

RELATÓRIO TÉCNICO Nº 99 358-205

**USO DO GÁS NATURAL PARA A SECAGEM FORÇADA DE ARGILA
PARA PLACAS CERÂMICAS NO PÓLO CERÂMICO DE SANTA
GERTRUDES E COGERAÇÃO**

CETAE- Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas

LETMCE- Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões

**CT- OBRAS - Centro de Tecnologia de Obras e Infra-estrutura
Seção de Recursos Minerais e Tecnologia Cerâmica**

CLIENTE: COMGÁS – COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO.

Abril/2008

RESUMO

O relatório apresenta os resultados obtidos no estudo que teve como objetivo investigar as possibilidades e alternativas de uso do gás natural para a secagem forçada de argila utilizada pelo Pólo das indústrias cerâmicas de revestimento situado na região em torno do município de Santa Gertrudes, no interior do Estado de São Paulo.

A partir de resultados obtidos em laboratório, foram estabelecidos os limites de temperatura de secagem das argilas, e proposto um tipo de secador mais adequado à natureza e características da argila da região.

Quanto às alternativas de sistemas de geração de gases quentes para secagem, foram analisadas três configurações possíveis: uma convencional com gerador de gases quentes e duas configurações alternativas com cogeração de energia elétrica: com motogeradores e com turbogeradores, em todos os casos utilizando o gás natural como combustível.

Para cada uma das alternativas, foram levantados o volume de investimento necessário, os custos operacionais envolvidos e calculadas as respectivas taxas de retorno esperadas, considerando uma instalação típica de secagem artificial.

Os resultados obtidos indicam que a alternativa de cogeração com motogeradores é técnica e economicamente mais atrativa, inclusive sob o aspecto da geração distribuída de energia elétrica como forma de aumento da eficiência do uso do gás natural para a geração termoelétrica.

Palavras-chave: Gás natural, Secagem de Cerâmica, Cogeração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 JUSTIFICATIVAS DO PROJETO	8
3 OBJETIVOS E METAS DO PROJETO	9
4 UM PANORAMA DO PÓLO CERÂMICO DE SANTA GERTRUDES	10
4.1 Localização	10
4.2 Origem do Pólo de Santa Gertrudes	12
4.3 Produção atual e relação com a produção nacional e mundial	13
4.4 Sistema produtivo de argila	15
4.5 Insumos energéticos	17
4.6 Tendências do setor de revestimentos	17
5 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PLACAS CERÂMICAS	19
5.1 O processo atual de secagem de argila	23
5.2 A secagem artificial e a possibilidade de cogeração	26
5.3 O estado da arte da aplicação de cogeração na indústria cerâmica	28
6 SECAGEM ARTIFICIAL DA ARGILA	31
6.1 Comportamento das argilas na secagem	32
6.1.1 Estudos na UFSCar	32
6.1.2 Estudos no IPT	34
6.1.3 Conclusões dos Estudos Experimentais de Secagem	38
6.2 Secadores industriais	38
6.2.1 Secadores tipo cilindro rotativo (<i>“rotary dryer”</i>)	39
6.2.2 Secadores do tipo câmara (<i>“rapid dryer”</i>)	44
6.2.3 Secadores pneumáticos (<i>“flash dryer / swirl fluidizer”</i>)	46
6.2.3 Análise comparativa entre os tipos de secadores	47
7 PROJETO CONCEITUAL DE UMA UNIDADE DE SECAGEM ARTIFICIAL	48
7.1 Parâmetros de projeto considerados	48
7.2 Valores calculados	49
8 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE SECAGEM	50
8.1 Configurações convencionais	51
8.2 Configurações alternativas de cogeração	54
8.2.1 Alternativa com motogeradores	55
8.2.2 Alternativa com turbogerador	57
8.3 Análise comparativa	60
8.3.1 Disponibilidades de energia (balanço calor e trabalho)	60
8.3.2 Emissões atmosféricas	61
9 ANÁLISE ECONÔMICA COMPARATIVA	63

9.1 investimentos	63
9.1.1 Alternativa gerador de gases quentes	64
9.1.2 Alternativa motogerador	66
9.1.3 Alternativa turbogerador	67
10 IMPACTOS DA COGERAÇÃO NO PÓLO DE SANTA GERTRUDES	71
11 CONCLUSÕES	76
12 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXO A – SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DAS INDÚSTRIAS E JAZIDAS NA REGIÃO DE SANTA GERTRUDES.....	80
ANEXO B – ENSAIOS LABORATORIAIS DA UFSCar.....	82
ANEXO C – ENSAIOS LABORATORIAIS DO IPT	89
ANEXO D – PROPOSTAS TÉCNICAS COMERCIAIS DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização e distribuição das unidades cerâmicas e minas de argila no Pólo de Santa Gertrudes.	11
Figura 2 - Cadeia produtiva de revestimentos cerâmicos. (modificado de Machado 2003).	12
Figura 3 - Principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos até 2006 em milhões de m ² (Anfacer 2008).	13
Figura 4 – Produção e vendas do Pólo de Santa Gertrudes e no Estado de São Paulo em 2007 (Aspacer, 2008).	14
Figura 5 – Capacidade instalada de produção por empresa (base agosto 2006).	15
Figura 6 – Fases do processo produtivo de revestimentos cerâmicos (extraído de Motta, 2000).	20
Figura 7 - Fluxograma da mineração e preparação de argila para revestimentos cerâmicos no Pólo de Santa Gertrudes.	22
Figura 8 - Fluxograma simplificado da planta de moagem.	23
Figura 9 - Etapas do processo e insumos na fabricação de placas cerâmicas – situação atual.	24
Figura 10 – Operações de pátio: a) deposição; b) revolvimento de argila durante secagem ao sol.	25
Figura 11 - Etapas do processo e insumos na fabricação de placas cerâmicas – situação futura.	27
Figura 12– Aspecto do conjunto turbogerador instalado na Pamesa.	31
Figura 13 – Valores do módulo de ruptura à flexão a seco das Argilas “A” e “B” em função da temperatura de secagem, observadas na UFSCar/LaRC.	33
Figura 14 – Valores de compacidade das Argilas “A” e “B” em função da temperatura de secagem, observadas na UFSCar/LaRC.	33
Figura 15 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da Mina Tute, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.	35
Figura 16 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da Mina Partezani, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.	35
Figura 17 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra da mistura de argila do Pátio da Unicer, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.	36
Figura 18 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila de topo da Mina Unicer, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.	36
Figura 19 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da base da Mina Unicer, secas artificialmente, em diversas temperaturas máximas.	37
Figura 20 – Secador do tipo cilindro rotativo instalado na Incefra.	41
Figura 21 – Detalhes das medições de temperatura e composição dos gases na entrada do secador.	42
Figura 22 – Perfis de temperatura dos gases na entrada do secador nas diferentes condições operacionais.	43
Figura 23 – Secador de argila a lenha.	44
Figura 24 – Esquema de secador alternativo tipo “rapid dryer” da ICON (Anexo D).	45

Figura 25 – Esquema de secador tipo pneumático (<i>“swirl fluidizerTM”</i>) da NIRO A/S (GEA).	47
Figura 26 - Configuração convencional com secador rotativo.....	52
Figura 27 - Configuração convencional com gerador de gases quentes.....	53
Figura 28 – Configuração com motogeradores.	56
Figura 29 – Configuração com turbogerador.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Custos médios envolvidos na secagem natural da argila.....	26
Tabela 2 - Distribuição da potência elétrica instalada em uma unidade industrial típica. ...	28
Tabela 3 – Resultados de Dap, MRFs, compacidade e coordenadas colorimétricas L* e a*, das Argilas “A” e “B”, conforme a temperatura.	32
Tabela 4 – Resultados da medição em secador rotativo.....	42
Tabela 5 – Regime de operação da unidade de secagem da argila.....	50
Tabela 6 – Disponibilidades de calor e trabalho.	60
Tabela 7 – Previsão de emissões segundo bibliografia (Lora e Haddad, 2006).....	63
Tabela 8 – Investimentos: alternativa gerador de gases quentes.....	65
Tabela 9 - Investimentos: alternativa motogeradores.....	66
Tabela 10 - Investimentos: alternativa turbogerador.	67
Tabela 11 – Parâmetros considerados na avaliação econômica.....	68
Tabela 12 – Quadro geral da avaliação econômica das alternativas.	69
Tabela 13 – Cenário atual.	72
Tabela 14 – Cenário provável com a adoção de secagem convencional.....	73
Tabela 15 - Cenário provável com a adoção de cogeração com motogeradores.....	74
Tabela 16 - Cenário provável com a adoção de cogeração com turbogeradores.	75

1 INTRODUÇÃO

Este texto constitui o relatório final do trabalho denominado “USO DO GÁS NATURAL PARA A SECAGEM FORÇADA DE ARGILA PARA PLACAS CERÂMICAS NO PÓLO CERÂMICO DE SANTA GERTRUDES E COGERAÇÃO” (código 24) no qual são apresentados os resultados e conclusões do estudo realizado pelo IPT sob o patrocínio da COMGÁS Cia de Gás de São Paulo S.A.

Trata-se de um trabalho desenvolvido dentro do programa de pesquisa e desenvolvimento ciclo 2006-2007 da empresa, com o acompanhamento da antiga CSPE - Comissão de Serviços Públicos de Energia do Estado de São Paulo, atualmente ARSESP – Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo.

2 JUSTIFICATIVAS DO PROJETO

O estudo da secagem de argila em secadores controlados, em ambiente fechado, como alternativa para substituição da secagem natural, se justifica pelo aspecto ambiental; pelo aspecto técnico quanto ao comportamento da argila e suas propriedades; e pela tecnologia do processamento térmico.

No aspecto ambiental, observa-se que a secagem de aproximadamente seis milhões de toneladas de argila por ano ao ar livre pode gerar os seguintes impactos negativos ao meio ambiente no entorno dos empreendimentos:

- assoreamento e turbidez aos corpos d'água (rios, córregos e represas);
- comprometimento do abastecimento público, fato ocasional, mas que tem-se repetido freqüentemente;
- aumento sensível na evaporação, fator sério em bacia hidrográfica com alto deficit hídrico, pela utilização de sistema de represa para retenção de finos; e,
- aumento da concentração de material particulado na atmosfera (geração de poeira).

Esse conjunto de adversidades tem sido objeto de preocupações do Ministério Público e do Sistema Estadual de Licenciamento Ambiental, bem como dos poderes locais e entidades civis de defesa do meio ambiente. Desta forma, na busca de amenizar esses impactos negativos da secagem, os órgãos ambientais, além de já não liberarem a secagem natural em algumas áreas, estão na iminência de generalizar a restrição a todo o Pólo de Santa Gertrudes, obrigando a instalação de secadores artificiais.

Do ponto de vista técnico das propriedades das argilas secas artificialmente, ressalta-se que o sistema de moagem via seca para a produção de revestimentos cerâmicos é exclusivo do Brasil e apenas duas indústrias da região trabalham com secadores, mas apenas para secagem complementar. Desta forma, a prática ainda não está bem desenvolvida, tanto no aspecto técnico como no econômico, faltando estabelecer melhores condições de processo para otimizar custos e gerar produtos (argila seca) com plasticidade suficiente para o processo de prensagem e dar a resistência mecânica necessária para o processo de esmaltação e decoração.

Desta forma, o desenvolvimento do processo de secagem artificial torna-se de grande importância, sendo necessário conhecer os limites em que as argilas da Formação Corumbataí (formação geológica que abastece matéria-prima para a região) possam ser trabalhadas. Dentre os parâmetros buscados destacam-se umidade inicial, granulometria, temperatura máxima e ciclo de secagem.

Do ponto de vista da tecnologia do processamento térmico, a utilização de um energético gasoso nobre, como o gás natural para a geração de energia térmica para a operação de secagem, pode ser aprimorada pelo emprego da cogeração que possibilita a geração de energia elétrica / mecânica e energia térmica a partir de um único fluxo do combustível. Dessa forma, além dos outros aspectos, a viabilidade econômica do projeto, além de considerar a valorização da geração adicional da energia elétrica, deve levar em conta aspectos técnicos específicos do aproveitamento térmico em consideração.

3 OBJETIVOS E METAS DO PROJETO

O trabalho teve com objetivo avaliar técnica e economicamente as alternativas e possibilidades de executar as operações de secagem da argila empregada na fabricação

de revestimentos cerâmicos (placas) de modo artificial em substituição à prática de secagem natural em pátios.

São as seguintes as metas do projeto estabelecidas na proposta de trabalho:

- Conhecer e estabelecer os limites técnicos da secagem, para que as argilas apresentem, no processo cerâmico, desempenho similar ou superior aos da argila seca ao sol;
- Análise e concepção do sistema térmico que busque viabilizar economicamente a secagem forçada da argila conjugando a geração de energia elétrica / mecânica e energia térmica por meio de um sistema de cogeração; e,
- Propiciar um sistema de secagem que minimize o impacto ambiental na região do Pólo de Santa Gertrudes.

4 UM PANORAMA DO PÓLO CERÂMICO DE SANTA GERTRUDES

O presente trabalho trata exclusivamente do segmento industrial mínero-cerâmico, mais precisamente da etapa de produção e preparação das argilas utilizadas na elaboração das massas dos revestimentos cerâmicos produzidos por via seca no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes. Contudo, para contextualização das atividades aqui desenvolvidas, serão abordados neste item aspectos mais gerais da cadeia produtiva local.

4.1 Localização

O Pólo de Santa Gertrudes congrega 36 empresas especializadas na produção de revestimentos cerâmicos, distribuídas entre os seguintes municípios do interior do Estado de São Paulo: Santa Gertrudes, Cordeirópolis, Rio Claro, Limeira, Ipeúna, Piracicaba e Araras. Por outro lado, os principais municípios fornecedores de argila para o Pólo são: Rio Claro, Santa Gertrudes, Cordeirópolis, Limeira, Ipeúna e Charqueada, conforme ilustra o mapa da Figura 1.

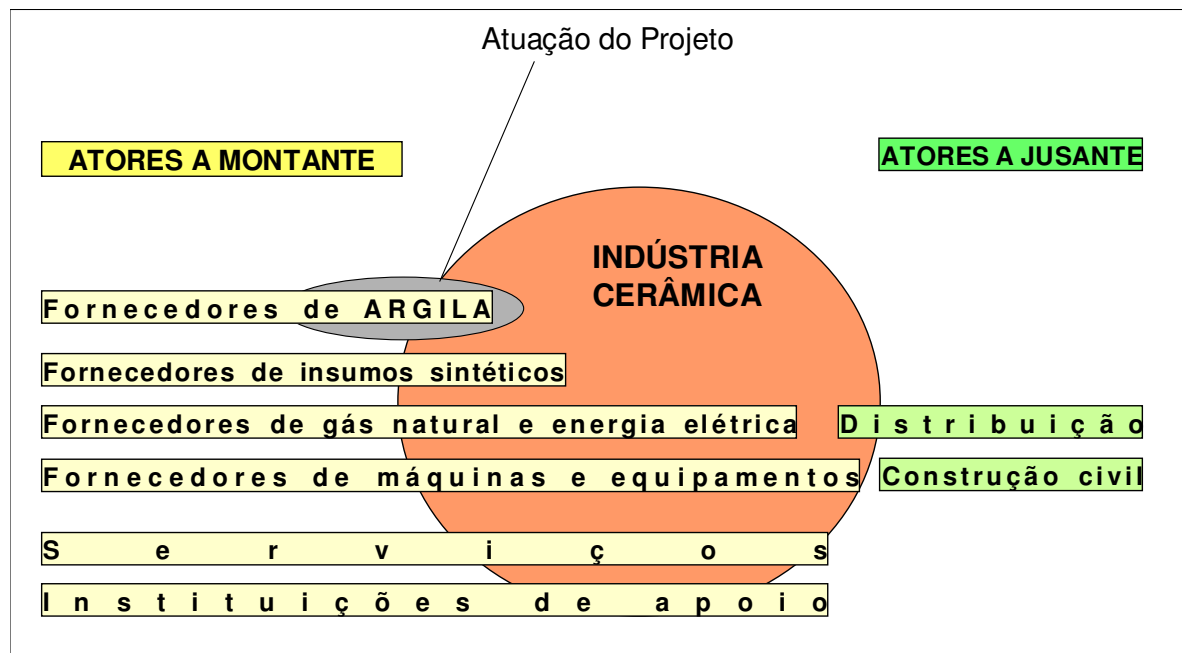


Figura 2 - Cadeia produtiva de revestimentos cerâmicos. (modificado de Machado 2003).

A cadeia produtiva de placas cerâmicas tem despertado bastante interesse econômico em face de sua importância como atividade econômica do Estado. Os principais processos de fabricação envolvidos encontram-se referidos e discutidos em farta bibliografia, destacando-se Araújo *et al.* (2001a, 2001b), Menegazzo *et al.* (2004), Boschi (2004a), Machado (2004) e Motta *et al.*, 2004, entre outros.

4.2 Origem do Pólo de Santa Gertrudes

No início do século 20, imigrantes italianos instalaram as primeiras unidades cerâmicas na cidade de Santa Gertrudes para a manufatura de telhas e tijolos e passaram a produzir pisos coloniais na década de 60 e 70. Daí, com o apoio de produtores de equipamentos, iniciaram a produção de pisos esmaltados, através de moagem a seco da argila, prensagem e monoqueima rápida.

A partir dos ajustes e domínio do novo processo, atendimento de qualidade do produto, preços bastante acessíveis e mercado próximo, o Pólo tornou-se, na década de 90, o principal produtor brasileiro de placas cerâmicas. Neste percurso, destaca-se a argila como fator essencial que contribuiu para o sucesso do Pólo devido à sua disponibilidade e qualidade, o que permitiu processo ágil e econômico de moagem e de queima extra-rápida.

Outro fator que facilitou o sucesso da produção foi a substituição do GLP (gás liquefeito de petróleo) por gás natural, que significou um aporte de economia e qualidade na produção. Ressalta-se que o processamento térmico das peças produzidas por moagem via seca, com a argila da Formação Corumbataí, é 30% mais econômico do que na moagem via úmida convencional, por dispensar a etapa de secagem da barbotina em atomizadores.

Atualmente, além da expansão do volume de produção na região, sobretudo pela instalação de novas linhas de produção, os empresários do Pólo vem instalando novas unidades em outras regiões do país, preferencialmente na região Nordeste do Brasil (p.ex. Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte).

4.3 Produção atual e relação com a produção nacional e mundial

No cenário internacional, a produção de revestimento hoje é liderada pela China, com mais de três bilhões de m²/ano, seguidos por Brasil, Espanha, Itália e Índia. O fato novo é que o Brasil recém conquistou a segunda posição e deve sustentá-la pelos anos vindouros. A Figura 3 ilustra a produção até 2006, em que a Espanha ainda ocupava o segundo lugar em volume de produção.



Figura 3 - Principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos até 2006 em milhões de m² (Anfacer 2008).

Atualmente o Pólo de Santa Gertrudes concentra aproximadamente 36 unidades produtoras (fábricas), que apresentam as seguintes estatísticas:

- Segundo Aspacer (Associação dos Fabricantes de Revestimentos Cerâmicos do Estado de São Paulo), em 2007 foram produzidos 367 milhões de m² de placas e, para 2008, tem-se a projeção de produção de 378 milhões de m² (Figura 4). Estes valores equivalem a 56% da produção brasileira e a 85% da produção paulista para o ano de 2008.
- Para a produção de 2007, estima-se que foram consumidos 6,2 milhões de toneladas de argila e, em 2008, serão utilizados 6,4 milhões de toneladas de argila no Pólo de Santa Gertrudes.

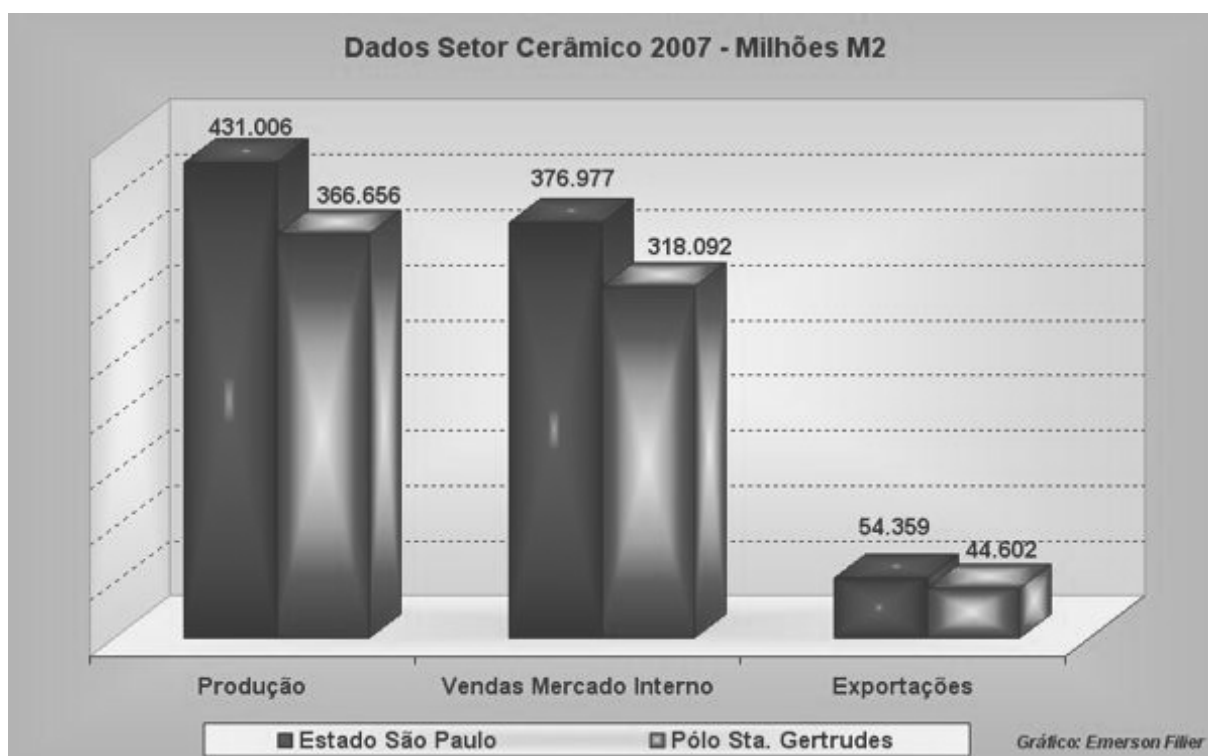


Figura 4 – Produção e vendas do Pólo de Santa Gertrudes e no Estado de São Paulo em 2007 (Aspacer, 2008).

Levantamentos de dados feitos no âmbito do projeto indicam que a produção média por empresa instalada na região está em torno de 1 milhão m²/mês, mas individualmente observam-se diferentes níveis de produção, como ilustra o gráfico da Figura 5.

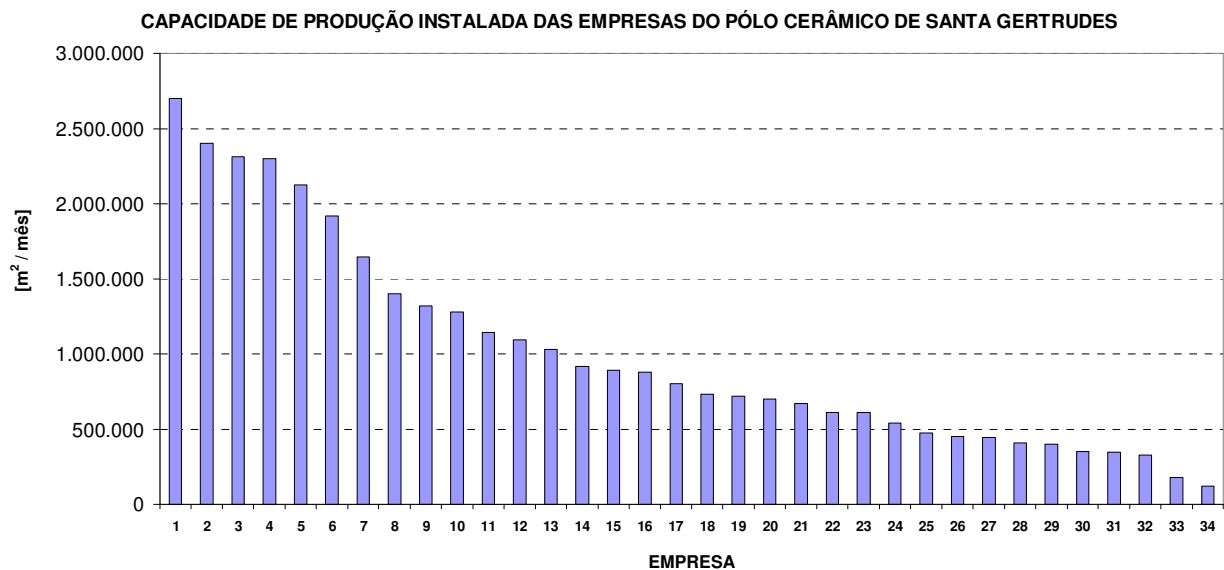


Figura 5 – Capacidade instalada de produção por empresa (base agosto 2006).

4.4 Sistema produtivo de argila

A matéria-prima é extraída da Formação Corumbataí (Permiano), uma seqüência de até 130 metros de espessura de siltitos, folhelhos e argilitos avermelhados, que ocorre no Estado de São Paulo, desde a cidade de Piracicaba e estende-se no rumo norte até as proximidades da cidade de Casa Branca. Desta forma, existem grandes reservas de material argiloso, suficientes para abastecimento do Pólo por longo prazo. Entretanto, para a transformação dessas reservas em recursos, ou seja, para a extração dessas argilas é necessário um planejamento que atenda às legislações ambiental e mineral e reduza os conflitos com outras formas de uso e ocupação.

As atuais atividades mineiras para extração de argila compreendem cerca de 20 minas de argila no Pólo de Santa Gertrudes, produzindo cerca de 520.000 t/mês em todo o Pólo. A maioria destas minas é operada por empresas ligadas às próprias indústrias cerâmicas e, secundariamente, por produtores independentes. Uma parte menor de argila é também extraída para abastecer outras plantas fora do Pólo, e uma quantidade adicional é ainda utilizada para a fabricação de produtos cerâmicos estruturais e de vedação, tais como tijolos, blocos e telhas.

A mineração é conduzida a céu aberto, iniciando pela supressão da vegetação (geralmente ocupação agrícola) e decapeamento do material estéril, seguida por desmonte do minério, que pode ser por explosivo ou mecânico (dependendo da dureza da

rocha), usando uma ou mais bancadas. O minério desmontado segue para trabalhos de pátio, para cominuição, homogeneização e secagem ao ar livre (operação detalhada na Seção 4), podendo, ocasionalmente, passar por sazonalidade.

Após o término das operações ao ar livre, o material é estocado ou segue diretamente para a planta de moagem e, após umidificação, constitui-se na massa pronta para a prensagem.

Do ponto de vista ambiental, a região de Santa Gertrudes é um território sedimentar com uma topografia suave, com predominância de pequenas colinas, densamente ocupada por agricultura e contendo ilhas de áreas urbanas. As minas de argila estão localizadas em colinas amplas com encostas de declive médio a baixo, onde se implantam extensas áreas de terra exposta (pátios) para trabalhar a argila (esparramar, misturar, revolver, coletar etc.). Estes pátios têm sido motivo de restrição dos órgãos ambientais quanto ao eficaz controle de impactos ambientais adversos, como a erosão laminar, a deflação eólica, o conseqüente assoreamento de drenagens e reservatórios de abastecimento de água (o principal problema), e impacto visual.

Além dos impactos causados por cada mina, há um forte adensamento da atividade em determinadas áreas, que pode agravar o impacto ambiental em toda a região. Este é um aspecto importante a ser aprofundado, buscando estabelecer um equilíbrio dos meios físico, biótico e socioeconômico, para garantir a continuidade do abastecimento de argila. O estudo deve envolver continuamente os diversos interesses, seja dos mineradores e ceramistas, dos órgãos ambientais, dos governos federal, estadual e municipal. Papéis importantes também podem desenvolver as instituições de pesquisa e as empresas consultoras.

As plantas de moagem são, na grande maioria, contíguas às linhas de produção fabril. Em poucos casos, alguns grupos de duas ou três fábricas utilizam uma mesma central de massas. Existem apenas duas centrais de massas independentes, que produzem, em conjunto, cerca de 50.000 t/mês.

O procedimento operacional da moagem dá-se pelo abastecimento de argila seca (em torno de 5% em peso de água) fragmentada para moinhos de martelo e pendulares combinados.

