0.0005299409 7.8619395e-08 -4.2030556e-12)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	43.04522
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	25101844
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	267804.47
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (300-1000: 176.02033 4.9823191  
0.001151273 -4.1438281e-06 1.7940265e-09) (1000-5000: 1420.5514 3.5583355 -0.0011825488  
1.7247612e-07 -9.0198041e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    44.09652

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    -1.038518e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    270176.3

Reference Temperature    k          constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (c3h7 . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (300-1000: 202.90664 5.0153929  
0.00045925343 -3.7838477e-06 1.8086547e-09) (1000-5000: 1486.3069 3.0958773 -  
0.0010194658 1.4722519e-07 -7.6011055e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    43.08858

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    1.004983e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    289459.15

Reference Temperature    k          constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (ar . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

----Density                      kg/m3      constant      1  
    Cp (Specific Heat)              j/kg-k      polynomial      (300-1000: 520.32267 0 0 0 0) (1000-5000: 520.32267 0 0 0 0)  
    Molecular Weight              kg/kgmol      constant      39.948  
    Standard State Enthalpy      j/kgmol      constant      0  
    Standard State Entropy      j/kgmol-k      constant      154729.8  
    Reference Temperature      k              constant      298.15  
    Speed of Sound                  m/s              none              #f

Material: (N<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---



---

Density                              kg/m3      constant      1  
    Cp (Specific Heat)              j/kg-k      polynomial      (300-1000: 979.04296 0.41796388 -0.001176279 1.6743942e-06 -7.2562943e-10) (1000-5000: 868.62287 0.44162954 -0.00016872292 2.9967875e-08 -2.0043856e-12)  
    Molecular Weight              kg/kgmol      constant      28.0134  
    Standard State Enthalpy      j/kgmol      constant      1429.881  
    Standard State Entropy      j/kgmol-k      constant      191509.42  
    Reference Temperature      k              constant      298.15  
    Speed of Sound                  m/s              none              #f

Material: (NCO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
<hr/>			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 559.39281 1.742366 - 0.0016595423 9.5015926e-07 -2.634493e-10) (1000-6000: 1019.5138 0.45614804 - 0.00017419992 2.9264654e-08 -1.8002718e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	42.0171
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.3179438e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	232381.4
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f
Material: (hnco . flamelet-mixture) (fluid)			
Property	Units	Method	Value
<hr/>			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1478: 701.66262 1.4112284 - 0.00044069343 -1.2778685e-07 6.9999963e-11) (1478-5000: 1202.7426 0.61425379 - 0.00021136811 3.2993582e-08 -1.9228223e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	43.02504
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.18076e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	240726.67
Reference Temperature	k	constant	298.15

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (HOCN . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1368: 731.63216 1.3308109 - 0.00062125669 9.9945089e-08 2.3065782e-12) (1368-5000: 1139.7252 0.61217717 - 0.00021604909 3.4251212e-08 -2.0162942e-12)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	43.02504
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-11801854
-------------------------	---------	----------	-----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	242107.51
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (HCNO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1382: 511.57152 2.4639669 - 0.002025088 8.5304341e-07 -1.4638664e-10) (1382-5000: 1275.1421 0.58510217 - 0.00020813242 3.3173563e-08 -1.9602575e-12)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	43.02504
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.7103274e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	242693.33
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (HCNN . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 511.50019 3.2340835 - 0.0038127381 2.4569854e-06 -6.5565416e-10) (1000-5000: 1194.4239 0.80840763 - 0.00032384929 5.9267742e-08 -4.0717651e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	41.03234
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	4.621127e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	250107.72
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (H<sub>2</sub>CN . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density                    kg/m<sup>3</sup>      constant      1

Cp (Specific Heat)            j/kg-k      polynomial    (300-1000: 845.75995 1.6891208  
0.00031768408 -4.8124242e-07 -6.9730345e-11) (1000-4000: 1545.1199 0.88064727 -  
8.4692496e-05 -4.8507964e-08 9.0258501e-12)

Molecular Weight            kg/kgmol    constant      28.03358

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant      2.4732936e+08

Standard State Entropy    j/kgmol-k   constant      224247.8

Reference Temperature    k            constant      298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (HCN . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density                    kg/m<sup>3</sup>      constant      1

Cp (Specific Heat)            j/kg-k      polynomial    (200-1000: 694.96964 3.0922059 -  
0.0041076214 3.1048745e-06 -9.2567802e-10) (1000-6000: 1169.7451 0.96798555 -  
0.00032709531 5.1130079e-08 -3.0148597e-12)

Molecular Weight            kg/kgmol    constant      27.02564

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant      1.308133e+08

Standard State Entropy    j/kgmol-k   constant      201820.45

Reference Temperature    k            constant      298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (CN . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------



---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1154.5667 -0.30534837 0.00068524198 -1.0071506e-07 -1.4837505e-10) (1000-6000: 1197.0834 0.013885336 9.4929856e-05 -2.1938698e-08 1.4103726e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	26.0177
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	4.386743e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	202639.3
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (HNO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1215.3525 -1.5199285 0.0049523546 -4.5941653e-06 1.4866434e-09) (1000-6000: 798.68682 0.93679117 - 0.00021057868 1.5409308e-08 -5.1836323e-14)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	31.01404
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.0625662e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	220912.7
Reference Temperature	k	constant	298.15

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (N<sub>2</sub>O . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 426.39219 2.1355458 - 0.0025826122 1.828997e-06 -5.5363411e-10) (1000-6000: 911.11377 0.49626427 - 0.00018106932 3.0226516e-08 -1.8466125e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.0128
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	81598330
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	220005.16
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (NO<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 712.7847 -0.28652652 0.0030104816 -3.7004196e-06 1.4159899e-09) (1000-6000: 882.79678 0.39260601 - 0.00014965271 2.8459674e-08 -1.8995806e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	46.0055
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy j/kgmol constant 34192474

Standard State Entropy j/kgmol-k constant 240166.09

Reference Temperature k constant 298.15

Speed of Sound m/s none #f

Material: (NO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1168.8905 -1.2854061 0.0030593383 -2.5869341e-06 7.7683846e-10) (1000-6000: 903.47575 0.3300411 - 0.00011891813 1.9245909e-08 -1.1176662e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	30.0061
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	91263135
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	210741.15
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (nnh . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 1244.7135 -1.3893953  
 0.0057468457   -6.2244269e-06   2.2767273e-09)   (1000-6000:   1079.1396   0.82838981   -  
 0.00029842633 4.8252442e-08 -2.891233e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    29.02134

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    2.4951192e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    224500.82

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (NH<sub>3</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 2092.4487 -2.2752783  
 0.010603029   -1.1135352e-05   4.0344089e-09)   (1000-6000:   1286.1457   2.7662795   -  
 0.00084354903 1.1652004e-07 -6.140993e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    17.03052

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    -45897542

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    192770.33

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (NH<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---



---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2181.5157 -1.0929046 0.0036878356 -2.9118958e-06 8.5313171e-10) (1000-6000: 1470.9872 1.6643169 - 0.00048461789 7.1106532e-08 -4.1101172e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	16.02258
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.9204626e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	194991.84
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f
Material: (NH . flamelet-mixture) (fluid)			
Property	Units	Method	Value(s)

---



---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1934.1942 0.17265446 - 0.00082455888 1.3742077e-06 -5.7351588e-10) (1000-6000: 1541.4668 0.73639906 - 0.00023522171 4.3385394e-08 -3.0480813e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	15.01464
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	3.5691098e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	181220.75
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (N . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1483.9934 0 0 0 0) (1000-6000: 1434.0973 0.10381463 -7.0652147e-05 1.7942219e-08 -1.2086225e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	14.0067
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	4.7267033e+08
-------------------------	---------	----------	---------------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	153298.97
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (HCCOH . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 245.7227 6.1456127 -0.010060699 8.5318739e-06 -2.7718753e-09) (1000-5000: 1171.6441 1.3434264 -0.0005074877 8.8979165e-08 -5.9217004e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	42.03728
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	78257184
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	235375.5
------------------------	-----------	----------	----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (CH<sub>2</sub>CO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 422.43621 3.5836396 - 0.0034404187 1.8480975e-06 -3.9845278e-10) (1000-3500: 892.26657 1.7807758 - 0.00082464372 1.8262389e-07 -1.5720701e-11)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	42.03728
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-47699025
-------------------------	---------	----------	-----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	241883.72
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (HCCO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 456.29731 3.57768 - 0.0048085544 3.5008249e-06 -1.0266908e-09) (1000-4000: 1140.5208 0.82786871 - 0.00032290366 5.800891e-08 -3.9328762e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	41.02934
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy j/kgmol constant 1.7740817e+08

