UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO COMO POZOLANAS ARTIFICIAIS DE ALTERITAS E
ARGILAS SEDIMENTARES DO MUNICÍPIO DE ITAÚ DE MINAS, MG**

JOSÉ ANTONIO GARBELLOTO DE MATTEO

Orientadora: Dr^a. Lilia Mascarenhas Sant'Agostino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: Prof^a. Dr^a. Lilia Mascarenhas Sant'Agostino

Examinadores: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dr. Tarcisio José Montanheiro

SÃO PAULO
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC

30900017088

**APLICAÇÃO COMO POZOLANAS ARTIFICIAIS DE ALTERITAS E
ARGILAS SEDIMENTARES DO MUNICÍPIO DE ITAÚ DE MINAS, MG.**

José Antonio Garbellotto de Matteo

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lília Mascarenhas Sant'Agostino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

**SÃO PAULO
2005**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Lília Mascarenhas Sant'Agostino, orientação, dedicação, pelo incentivo, amizade e principalmente paciência durante a realização deste trabalho.

Ao Geólogo Deyna Pinho pela grande contribuição na caracterização tecnológica das amostras.

Às secretárias da Pós-Graduação Ana Paula e Magaly, pela amizade e momentos de descontração durante todo o período que antecederam a entrega do trabalho.

À Bibliotecária Maria Laet, pelo auxílio na elaboração das Referencias Bibliográficas.

Aos Engenheiros Newton Martins da Cunha e José Eustáquio Machado, pelos ensinamentos, entusiasmo, discussões sobre o tema, apoio e amizade.

À Votorantim cimentos pela oportunidade.

Agradeço à minha família pelo apoio, compreensão e solidariedade em todos os momentos.

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	2
3 JUSTIFICATIVAS	2
4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA	3
CAPÍTULO II - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	6
CAPÍTULO III - CONSIDERAÇÕES SOBRE ARGILAS	11
3.1 INTRODUÇÃO	11
3.2 DEFINIÇÕES	12
3.2.1 ARGILAS CAULÍNÍICAS	14
3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE POZOLANAS	17
3.3.1 UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS	18
3.3.2 POZOLANAS DE ARGILAS CALCINADAS	20
3.3.3 A REAÇÃO POZOLÂNICA	26
3.4 O CIMENTO PORTLAND	27
CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	31
4.2. ATIVIDADES DE CAMPO	31
4.2.1 SELEÇÃO DE ALVOS PARA PESQUISA	31
4.2.2 DETALHAMENTO DOS ALVOS SELECIONADOS	32
4.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	33
4.3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	34
4.3.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	35
4.3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	35
4.3.4 IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA	35
4.3.5 ANÁLISES TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA (ATD-ATG)	36
4.4 ENSAIOS DE APLICAÇÃO	37
4.4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	37

4.4.2 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL – NBR 5751/92.....	37
4.4.3 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO – NBR 5752/92.....	38
4.4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	39

CAPÍTULO V - RESULTADOS OBTIDOS..... 41

5.1. PROSPECÇÃO REGIONAL.....	41
5.1.1 SELEÇÃO DE ALVOS PARA PESQUISA	41
5.1.2 ALVOS SELECIONADOS	42
5.1.3 – DESCRIÇÃO DO DEPÓSITO	49
5.1.4 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	52
5.1.4.1 Seleção e preparação de amostras	52
5.1.4.2 Composição Química das Amostras Estudadas.....	56
5.1.4.3 Distribuição granulométrica.....	57
5.1.4.4 Composição Mineralógica	58
5.1.4.5 Análises Térmica Diferencial e Termogravimétrica.....	59
5.1.4.6 Composição mineralógica das argilas calcinadas.....	63
5.1.5 ENSAIOS DE APLICAÇÃO	65
5.1.5.1 Índice de atividade pozolânica com cal – NBR 5751/92	65
5.1.5.2 Índice de atividade pozolânica com cimento – NBR 5752/92	69

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES 71

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Mapa de localização da área pesquisada</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.2 - Vista aérea com localização da área selecionada e pesquisada.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 - Mapa geológico da Província Tocantins no sudoeste de Minas Gerais. (Modificado de FERNANDES 2002)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.1 - Organização estrutural dos átomos formadores de folhas tetraédricas e octaédricas; organização de camadas dioctaédricas e trioctaédricas; arranjos em estruturas 1:1 e 2:1, e exemplos de filossilicatos, adaptado de Velde, 1992.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.2 - Diagrama de fase no intemperismo em granitos (MURRAY et. al. 1993)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.4 - Localização das fábricas de cimento no Brasil (adaptado de SNIC, 2004).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5.1 - Localização das áreas prospectadas com potencial para uso como pozolanas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.2 - Localização da Área do Eucalipto e Área da Lagoa.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.3 - Croquis esquemáticos representando os litotipos encontrados em cortes dos taludes da jazida de calcário.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.5 - Mapa Geológico Local – Itaú de Minas - MG</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.5 – Mapa Geológico da Região de Itaú de Minas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.9 - D - Perfil A, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalipto S-N(cota 710 – porção centro esquerda).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.10 - E – Perfil B, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalipto W-E (cota 710m).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.11 - F - Perfil C, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalipto S-N (cota 710 m).</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.12 - Correlação entre óxidos para as amostras da Jazida do Eucalipto</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.13 - Correlação entre óxidos para as amostras da Jazida do Eucalipto</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.14 - Composição química das argilas brancas da área do Eucalipto</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.15 - Curvas de Distribuição Granulométrica Eucalipto</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.16 - Curvas de ATD e ATG para as amostras do tipo A.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.17 - Curvas de ATD e ATG para as amostras do tipo B.....</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 - Aplicações industriais de algumas argilas de Murray, 2000</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 3.2 - Especificações químicas e físicas para materiais pozolânicos</i>	<i>18</i>
<i>(NBR 12653/92 - ABNT 1992a)</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 3.3 - Fases e fórmulas produzidas durante a reação pozolânica.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 3.4 - Composição dos Cimentos Portland (CP) Comum, Composto , Alto Forno e Pozolânico</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4.1 - Composição das argamassas de pozolana e cal</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4.2 - Composição das argamassas com cimento</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 4.3 - Fórmula para a determinação do índice de atividade pozolânica</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 5.1 - Súmula dos critérios de composição química na classificação das argilas.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 5.2 - Composição química das amostras selecionadas para caracterização.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 5.3 - Composição química das amostras de trincheiras</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 5.4 - Análise granulométrica por difração laser para as amostras caracterizadas ...</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5.5 - Identificação mineralógica por difração de raios X das amostras de furos de sondagem.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5.6 - Identificação mineralógica por difração de raios X das amostras de trincheiras</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 5.7 - Temperaturas de perdas de massa para as amostras de furos de sondagem caracterizadas segundo análises de ATD-ATG.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.8 - Temperaturas aplicadas nas amostras para verificação das transformações... </i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5.9 - Transformações de fases minerais na calcinação (identificação-difratometria de raios X)</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5.10 - Ensaios de Índice de Atividade Pozolânica IAP – Amostras de furos de trado</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5.11 - Resultados de ensaios IAP para argilas tipo A,B e C (amostras de trincheiras) calcinadas em laboratório</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 5.12 - Resultados de ensaios IAP para a argila tipo A calcinada em forno industrial (lotes de 5.700 t produzidas).....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 5.13 - Resultados de ensaios para a argila tipo B calcinada em forno industrial (lotes de 4.300 t produzidas)</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 5.14 - Resultados de ensaios para a argila tipo C calcinada em forno industrial (lotes de 900 t produzidas)</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 5.15 - Resistência à compressão da argila tipo B calcinada em escala industrial.....</i>	<i>70</i>

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em investigação realizada na região de Itaú de Minas, MG, visando identificar, avaliar e caracterizar tecnologicamente um depósito de argila para aplicação como aditivo pozolânico na fabricação de cimento.

Os estudos foram balisados por aspectos geológicos e econômicos, estes restringindo a área de investigação a um raio pré-determinado de 50 km do complexo industrial existente na região. A princípio considerou-se a necessidade de ativação dos materiais pesquisados por tratamento térmico e adotou-se que após o tratamento deveriam apresentar coloração similar ao cimento tradicional.

Dos levantamentos efetuados no entorno do empreendimento, foi priorizado para caracterização tecnológica o alvo designado Depósito do Eucalipto, na área da jazida de calcário e que atendia aos requisitos legais e econômicos.

Na etapa de campo, prevaleceram técnicas tradicionais para levantamento de dados,, envolvendo sondagem rotativa, escavação e amostragem em trincheiras e mapeamento superficial. Na etapa de laboratório foram realizadas análises químicas via fluorescência de raio x, que serviram de base na seleção das amostras para caracterização via análise termodiferencial e termogravimétricas, distribuição granulométrica, identificação mineralógica por difração de raios x e ensaios de aplicação.

Com objetivo de dimensionar o recurso, foi realizada uma avaliação volumétrica através de métodos computacionais, levando em consideração, principalmente, a cor das argilas. Estimou-se um montante para uso direto como pozolanas de 478.000 t entre alteritas e argilas sedimentares de colorações claras e 500.000 t entre material coluvionar e alteritas coradas.

As alteritas fazem parte de sericita filitos, que sobrepõem tectonicamente a jazida de calcário. Possuem coloração em tons amarelados e brancos e são constituídas basicamente de quartzo, caulinita e muscovita. Texturalmente são untuosas ao tato, friáveis e de fácil moagem. Quimicamente apresentam características silico-aluminosas (média de 65,5% SiO₂, 20,6% Al₂O₃, 2,3%). Mostram-se reativas com cal (7 Mpa a 7 dias) e cimento (29,7 Mpa a 3 dias) superando o limite mínimo especificado pela norma brasileira. Fazem necessárias misturas controladas para melhor aproveitamento no processamento industrial.

As argilas de provável origem sedimentar ocorrem em pequenas lentes imersas nas alteritas. Possuem coloração em tons cinza a brancos e são constituídas basicamente de caulinita e quartzo. Texturalmente possuem aspecto compacto, com pequenos grânulos de quartzo em sua

matriz, restritas concreções ferruginosas e boa porosidade. Quimicamente apresentam características aluminosas (média de 51,2% SiO_2 , 33,10% Al_2O_3). Mostram-se altamente reativas com cal (20 Mpa) quando calcinadas, constituindo-se no principal minério.

As argilas coluvionares ocorrem no depósito estudado e em grande extensão na região, variando em dezenas de metros em profundidade, sendo que possuem coloração em tons vermelhos a roxo e são constituídas por quartzo, caulinita e gibbsita. Mostram reatividade com cal (9,3 MpA), constituindo uma opção para fabricação de cimentos corados como já produzidos em outra unidade do industrial. Podem ser aproveitadas como corretivos de ferro em substituição parcial do minério de ferro atualmente utilizado.

A caracterização pozolânica foi realizada através da determinação dos índices de atividade pozolânica com cal e com cimento, utilizando amostras calcinadas nas temperaturas 700, 800, 900°C em laboratório e entre 750-800°C em escala industrial. Os resultados obtidos indicaram que esses materiais apresentam grande potencialidade de aplicação no setor cimenteiro.

ABSTRACT

This work presents the results obtained in a mineral research developed in the region of Itaú de Minas, MG, aiming to identify, evaluate the resources and characterize a clay deposit for application as pozzolanic additive in cement manufacture.

The studies have been conducted based on geologic and economic aspects, these confining the investigation area to a 50 km radius from the industrial complex. It was considered the need of materials thermal activation and traditional cement similar color after treatment.

The research indicated a potential target neighboring the calcareous mine, named Eucalipto Deposit, which attained legal and economical requirements and was selected for technological characterization.

For field work traditional techniques were applied to data collection, meaning auger drilling, trench excavation and sampling as well as geological mapping. In the laboratory activities chemical analysis by X ray spectrometry were developed that were used as base for samples selection to be characterized using differential thermal analysis plus differential thermal gravimetric analysis, grain size distribution, mineralogical identification by X ray diffraction and technological application tests.

A preliminary mineral resources evaluation essentially based on the clay color was run applying computational methods. A total amount of 478000 t of materials to be directly applied as pozzolan was defined, comprising light colored alterites and sedimentary clays, plus 500000 t of colluvium material and colored alterites.

The alterites came from sericite phyllites that tectonically overlaid the calcareous orebody. They have white and yellowish colors being constituted mainly by quartz, kaolinite and muscovite. Their texture is unctuous in hand touch; they are friable and easily comminuted. Chemically are composed mainly by silica and alumina (media of 65.5% SiO_2 and 20.6% Al_2O_3). The tested samples showed pozzolanic reactivity with lime (7 Mpa, 7 days) and cement (29.7 Mpa, 3 days) higher than the required Brazilian standardized limits. Some blending should be necessary to reach better profiting in industrial processing.

The clays of probable sedimentary origin occur in small lens being immerse in the alterites body. Their color is grey to white and they are constituted basically by kaolinite and quartz. They have a compact texture with small quartz grains in the clayed matrix as well as few ferruginous concretions; they show a good porosity. Their chemical composition also is silico-aluminous (media 51.2% SiO_2 and 33.1% Al_2O_3). After burning they became highly reactive (20 Mpa) and represent the main ore.

The clays associated with the colluvium are significant in the studied deposit as well as widespread in the all region, where can reach several meters depth, they are reddish to violet

colored and are constituted by quartz, kaolinite and gibbsite. They showed reactivity with lime (9.3 Mpa) and so could be an option for special colored cement manufacturing that is already industrially produced in another place. They can also be profitable for cement raw mix iron grade correction partially substituting the iron ore actually used.

The pozolanic characterization was based on pozolanic activity with lime and cement indexes, and the tests comprised samples burned in the laboratory applying temperatures of 700, 800 and 900°C and also in industrial furnace in the temperature range of 600 till 800 °C. The results indicated a high potential for the cement sector application.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

As argilas e os argilominerais têm grande aplicação em diversos setores da indústria. Devido à grande variedade de argilas, encontradas em ambientes com características geológicas peculiares, a sua aplicação está vinculada a parâmetros físicos, químicos e mineralógicos.

O setor cimenteiro utiliza significativa quantidade de argilas no seu processo de fabricação do clínquer Portland, seja como corretivo químico devido aos óxidos seus componentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O) na composição da farinha ou como adições na forma natural ou ativadas na forma calcinada, quando são conhecidas como **Pozolanas Artificiais**, sendo moídas juntamente com o clínquer ou misturadas ao cimento Portland.

O tratamento térmico das argilas em temperaturas otimizadas permite a ocorrência de transformações mineralógicas que são responsáveis pela reatividade deste material em presença dos hidróxidos de cálcio liberados na moagem do clínquer Portland. Cada tipo de argila, em função de sua gênese aliada ao contexto geológico de sua formação, carrega proporções diferenciadas de argilominerais que certamente terão influência direta no comportamento da sua reatividade.