4.5 Insumos energéticos

Um importante marco para o Pólo foi a chegada da rede de gás natural (GN), operada pela Comgas - Companhia de Gás de São Paulo, que detém a concessão de distribuição da região, pois aportou qualidade ao produto, preço mais competitivo e logística de abastecimento. Por se tratar de combustível relativamente limpo a queima é feita diretamente no canal do forno, onde as placas são sinterizadas e o esmalte é fundido em contato direto com os produtos de combustão, sem provocar qualquer reação ou depósitos não desejáveis na superfície das peças.

Atualmente o consumo de GN pelas empresas de placas cerâmicas no Pólo é de cerca de 1 milhão m³/dia de GN e está com demanda altamente reprimida, o que tem provocado a pressão dos empresários junto ao governo e a concessionária para aumento no fornecimento. Por outro lado, algumas alternativas de redução de consumo específico por metro quadrado têm sido implementadas (p. ex. diminuição de espessura de placa, recuperação de calor dos fornos), bem como o uso consorciado de GN/GLP para novas linhas, além da instalação de novas unidades fora do Pólo (p. ex. Nordeste).

Outro insumo energético importante no processo produtivo é a energia elétrica, cuja demanda no Pólo é da ordem de 52 MW, valor estimado com base em consumo específico de 1,24 kWh/m² e determinado a partir de levantamentos feitos no âmbito deste trabalho. Em algumas plantas existem instalações de conjuntos motogeradores a diesel que são acionados nos horários de pico para redução da demanda contratada da concessionária de energia elétrica, como forma de reduzir a participação deste insumo nos custos de produção.

4.6 Tendências do setor de revestimentos

Apoiando-se nos estudos levantados na literatura, nas visitas de campo, na participação em feiras técnico-comerciais e em eventos técnico-científicos, em que foram realizadas entrevistas e troca de informações com empresários (ceramistas, fornecedores de matérias-primas e de equipamentos) e técnicos especialistas, podem-se relacionar algumas tendências do setor:

- Do ponto de vista da produção mundial, destaca-se a ascensão do Brasil para o 2º lugar; o primeiro lugar da China, que continua a crescer e já excede a demanda interna, tornando-se exportador; as estabilizações da Espanha e Itália (3º e 4º lugares, respectivamente); e o rápido crescimento da produção indiana (5º lugar);
- Do ponto de vista do mercado consumidor, houve um desaquecimento dos Estados Unidos, o principal importador. Por outro lado, houve um aquecimento do mercado nacional. Essa combinação, com a valorização do real frente ao dólar, fortaleceu o mercado interno. No que tange especificamente ao Pólo de Santa Gertrudes, este foi ainda favorecido no mercado interno pela pressão de consumo das classes de menor renda, consumidoras principais de seus produtos;
- Quanto aos tipos de produtos, a tendência de maiores crescimentos está voltada para às placas produzidas por via seca e ao porcelanato. O primeiro tipo é o carro-chefe de Santa Gertrudes e o segundo está em início de produção na região e visa ampliar o seguimento econômico a ser atingido;
- No tocante à ampliação do setor, observa-se a expansão no Pólo e abertura de filiais de empresas do Pólo em outras regiões do País, com predominância para a região Nordeste;
- A expansão no Pólo está encontrando dificuldades na disponibilidade limitada do GN, forçando os empresários a tomarem medidas para reduzirem ainda mais o consumo específico deste insumo energético, bem como soluções alternativas, como o uso combinado de GN e GLP e instalação de unidades em outros Estados, esta última medida, associada com estratégia de mercado; e
- Quanto à matéria-prima, está havendo um rigor maior no cumprimento das regras minero-ambientais, tais como obedecer os planos de lavra aprovados e a preservação do meio ambiente, sob pena de fechamento temporários dos empreendimentos, como é o caso de um conjunto de minas no município de Santa Gertrudes, paralisado há mais de 2 anos para estudos de impactos ambientais.

5 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PLACAS CERÂMICAS

Uma das principais características das indústrias do Pólo é o emprego do **processo via seca**, em contraposição ao tradicional **processo via úmida**, que se concentra em Santa Catarina, sendo este último o processo típico utilizado também na Itália, Espanha, China e demais produtores mundiais.

O processo **via úmida** consiste em seleção, dosagem e mistura de diversas matérias-primas diferentes (plásticas e não-plásticas), que são moídas em moinhos de bola, em meio aquoso, formando uma suspensão água-argila (barbotina), que é seca em atomizadores (“*spray dryer*”) formando a massa granulada, composta de grânulos entre 100 e 500µm de diâmetro e umidade em torno de 6-7%.

Por outro lado, o processo **via seca** caracteriza-se pela utilização de massa simples, constituída exclusivamente de argila, que é misturada e seca ao sol até atingir cerca de 5% de água, depois moída, em moinho de martelo e pendulares, seguindo-se então para a umidificação/granulação por aspersão d’água, atingindo de 8 a 10% de umidade.

Após a granulação, em ambos os processos, a massa segue para silos e para o processo industrial-cerâmico: prensagem a seco (com conteúdo de água entre 6 e 10%), secagem para extração da água de prensagem, decoração a verde (aplicação de engobe¹, vidrado² e decoração, com a peça não-queimada), queima, controle de qualidade (escolha) e expedição, conforme ilustrado no esquema da Figura 6.

¹ Denomina-se engobe a camada (composta de várias matérias-primas) que é aplicada na base da placa cerâmica antes que receba as coberturas finais dos esmaltes de interesse (vidrado etc.).

² Vidrado é a camada fina de material vítreo que recobre a superfície de uma peça cerâmica esmaltada.

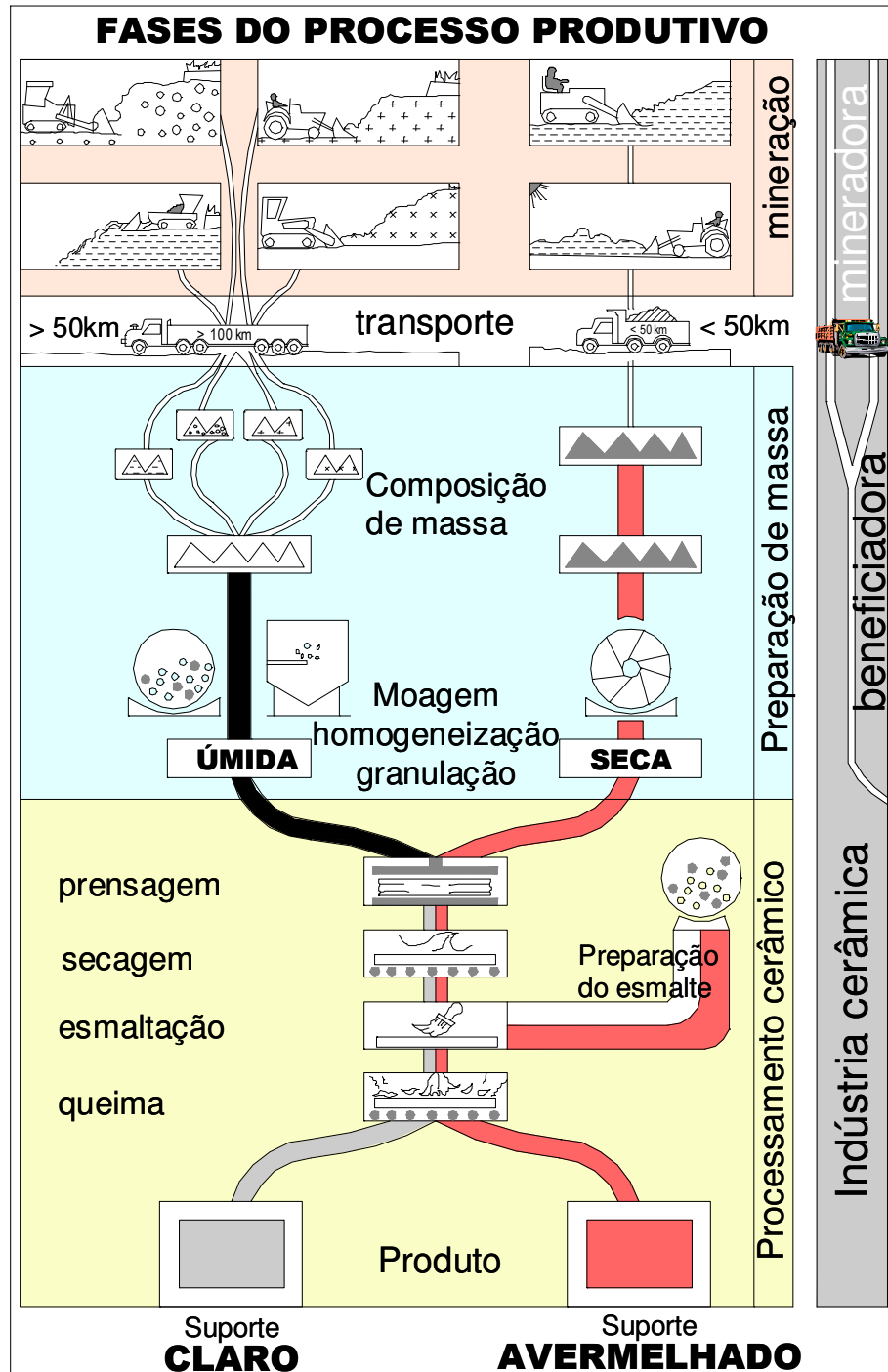


Figura 6 – Fases do processo produtivo de revestimentos cerâmicos (extraído de Motta, 2000).

Os processos via úmida e seca não são os únicos, mas representam a grande maioria da quantidade produzida no Brasil e no mundo. Além dessas vias, outro processo de fabricação de placas na região é pela extrusão de massa plástica, semelhante à

confecção de blocos cerâmicos. As indústrias que utilizam este processo também usam apenas argilas locais e tem produção pequena, quase artesanal, e mais diferenciada.

Do ponto de vista da tecnologia de produção, as fábricas mais recentes mostram um “*layout*” linear, em galpões com comprimento da ordem de 500m a 650 m e largura de até 200m, onde instalam até seis linhas de produção com capacidade da ordem de 550 a 600 mil m²/mês cada. Em galpão anexo ou contíguo, situa-se a fábrica de massa, onde se recebem e se estocam as argilas secas recebidas e encontram-se instalados os equipamentos de preparação da massa (moinhos, peneiras e umidificadores). Por correias transportadoras a massa umidificada, pronta para a prensagem, segue para silos de armazenamento, como ilustra o fluxograma da Figura 8.

A partir daí, inicia-se a conformação por prensagem na forma de placas, seguida das operações de secagem, decoração, queima, escolha, armazenamento e expedição, como ilustra o fluxograma da Figura 7. Os equipamentos desta linha são tradicionalmente de origem italiana. As principais fábricas têm linhas novas, novíssimas e novas linhas encomendas, sempre agregando as novidades compatíveis com a via seca.

A massa geralmente é processada em galpões anexos às fábricas, mas também pode ser preparada em plantas de moagem separadas conforme fluxograma da Figura 8, sendo transportada em caminhões-tanque especiais até os silos das fábricas.

A partir dos silos, a massa é alimentada por correias transportadoras às prensas, onde são conformadas por prensagem uniaxial, com umidade entre 8 e 10% e, a seguir, as placas verdes vão para secadores para extração da umidade.

Na seqüência da fabricação, as placas secas seguem para a linha de esmaltação a úmido, recebendo inicialmente a aplicação de uma camada de engobe, material à base de argila e caulim que dá fundo branco à camada de esmalte e permite um melhor acordo dilatométrico entre a massa e o vidrado. Posteriormente, as placas “engobadas” recebem as suspensões de decoração, por meio de sistemas de transferência por contato direto (telas tipo silk screen, rotocolor), aspersão ou cortina.

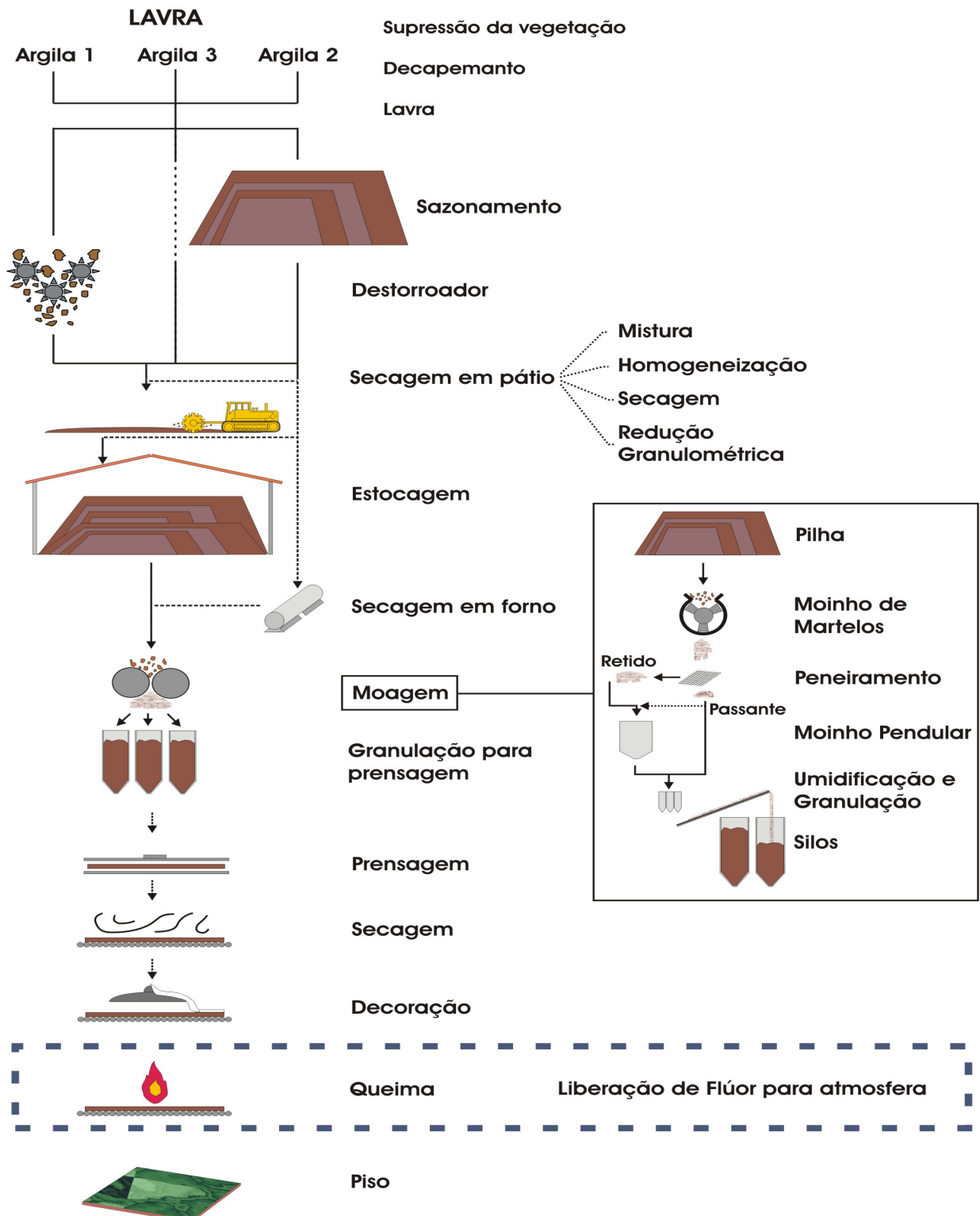


Figura 7 - Fluxograma da mineração e preparação de argila para revestimentos cerâmicos no Pólo de Santa Gertrudes.

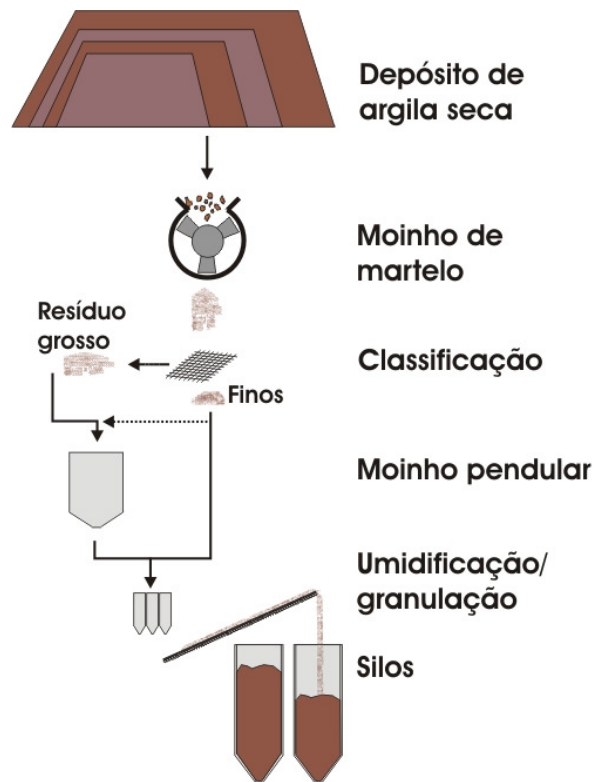


Figura 8 - Fluxograma simplificado da planta de moagem.

Por fim, na última etapa do processo de transformação, as peças secas e recobertas com as camadas de engobe e decoração seguem para o forno túnel a rolos, passando pelas zonas de pré-aquecimento, queima (em torno de 1.050°C) e resfriamento, durante um período aproximado de 25 minutos. Nesta etapa, ocorrem os principais fenômenos cerâmicos, tais como sinterização da massa e formação do vidrado.

Ao sair do forno, em casos especiais, voltados a mercados de maior valor, as peças podem receber retificação, mas a grande maioria segue para classificação e escolha. Como em todas as partes do processo, o nível de automatização é muito elevado, mas nesta etapa da escolha, exceto no quesito tonalidade, ainda manual, a escolha é a parte mais automatizada do processo, pois utiliza robôs, que classificam, embalam e estocam os produtos.

5.1 O processo atual de secagem de argila

A particularidade da moagem via seca das matérias primas ocorre em função das características físicas, químicas e mineralógicas dos depósitos de argilas da região, o que permitiu o desenvolvimento de um método de preparação de massa singular que

dispensa a mistura de outras matérias-primas, bem como a adição de água na moagem da massa bruta.

Entretanto um ajuste prévio da umidade da argila é necessário para assegurar especificações mínimas para a etapa de fabricação. Atualmente, como mostra o esquema da Figura 9, a secagem é feita próxima às jazidas, em pátios abertos utilizando a radiação solar incidindo diretamente sobre o material. Nesta condição reduz-se a umidade de 15 % para cerca de 5 %.

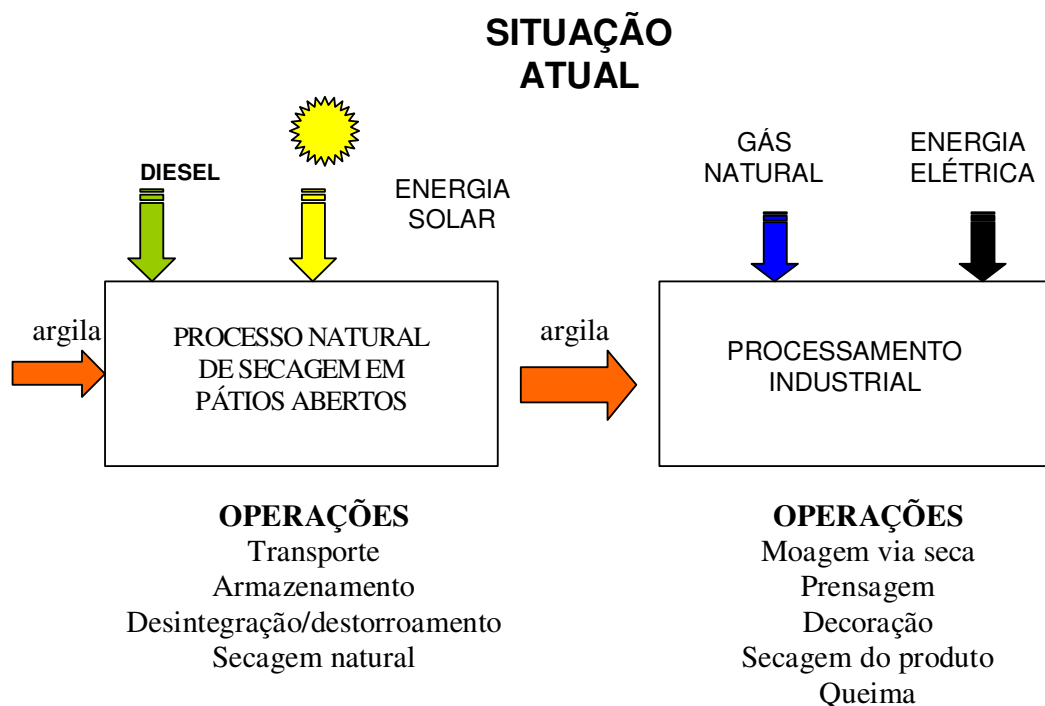


Figura 9 - Etapas do processo e insumos na fabricação de placas cerâmicas – situação atual.

Esse processo, segundo o esquema atual mostrado na Figura 10, exige a movimentação e o espalhamento do minério em pátios (“terreiros”), e às vezes a cominuição do minério bruto em operações de destorroamento. Nessas operações, empregam-se equipamentos acionados por motores a diesel (caminhões, pás carregadeiras, rolos compressores, etc).



a)



b)

Figura 10 – Operações de pátio: a) deposição; b) revolvimento de argila durante secagem ao sol.

Por razões estritamente ambientais, face às restrições impostas pelo órgão de controle ambiental, essa operação de secagem não poderá ser mais praticada. Devem-se estudar formas alternativas de secagem artificial em ambientes fechados de modo a reduzir os impactos ambientais decorrentes quais sejam: um aumento da concentração de material particulado em suspensão no ar atmosférico devido às emissões fugitivas resultantes da movimentação em pátios abertos nos períodos de seca; e o carregamento de partículas de matéria prima para os corpos d'água, nos períodos úmidos (chuvas) comprometendo a qualidade da água que é muitas vezes utilizada para abastecimento público.

Segundo levantamentos realizados numa instalação típica de preparação de argila o custo médio das operações de extração, secagem natural e moagem das argilas é da ordem de 34,77 R\$/t de argila. Somente na operação de secagem da argila nos pátios são gastos cerca de 16,26 R\$/t de argila (vide discriminação dos custos na Tabela 1), ou seja, 46,8 % dos custos envolvidos em todas as operações destinadas à preparação das argilas (extração, secagem e moagem) que são utilizadas na fabricação das placas cerâmicas.

Estes valores serão considerados mais adiante na avaliação econômica das alternativas de secagem artificial.

Tabela 1 - Custos médios envolvidos na secagem natural da argila.

OPERAÇÃO	R\$/t de argila	Participação no custo global (%)
Movimentação da argila	1,78	11,0
Frete hora	2,67	16,4
Mão de obra	1,58	9,7
Energia elétrica	0,22	1,4
Depreciação	2,12	13,0
Manutenção de equipamentos	0,90	5,6
Manutenção de veículos	6,87	42,2
Outros	0,11	0,7
TOTAL	16,26	100

Fonte: Cerâmica Triunfo

5.2 A secagem artificial e a possibilidade de cogeração

Os equipamentos utilizados nos processos térmicos envolvidos na fabricação das placas (secadores e fornos) são bastante modernos e otimizados energeticamente, não havendo disponibilidade de calor residual suficiente para promover a secagem da argila. A operação de secagem da argila por sua vez, muitas vezes é feita próximo às jazidas, ou próximo das unidades de moagem podendo ser considerada uma unidade de produção independente da unidade onde se dá o processamento industrial, ou seja, a secagem artificial da argila deve ter geração própria de calor para a operação.

Os níveis de temperatura do agente de secagem por sua vez devem ser relativamente baixos, como forma de preservar as boas características da argila para a conformação das placas, o que propicia considerar a possibilidade de utilização de calor residual de um sistema de cogeração. Quanto às alternativas de fonte de energia para a geração de gases quentes como agente de secagem, considera-se a possibilidade do uso de gás natural, dado as disponibilidades regionais deste insumo.

O esquema da Figura 11 ilustra as etapas do processo e os insumos energéticos na situação futura com auto-geração de energia elétrica em sistema de cogeração.

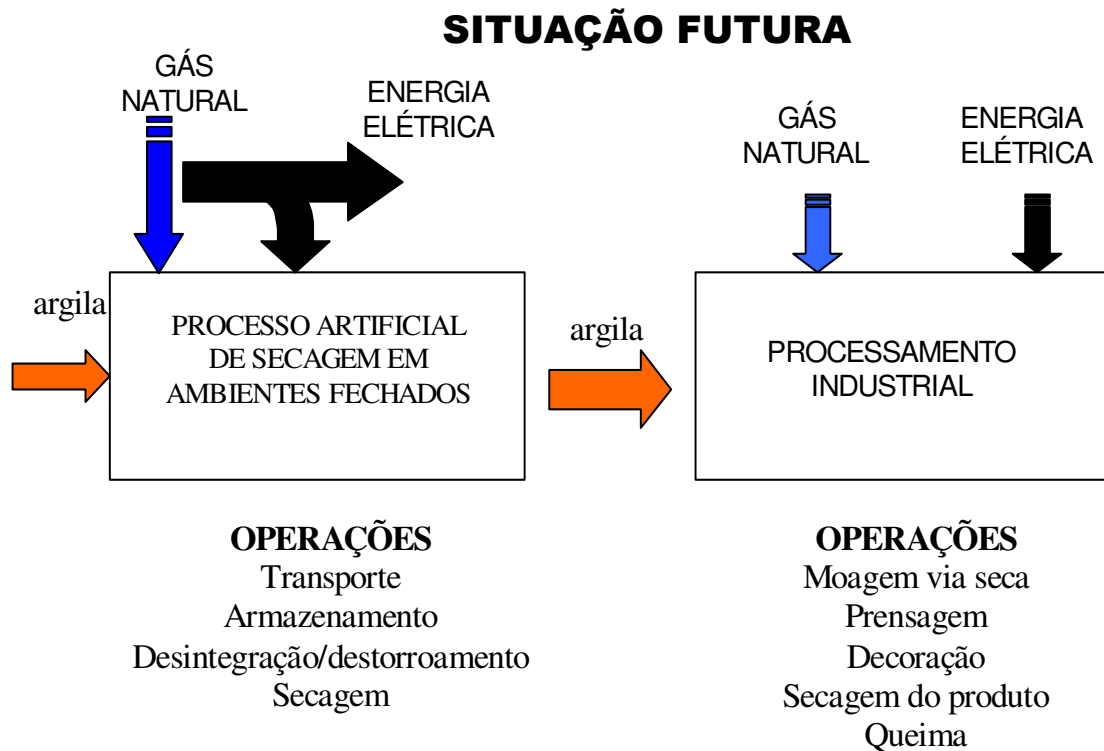


Figura 11 - Etapas do processo e insumos na fabricação de placas cerâmicas – situação futura.

Parte da energia elétrica cogerada pode ser utilizada no acionamento dos equipamentos periféricos dos secadores (ventiladores, exaustores, sistemas de transporte e movimentação de material).

Essa alternativa é também interessante do ponto de vista estratégico, particularmente neste caso, pois são reais as limitações de ampliação da capacidade de distribuição de energia elétrica na região, segundo as informações fornecidas pelas indústrias. Esse esquema se torna mais interessante na hipótese do sistema elétrico no futuro ser complementado com geração termoeletrica a gás.

A Tabela 2 mostra com detalhe como é a distribuição típica de potência elétrica nas diversas seções e operações durante a fabricação de pisos. Este levantamento foi feito numa das empresas do Pólo que já dispõe de uma unidade de secagem com secador rotativo. O consumo específico médio de energia elétrica no pólo é da ordem de 1,24 kW/m².

Tabela 2 - Distribuição da potência elétrica instalada em uma unidade industrial típica.