Standard State Entropy j/kgmol-k constant 246699.73

Reference Temperature k constant 298.15

Speed of Sound m/s none #f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1186.5911 -1.521192 0.016574637 -1.9589292e-05 7.4292371e-09) (1000-3500: 296.37825 5.9960375 -0.0027721084 6.1221041e-07 -5.2536333e-11)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	30.06964
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-83849830
-------------------------	---------	----------	-----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	229216.67
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---



Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 1232.0484 -1.1977525  
0.014222892 -1.7140574e-05 6.5946942e-09) (1000-3500: 559.21292 4.9772324 -0.0022836109  
5.01285e-07 -4.2811361e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    29.0617

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    1.1865581e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    247113.46

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value
----------	-------	--------	-------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 1173.3952 -2.2436885  
0.016922535 -2.0496732e-05 7.9986085e-09) (1000-3500: 603.44569 4.3404863 -0.0019888849  
4.3632705e-07 -3.7255717e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    28.05376

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    52498927

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    219318.22

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 987.56622 0.46567242 0.0079685333 -1.0995004e-05 4.5236654e-09) (1000-3500: 927.3917 3.1756862 -0.0014389639 3.1283746e-07 -2.6517991e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	27.04582
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.9973402e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	233888.29
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---



---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 258.22569 7.4597462 - 0.011341243 8.945746e-06 -2.7144283e-09) (1000-3500: 1324.3899 1.903662 -0.00075772301 1.4925269e-07 -1.1534858e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	26.03788
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.2819533e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	200912.53
Reference Temperature	k	constant	298.15

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (C<sub>2</sub>H . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 959.8742 4.4544644 - 0.0094593533 9.7922447e-06 -3.6317281e-09) (1000-3500: 1052.2686 1.5785721 - 0.00061049617 1.0104464e-07 -5.8872435e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	25.02994
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	5.661939e+08
-------------------------	---------	----------	--------------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	213332.45
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (CH<sub>3</sub>OH . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial    (200-1000: 1483.0381 -3.9521364  
0.016929625 -1.8444107e-05 6.7816127e-09) (1000-3500: 464.39566 3.6570845 -0.0016516004  
3.5852807e-07 -3.0374933e-11)

Molecular Weight      kg/kgmol    constant    32.04216

Standard State Enthalpy   j/kgmol    constant    -2.0093589e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant    239805.34

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (CH<sub>3</sub>O . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(300-1000: 564.27054 1.9333892 0.0014302235 -1.9765335e-06 5.5607414e-10) (1000-3000: 1010.2302 2.1088432 - 0.0007116686 1.0567477e-07 -5.6598837e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	31.03422
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	16303473
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	228480.61
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CH<sub>2</sub>OH . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1035.1698 1.4994112 0.0015894272 -2.8005044e-06 1.1706737e-09) (1000-3500: 989.29756 2.3162771 - 0.0010049288 2.1090707e-07 -1.7375336e-11)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	31.03422
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-14627567
-------------------------	---------	----------	-----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	243913.97
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (CH<sub>2</sub>O . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1327.392 -2.7436384 0.01033454 -1.0502489e-05 3.6488124e-09) (1000-3500: 487.53878 2.5474996 -0.0012246239 2.7867763e-07 -2.4474148e-11)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	30.02628
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.0857778e+08
-------------------------	---------	----------	----------------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	218759.73
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s            none            #f

Material: (HCO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1209.4549 -0.92945007 0.0039482322 -3.8148469e-06 1.2428353e-09) (1000-3500: 794.2839 1.4202677 - 0.00071184682 1.6880674e-07 -1.5286101e-11)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	29.01834
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	41999141
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	224331.09
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (CO<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 445.24211 1.6973718 - 0.0013457849 4.645907e-07 -2.7147747e-11) (1000-3500: 728.75215 0.83396369 - 0.0004184231 9.8897868e-08 -8.9186232e-12)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	44.0098
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-3.9350195e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	213783.11
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CO . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1062.5146 -0.18117157 0.00030182147 2.6922698e-07 -2.6846074e-10) (1000-3500: 805.9498 0.61222097 - 0.00029648192 6.8286741e-08 -6.0448846e-12)

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.0104
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.1052774e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	197653.4
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CH<sub>4</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

-----

-----

Density                    kg/m<sup>3</sup>      constant    1

Cp (Specific Heat)            j/kg-k      polynomial    (200-1000: 2668.981 -7.0851378  
0.025488117 -2.512235e-05 8.6391009e-09) (1000-3500: 38.792625 6.9400081 -0.0029711179  
6.3379476e-07 -5.2766883e-11)

Molecular Weight            kg/kgmol    constant    16.04276

Standard State Enthalpy    j/kgmol    constant    -74598474

Standard State Entropy    j/kgmol-k    constant    186367.48

Reference Temperature    k            constant    298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (CH<sub>3</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2031.5161 1.1120676 0.0031688431 -3.799798e-06 1.4067674e-09) (1000-3500: 1264.0148 4.0037056 -0.0016519071 3.2941696e-07 -2.5833901e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	15.03482
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	1.46897e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	194004.96
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f



Material: (CH<sub>2</sub><s> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2488.6947 -1.4027948 0.0048800337 -3.9643623e-06 1.1517877e-09) (1000-3500: 1358.5906 2.7597457 - 0.0011925519 2.4771101e-07 -2.0136462e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	14.02688
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	4.2988363e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	189216.99
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (CH<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2230.3028 0.57429253 0.0016566575 -2.2826022e-06 1.0002053e-09) (1000-3500: 1703.6044 2.1673026 - 0.00083514337 1.542197e-07 -1.1127427e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	14.02688
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	3.9232731e+08

Standard State Entropy j/kgmol-k constant 194415.57

Reference Temperature k constant 298.15

Speed of Sound m/s none #f

Material: (CH . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 2228.7162 0.20681244 - 0.0010786471 2.0194719e-06 -8.9797755e-10) (1000-3500: 1838.2859 0.62005866 9.2247932e-05 -8.3461727e-08 1.1245031e-11)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	13.01894
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	5.9732579e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	183033.7
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (C . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m3	constant	1

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 1768.1139 -0.22257713  
 0.0005079509   -5.0687285e-07   1.8449337e-10)      (1000-3500:   1725.493   0.033219238   -  
 5.0140435e-05 2.590944e-08 -3.3730698e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol      constant      12.011

Standard State Enthalpy   j/kgmol      constant      7.1666535e+08

Standard State Entropy   j/kgmol-k      constant      158098.35

Reference Temperature    k            constant      298.15

Speed of Sound            m/s            none            #f

Material: (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1045.2268 -0.13268419 0.0040902514   -5.2741696e-06   2.1081306e-09)      (1000-3500:   1018.0678   1.1997589   - 0.00046476467 9.0730428e-08 -7.0374542e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	34.01468
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-1.3587722e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	234522.09
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (HO<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1083.6154 -1.1962951 0.005329736 -6.11518e-06 2.3407018e-09) (1000-3500: 1011.9284 0.56420677 -0.00015961738 2.8778461e-08 -2.7181971e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	33.00674
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	12551743
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	229101.02
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (H<sub>2</sub>O . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1937.7398 -0.93984692 0.0030092699 -2.5327863e-06 8.1779628e-10) (1000-3500: 1400.2361 1.0046825 -7.5722093e- 05 -4.478643e-08 7.7627449e-12)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.01528
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	-2.4182106e+08