O primeiro contato do profissional prospector com argilas ou argilominerais de interesse para pozolanas, ainda quando no seu estado natural, são as observações diretas onde alguns aspectos fundamentais como estrutura, textura, composição, consistência e cor permitem uma avaliação preliminar sobre a ocorrência mineral. Por vezes é necessário o uso de trabalhos de investigação sub-superficial, pois algumas ocorrências encontram-se abaixo do capeamento vegetal.

Métodos indiretos (mapas geológicos, mapas estruturais, mapas hidrogeológicos, geomorfológicos, cartas topográficas, Imagens de satélite, etc...) são de igual importância, pois a partir destes os trabalhos de prospecção ficam mais objetivos atendendo ao compromisso de agilidade.

Cada jazida encontrada, deve ser caracterizada tecnologicamente para determinação das condições ideais de processamento e utilização do material componente.

Neste contexto são aqui expostos os trabalhos de pesquisa visando localizar uma jazida de argila com características de pozolanicidade, a ser utilizada pela fábrica de Cimento Itaú que

tem capacidade para 2.000.000 t/ano de clínquer e 2.500.000 t/ano de cimento e que se localiza ao sul do estado de Minas Gerais, próxima da divisa com São Paulo. As investigações conduziram à seleção de uma área de maior favorabilidade a qual foi, então, detalhada quanto à situação geológica através de mapeamento e métodos de investigação superficial, quanto aos recursos minerais contidos através de modelagem com recursos computacionais e quanto à qualidade tecnológica através de ensaios em laboratório.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar tecnologicamente um depósito de argila, priorizado dentre diversos alvos selecionados em uma área de prospecção, para uso como pozolana artificial na indústria cimenteira, buscando otimizar os processos industriais e garantindo a qualidade do produto.

Fez parte do escopo do trabalho a utilização de métodos de observação direta e indireta que habilitaram à descoberta de potenciais depósitos com características para uso como pozolanas. Tais métodos, aliados a fatores logísticos/econômicos, foram aplicados para priorização de um alvo e elaboração do modelo descritivo do depósito mineral com a definição de diferentes litotipos.

No estudo realizado visou-se, ainda, identificar alternativas eficazes de processo para diferentes litotipos de argila encontrados no depósito.

3 JUSTIFICATIVAS

A procura por cimentos de melhores desempenhos e de menores custos fez dos cimentos compostos um dos temas de maior interesse da indústria cimenteira atual. Dentre vários tipos de materiais que podem ser adicionados, dois se consagraram em todo o mundo pelas diversas vantagens: as escórias de alto-forno (sub-produto da fabricação do gusa) e as argilas pozolânicas, tais como cinzas vulcânicas, cinzas volantes e argilas calcinadas etc.

As principais vantagens técnicas desses cimentos aditivados são a maior durabilidade frente a meios agressivos, a menor susceptibilidade a reações expansivas do tipo álcali-agregado e o menor desprendimento de calor durante a hidratação, além da maior impermeabilidade, trabalhabilidade e da resistência mecânica superior a longas idades (acima de 28 dias).

Alguns intermediadores estão importando clínquer de baixo custo e instalando moagens próximas às indústrias siderúrgicas se tornando concorrentes diretos das produtoras de cimento. Além disso, as próprias siderúrgicas poderão futuramente utilizar seu resíduo para fabricar cimento, deixando de fornecê-lo. Neste contexto as cimenteiras devem buscar nas argilas calcinadas alternativas para se tornarem competitivas no mercado.

Do ponto de vista econômico, as vantagens do uso de pozolanas não se limitam à substituição de uma parcela do clínquer por um material, via de regra, de menor custo. Ganhos adicionais são também registrados em função da melhoria da qualidade e do aumento de produtividade (maior quantidade de cimento/tonelada de clínquer) e, para iguais níveis de produção, em decorrência do prolongamento da vida útil dos equipamentos e da própria jazida de calcário.

A pesquisa de jazida de argilas a serem utilizadas como pozolanas envolve procedimentos peculiares de prospecção e de avaliação, com estreita relação com o estudo das características tecnológicas destas argilas que se mostram, junto com a logística da ocorrência, como os parâmetros decisivos para seu aproveitamento.

4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA

A área estudada localiza-se, no bairro Taboca que é situado no perímetro urbano, da cidade de Itaú de Minas, estado de Minas Gerais (Figura 1.1). Encontra-se a 380 km da cidade de Belo Horizonte, capital do estado, e cerca de 380 km da cidade de São Paulo.

O acesso a partir da cidade de Itaú de Minas é feito pela rodovia MG-050 até o km 351 (trevo para Franca, SP), onde o acesso a área é realizado através do parque industrial da Companhia de Cimento Portland Itaú, que pertence ao Grupo Votorantim.

Figura 1.1: Mapa de localização da área pesquisada

A Figura 1.2. mostra uma visão aérea de detalhe do parque industrial que contém a fábrica de cimento e a área estudada no contexto local, orientada segundo São Paulo, Belo Horizonte e Franca.

Figura 1.2 : Vista aérea com localização da área selecionada e pesquisada.

CAPÍTULO II - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

As associações de rochas encontradas no sudoeste do estado de Minas Gerais estão inseridas, segundo Almeida et al. (1981), na Província Orogenética Tocantins, limitada a noroeste e a leste pela Província São Francisco e a sul pela Província Mantiqueira (Figura 2.1).

As principais entidades tectônicas de expressão regional presentes na área estudada são constituídas por complexos gnáissico-migmatíticos arqueanos denominados de complexos Campos Gerais (Barbacena) e Granulítico Varginha, representando o embasamento cristalino da região; seqüências metavulcano-sedimentares tipo *greenstone belt* do Morro do Ferro e de Piumí; unidades alóctones das seqüências metavulcano-sedimentares pertencentes aos grupos Araxá e Lavapés e seqüência metacarbonática-metapelítica do Grupo Bambuí (FERNANDES, 2002).

O Complexo Campos Gerais (CAVALCANTI et. al. 1979; WERNICK ; ARTUR, 1983), ou Complexo Barbacena (HASUI et. al. 1988) da Série Barbacena de Barbosa et. al. (1970), é constituído por granitóides homogêneos ligeiramente foliados, biotita gnaisses bandados e migmatitos. Este Complexo, estimado por Hasui et al. (1988) como de idade arqueana, possui remanescentes de seqüências metavulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt* (Morro de Ferro e Piumí), sendo considerado como hospedeiro dos terrenos granito-*greenstone* no sudoeste do estado de Minas Gerais (FERNANDES, 2002).

O Complexo Varginha (CAVALCANTI et. al. 1979) é formado por ortognaisses tonalíticos a graníticos com metamorfismo de fácies granulito, levemente migmatizados e retrometamorfisados em condições de grau médio a baixo. As rochas supracrustais associadas são paragneisses, quartzitos, micaxistos, mármore, rochas calcio-silicáticas, formações ferríferas bandadas, anfibolitos e metaultrabasitas pertencentes ao Grupo Caconde (HASUI & OLIVEIRA 1984; MORALES ; HASUI, 1999; ZANARDO, 1992; DEL LAMA, 1993). A idade atribuída ao metamorfismo granulítico (SOARES et. al. 1990) é inferida como brasileira a partir de datações Rb/Sr e U/Pb em zircão (OLIVEIRA et. al. 1986).

As seqüências metavulco-sedimentares Fortaleza de Minas, Alpinópolis e Piumí integram o *greenstone belt* Morro do Ferro e Piumí, sendo que a Seqüência Bom Jesus da Penha-Jacuí é considerada como parte de uma seqüência ofiolítica estratigraficamente posicionada na base do Grupo Araxá (SOARES et. al. 1990; SOARES et. al. 1991; ZANARDO et. al. 1992; ROIG, 1993; ZANARDO et. al. 1996b; CARVALHO et. al. 1996).

A Seqüência Fortaleza de Minas (TEIXEIRA et. al. 1987) foi dividida em unidades Morro do Níquel (base) e Morro do Ferro (topo). A Unidade Morro do Níquel é composta por uma sucessão de derrames komatiíticos maciços e diferenciados, com texturas *spinifex*, almofadas e brechas de fluxo. Os sedimentos são químicos, constituídos por formações ferríferas bandadas fácies óxidos e silicatos manganésíferos (BRENNER et. al; FERNANDES et. al. 1997) e sedimentos tufáceos, recobertos por basaltos toleíticos intercalados com metassedimentos. A Unidade Morro do ferro é constituída por sedimentos químicos, clásticos e tufáceos, com rochas vulcânicas subordinadas (FERNANDES, 2002).

A Seqüência Alpinópolis é composta por komatiitos com textura *spinifex* e rochas vulcânicas básicas, formações ferríferas e *cherts*.

A Seqüência Bom Jesus da Penha, considerada como pertencente ao Grupo Araxá, foi subdividida por Teixeira et. al. (1987) em duas unidades, a Unidade Colônia e Unidade Ibituruna. A Unidade Colônia é composta por basaltos ricos em magnésio, rochas ultramáficas, anfibolitos e metassedimentos pelíticos-aluminosos, carbonáticos impuros e margosos. A Unidade Ibituruna é formada por duas sub-unidades sendo a primeira composta por uma assembléia mineral aluminosa, que grada para porções feldspáticas a grafitosas, contendo lentes de *cherts* manganésíferos e a segunda composta por uma assembléia de quartzitos a muscovita-quartzo xistos.

O *greenstone belt* Piumi em sua base (Grupo Inferior, conhecido como Grupo Ribeirão das Araras) é composto essencialmente por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas de composição ultramáfica a máfica e sedimentos de composição máfica subordinados. Tectonicamente sobreposto e discordante ao Grupo Ribeirão das Araras encontram-se o Grupo Paciência e o Grupo Lavapés (Grupo Superior). O Grupo Paciência é formado por sedimentos plataformais (siltitos e quartzitos com intercalações de calcários) e seqüência turbidítica (brechas, grauvas e turbiditos) com intrusões máficas a félsicas (gabros e traquitos). O Grupo Lavapés, sobreposto tectonicamente ao Grupo Paciência, constitui uma associação de sedimentos clásticos (quartzitos e conglomerados), xistos sericíticos, clorita xistos, quartzo xistos, xistos grafitosos carbonatos, formações ferríferas bandadas e corpos ultramáficos com cromititos (SCHRANK, 1979; FRITZSONS et. al.1980; SCHRANK, 1982; MACHADO E SCHRANK, 1989).

A seqüência metavulcano-sedimentar do Grupo Araxá na porção sul do cinturão dobrado Brasília é constituída essencialmente por mica xistos (calco xistos, quartzo xistos, muscovita-clorita xistos, estaurolita xistos e xistos feldspáticos), quartzitos micáceos, metagrauvas, paragnaisses de composição variadas com biotita e hornblenda e

subordinadamente metacalcários calcíticos e/ou dolomíticos, formações ferríferas bandadas, rochas calcio-silicáticas, anfibolitos e metaultramafitos (DARDENNE, 2000).

A presença de lentes de serpentinitos, anfibolitos, talco xistos, com cromita podiforme associadas e tectonicamente intercaladas a mica xistos da base do Grupo Araxá leva a interpretação desta assembléia como uma *melange ofiolítica* (STRIEDER ; NILSON 1992) obductada sobre a margem continental e transportada por *nappes* de oeste para leste (DARDENE, 2000).

Na região de Itaú de Minas, Passos e Fortaleza de Minas, Teixeira e Danni (1978) baseados em critérios estruturais e de processos metamórficos subdividiram o Grupo Araxá em Seqüência Passos (xistos e gnaisses) e Formação Canastra (Seqüência Itaú na base e Seqüência Ventania no topo). Parte da Seqüência Itaú, nomeada por Teixeira (1978) foi incluída na Seqüência Carmo do Rio Claro por Heilbron et al. (1987) de acordo com critérios litológicos (ardósias e metacalcários). Valeriano et. al. (1989) excluíram desta Seqüência o conjunto de ardósias, metassiltitos, metacalcários e metaconglomerados polimíticos considerados, então, como pertencentes ao Grupo Bambuí (Subgrupo Paraopeba – Fácies Samburá). Simões (1995) exclui apenas os mármores e ardósias de Itaú de Minas do Grupo Araxá, caracterizando-os como Grupo Bambuí.

O Grupo Bambuí na região é composto por ardósias, metassiltitos e localmente lentes de metacalcários (Formação Paraopeba) representado localmente pela jazida de calcário da Cia de Cimento Itaú. Metadiamicrititos polimíticos estão presentes nos arredores de Carmo do Rio Claro (SIMÕES ; VALERIANO, 1990).

Na região o domínio autóctone está constituído pelo embasamento pertencente ao Complexo Campos Gerais e pelos metassedimentos do Grupo Bambuí.

Figura 2.1: Mapa geológico da Província Tocantins no sudoeste de Minas Gerais. (Modificado de FERNANDES 2002)

O domínio alóctone, segundo Simões (1995), está representado pela *nappe* de Passos composta pelo Grupo Araxá e pelo sistema de cavalgamento Ilícínia-Piumhi que é composto

pelo Grupo Canastra + embasamento + Grupo Bambuí. Deste modo pode-se considerar a seguinte estratigrafia para a Região de Passos:

- *Grupo Araxá*: Micaxistos granatíferos, comumente com cianita e/ou estauroлита, associados a quartzitos e paragnaisses;
- *Grupo Canastra*: Quartzitos puros e sericíticos, muscovita filitos, epidoto-biotita filito com fenocristais de albita, sericita-clorita-calcifilito com lentes de mármore;
- *Grupo Bambuí*: Filitos/ardósias e mármore;
- *Complexo Campos Gerais*: Gnaisses e migmatitos, ortognaisses granitóides, rochas vulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt*.

Conforme estudos anteriores (DARDENNE, 2000, SIMÕES ; VALERIANO, 1990, TEIXEIRA et. al. 1987, TEIXEIRA ; DANNI, 1978, SIMOES, 1995, HEILBRON et al. 1987, CAVALCANTI et. al. 1979; WERNICK ; ARTUR, 1983, HASUI et. al. 1988, ZANARDO, 1992) na área estudada pode ser reconhecida localmente a presença de um embasamento granito-gnaiss *greenstone* aflorante a sul da cidade de Itaú de Minas. Observa-se que nas porções leucocráticas os granito-gnaisses são compostos basicamente por quartzo e feldspato, apresentando em locais isolados espesso pacote caulizado com grande presença de quartzo livre.