ETAPA DO PROCESSO	EQUIPAMENTO	Potência nominal dos motores elétricos		Fração da pot. instalada (%)
		(CV)	(Kw)	
SECAGEM DE ARGILAS	Acionamento do secador	150	112,5	13,5
	Esteira de carga do secador	1	0,8	
	Elevador de carga do secador	7	5,3	
	Calha vibratória	1	0,8	
	Queimador (vent. Ar primário)	25	18,8	
	Elevador de descarga do secador	7	5,3	
	Esteira de descarga do secador	7	5,3	
	Exaustor do filtro de mangas do secador	100	75,0	
	Elavador de descarga do filtro de mangas	7	5,3	
	Esteira de descarga do filtro de mangas	3	2,3	
	Válvula de descarga do filtro de mangas	0,75	0,6	
	Compressor de ar	25	18,8	
	SUBTOTAL SECAGEM	333,75	250,3	
MOAGEM DE ARGILAS	Moinho pendular	113,25	151,0	32,6
	Ventilador primário do moinho pendular	67,5	90,0	
	Ventilador secundário do moinho pendular	13,875	18,5	
	Moinho de martelos	90	120,0	
	Peneira	23,925	31,9	
	Granulador	47,25	63,0	
	Misturador	29,1	38,8	
	Exaustor do sistema de despoeiramento	67,5	90,0	
	SUBTOTAL MOAGEM	452,4	603,2	
MOAGEM DE ESMALTES	Moinhos	244,125	325,5	17,6
PRODUÇÃO DE PLACAS	Compressor de ar	30	40,0	32,2
	Recepção de massa	5,1	6,8	
	Filtro de mangas	25,35	33,8	
	Prensa	128,25	171,0	
	Peneiras rotativas	1,65	2,2	
	Carga do secador	7,5	10,0	
	Resfriamento das prensas	18,525	24,7	
	Secador	90	120,0	
	Descarga do secador	1,65	2,2	
	Esmaltação	16,65	22,2	
	Carga do pulmão	4,275	5,7	
	Descarga do pulmão	4,8	6,4	
	Forno	102,6	136,8	
	Máquina de escolha	6,75	9,0	
	Máquina de plastificar	3	4,0	
	SUBTOTAL PRODUÇÃO	446,1	594,8	
ILUMINAÇÃO	Preparação de matéria prima	29,25	39,0	4,1
	Produção de placas	27	36,0	
	SUBTOTAL ILUMINAÇÃO	56,25	75,0	
POTÊNCIA TOTAL INSTALADA		1533	1848,8	100

5.3 O estado da arte da aplicação de cogeração na indústria cerâmica

A cogeração é prática que vem sendo utilizada de modo significativo nos países mais desenvolvidos tecnicamente, pois, de modo genérico, a cogeração permite elevada eficiência do uso de combustíveis com menores impactos ambientais. A aplicação da cogeração na indústria de cerâmica na Europa é bastante usual, sobretudo na fabricação

de revestimentos cerâmicos, particularmente na geração de gases quentes nos secadores atomizadores.

Segundo Berg e Nogueira (1996), no Brasil, a viabilidade apresenta-se variável em função de condicionantes normativos e tarifários, restrições que ainda dificultam sua desejável expansão. Esse quadro vem se alterando com algumas aplicações em setores mais variados da indústria ao setor de serviços.

Berg e Nogueira (op. cit.) em seu trabalho de pré-viabilidade apresenta o estudo de caso de aplicação de turbina a gás natural com aproveitamento de gases quentes para um secador atomizador. No Brasil, o caso mais emblemático, e até então o primeiro no setor cerâmico, foi a instalação de uma turbina a gás natural na Pamesa, e como tal mereceu a visita *“in loco”* dos pesquisadores envolvidos no projeto.

As informações apresentadas a seguir foram coletadas durante visita de pesquisadores do IPT e engenheiro da COMGÁS às instalações daquela empresa, conforme previsto no plano de trabalho do projeto proposto.

A empresa do ramo cerâmico é de capital misto (espanhol e brasileiro), está localizada na região do Grande Recife – PE, tem processo de fabricação de placas cerâmicas via úmida, e parte da produção é de pisos tipo porcelanato destinada principalmente para a exportação.

A empresa, que está investindo nos últimos anos em modernização e ampliação de sua planta, optou pela auto-produção de energia elétrica, incluindo no plano de investimentos a instalação de uma unidade de cogeração a partir do gás natural, sendo considerado o primeiro projeto desta modalidade no setor cerâmico no Brasil.

A produção atual é de 900.000 m²/mês de piso de revestimento, processados em três linhas de produção com fornos do tipo túnel a rolos, com perspectivas de instalação de mais duas linhas de produção. A planta de cogeração foi montada para geração de gases quentes para secador atomizador e possui as seguintes características:

- Uma turbina de 4.500 kW_e ISO; rendimento elétrico de 27,5%;
- Gases do escape da turbina a 520 °C são utilizados no secador tipo atomizador (*“spray dryer”*);
- O secador atomizador trabalha de 530 °C à 600 °C, com *“after burner”* para complementar a carga térmica;

- O combustível utilizado na turbina é o gás natural cuja pressão é elevada a 15 bar em compressor com capacidade de 2000 m³/h (fabricante: Galileo);
- A câmara de combustão não possui sistema para redução de emissões de NO_x (*"low NO_x"*);
- Possui sistemas de paralelismo com a rede de energia local, fornecido por empresa nacional;
- Eficiência da cogeração CHP de 94%;
- Unidade de cogeração atenderá 100% da demanda da Pamesa, de 2,5 MW, e outra empresa do grupo instalada na mesma planta;
- Projeto realizado e contrato de comercialização da energia por empresa especializada;
- A montagem e manutenção da unidade foi feita em sistema *"turn key"* contratada de empresa espanhola (Turbomach), com equipamentos importados da Espanha, já pré-montados;
- Contrato de manutenção com o fabricante de 12 anos, com *"overhall"* da turbina a cada 32.000 h;
- *"Back-up"* elétrico contratado com a concessionária local (Celpe) em subgrupo A4 Verde;
- A alimentação elétrica é do subgrupo A4 AZUL, com tarifa R\$ 150,00/MWh;
- Produtor independente de energia elétrica, inferior a 5 MW, o que requer apenas registro na Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL;
- Fornecimento de gás natural pela concessionária local (Copergás). A tarifa normal de tabela é R\$ 0,45/m³, entretanto, existem incentivos a cogeração, Projeto Cogep (bloco de 100.000 m³/dia), limitado em 45.000 m³/dia máximo por cliente, usufrui de desconto de 18% sobre a tabela vigente, o que resulta R\$ 0,37/m³ sem ICMS;
- Investimentos da ordem de US\$ 3,5 Milhões realizado integralmente com recursos próprios; e,
- Custo da energia cogerada após as amortizações: R\$ 62,00 / MWh.

No estado de Pernambuco, os pólos industriais com plantas de 5 MW são abastecidos em A4, pois na concepção inicial, o Estado não queria inviabilizar a

instalação de uma nova empresa de distribuição, devido aos altos investimentos que seriam necessários em subestações.

Na região da planta industrial, a energia elétrica é fornecida em A4 (média tensão), diferentemente do que acontece no interior do Estado de São Paulo, onde os maiores consumidores industriais são abastecidos em A2 (alta tensão), cujo custo por kW é menor.



Figura 12– Aspecto do conjunto turbogerador instalado na Pamesa.

6 SECAGEM ARTIFICIAL DA ARGILA

Em visitas de campo realizadas no Pólo de Santa Gertrudes, ficou evidente a preocupação dos empresários e técnicos cerâmicos com a qualidade das argilas secas artificialmente ao invés da secagem natural. Levando-se em conta essa preocupação, adredemente prevista no presente projeto, foram realizados estudos em laboratórios para conhecimento do comportamento da argila durante a secagem artificial.

Embora não tenha sido previsto no plano de trabalho proposto, foram feitas também medições em um secador industrial instalado numa das unidades do Pólo no sentido de verificar experimentalmente os limites de temperatura para o processo de secagem artificial bem sucedido.

6.1 Comportamento das argilas na secagem

Os estudos de laboratório buscaram determinar algumas características das argilas quando expostas a diferentes temperaturas de secagem. Uma das principais características analisadas foi a variação da resistência mecânica dos corpos-de-prova. Adicionalmente, foram avaliados outros parâmetros como densidade da peça, compacidade e colorimetria e também o comportamento da resistência mecânica das peças com o tempo em que permanecem umidificadas após secagem.

Esta pesquisa foi realizada simultaneamente nos laboratórios de cerâmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.

6.1.1 Estudos na UFSCar

Os estudos realizados em São Carlos (SP) foram realizados com amostra de argila do Pólo de Santa Gertrudes, bem como amostra de argila de fora do Pólo, a título de comparação. Os dados pormenorizados encontram-se relacionados no Anexo B.

Os principais resultados encontram-se relacionados na Tabela 3 e ilustrados graficamente nas Figuras 13 e 14.

Tabela 3 – Resultados de Dap, MRFs, compacidade e coordenadas colorimétricas L* e a*, das Argilas “A” e “B”, conforme a temperatura.

		Temperatura (°C)					
		25	200	300	400	500	600
Argila “A”	Dap (g/cm ³)	1,84±0,01	1,81±0,01	1,81±0,01	1,82±0,01	1,76±0,01	1,72±0,02
	MRFs (MPa)	2,8±0,2	2,6±0,2	2,5±0,4	2,1±0,2	1,9±0,2	0,9±0,1
	Compacidade	0,68	0,67	0,67	0,68	0,65	0,64
	Densidade real (g/cm ³)	2,693	-	-	-	-	-
	L*	62,06	61,67	61,45	61,20	63,01	62,99
	a*	11,51	11,35	11,59	12,82	12,83	12,02
Argila “B”	Dap (g/cm ³)	2,12±0,02	2,14±0,02	2,12±0,02	2,10±0,01	2,01±0,01	1,87±0,01
	MRFs (MPa)	2,7±0,2	2,1±0,6	1,2±0,3	0,8±0,2	0,7±0,2	0,7±0,3
	Compacidade	0,77	0,77	0,77	0,76	0,73	0,68
	Densidade real (g/cm ³)	2,767	-	-	-	-	-
	L*	58,57	57,11	59,67	61,68	60,84	57,50
	a*	4,05	4,08	7,03	8,90	10,19	11,74

Dap : densidade aparente (g/cm³); MRF : módulo de ruptura à flexão (MPa).

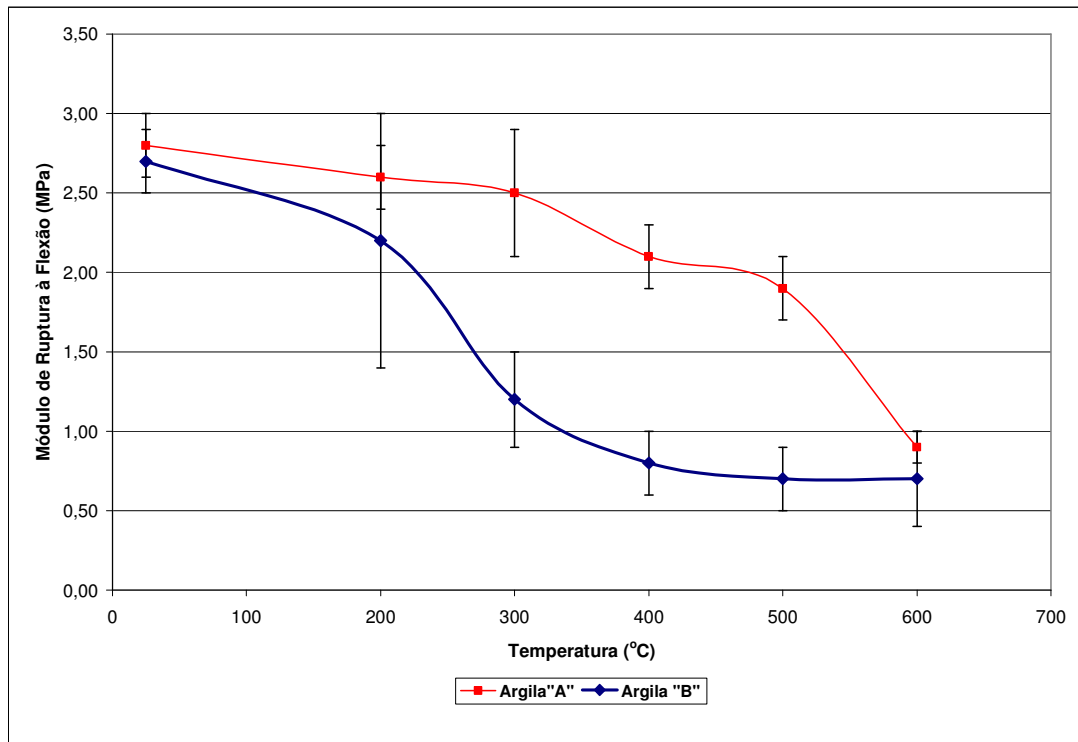


Figura 13 – Valores do módulo de ruptura à flexão a seco das Argilas “A” e “B” em função da temperatura de secagem, observadas na UFSCar/LaRC.

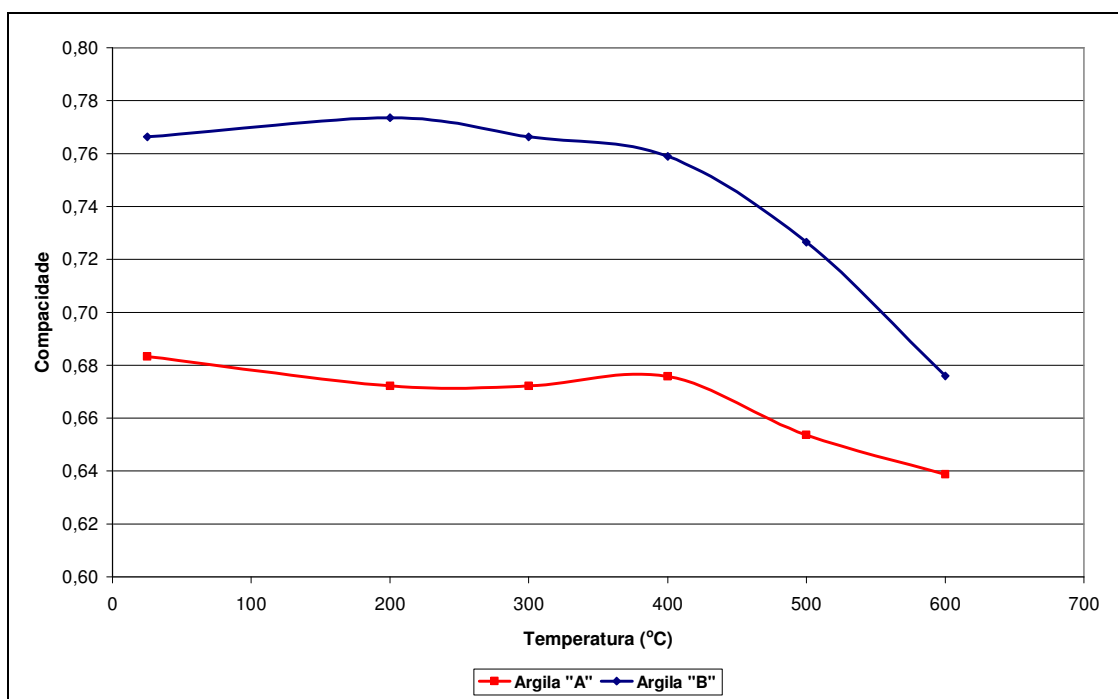


Figura 14 – Valores de compacidade das Argilas “A” e “B” em função da temperatura de secagem, observadas na UFSCar/LaRC.

A análise dos resultados permite destacar:

- **Argila “A”, do Pólo de Santa Gertrudes:** apresentou diminuição dos valores de Dap e MRFs com o aumento da temperatura. A compacidade diminuiu significativamente em temperaturas acima de 400°C. O comportamento da luminosidade e da tonalidade verde-vermelho em relação à temperatura não demonstrou variações significativas.

- **Argila “B”:** apresentou quedas nos valores de Dap e MRFs superiores à Argila “A”. A compacidade também diminuiu significativamente em temperaturas acima de 400°C. As curvas referentes à luminosidade e a tonalidade verde-vermelho apresentaram uma expressiva variação a temperaturas acima de 200°C, devido provavelmente, ao maior teor de material orgânico em sua composição.

Como conclusão, de uma maneira geral, nota-se que acima da temperatura de 200°C as argilas analisadas apresentam variações significativas nas propriedades analisadas. A diminuição dos valores de Dap, MRFs e compacidade, observados conforme o aumento da temperatura pode prejudicar a potencialidade do uso destas argilas na produção de revestimentos cerâmicos por via seca.

6.1.2 Estudos no IPT

Os trabalhos realizados no laboratório de cerâmica do IPT focalizaram o comportamento da resistência mecânica das argilas em diversas temperaturas máximas de queima. Adicionalmente, analisou-se também o desempenho das argilas quanto ao tempo em que permaneciam umidificadas após a secagem.

Os resultados e a metodologia utilizada nos trabalhos experimentais encontram-se detalhados no Anexo C. Os principais resultados encontram-se ilustrados graficamente nas Figuras 15 a 19.

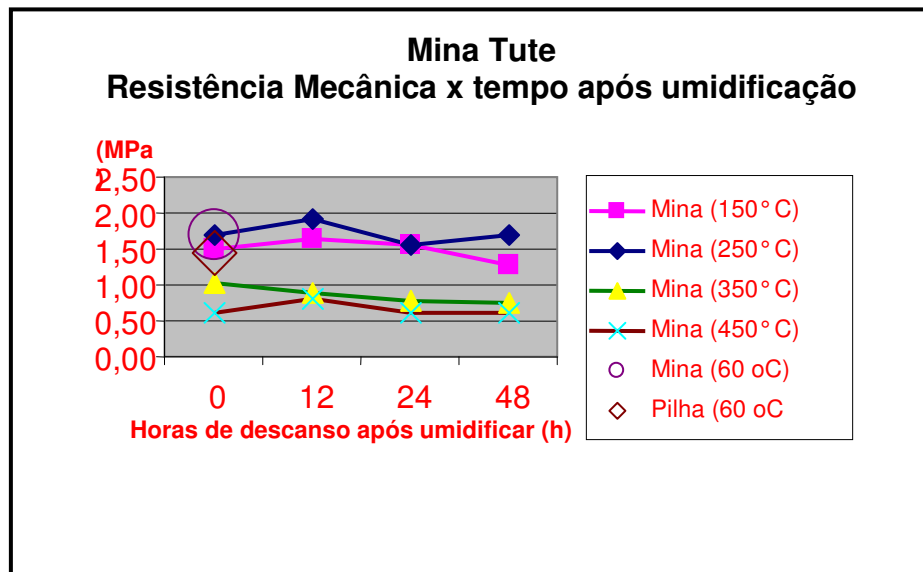


Figura 15 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da Mina Tute, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.

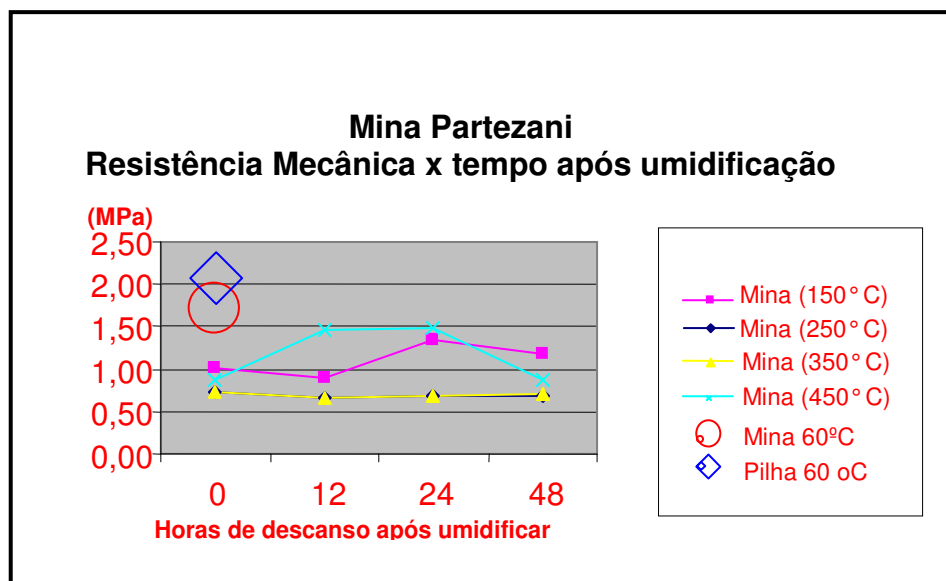


Figura 16 – Resultados de Ensaios de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da Mina Partezani, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.

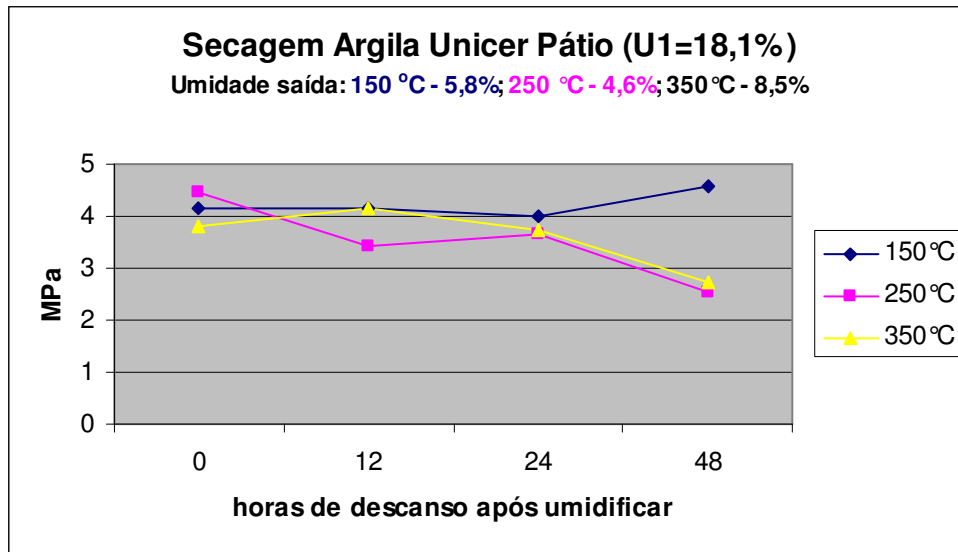


Figura 17 – Resultados de Ensaio de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra da mistura de argila do Pátio da Unicer, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.

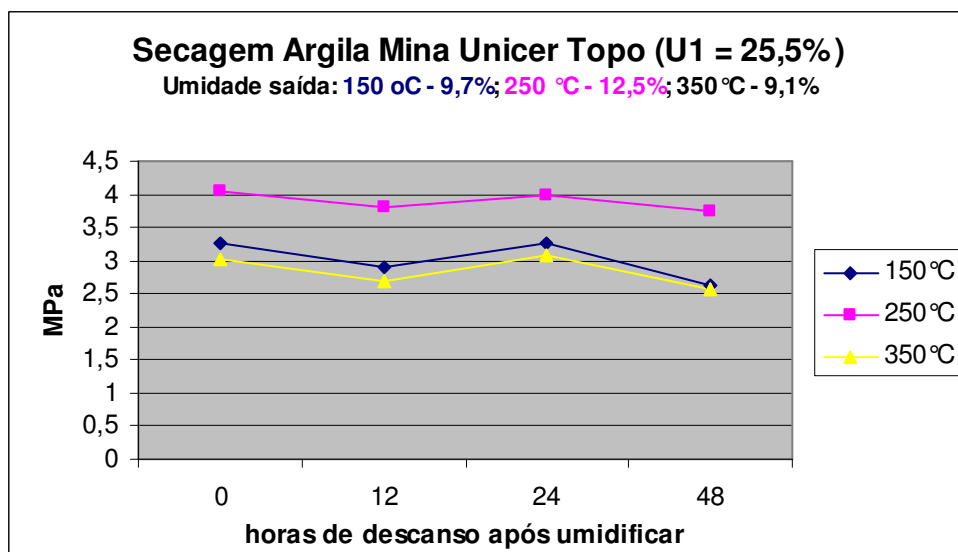


Figura 18 – Resultados de Ensaio de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila de topo da Mina Unicer, seca artificialmente, em diversas temperaturas máximas.

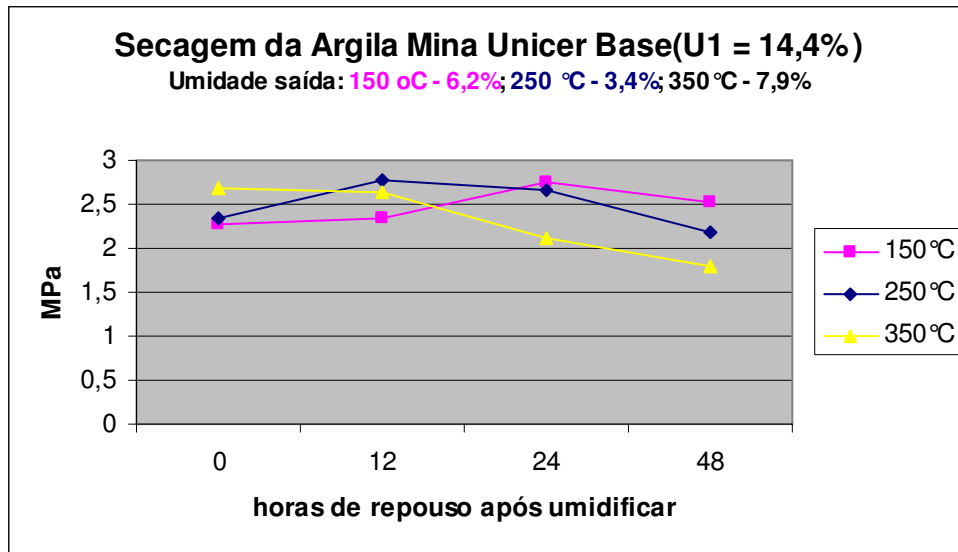


Figura 19 – Resultados de Ensaio de Módulo de Ruptura à Flexão em amostra de argila da base da Mina Unicer, secas artificialmente, em diversas temperaturas máximas.

Analisando-se os resultados pode-se observar:

- **Argila “Tute”:** apresentou MRFs estáveis em temperaturas de secagem até 250°C, com leve tendência de queda com o tempo de umidificação. No caso das amostras secas acima de 350°C, os MRF’s diminuíram significativamente, para valores inferiores a 1 MPa.
- **Argila “Mina Partezani”:** apresentou queda nos valores de MRFs em relação às amostras secas “naturalmente”, para todas as temperaturas, acentuando-se para as temperaturas de 250°C e superiores. No entanto, observa-se uma recuperação do MRF’s, para algumas amostras, quando permanecem em repouso por 12 ou 24 horas após umidificação.
- **Argila “Mistura de Argila do Pátio da Unicer”:** apresentou valores de MRFs relativamente altos nas temperaturas máximas de 150°C, 250°C e 350°C. Quanto ao comportamento, quando as amostras ficam sujeitas ao descanso pós-umidificação, observa-se que não há ganho em MRF’s, mas não compromete a propriedade até 24h de repouso;
- **Argila “Mina Unicer Topo”:** apresentou maior queda nos valores de MRFs para a temperatura de 350°C; e mostrou-se relativamente estável com o descanso pós-umidificação.

- **Argila “Mina Unicer Base”:** apresentou resultados relativamente estáveis para as 3 temperaturas de secagem (150°C, 250°C e 350°C) até 12 horas pós umidificação. Após esse tempo de umidificação, o comportamento não é uniforme, podendo melhorar em algumas amostras e piorar em outras.

Como conclusão, observa-se que os resultados foram mais afetados negativamente quanto mais acentuada foi a extração de água. Para as argilas secas totalmente (até 0%) e depois umidificadas novamente até a umidade de prensagem (~9%), os valores de MRF's foram satisfatórios para as amostras secas a temperaturas mais baixas (até 250%), como é o caso da argila Tute (Figura 15), mas afetaram no desempenho no caso da Mina Partezani (Figura 16), mesmo a temperaturas mais baixas.

Quando as argilas não foram totalmente secas, os desempenhos mostraram-se melhores. Ocasionalmente, o desempenho pode ser melhorado controlando-se o tempo de permanência após umidificação.

6.1.3 Conclusões dos Estudos Experimentais de Secagem

Os estudos experimentais desenvolvidos em diferentes laboratórios sugerem que as temperaturas máximas de secagem não devam ser altas, pois pode colocar em risco o desempenho das placas pós-prensagem. Embora algumas argilas mostraram-se menos susceptíveis que outras, de forma geral recomenda-se temperaturas não superiores a 250°C, uma vez que esse valor atende aos requisitos para a maioria das argilas.

Quanto ao limite mínimo de secagem, sugere-se que as argilas não sejam secas aquém de 6%, uma vez que as características relacionadas à plasticidade são menos afetadas em limites maiores.

De forma geral, o repouso da argila pós umidificada não altera muito as propriedades nas próximas 12 horas, mas pode apresentar modificações após esse tempo. Sugere-se conhecer esse comportamento para cada formulação e, sempre que possível, utilizar os benefícios desse descanso.