Standard State Entropy j/kgmol-k constant 188825.25

Reference Temperature k constant 298.15

Speed of Sound m/s none #f

Material: (OH . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1951.5676 -1.1739267 0.0022575611 -1.8973609e-06 6.6687168e-10) (1000-3500: 1512.013 0.2681096 6.1844326e-05 -4.2994039e-08 5.7399124e-12)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	17.00734
------------------	----------	----------	----------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	39346302
-------------------------	---------	----------	----------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	183735.9
------------------------	-----------	----------	----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (O<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)      j/kg-k      polynomial      (200-1000: 982.80649 -0.77865003  
 0.0025586527   -2.5155187e-06   8.4282725e-10)   (1000-3500:   852.91122   0.38535489   -  
 0.00019694465 5.4427335e-08 -5.6310406e-12)

Molecular Weight      kg/kgmol      constant      31.9988

Standard State Enthalpy   j/kgmol      constant      0.01634309

Standard State Entropy   j/kgmol-k      constant      205145.27

Reference Temperature    k            constant      298.15

Speed of Sound            m/s        none        #f

Material: (O . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
-----			
Density	kg/m3	constant	1
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 1646.4399 -1.7041496 0.0034521727   -3.1845461e-06   1.0978769e-09)   (1000-3500:   1335.2399   -0.044677801 2.1799177e-05 -5.205897e-09 6.3832461e-13)
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	15.9994
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.4916997e+08
Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	161057.16
Reference Temperature	k	constant	298.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: (H . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 20622.11 5.8181805e-09 - 1.646403e-11 1.8979075e-14 -7.6527194e-18) (1000-3500: 20622.111 -1.9041877e-07 1.3326993e-10 -3.9059534e-14 4.1095524e-18)
--------------------	--------	------------	---

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	1.00794
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	2.1799397e+08
-------------------------	---------	----------	---------------

Standard State Entropy	j/kgmol-k	constant	114715.52
------------------------	-----------	----------	-----------

Reference Temperature	k	constant	298.15
-----------------------	---	----------	--------

Speed of Sound	m/s	none	#f
----------------	-----	------	----

Material: (H<sub>2</sub> . flamelet-mixture) (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

---

Density	kg/m3	constant	1
---------	-------	----------	---

Cp (Specific Heat)	j/kg-k	polynomial	(200-1000: 9669.0111 32.915036 - 0.080336116 8.313684e-05 -3.0422222e-08) (1000-3500: 13764.348 -0.20375665 0.0020599706 -7.406076e-07 8.259377e-11)
--------------------	--------	------------	--

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	2.01588
------------------	----------	----------	---------

Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0.013281575
-------------------------	---------	----------	-------------

Standard State Entropy   j/kgmol-k   constant   130678.34

Reference Temperature   k   constant   298.15

Speed of Sound   m/s   none   #f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

FLUENT Report on Models

FLUENT

Version: 3d, pbns, pdf20, rke (3d, pressure-based, 20 species pdf, realizable k-epsilon)

Release: 12.0.7

Title: Models

Model	Settings
-----	
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Realizable k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled



Solidification and Melting Disabled

Radiation None

Species Transport Reacting (#f species)

Coupled Dispersed Phase Disabled

Pollutants Disabled

Pollutants Disabled

Soot Disabled

## FLUENT Report on Solution Control

### FLUENT

Version: 3d, pbns, pdf20, rke (3d, pressure-based, 20 species pdf, realizable k-epsilon)

Release: 12.0.7

Title: Solver Settings

-----

#### Equations

Equation	Solved
----------	--------

-----

Flow	yes
------	-----

Turbulence	yes
------------	-----

Energy	yes
--------	-----

Pdf	yes
-----	-----

#### Numerics

Numeric                      Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation   yes

#### Relaxation

Variable                      Relaxation Factor

-----

Pressure                      0.2

Density                      0.2

Body Forces                      0.30000001

Momentum                      0.2

Turbulent Kinetic Energy   0.2

Turbulent Dissipation Rate   0.1

Turbulent Viscosity           0.2

Energy                      0.60000002

Temperature                      1

Mean Mixture Fraction       0.60000002

Mixture Fraction Variance   0.5

#### Linear Solver

Solver   Termination   Residual Reduction

Variable                      Type      Criterion    Tolerance

-----

Pressure                      V-Cycle   0.1

X-Momentum                      Flexible   0.1       0.7

Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7
Energy	Flexible	0.1	0.7
Mean Mixture Fraction	Flexible	0.1	0.7
Mixture Fraction Variance	Flexible	0.1	0.7

#### Pressure-Velocity Coupling

Parameter Value

-----

Type SIMPLE

#### Discretization Scheme

Variable Scheme

-----

Pressure PRESTO!

Momentum First Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate First Order Upwind

Energy First Order Upwind

Mean Mixture Fraction First Order Upwind

Mixture Fraction Variance First Order Upwind

## Solution Limits

Quantity	Limit
-----	
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

## APÊNDICE B

### Software utilizando ANSYS FLUENT 12.0

#### Case File Setup for Simulação no Forno rotativo de Engenharia Química

The step-by-step operations in FLUENT are listed in this appendix. As an example, some parameter settings especially for rotate kiln are recorded here.

#### Step 1. Input mesh

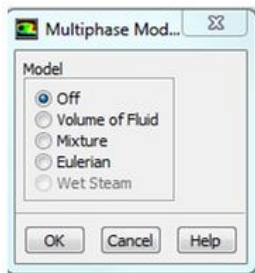
Grid file made by GAMBIT is read into FLUENT. Then check it, and scale and smooth it, if necessary.

#### Step 2. Model definitions

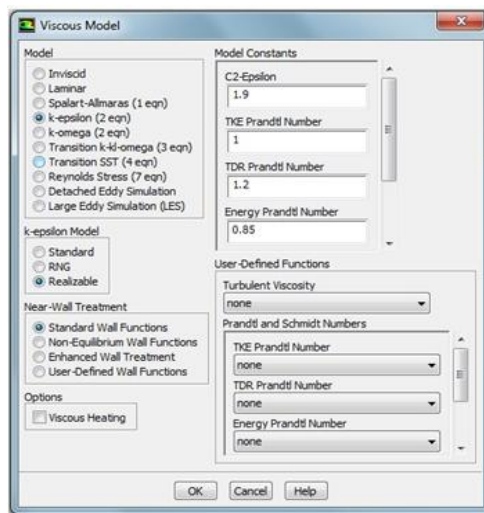
A solver can be defined in this window



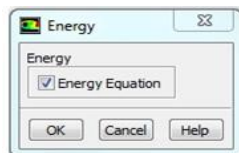
With multiphase model off



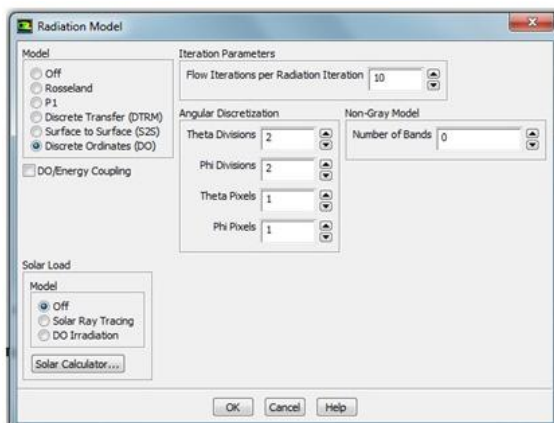
Using this window to define turbulence model