CAPÍTULO III - CONSIDERAÇÕES SOBRE ARGILAS

3.1 INTRODUÇÃO

O perfil de alteração dos terrenos brasileiros em função das condições climáticas favoráveis permitiu o desenvolvimento de camadas argilosas espessas em grande parte do território. Aproveitando este contexto, o Brasil se tornou um dos principais produtores de caulim com grandes reservas estratégicas no Norte do País.

Cada vez mais, através de estudos para uso nos diferentes segmentos da indústria, as argilas vem ganhando espaço em função de sua grande aplicabilidade. Atualmente as argilas e os argilominerais têm uma infinidade de aplicações nas indústrias alimentícias, metalúrgica, de borracha, papel, petrolífera, cerâmica, cimento, farmacêutica, plásticos, engenharia, etc..

Devido à grande variedade encontrada de argilas, o seu uso na indústria depende de suas características físicas, químicas e mineralógicas. Murray (2000) apresentou uma visão geral sobre as aplicações tradicionais para caulim e esmectita (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Aplicações industriais de algumas argilas de Murray, 2000

<i>Indústria</i>	<i>Tipo de Argila</i>	
	<i>Caulim</i>	<i>Esmectita</i>
Abrasivos para polimento	x	x
Adesivos	x	x
Aglomerante de alimento animal		x
Aglomerantes de minérios		x
Aglomerantes para moldes de fundição		x
Agricultura		x
Carga para borracha	x	
Catalisadores	x	x
Clarificação de vinhos e cervejas		x
Clarificação de óleos mineral e vegetal		x
Dessecantes	x	
Fabricação do cimento	x	
Fibra de vidro	x	
Fluido de perfuração		x
Indústria cerâmica	x	x
Indústria de fertilizantes		
Indústria de papel	x	
Indústria farmacêutica	x	x
Inseticidas	x	
Refratários	x	
Sanitários para cães e gatos		x
Tinta	x	x

Entre as grandes aplicações das argilas nos diversos segmentos da indústria, o setor cimenteiro vem se destacando e ganhando expressão principalmente na fabricação de cimentos compostos com adição de pozolanas naturais e artificiais. O uso de argilas calcinadas (pozolanas artificiais) além de melhorar a qualidade do cimento, reduz custo e reduz os impactos ambientais, através da redução de consumo de calcário, e emissão de CO_2 para a atmosfera.

3.2 DEFINIÇÕES

Argila é um material natural, terroso e de granulação fina que geralmente adquire, quando umedecida com água, certa plasticidade; quimicamente as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. O termo “argila” designa, ainda, um grupo de partículas do solo cujas dimensões se encontram em uma faixa determinada de valores (SANTOS, 1992).

Argilomineral são os minerais constituintes característicos das argilas, geralmente cristalinos, quimicamente são silicatos de alumínio hidratados, contendo ferro, cálcio, sódio, potássio e, lítio. (SANTOS, 1992).

De acordo com Saito (2002) o termo argila é confundido com os nomes dos argilominerais que podem compô-la. Adverte que do ponto de vista sedimentológico o termo argila corresponde à fração granulométrica inferior a $4\ \mu\text{m}$ (por vezes $< 2\ \mu\text{m}$), que pode ou não ser composta por argilominerais.

Argilominerais são aluminossilicatos hidratados, da classe dos filossilicatos, caracterizados pela clivagem perfeita (001) e hábito placóide/laminar. A estrutura atômica desses minerais é composta por alternância de duas unidades modulares planares, uma de tetraedros de silício, onde um átomo de Si é coordenado por 4 átomos de O, e outra de octaedros de alumínio, na qual um átomo Al ou Mg é coordenado por 6 átomos de O/OH, que resulta na unidade ou folha também conhecida como gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$, ou brucita - $\text{Mg}(\text{OH})_2$ definido por Moore & Reynolds, 1997 (apud SAITO 2002). Da mesma forma que os tetraedros, os octaedros são mantidos unidos entre si através de fortes ligações covalentes.

Segundo Velde (1992) as variedades ou espécies de argilominerais encontradas na natureza são formadas por substituições de cátions de cargas similares ou distintas em sítios tetraedrais ou octaedrais. Essas substituições determinam o nome do mineral ou grupo, assim como as propriedades físicas e também o limite de estabilidade dos argilominerais em função das características químicas e físicas do meio.

A forma de ocupação dos sítios octaédricos diferencia as estruturas dioctaédricas das trioctaédricas (Figura 3.1). Nos tipos dioctaédricos, a ocupação é realizada por cátions trivalentes, geralmente o Al^{+3} podendo em alguns casos ocorrer substituição por Fe^{+3} . Assim, somente dois, a cada três sítios, são ocupados por um cátion, o que mantém a estrutura neutra. Nos tipos trioctaédricos, todos os sítios são ocupados por cátions bivalentes por vezes, a ocupação desses sítios não ocorre de forma regular, provocando uma descompensação eletrostática, com geração de carga (z). Como consequência, há a necessidade de neutralização dessa carga, que ocorre através da incorporação de cátions interplanares, como, por exemplo, nas estruturas das esmectitas (VELDE, 1992);

Figura 3.1 : Organização estrutural dos átomos formadores de folhas tetraédricas e octaédricas; organização de camadas dioctaédricas e trioctaédricas; arranjos em estruturas 1:1 e 2:1, e exemplos de filossilicatos, adaptado de Velde, 1992 (apud SAITO 2002).

O empilhamento das folhas tetraédricas e octaédricas resulta em dois tipos de empacotamento: 1:1 e 2:1. O primeiro, encontrado por exemplo na estrutura da caulinita, é constituído por uma folha tetraédrica e uma folha octaédrica. No segundo caso, a camada é formada por uma folha octaédrica em meio a duas folhas tetraédricas. Existem ainda, argilominerais, como por exemplo illita/esmectita, que apresentam simultaneamente camadas 2:1 e 1:1, chamados de camadas mistas ou interestratificados (SAITO 2002).

3.2.1 Argilas Cauliniticas

Apesar da grande variabilidade dos solos brasileiros, uma das características peculiares a quase todos é a presença de caulinitas. Embora exista a possibilidade do uso de outros argilominerais, sabe-se que as melhores argilas calcinadas (pozolanas artificiais) para uso como adição no cimento possuem elevados teores de caulinita.

Popularmente conhecido como Caulim, estas argilas ricas no argilomineral caulinita (do chinês Kao-ling que significa colina alta) possui uma estrutura 1:1 (Figura 3.1). É um filossilicato de alumínio de composição $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ que exibe cor branca a acinzentada ou amarelada e apresenta clivagem basal perfeita. A composição ideal da caulinita é representada em óxidos por 46% SiO_2 , 39,50% Al_2O_3 e 13,96% H_2O (GIESE, 1988).

Para os geólogos o termo caulim corresponde a uma rocha composta essencialmente por argilomineral do grupo da caulinita (caulinita, dickita, nacrita e haloisita), contendo baixíssimo teor em ferro, alto teor em alumínio e normalmente cores clara, e podendo apresentar quantidades significativas de quartzo. Podem também ocorrer associados filossilicatos (esmectita, illita e cloritas) ou hidróxidos de alumínio (gibbsita, diásporo, boehmita), porém apenas em quantidade de traços (DUARTE, 1995).

No contexto mundial de recursos minerais, o Brasil ocupa a primeira posição com 7,2 bilhões t cubadas de caulim (DNPM, 2004), destacando-se pela qualidade de seus recursos concentrados na região Norte do país. Seu principal uso está voltado para a indústria de papel, seguida das indústrias cerâmica e de refratários, e em menor proporção para tintas, borracha, plásticos, polímeros, matérias de construção, fertilizantes e indústria farmacêutica e petroquímica, de inseticidas e de cimento.

O caulinita, principal mineral prospectado para produção de argilas pozolânicas, ocorre em depósitos de origem intempérica (residual), hidrotermal, sedimentar e diagenética.

Os depósitos residuais e hidrotermais são classificados como primários e os de ocorrências sedimentares como secundários. Caulins primários são formados *in situ* pela alteração de rochas cristalinas de composição ácida tais como granitos e riolitos.

Os minerais primários mais comuns que dão origem ao mineral caulinita são os feldspatos e muscovitas. A transformação destes silicatos em caulinita é decorrente do intemperismo ou alteração hidrotermal que libera o potássio e sílica.

O intemperismo promove intensa lixiviação de rochas ricas em silício e alumínio e a remoção em meio ácido de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+2} , K^{+2} e Fe^{+3} , bem como parte da sílica. As condições favoráveis são precipitação excedendo a evaporação, intensa percolação de água favorecida por alta permeabilidade da rocha matriz e alta concentração de alumínio. Requer água levemente ácida contendo ácido carbônico e rocha matriz com alta concentração de alumínio e sílica, tais como as portadoras de filossilicatos e feldspatos, especialmente plagioclásios (DUARTE 1995).

Para Bristow (1987) a caulinitização se desenvolve com máxima intensidade em clima tropical quente e úmido. Esta condição junto aos tempo e estabilidade tectônica são responsáveis pela formação de caulinitas de origem intempérica.

O processo consiste essencialmente em hidrólise dos alumino-silicatos e remoção dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos:

O potássio pode ser perdido em solução ou formar illita ao invés de caulinita. Granitos e riolitos intemperizados evoluem para caulinita e quartzo sob condições favoráveis de altas chuvas, rápidas drenagens, temperatura e clima tropical as quais contribuem para a solubilidade de seus componentes. Os componentes mais resistentes são a alumina e sílica enquanto os elementos alcalinos e alcalinos terrosos possuem maior mobilidade.

O diagrama abaixo (Figura 3.2) indica a alteração dos minerais (1) mica e (2) feldspatos nos sucessivos estágios do intemperismo, onde é indicada a reação comum (3) em climas tropicais em que o intemperismo mais intenso remove a sílica e forma gibbsita. Plagioclásios são relativamente instáveis e se alteram para feldspatos potássicos ou muscovitas (MURRAY et. al. 1993).

Figura 3.2: - Diagrama de fase no intemperismo em granitos (MURRAY et. al. 1993)

A origem hidrotermal pode levar à formação de caulinitas através da ação de soluções aquosas quentes, sendo o calor fornecido por grandes massas intrusivas, muitas vezes devido a concentrações de elementos radiogênicos (BRISTOW, 1987).

A origem sedimentar é resultado de transporte e deposição de material argiloso já sob a forma de caulinita. Pode ter sido originado pela alteração de rochas por processos intempéricos, processos subquáticos ou pela combinação destes (PATTERSON ; MURRAY, 1984).

Na origem diagenética pode ocorrer caulinização e formação de "*flint-clay*" ou "*semi-flint clay*" por ressilificação e deferrificação da bauxitas sob influência de soluções percolantes em coberturas areno-argilosas, segundo Nicolas et.al. 1969 (apud DUARTE 1995). Argilas *flint* podem igualmente ser originadas a partir de sedimentos depositados em zonas lacustres ou pantanosas. Neste segundo caso o caulim seria derivado de acumulações de argilominerais submetidos a transformações diagenéticas, ocorrendo cristalização ou recristalização da caulinita segundo Keller, 1970 (apud DUARTE 1995).

Na região do Pará são observadas lentes de argila do tipo “semi flint” intercaladas em areias argilosas que teriam sido originadas por transformação de sedimentos essencialmente argilosos, acumulados em pequenas depressões em ambiente pantanoso ou lacustre rico em vegetação. Este fenômeno teria ocorrido em função de ácidos orgânicos, por degradação e decomposição dos minerais originais. Condições ácidas e ambiente levemente redutor teriam promovido a lixiviação do ferro e dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos. O silício e o alumínio, menos móveis, se combinariam numa fase amorfa evoluindo para caulinita (DUARTE, 1995).

3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE POZOLANAS

Segundo o U.S. Bureau of Reclamation 1956 (apud SANTOS, 1992), pozolanas são materiais naturais ou artificiais que, sendo adicionados a argamassas ou concretos, produzem um produto de baixo custo com características tecnológicas superiores aos desses produtos sem a adição. Materiais pozolânicos são utilizados em argamassas e concretos contendo cimento há cerca de 20 séculos. Seu uso é especialmente vantajoso em grandes estruturas maciças de concreto, tais como barragens e instalações portuárias sendo que seu emprego em concreto estrutural vem aumentando rapidamente.

A definição e classificação de materiais pozolânicos no Brasil é estabelecida pela norma NBR12653/92 (ABNT 1992a):

“Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Mielenz *et al.* 1951 (apud SANTOS 1992) propuseram uma classificação das pozolanas naturais por atividade-tipo, colocando os materiais em ordem decrescente de reatividade química:

- (1) vidro vulcânico > (2) opala >
- (3) argilas (caulinita>montmorillonita>illita>vermiculita>paligorskita) > (4) zeólita >
- (5) óxidos hidratados de alumínio > (6) não pozolânicos.

Existem diferentes tipos de pozolanas, classificadas de acordo com a sua natureza e as suas características (SAITO 2002) como segue abaixo.

As características físicas e químicas necessárias para que um material seja uma pozolana são definidas pela NBR 12653/92 (ABNT 1992a), conforme indicado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Especificações químicas e físicas para materiais pozolânicos (NBR 12653/92 - ABNT 1992a).

	Propriedades	Classe do material pozolânico		
		N ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	E ⁽³⁾
Especificações Químicas	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%mín.)	70	70	50
	SO_3 (%máx.)	4,0	5,0	5,0
	Teor de umidade (% máx.)	3,0	3,0	3,0
	Perda ao fogo (% máx.)	10,0	6,0	6,0
	Álcalis disponíveis em Na_2O (% máx.)	1,5	1,5	1,5
	Material retido na peneira 45 μm (% máx.)	34	34	34
Especificações Físicas	Índice de atividade pozolânica			
	com cimento aos 28 dias em relação ao controle (% mín.)	75	75	75
	com o cal aos 7 dias (MPa)	6,0	6,0	6,0
	água requerida (% máx)	115	110	110

- (1) Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis nesta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, *cherts* silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- (2) Classe C: Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas, que obedece aos requisitos aplicáveis nesta norma.
- (3) Classe E: Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta norma.

3.3.1 Utilização de Pozolanas

Segundo Malhotra & Mehta (1996) como a reação pozolânica é lenta, a taxa de liberação de calor é lenta também. Esse fato impede a fissuração térmica da pasta de cimento durante a

cura e, conseqüentemente, a resistência mecânica é aumentada, embora seu desenvolvimento ocorra em idades superiores às de um cimento Portland comum.

Os produtos da reação pozolânica são bastante eficientes no preenchimento de espaços capilares grandes (refinamento de poros e de grãos), melhorando, assim, a impermeabilidade do sistema, além de contribuir para o aumento da durabilidade da pasta de cimento endurecida frente a ataques químicos e melhorar a resistência mecânica (MEHTA 1994; MALHOTRA & MEHTA 1996).