6.2 Secadores industriais

Na secagem forçada ou artificial em secadores industriais, a extração de parte da água, sobretudo a água livre do sistema água-argila, ocorre mediante o contato da argila com um fluxo de gases quentes. O contato se dá no interior de equipamentos

denominados secadores onde a água extraída da argila, já no estado gasoso (vapor), se incorpora ao fluxo de gases.

Neste sistema de evaporação com incorporação do vapor d'água no fluxo gasoso, ocorre geralmente de modo que a entalpia sensível e latente de vaporização da água é fornecida pelo fluxo de gases quentes. Assim, quanto maior a temperatura dos gases maior será a capacidade de incorporar o vapor d'água ao fluxo gasoso, num processo teórico conhecido como de saturação adiabática. Os limites reais desse processo estão principalmente associados à manutenção das características fundamentais da argila na prensagem das placas cerâmicas, o que implica, de fato, limitações da temperatura máxima dos gases na entrada do secador.

Neste sentido, a temperatura máxima e umidade relativa dos gases na entrada do secador são determinantes na taxa de evaporação a que será submetido o material, e, por conseguinte, na manutenção das propriedades desejadas (plasticidade, fluidez nos moldes e resistência mecânica após prensagem) descritas anteriormente.

Os resultados dos testes laboratoriais são bastante contundentes quanto à temperatura de 200 °C, acima da qual já se observa certa perda de propriedades da argila. Portanto, na escolha do tipo de secador mais adequado este deve ser o parâmetro mais importante.

Neste item, são apresentados os resultados do levantamento das técnicas de secagem aplicáveis às argilas conforme previsto no plano de trabalho proposto. As informações apresentadas aqui foram obtidas através de consultas à literatura técnica disponível, complementadas por consultas a fabricantes de equipamentos e visitas e medições em plantas industriais do pólo de Santa Gertrudes que já operam unidades de secagem artificial.

6.2.1 Secadores tipo cilindro rotativo (“rotary dryer”)

O secador denominado genericamente do tipo rotativo é constituído de um cilindro metálico com diâmetro interno variando na faixa de 1,5 m a 3,0 m, e comprimento variando entre 15 m a 40 m, montado na horizontal, ligeiramente inclinado. O cilindro apoiado sobre roletes, gira a rotações que variam de 1 rpm a 6 rpm, acionado por conjunto moto-redutor de velocidades. A composição do movimento rotativo com a inclinação do cilindro promove o deslocamento do material sólido no interior, descrevendo

uma trajetória, quase helicoidal, desde a cabeceira de entrada até a cabeceira de descarga do secador.

Para matérias sensíveis a temperaturas elevadas, como é o caso das argilas, o fluxo de gases no interior do secador se dá no mesmo sentido do material (co-corrente). Internamente ao cilindro podem existir pás levantadoras de material que intensificam o contato entre o material e os gases quentes. A água evaporada, juntamente com uma fração mais fina do material sólido, se incorpora aos gases, que são extraídos do secador por um sistema de exaustão dotado de um filtro do tipo mangas para retenção do material sólido arrastado.

O material sólido seco na saída do secador é descarregado em calhas que alimentam, por sua vez, correias transportadoras ou elevadores de canecas, que conduzem o material sólido para os pátios cobertos ou silos de armazenamento.

Os sistemas de controle de operação dessas instalações geralmente monitoram e controlam continuamente a temperatura da mistura na entrada do secador, atuando sobre as vazões de combustível e ar de diluição, tendo como referência o teor de água do material à saída de modo descontínuo, porém periodicamente (p. ex., a cada hora).

Embora não estivesse previstas no plano de trabalho do projeto, foram realizadas medições em secador deste tipo instalado na unidade de preparação de matérias primas da Incefra – Industria Cerâmica Fragnani Ltda (vide Figura 20), que está localizada no município de Cordeirópolis (SP), pertencente ao pólo de Santa Gertrudes.



Figura 20 – Secador do tipo cilindro rotativo instalado na Incefra.

O trabalho de medição de campo realizado esteve focado principalmente no levantamento dos perfis de temperatura dos gases na entrada do secador, uma vez que este parâmetro é importante na manutenção das características da argila no processo subsequente de conformação das placas.

A Figura 21 mostra detalhes da instalação dos instrumentos de medição utilizados. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos nas medições em três situações diferentes quanto à temperatura dos gases de escape, que tem sido o parâmetro ajustado pela operação do equipamento.

O gráfico da Figura 22 mostra que a temperatura dos gases na entrada do secador apresentou maiores flutuações quando a temperatura na saída do secador foi ajustada no sistema de controle automático em 70 °C. Nessa condição, o valor médio de 300 °C, superou os valores tidos como limite (250 °C) definidos pelos testes de laboratórios anteriormente relatados



Figura 21 – Detalhes das medições de temperatura e composição dos gases na entrada do secador.

Tabela 4 – Resultados da medição em secador rotativo.

PARÂMETRO			CONDIÇÃO 1	CONDIÇÃO 2	CONDIÇÃO 3
ROTAÇÃO DO CILINDRO [RPM]			10	10	10
ARGILA	Produção de argila seca [t/h]		48	48	48
	Umidade de entrada [%]		4,8	5,3	5,4
	Umidade de saída [%]		3	3,5	3,8
	Estimativa do tempo de permanência no interior do secador [min]		12	12	12
GÁS NATURAL	vazão [Nm³/h]		93	70	66
	pressão no CRM ⁻¹ [bar]		2,99	2,98	2,98
	temperatura no CRM ⁻¹ [°C]		31	30,9	31,5
CONDIÇÕES DO AR AMBIENTE [°C]	temperatura de bulbo seco [°C]		32	32	32
	temperatura de bulbo úmido [°C]		27	27	27
GASES NA ENTRADA DO SECADOR	temperatura [°C]	mínima	250	150	180
		máxima	380	180	220
		média	315	170	210
	composição	teor de O ₂ [%]	8,3	18	18
		teor de CO [ppm]	80	77	62
GASES NA SAÍDA DO SECADOR [°C]	temperatura indicada no sist. de controle ("set point")		70	60	50
	temperatura medida	bulbo seco	52	46	45
		bulbo úmido	37	36	25

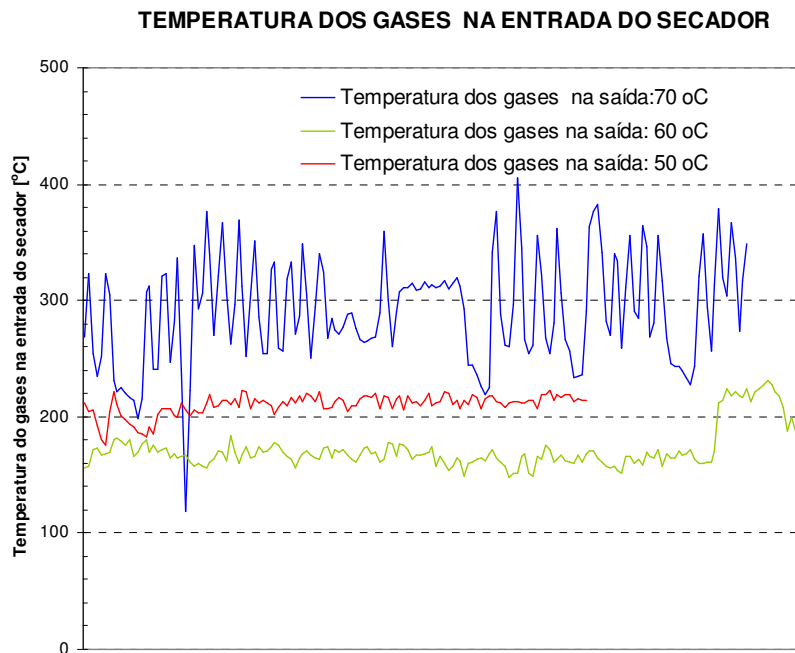


Figura 22 – Perfis de temperatura dos gases na entrada do secador nas diferentes condições operacionais.

Nesta instalação em particular, a unidade de secagem utiliza gás natural como combustível, e é complementar à secagem natural realizada em pátios. A argila parcialmente seca no pátio é introduzida no secador para condicionar o teor de água final em torno do valor adequado (~4%), independentemente das condições climáticas.

Segundo a equipe de operação, existem limitações de capacidade de produção do equipamento quando o teor de umidade na entrada do secador é mais elevado, mais próximo do teor natural da jazida que se situa na faixa de 12 % a 20 %, razão pela qual ainda se faz a secagem parcialmente de forma natural.

Dificuldades no controle operacional deste secador foram observadas durante o trabalho de medição de campo, e estão associadas ao parâmetro que é utilizado para o controle da umidade do material na saída. Atualmente, esse controle operacional é feito manualmente pelo operador, atuando única e exclusivamente na temperatura dos gases no duto de exaustão de gases, ao invés de atuar na temperatura dos gases na entrada do secador.

A empresa Unicer, especializada no beneficiamento (secagem e moagem) de argila consumida no Pólo, situada no município de Cordeirópolis (SP), substituiu o gerador de gases quentes a gás natural do projeto original do secador por uma fornalha para queima

de lenha em toras sobre grelhas fixas. As fotos da Figura 23 mostram o aspecto da instalação, com um detalhe particular na duto de conexão entre a fornalha e o corpo do secador, na região onde a argila é alimentada ao secador.



Figura 23 – Secador de argila a lenha.

Embora não tenha sido possível medir a temperatura dos gases na entrada do secador da UNICER, o aspecto da chama presente na parte interna, visualizada através da fresta existente entre o duto de conexão entre o gerador de gases e o cilindro do secador (vide ilustração da Figura 23), sinaliza para níveis de temperatura muito superiores ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) àqueles medidos no secador à GN da Incefra. Esta condição de operação deve ter impactos na qualidade da argila seca que, certamente, prejudicam o seu comportamento na operação de conformação das placas.

De modo genérico, o que se observa no manuseio das argilas utilizadas na região, é que a resistência à desagregação em partículas menores varia bastante à medida que o material desidrata. Conjectura-se que o dimensionamento do conjunto destes secadores do tipo cilindro rotativo com o sistema de exaustão não está adequado a esta característica peculiar da argila e à própria distribuição granulométrica, razão pela qual não se consegue obter o melhor desempenho deste tipo de equipamento.

6.2.2 Secadores do tipo câmara (“rapid dryer”)

Não se tem notícia de outros tipos de secadores empregados alternativamente ao do tipo cilindro rotativo para este tipo de material no Brasil. Segundo a Icon – Máquinas e Equipamentos, tradicional fabricante de equipamentos para a indústria cerâmica no Brasil,

existe pelo menos um caso na Colômbia em que se utiliza secador denominado tipo “*rapid dryer*” para secagem de argila em condições similares. Trata-se de equipamento que foi fornecido pela indústria nacional, com tecnologia licenciada pela empresa alemã HASEMAG para fabricação do equipamento no país.

O equipamento é constituído por uma câmara semi-cilíndrica, no interior do qual existem dois eixos rotativos dotados de braços e pás com ângulos reguláveis que promovem a movimentação do material sólido desde a seção de entrada até a seção de saída. A regulação dos ângulos das pás na diferentes regiões do secador, em princípio, possibilita atuar sobre o tempo de permanência do material em contato com os gases, como um recurso no sentido de da preservação das características da argila.

O material é alimentado e descarregado do secador por válvulas tipo eclusas, conforme esquema da Figura 24. Os gases quentes provenientes do gerador são introduzidos próximo à válvula de alimentação do material, circulando na parte superior da câmara, passando através de chicanas que promovem certa turbulência no escoamento no mesmo sentido de deslocamento do material sólido (co-corrente) como mostra o esquema da Figura 24. Maiores detalhes do funcionamento do secador podem ser visto na proposta de fornecimento que se encontra no anexo.

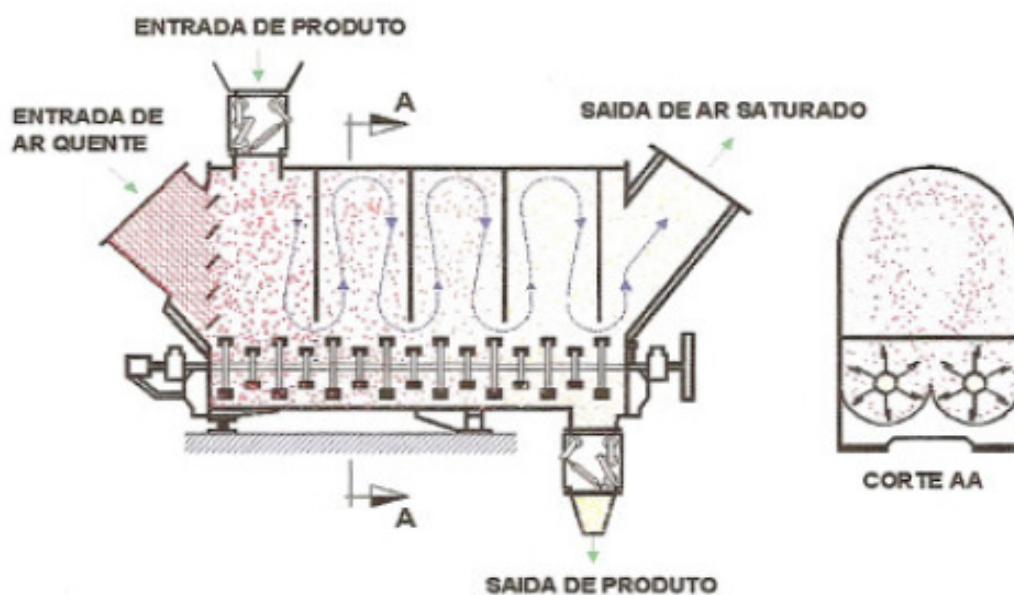


Figura 24 – Esquema de secador alternativo tipo “*rapid dryer*” da ICON (Anexo D).

Como uma das atividades previstas no plano de trabalho do projeto, foi feita uma visita à sede da empresa localizada em Criciúma (SC), quando os técnicos da empresa relataram aos pesquisadores do IPT e engenheiro da Comgás, que um exemplar do equipamento está operando na Colômbia para secagem de argila em processo de fabricação semelhante, demonstrando elevada eficiência. As temperaturas dos gases na entrada do secador são muito superiores ($\sim 600^\circ\text{C}$) às verificadas no Brasil em secadores do tipo rotativo, sem provocar danos às características da argila; a conferir.

6.2.3 Secadores pneumáticos (“*flash dryer* / *swirl fluidizer*”)

Outro tipo de secador também considerado como alternativa é o do tipo pneumático (“*flash dryer*”), em que o material sólido seria descarregado num fluxo de gases quentes, sendo transportado pneumaticamente para o interior de um duto metálico montado na posição vertical, até ser separado dos gases em câmaras inerciais ou ciclônicas.

Em consulta feita a um fabricante de equipamentos tradicional na área de secadores, a empresa multinacional Niro, divisão secadores da GEA, possui uma marca registrada de secador, denominada “*swirl fluidizer*TM”, que é uma variante de secador do tipo pneumático.

O esquema da Figura 25 mostra os seus principais componentes: um sistema de alimentação tipo rosca helicoidal que descarrega o material numa câmara de secagem ciclônica dotadas de pás agitadoras, onde o material sólido se incorpora à corrente de gases quentes, sendo em seguida transportado pneumaticamente para um filtro também em forma ciclônica.

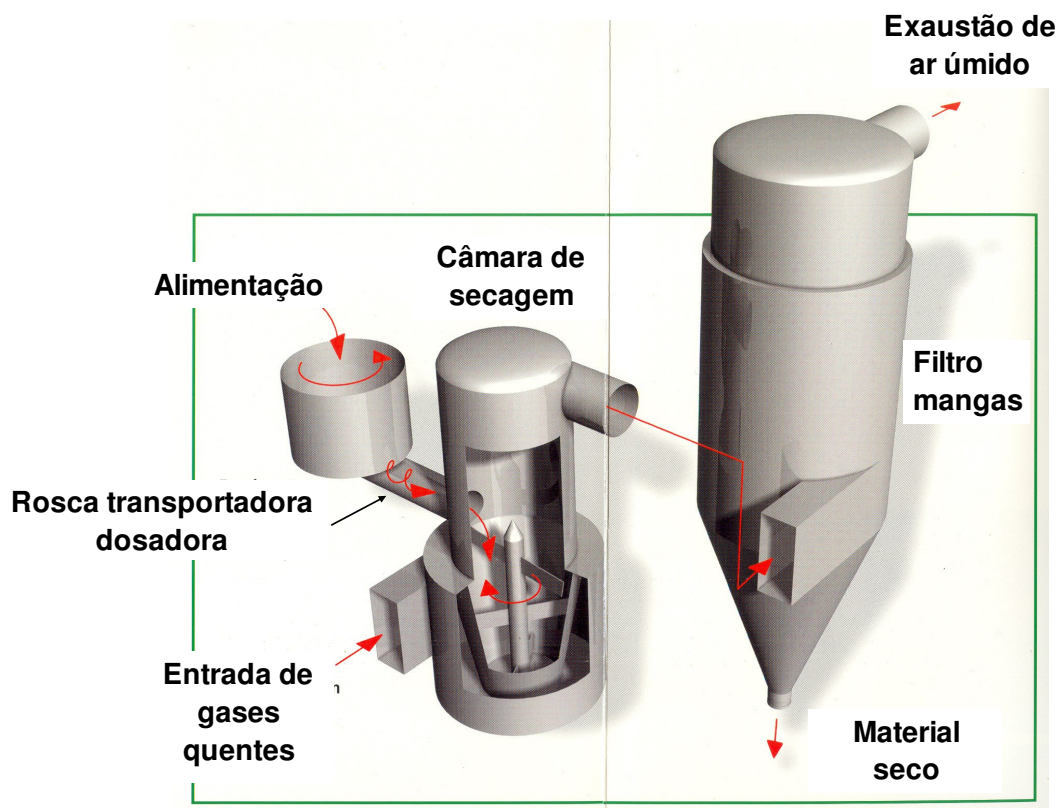


Figura 25 – Esquema de secador tipo pneumático (“swirl fluidizerTM”) da NIRO A/S (GEA).

Segundo técnicos da empresa que foram consultados, o equipamento se destina a materiais em diferentes estados de agregação, desde sólidos agregados separados em filtros tipo prensa, até pastas e pós de um modo geral.

Amostras de argila da região de Santa Gertrudes foram encaminhadas para testes preliminares na Dinamarca, sede da empresa. Os técnicos do laboratório descartaram a possibilidade de aplicação da tecnologia, avaliando que, o estado de agregação da argila constitui sério impedimento para o processamento em secadores deste tipo. Conclui-se que os secadores pneumáticos melhor se adaptam a materiais mais uniformes, com distribuição granulométrica mais estreita, na medida em que a secagem deverá ocorrer durante o período de transporte pneumático do material.

6.2.3 Análise comparativa entre os tipos de secadores

Considerando o exposto acerca das limitações dos secadores do tipo cilindro rotativo e pneumáticos, e os maiores recursos de ajuste que estão disponíveis nos

secadores do tipo “*rapid dryer*”, optou-se pelo último como mais adequado para as características específicas da argila.

Assim, tanto para a configuração do sistema convencional de secagem artificial quanto para os sistemas alternativos de cogeração propostos e analisados nesse trabalho, foi adotado o secador tipo “*rapid dryer*” como solução mais apropriada à argila utilizada.

Os resultados dos trabalhos e testes de laboratório com as argilas confirmaram categoricamente que temperaturas superiores a 250 °C podem comprometer seriamente as características mais importantes e desejadas na argila no processo de conformação das placas. Assim, optou-se pelo dimensionamento das unidades de secagem levando-se em consideração estes resultados, apesar do fabricante assegurar bom desempenho deste tipo de secador em temperaturas de gases mais elevadas na entrada do secador. Ponderou-se que as argilas da formação de Corumbataí têm comportamento muito peculiar, merecendo tratamento distinto de outras experiências.

O fabricante por sua vez não forneceu informações acerca da eficiência do equipamento operando em temperaturas mais baixas, e, na impossibilidade de realização de testes em escala real com este tipo de secador em situações diferentes do padrão, considerou-se de modo conservativo que a produção nominal do equipamento poderá reduzir-se à metade quando a temperatura dos gases de secagem reduzir-se-à a terça parte do valor nominal de projeto (600 °C).

7 PROJETO CONCEITUAL DE UMA UNIDADE DE SECAGEM ARTIFICIAL

Neste item, propõe-se elaborar um projeto conceitual de uma unidade de secagem artificial típica. O dimensionamento dos equipamentos e das instalações necessárias permitirá o levantamento detalhado dos investimentos necessários para implantação de uma unidade, bem como calcular os custos operacionais correspondentes, como subsídios para a posterior análise de viabilidade econômica de diferentes configurações alternativas apresentadas mais adiante.

7.1 Parâmetros de projeto considerados

Na fase inicial do trabalho de levantamento de campo, quando foram feitas várias visitas às unidades industriais na região de Santa Gertrudes, constatou-se que existem diferenças de volume de produção consideráveis entre as várias empresas do pólo.

Observa-se, entretanto que existe certa uniformidade entre as empresas em relação aos padrões tecnológicos no que se refere aos equipamentos utilizados.

Após a preparação da matéria-prima (secagem e moagem) o processo de fabricação de pisos ocorre segundo linhas de produção que são independentes entre si, e nestas linhas a matéria prima segue uma seqüência de operações executadas por diferentes equipamentos montados em série até a fase final de escolha e embalagem dos produtos. O volume de produção diferenciado observado entre as várias empresas ocorre em função da maior ou menor disponibilidade de linhas de produção e não da capacidade de produção de cada linha.

Embora exista uma tendência mais recente de aumento de capacidade de produção nas linhas, observa-se que na maioria das empresas da região dispõe-se de pelo menos três linhas de produção com capacidade média de 550.000 peças/mês.

O volume de argila necessário para atender a capacidade da linha depende da espessura final do produto (variável nas várias empresas). Nos cálculos, em termos médios, considerar-se-á espessura de 17 mm, que resultará no valor de produção específica de piso por tonelada de argila.

Os seguintes parâmetros foram adotados para o dimensionamento da unidade de secagem de argila típica.

- Produção média específica de produto: 59 m²/t argila;
- Produção média mensal por linha de fabricação: 550.000 m²/mês;
- Produção horária de argila seca: 31,25 t/h (320 h/mês de operação);
- Capacidade nominal considerada: 40 t/h (30% maior p/ atender eventuais expansões de produção);
- Umidade inicial da argila: 14 % (valor bastante variável máximo de 21 %, dependente de diversos fatores: localização das jazidas naturais, regimes de chuvas, profundidade do depósito, etc.) e ,
- Umidade final da argila: 4 % (pouco variável função dos requisitos necessários à etapa de prensagem).

7.2 Valores calculados

A partir dos parâmetros de projeto e dos resultados obtidos no laboratório com as amostras de argila analisadas, são calculados os seguintes valores relativos ao secador:

- Massa de água a evaporar: 4.000 kg/h;
- Consumo específico típico de secadores: 1000 a 1200 kcal/kg água evaporada;
- Carga térmica necessária: 4,8 Gcal/h;
- Temperatura do ar de secagem: 200 °C; e,
- Volume de gases quentes (eficiência termodinâmica 81 %): 63.000 kg/h.

Considerando os parâmetros de projeto e admitindo-se os valores acima calculados, podem-se prever diferentes taxas de utilização da unidade de secagem artificial para capacidades de linha de fabricação distintas em torno do valor médio mais freqüente nas indústrias da região (550.000 m²/mês), como mostram os valores constantes da Tabela 5.

Tabela 5 – Regime de operação da unidade de secagem da argila.

PRODUÇÃO MENSAL DA LINHA (1.000 m ² /mês)	CONSUMO DE ARGILA (t/mês)	TAXA DE UTILIZAÇÃO DA UNIDADE (%)
500	9090	28
550	10.000	31
600	10.909	34
650	11.818	36
700	12.727	40

Da Tabela 5, pode-se prever que, com uma unidade deste porte poder-se-á abastecer de argila seca até cerca de três linhas com capacidade para 550.000 m²/mês cada, com uma taxa de utilização da unidade de secagem de cerca de 93%. Na análise econômica comparativa entre as três alternativas, será considerada uma unidade industrial exemplo com produção de cerca de 1.650.000 m²/mês.

8 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE SECAGEM

Para distinção dos diferentes esquemas possíveis de secagem, adotou-se a classificação em dois grupos: as configurações convencionais e as configurações alternativas em esquemas de cogeração. Os esquemas de cogeração distinguem-se do convencional apenas nos equipamentos primários de combustão, geração de energia elétrica e gases quentes, e podem ser utilizados com diferentes tipos de secadores.

8.1 Configurações convencionais

Numa configuração, denominada genericamente convencional, uma unidade de secagem de argila é composta por um gerador de gases quentes acoplado a um canal de gases, e este conectado a um secador, que pode ser do tipo cilindro rotativo como mostra o esquema da Figura 26.

O gerador de gases quentes constitui uma câmara de combustão (fornalha) revestida de material refratário na qual é montado um combustor (queimador de gás ou de líquido) ou uma grelha no caso de combustível sólido. O processo de combustão ocorre no interior da câmara mantida a temperaturas elevadas, em condições de excesso de ar adequadas para se obter a maior conversão possível do combustível.

Os produtos de combustão, à saída da fornalha, são diluídos com ar a temperatura ambiente em proporções até atingir a temperatura desejada da mistura na entrada do secador.

Nas análises feitas a seguir, foi admitido que, para atender a produção nominal estabelecida de 40 t/h de argila seca, serão utilizados dois secadores em paralelo, supridos de argila por um único sistema de alimentação composto por um caixão alimentador, em cuja descarga será montado um destorroador de modo a condicionar o material dentro de uma faixa de dimensão adequada à operação dos secadores.

Como mostrado no esquema da Figura 27, a descarga dos secadores é feita por uma única esteira que conduzirá o material seco até os silos de armazenamento.

Os gases quentes à saída do gerador são diluídos com ar atmosférico até temperatura de mistura de 250 °C e em seguida introduzidos nos secadores. O controle da umidade de saída do material deverá ser feito mediante atuação na carga térmica desenvolvida na câmara de combustão, portanto sobre a vazão de gás natural. Os gases de exaustão por sua vez são enviados a um único conjunto filtro mangas.

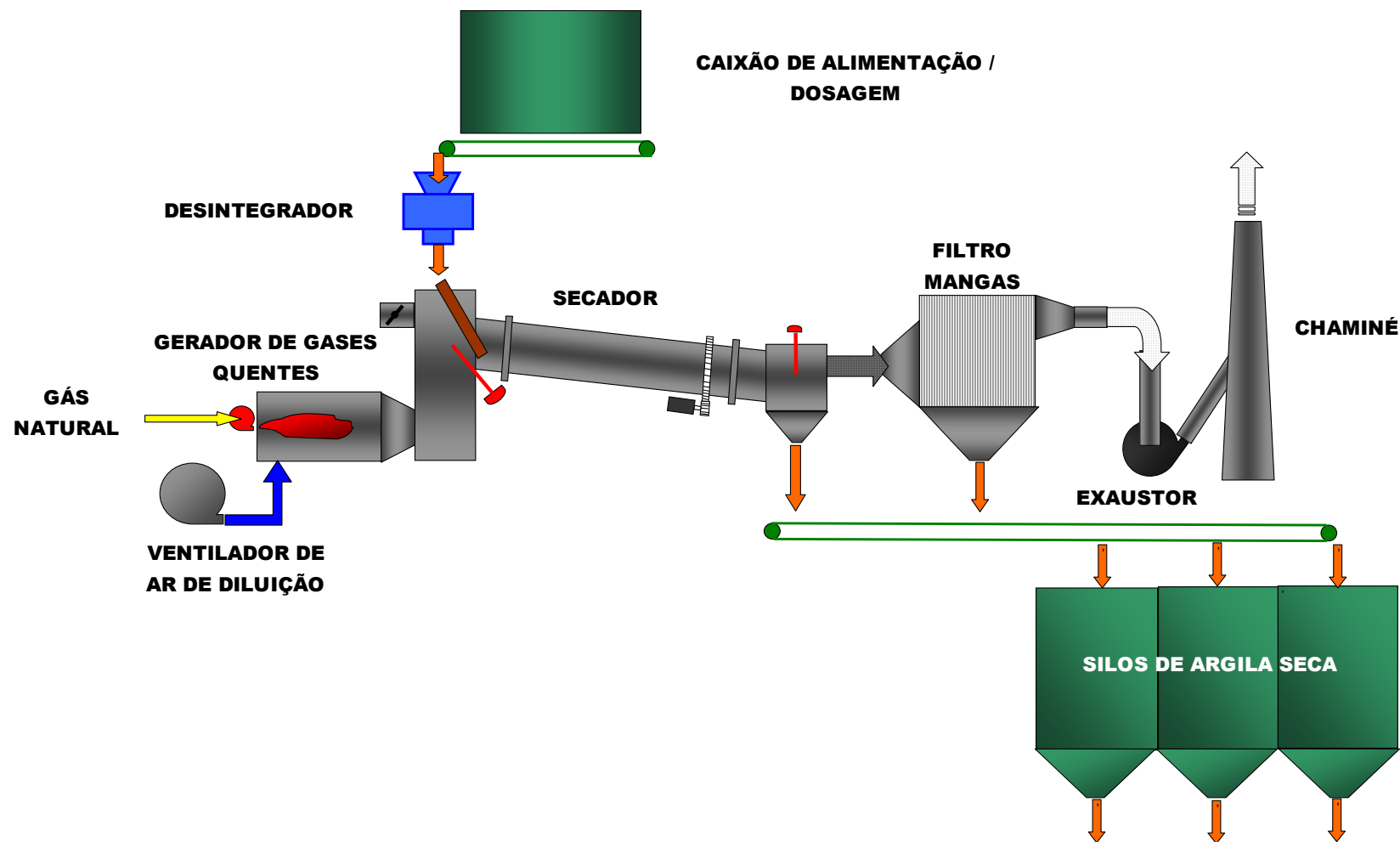


Figura 26 - Configuração convencional com secador rotativo.