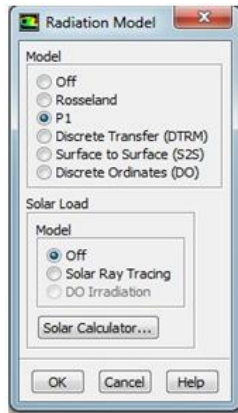


Enabling energy equation



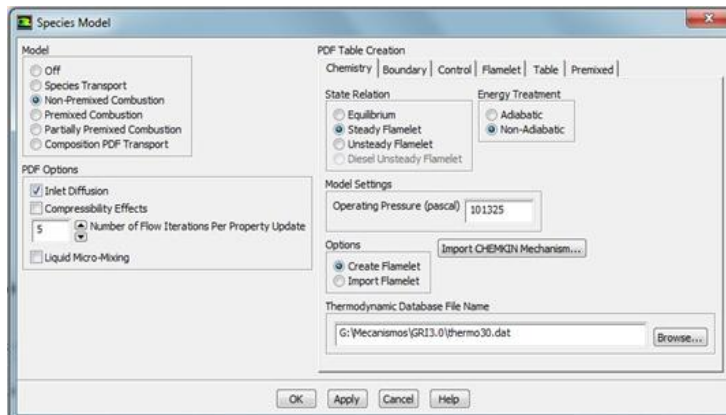
Select and turn on or off radiation model





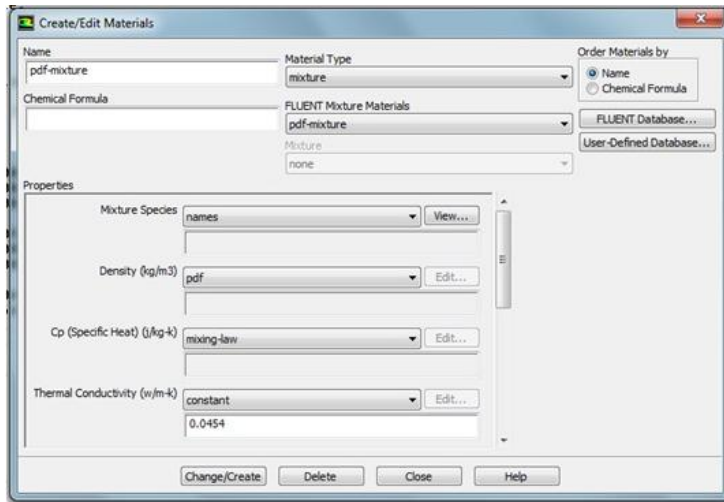
The window below defines chemistry model and turbulence-chemistry interaction model.

If convergence difficulty is encountered, the option of "Diffusion Energy Source" could be disabled.

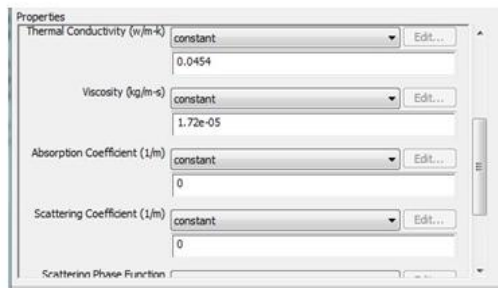


### Step 3. Material definitions

The solids, fluids and mixture can be defined, respectively, by selecting in the drop-down list of "Material type".

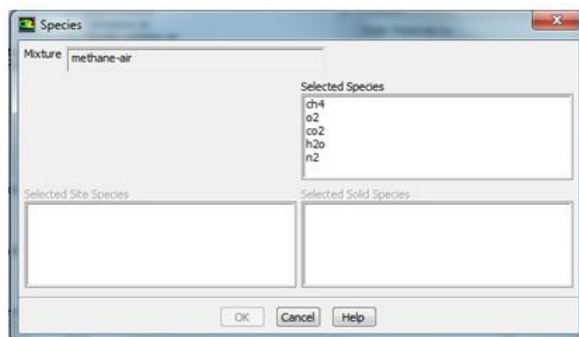


The under part of the "Properties" sub-window is shown below.



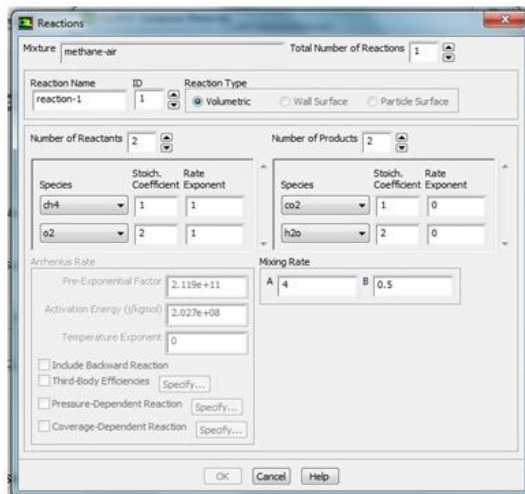
In the "Material" window, press "Edit in the item of "Mixing Species" to select species.

Normally is put in the end of convenience.

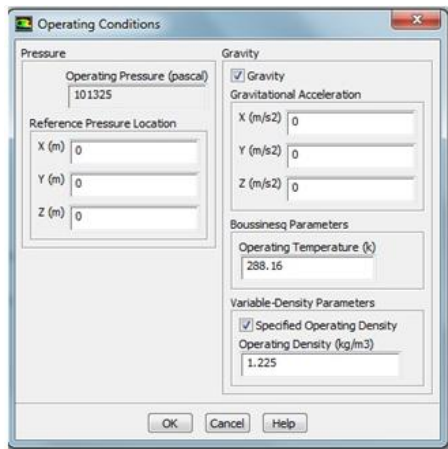


In the "Material" window, press "Edit" in the item of "Reaction" to define the eddy-dissipation model.





Step 4. Operating conditions Operating pressure and temperature can be specified in this window. If the gravity is not very important in the problem, the option of "Gravity" can be disabled.

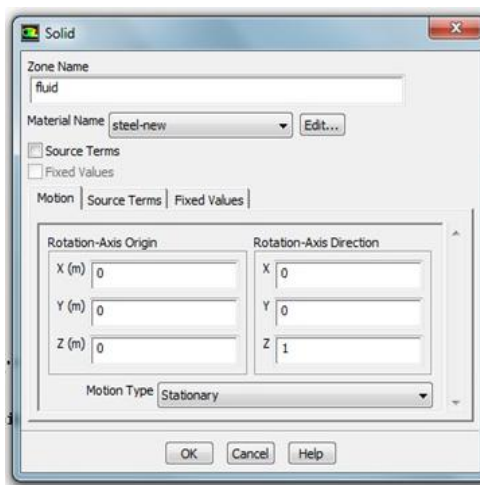


#### Step 5. Boundary conditions

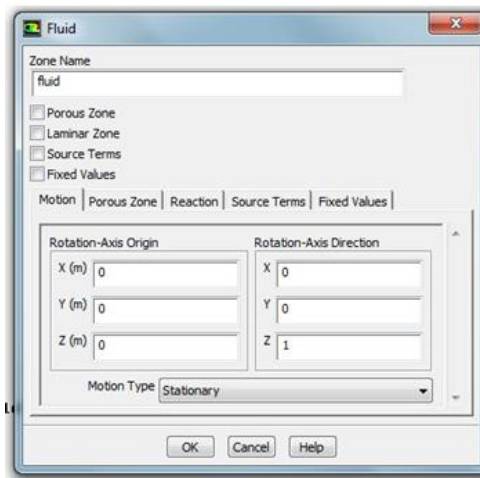
In this window, the control volumes, walls, inlets, outlets, porous jumps and so on can be defined.



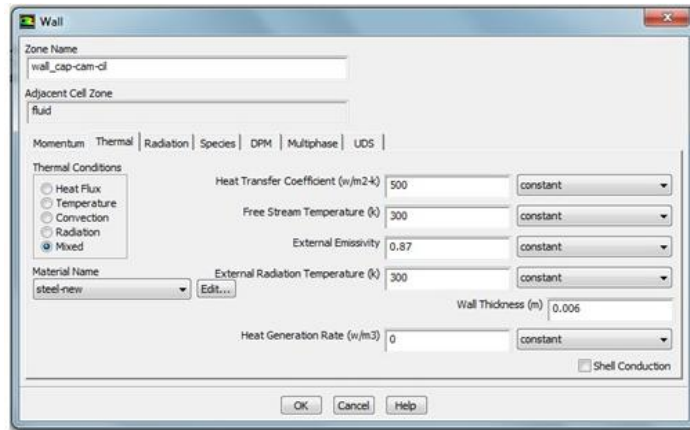
An example of the definition of a solid volume.