Na hidratação do cimento podem ser liberados até 20% de hidróxido de cálcio, elemento susceptível a reações álcalis/agregado e ataques de sulfatos. O uso de argilas calcinadas em temperaturas ideais favorece a amorfização de aluminossilicatos que se tornam reativos quando em contato com o hidróxido de cálcio, resultando na formação de monossilicatos com características cimentícias. Para pozolanas obtidas a partir de argilas calcinadas a formação de monossilicatos depende do potencial de silicatos (C2S e C3S) do clínquer e da velocidade de liberação de hidróxidos a partir destes silicatos quando hidratados (reatividade do clínquer, tamanho dos cristais, distribuição e amorfização).

Cimentos com adição de pozolanas de argilas calcinadas apresentam resistências iniciais mais elevadas do que com uso de escórias de alto forno ou pozolanas de cinzas volantes. Para reação álcalis/agregado as pozolanas de argilas calcinadas são mais eficientes do que escórias, para inibição desta reação é necessário o dobro da quantidade de escória para produzir o mesmo efeito.

Na composição do concreto, o cimento Portland é o componente de mais alto custo. Por outro lado, muito dos materiais cimentícios e pozolânicos em uso atual são subprodutos ou resíduos industriais, que necessitam de pouco ou nenhum gasto energético para serem adicionados ao clínquer para a fabricação do cimento. Quando usadas como substituto parcial do cimento, mundialmente em taxas entre 20 a 60% da massa do cimento, as adições “minerais” podem resultar numa enorme economia de energia (MALHOTRA & MEHTA 1996).

O combustível e a energia elétrica são responsáveis por 50 e 15%, respectivamente, do custo total da produção do cimento nas indústrias brasileiras, enquanto que as matérias-primas e demais gastos são menos impactantes na composição do custo final, como evidenciado no contexto de 1999 quando, em função dos aumentos tarifários da energia elétrica (35%) e aumento dos derivados de petróleo (225%), o custo da produção de cimento sofreu um aumento de 30% em São Paulo segundo Bocchili 2001 (apud SAITO 2002).

Além da redução do custo de produção, a substituição de uma parcela do clínquer por material pozolânico permite ganhos adicionais em função do aumento de produtividade para iguais níveis de produção (maior quantidade de cimento/tonelada de clínquer), além de prolongar a vida útil dos equipamentos e da própria jazida de calcário (ZAMPIERI 1993).

Algumas pozolanas contribuem significativamente para o aumento de produção dos moinhos de cimento, substituindo ou funcionando como aditivo para aumentar a capacidade da moagem. O inconveniente é que no caso de moagem conjunta não se aproveita todo esse potencial de aumento de produtividade devido a diferença de moabilidade dos materiais ou seja existe menor controle granulométrico. A melhor situação para uso de pozolanas a partir de argilas calcinadas seria utilizando a moagem separada.

Segundo Malhotra & Mehta 1996; Yamamoto et al. 1997 e Sabir et al. 2001 (apud SAITO 2002) o total de material pozolânico e subprodutos cimentícios gerados anualmente pelas usinas termoelétricas e siderúrgicas excede 500 milhões t. Muitos desses produtos contêm elementos tóxicos, que podem ser danosos à saúde humana se não forem dispostos de maneira segura. As indústrias do cimento e do concreto são veículos preferidos para disposição de subprodutos “minerais” porque a maioria dos metais prejudiciais pode ser incorporado seguramente nos produtos de hidratação de cimento. É importante observar que os materiais que contêm elementos tóxicos devem passar por um teste de lixiviação de tal forma que atenda os limites de norma da NBR 10004.

Para cada tonelada de cimento Portland fabricado são lançados na atmosfera 1,25 t de CO₂, referentes à queima de combustível (0,75 t) e à calcinação de carbonatos (0,50 t). Em 1997, a indústria de cimento foi responsável por 7 a 8% da emissão de CO₂ na atmosfera, derivada de atividades antrópicas.

3.3.2 Pozolanas de argilas calcinadas

No Brasil, desde o início da fabricação de cimento pozolânico, as indústrias utilizam-se de pozolanas de argilas calcinadas e de cinzas volantes. A exploração comercial de pozolanas naturais sem ativação térmica ocorre em pequena escala no Nordeste do país, resultado do uso de terras diatomáceas.

O termo pozolana também pode ser atribuído aos materiais inorgânicos, tanto naturais como artificiais, que reagem com o hidróxido de cálcio em meio aquoso (hidratação do clínquer do cimento Portland) (MASSAZZA, 2001).

A atividade pozolânica de argilas calcinadas é estritamente dependente de uma série de fatores que devem ser considerados. A composição mineralógica, a cristalinidade e a temperatura ótima de calcinação são algumas das importantes variáveis que devem ser determinadas durante a caracterização de uma pozolana.

Existem pozolanas cuja reatividade pode ser afetada pelo tipo de combustível utilizado. Alguns combustíveis sólidos podem prejudicar a transformação de caulinitas em metacaulinitas. A temperatura de 600°C pode não ser suficiente para manter a chama acesa. Argilas contendo illita são as melhores para se trabalhar com combustíveis sólidos com baixo teor de voláteis.

Deve-se tomar cuidado com argilas com alto teor de carbonato, pois podem levar a interpretação errônea na determinação do teor de caulinita.

O tratamento térmico de argilominerais provoca o desarranjo cristalino a partir da desidroxilação, que pode ocorrer desde 550°C, no caso de caulinita, até temperaturas superiores a 900°C para illitas.

A desidroxilação de argilas caulínicas – perda da água estrutural - ocorre entre 550 e 700°C, quando se forma a metacaulinita (He et al. 1994), porém, somente entre 650 e 850°C estas argilas apresentam propriedades pozolânicas interessantes, pois nesse intervalo é produzida grande quantidade de material amorfo (AMBROISE et al. 1992).

A calcinação promove a transformação do argilomineral caulinita presente nas argilas em um composto de sílica e alumina com estrutura amorfa, chamado de metacaulinita, que se forma graças à perda da hidroxila na forma de água à temperaturas de 550 a 900°C.

Durante o processo de ativação de argilas por calcinação ocorrem importantes transformações térmicas. Essas modificações podem estar associadas às perdas de água adsorvida, em temperaturas mais baixas (~100°C) e água estrutural (hidroxila) em temperaturas superiores a 500°C e geração de fundidos e formação de novas fases sintéticas em temperaturas mais elevadas. Essas transformações podem ser observadas em curvas de ATG (análise termogravimétrica), nas quais são observadas as perdas de massa durante as reações térmicas e ATD (análise termodiferencial), onde se verifica a troca energética pelas reações endo e exotérmicas. Quando ocorrem transformações endo ou exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos (ENDO deflexão para baixo e EXO deflexão para cima) na curva termodiferencial ou termograma (Figura 3.3).

Figura 3.3: Curvas de ATD dos argilominerais caulinita, montmorillonita e illita (extraído de Souza 1992)

No caso da caulinita, a primeira deflexão representa a sua desidratação, a segunda deflexão representa a sua desestruturação, pela perda da hidroxila (OH^-) e, conseqüentemente, a formação de uma substância amorfa, a metacaulinita, e a terceira deflexão representa a formação de uma nova fase sintética, a mulita.

Na montmorillonita, como na caulinita, a primeira deflexão representa a perda de água (adsorção), já a segunda deflexão relativa à perda de OH^- pode variar de posição dependendo da quantidade de ferro na sua estrutura, pois este funciona como fundente diminuindo a temperatura de desarranjo estrutural. O intervalo de ativação térmica da montmorillonita pobre em ferro corresponde de 700 a 850°C e para a montmorillonita rica em ferro de 500 a 850°C.

A illita, como as caulinita e montmorillonita, possui a primeira deflexão como sendo a perda de água e a segunda deflexão como sendo o desarranjo estrutural, tendo como intervalo de ativação térmica de 550 a 850°C.

Para a ativação térmica da argila é fundamental a utilização dos termogramas visando a determinação das temperaturas de calcinação. Essas temperaturas "ótimas" conferem ao

material pozzolânico uma situação que concilia dois fatores muito importantes na avaliação: maior atividade pozzolânica com a menor temperatura de calcinação (fator tecnológico e fator econômico).

Essa temperatura "ótima" de calcinação corresponde, para qualquer argilomineral, a um intervalo entre a desidroxilação e a formação de novas fases cristalinas, ou seja, uma faixa de onde existiriam materiais desestruturados (amorfo). Essa temperatura varia de acordo com o tipo de argilomineral.

Montanheiro (1999), investigando os materiais pozzolânicos da Bacia do Paraná, considerou todas as possíveis fontes geológicas para ocorrência destes materiais. Como resultado, confirmou as propriedades pozzolânicas para terras diatomáceas, arenitos opalinos, argilas e basaltos, sendo estes dois últimos com grande potencial devido a abundância. Reforça que as rochas sedimentares argilosas, essencialmente cauliniticas, quando ativadas por calcinação, oferecem as melhores respostas aos ensaios de atividade pozzolana com cal se tornando alvos potenciais para prospecção de materiais pozzolânicos na Bacia do Paraná.

Segundo Pera (2001), o comportamento dos argilominerais durante o aquecimento depende da estrutura, tamanho dos cristais e da cristalinidade do material. Depois da eliminação da água adsorvida, que acontece por volta de 100°C, a caulinita perde hidroxila de sua estrutura a cerca de 550°C. A natureza do produto da desidroxilação da caulinita pode ser uma mistura amorfa de sílica e alumina, apresentando estrutura residual da caulinita em alguns casos, esse produto é denominado metacaulinita. Sob temperaturas superiores à 900°C, a metacaulinita passa a compor uma mistura de novas fases cristalinas constituída de sílica livre e mulita.

Zampiere (1989) realizou estudos experimentais sintetizando parte dos conhecimentos desenvolvidos no campo das pozzolanas e argilas calcinadas e buscando as modificações mineralógicas que ocorrem em diferentes argilominerais quando submetidos à ativação térmica. Realizou posterior caracterização dos materiais calcinados quanto à atividade pozzolânica, reconhecendo e analisando as fases geradas a partir da reação pozzolânica entre as argilas calcinadas e hidróxido de cálcio, em meio alcalino, como a formação de aluminatos, silicatos e alumino-silicatos de cálcio hidratados. Concluiu também que as argilas cauliniticas mal cristalizadas são as mais propícias à fabricação de pozzolana, sendo que a reatividade dos argilominerais cauliniticos está intimamente relacionada com a geração de metacaulinita após ativação térmica. As argilas aluminosas, constituídas de uma mistura de caulinita e gibbsita, apresentaram uma maior refratariedade, deslocando a temperatura de ativação térmica para valores mais elevados, mas ainda gerando um

argilas caulínicas mal cristalizadas são as mais propícias à fabricação de pozolana, sendo que a reatividade dos argilominerais caulínicos está intimamente relacionada com a geração de metacaulinita após ativação térmica. As argilas aluminosas, constituídas de uma mistura de caulinita e gibbsita, apresentaram uma maior refratariedade, deslocando a temperatura de ativação térmica para valores mais elevados, mas ainda gerando um material com atividade pozolânica considerável. As gibbsitas puras revelaram-se totalmente inadequadas como material pozolânico.

HE et al. (1994) estudaram três minerais em diferentes temperaturas de calcinação e a interferência dos mesmos na atividade pozolânica. O caulim possui como principal componente a caulinita de baixa cristalinidade e foi calcinado a 550, 650, 800 e 950°C por 100 minutos. Esse material foi misturado com cal e cimento Portland para o estudo da reação pozolânica, tendo sido também estudadas a sua composição química, a resistência à compressão e a solubilidade ácida, antes e depois da mistura com cal e cimento. A ótima temperatura de calcinação foi 550°C, correspondendo ao ponto culminante da desidroxilação da caulinita.

HE et al. (1995) calcinaram a illita a 650, 790 e 930°C por 100 minutos, sendo que o método e a investigação foram os mesmos que os aplicados para a caulinita, HE et al. (1994), sendo que o ensaio de resistência à compressão, após a mistura com cimento, foi realizado depois de 2, 7, 28 e 91 dias de reação (cura), tendo revelado que a illita possui baixa atividade pozolânica. A temperatura de calcinação ótima para a illita foi de 930°C, sendo que a 650°C a sua desidroxilação não foi muito significativa, enquanto que a 790°C houve uma considerável ativação, mas que ainda não a qualificou como pozolana.

Para materiais com alto teor de caulinita, não é necessário transformar toda caulinita em metacaulinita pois a quantidade de hidróxido de cálcio gerado pode não ser suficiente para absorver toda metacaulinita formada, resultando em perdas de energia. Deve-se levar em consideração também os outros argilominerais contidos nas argilas.

Pozolanas calcinadas reduzem o calor de hidratação do cimento em função do efeito diluição e não necessariamente em função de reações resultantes na adição. A grande vantagem do uso de pozolanas está na reação dos aluminossilicatos com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação, favorecendo a formação de monossilicados de cálcio com características cimentícias.

Morsy et al. (1997) estudando a ativação térmica de argilas caulínicas (a 850°C por 120 minutos) concluiu que a substituição de cimento por caulinita ativada repercute no retardamento da pega inicial e final da pasta. A condutividade elétrica e a porosidade

Fava et al. (1999) estudaram amostras do solo do Distrito Federal, com o objetivo de caracterizar e quantificar argilo-minerais a serem utilizados como material pozolânico pela indústria de cimento. Essa quantificação foi efetuada através de comparação da porcentagem de OH, determinada através de análises termogravimétricas, e difração de raios X, a partir de dados estequiométricos desses argilo-minerais. A metodologia empregada mostrou-se extremamente eficiente na delimitação das áreas do Cerrado para exploração de argilo-minerais. Amostras com quantidades de argilo-minerais do grupo de caulinita superiores a 45% apresentaram resultados satisfatórios no papel de pozolanas naturais em ensaios industriais com cimento Portland.

HE et al. (2000) calcinaram a esmectita a 560, 760 e 960°C. Os ensaios indicaram que a esmectita é um razoável material pozolânico, com sua desidratação e desidroxilação, para a amostra calcinada a 560°C ocorre considerável incremento de sua atividade pozolânica, enquanto que para calcinação entre 560 a 760°C não houveram grandes mudanças. Entretanto a 960°C ocorreu, novamente, um aumento da atividade pozolânica, com um aumento da resistência à compressão de 113% em relação ao cimento Portland comum.