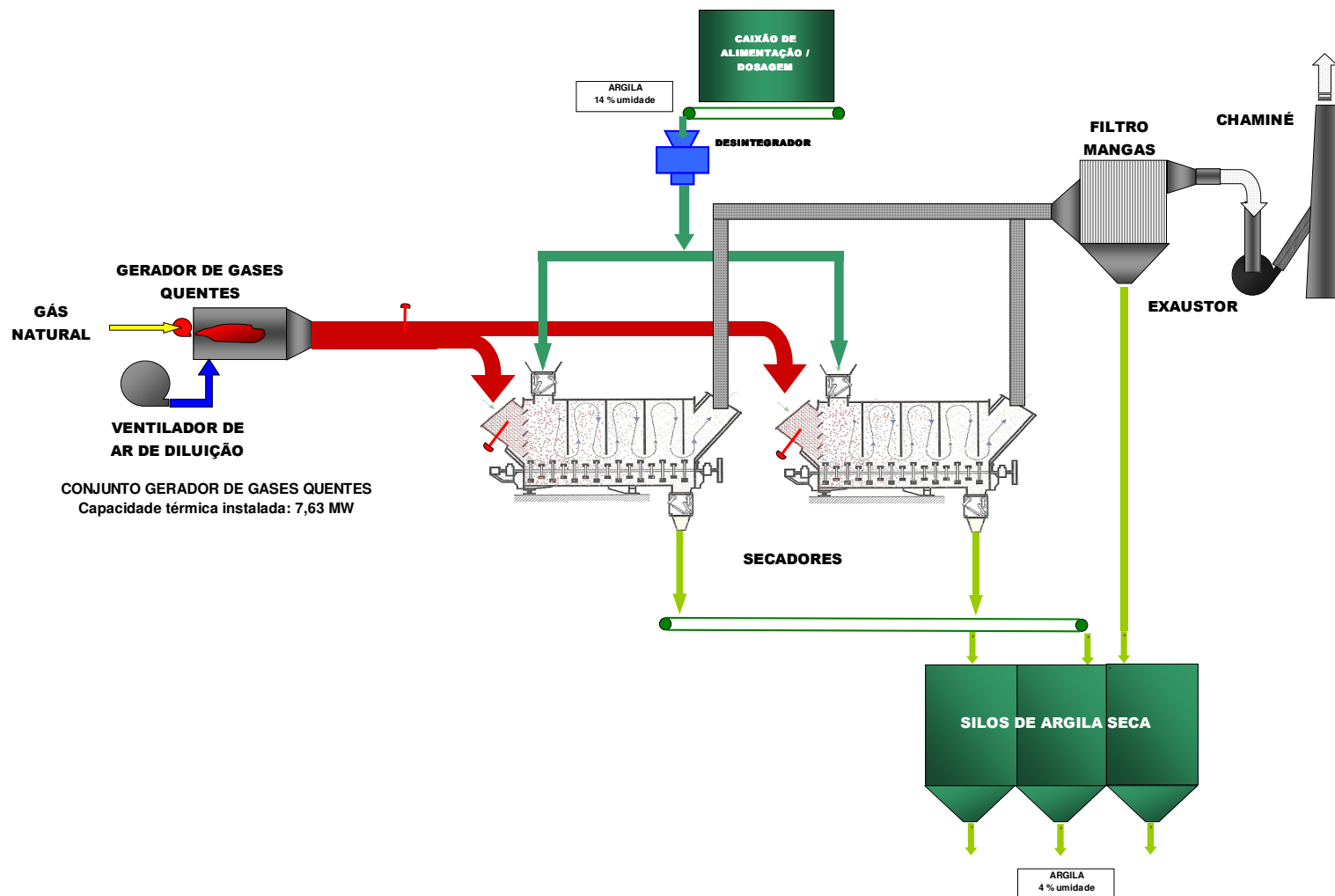


Figura 27 - Configuração convencional com gerador de gases quentes.

As características, componentes e especificações básicas do sistema de geração de gases quentes, segundo esta configuração, são descritas a seguir:

- Capacidade nominal do gerador de gases quentes: 7,63 MW;
- Vazão máxima de gás natural (39,35 MJ/Nm³): 698 Nm³/h;
- Temperatura dos gases na saída: 200 °C a 400 °C (controlável);
- Queimador tipo duobloco (modelo HE-16-G da KEI-TEK);
- Câmara de combustão com revestimento refratário;
- Ventilador tipo centrífugo para o ar de diluição (potência do motor: 40 CV);
- Ventilador tipo centrífugo para o ar de combustão (potência do motor: 20 CV); e,
- Sistemas de detecção de chama e automático de controle de temperatura de saída dos gases.

As especificações detalhadas do gerador de gases quentes constam da proposta de fornecimento da empresa KEI-TEK constante no ANEXO D.

8.2 Configurações alternativas de cogeração

A possibilidade de utilizar o calor rejeitado por sistema térmico surge naturalmente nos casos em que as temperaturas do agente de secagem são relativamente baixas se comparadas às desenvolvidas em processos de combustão de gás natural. Neste caso em particular consideraram-se como alternativas de sistemas de cogeração os motores de combustão interna alternativos e as turbinas a gás, ambos utilizando o gás natural como combustível primário.

Em ambos os casos, o dimensionamento em termos da capacidade elétrica foi feito com o foco no atendimento da carga térmica necessária ao processo de secagem da argila. Assim, é natural também que as disponibilidades de geração de energia elétrica sejam diferentes, em virtude das diferenças na razão calor e trabalho nas duas alternativas.

Nas duas alternativas, em relação ao que foi descrito com referência aos sistemas de alimentação e tratamento dos gases de exaustão, não há alterações propostas em relação ao que foi considerado como solução convencional descrito no item anterior, ou seja, as alternativas de cogeração distinguem-se apenas no sistema de geração de energia elétrica.

8.2.1 Alternativa com motogeradores

Para o dimensionamento da capacidade dos motorgeradores, foram feitas consultas à pelo menos dois possíveis fornecedores instalados no país: SOTREQ e STEMAC, representantes comerciais no Brasil de fabricantes de motores estacionários. O estudo foi feito com base na proposta da SOTREQ S.A., que é uma empresa do grupo CATERPILLAR; das duas empresas consultadas, a única que apresentou proposta técnico-comercial com viabilidade de fornecimento, ofertando equipamentos de sua linha padrão disponível no país.

Por razões estratégicas e de segurança operacional optou-se pela instalação de três unidades montadas em paralelo, com taxas de utilização propositalmente baixa de modo a conferir maior confiabilidade operacional ao sistema. A Figura 28 mostra esquematicamente a configuração com o arranjo dos três conjuntos motogeradores.

As características e especificações básicas do conjunto motogerador para esta configuração são descritas a seguir e estão baseadas na proposta da empresa SOTREQ constante no ANEXO D:

- Gerador com potência nominal contínua: 2000 KW_e (2500 kVA; 480 V);
- Motor modelo: G3520C SCAC (20 cil. em V; vol. motor 86 litros; 1800 rpm);
- Carga térmica rejeitada pelos gases de exaustão: 1,995 MW (100 % carga); e,
- Vazão de GN: 552 Nm³/h (100% carga); 408 Nm³/h (75 %); 286 Nm³/h (50 %)
- Fabricante: CATERPILLAR

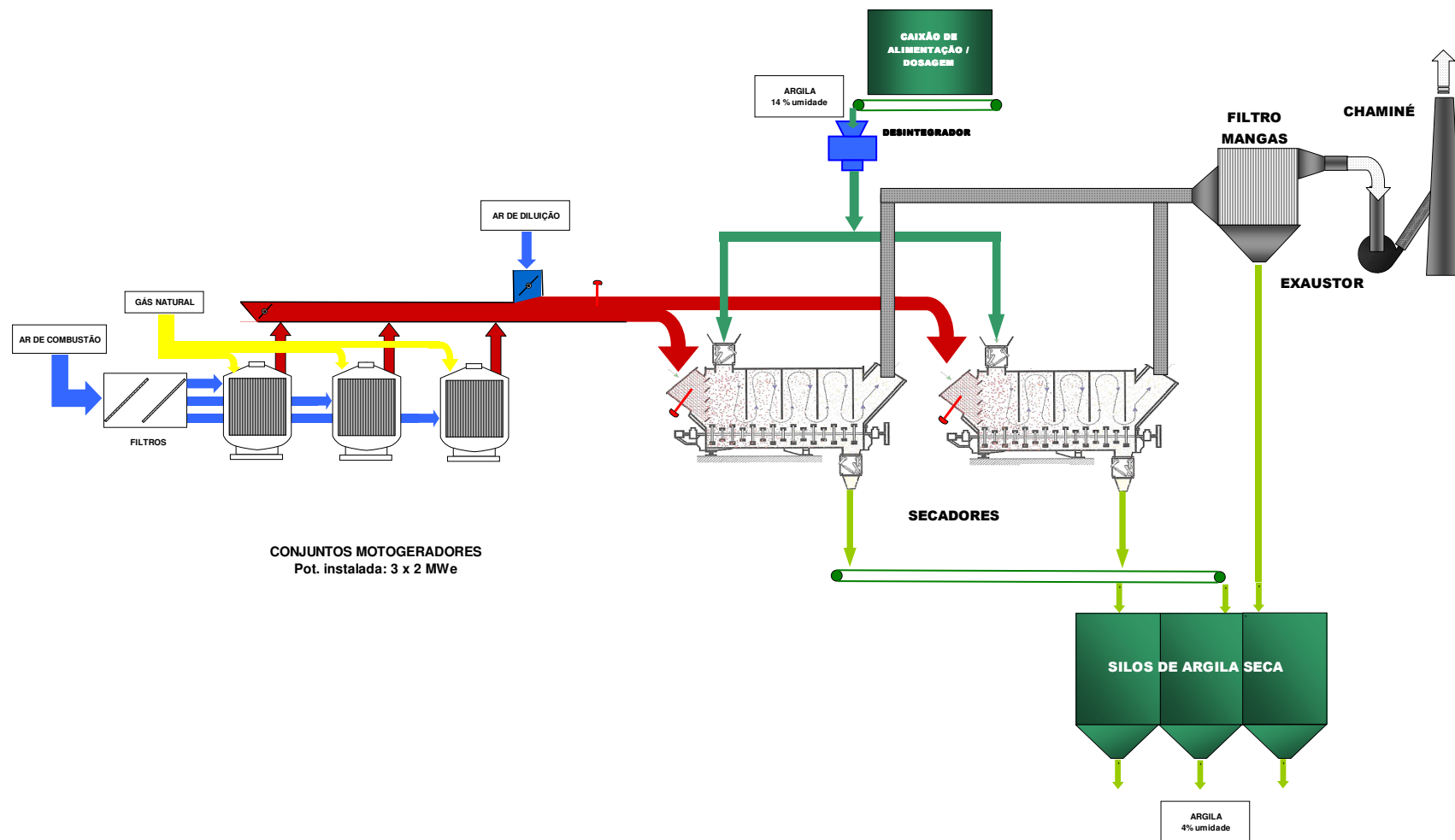


Figura 28 – Configuração com motogeradores.

8.2.2 Alternativa com turbogerador

Conceitualmente as turbinas a gás também podem ser consideradas motores de combustões internas, distinguindo-se dos motores de combustão alternativos pelo fato do escoamento ser contínuo. Em relação aos conjuntos motogeradores utilizados na indústria, as turbinas industriais são equipamentos menos convencionais, cuja tecnologia de fabricação esteve restrita a poucos fabricantes no mundo (Pratt & Whitney, Rolls-Royce, General Electric e Alstom), e quase sempre derivadas de aplicações aeronáuticas (aeroderivativas), sobretudo aqueles de médio a grande porte.

Mais recentemente, com as possibilidades de aplicação em sistemas de cogeração, já se dispõe de fabricantes aptos ao fornecimento de equipamentos de pequeno porte e intermediários. No Brasil, embora ainda não existam fabricantes desses equipamentos, já existem aplicações em diferentes setores industriais (vide o caso da Pamesa relatado anteriormente) e em unidades de geração termoeletricas a gás natural de grande porte (Programa Prioritário de Termoeletricas - PPT).

Em cálculos preliminares, assumindo parâmetros médios de desempenho, relatados na literatura, o dimensionamento preliminar indicou que para atender a demanda de carga térmica dos secadores, a potência instalada seria da ordem 3,5 MW, portanto pouco inferior à instalada na Pamesa, caso relatado anteriormente.

Assim, para o dimensionamento do sistema com turbogeradores em lugar dos motores de combustão alternativos, foi considerada importante aquela experiência, tomando-a como exemplo bem sucedido. A escolha do equipamento recaiu sobre aquele, que dentro das séries alternativas de modelos disponíveis fosse capaz de atender à carga térmica calculada para os secadores.

As características e especificações básicas do conjunto turbogerador para esta configuração são descritas a seguir e estão baseadas na proposta constante no ANEXO D apresentada pela empresa CONPET, que representa a TURBOMACH no Brasil.

- Fabricante da turbina: Solar Turbines;
- Modelo: TBM C-40 (Centaur 40);
- Potência no eixo: 3712 kW
- Rotação: 14951 rpm;

- Consumo de GN: 1153 Nm³/h (100 % carga);
- Potência do gerador: 4500 KVA

A Figura 29 mostra esquematicamente a configuração com o conjunto turbogerador.

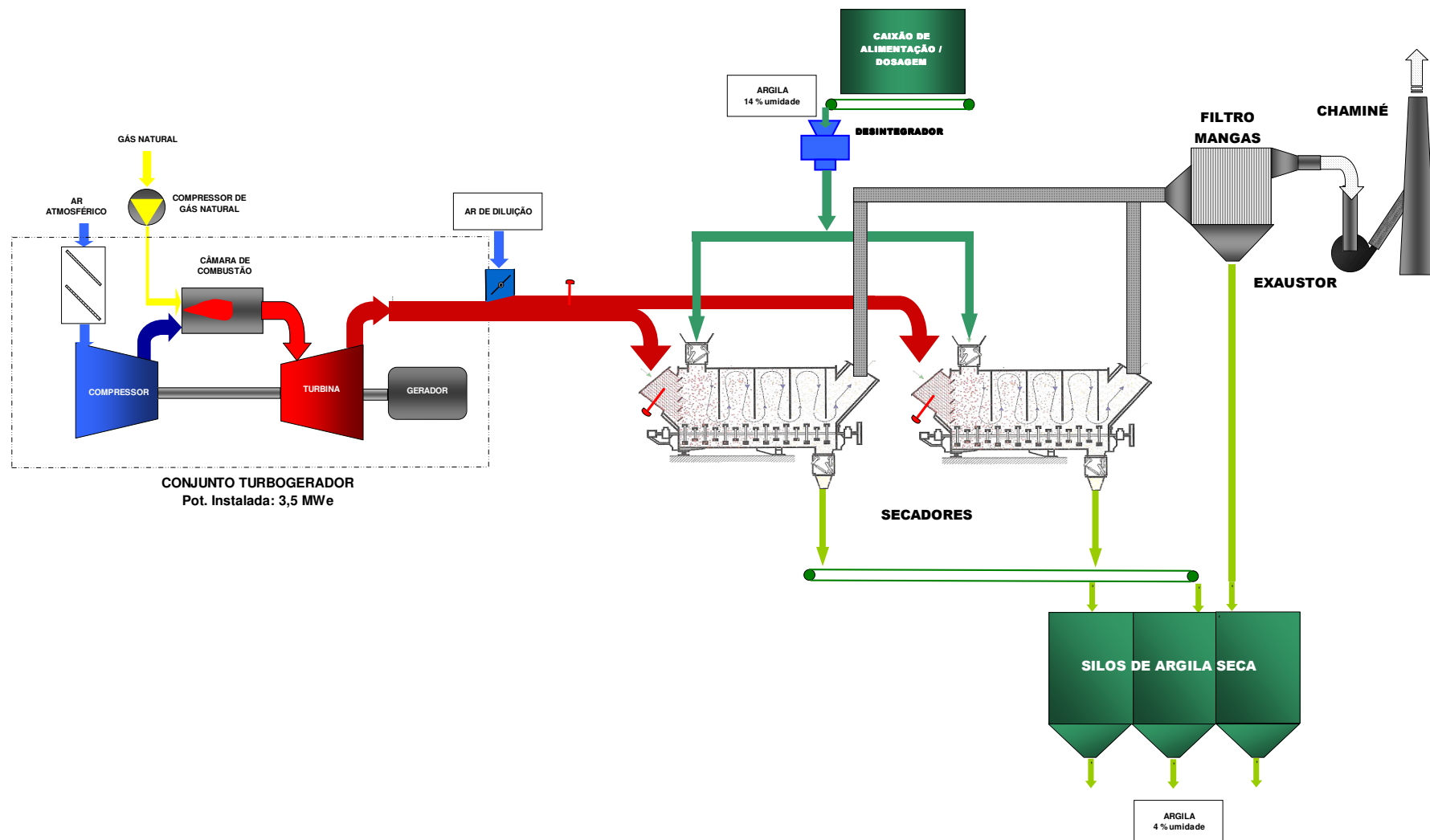


Figura 29 – Configuração com turbogerador.

8.3 Análise comparativa

Todas as três alternativas consideradas possuem em princípio a capacidade de atenderem a carga térmica calculada para o processo de secagem, entretanto, para que fosse possível a escolha de modelos e tamanhos de equipamentos disponíveis no mercado, as potências nominais dos equipamentos podem ser diferentes. As alternativas consideradas para a secagem forçada, embora sejam distintas em relação à potência, são analisadas tecnicamente de modo comparativo sob os seguintes aspectos: impactos na qualidade da argila e limitações de processo.

8.3.1 Disponibilidades de energia (balanço calor e trabalho)

Com base nos valores fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, constantes nas propostas apresentadas no ANEXO D, pode-se calcular as respectivas disponibilidades de calor e trabalho apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Disponibilidades de calor e trabalho.

		GERADOR DE GASES QUENTES	COGERAÇÃO	
			MOTOGERADOR	TURBOGERADOR
TOTAL	[kW]	5140	10495	7915
Calor (térmica)	[kW}	5140	5140	5140
	[%]	100	49,0	64,9
Trabalho (Elétrica)	[kW]	zero	4078	2142
	[%]	zero	38,8	27,0
Calor / Trabalho		---	1,26	2,40

Os valores constantes na Tabela 6 apresentam algumas diferenças quando comparados com a literatura. Segundo Lora e Haddad (2006), nos motores alternativos mais modernos cerca de 43 % da energia primária contida no combustível pode ser convertida em energia mecânica disponível no eixo do gerador. A disponibilidade de calor associado à entalpia dos gases de escape pode representar 30 % da energia primária. Os

restantes 27% constituem perdas de calor para água de resfriamento (7,5 %), óleo de lubrificação (5,6 %) e para compressão do ar no turbocompressor (11,7%).

Os turbogeradores por sua vez, apresentam balanço calor e trabalho muito distinto dos motores alternativos. De um modo geral pode-se dizer que as turbinas possuem eficiências elétricas menores do que os motores. Esta característica distingue substancialmente as duas alternativas de cogeração no que se refere à potência elétrica gerada, na medida em que o dimensionamento da instalação neste caso foi pautado pela necessidade de atendimento da carga térmica necessária para o processo de secagem, e não pela necessidade de geração de determinada demanda potência elétrica.

8.3.2 Emissões atmosféricas

As emissões de poluentes de processos de combustão constituem fatores muito importantes pelos seus impactos causados à saúde humana e ao meio ambiente. Assim, se torna uma questão não menos relevante do que às técnico-econômicas na avaliação comparativa entre as alternativas consideradas.

Todas as alternativas consideradas nesse trabalho constituem processos de conversão de energia química de um combustível mediante a reação de combustão com ar, e que são fortemente exotérmicas. Embora em todos os casos os reagentes sejam os mesmos, gás natural e ar atmosférico, os produtos de combustão podem ter composições diferentes em função dos seguintes fatores:

- Pressões do ambiente onde se desenvolvem as reações;
- Excesso de ar de combustão; e,
- Tempo de permanência dos reagentes no interior das câmaras de combustão.

Na análise sob o aspecto das emissões, deve-se levar em conta os seguintes compostos químicos derivados do processo de combustão: monóxido de carbono (CO), óxidos de Nitrogênio (NO_x), Material Particulado (MP), hidrocarbonetos não-queimados e óxidos de enxofre, que representam as emissões mais significativas de poluentes e que podem causar maiores danos ao meio ambiente e saúde humana.

O monóxido de carbono reduz a capacidade do sangue de absorver e transportar oxigênio podendo causar asfixia e até mesmo a morte. Seus efeitos sobre a saúde resultam principalmente de sua capacidade de se ligar à hemoglobina presente na

corrente sanguínea formando a carboxi-hemoglobina, e interrompendo assim a oxigenação dos tecidos.

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados pela reação entre oxigênio atmosférico e nitrogênio em razão das altas temperaturas e pressões encontradas na câmara de combustão. O NO_x é um dos precursores do fenômeno de “*smog*” fotoquímico, observado em grandes cidades, é um dos responsáveis também pela chuva ácida e depleção da camada de ozônio na estratosfera. Existe uma grande variedade desses óxidos, porém, o mais importante do ponto de vista da saúde humana é o NO_2 .

O material particulado (MP) é um conjunto de poluentes constituídos de uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, de todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. As partículas estão entre os poluentes que apresentam maiores riscos ao meio ambiente. A maior parte das partículas tem seu diâmetro variando entre 0,1 e 10 μm .

Na atmosfera, o SO_2 , em baixas concentrações (até algumas centenas de ppm), é praticamente inócuo a vegetais e animais. No entanto, os compostos resultantes da sua oxidação e da sua reação com água, principalmente o ácido sulfúrico, são extremamente nocivos, podendo provocar a lixiviação ou o empobrecimento do solo e corrosão em equipamentos e edificações.

Quando reações acontecem em ambientes com pressões próximas às atmosféricas, como é o caso da alternativa convencional com gerador de gases quentes, a energia liberada na reação exotérmica de combustão se incorpora aos produtos de combustão na forma de entalpia sensível dos gases.

Nos produtos de combustão, as proporções de CO, NO_x , HC's e MP presentes serão conseqüências do projeto do conjunto queimador-câmara de combustão. Um bom projeto poderá garantir teores de CO bastante baixos (2 a 20 ppm) e NO_x variando na faixa 50 a 200 ppm, operando com excessos de ar correspondentes a 2 a 4% de O_2 nos gases de exaustão. Os teores de MP, SO_2 , HC's podem ser considerados desprezíveis se comparados aos padrões de emissão previstos na legislação.

Nas alternativas de cogeração, as reações de combustão acontecem em pressões acima da atmosférica, sendo que parte da energia química liberada na reação é convertida em trabalho (energia mecânica) pela expansão dos produtos de combustão até

pressão próxima a atmosférica na exaustão, e que é convertida em seguida em energia elétrica no gerador.

A Tabela 7 apresenta os valores estimados para as emissões calculados com base nos fatores de emissão de motores e turbinas a gás disponíveis na literatura.

Tabela 7 – Previsão de emissões segundo bibliografia (Lora e Haddad, 2006).

		MOTOGERADORES ^(*1)	TURBOGERADOR ^(*2)
NO_x	g/h	925	592
SO₂	g/h	12,96	6,81
PM-10	g/h	55,5	68
CO₂	g/h	2.545.225	1.289.306

(*1) Base de cálculo: 4,078 MW equipados com catalisador de três vias.

(*2) Base de cálculo: 2,14 MW.

Embora as duas alternativas operem com reações de combustão em pressões muito acima da atmosférica, numa turbina o excesso de ar de combustão e o tempo de permanência dos reagentes no interior da câmara de combustão são maiores do que nos motores alternativos, o que leva este último à maior formação de NO_x.

9 ANÁLISE ECONÔMICA COMPARATIVA

Neste item é apresentada uma análise econômica comparativa considerando as três alternativas.

9.1 investimentos

Para o levantamento e detalhamento dos investimentos necessários à instalação de uma unidade típica de secagem foram feitas visitas e consultas técnicas e solicitadas propostas técnico-comerciais para diferentes fornecedores de equipamentos no mercado nacional e internacional, bem como dos diversos serviços necessários à implantação de uma unidade na região de Santa Gertrudes (SP). As propostas enviadas pelas empresas consultadas são apresentadas no anexo correspondente deste relatório.

Além dos equipamentos e seus periféricos, está relacionada também, no montante dos investimentos, a construção de um galpão industrial com área de 1000 m²

considerada como área suficiente para a instalação dos equipamentos e dos seus periféricos, além de espaço para estocagem de certa quantidade estratégica de argila seca. O custo para execução desta obra foi estimado com base nos índices da construção civil (Revista A Construção).

As alternativas são particularmente diferentes no que se refere ao módulo de geração de gases quentes. Os demais componentes agrupados em módulos destinados ao manuseio e transporte da argila úmida e seca (caixão alimentador, destorroador, correias transportadoras) e ao tratamento dos gases de exaustão do sistema são idênticos nas três alternativas.

Em todas as alternativas, foi adotado no módulo secagem o secador do tipo “rapid dryer” pelas razões já expostas no item em que se avaliou potencialmente as vantagens deste tipo em relação aos secadores rotativos até o momento considerados convencionais.

9.1.1 Alternativa gerador de gases quentes

Segundo fluxograma da Figura 28, o módulo de geração de gases quentes é composto por uma câmara de combustão convencional com capacidade nominal de 5,8 MW (5 Gcal/h), dotada de ventilador de ar de combustão suficientes para produzir gases quentes a temperatura de 200 °C, em volume suficiente à alimentação de dois secadores montados em paralelo.

Na Tabela 8, estão apresentados os componentes de cada um dos módulos que compõem a instalação e os respectivos custos envolvidos da aquisição dos equipamentos, bem como dos serviços de transporte, instalações elétricas e mecânicas dos mesmos.

Tabela 8 – Investimentos: alternativa gerador de gases quentes.

MÓDULO	ITEM / COMPONENTE	US\$	R\$
GERADOR DE GASES QUENTES	1 CONJUNTO GERADOR DE GASES QUENTES	172926,97	307810,00
	Revestimento refratário	74129,21	131950,00
	Transporte (embalagem, seguro transporte)	8894,02	15831,36
	Custo posto Sta. Gertrudes (SP)	255950,20	455591,36
	Instalações elétrica e mecânica	6926,97	12330,00
	Subtotal gerador de gases quentes	262877,17	467921,36
SECADOR	Secador tipo "câmara"	674157,30	1200000,00
	Transporte (embalagem, seguro de transporte)	20224,72	36000,00
	Instalações elétrica e mecânica	5337,08	9500,00
	Subtotal secador	699719,10	1245500,00
SISTEMA DE EXAUSTÃO DE GASES	Filtro de mangas	224719,10	400000,00
	Exaustor	25280,90	45000,00
	Instalações elétrica e mecânica	3932,58	7000,00
	Subtotal sistema de exaustão	253932,58	452000,00
EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	Alimentador de argila	137640,45	245000,00
	Destorroador	94382,02	168000,00
	Silos de armazenamento	46067,42	82000,00
	Dispositivos p/ transporte e armazenamento de argila	35955,06	64000,00
	Instalações elétrica e mecânica		8500,00
	Subtotal sistema de transporte	318820,22	567500,00
CONSTRUÇÕES CIVIS (R\$823,00 /m ²)	Galpão industrial com 1000 m ²	462359,55	823000,00
INVESTIMENTO TOTAL		1997708,63	3555921,36
TAXA DE DEPRECIAÇÃO (média ponderada)			19,49

9.1.2 Alternativa motogerador

A Tabela 9 apresenta os itens de investimento necessários para a instalação de toda a unidade de secagem segundo o fluxograma da Figura 29, em que o módulo de geração de gases quentes é composto por três unidades motogeradores montados em paralelo, descarregando os gases quentes num duto de gases acoplado aos os secadores, estes montados em paralelo. Em virtude da possibilidade de haver excedente de energia elétrica exportável, considerou-se um módulo adicional correspondente ao sistema de controle e paralelismo com a rede de transmissão de energia elétrica.