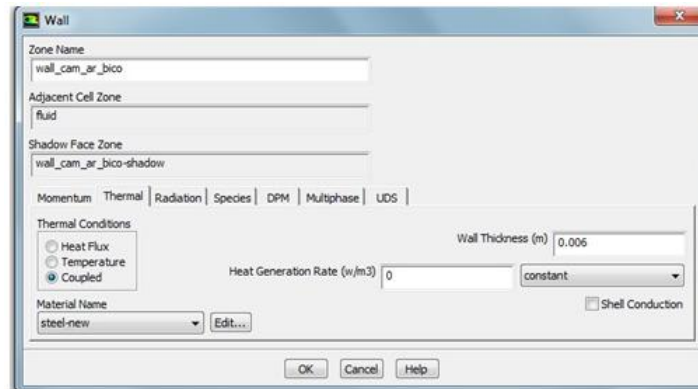
An example of the definition of a fluid volume.



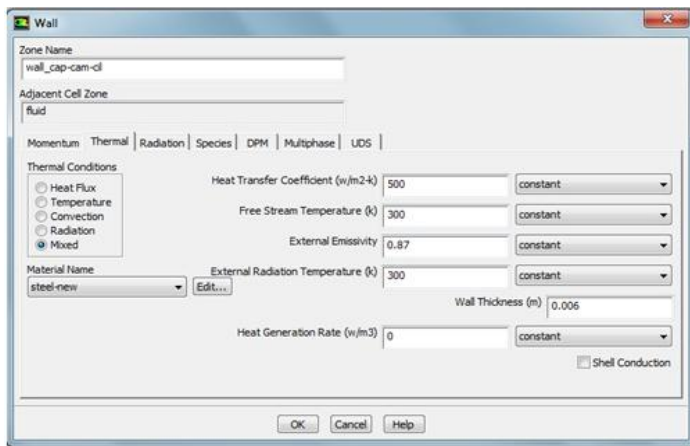
An example of the definition of an outside wall of the rotary kiln.



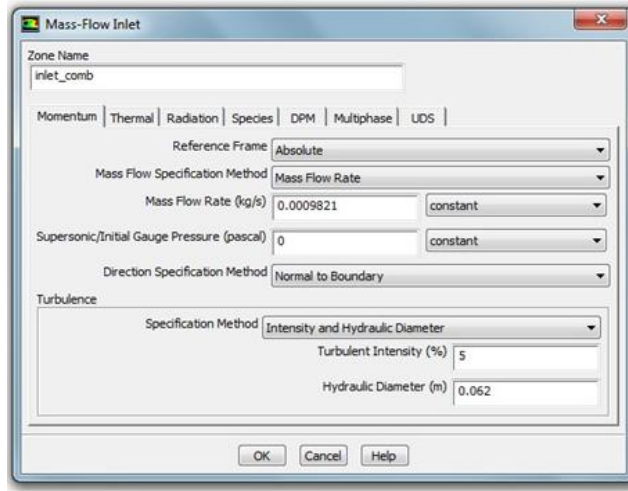
An example of the definition of a coupled wall in the rotary kiln. It is not necessary to define the other one being shadowed by this coupled wall.



An example of the definition of a wall of the rotary kiln (Forno rotativo em engenharia Química / UFPE)



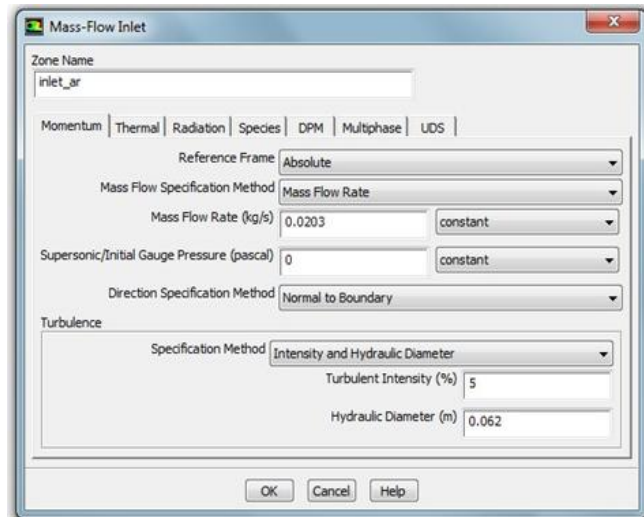
### Fluid injection boundary



Mass-Flow Inlet dialog box configuration for fluid injection boundary. The Zone Name is 'inlet\_comb'. The Reference Frame is 'Absolute'. The Mass Flow Specification Method is 'Mass Flow Rate' with a value of 0.0009821 kg/s. The Supersonic/Initial Gauge Pressure is 0 pascal. The Direction Specification Method is 'Normal to Boundary'. The Turbulence Specification Method is 'Intensity and Hydraulic Diameter' with a Turbulent Intensity of 5% and a Hydraulic Diameter of 0.062 m.

Property	Value
Zone Name	inlet_comb
Reference Frame	Absolute
Mass Flow Specification Method	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate (kg/s)	0.0009821
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0
Direction Specification Method	Normal to Boundary
Turbulence Specification Method	Intensity and Hydraulic Diameter
Turbulent Intensity (%)	5
Hydraulic Diameter (m)	0.062

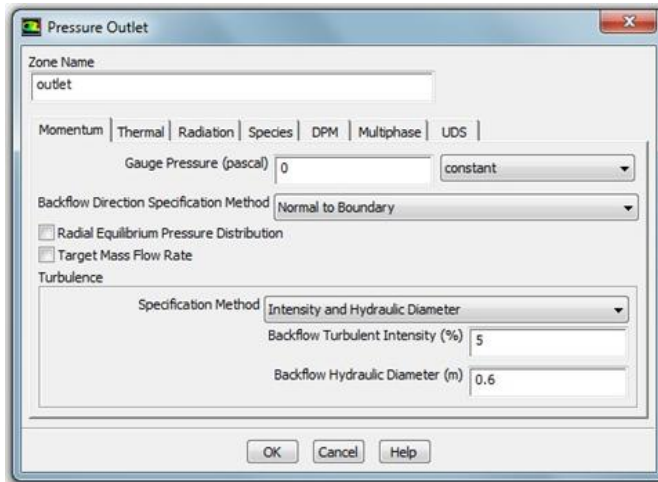
### Air injection boundary



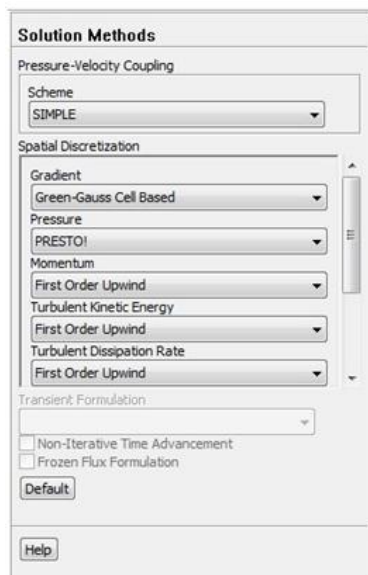
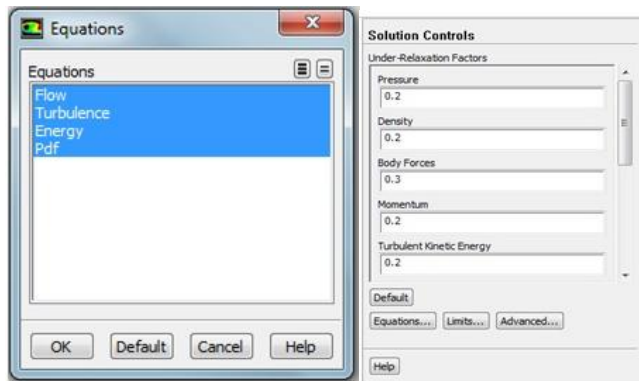
Mass-Flow Inlet dialog box configuration for air injection boundary. The Zone Name is 'inlet\_ar'. The Reference Frame is 'Absolute'. The Mass Flow Specification Method is 'Mass Flow Rate' with a value of 0.0203 kg/s. The Supersonic/Initial Gauge Pressure is 0 pascal. The Direction Specification Method is 'Normal to Boundary'. The Turbulence Specification Method is 'Intensity and Hydraulic Diameter' with a Turbulent Intensity of 5% and a Hydraulic Diameter of 0.062 m.