Shi & Day (2001), comparando diferentes métodos para acelerar a ativação de pozolanas naturais (métodos mecânicos, térmicos e químico) e reconhecendo a vantagem de seu uso na performance de concretos, concluíram que todos os métodos aceleraram a reação com desenvolvimento de resistência à compressão nas razões cal hidratada/pozolanas utilizadas, no entanto, o método mecânico não mostrou um efeito significativo nas resistências finais, a ativação térmica reduziu as resistências finais e a ativação química (adição de Na_2SO_4 ou $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) aumentou as resistências finais. Ativadores químicos podem ser utilizados durante a moagem da pozolana ou durante a mistura do concreto contendo pozolanas, requerendo o mínimo uso de equipamentos extras e reduzindo o custo final por unidade de resistência à compressão.

Désir et al. (2001) estudou a atividade pozolânica da metacaulinita, sendo que esta, um aditivo "mineral" proveniente da calcinação do argilomineral caulinita, representa uma alternativa economicamente viável para substituição parcial do cimento na produção de argamassa e de concreto de alto desempenho. Porém, este potencial depende de certas características do produto, tais como: temperatura de queima, grau de finura e atividade pozolânica. Procurou primeiro determinar a faixa de temperatura mais adequada para a queima do argilomineral, sendo a metacaulinita gerada utilizada nos ensaios de pozolanidade com cal. Observou que o intervalo ideal de temperatura encontrado para produção de metacaulinita foi de 550 a 650°C sem grande influência do tempo de queima

utilizado e que a atividade pozolânica é diretamente proporcional tanto ao nível de temperatura atingido quanto ao tempo de calcinação.

Saito (2002), avaliando o potencial de aplicação dos lamitos e lamitos arenosos de composição esmectítica e caulínica da Formação Taubaté (rejeito de uma mineração de Areia), verificou que depois de submetidos ativação térmica apresentaram resultados positivos nos ensaios de atividade pozolânica com cal e regulares nos ensaios de atividade com cimento, aconselhando seu uso na indústria cimenteira desde que o volume de cimento substituído por pozolana se faça em quantidades menores, visto que os ensaios foram efetuados com 35% de pozolanas.

Pinho (2002) estudou uma alternativa de utilização como pozolanas dos resíduos finos obtidos da extração de areia no Bairro do Taboão, em Mogi das Cruzes, SP. Realizou apenas o ensaio do índice de atividade pozolânica com cimento para amostras calcinadas a 600 e 850°C. Obteve resultados satisfatórios, com um índice de atividade pozolânica com cimento de 81,7% para a amostra calcinada a 600°C e de 79,4% para a amostra calcinada a 850°C. O índice de atividade pozolânica com cimento deve ser no mínimo de 75%, conforme a norma NBR12653/92 (ABNT 1992).

Pinho (2003) estudou o comportamento térmico de argilas de dois depósitos do Sudoeste mineiro, na região de Passos – MG, e verificou que a mineralogia dos maiores constituintes foi semelhante com caulinita e quartzo, sendo que em ambos ocorre muscovita associada, seja como constituinte ou traço. Foi detectada a presença de clorita em algumas amostras justificando o magnésio associado. A caulinita inicia sua desestruturação a 450°C e se desestrutura totalmente a 550°C, enquanto que as micas resistem até 970°C quando também se desestruturam, ocorrendo a 970°C o possível início da nucleação de mullita. Através dos resultados de difração de raios X e análises por ATD-ATG observou que a temperatura de ativação para os argilominerais seriam a partir de 600°C, porém algumas amostras apresentaram ativação a temperaturas entre 800 e 900°C.

3.3.3 A reação pozolânica

A reação entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio, gerado durante a hidratação das fases do clínquer Portland, é denominada reação pozolânica. Segundo Takemoto & Uchikawa (*apud* Zampieri 1993), os produtos da reação são aqueles apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Fases e fórmulas produzidas durante a reação pozolânica

Fase	Fórmula
Silicato cálcico hidratado	C-S-H*
Solução sólida carboaluminato- C ₄ AH ₁₃	C ₄ AH ₁₂
Gehlenita hidratada	C ₂ ASH ₈
Hidrogranada	C ₃ (A,F)H ₆

* Abreviação empregada pelo setor de cimento, na qual C, S, F, A e H, representam CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ e H₂O, respectivamente.
C-S-H:CaO.SiO₂.H₂O; CH:Ca(OH)₂.

Para compreender as diferenças entre as reações pozolânica e de hidratação do cimento, Metha (1994) descreveu como:

Nessas reações, verifica-se que é produzido Ca(OH)₂ durante a hidratação das fases do clínquer de Cimento Portland, cuja presença em alguns meios quimicamente agressivos facilita o ataque químico ao concreto. Por outro lado, o Ca(OH)₂ reage com a pozolana adicionada, produzindo mais C-S-H, um importante componente na determinação das propriedades da pasta, além de outros produtos secundários (MEHTA 1994).

No Brasil, a determinação de atividade pozolânica é realizada segundo recomendações de duas normas técnicas: NBR5751/92 - Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal (ABNT 1992b) e NBR5752/92 - Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento (ABNT 1992c).

3.4 O CIMENTO PORTLAND

Segundo a norma brasileira NBR 11172/90 (ABNT 1990), o cimento é um aglomerante hidráulico de origem mineral, cuja característica principal é endurecer apenas pela reação com a água e, a seguir, resistir satisfatoriamente à ação da mesma.

Segundo a NBR 11172/90 (ABNT 1990), o cimento Portland é obtido pela moagem de clínquer Portland, este constituído em sua maior parte de silicatos e/ou aluminatos de cálcio, resultantes da queima (fusão parcial) de uma mistura homogênea de calcário e argila (farinha) e que, após moagem, sofre a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Ao cimento Portland podem ser adicionadas quantidades específicas de materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e materiais carbonáticos.

Na tabela abaixo estão descritos os tipos de cimentos com suas respectivas classes, com limites mínimos e máximos de cada tipo de adição utilizadas:

Tabela 3.4: Composição dos Cimentos Portland (CP) Comum, Composto, Alto Forno e Pozolânico.

TIPO *	NORMA	SIGLA	CLASSES (Resistência Mpa)	Clinker + CaSO ₄	Composição (% em massa)		
					Escória	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP Comum	NBR5732/91	CP-I	25	100		0	
			32				
			40				
	NBR5732/91	CP-I-S	25	99 - 95		1 - 5	
			32				
			40				
CP Composto		CP-II-E	25	94 - 56	6 - 34		0 - 10
			32				
			40				
	NBR11578/91	CP-II-Z	25	94 - 76		6 - 14	0 - 10
			32				
			40				
CP Alto Forno		CP-II-F	25	94 - 90			6 - 10
			32				
			40				
CP Alto Forno		CP-III	25	65 - 25	35 - 70		0 - 5
			32				
			40				
CP Pozolâni co	NBR 5736/91	CP-IV	25	85 - 55	-	15 - 40	0 - 5
			32				
CP de Alta Resistên cia Inicial		CP-V-ARI		100 - 95			0 - 5

*Comercialmente cada tipo de cimento é identificado por uma sigla.

Para substituições em proporções maiores, o cimento passa a receber o nome referente ao aditivo utilizado. No Cimento Portland Pozolânico, permite-se a adição de material pozzolânico entre 15 a 50%, em massa (ABNT 1991c). Dentre os aglomerantes existentes destaca-se o cimento Portland Composto (CP II), que representou em 2003 cerca de 72,7% da produção brasileira.

O Brasil ocupou a décima posição dentre os produtores mundiais de cimento no ano de 2002, com 2,08%, perdendo para China (38,62%), Índia (6,57%), Estados Unidos (4,92%), Japão (4,19%), Coreia do Sul (3,09%), Espanha (2,32%), Itália (2,27%), Rússia (2,17%) e Tailândia (2,13%), segundo o SNIC 2003; ocupou a oitava posição entre os maiores consumidores (2,09%). Na América Latina aparece na primeira posição em produção (33,74%) e consumo (34,9%), seguido pelos México e Venezuela (SNIC 2003). O consumo per capita de cimento Portland, no ano de 2002, foi de 217 kg/hab (SNIC 2003).

O Brasil conta com 48 fábricas de cimento e 9 unidades de moagem responsáveis pela produção anual de cerca de 35,4 milhões de toneladas em 2004 (Figura 3.4). Desse total, a região Sudeste foi responsável por 47,78% da produção, seguida da Região Nordeste com 19,9%, Região Sul com 16,8%, Centro Oeste com 11,4% e Norte com 3,6%. (SNIC 2003).

Figura 3.4: Localização das fábricas de cimento no Brasil (adaptado de SNIC, 2004).

Entre as importantes obras realizadas nos últimos anos no Brasil, podemos destacar o novo terminal de passageiros do aeroporto de Congonhas, construído em concreto armado, o terminal de contêineres do Porto de Paranaguá –PR com 250 mil m² de pavimentação com placas de concreto (2002), Rodovia dos Imigrantes, com 21 km de extensão que consumiram aproximadamente 400 mil m³ de concreto (2002), o sistema de Barragem Açude do Castanhão, Alto Santo – CE, num total de 10,5 km de barragens que consumiu mais de 1 milhão de m³ de

concreto (2003) e o Rodoanel em São Paulo, o trecho oeste tem 32 km com 60 viadutos, seis pontes, sete trevos e três túneis (2002) (fonte SNIC 2004).

No final do século passado já se produzia cimento no Brasil, porém foi a partir de 1926 o verdadeiro marco para a indústria do cimento, iniciando um consistente processo de consolidação e crescimento; em 1933 a produção nacional começava a ultrapassar as importações. O advento da segunda Guerra favoreceu o crescimento de produção, a quantidade de cimento fabricado no Brasil passou de 697 mil toneladas em 1939 para 810 mil em 1944. A partir de 1956 a produção ultrapassava os 3,2 milhões suprimindo a necessidade interna (SNIC 2004). Em 1969, foi iniciada a produção de Cimento Portland Pozolânico na região Sul do Brasil (Charqueadas no Rio Grande do Sul), obtido pela adição de cinzas volantes subprodutos de usina termoeletrica (KIHARA ; ESPER, 1986). Argilas caulínicas calcinadas foram inicialmente utilizadas como pozolanas durante a construção da Barragem de Jupia (MS), primeira usina construída com utilização de pozolana de argila calcinada com coloração vermelha, seguida das usinas de Ilha Solteira (MS), Capivara (SP), Água Vermelha (SP) e Barragem de Tucuruí (PA), nas décadas de 70-80 (ZAMPIERI, 1989, 1993).

Nos últimos 5 anos ocorreu um crescimento acentuado na produção de Cimento Portland Comum e Composto, motivado pelo aquecimento da indústria de construção civil, principalmente de pequenas obras. Por outro lado, desde o início da década de 90 a produção de Cimento Portland Pozolânico tem se mantido num patamar próximo a 2,3 milhões de toneladas anuais, muito inferior ao da década de 80 que foi marcada pelo grande consumo de cimento em obras de engenharia (SAITO, 2002).

O perfil de distribuição atual do cimento é caracterizado pelo predomínio do mercado varejista, que responde pelo consumo de cerca de 70% da produção, sobre as concreteiras, que consomem menos de 15% (SNIC, 2002). Algumas indústrias, visando o importante mercado, indicam o Cimento Portland Pozolânico para os mais diferentes usos a exceção do uso em obras que requerem altas resistências nas primeiras idades, como acontece na aplicação em concreto armado (ABCP, 2001).

Em virtude das vantagens econômicas, ambientais e tecnológicas que os aditivos agregam ao produto final, as indústrias têm buscado incrementar a produção de cimentos com adições de escória de alto-forno ou de pozolanas (naturais e artificiais, conforme a disponibilidade regional).

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em etapas de escritório, campo e de laboratório.

4.1. Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico contemplou assuntos relacionados aos procedimentos empregados na caracterização tecnológica e à aplicabilidade industrial de matérias primas argilosas como pozolanas. Os capítulos II (Contexto Geológico Regional) e III (Considerações sobre Argilas) resultaram da compilação de dados e revisão bibliográfica obtidas na literatura referentes à geologia regional e aspectos relacionados à utilização de argilas como pozolanas na indústria cimenteira.

4.2. Atividades de Campo

4.2.1 Seleção de alvos para pesquisa

A investigação dos depósitos para aplicação como pozolanas, localizados no entorno do empreendimento industrial, foi baseada na avaliação e prospecção dos aspectos geológicos favoráveis, cuja alteração por processos intempéricos vieram a desenvolver depósitos autóctones ou alóctones de argilas com proporções elevadas de caulinitas.

Foram alvos de prospecção rochas do embasamento granito-gnaissico intemperizados, arcósios, alinhamentos geológicos ou falhas, planícies de inundação de rios ou regiões baixas que possibilitem o transporte ou acúmulo de sedimentos.

Na investigação de alvos de prospecção, priorizaram-se áreas cuja posse das terras estivesse vinculada a Empresa e que estivessem legalmente autorizadas à pesquisa ou lavra, na sequência verificaram-se áreas cuja posse fossem de terceiros porém legalmente vinculadas a Empresa através de alvarás de pesquisa ou decretos de lavra. Por último, áreas desvinculadas da empresa onde poderia ser requerido o direito de pesquisa. Outro aspecto importante foi o fator de viabilidade econômica, onde foi estabelecido um raio limite (50 km) no entorno do empreendimento para priorizar os prospectos desde que o custo de logística tem influência direta no custo final do produto.

4.2.2 Detalhamento dos alvos selecionados

Após a identificação de alvos favoráveis, basicamente apoiada em investigações de campo, procedeu-se a seu mapeamento e coleta de amostras superficiais seja via trado manual (diâmetro de 3" e 15 metros de profundidade média escavada) ou outra ferramenta adequada (enxada, cavadeira boca de lobo, martelo, etc...).

Como base para o detalhamento dos prospectos, foram utilizadas informações locais de antigos moradores, ortofotos 1:10.000, aerofotos 1:60.000 e cartas planaltimétricas do IBGE 1:50.000 (1970). Com auxílio de GPS (Garmin mod. 12L) foram plotados em cartas planaltimétricas do IBGE (1970) os pontos de coleta de amostra que, após os resultados preliminares, serviram de base para programação dos furos pioneiros para investigação de sub-superfície. Para esta etapa foram utilizados o trado mecanizado MB/1 e acessórios, veículo Ranger e equipe de sondagem composta por 1 sondador e 2 auxiliares.

Nesta primeira etapa, desenvolvida em 6 meses, foram identificadas 10 áreas com potencial econômico no raio de pesquisa estabelecido, das quais foram priorizadas duas áreas no entorno do empreendimento, que atendiam todas as orientações solicitadas pela Empresa, denominadas área do Eucalipto, situada dentro do pátio industrial, e Área da Lagoa Pequena, vizinha ao pátio Industrial (5 km).