Tabela 9 - Investimentos: alternativa motogeradores.

MÓDULO	ITEM / COMPONENTE	US\$	R\$
MOTOGERADOR	2 CONJUNTOS MOTOGERADORES (2+2 MWe)	2218050,02	3948129,03
	Disjuntor	43349,04	77161,29
	Silenciador	43494,02	77419,35
	Impostos (PIS + COFINS)	374545,12	666690,32
	Transporte embalagem, frete e seguro)	1896,07	3375,00
	Instalações elétrica e mecânica	40449,44	72000,00
	Subtotal turbogerador	2721783,70	4844774,99
SISTEMA DE CONTROLE E PARALELISMO COM A REDE		561797,75	1000000,00
SECADOR	Secador tipo "câmara"	674157,30	1200000,00
	Transporte (embalagem, seguro de transporte)	20224,72	36000,00
	Instalações elétrica e mecânica	5337,08	9500,00
	Subtotal secador	699719,10	1245500,00
SISTEMA DE EXAUSTÃO DE GASES	Filtro de mangas	224719,10	400000,00
	Exaustor	25280,90	45000,00
	Instalações elétrica e mecânica	3932,58	7000,00
	Subtotal sistema de exaustão	253932,58	452000,00
EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	Alimentador de argila	137640,45	245000,00
	Destorroador	94382,02	168000,00
	Silos de armazenamento	46067,42	82000,00
	Dispositivos p/ transporte e armazenamento de argila	35955,06	64000,00
	Instalações elétrica e mecânica	4775,28	8500,00
	Subtotal sistema de transporte	318820,22	567500,00
CONSTRUÇÕES CIVIS (R\$823,00 /m ²)	Construção de galpão industrial com 1000 m ²	462359,55	823000,00
INVESTIMENTO TOTAL		5.018.412,92	8.932.774,99
US\$/kWe instalado		820,90	1461,19
TAXA DE DEPRECIAÇÃO (MÉDIA PONDERADA)			19,80

9.1.3 Alternativa turbogerador

A Tabela 10 apresenta os itens de investimento necessários para a instalação de toda a unidade de secagem segundo o fluxograma da Figura 30, em que o módulo de geração de gases quentes é composto por um conjunto turbogerador, descarregando os gases quentes num duto de gases acoplado aos os secadores. Neste caso, foi adicionado um módulo correspondente ao compressor de gás natural necessário para elevar a pressão do gás suficiente para introduzi-lo na câmara de combustão da turbina.

Tabela 10 - Investimentos: alternativa turbogerador.

MÓDULO	ITEM / COMPONENTE	US\$	R\$
TURBOGERADOR	CONJUNTO TURBOGERADOR 3.5 MW	1840000,00	3275200,00
	Impostos (PIS + COFINS)	237362,13	422504,59
	Taxas diversas (marinha mercante, fumigação, etc.)	1600,00	2848,00
	Despesas de transporte (frete, seguro, IPI e ICMS)	528472,96	940681,87
	Despesas alfandegárias (armazenagem, despachante, taxa)	111250,00	198025,00
	Transporte interno no país	1000,00	1780,00
	Instalações elétrica e mecânica	40000,00	71200,00
	Subtotal turbogerador	2719685,09	4841039,46
COMPRESSOR DE GÁS NATURAL	Compressor de gás natural	115000,00	204700,00
	Instalações elétrica e mecânica	2528,09	4500,00
	Subtotal compressor de gás natural	117528,09	209200,00
SISTEMA DE CONTROLE E PARALELISMO COM A REDE		43800,00	77964,00
SECADOR	Secador tipo "câmara"	674157,30	1200000,00
	Transporte (embalagem, seguro de transporte)	20224,72	36000,00
	Instalações elétrica e mecânica	5337,08	9500,00
	Subtotal secador	699719,10	1245500,00
SISTEMA DE EXAUSTÃO DE GASES	Filtro de mangas	224719,10	400000,00
	Exaustor	25280,90	45000,00
	Instalações elétrica e mecânica	3932,58	7000,00
	Subtotal sistema de exaustão	253932,58	452000,00
EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	Alimentador de argila	137640,45	245000,00
	Destorroador	94382,02	168000,00
	Silos de armazenamento	46067,42	82000,00
	Dispositivos p/ transporte e armazenamento de argila	35955,06	64000,00
	Instalações elétrica e mecânica		8500,00
	Subtotal sistema de transporte	318820,22	567500,00
CONSTRUÇÕES CIVIS (R\$823,00 /m ²)	Construção de galpão industrial com 1000 m ²	462359,55	823000,00
INVESTIMENTO TOTAL		4615844,64	8216203,46
US\$/kWe instalado		823,15	1465,20
TAXA DE DEPRECIAÇÃO (MÉDIA PONDERADA)			19,78

Para o cálculo dos custos operacionais necessários à avaliação econômica foram adotados os parâmetros constantes na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros considerados na avaliação econômica.

PRODUÇÃO MENSAL		[m² piso/mês]	1.650.000	
ARGILA	Produção específica de piso	[m² piso/t argila]	59	
	Consumo específico de argila	[kg/m² piso]	16,95	
	Umidade média inicial	[%]	14,00	
	Umidade final	[%]	4,00	
GÁS NATURAL	Tarifa de consumo normal	[R\$/m³]	0,757398	
	Tarifa de consumo para cogeração	[R\$/m³]	0,679336	
	Densidade (20 °C; 1 atm)	[kg/m³]	0,766	
	Poder calorífico	[kJ/m³]	39348	
		[kWh/m³]	10,932	
ENERGIA ELÉTRICA	Tarifa convencional	demanda	[R\$/kW]	9,26
		consumo	[R\$/kWh]	0,22488
	Tarifa de cogeração		[R\$/kWh]	0,679336
	Consumo específico		[kWh/m² piso]	1,22
	Demanda específica		[kW/m² piso]	0,00114

O quadro geral da Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados da análise econômica comparativa entre as alternativas consideradas tendo como referencial a situação atual com a secagem feita naturalmente. Trata-se de uma planilha eletrônica na qual são apresentados os valores globais obtidos a partir dos cálculos feitos com base nos levantamentos realizados, e nas informações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos.

Na planilha, vários índices específicos são calculados (consumos de energia elétrica, gás natural e custos operacionais) de modo a permitir estimativas para outras situações com níveis de produção diferentes dos adotados nesse trabalho. Os custos correspondentes à situação atual de secagem natural, embora envolvam também o consumo de combustível e desgaste de equipamentos de movimentação e transporte de argila, por simplificação da planilha, foram todos englobados como custo de mão de obra.

Tabela 12 – Quadro geral da avaliação econômica das alternativas.

MATÉRIA PRIMA / INSUMO	PARÂMETRO		SECAGEM NATURAL	SECAGEM ARTIFICIAL		
				CONVENCIONAL	COGERAÇÃO	
				Gerador de g. quentes	Motogerador	Turbogenerador
ARGILA	Vazão de argila úmida	[t/h]		43,776	43,776	43,776
	Produção de argila de argila seca	[t/h]		40	40	40
	Massa de água evaporada	[kg/s]		1,0489	1,0489	1,0489
	Vazão de gases de secagem	[kg/s]		0,0340	0,0340	0,0340
	Produção mensal de argila seca	[t/mês]		27966	27966	27966
	Taxa de utilização	[%]		88,73	88,73	88,73
	Eficiência do secador	[kJ/kg água evap.]		4900,00	4900,00	4900,00
GÁS NATURAL	Potência térmica	[kW]		5139,56	5139,56	5139,56
	Carga	[%]		88,40	66,17	69,98
	Consumo	[kg/s]		0,1051	0,2043	0,1541
		[Nm³/h]		493,74	960,23	724,16
	Potência total desenvolvida	[kW]		5396,53	10495,35	7915,11
	Potência elétrica gerada	[kW]		0,00	4078,17	2142,65
	Consumo específico	[Nm³/m² piso]	0	0,1912	0,3718	0,2804
	Custo específico	[R\$/m² piso]	0	0,1448	0,2526	0,1905
	Conta mensal de gás natural	R\$/mês	0	238.899,21	469.670,94	354.204,25
ENERGIA ELÉTRICA	Potência instalada	[kW]	0	400	360	370
	Consumo mensal	[kWh]	0	255538	229984	236373
	Consumo específico	[kWh/m² piso]	0	0,1549	0,1394	0,1433
	Custo específico	[R\$/m² piso]	0	0,0371	0,0336	0,0345
	Conta mensal de em. elétrica	R\$/mês	0	61.169,43	55.422,89	56.859,53
MÃO DE OBRA	Mão de obra para operação ^(*)	R\$/mês		16000,00	16000,00	16000,00
	Manutenção			2000,00	10000,00	50000,00
	Específico	[R\$/t argila]	16,26	0,6436	0,9297	2,3600
		[R\$/m² piso]	0,2756	0,0109	0,0158	0,0400
	Mensal	[R\$/mês]	454.728,81	18.000,00	26.000,00	66.000,00
CUSTO (OPER.+INSUMOS)	Específico	[R\$/t argila]	16,26	11,37	19,71	17,06
		[R\$/m² piso]	0,2756	0,1928	0,3340	0,2891
	Custo mensal	[R\$/mês]	454.728,81	318.068,64	551.093,83	477.063,77
ENERGIA CONTRATADA	Consumo específico secagem	[kWh/m²]	0	0,1549	0,1394	0,1433
	Consumo específico moagem	[kWh/m²]	0,27	0,27	0,27	0,27
	Consumo específico fabricação	[kWh/m²]	0,97	0,97	0,97	0,97
	Consumo específico global	[kWh/m²]	1,2400	1,3949	1,3794	1,3949
	Consumo global	[kWh]	2.046.000	2.301.538	0	758.832
	Demanda contratada	[kW]	2.842	3.197	0	1.054
	Fatura mensal	[R\$]	486.418,31	547.170,25	0,00	180.405,52
(*) 4 operadores (salários + encargos: R\$4000,00)						
ENERGIA EXPORTÁVEL	Potência líquida	[kW]	0	0	917,08	0,00
	Produção mensal	[kWh]	0	0	660.298	0
	Fração da energia elétrica produzida	[%]			22	0
	Faturamento mensal	R\$	0,00	0,00	448.564,53	0,00
CUSTO GLOBAL			941.147,13	865.238,89	102.529,31	657.469,30
ECONOMIA	Bruta Mensal	[R\$/mês]		75.908,23	838.617,82	283.677,83
	Bruta Anual	[R\$/ano]		910.898,80	10.063.413,83	3.404.133,98
	Depreciação anual	[R\$/ano]		693.004,27	1.764.362,98	1.625.060,69
	Imposto de renda (10%)	[R\$/ano]		205.142,68	2.676.321,73	878.316,17
	Contribuição social (9%)	[R\$/ano]		81.980,89	905.707,24	306.372,06
	Líquida anual	[R\$/ano]		623.775,23	6.481.384,85	2.219.445,75
AVALIAÇÃO ECONÔMICA	INVESTIMENTO	R\$	0	3.555.921,36	8.932.774,99	8.216.203,46
	Prazo de amortização	[anos]		15	15	15
	Taxa de juros do mercado	[%]		15,00%	15,00%	15,00%
	Valor presente	[R\$]		R\$ 91.523,28	R\$ 28.966.280,99	R\$ 4.761.717,24
	Taxa interna de retorno	[%]		15,53	72,54	26,19

Os números constantes na Tabela 12 devem ser analisados tomando-se como referência a situação atual em que a secagem é feita naturalmente. Na secagem artificial, segundo a configuração convencional com a utilização de gerador de gases quentes, os valores obtidos indicam que, apesar de adicionar $0,1928 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$ de piso ao consumo específico global atual de GN, há uma redução nos custos operacionais com secagem da ordem de 30 %. Deduzidos os custos adicionais com energia elétrica para acionamento dos novos equipamentos, resulta economia líquida anual estimada em R\$ 624.000,00. Esta é a alternativa que envolveria o menor volume de investimentos (~R\$ 3.600.000,00), com a menor taxa de retorno, 15,53 %, admitindo-se 15 anos de período de amortização, e taxa de juros de 15 % ao ano.

Também merecem destaque os valores calculados para a configuração do sistema de secagem utilizando os motogeradores. Nesta situação, ao consumo específico de GN atual serão acrescidos $0,3718 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$ de piso. Este custo adicional, deduzido da economia obtida com a eliminação da conta de energia elétrica, acrescida da renda obtida com a venda da energia elétrica gerada, proporciona economia líquida anual estimada em R\$ 6.481.000,00. Dentre todas analisadas, esta é a alternativa que requer o maior volume de investimentos (~R\$ 8.930.000,00), mas, que apresenta a taxa de retorno mais atrativa (72,54 %), calculada nas mesmas condições anteriores.

A configuração de cogeração com o turbogerador, pelo fato da turbina apresentar “menor eficiência na geração de energia elétrica” em relação aos motores, não atende à demanda de energia elétrica do processo de fabricação. A economia líquida anual estimada é menor (R\$ 2.220.000,00). Considerando que não há geração de excedentes exportáveis de energia elétrica, apesar da redução significativa da conta de energia elétrica. Do ponto de vista do retorno do investimento, os valores obtidos situam-se entre as duas alternativas anteriores, com taxas de retorno também atrativas, 26,19 %, porém com valores de investimento não proporcionalmente menores (R\$ 8.216.000,00).

Todas as previsões apresentadas na Tabela 12 são bastante sensíveis às variações dos parâmetros adotados constantes da Tabela 11, bem como dos custos envolvidos na secagem natural discriminados na Tabela 1.

10 IMPACTOS DA COGERAÇÃO NO PÓLO DE SANTA GERTRUDES

Neste item são feitas considerações acerca dos impactos da adoção da secagem em sistema de cogeração segundo as diferentes configurações de sistemas de secagem consideradas anteriormente, caso fossem adotadas de modo generalizado em todo o pólo cerâmico. Esta análise tem como premissa básica um cenário de escassez de energia proveniente de hidroelétricas, em que, parte da demanda de energia elétrica da rede de distribuição seria atendida por centrais termoelétricas.

Neste cenário hipotético, este exercício serve, em última análise, para responder à seguinte questão que poderia ser formulada: Se há que se utilizar gás natural para aportar energia elétrica na rede de distribuição, qual seria a alternativa mais eficiente para o uso do gás natural: na geração termoelétrica centralizada nas usinas existentes, p. ex Nova Piratininga (Emae) ou disponibilizar parte dele para o Pólo, para auto-produção utilizando-o nos motogeradores ou turbinas nos sistemas de cogeração considerados no presente projeto?.

Para esta análise, são considerados os valores de previsão de produção de pisos fornecidos pela Aspacer, verificados no ano de 2007 e as previsões para 2008. A demanda de energia elétrica e de gás natural de todo o setor foi estimada a partir dos consumos específicos de energia elétrica e de gás natural apurados durante os levantamentos de campo feitos no âmbito desse projeto.

Para o cálculo dos consumos de gás nas centrais termoelétricas, imaginaram-se três situações distintas com relação à eficiência térmica: a primeira admitindo-se que a geração fosse na central térmica de Carioba (Americana, SP), de baixa eficiência operada pela CPFL com óleo combustível do tipo 2A, estimando-se o consumo equivalente energético de gás natural (base PCI). A segunda alternativa, com eficiência maior (35 %), na hipótese de que a mesma usina fosse repotenciada e transformada para operar com gás natural, portanto, operando tipicamente de modo convencional. A terceira alternativa considera que a geração fosse feita na UTE Nova Piratininga em ciclo combinado, com eficiência típica de 55 %.

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos segundo o cenário atual, ou seja, a secagem da argila feita de modo natural em pátios. Considerando o ano de 2008, o consumo médio diário de gás natural para o processo de fabricação é estimado em 1,035

milhões de m³, e a demanda de energia elétrica do setor seria de aproximadamente 54,25 MW.

Tabela 13 – Cenário atual.

SITUAÇÃO ATUAL COM SECAGEM NATURAL				
		2007	2008 (previsão)	
Produção	[m²]	366.656.000	378.000.000	
Consumo específico de gás natural	[m ³ /m ²]	1,00	1,00	
Consumo mensal de gás natural	[m ³ /mês]	30.554.667	31.500.000	
Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.004.537	1.035.616	
Consumo específico de energia elétrica	[kWh/m ²]	1,24	1,24	
Consumo mensal de energia elétrica	[kWh/mês]	37.887.787	39.060.000	
Consumo diário de energia elétrica	[kWh/dia]	1.245.626	1.284.164	
Demanda de energia elétrica da rede	[MW]	52,62	54,25	
UTE CARIOBA (CPFL)	Potência nominal instalada	[MW]	32	32
	Consumo específico (óleo combustível tipo 2A)	kg/kWh	0,42	0,42
	Consumo de óleo	t/h	22,10	22,79
	Consumo específico de energia térmica	kWh/kWh	4,79	4,79
	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	20,90	20,90
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m ³ /dia]	552.940	570.048
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,55	0,55
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,55	1,55
	Consumo diário de óleo combustível	[t/dia]	530,43	546,84
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m³/dia]	1.557.477	1.605.664
UTE CARIOBA (repotenciada)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	35	35
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	330.117	340.330
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,33	0,33
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,33	1,33
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.334.654	1.375.947
UTE PIRATININGA (EMAE)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	55	55
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	210.074	216.574
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,21	0,21
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,21	1,21
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.214.611	1.252.190

O montante de gás natural para a sustentação desta atividade industrial como insumo energético na hipótese mais conservativa, UTE de Piratininga, seria da ordem de 1,262 milhões de m³/dia.

A Tabela 14 apresenta os resultados esperados para o cenário em que a secagem seria feita artificialmente na configuração convencional com geradores de gases quentes.

Tabela 14 – Cenário provável com a adoção de secagem convencional.

SECAGEM CONVENCIONAL COM GERADOR DE GASES QUENTES				
		2007	2008 (previsão)	
Produção	[m²]	366.656.000	378.000.000	
Consumo específico de gás natural	[m ³ /m ²]	1,19	1,19	
Consumo mensal de gás natural	[m ³ /mês]	36.395.626	37.521.673	
Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.196.569	1.233.589	
Consumo específico de energia elétrica	[kWh/m ²]	1,39	1,39	
Consumo mensal de energia elétrica	[kWh/mês]	42.619.838	43.938.457	
Consumo diário de energia elétrica	[kWh/dia]	1.401.200	1.444.552	
Demanda de energia elétrica da rede	[MW]	59,19	61,03	

UTE CARIOBA (CPFL)	Potência nominal instalada	[MW]	32	32
	Consumo específico (óleo combustível tipo 2A)	kg/kWh	0,42	0,42
	Consumo de óleo	t/h	24,86	25,63
	Consumo específico de energia térmica	kWh/kWh	4,79	4,79
	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	20,90	20,90
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m ³ /dia]	622.001	641.245
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,62	0,62
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,81	1,81
	Consumo diário de óleo combustível	[t/dia]	596,68	615,14
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m³/dia]	1.818.569	1.874.834

UTE CARIOBA (repotenciada)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	35	35
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	371.347	382.836
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,37	0,37
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,56	1,56
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.567.916	1.616.426

UTE PIRATININGA (EMAE)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	55	55
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	236.312	243.623
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,24	0,24
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,43	1,43
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.432.880	1.477.212

Em relação à situação atual, a demanda de energia elétrica do setor aumenta 12,5 %, enquanto o consumo global de gás natural, na melhor situação aumenta aproximadamente 18 %. Em termos absolutos seriam cerca de 225.000 m³/dia de gás adicionais como insumos energéticos consumidos exclusivamente para o abastecimento do Pólo, necessário para a produção projetada para o ano de 2008 pela Aspacer.

A Tabela 15 apresenta os resultados esperados para o cenário em que a secagem seria feita artificialmente na configuração alternativa com cogeração utilizando conjuntos motogeradores.

Tabela 15 - Cenário provável com a adoção de cogeração com motogeradores.

SECAGEM FORÇADA E COGERAÇÃO COM MOTOGERADORES				
		2007	2008 (previsão)	
Produção	[m²]	366.656.000	378.000.000	
Consumo específico de gás natural	[m ³ /m ²]	1,37	1,37	
Consumo mensal de gás natural	[m ³ /mês]	41.914.345	43.211.136	
Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.378.006	1.420.640	
Consumo específico de energia elétrica	[kWh/m ²]	-0,400180894	-0,400180894	
Consumo mensal de energia elétrica	[kWh/mês]	-12.227.394	-12.605.698	
Consumo diário de energia elétrica	[kWh/dia]	-401.997	-414.434	
Demanda de energia elétrica da rede	[MW]	-16,98	-17,51	

UTE CARIOBA (CPFL)	Potência nominal instalada	[MW]	32	32
	Consumo específico (óleo combustível tipo 2A)	kg/kWh	0,42	0,42
	Consumo de óleo	t/h	-7,13	-7,35
	Consumo específico de energia térmica	kWh/kWh	4,79	4,79
	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	20,90	20,90
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m ³ /dia]	-178.448	-183.970
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	-0,18	-0,18
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,19	1,19
	Consumo diário de óleo combustível	[t/dia]	-171,18	-176,48
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m³/dia]	1.199.557	1.236.671

UTE CARIOBA (repotenciada)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	35	35
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	-106.537	-109.834
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	-0,11	-0,11
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,27	1,27
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.271.468	1.310.806

UTE PIRATININGA (EMAE)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	55	55
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	-67.797	-69.894
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	-0,07	-0,07
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,30	1,30
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.310.209	1.350.746

Neste cenário, as empresas estariam aportando cerca de 17,5 MW á rede de transmissão de energia elétrica, consumindo cerca de 7,9 % a mais de gás natural em relação à situação atual. Em relação ao cenário da solução convencional com gerador de gases quentes, representa uma economia de gás natural de 126.466 m³/dia em termos absolutos, e em termos relativos, uma redução de consumo de GN da ordem de 8,6 %.

A Tabela 16 apresenta os resultados previstos para o cenário em que a secagem seria feita artificialmente na configuração alternativa com cogeração utilizando conjuntos turbogeradores.

Tabela 16 - Cenário provável com a adoção de cogeração com turbogeradores.

SECAGEM FORÇADA E COGERAÇÃO COM TURBOGERADOR				
		2007	2008 (previsão)	
Produção	[m²]	366.656.000	378.000.000	
Consumo específico de gás natural	[m ³ /m ²]	1,28	1,28	
Consumo mensal de gás natural	[m ³ /mês]	39.121.614	40.332.001	
Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.286.190	1.325.984	
Consumo específico de energia elétrica	[kWh/m ²]	0,459898084	0,459898084	
Consumo mensal de energia elétrica	[kWh/mês]	14.052.033	14.486.790	
Consumo diário de energia elétrica	[kWh/dia]	461.985	476.278	
Demanda de energia elétrica da rede	[MW]	19,52	20,12	

UTE CARIOBA (CPFL)	Potência nominal instalada	[MW]	32	32
	Consumo específico (óleo combustível tipo 2A)	kg/kWh	0,42	0,42
	Consumo de óleo	t/h	8,20	8,45
	Consumo específico de energia térmica	kWh/kWh	4,79	4,79
	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	20,90	20,90
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m ³ /dia]	205.078	211.422
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,20	0,20
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,48	1,48
	Consumo diário de óleo combustível	[t/dia]	196,73	202,82
	Consumo diário equivalente de gás natural	[m³/dia]	1.491.268	1.537.406

UTE CARIOBA (repotenciada)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	35	35
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	122.436	126.224
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,12	0,12
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,40	1,40
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.408.626	1.452.207

UTE PIRATININGA (EMAE)	Eficiência térmica de geração de energia elétrica	[%]	55	55
	Consumo de gás natural	[m ³ /dia]	77.914	80.324
	Cons. específico de gás natural para geração	[m ³ /m ²]	0,08	0,08
	Consumo específico global de gás natural	[m ³ /m ²]	1,36	1,36
	Consumo diário de gás natural	[m³/dia]	1.364.104	1.406.308

De acordo com este cenário, a demanda de energia da rede de distribuição seria da ordem de 20,1 MW, ou seja, 37 % dos valores estimados para a configuração atual. O consumo de gás natural para movimentação do setor, na melhor das hipóteses, seria de 1,406 milhões de m³/dia, o que representa um aumento de 12,3 % no consumo de gás natural em relação à situação atual.

Em relação ao cenário da solução convencional com gerador de gases quentes, representa uma economia de gás natural de 70.904 m³/dia em termos absolutos, e em termos relativos redução de consumo de GN da ordem de 4,2 %.

11 CONCLUSÕES

O trabalho realizado atendeu aos objetivos estabelecidos na proposta, na medida em que foram apontadas e avaliadas técnica e economicamente as alternativas e possibilidades de executar as operações de secagem da argila de modo artificial em substituição à prática de secagem natural em pátios.

Os resultados dos testes laboratoriais demonstraram os reais limites técnicos de temperatura no processo de secagem forçada, para que sejam preservadas as características da argila. A temperatura do agente de secagem não deverá exceder a temperatura de 250 °C, sob pena de comprometer a qualidade dos processos subseqüentes de conformação das placas cerâmicas.

Entre as alternativas de equipamentos de secagem considerados, acredita-se que o secador do tipo “*rapid dryer*”, disponível no mercado nacional, reúne as condições e características particulares para se obter bom desempenho com as argilas da formação de Corumbataí, embora não tenha sido possível quantificar e comprová-la durante a execução do trabalho.

Do ponto de vista da análise e concepção do sistema de geração de calor para a operação de secagem, foram analisadas técnica e economicamente, com detalhes, três opções, incluindo a opção convencional de geração de gases quentes, e duas opções alternativas associadas com cogeração de energia elétrica.

As análises econômicas apontam com clareza para a opção de configuração com motogeradores como mais interessante neste momento, revelando-se como alternativa bastante atraente, com a maior taxa interna de retorno do investimento (72,54 %).

No que se refere aos impactos ambientais globais, em que pese o pior desempenho dos motores em relação às emissões de NO_x, os diferentes cenários considerados demonstram que a alternativa mais interessante do ponto de vista do empresário do setor cerâmico, também é aquela que pode propiciar melhor aproveitamento do gás natural como insumo energético, sobretudo em cenários de escassez de energia gerada a partir da hidroeletricidade, ou seja, nas situações em que seja essencial para a geração de energia elétrica para o suprimento da rede de distribuição de energia elétrica.

Por fim, tendo em vista os resultados técnicos e econômicos apresentados, acredita-se que as metas previamente estabelecidas tenham sido plenamente alcançadas, bem como atendido a premissa ambiental, pois apresentou opções técnica e economicamente viáveis para a principal questão apresentada nos objetivos e metas.

12 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A atratividade técnica e econômica da alternativa de cogeração demonstrada no trabalho conduz naturalmente para proposição de um projeto de implantação de uma unidade de demonstração como solução de continuidade.

O projeto de continuidade deve ter como objetivo a montagem de uma instalação dentro de uma das indústrias e com dimensão apropriada para a execução de testes e demonstração em escala real envolvendo os diferentes parceiros: a indústria cerâmica como principal interessada, os fabricantes de equipamentos, um eventual investidor em ativos de cogeração de energia, a concessionária responsável pela distribuição de gás natural e as instituições de pesquisa, cada qual com seus interesses, mas com contribuições específicas e com as seguintes metas:

- Reduzir os impactos ambientais decorrentes do processo de secagem natural;
- Consolidar o processo de secagem artificial da argila com gás natural como alternativa ao processo de secagem natural;
- Incrementar a utilização de gás natural no setor como insumo para a geração distribuída de energia elétrica, e,
- Avaliar o desempenho do sistema térmico e de geração de energia elétrica quanto à eficiência e quanto as emissões atmosféricas.