Property	Value
Zone Name	inlet_ar
Reference Frame	Absolute
Mass Flow Specification Method	Mass Flow Rate
Mass Flow Rate (kg/s)	0.0203
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0
Direction Specification Method	Normal to Boundary
Turbulence Specification Method	Intensity and Hydraulic Diameter
Turbulent Intensity (%)	5
Hydraulic Diameter (m)	0.062

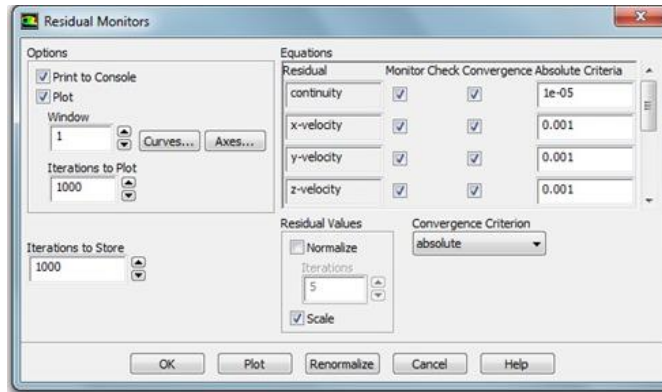
Pressure outlet boundary of the rotary kiln



Step 6. Solution control

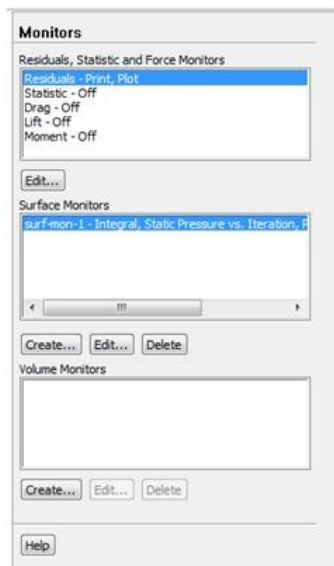


### Step 7. convergence-related monitors



### Step 8. Executes commandes when calculating.

For instance, temperature distribution profiles and XY-plot are recorded in every iteration for post-processing



### Step 9. Initialization

An initial guess of solution can be specified in this window, including initial velocities, turbulence parameters, mixture compositions, pressure and temperature.

**Solution Initialization**

Compute from  
inlet\_comb

Reference Frame  
☒ Relative to Cell Zone  
☐ Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)  
0

X Velocity (m/s)  
0

Y Velocity (m/s)  
-0.464917

Z Velocity (m/s)  
0

Turbulent Kinetic Energy (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)  
0.0008105534

Turbulent Dissipation Rate (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)  
0.0008085282

Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

Help

Step 10. Begin to iterate

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Number of Iterations Reporting Interval  
0 1

Profile Update Interval  
1

Calculate Acoustic Signals...

Help

## APÊNDICE C

### Concentrações de Manganês na Distribuição de Tempo de Residência – DTR

**Tabela 4.12** - Concentração Adimensional do traçador em função do tempo residência no reator

Tempo (min)	E(t) Concentração Adimensional do traçador Normalizado (Cloreto manganês)
10	0
11	0
12	0
13	0,05
14	0,10
15	0,11
16	0,13
17	0,16
18	0,14
19	0,11
20	0,09
21	0,06
22	0,04
23	0,03
24	0,01
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0



## APÊNDICE D

### Tabelas de avaliação da aplicabilidade das pastas

**Tabela 3.5** – Propriedade física do pó na determinação do módulo de finura, massa unitária.

Características	Método de ensaio	Exigência NBR 12127 (ABNT 1991a)	Gesso Estudado
Propriedades físicas do pó	Módulo de Finura	< 1,1	0,541
	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	>700	0,730
	Relação a/g	-	0,70

### Processo de Calcinação da Gipsita e dos Resíduos de Gesso

**Tabela 4.13** – Evolução da água de hidratação e temperatura da gipsita e dos resíduos de gesso (revestimento e placa) em calcinação, na saída do reator, em função do tempo operacional ( $T_C=500^\circ\text{C}$ ,  $N=3$  rpm e  $Q_s=120$  kg/h).

Tempo operacional (min.)	3	9	12	15	18	21	23
Temperatura da gipsita em calcinação (°C)	40	65	80	100	120	135	140
Água cristalização correspondente (%)	18,45	14,24	12,15	9,6	8,15	6,52	6,20
Temperatura do resíduo de gesso Revestimento em calcinação (°C)	40	65	80	100	120	135	140
Água cristalização correspondente (%)	16,81	13,45	11,65	9,81	8,43	6,98	5,97
Temperatura de resíduo de gesso de Placa em calcinação (°C)	40	65	80	100	120	135	140
Água cristalização correspondente (%)	14,82	12,26	10,65	8,71	6,84	5,78	5,02

**Tabela 4.14** – Valor do diâmetro médio de Sauter na análise granulométrica do gesso oriundo da calcinação da gipsita e resíduos (revestimento e placa).

.PENEIRA (µm)	FRAÇÃO DA MASSA RETIDA (g)		
	Gesso Natural	Resíduo Revestimento	Resíduo Placa
0	18,09	35,58	42,27
105	31,49	27,98	25,90
210	25,12	16,74	15,71
420	15,60	11,5	10,60
840	9,7	8,20	6,2

**Tabela 4.17** – Penetração do cone em relação à consistência (água/pó) dos materiais estudados.

Ensaio	Consistência			
	0,50	0,60	0,70	0,80
Penetração do cone na pasta de gesso beta (mm.).	25	28	31	36
Penetração do cone pasta do Resíduo de Revest. 100% (mm.)	23	26	30	34
Penetração do cone pasta do Resíduo Placa. 100% (mm.)	22	25	29	33

**Tabela 4.18**– Interferência fator água/pasta no tempo de pega.

Consistência		0,50	0,60	0,70	0,80
Tempo de pega (min.)	Início	9'	12'	15'	17'
Gesso calcinado 100%	Fim	14'	17'	19'	21'
Consistência		0,50	0,60	0,70	0,80
Tempo de pega (min)	Início	5'	8'	11'	13
Res. Revestimento 100%	Fim	12'	15'	17'	19'
Consistência		0,50	0,60	0,70	0,80
Tempo de pega (min)	Início	4'	6'	9'	11'
Res. Placa 100%	Fim	7'	10'	13'	15'

## Resistência à compressão

**Tabela 4.19** – Resistência a compressão do gesso oriundo da gipsita adicionado a percentuais 100 % de resíduo revestimento e placa adicionados a gipsita calcinada em relação à consistência.

<b>Consistência</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>
Resistência a Compressão dos corpos de prova do Gesso calcinado kgf/cm <sup>2</sup> )	107,0	97,8	90,7	81,3
Resistência a Compressão do Resíduo Revestimento 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	86,4	86,0	85,3	76,2
Resistência a Compressão do Resíduo Placa 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	85,3	84,2	80,0	70,0

## Resistências à flexão

**Tabela 4.20** – Resistência a Flexão dos percentuais a 100% de resíduo revestimento e placa adicionados a Gipsita calcinada em relação à consistência.

<b>Consistência</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>
Resistência Flexão dos corpos de prova do Gesso calcinado (kgf/cm <sup>2</sup> )	46,56	43,84	41,40	38,58
Resistência Flexão Resíduo Revestimento 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	39,00	37,00	34,70	32,30
Resistência Flexão Resíduo Placa 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	35,00	33,14	31,9	30,04

## Ensaio de Dureza Shore

**Tabela 4.21** – Dureza dos percentuais de resíduos revestimentos e placa adicionados gipsita calcinada em relação à consistência.