Nas duas áreas foram programadas sondagens arranjadas segundo malhas quadráticas com uso de trado mecanizado MB/1. A amostragem foi executada com recuperação total do material, adotando como critério de descrição macroscópica do material obtido na sondagem a cor, textura e estruturas caso preservadas.

Ressalta-se que a cor das argilas após a queima é um fator limitante, visto que a aplicação como aditivo deste material deve manter a tonalidade cinza tradicional do cimento desde que para o consumidor a cor representa alto valor agregado.

Devido à proximidade da jazida ao complexo Industrial e aspectos legais foi selecionado para desenvolvimento em escala industrial somente o depósito do Eucalipto, ficando a Lagoa Pequena como área estratégica para futuras aplicações, não fazendo parte do escopo de nosso trabalho a caracterização desta.

Baseados nesta premissa, os trabalhos finais de caracterização de uso como pozolanas ficaram voltados para área do Eucalipto, legalmente disponíveis e parte integrante do capeamento da jazida principal de calcário, cuja remoção é fator determinante na liberação de novas reservas de calcário.

Os trabalhos de tradagem totalizaram aproximadamente 350 metros de perfuração com trados com diâmetro de 3" do tipo concha. A profundidade dos furos variou entre 15 a 20 metros, considerando-se malhas pré-estabelecidas, furos pioneiros e furos adicionais para complementar os ensaios tecnológicos pertinentes.

Com o objetivo de conhecer a forma espacial do corpo mineralizado e contribuir nas interpretações, assim como prever o potencial de recursos minerais através de seus volumes, foram utilizadas ferramentas computacionais (programa integrado para mineração Datamine). A avaliação inicial levou em consideração somente a cor das argilas, não diferenciando os aspectos genéticos e tecnológicos.

Com a informação espacial do depósito foram efetuados 3 trincheiras espaçadas em 25 metros, com comprimento aproximado de 50 m e profundidade média de 2,5 m abertas de forma transversal ao corpo mineralizado. As aberturas das trincheiras foram efetuadas com auxílio de retro escavadeira.

4.3 Caracterização Tecnológica

Segundo LCT (2000), a caracterização tecnológica é o estudo das propriedades físicas, químicas e físico-químicas de matérias-primas minerais face ao processo de beneficiamento ou uso final. Consiste no conhecimento da natureza e propriedades dos constituintes minerais através de métodos e instrumentos analíticos, visando à aplicabilidade nos processos de concentração ou mesmo no uso final, sendo norteadas pelas especificações do segmento da indústria a que se destina o bem mineral.

A caracterização tecnológica teve como objetivo definir as características mineralógicas, a composição química, a distribuição do tamanho de partículas (granulometria) e transformações térmicas. Esses atributos nortearam a execução dos ensaios de aplicação, com vistas à indústria de cimento.

Os ensaios inerentes à caracterização tecnológica e os específicos de aplicação foram realizados nos seguintes laboratórios: Laboratório de Ensaio Físicos e Químicos da Cia de Cimento Portland Itaú, Laboratório de Difractometria e Espectrometria do Centro Técnico da Votorantim Cimentos em Curitiba (PR), Laboratórios do Instituto de Geociências e do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Por fim, foram efetuados testes de calcinação em escala industrial na unidade da Cimento Portland Itaú, em Itaú de Minas. Após pré-secagem ao tempo e destorroamento, o material foi processado em forno rotativo adaptado marca FLSmith originalmente concebido para a produção de clínquer. A calcinação industrial foi realizada utilizando como combustível uma mistura em proporções adequadas de moinha de carvão e coque de petróleo sendo o consumo energético da ordem de 550 Kcal/kg de pozolana (ORSI, 2004). A temperatura de queima do material ficou na faixa de 780 a 800°C. O tempo de residência do material no forno foi de aproximadamente 50 minutos. Para o controle de qualidade do material fez-se o acompanhamento horário de Perda ao Fogo na saída do forno. O material calcinado foi submetido a ensaios físicos e testes de índice de reatividade com cal e cimento no laboratório da mencionada fábrica.

4.3.1 Seleção e preparação de amostras

Com base em critérios de cor e de características de composição química, foram selecionadas 4 amostras para os estudos de caracterização tecnológica em escala de laboratório, referentes à sondagem com trado.

As amostras foram secas em estufa à 100°C durante 24 h, sendo depois submetidas à redução granulométrica entre 10 e 20 mm em britador de mandíbulas no laboratório de preparação da Cia de Cimento Itaú. Posteriormente foram preparadas e encaminhadas para ensaios específicos.

Para complementar os testes preliminares foram selecionados 10 pontos de amostragem através de trincheiras contemplando os litotipos previamente estudados. Nesta etapa, foram separados 3 litotipos diferenciados, conforme verificado na caracterização nas amostras de furos de trado, entre eles dois inerentes ao depósito mineral e um relacionado ao material coluvionar sotoposto ao depósito. Foram coletados 50 kg de amostra para cada litotipo testado. Após os estudos para caracterização em escala laboratorial, deu-se prosseguimento com testes em forno industrial, contemplando 5.700 toneladas para o **litotipo** caracterizado como **A**, 4.300 toneladas para o **litotipo** caracterizado como **B**. Os materiais resultantes da queima em forno industrial, foram coletados em amostrador manual em forma de tubo, na saída dos satélites entre o *shut* de transferência e o arrastador de material, sendo preparados em laboratório para ensaio de reatividade com cal e cimento.

4.3.2 Distribuição granulométrica

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada por peneiramento a úmido em peneiras circulares (8") de aberturas 0,500; 0,177; 0,150; 0,106; 0,075 e 0,044 mm, seguido de análise por granulômetro de difração laser, via úmida, para o material passante em 0,044 mm (Analisador de Partículas Malvern 3600Ec). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Preparação de Amostras do Depto de Geologia Sedimentar e Ambiental – IGc-USP e no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) – Departamento de Engenharia de Minas – EPUSP, respectivamente.

4.3.3 Composição Química

Foram efetuadas análises para os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O e SO_3 , em pastilha prensada, para amostras coletadas na campanha de sondagem a trado. Para as amostras coletadas das trincheiras foram efetuadas análises dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 em pérola fundida. Utilizaram-se os Espectrômetros de Fluorescência de Raios X (Modelo PW1660 e Magics Pró PW 2540 da Philips) do Laboratório de Raios X da Cia. Cimento Portland Itaú e do Centro Técnico da Votorantim Cimentos, respectivamente.

4.3.4 Identificação Mineralógica

A determinação da assembléia mineralógica de amostras naturais e compostos neoformados, após transformações térmicas, foi realizada por difração de raios X. Na preparação das amostras, as etapas constaram de moagem em moinho planetário das amostras secas (entre 70-80°C), quarteamento de alíquotas e análise. Após transformações térmicas, foram realizadas análise por difração de raios X.

Foram utilizados o Difrátmetro de Raios x, PANalytical (modelo MPD 1880), no laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT-EPUSP) e o Difrátmetro de Raios X, PANalytical (modelo X'Celerator), no Centro Técnico da Votorantim Cimentos.

Os difratogramas obtidos foram interpretados com o programa X'Pert High Score Plus (PANalytical, versão 1.0b), utilizando fichas de identificação do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). A editoração dos gráficos foi realizada nos programas Winfit Versão

Beta Release 1.2.1 (Stefan Krumm, Geologisches Institut Erlangen, Schlossgarten 5, D-91054 Erlangen, 1997) e Corel Draw 11.

As análises por DRX foram realizadas em pastilha prensada, na qual uma massa aproximada de 3 a 4 g da amostra é colocada em anel metálico e submetida à pressão manual até se obter superfície plana e lisa, tendo sido esta pastilha posteriormente analisada no difratômetro nas seguintes condições de operação: radiação $\text{CuK}\alpha$, passo de $0,02^\circ 2\theta$ com tempo de contagem de 1s por passo e leitura em intervalo de ângulo de $2,5$ a $65^\circ 2\theta$.

Amostras Tal Qual

Foram aplicados dois métodos de preparação: o método da pastilha prensada e o método da orientação dos argilominerais para realizar a glicolagem (verificação de argilominerais expansivos).

Para obter a orientação dos argilominerais as amostras foram colocadas em recipiente com água com pastilha de cerâmica ao fundo, onde a orientação dá pelo processo de decantação. O material depositado foi desaguado e as pastilhas secas ao ar tendo sido analisadas nas seguintes condições: radiação $\text{CuK}\alpha$, passo de $0,02^\circ 2\theta$ com tempo de contagem de 1s por passo e leitura em intervalo de ângulo de $2,5$ a $15^\circ 2\theta$.

Amostras Calcinadas

Utilizou-se o método da pastilha prensada para amostras calcinadas segundo temperaturas escolhidas de acordo com os resultados das curvas de Análises Térmica Diferencial e Termogravimétrica.

4.3.5 Análises Térmica Diferencial e Termogravimétrica (ATD-ATG)

Foram realizadas análises termodiferenciais e termogravimétricas simultâneas, com o equipamento *Simultaneous DTA-TGA* (Modelo SDT 2960 /TA Instruments), no Laboratório de Análises Mineralógicas do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental -IGC-USP.

As condições de análise adotadas foram: 20 mg de amostra pulverizada e seca a 70°C , taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{m}$, intervalo de medição de 20°C a 1.000°C e padrão de alumina. O aquecimento foi realizado em cadinho de alumina sob atmosfera dinâmica de nitrogênio.

4.4 ENSAIOS DE APLICAÇÃO

Os ensaios realizados para verificação da capacidade das argilas de reação com compostos do cimento Portland caracterizando-as como de interesse para utilização como pozolana, incluíram determinação do Índice de atividade pozolânica com cal e do Índice de atividade pozolânica com cimento, ambos com determinação da Resistência à Compressão.

A determinação do índice de atividade pozolânica foi integralmente realizada pelos técnicos do Laboratório de Ensaio Físicos Cia Cimento Portland Itaú, cujos métodos empregados seguem estritamente as recomendações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.4.1 Preparação das amostras

As amostras naturais foram secas em estufa a 110°C durante 24 h, sendo então britadas em britador de mandíbulas até granulometria entre 10-20 mm. Logo após as amostras foram submetidas a calcinações nas temperaturas 700, 800, 900°C durante 30 minutos em forno estático de alta temperatura. Em seguida as amostras foram pulverizadas em moinho de bolas de aço (similares ao moinho industrial) até atingir um resíduo inferior a 6 % em peso na peneira de 0,044 mm. Após a preparação da amostra, determinaram-se as massas específicas - NBR NM23/01 (ABNT 2001) e o resíduo na peneira 0,044 mm - NBR 12826/93 (ABNT 1993).

4.4.2 Índice de atividade pozolânica com cal – NBR 5751/92

Foram preparadas argamassas compostas por uma parte (em massa) de hidróxido de cálcio, nove partes (em massa) de areia normal e mais uma quantidade de material pozolânico correspondente ao dobro do volume do hidróxido de cálcio, segundo a NBR 5751/92 (ABNT 1992b). Foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, utilizando-se as proporções de materiais indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 : Composição das argamassas de pozolana e cal

Material	Massa (g)	Onde
Hidróxido de cálcio	104	δ_{poz} = massa específica do material pozolânico (NBR 6474). δ_{cal} = massa específica da cal hidratada (NBR 6474).
Areia normal	234 de cada uma das quatro frações*	
Material pozolânico	$2 \times \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \times 104$	

* definido pela NBR 7215/96.

O material pozolânico e o hidróxido de cálcio foram homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 minutos, aproximadamente. A água de amassamento (quantidade de água para a mistura correspondente a um índice de consistência de 225 ± 5 mm obtido no ensaio de abatimento - NBR 7215/96 - ABNT 1996) foi adicionada à mistura na cuba de um misturador mecânico (Marca EMIC, 5l). A agitação da areia e o tempo de amassamento, a moldagem e desmoldagem e o rompimento dos corpos-de-prova em ensaios de resistência à compressão, seguiram as recomendações da NBR 7215/96 (ABNT 1996).

Durante os 7 dias de cura os corpos-de-prova foram mantidos vedados para garantir a umidade, sendo que durante as primeiras 24 ± 2 h os corpos-de-prova permaneceram à temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$, durante as 144 ± 2 h posteriores foram mantidos em temperatura de $55 \pm 2^\circ \text{C}$ até $4 \pm 0,5$ h antes do ensaio de ruptura à compressão, quando os corpos-de-prova passaram à temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$, conforme a NBR 5751/92 (ABNT 1992a).

4.4.3 Índice de atividade pozolânica com cimento – NBR 5752/92

Este ensaio foi efetuado exclusivamente com o material calcinado resultante do teste industrial, com temperatura média na zona de queima de 700°C .

Para a confecção dos corpos-de-prova, foram preparadas argamassas com dois traços diferentes: a **Argamassa A**, de referência, somente com cimento Portland e a **Argamassa B**, com 16% do seu volume absoluto de cimento substituído por material pozolânico. Para cada tipo de argamassa, foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos de 50x100 mm, sendo que as proporções de materiais utilizados constam da Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição das argamassas com cimento

Material	Massa (g)		Onde
	Argamassa A	Argamassa B	
Cimento Portland	912,0	202,8	A = massas específicas do material pozolânico e do cimento (NBR 6474) B = quantidades de água (NBR 7215)
Material pozolânico	-	$109,2x \frac{\delta p^{(A)}}{\delta c^{(A)}}$	
Areia normal	936,0	936,0	
Água	x(B)	y(B)	

A moldagem e o rompimento dos corpos-de-prova nos ensaios de resistência à compressão seguiram as recomendações da NBR 7215/96 (ABNT 1996). A água requerida é expressa em porcentagem pela seguinte relação:

$$\text{Água requerida} = \frac{B}{A} \times 100(\%)$$

onde B e A = quantidade de água necessária para a obtenção de índices de consistência normais de 225 ± 5 mm para as argamassas B e A, respectivamente.

Após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos foram colocados em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$, durante 24 ± 2 h, com as faces superiores expostas ao ar úmido, mas protegidas de respingos de água. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram armazenados em recipientes hermeticamente fechados e estanques, sob temperatura de $38 \pm 2^\circ \text{C}$, durante 27 dias. Para o ensaio à compressão, os corpos-de-prova, ainda dentro dos recipientes fechados, foram resfriados ao ar até $23 \pm 2^\circ \text{C}$ (NBR 5752/92 – ABNT 1992c).

O cálculo do índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi feito através da fórmula indicada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Fórmula para a determinação do índice de atividade pozolânica

Fórmula	Onde
$\frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100(\%)$	<p>f_{cB} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B)</p> <p>f_{cA} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A).</p>

4.4.4 Determinação da Resistência à Compressão

Segundo a norma brasileira NBR 7215/96 (ABNT 1996), este método compreende a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, somente após os dias de cura a que foram submetidos. É necessário que se faça o capeamento nas bases do corpo de prova, utilizando um material composto pela fundição de enxofre com caulim, quartzo moído ou outras substâncias. Para o caso estudado foi utilizada uma mistura de enxofre com quartzito moído (abundante no local) a uma temperatura de fundição de 136°C .