A operação da unidade de demonstração em caráter experimental permitiria aferir os parâmetros adotados no projeto básico desenvolvido nesta primeira etapa, permitindo o seu aprimoramento e ajustes às necessidades e condições locais;

No projeto, caberia às instituições de pesquisa dar o apoio técnico no desenvolvimento do projeto executivo da instalação protótipo e seus componentes, e o monitoramento do desempenho térmico e ambiental da instalação, incluindo a execução de ensaios cerâmicos para avaliação de características cerâmicas da argila após secagem artificial,

comparativamente ao processo de secagem natural de argila ao sol. Os termos de responsabilidade de cada um dos parceiros devem ser objeto de acordos e contratos a serem discutidos previamente.

São Paulo, 22 de abril de 2008.

EQUIPE TÉCNICA

- Laiete Soto Messias – Engenheiro Mecânico - Gerente do Projeto
- José Francisco Marciano Motta - Geólogo
- Marcos Antonio Soares de Paiva – Engenheiro Mecânico
- Antonio Carlos de Camargo – Engenheiro Metalúrgico
- José Carlos Portela – Engenheiro Químico
- Eduardo Alessandro da Silva – Técnico
- André Luiz B. Ferreira – Bolsista

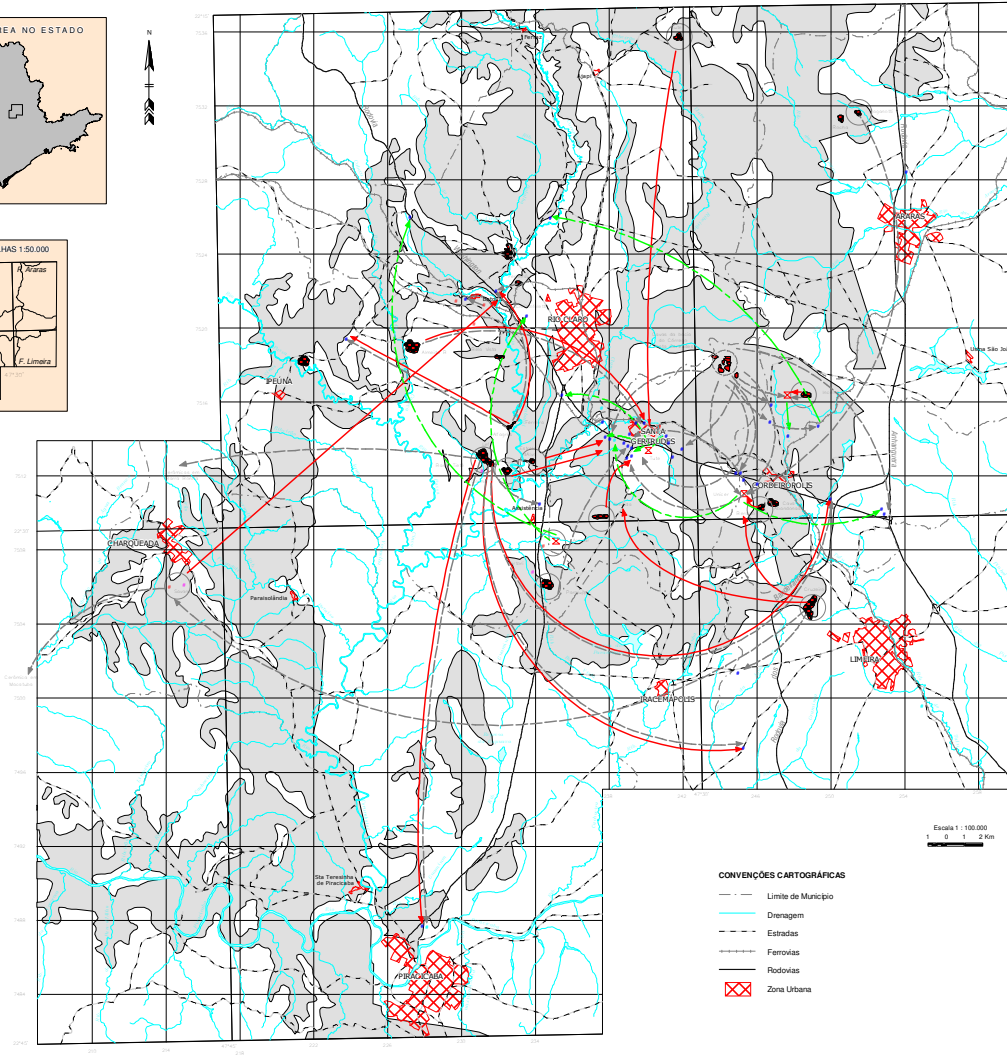
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A.; ROMACHELLI, J.C.; MARTINS. M.; Análise crítica do setor de revestimentos Cerâmicos no Brasil. Parte I: Histórico Recente, Rev. Cerâmica Industrial, V.6, no 4, agosto 2001.
- ARAÚJO, A.; ROMACHELLI, J.C.; MARTINS. M. Análise crítica do setor de revestimentos Cerâmicos no Brasil. Parte II: Crescimento da Capacidade Produtiva, Rev. Cerâmica Industrial, V.6, no 5 , set/out 2001.
- BOSCHI, A. O.; O pólo de Santa Gertrudes e a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 7-12, maio/jun. 2004.
- MACHADO, S. A.; Dinâmica dos arranjos produtivos locais: um estudo de caso em Santa Gertrudes, a nova capital da cerâmica brasileira. 2003. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- MENEGAZZO, A.P.M.; QUINTEIRO, E.; DEYURI, T.A.; PASCHOAL, A.B.; DESIMONE, D.; GILBERTONI, C.; The Brazilian Ceramic Tile Industry in Qualicer, VIII World Congress on Ceramic Tile Quality, Castelon, Spain, 2004.

BERG, E. A. T.; NOGUEIRA, L. A. H.; Cogeração na Indústria Cerâmica; Cerâmica Industrial, 01, julho/agosto, 1996.

LORA, E. E. S.; HADDAD, J.; Geração Distribuída – Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais, Editora Interciência, 2006.

ANEXO A – SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DAS INDÚSTRIAS E JAZIDAS NA REGIÃO DE SANTA GERTRUDES



- LEGENDA**
- Ocorrência da Formação Comtatã (área de interesse para extração de argila)
 - INDÚSTRIAS DE PLACAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO
 - Fábrica Via Seca
 - Fábrica Via Úmida
 - FORNECEDORES DE ARGILA
 - Empreendimentos Mineiros Ativos
 - Empreendimentos Paralisados
 - Minas de Argila
 - Planta de Moagem de Argila (Massa Pronta)
 - FLUXO DE ARGILA
 - Fluxo de Argila in natura em 2007
 - Fluxo de Argila in natura em 2003
 - Fluxo de Argila Moída

- CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS**
- Limite de Município
 - Drenagem
 - Estradas
 - Ferrovias
 - Rodovias
 - Zona Urbana

Fonte:
- Topografia: Folhas Topográficas 1:50.000 (Rio Claro, Araras, Piracicaba, Limeira) - IBGE 1969
- Geologia / Mineralogia: IPT 2004

IPT	COORDENADOR GERAL	COMBÁS - CIA DE GÁS DE SÃO PAULO		
		Mapa de Empreendimentos Mineiros Cerâmicos e Fluxos de Matéria-Prima de Placas Cerâmicas de Santa Otília		
ESCALA 1:50.000	COORDENADOR TÍTULO	COORDENADOR TÍTULO	COORDENADOR TÍTULO	RT 99 308 - 205
Roberto C. Carvalho-Ferreira	Glauco José Francisco-Mota	Willy L. Almeida-Silva	Willy L. Almeida-Silva	Anexo A

ANEXO B – ENSAIOS LABORATORIAIS DA UFSCar



Laboratório de Revestimentos Cerâmicos
Departamento de Engenharia de Materiais
Universidade Federal de São Carlos
Rod. Washington Luiz, Km 235 - Caixa Postal 2068
CEP 13574 970 São Carlos SP
Fone: (16) 3351 8249 Fax: 3361 5404 Cel.: 8134 8447
E-MAIL: daob@power.ufscar.br



SECAGEM “FORÇADA” DE ARGILAS

Projeto: LaRC - IPT - COMGÁS

Helton José Alves

Silvia Midori Higa

Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi

Dezembro / 2007

OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da temperatura de secagem sobre as propriedades tecnológicas das argilas utilizadas na fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca.

IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram coletadas duas amostras de argilas utilizadas atualmente na produção de revestimentos cerâmicos por via seca, provenientes de regiões distintas, denominadas:

- Argila “A” – região de Santa Gertrudes;
- Argila “B” – Colômbia (teor considerável de matéria orgânica).

METODOLOGIA

A metodologia adotada para execução do trabalho divide-se em três partes:

1ª parte: Preparação e secagem das matérias-primas

Inicialmente, as amostras encontravam-se na forma de “torrões” com dimensões variadas. O primeiro passo foi secá-las em estufa numa temperatura de 110°C durante 24 horas. Após a secagem prévia, foi realizado o quarteamento das matérias-primas, de modo que a quantidade da amostra separada para as análises, cerca de 400g, representasse efetivamente a amostra original.

Em seguida as argilas foram colocadas em cápsulas de porcelana e submetidas à secagem “forçada” em mufla elétrica, utilizando as temperaturas de 200, 300, 400, 500 e 600°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e tempo de patamar de uma hora.

2ª parte: Caracterização física

Para a caracterização física das argilas, primeiramente, as mesmas após cada condição descrita anteriormente, foram britadas em britador de mandíbulas sendo em seguida moídas em moinho de martelos. Na sequência o material moído foi granulado utilizando 9,0% de umidade para a argila “A” e 7,0% para “B” e peneirado em malha de abertura 355µm (# 42 mesh). Com o material passante na malha foram preparados vários corpos de prova das argilas de forma que pudessem ser caracterizadas quanto à densidade aparente, compacidade e resistência mecânica após secagem (MRFs), antes e após o tratamento térmico aplicado. Para isso, os corpos de prova foram prensados utilizando uma pressão de 250 kgf/cm², sendo posteriormente secos em estufa a 110°C por 24 horas.

Na sequência, determinou-se:

- densidade aparente (Dap) - método geométrico;

- compactidade – através da relação entre a densidade aparente e a densidade real do sólido (picnometria de gás hélio);
- módulo de ruptura à flexão a seco (MRFs) – ensaio de flexão em três pontos do corpo de prova (tensômetro).

3ª parte: Análise Colorimétrica

Utilizando uma fração do material moído e peneirado em malha de abertura 250 μ m (# 60 mesh), foram determinadas as coordenadas colorimétricas L^* (luminosidade) e a^* (tonalidade verde-vermelho) das argilas, através de um colorímetro, de modo que pudessem ser identificadas possíveis variações de cor/tonalidade das mesmas, decorrentes da temperatura em que foram submetidas. Esse acompanhamento da cor das argilas pode ser útil para relacionar a mudança observada com a temperatura real em que serão submetidas no interior de um secador industrial, uma vez que as temperaturas registradas nos painéis dos secadores não representam a temperatura real que o material é submetido.

RESULTADOS

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram o comportamento das Argilas “A” e “B”, no que diz respeito à densidade aparente, módulo de ruptura à flexão a seco e compactidade, respectivamente, conforme ocorre o aumento da temperatura em que foram submetidas.

Nas Figuras 3 e 4 são encontrados os gráficos que ilustram a variação de luminosidade (coordenada L^*) e de tonalidade verde-vermelho (coordenada a^*) das Argilas “A” e “B”, de acordo com o aumento da temperatura.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos, observados nos gráficos das Figuras de 1 a 5.

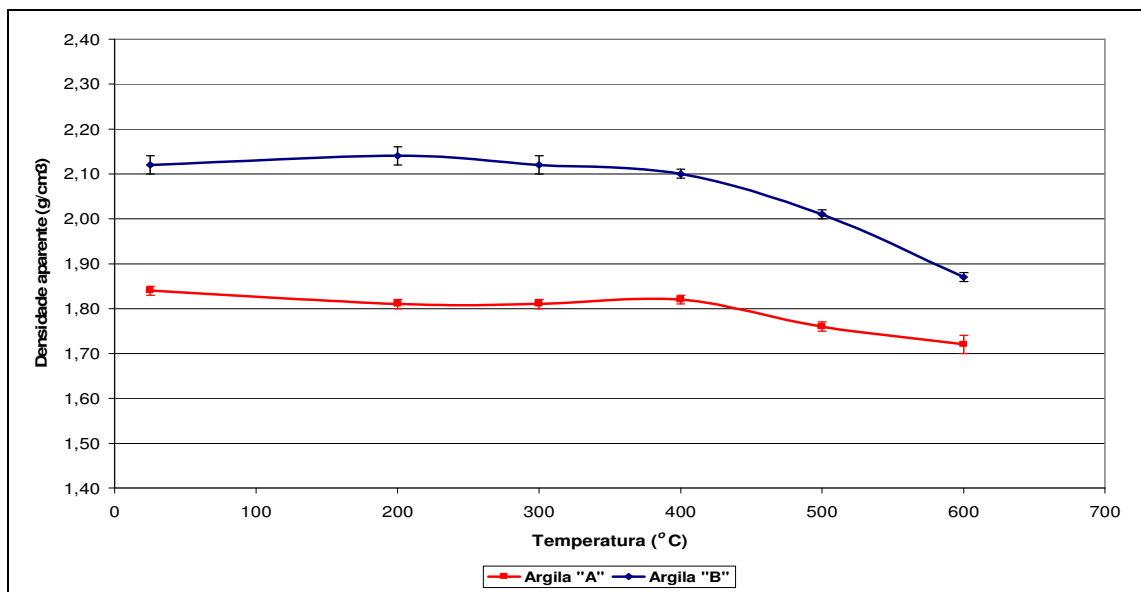


Figura 1 – Valores de densidade aparente das Argilas “A” e “B” em função da temperatura de secagem.

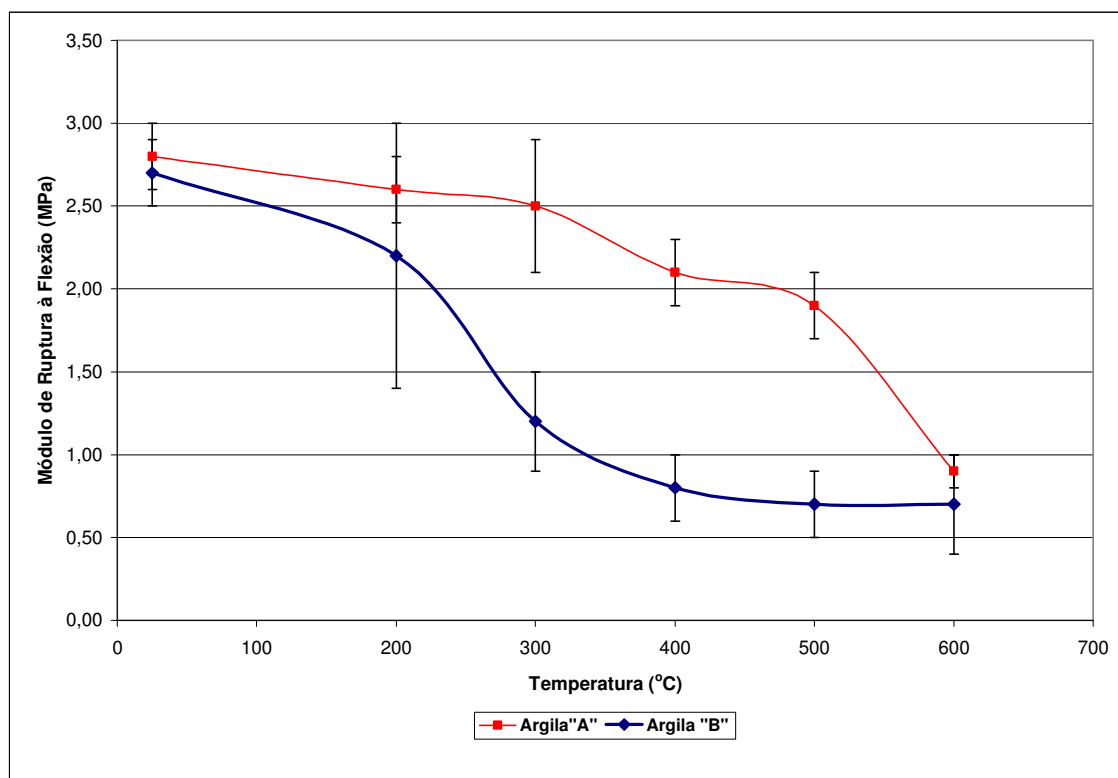


Figura 2 – Valores do módulo de ruptura à flexão a seco das Argilas "A" e "B" em função da temperatura de secagem.

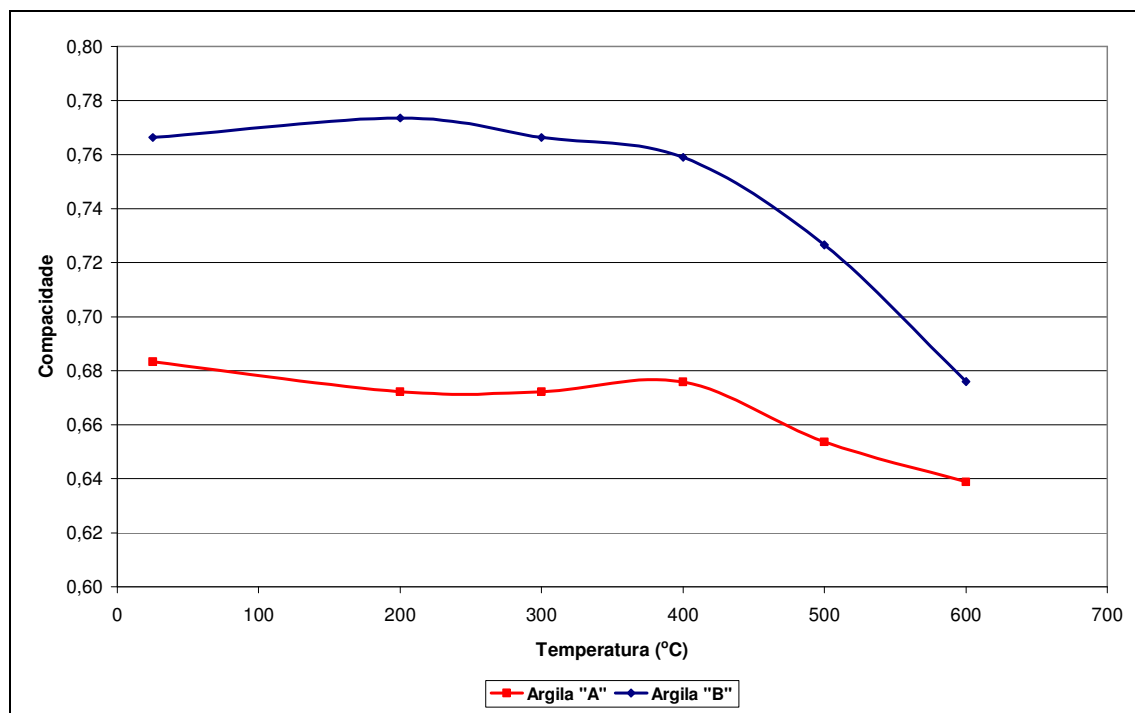


Figura 3 – Valores de compacidade das Argilas "A" e "B" em função da temperatura de secagem.

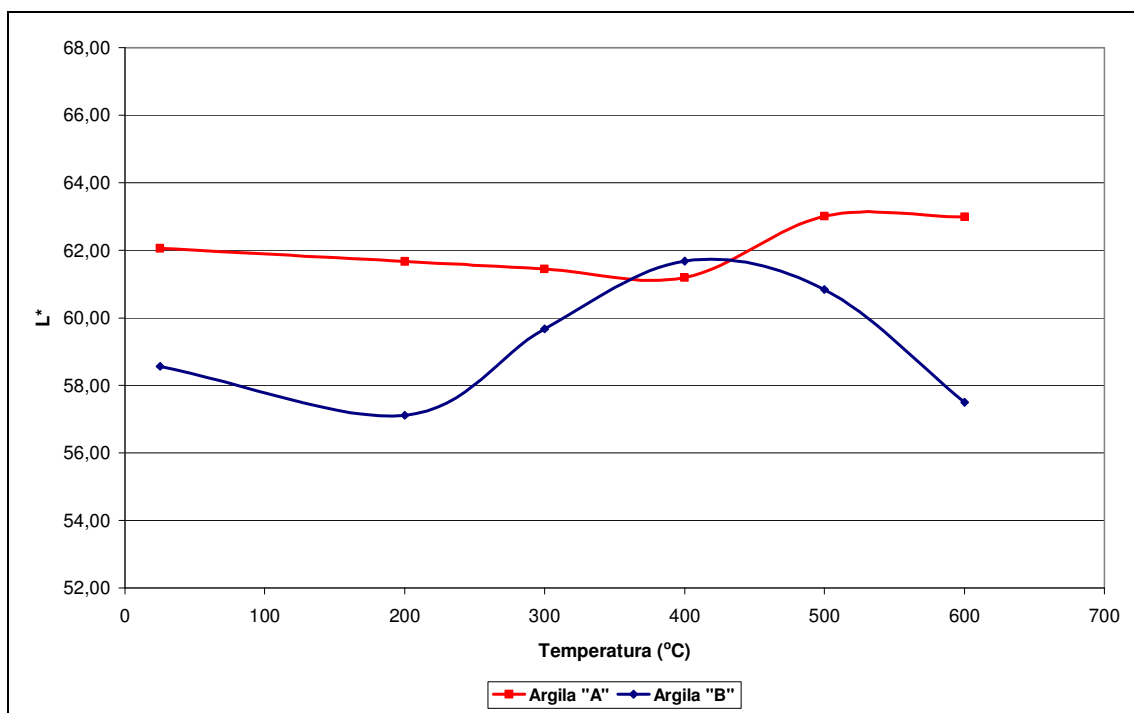


Figura 4 – Valores da coordenada colorimétrica L^* (luminosidade) das Argilas "A" e "B" em função da temperatura de secagem.

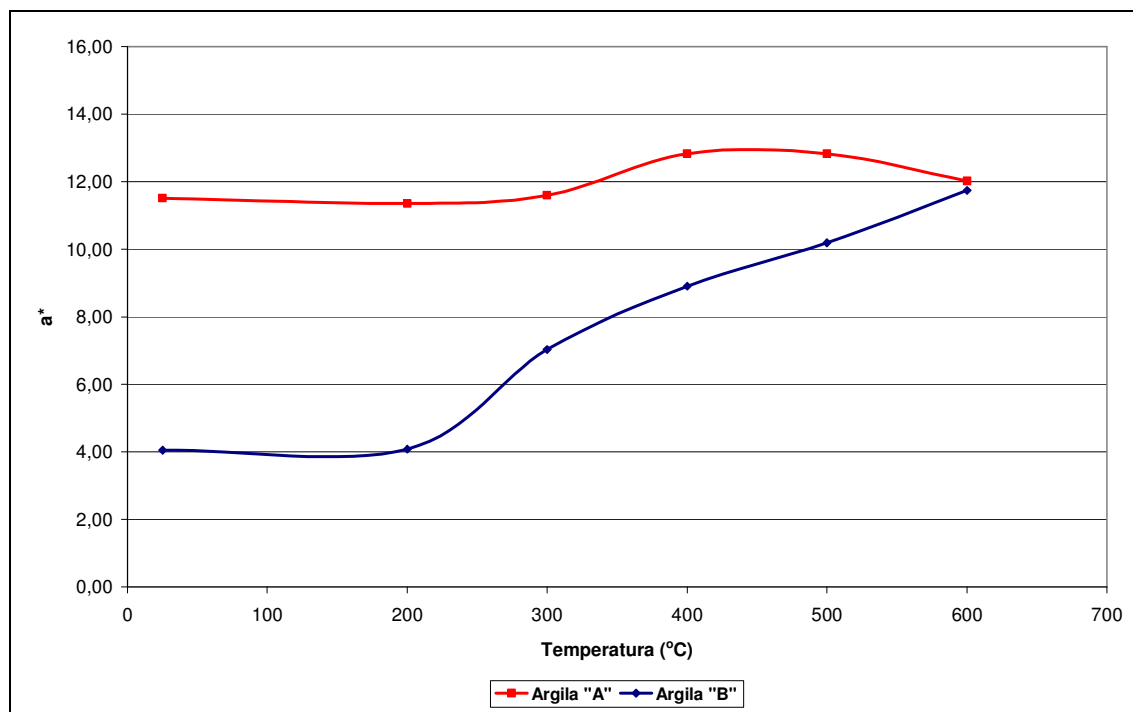


Figura 5 – Valores da coordenada colorimétrica a^* (tonalidade verde-vermelho) das Argilas "A" e "B" em função da temperatura de secagem.

Tabela 1 – Resultados de Dap, MRFs, compacidade e coordenadas colorimétricas L* e a*, das Argilas “A” e “B”, conforme a temperatura.

		Temperatura (°C)					
		25	200	300	400	500	600
Argila “A”	Dap (g/cm ³)	1,84±0,01	1,81±0,01	1,81±0,01	1,82±0,01	1,76±0,01	1,72±0,02
	MRFs (MPa)	2,8±0,2	2,6±0,2	2,5±0,4	2,1±0,2	1,9±0,2	0,9±0,1
	Compacidade	0,68	0,67	0,67	0,68	0,65	0,64
	Densidade real (g/cm ³)	2,693	-	-	-	-	-
	L*	62,06	61,67	61,45	61,20	63,01	62,99
	a*	11,51	11,35	11,59	12,82	12,83	12,02
Argila “B”	Dap (g/cm ³)	2,12±0,02	2,14±0,02	2,12±0,02	2,10±0,01	2,01±0,01	1,87±0,01
	MRFs (MPa)	2,7±0,2	2,1±0,6	1,2±0,3	0,8±0,2	0,7±0,2	0,7±0,3
	Compacidade	0,77	0,77	0,77	0,76	0,73	0,68
	Densidade real (g/cm ³)	2,767	-	-	-	-	-
	L*	58,57	57,11	59,67	61,68	60,84	57,50
	a*	4,05	4,08	7,03	8,90	10,19	11,74

COMENTÁRIOS

A análise dos resultados permite destacar:

- **Argila “A”:** apresentou diminuição dos valores de Dap e MRFs com o aumento da temperatura. A compacidade diminuiu significativamente em temperaturas acima de 400°C. O comportamento da luminosidade e da tonalidade verde-vermelho em relação à temperatura não demonstrou variações significativas.

- **Argila “B”:** apresentou quedas nos valores de Dap e MRFs superiores à Argila “A”. A compacidade também diminuiu significativamente em temperaturas acima de 400°C. As curvas referentes à luminosidade e a tonalidade verde-vermelho apresentaram uma expressiva variação a temperaturas acima de 200°C, devido provavelmente, ao maior teor de material orgânico em sua composição.

CONCLUSÕES

De uma maneira geral, nota-se que acima da temperatura de 200°C as argilas analisadas apresentam variações significativas nas propriedades analisadas. A diminuição dos valores de Dap, MRFs e compacidade, observados conforme o aumento da temperatura pode prejudicar a potencialidade do uso destas argilas na produção de revestimentos cerâmicos por via seca.

São Carlos, 20 de dezembro de 2007.

Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi
Laboratório de Revestimentos Cerâmicos
Departamento de Engenharia de Materiais
Universidade Federal de São Carlos

ANEXO C – ENSAIOS LABORATORIAIS DO IPT

A N E X O C – RESULTADOS DE ENSAIOS CERÂMICOS IPT

PROJETO: “Uso do gás natural para a secagem forçada de argila para placas cerâmicas no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes e cogeração”

CLIENTE: COMGÁS- – COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO

1. INTRODUÇÃO

Hoje, a secagem de argila no Pólo de Santa Gertrudes é feita ao sol, em pátios a céu aberto. Buscando conhecer as características laboratoriais para a implementação de secagem forçada foram coletadas e estudadas amostras de argilas em diferentes teores de umidade, de diferentes posições estratigráficas, em minas da região de Santa Gertrudes.

2. OBJETIVOS

Este estudo experimental tem a finalidade de conhecer o comportamento das argilas secas artificialmente, em diferentes condições de temperatura máxima de secagem, umidades e repouso quando umidificada após secagem e moagem.