<b>Consistência</b>	<b>0,50</b>	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,80</b>	<b>Norma-CENT/TC 241</b>
Dureza Shore (C) Gesso calcinado	89	83	73	62	> 60
Dureza Shore (C) Resíduo Revestimento 100% kg/cm <sup>2</sup>	77	75	65	55	> 60
Dureza Shore (C) Resíduo Placa 100% Kg/cm <sup>2</sup>	74	72	61	51	>60

### Tempo de Secagem dos corpos de prova

**Tabela 4.22** – Influência do tempo de secagem dos corpos de prova em relação à resistência à compressão e densidade aparente.

Idade de ruptura do C. P (dias)	01	03	07
Resistência Compressão do Gesso calcinado (kgf/cm <sup>2</sup> )	67	77	92
Densidade Aparente Gesso calcinado em (g/cm <sup>3</sup> )	0,845	0,897	0,932
Resistência Compressão do resíduo de Revestimento 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	50	78	86
Densidade Aparente Resíduo Revestimento 100% (g/cm <sup>3</sup> )	0,732	0,797	0,810
Resistência Compressão do resíduo de Placa 100% (kgf/cm <sup>2</sup> )	69	75	85
Densidade Aparente Resíduo Placa 100% (g/cm <sup>3</sup> )	0,721	0,746	0,778

### Aderência

**Tabela. 4.23** - Resistência de aderência á tração em parede de alvenaria cerâmica com gesso oriundo da calcinação da gipsita, com 7 mm de espessura.

Corpo de prova	Carga (kgf)	Taxa de Carregamento (N/s)	Norma NBR 13528 Taxa de Carregamento 5 (N/s)
			Resistencia Aderência até 0,20(MPa)
01	92	5	0,3750
02	80	5	0,3260
03	75	5	0,3058
04	77	5	0,3139
Média	81,0	5	0,33

**Tabela 4.24-** Resistência de aderência á tração em parede de alvenaria cerâmica com gesso oriundo do resíduo revestimento 100%, com 7 mm de espessura.

Corpo de prova	Carga (kgf)	Taxa de Carregamento (N/s)	Norma NBR 13528 Taxa de Carregamento 5 (N/s)
			Resistencia Aderência até 0,20(MPa)
01	90	5	0,366
02	79	5	0,322
03	66	5	0,269
04	73	5	0,297
Média	77,0	5	0,313

**Tabela 4.25** - Resistência de aderência á tração em parede de alvenaria cerâmica com gesso oriundo do residuo placa 100% , com 7 mm de espessura.

Corpo de prova	Carga (kgf)	Taxa de Carregamento (N/s)	Norma NBR 13528
			Taxa de Carregamento 5 (N/s) Resistencia Aderência até 0,20(MPa)
01	65	5	<b>0,265</b>
02	55	5	<b>0,224</b>
03	89	5	<b>0,362</b>
04	91	5	<b>0,371</b>
Média	75,0	5	<b>0,305</b>

## APÊNDICE E

Trabalhos publicados:

### **ESTUDO DA CONVERSÃO DA GIPSITA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA EM CONDIÇÕES TRANSIENTES DE FUNCIONAMENTO DO FORNO CONTÍNUO DE PRODUÇÃO DE GESSO**

**CAVALCANTI<sup>1</sup>, D. E. S.; PRADO<sup>2</sup>, M. F. S; MELO<sup>3</sup>, D. C. P; RIBEIRO<sup>4</sup>, A.S.; BENACHOUR<sup>5</sup>, M.;**

<sup>1</sup>Mestrando do DEQ/UFPE <sup>2</sup>Aluna de Engenharia Química do DEQ/UFPE <sup>3</sup>Doutoranda do DEQ/UFPE <sup>4</sup>Doutorando do DEQ/UFPE <sup>5</sup>Professor do DEQ/UFPE Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de Pernambuco Cidade Universitária, 50740-521 – Recife – PE  
e-mail: [mbena@ufpr.br](mailto:mbena@ufpr.br)

**RESUMO** – O presente trabalho teve por objetivo estudar a desidratação da gipsita em função da temperatura em regime transiente de funcionamento de um forno contínuo para a produção de gesso, operando a pressão atmosférica e em condições operacionais ótimas previamente estabelecidas. Durante os ensaios foram recolhidas amostras do sólido reacional antes de atingir-se o regime estacionário, com diferentes temperaturas, posteriormente realizaram-se as análises físico-químicas e mecânicas do material recolhido usando várias técnicas de caracterização. Os valores obtidos nas caracterizações foram comparados aos indicados pela norma NBR 13207. A realização deste trabalho permitiu avaliar a evolução das propriedades do gesso produzido com a elevação da temperatura, se aproveitando do funcionamento em estado transiente do forno contínuo de calcinação da gipsita e mostrando que é fundamental o controle da temperatura de calcinação do dihidratado na formulação de um gesso de alta qualidade.

Palavras chave: calcinação, dihidratado, regime transitório.

### **Estudo da Conversão em Função a Granulometria no Processo de Desidratação Térmica da Gipsita para Obtenção de um Gesso Beta**

D. C. P. de Melo<sup>1</sup>; V.A. Santos<sup>2</sup>; M. Benachour<sup>3</sup>; A. S. Ribeiro<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de Pernambuco  
Campus Universitário, Rua Prof. Arthur de Sá S/N, Cidade Universitária– CEP:  
50740-521  
Recife – PE – Brasil Telefone: (55-81) 2126-7289 – Fax: (55-81)2126-7289  
e-mail: [danielecastro3@hotmail.com](mailto:danielecastro3@hotmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Química – Universidade Católica de Pernambuco  
Rua do Príncipe, xxxx – CEP: 50000-000 – Recife – PE – Brasil  
Telefone: (55-81) 2119-4188 – Fax: (55-81)2119-4188  
e-mail: [vas@unicap.br](mailto:vas@unicap.br)

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de Pernambuco  
Campus Universitário, Rua Prof. Arthur de Sá S/N, Cidade Universitária– CEP:  
50740-521 Recife – PE – Brasil Telefone: (55-81) 2126-7289 – Fax: (55-  
81)2126-7289  
e-mail: [mbena@ufpe.br](mailto:mbena@ufpe.br)

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de Pernambuco  
Campus Universitário, Rua Prof. Arthur de Sá S/N, Cidade Universitária– CEP:  
50740-521 Recife – PE – Brasil Telefone: (55-81) 2126-7289 – Fax: (55-  
81)2126-7289  
e-mail: [abrahao@yahoo.com.br](mailto:abrahao@yahoo.com.br)

## RESUMO

Foram determinados parâmetros cinéticos otimizados com os quais ocorre desidratação térmica do minério de gipsita, dando origem a um tipo de gesso beta reciclável. Com a resolução do CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, o resíduo de gesso proveniente da construção civil tornou-se um rejeito de difícil descarte, uma vez que esse material é considerado como contaminante para os demais componentes de um entulho e consideram que ainda não foi desenvolvida tecnologia para sua reciclagem. Com auxílio de um reator batelada em escala laboratorial será produzido gesso beta a partir do minério de gipsita e sob pressão manométrica e temperatura controlada. Esse excedente de pressão será obtido restando-se parte do vapor produzido com a desidratação do minério, por meio de uma válvula do tipo alívio. A desidratação do minério de gipsita nessas condições dá origem a um gesso beta com características mecânicas superiores ao gesso convencionalmente produzido pela maioria dos processos produtivos existentes no Pólo Gesseiro do Araripe, Pernambuco. A determinação da conversão do processo de desidratação foi calculada com auxílio de um programa computacional em linguagem Matlab. O estudo da influência da granulometria na determinação da etapa responsável pela reação mostrou que em condições operacionais do tipo: 0,65atm e 170°C, a etapa química prevalece para diâmetros com partículas menores que 0,4mm e acima desse valor prevalece o regime de difusão.