Segundo a norma, os corpos devem ser rompidos numa velocidade de carregamento da máquina de ensaio, com transmissão de carga de compressão ao corpo de prova equivalente a $0,25 \pm 0,05$ MPa. Por fim calcula-se:

- Resistência Individual: Resistência à compressão em MPa, de cada corpo de prova, dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova.
- Resistência média : Média das resistências individuais, em MPa, dos corpos de prova, com o resultado arredondado para o décimo mais próximo.
- Desvio Relativo Máximo: Divide-se o valor absoluto da diferença entre a resistência média, multiplicando-se por 100 (resultado em porcentagem). A porcentagem obtida deve ser arredondada ao décimo mais próximo.

CAPÍTULO V - RESULTADOS OBTIDOS

5.1. PROSPECÇÃO REGIONAL

5.1.1 Seleção de alvos para pesquisa

As áreas com potencial econômico para o raio de pesquisa pré-estabelecido (50 km) foram prospectadas enfocando ocorrências de argilas sedimentares de deposição recente, geralmente em planícies de inundação, de alterações de rocha segundo geologia disponível em trabalhos realizados nesta área (composta principalmente por granito- gnaisses, xistos, filitos e subordinadamente arcósios), localizada entre os Municípios Itaú de Minas, Fortaleza de Minas, Passos, São João Bartista do Glória, São Sebastião do Paraíso, Pratápolis e Cássia. Foram também pesquisados alinhamentos estruturais que eventualmente poderiam ser responsáveis pela formação de depósitos hidrotermais ou de depósitos evoluídos de farinha de falhas. Em função da geologia da área, foram considerados feições cársticas como dolinamentos preenchidos por sedimentos recentes para as rochas do Grupo Bambui, pequenas áreas alagadas na busca de materiais organogênicos no Grupo Canastra e fontes de origem vulcânica, na busca de ocorrências de tufos e cinzas nas proximidades do Greenstone Belt Morro do Ferro.

As ocorrências encontradas nas áreas pesquisadas se restringiram a pequenos depósitos aluvionares de planícies de inundação, compostos por intercalações de argilas plásticas, argilas siltosas, argilas arenosas, siltes argilosos e areias de coloração variando entre os tons cinza, vermelho e marrom (Figura 5.1). Os tufos e cinzas não foram encontrados, possivelmente em função de soterramentos recentes ou mesmo da transformação destes. Os materiais organogênicos se restringem a pequenas acumulações próximo a represa de furnas, também pouco expressivos.

Algumas ocorrências de grande extensões se referem a planícies de inundações próximo a barragem de furnas, porém com restrições ambientais.

Figura 5.1 - Localização das áreas prospectadas com potencial para uso como pozolanas.

Geralmente estes tipos de depósitos apresentam grandes bolsões de areias e silte que dificultam a extração de argilas para uso como pozolanas, visto que para os fornos industriais a presença de areia é extremamente prejudicial afetando a estabilidade térmica, acentuando a formação de colagens e comprometendo a reatividade em função a presença de quartzo livre não reativo. Para este tipo de depósito a lavra se tornaria seletiva e predatória por vezes inviabilizando a utilização sem métodos prévios de beneficiamento.

5.1.2 Alvos Selecionados

Foram detectados dois alvos de maior potencialidade denominados de Área da Lagoa e Área do Eucalipto.

A Área da Lagoa se localiza a 4 km NE da fábrica e se trata de provável depósito sedimentar, onde foram observadas feições cársticas sugerindo uma dolina preenchida por sedimentos argilosos a argilo-siltosos com plasticidade acentuada e fragmentos de quartzo dispersos em

sua matriz. Possui um capeamento pouco espesso, caracterizado por argilas coluvionares nas bordas e turfas na porção central, que tem espessura variando de 0,5 a 1,0 m. Furos de sondagens rotativas realizados na pesquisa de calcários pela Cimento Portland Itaú, revelaram profundidades de até 40 m de argilas de cores em tons de cinza.

Das duas áreas selecionadas como alvos (Figura 5.2), foi priorizada a Área do Eucalipto para aproveitamento industrial, por critérios definidos pela empresa, a qual foi caracterizada tecnologicamente, sendo que a área da Lagoa destinada ficou a trabalhos futuros.

Figura 5.2 - Localização da Área do Eucalipto e Área da Lagoa

A área do Eucalipto encontra-se na aba oeste da estrutura antiformal onde está inserida a cidade de Itaú de Minas, como ilustrado no croqui da Figura 5.3. Ocorre sotoposta à jazida de calcário em exploração pela Cimento Portland Itaú.

Estratigraficamente em contato tectônico, encontram-se os mármore calcíticos bandados ou compactos utilizados na fabricação de cimento contendo em menores proporções intercalações de camadas sulfetadas, metamargas e *cherts* acompanhando ou não o bandamento original. Na mesma ocorrência são observados mármore magnesianos a dolomíticos brechados, preenchidos com calcita, quartzo e raras exposições com preenchimento de sulfetado, os quais são utilizados na fabricação de cal, calcário agrícola e areia artificial pela Cia de Cimento Itaú de Minas.

Geralmente entre os contatos dos calcários são observados quartzos xistosulfetados e xistos grafitosos altamente deformados.

Em contato tectônico superior com os calcários podem ser observadas restritas exposições de formações ferríferas bandadas deformadas, de composição calcio-silicáticas e rochas de caráter ultrabásico, possivelmente, cromititos conforme descritos por Fernandes (2002) na região.

O grande pacote exposto da área do Eucalipto refere-se a uma sequência metassedimentar composta por quartzos xistos e sericitas filitos, sericita quartzitos e quartzitos arcoseanos. Capeando estas seqüências encontram-se extensas camadas de material coluvionar de coloração roxa, que atingem dezenas de metros dificultando boas exposições da sequência metassedimentar supracitada, que pode ser observada claramente nos taludes do capeamento da jazida de calcário.

O croqui esquemático (Figura 5.3), com direção SW-NE, retrata as ocorrências dos litotipos locais responsáveis pelo desenvolvimento das ocorrências de argilas sedimentares caulínicas e alteritos passíveis de uso como pozolanas artificiais.

Para melhor entendimento da evolução dos depósitos sedimentares e possíveis fontes geradoras de argilas ricas em caulinitas, além das ocorrências dos alteritos caulínicos, foi efetuado um mapeamento litológico (1:50.000). Foram utilizadas como base cartográfica as folhas do IBGE (1970) de quatro municípios circunvizinhos e imagens de satélites para auxiliar na interpretação. Basicamente foram reconhecidas 5 unidades litológicas, caracterizadas pelos Grupos Araxá, Intercalações entre Araxá e Canastra aqui denominados de Araxá-Canastra, Grupo Bambuí, Complexo Granito-Gnaissícos e intrusões de vulcânicas básicas, além de feições estruturais que provavelmente contribuíram para evolução do depósito.

As associações de rochas reconhecidas na área estudada são constituídas por granito-gnaissícos migmatíticos arqueanos de composição quartzofeldspático, localmente bastante alterados, favorecendo a formação de material caulinizado facilmente identificadas pela sua cor branca, e contendo grande quantidade de quartzos livres. Dentro desta sequência foram identificados lascas de rochas ultrabásicas (Greenstone Belt) deformadas, caracterizando esta unidade, descrita anteriormente por Complexo Campos Gerais. A sudoeste da área mapeada foram reconhecidas rochas ultra-básicas intrusivas onde está inserida a antiga jazida do Morro do Níquel, depósito residual de níquel (garnierita) e Morro do Ferro onde são observados metassedimentos de origem química (itabiritos) e metavulcânicas (anfibolitos?). Nas bordas da área mapeada foram reconhecidas rochas compostas por

micaxistos granitíferos, calco xistos, quartzo xistos, clorita xistos típicas do Grupo Araxá na região. Na porção centro-norte, foram identificadas rochas compostas por quartzitos, quartzitos arcoseanos intercalados a sericita xistos, sericita filitos, clorita xistos, representando classificados aqui como Araxá- Canastra. Estas rochas quando alteradas são utilizadas pela Cia. de Cimento como corretivos de óxidos na composição da farinha para a produção do clínquer. Para finalizar a porção central é representada preferencialmente pelos calcários calcíticos, dolomíticos brechados e metamargas utilizados na fabricação do clínquer, reconhecidos neste trabalho como rochas pertencentes ao Grupo Bambuí. Subordinadamente são identificadas intrusões de rochas metabásicas, além de formações ferríferas e xistos grafitosos sulfetados no contato com o Grupo Araxá-Canastra. As feições estruturais observadas são alinhamentos representados por falhas indiscriminadas e eixo da estrutura antiformal de Itaú de Minas, feição provavelmente responsável pela direção do lençol de água subterrâneo, fator importante na evolução de depósitos recentes de argilas (Figura 5.4 e Figura 5.5)

Conforme citado, a jazida evoluiu na aba oeste do anti-forme de Itaú de Minas, localizada no contato entre os calcários e metassedimentos, precisamente no eixo NW da jazida de calcário. Os sericita filitos em contato direto com os calcários, sofreram localmente grande interferência das condições intempéricas que, a partir da cota 710 m, lixiviaram parte do ferro destas rochas tornado-as untuosas ao tato e de cores brancas. Logo abaixo, nas exposições dentro da jazida foram observadas feições cársticas indicando variações no lençol freático local (atualmente aflorante no nível 680 m cota local, ressurgente na mesma direção da jazida de argila). Entre o contato dos sericita filitos brancos e o material coluvionar, foram depositados materiais em pequenas depressões (lagoas? dolinas?) que se transformaram, concomitantemente aos sericita filitos, no depósito em estudo.

Figura 5.3 - Croquis esquemáticos representando os litotipos encontrados em cortes dos taludes da jazida de calcário

Figura 5.4 – Mapa Geológico Local - Itaú de Minas - MG

Figura 5.5 – Mapa Geológico da Região de Itaú de Minas - MG

5.1.3 – Descrição do Depósito

Os trabalhos de investigação na área foram efetuados através de sondagem rotativa com trado mecanizado, diâmetro de 3", segundo arranjo de malha quadrática de 50 m (Figura 5.4 A). Foi realizada uma descrição expedita dos materiais amostrados no trado cuidando essencialmente de diferenciação de cores entre as argilas, tendo sido obtida uma classificação baseada nos tons cinza e branco e ocorrência ou não de fragmentos de rocha.

Para uma avaliação preliminar objetivando conhecer a configuração espacial do depósito e prever o potencial do recurso mineral, foram utilizadas ferramentas computacionais. Utilizou-se um modelo de blocos com dimensão 10x10x5 m que forneceu na cubagem inicial um recurso de 470.000 t de argilas brancas e cinzas, objeto do interesse empresarial. O capeamento sotoposto a elas, aliado a argilas coradas (sericitas filitos de cor em tons vermelho e amarelo e colúvio que possui argilas em tons de vermelho e roxo) compuseram o estéril cubado em 500.000 t.

Figura 5.6 - A - Esquema da malha quadrática de localização dos furos de sondagem rotativa. Escala aproximada: 1:2.500, com curvas de nível a cada 2 metros.

A partir do modelo de blocos gerado nos trabalhos de levantamento do potencial do recurso, foram confeccionados plantas e perfis para entendimento preliminar visando planejamento dos trabalhos futuros (Figuras 5.7 B, 5.8 C, 5.9 D, 5.10 E, 5.11 F), nas figuras nota-se a distribuição espacial das argilas e a grande variabilidade de espessura do capeamento.

Figura 5.7 - B - Planta referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalipto (cota 710 m).
Verifica-se nesta cota grande ocorrência de argila no centro esquerdo da área.

Figura 5.8 - C - Planta referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalipto (cota 725 m).
Verifica-se nesta cota grande ocorrência de argila na porção direita da área.

Figura 5.9 – D - Perfil A, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalypto S-N(cota 710 – porção centro esquerda).

Figura 5.10 - E – Perfil B, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalypto W-E (cota 710m).

Figura 5.11 – F - Perfil C, referente à ocorrência de argilas no depósito do Eucalypto S-N (cota 710 m).

5.1.4 Caracterização Tecnológica

5.1.4.1 Seleção e preparação de amostras

Após a primeira avaliação efetuada na área, utilizando para amostragem os trabalhos de perfuração com trado mecanizado nos quais foram consideradas como critério de descrição e qualificação apenas a coloração das argilas e a ocorrência ou não de fragmentos de rocha, pode-se vislumbrar a configuração espacial e potencial do recurso na qual porém não foram consideradas as variações dos litotipos presentes no depósito.

Posteriormente, foi realizado um mapeamento detalhado em trincheiras tendo-se observado variações das argilas preliminarmente consideradas como um único litotipo, caracterizadas por texturas e estruturas distintas tais como variações ao tato e foliações residuais, tanto lateralmente como em profundidade.

Com base nos dados químicos e texturais, foi adotado um novo critério de descrição de amostras que serviria como base para futuros trabalhos de pesquisa de campo em descrições de perfis argilosos. Foram estabelecidos como parâmetros: cor natural, textura, estrutura, presença de seixos, grânulos de areia, plasticidade e consistência do material (facilidade/dificuldade na perfuração).

Os testemunhos de argilas foram, então, descritos novamente levando em consideração os novos critérios estabelecidos.

Utilizando os dados disponíveis de cor e de características de composição química, foram selecionadas quatro amostras como representativas das diversas populações reconhecidas no depósito mineral, como indicado nos gráficos de correlação das análises químicas expostos nas Figuras 5.12 e 5.13.

Figura 5.12 - Correlação entre óxidos para as amostras da Jazida do Eucalypto

Figura 5.13 - Correlação entre óxidos para as amostras da Jazida do Eucalipto

As argilas brancas da área do Eucalipto foram divididas claramente em duas populações delimitadas principalmente pelos teores de Al_2O_3 e K_2O (gráfico da Figura 5.11), uma com teor de K_2O mais elevado e Al_2O_3 mais baixo e outra com situação inversa, como foi observado nos diagramas ternários SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O (Figura 5.13), as quais foram, posteriormente, associadas aos diferentes litotipos.