3. METODOLOGIAS

A interferência nas propriedades plásticas da argila, causada pela secagem forçada, pode interferir negativamente na força de adesão entre as partículas quando sujeitas à conformação. Essa característica intrínseca de cada argila está relacionada com sua forma, tamanho e, acima de tudo, com as características superficiais das partículas (ou química de superfície). Na prática cerâmica esta propriedade reflete na resistência mecânica das peças e, desta forma, os ensaios foram centrados na determinação da tensão de ruptura a flexão (TRF) ou módulo de ruptura à flexão (MRF), de corpos-de-prova submetidos a diferentes condições de queima e de tempo de descanso após umidificação. A conformação dos corpos-de-prova foi executada em prensa manual com carga de 200 kgf/cm² e dimensões de 50 x 20 x 5 mm.

De forma geral, a Figura 1 ilustra o fluxograma de preparação e ensaios a que as amostras foram submetidas, visando estudar a influência da umidade, das temperaturas

de secagem (natural e forçada), bem como do comportamento quando permanecem umedificadas, após secagem.

Foram efetuados três lotes de ensaios, sendo que a metodologia específica de é discriminada na descrição desses ensaios.

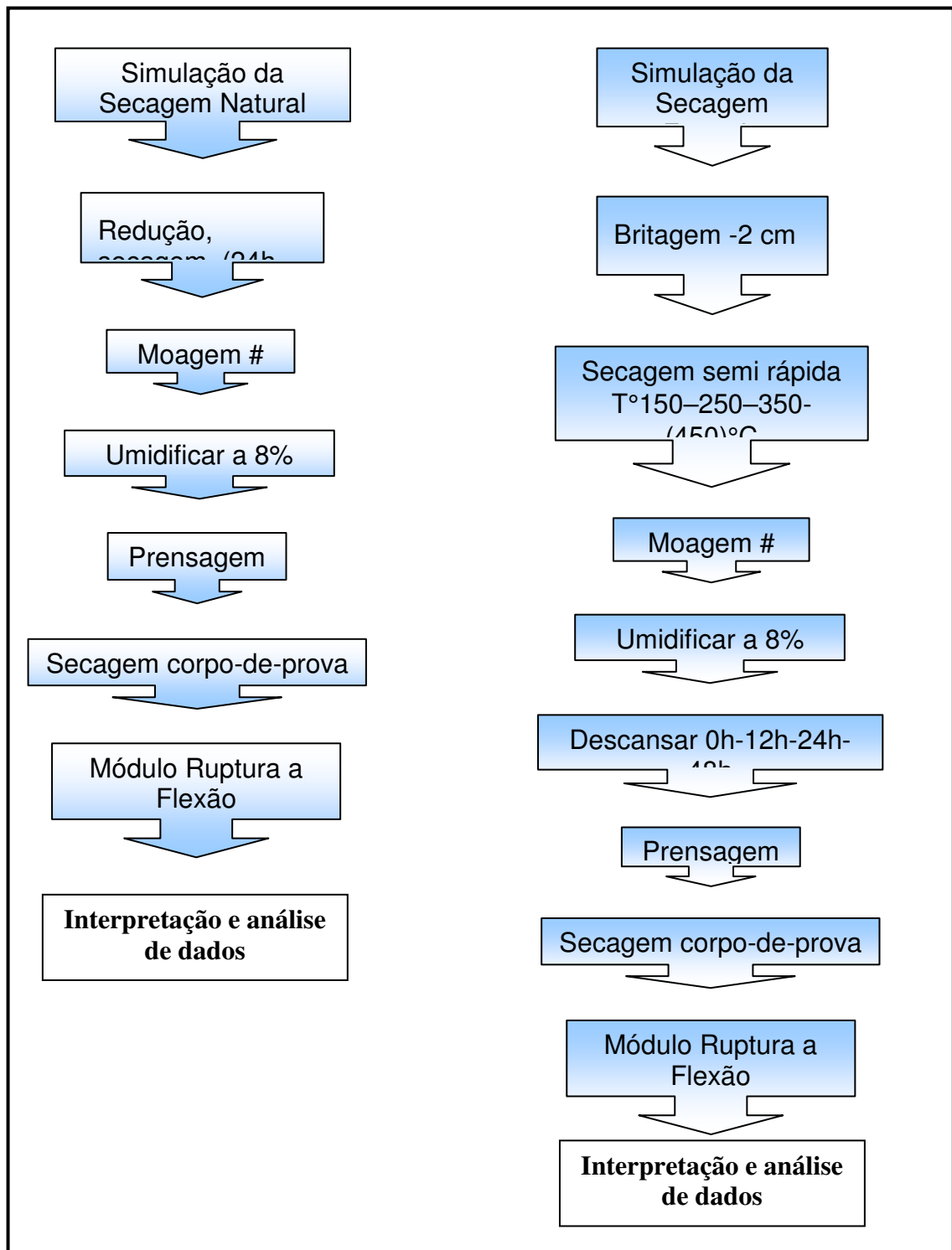


Figura 1 - Fluxograma do método básico dos ensaios

3. TRABALHOS EFETUADOS E RESULTADOS

Os ensaios realizados e os resultados obtidos encontram-se abordados a seguir, organizados de acordo com os lotes ensaiados, denominados de Ensaio A, Ensaio B e Ensaio C

3.1 Ensaio “A”

Primeiramente, foram coletadas duas amostras de argila da mina Tute e duas amostras da mina Partezani, sendo na forma “*in natura*” e na forma seca/homogeneizada, totalizando quatro amostras (+/- 50 Kg de cada), ou seja, duas amostras da frente de lavra codificada como: “Partezani mina” e “Tute mina” (Figura 2) e duas outras amostras foram coletadas da pilha do barracão de armazenamento de argila beneficiada (seca e homogeneizada no pátio de secagem) codificada como “Partezani pilha” (Figura 3) e “Tute pilha”.



Figura 2 – Frente de lavra da Mineração Tute (amostra Tute Mina)



Figura 3 – Armazenamento de argila beneficiada (amostra “Partezani pilha”)

As amostras foram hermeticamente embaladas e lacradas em sacos plásticos e encaminhadas para o laboratório de cerâmica da Seção de Recursos Minerais e Tecnologia Cerâmica (CT-OBRAS/IPT). Em uma alíquota das amostras foi determinada a umidade inicial de cada argila (Tabela 1), por secagem em estufa por 24 horas a 110 °C. As amostras “*in natura*”, ou seja, sem passar por beneficiamento seguiram para uma secagem em estufa a 60 °C, e posterior moagem em almofariz. O material passante na malha 60# foi umidificado em 8%, com repouso por 24 horas, quando seguiu para prensagem e conformação dos corpos-de-prova. Após a prensagem seguiram para estufa por 24 horas (110°C) e então para ensaio do Módulo de Ruptura por Flexão (MRF).

As amostras da frente de lavra foram britadas em fragmentos menores que 2 cm e depois seguiram para a secagem nas temperaturas de 150, 250, 350 e 450 °C, objetivando secá-las ao redor de 6%. Então, as amostras foram moídas e o passante em malha 60 foi umidificado completando em 8% de umidade. Os corpos-de-prova foram

prensados com intervalos de 0, 12, 24 e 48 horas após a umidificação das argilas. Posteriormente, os corpos-de-prova secaram a 110°C por 24 horas e depois seguiram para a determinação do MRF.

Resultados do Ensaio “A”

A Tabela 1 mostra a umidade inicial das amostras: mina- coletadas na frente de lavra; pilha- amostras no barracão de armazenamento. A porcentagem de umidade encontrada nas amostras *in natura* e beneficiada tem valores muito próximos.

Tabela 1-Umidade inicial das amostras Partezani e Tute

Amostra	Umidade %
“Partezani mina”	10,3%
“Partezani pilha”	6,0%
“Tute mina”	10,1%
“Tute pilha”	6,7%

Os Gráficos 1 e 2 ilustram os resultados obtidos para a secagem natural e artificial. No Gráfico 1 observa-se que as temperaturas de 350 e 450 °C , independente do tempo após a umidificação, diminuem substancialmente a resistência mecânica dos corpos-de-prova. As temperaturas de 250 °C, seguindo de 150°C, mostraram melhor desempenho. Por outro lado, o tempo de repouso mostrou oscilação nos resultados, mas, em geral, a tendência é que as peças tornam-se mais fracas com repouso de 24 ou 48h.

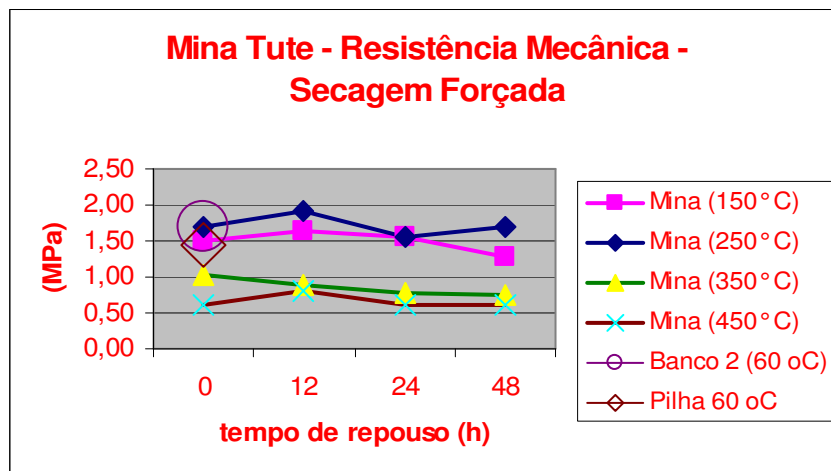


Gráfico 1 – Módulo de ruptura à flexão dos corpos-de-prova submetido às temperaturas de 150, 250, 350 e 450°C e após períodos de descanso após umidificação – Argila Mina “Mina Tute”.

O gráfico 2 mostra que a resistência mecânica diminuiu em todas as temperaturas de secagem em relação à secagem natural, mas podem mostrar alguma recuperação nas propriedades como descanso.

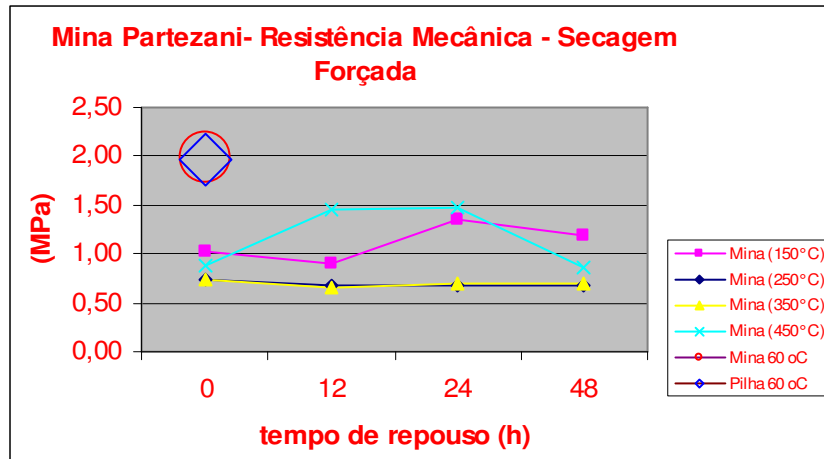


Gráfico 2 – Módulo de ruptura à flexão dos corpos-de-prova submetido às temperaturas de 150, 250, 350 e 450°C e após períodos de descanso após umidificação – Argila Mina “Mina Partezani”.

3.2 Ensaio “B”

Foram coletadas três amostras de argilas nomeadas: Argila Unicer Mina-Base; Argila Unicer Mina-Topo; e Argila Unicer-Pátio. As amostras Mina-Base e Mina-Topo, como denominadas, são originárias da base e do topo da frente de lavra, respectivamente. A Argila Unicer-Pátio trata-se do material proveniente da mesma mina, porém já misturada e disposta no pátio de secagem ao sol.

As amostras foram homogeneizadas, quarteadas, reduzidas manualmente (passante #10 ou -2 mm). Então, foram secas próximas a 6% e, depois, foram moídas manualmente em almofariz de porcelana e passadas em malha 60 (0,250 mm). Daí, foram umidificadas a 8% e homogeneizadas. A seguir, os corpos-de-prova foram conformados a intervalos de 0, 12, 24 e 48 horas após a adição da água. Em seguida, os corpos-de-prova seguiram para secagem em estufa a 110°C por 24 horas e então aplicado o módulo de ruptura a flexão (MRF) por três pontos. Com os dados obtidos no MRF analisou-se a relação da secagem forçada em determinada temperatura e a resistência mecânica das amostras com diferentes taxas de umidade.

Resultados ensaio “B”

O teor de umidade das amostras coletadas encontra-se na Tabela 2. Observa-se maior umidade na seção de topo, relacionada ao material da Formação Corumbataí mostrar-se com ação mais pronunciada do intemperismo, apresentando-se mais branda. A amostra Pátio trata-se de uma mistura das duas anteriores.

Tabela 2 – Umidade inicial das amostras de argilas Unicer

Argila Unicer Mina Base	14,3%
Argila Unicer Mina Topo	29,8%
Argila Unicer Pátio	16,0%

No gráfico 3 observa-se que os corpos-de-prova submetidos às temperaturas de 150, 250 e 350°C tiveram desempenho relativamente próximos quanto ao MRF, com valores medianos. No entanto, como as amostras não foram secas totalmente e a amostra submetida a 350°C preservou maior umidade do que as demais, favorecendo, provavelmente, um bom desempenho.

Quanto ao descanso, os valores do MRF melhoram inicialmente, mas depois o desempenho cai.

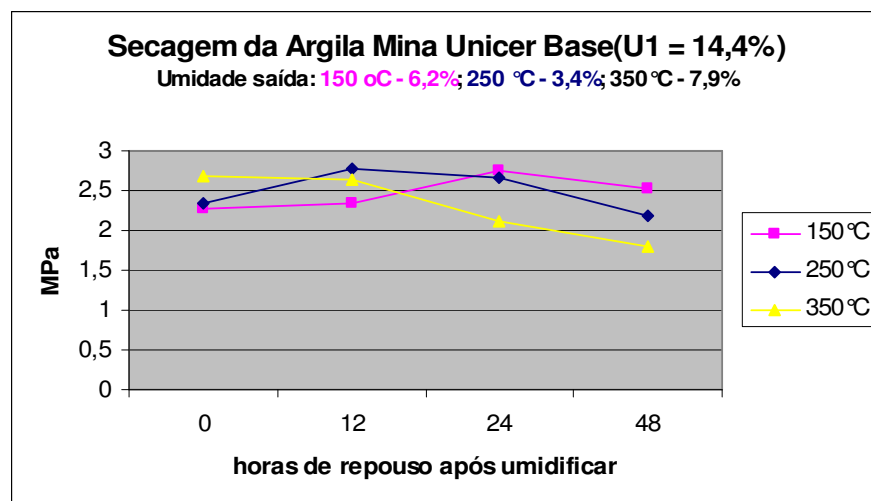


Gráfico 3 – Módulo de ruptura à flexão dos corpos-de-prova submetido às temperaturas de 150, 250 e 350°C e após períodos de descanso após umidificação – Argila Mina Unicer-Base.

No gráfico 4, todos os ensaios com a amostra “Unicer Topo” apresentaram valores altos de MRF. No entanto ressaltam-se dois fatores que contribuíram para o fato: (a) a alta umidade original, que torna a argila mais plástica; e (b) a secagem da amostra foi ineficiente. Ainda assim, a participação da amostra em composição de massa deve auxiliar na melhora do desempenho mecânico das peças.

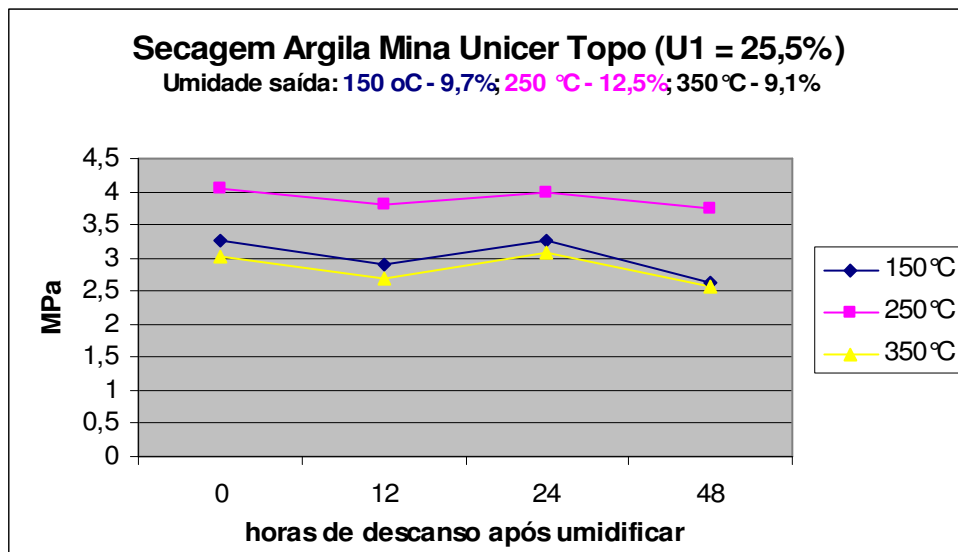


Gráfico 4 – Módulo de ruptura à flexão dos corpos-de-prova submetido às temperaturas de 150, 250 e 350°C e após períodos de descanso após umidificação – Argila Mina Unicer-Topo.

No gráfico 5, as amostras da argila “Unicer Pátio”, que é formada pela mistura das argilas de base e topo da mina, também mostraram bom desempenho quanto ao MRF. As curvas apresentadas neste gráfico tiveram pequena oscilação e diferenças nos três primeiros intervalos de descanso. A temperatura de 250 e 350°C no intervalo de 48 horas de descanso após a umidificação apresentou significativa queda da resistência mecânica.

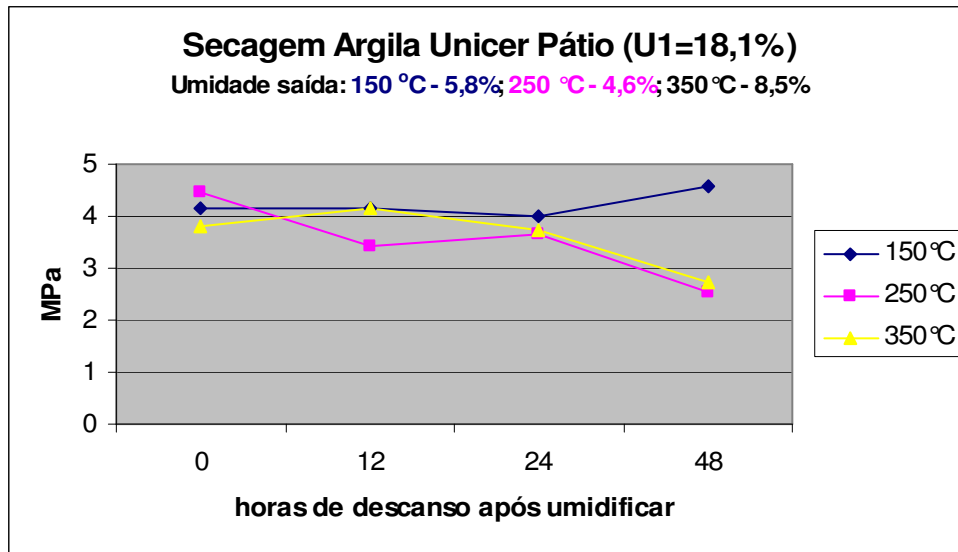


Gráfico 5 – Módulo de ruptura à flexão dos corpos-de-prova submetido às temperaturas de 150, 250 e 350°C e após períodos de descanso após umidificação – Argila Mina Unicer-Pátio.

3.3 Ensaio “C”

O ensaio “C” consistiu na secagem forçada das argilas da Unicer (topo, base e pátio) em estufa elétrica a 110°C até estas apresentarem 0% de umidade. Posteriormente, as amostras foram moídas e adicionada água até 8%. Ainda foi mantido o teor de umidade em e os mesmos intervalos após secagem em 0, 12, 24 e 48 horas.

Resultados do Ensaio “C”

Os resultados do Gráfico “C” mostram que para as argilas “Unicer Pátio” e “Unicer Base” aumentou a resistência mecânica a flexão no intervalo de 12 horas após a umidificação e gradativa queda da resistência no decorrer dos intervalos de 24 e 48 horas. Na argila “Unicer Topo” ocorreu uma discreta diminuição na resistência mecânica nos intervalos após umidificação.

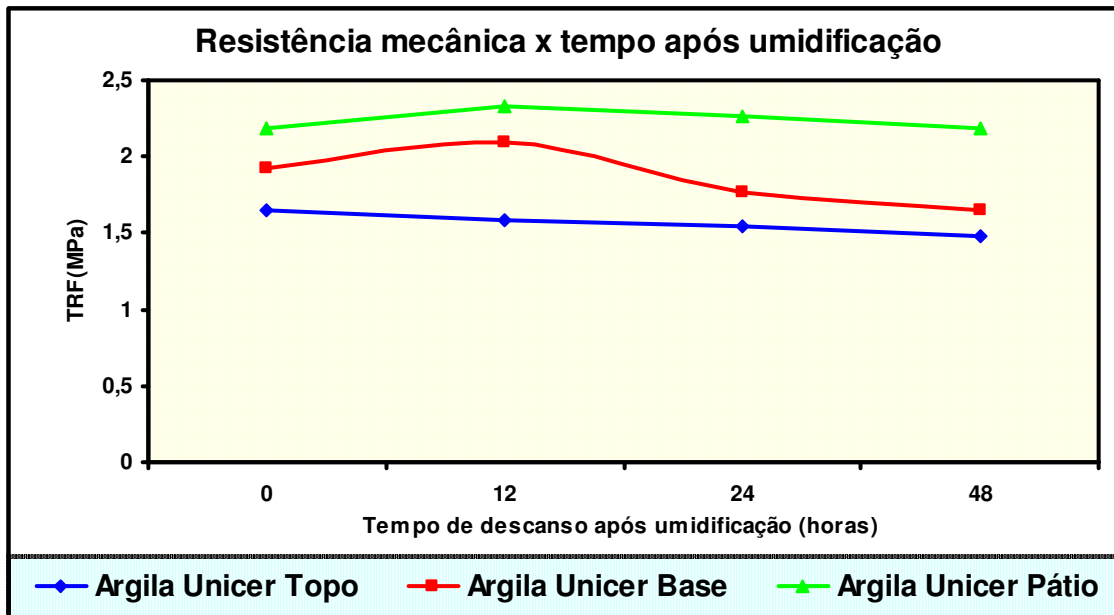


Gráfico 5 - Resistência mecânica x tempo após umidificação do ensaio "C"

4. CONCLUSÃO

Observou-se que as faixas de 150 e 250°C, bem como o intervalo de 0 a 12 horas e apresentaram os maiores valores de resistência mecânica a flexão nos corpos-de-prova. Nas faixas de secagem forçada de 350 a 450°C e intervalos de 24 a 48 horas ocorreram os menores valores de resistência mecânica.

5. EQUIPE TÉCNICA

José Francisco Marciano Motta – Geólogo

André Luiz Baradel Ferreira – Bolsista de Geologia

José Carlos da Silva Portela – Engenheiro Químico

Carolina Del Roveri – Geóloga – Bolsista Unesp/Rio Claro

ANEXO I – Base de dados do ensaio B

Unicer Pátio 150° Secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	4	4,4	4,1	4,6
2	3,9	3,6	3,3	4,4
3	3,9	4,2	3,9	4,4
4	4,7	4,3	4,7	4,9
Média	4,1	4,1	4	4,6
Unicer Pátio 250°C secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	4,6	3,3	3,3	3
2	4,1	3,2	3,1	3,7
3	4,6	3,7	4,1	x
4	4,6	3,5	4,1	3,5
Média	4,5	3,4	3,6	3,4
Unicer Pátio 350°C secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	3,5	3,5	3,7	2,1
2	4	4,4	3,6	2,6
3	3,7	4,1	3,7	3,1
4	4	4,7	4	3,3
Média	3,8	4,2	3,7	2,7
Unicer Topo 150° Secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	3,6	2,8	3,2	2,2
2	3,1	2,8	3,3	2,6
3	3,3	2,9	3	2,7
4	3,1	3	3,4	3,1
Média	3,3	2,9	3,3	2,6
Unicer Topo 250°C secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	3,8	3,3	3,8	3,7
2	4,3	3,9	4,1	3,8
3	4,3	3,6	3,9	3,6
4	3,8	4,3	4,3	3,8
Média	4	3,8	4	3,7
Unicer Topo 350°C secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	3,1	2,5	3,1	2,6
2	3,2	2,6	3,1	2,3
3	2,7	2,9	2,8	2,6
4	3,1	2,7	3,3	2,8
Média	3	2,7	3,1	2,6

ANEXO I/continuação

Unicer Base 150º Secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	1,9	2,5	2,4	2,5
2	2,1	1,8	2,2	2,6
3	2,3	2,5	3,2	2,4
4	2,7	2,5	3,2	2,5
Média	2,3	2,3	2,8	2,5
Unicer Base 250º Secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	2	1,9	2,4	2,4
2	2,4	2,9	2,1	2,2
3	2,6	3	2,7	1,6
4	2,3	3,3	3,4	2,5
Média	2,3	2,8	2,7	2,2
Unicer Base 350º Secagem				
	0 hora	12 horas	24 horas	48 horas
amostra	TRF	TRF	TRF	TRF
1	1,8	2,5	2	2,1
2	2,9	2,9	2,1	1,7
3	2,9	2,5	1,9	1,3
4	3,2	2,7	2,4	2,1
Média	2,7	2,6	2,1	1,8

ANEXO II – base de dados do Ensaio A

Tute Mlna SRM 031/07	P (Mpa)	Larg. (cm)	Espes (cm)	TRF (Mpa)	média
P (Kg)					TRF (Mpa)
3,7	0,362846	2,03	0,625	2,16	
2,7	0,26478	2,03	0,63	1,60	
2,8	0,274586	2,03	0,635	1,69	1,68
2,6	0,254973	2,03	0,625	1,52	
2,9	0,284393	2,03	0,63	1,72	
2,9	0,284393	2,03	0,62	1,66	
2,9	0,284393	2,03	0,62	1,66	
2,9	0,284393	2,03	0,62	1,66	
2,9	0,284393	2,03	0,62	1,66	
2,6	0,254973	2,03	0,62	1,49	

Tute Pilha SRM 032/07	P (Mpa)	Larg. (cm)	Espes (cm)	TRF (Mpa)	Média
P (Kg)					TRF (Mpa)
2,4	0,23536	2,03	0,62	1,38	
2,8	0,274586	2,03	0,62	1,61	
2,8	0,274586	2,03	0,62	1,61	1,45
2,8	0,274586	2,03	0,61	1,56	
2,4	0,23536	2,03	0,62	1,38	
2,5	0,245166	2,03	0,62	1,43	
2,5	0,245166	2,03	0,62	1,43	
2,4	0,23536	2,03	0,62	1,38	
2,4	0,23536	2,03	0,62	1,38	
2,5	0,245166	2,03	0,61	1,39	

Partezani Mina SRM 029/07	P (Mpa)	Larg. (cm)	Espes (cm)	TRF (Mpa)	Média
P (Kg)					TRF (Mpa)
3	0,2942	2,03	0,62	1,72	
3,4	0,333426	2,03	0,62	1,95	
3,2	0,313813	2,03	0,63	1,90	1,78
0	0	2,03	0,645	0,00	
3,2	0,313813	2,03	0,63	1,90	
3,7	0,362846	2,03	0,64	2,26	
3,4	0,333426	2,03	0,625	1,98	
3,5	0,343233	2,03	0,64	2,14	
3,2	0,313813	2,03	0,625	1,87	
3,6	0,353039	2,03	0,625	2,10	

ANEXO II/ continuação

Partezani Pilha SRM 030/07	P (Mpa)	Larg. (cm)	Espes (cm)	TRF (Mpa)	Média
P (Kg)					TRF (Mpa)
2,5	0,245166	2,015	0,655	1,59	
2,6	0,254973	2,015	0,65	1,63	
3	0,2942	2,015	0,63	1,76	1,97
3,2	0,313813	2,015	0,635	1,91	
3,2	0,313813	2,015	0,635	1,91	
3,5	0,343233	2,015	0,645	2,16	
3,4	0,333426	2,015	0,655	2,16	
3,4	0,333426	2,015	0,64	2,06	
3,9	0,382459	2,015	0,66	2,52	
3,2	0,313813	2,015	0,64	1,94	

ANEXO D – PROPOSTAS TÉCNICAS COMERCIAIS DE FORNECEDORES DE EQUIPAMENTOS