*Palavras-chave: Gipsita, Gesso Beta, Desidratação, Conversão, Granulometria.*

## 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



### TÍTULO DO TRABALHO:

**Estudo do Processo de Produção de Gesso Reciclado a Partir de Resíduos de Bloco de Gesso em um Forno Piloto Rotativo Contínuo usando Gás natural como Combustível**

### AUTORES:

**Rafael Augusto D. P. de Melo; Danilo Emídio Souza Cavalcante, Mohand Benachour; Abrahão Severo Ribeiro, Pedro Leiz de Mendonça Pereira**

### INSTITUIÇÃO:

**Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Engenharia Química**



## Resumo

Este trabalho teve como objetivo estudar a calcinação do gesso resíduos de gesso utilizando gás natural (GN) como combustível em forno rotativo piloto contínuo, para a produção de gesso beta reciclável. Das condições ideais de calcinação previamente estabelecidos, os experimentos foram realizados pela adição de frações de resíduos de gesso para estuque de gesso nos seguintes valores: 0 (gesso puro desperdício de gesso), 50, 70, 80 e 88%. Em cada experimento, foram avaliadas as propriedades físico-químicas e mecânicas do material produzido, e os resultados foram comparados com as especificações exigidas pela NBR 13207. O processo de calcinação de resíduos de gesso mostraram resultados promissores, produzindo um gesso beta reciclados satisfazendo as exigências regulamentares (Resolução 307/2002 do CONAMA) de uma fração igual ou superior a 80% de gesso. O uso do gás natural como combustível para calcinação de resíduos de gesso permite a formulação de uma satisfatória qualidade de gesso beta reciclados, reduzindo o impacto ambiental dos gases de combustão e proporcionar oportunidades de negócios nas grandes cidades, com geração de empregos e aumento da renda para as populações.

Palavras-chave: Resíduos gesso, calcinação, hemihidrato, o gás natural.

## APENDICE F

Matéria da Revista “Brasil Gypsum Magazine” julho/agosto 2010

### Movimento

#### Certificação na Argentina

Depois de passar por rigorosas avaliações, os produtos de gesso das indústrias pernambucanas receberam a certificação técnica dos órgãos reguladores da Argentina. Isso permitirá a participação das empresas em licitações públicas no país vizinho ao Brasil. Todo o sistema construtivo, incluindo blocos, placas e massas de rejunte e revestimento foram homologados. De acordo com a Rafaela Sartori, do Sindusgesso, em novembro passado uma comitiva com dois arquitetos argentinos vieram a Pernambuco para avaliar a qualidade dos produtos fabricados no Estado. “Eles conheceram as fábricas em Araripina e visitaram obras no Recife e em Suape”, revelou.



#### Casas para os desabrigados

O Sindusgesso apresentou, em julho, um projeto ao Governo do Pernambuco para construção de casas para atender a população que foi atingida pelas enchentes ocorridas em 12 municípios da Zona da Mata. A proposta prevê a construção de casas com paredes de gesso com 47 m<sup>2</sup> de área. A meta é construir 150 casas por mês, a um custo de R\$ 25 mil por unidade, aproximadamente. Segundo Josias Inojosa Filho, presidente do Sindusgesso, as empresas do polo gesso que participarem do projeto abrirão mão de parte dos lucros como forma de auxílio às vítimas das chuvas.



#### Estande arrojado

O estande do Sebrae foi uma atração a parte no 19º Congresso Brasileiro de Arquitetos. Com linhas modernas e arrojadas, o estande foi construído pelo Sindusgesso e contou com espaço para divulgação das ações do Sebrae no âmbito do Arranjo Produtivo Local do Gesso na Região do Araripe (PE). O evento aconteceu em Recife, de 1º a 4 de junho, numa promoção do Instituto de Arquitetos do Brasil. ●



Projetos

COLMÉIA

# Experiência de sucesso

**Após projeto pioneiro de construção de casas populares, empresa conquista mercado utilizando gesso em suas construções**

**Desde que utilizou o material pela primeira vez na construção de 200 casas populares** para famílias desabrigadas no Sertão do Araripe, em 2004, a Colméia não parou mais de aplicar o gesso de forma bem-sucedida em seus empreendimentos. Para a construção dessas casas, a construtora firmou parceria com o Sindicato da Indústria do Gesso de Pernambuco (Sindugesso), a qual levou à concepção de um projeto que atendesse a necessidade de construir com baixo custo sem, contudo, perder de vista às exigências de qualidade na finalização da obra.

Após diversos estudos em conjunto com técnicos da Companhia Pernambucana de Habitação e Obras (Cehab), do Instituto Tecnológico de Pernambuco (Itep) e do próprio Sindugesso, chegou-se à conclusão de

que utilizar os blocos de gesso era a solução mais viável. Conseguiu-se, dessa forma, não apenas resolver a questão financeira, mas também proporcionar um alto padrão de acabamento, com maior velocidade da obra e menos desperdício de material.

A utilização de blocos hidrofugados (tratados com silicone, que os torna à prova d'água) conseguiu pôr fim à desconfiança em relação à resistência do gesso. Após essa vitoriosa experiência, a Colméia também construiu, em 2006, da UTI do Hospital Regional de Arcoverde, utilizando os blocos de gesso em todos as elevações dos ambientes internos da unidade.

Para Luiz Neves, arquiteto e diretor da empresa, velocidade de execução, acabamento, possibilidade de moldagem mais versátil, disponibili-

de do material, isolamento térmico e preço competitivo com relação a outras técnicas são fatores fundamentais para a expansão do gesso no mercado.

Prova disso é que a Colméia também aplicou divisórias de gesso na reforma de sua sede, no Recife, e sempre utiliza o material de acordo com as necessidades de seus projetos. Hoje, a empresa tem um contrato assinado para a construção de mais 51 casas em Suape.

A desinformação e a falta da correta qualificação dos profissionais do setor ainda representam um desafio para a construtora. Segundo Luiz Neves, alguns clientes ainda têm preconceito em relação ao gesso, devido ao desconhecimento. “A correta aplicação do gesso, seja como elevação de paredes ou acabamentos, é o segredo para o sucesso da utilização do material”, esclarece. ●





“Com esse projeto, procuramos aumentar a participação das empresas atendidas nos mercados nacional e internacional. Para isso, é preciso que elas estejam atentas às necessidades e exigências de cada mercado, e é nesse sentido que estamos conduzindo as capacitações”, ressalta a diretora técnica do Sebrae em Pernambuco, Roberta Correia.

A iniciativa vem colhendo bons frutos, trazendo mudança no comportamento empreendedor do setor. O Programa Estratégias Empresariais, desenvolvido no projeto, teve um forte impacto na melhoria do nível de gestão das empresas, que passaram a trabalhar com foco estratégico. Também a partir da participação em eventos como a Expogesso, em Trindade, o Global Gypsum Conference, no Rio de Janeiro/RJ, e em rodadas de negócios, as empresas ampliaram informações e observaram as possibilidades dos novos mercados para expandir os negócios no Brasil e no exterior.

Um dos principais motes do programa, a responsabilidade ambiental, também vem trazendo novas práticas e bons resultados. “A licença ambiental é também um dos focos estratégicos e de importância

no projeto do polo gesso. Por meio dessa regularização, as empresas podem não só promover a preservação do ambiente, como também podem ter ganhos em produtividade, com economia de matéria-prima e energia”, explica Roberta.

Em ações como o workshop “Gesso na Chapada do Araripe”, os empreendedores aprenderam sobre o manejo florestal e sobre os cuidados com o meio ambiente. De posse dessas informações, quinze empresários se mobilizaram para a compra de áreas, onde serão feitos planos de manejo, atendendo às suas demandas de

biomassa como matriz energética.

Outros investiram em tecnologia de produção para otimizar o consumo de lenha nos fornos e obtiveram uma redução de 30% em média. Igualmente nessa linha, as consultorias em Eficiência Energética, Gestão da Manutenção, Eficiência nos Fornos de Calcinação e Produção Mais Limpa foram responsáveis pela redução em até 50% nos custos de energia elétrica, manutenção e consumo de lenha das empresas mediante a otimização de processos e adequação das instalações das empresas. ●