Figura 5.14 - Composição química das argilas brancas da área do Eucalipto

As populações foram chamadas respectivamente de A e B com características conforme sumariado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Síntese dos critérios de composição química na classificação das argilas

ÓXIDO (% em peso)	TEORES (% em peso)	POPULAÇÕES		AMOSTRAS	
		Por classe	Total	Selecionadas	Identificação
Al_2O_3	15 – 25	B	A	D8 (5 a 7 m)	EcBrA1
	20 – 35	A		D8 (10 a 19 m)	EcBrA2
SiO_2	60 – 75	B	B	F0 (9 a 20 m)	EcBrB1
	40 – 60	A		H0 (5,5 a 17 m)	EcBrB2
K_2O	3 – 6	B			
Fe_2O_3	0 – 3	A			
	0 – 4	A e B			

No gráfico da Figura 5.14 notou-se que há uma correlação entre alumínio e potássio, dentro de cada população, situação semelhante ocorre entre sílica e potássio também dentro de cada população.

As argilas Amarelas e Roxas *a priori* não foram estudadas por não possuírem as características de cor adequadas para adição como pozolanas no cimento tradicional, entretanto os seus óxidos favorecem seu aproveitamento como corretivos de ferro, sílica e alumínio na fabricação do clínquer, possibilitando a redução de custos com a remoção de estéril, onde poderão substituir parte dos corretivos atualmente utilizados.

5.1.4.2 Composição Química das Amostras Estudadas

Os resultados de análise química para as amostras dos furos de sondagem estão expressos no Anexo I, no geral todas as amostras apresentaram-se bem silicosas, com teores superiores a 45% SiO_2 e aluminosas, com teores de 20 a 35% Al_2O_3 . Os teores de ferro variam de 2,17 a 9,41% Fe_2O_3 , onde teores abaixo de 4% são representados pelas argilas claras e acima de 5% pelas argilas coradas. Os teores de potássio variam de 0,72 a 5,11% K_2O .

A composição química das amostras selecionadas para caracterização tecnológica está sumariada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Composição química das amostras selecionadas para caracterização

AMOSTRAS	FURO	Profundidade (m)		Teores (% em peso)								
		DE	ATÉ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	PF
EcBrA1	D8	5	7	45,8	35,1	3,16	0,64	0,2	0,72	0,01	0,1	14,1
EcBrA2	D8	10	19	51,2	33,1	2,24	0,96	0,18	0,76	0,01	0,14	11,3
EcBrB1	F0	9	20	65,5	20,6	2,17	0,46	1,68	5,04	0,21	0,03	4,14
EcBrB2	H0	5,5	17	64,4	20,9	2,28	0,37	1,77	5,11	0,15	0,05	4,77

A composição química *tal qual* das amostras coletadas nas trincheiras selecionadas para caracterização tecnológica está sumariada na tabela 5.3.

Tabela 5.3 Composição química das amostras de trincheiras

Tipo	Teores (% em peso)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
A	48,96	33,53	1,51	0,03	0,33	0,01	0,56	2,04
A	52,82	31,03	1,41	0,02	0,37	0,02	0,87	1,82
B	58,54	24,92	1,95	0,01	1,5	0,04	5,32	1,28
B	56,81	25,34	3	0,02	1,23	0,05	4,55	1,30
C	43,78	30,93	9,48	0,02	0,35	0,01	0,74	1,70
A	53,22	30,17	1,81	0,05	0,46	0,01	1,39	1,53
B	54,63	27,29	2,38	0,01	1,3	0,06	4,74	1,45
B	58,1	24,93	2,18	0,04	1,36	0,04	5,09	1,27
A	54	29,72	1,63	0,02	0,53	0,02	1,51	1,57

1.4.3 Distribuição granulométrica

Os resultados das análises granulométricas são apresentados abaixo, na forma de tabelas e curvas. Na figura 5.15 estão representadas as curvas de distribuição das amostras da área do Eucalipto. Na Tabela 5.4 estão representados os parâmetros d₉₀, d₅₀ e d₁₀ para todas as amostras, que representam os diâmetros em que respectivamente 90, 50 e 10% dos grãos são passantes.

Figura 5.15 - Curvas de Distribuição Granulométrica Eucalipto

Tabela 5.4 - Análise granulométrica por difração laser para as amostras caracterizadas

AMOSTRA	PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO (µm)		
	D90	D50	D10
EcBrA1	35,56	16,57	4,88
EcBrA2	222,28	12,21	0,36
EcBrB1	48,27	14,22	4,19
EcBrB2	41,43	14,22	4,19

Nota-se que na área do Eucalipto a moda varia de 14 a 17 micrômetros representando um tipo selecionado de argila (argila branca).

Pode-se observar ao analisar os gráficos e os parâmetros de distribuição granulométrica, dois grupos distintos de materiais: um grupo mostrando uma distribuição log-normal e de apenas uma população, e um outro grupo com distribuição trimodal, representando outra população distinta, grupo composto pela amostra EcBrA2.

Observou-se que após calcinadas e submetidas a moagem para atingir a granulometria estabelecida para realização dos ensaios de atividade pozolânica, o tempo de moagem oscilou bastante entre as duas populações. Para as argilas calcinadas classificadas como tipo A (EcBrA1 e EcBrA2) e submetidas a calcinação em escala industrial os tempos oscilaram em média 26,6 horas e para as argilas calcinadas classificadas como tipo B o tempo de moagem ficou abaixo de 3 horas, confirmando a presença de litotipos diferenciados.

5.1.4.4 Composição Mineralógica

Difratogramas de raios X relativos às amostras estudadas estão expostos nos anexos II, sendo a sua assembléia mineralógica resumida nas Tabelas 5.4 e 5.5 que têm caráter qualitativo com indicação de frequência de fases minerais baseada apenas na interpretação dos difratogramas.

Tabela 5.5 - Identificação mineralógica por difração de raios X das amostras de furos de sondagem

AMOSTRAS	MINERAIS				
	QUARTZO	CAULINITA	MUSCOVITA	FELDSPATO	TITANITA
EcBrA1					
EcBrA2					
EcBrB1					
EcBrB2

Maior componente

Menor componente

Não Possui

A mineralogia na área do Eucalipto é composta por quartzo, caulinita e muscovita, esta como maior ou menor componente comum a todas as amostras e entre os menores componentes destaca-se o feldspato que ocorre em três das quatro amostras estudadas.

Análise posterior de amostras coletadas nas trincheiras, caracterizadas como tipo A (EcBrA), B (EcBrB) e C (capeamento), confirmaram para A e B a mesma composição mineralógica anterior, acrescentando apenas minerais de titânio não diferenciados (titanita e/ou rutilo). Para o capeamento foi registrada a presença dos minerais hematita e gibbsita com ausência do mineral muscovita.

Tabela 5.6 - Identificação mineralógica por difração de raios X das amostras de trincheiras

AMOSTRAS	MINERAIS					
	QUARTZO	CAULINITA	MUSCOVITA	Minerais de Titânio	HEMATITA	GIBSITA
Tipo A						
Tipo A						
Tipo A						
Tipo B						
Tipo B						
Tipo C						
Tipo B						
Tipo B						
Tipo A						
Tipo A						

Maior componente

Menor

Não Possui

5.1.4.5 Análises Térmica Diferencial e Termogravimétrica

Os resultados estão expressos na forma de curvas termodiferenciais e termogravimétricas, conforme os gráficos presentes nas Figuras 5.16 e 5.17. Em alguns gráficos, especialmente das amostras EcBrA1, EcBrB1e EcBrB2, as transformações minerais puderam ser percebidas pelos patamares de perdas de massa mas que não se expressaram por picos de consumo/liberação de energia nos termogramas que pode ter causas relativas ao equipamento ou a características das amostras. As temperaturas em que ocorreram perdas de massa de acordo com os gráficos ATD-ATG estão sumariadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Temperaturas de perdas de massa para as amostras de furos de sondagem caracterizadas segundo análises de ATD-ATG

AMOSTRAS	TEMPERATURA (°C)				
EcBrA1		406	560	840	
EcBrA2	65	400	500	700	970
EcBrB1		405	500	860	
EcBrB2		403	500	850	

- Perda de massa com pico endotérmico
- Perda de massa com pico exotérmico
- Perda de massa sem qualquer pico
- Perda de massa não expressível/visível

Foi verificado que para as amostras da área do Eucalipto a perda de água adsorvida (umidade residual) é bem visível na amostra EcBrA2 ocorrendo a aproximadamente 65°C. A perda da água estrutural (OH⁻) da caulinita ocorreu entre 400 e 500° C, bem visível também na amostra EcBrA2, e nas outras pela grande perda de massa. A aproximadamente 850-860° C houve novamente uma pequena perda de massa, que na amostra EcBrA2 ocorre um pouco antes de 700° C, representando provavelmente a perda da estrutura da metacaulinita. E apenas na amostra EcBrA2 está visível um pico exotérmico a 970°C representando a nucleação de mulita.

Figura 5.16 - Curvas de ATD e ATG para as amostras do tipo A

Figura 5.17 - Curvas de ATD e ATG para as amostras do tipo B

5.1.4.6 Composição mineralógica das argilas calcinadas

Visando investigar as transformações mineralógicas ocorridas nas diversas temperaturas promoveram-se ensaios de calcinação seguidos por análises por difratometria de raios X em algumas das amostras em estudo, como indicado na Tabela 5.8. As amostras foram calcinadas em mufla por uma hora para cada temperatura.

Tabela 5.8 - Temperaturas aplicadas nas amostras para verificação das transformações minerais na calcinação

AMOSTRAS		TEMPERATURAS DE CALCINAÇÃO (°C)				
EcBrA2	100	410	500	700	970	
EcBrB1	-	-	550	860	900	

Os difratogramas para as amostras calcinadas podem ser vistos no Anexo III, e resumidamente são destacadas as transformações minerais que ocorreram nas calcinações na Tabela 5.9

Tabela 5.9 - Transformações de fases minerais na calcinação (identificação-difratometria de raios X)

AMOSTRA	MINERAIS	TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO (°C)				
		100	410	550	700	970
EcBrA2	Quartzo					
	Caulinita					
	Muscovita					
	Feldspato					
EcBrB1	Quartzo					
	Caulinita					
	Muscovita					
	Titanita

Minerais presentes

Nota-se que o quartzo e os feldspatos mantiveram-se intactos em todas as temperaturas de calcinação, como também a titanita e a goethita. Os minerais micáceos, como a clorita e a muscovita, resistem até 970° C quando, então, são desestruturadas. A caulinita não aparece a 410° C na amostra EcBrA2, nem a 550° C para a amostra EcBrB1.

Amostras coletadas nas trincheiras, após reconhecimento dos diferentes litotipos A (EcBrA), B (EcBrB) e C (capeamento) foram calcinadas em laboratório respectivamente a 600°C, 700°C, 800°C, com objetivo de estabelecer qual a melhor temperatura para o uso nos fornos industriais. A análise por difratometria de raios X não detectou a presença de caulinitas, nem a presença de mulitas, indicando a total transformação deste mineral em metacaulinitas nas temperaturas aplicadas e confirmando a faixa ideal de temperatura para operação de fornos industriais. Observa-se que em todas as amostras do capeamento foi evidenciada a presença dos minerais hematita e gibbsita e ausência do mineral muscovita.

Foram observados para as amostras do Tipo A, designadas como argilas sedimentares, uma composição mineralógica básica de caulinita e quartzo, subordinadamente feldspato, muscovitas e minerais de titânio.

Para as amostras do Tipo B, designadas como alteritas, foi observada uma composição mineralógica básica de quartzo, caulinita e muscovita, subordinadamente feldspatos e minerais de titânio.

Para as amostras do Tipo C, caracterizadas como argilas coluvionares, foi identificada uma composição mineralógica básica de quartzo, caulinita e gibbsita, subordinadamente com hematita e minerais de titânio

5.1.5 ENSAIOS DE APLICAÇÃO

5.1.5.1 Índice de atividade pozolânica com cal – NBR 5751/92

Os resultados dos ensaios de pozolanicidade para as amostras de furos de sondagem são apresentados por completo no Anexo II. Os resultados relativos às amostras de furos de trado selecionadas para estudo tecnológico e da amostragem complementar realizada nas trincheiras estão resumidos nas Tabelas 5.10 e 5.11.

Na tabela 5.10 são apresentados os resultados referentes às amostras de trado, onde são diferenciados dois lotes de argilas com faixas de resistência a compressão bem definidas, aqui identificadas como EcBrB (tipo B) e EcBrA (tipo A).

Tabela 5.10 - Ensaios de Índice de Atividade Pozolânica IAP – Amostras de furos de trado

FURO	AMOSTRA	TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO (°C)	# 325 (%)	RC 7D (Mpa)
H0	EcBrB2	700	4,4	3,8
		800	5,7	8,4
		900	9,4	11
F0	EcBrB1	700	1,7	4,8
		800	7,8	5
		900	7,4	9,4
<i>D8</i>	<i>EcBrA2</i>	700	10	8,1
		800	6,1	13,8
		900	8	17
D8	EcBrA2	700	8,4	15,6
		900	8,5	14,6

OBS: Em itálico amostra não caracterizada
Resistência a compressão após sete dias:RC 7D

Na tabela 5.11 são apresentados os resultados referentes às amostras complementares coletadas em trincheira, segundo os litotipos caracterizado como tipo A, B e C. Pode ser diferenciados três lotes de argilas com faixas de resistência a compressão bem definidas: o lote tipo A com média de resistência a compressão de 16 Mpa, o lote tipo B com média de 6,7 Mpa e o lote C, referente ao capeamento, com média de 7,6 Mpa de resistência.

Tabela 5.11 - Resultados de ensaios IAP para argilas tipo A,B e C (amostras de trincheiras) calcinadas em laboratório

AMOSTRA	TIPO	TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO (°C)	% PESO RETIDA EM 325#	RC a 7 (Mpa)
PLE(01)	A	700	2,3	16,7
		800	2,5	17,1
		900	2,3	13,5
PLE(02)	A	700	2,4	17,5
		800	2,6	16,2
		900	1,5	14,8
PLE(03)	A	700	2,2	18,8
		800	2	19,4
		900	2,8	19,4
PLE(04)	B	700	1	4,5
		800	1	5
		900	2,5	6,7
PLE(05)	B	700	2	5,6
		800	2,9	5,3
		900	1,8	8,8
PLE(06)	C	700	6,2	7,6
		800	3	9,3
		900	4,7	6,5
PLE(07)	A	700	3,7	15,4
		800	2,7	17,5
		900	2,5	13,6
PLE(08)	B	700	1,5	6,6
		800	1,6	7
		900	1,9	6,2
PLE(09)	B	700	1	6,1
		800	1,1	6
		900	2	7,2
PLE(10)	A	700	2,6	11,7
		800	2,8	15,1
		900	2,7	17

Na tabela 5.12 são apresentados os resultados de laboratório referentes à argila do tipo A calcinada em forno industrial; a temperatura do forno indicada no pirômetro oscilou entre 600-700° C, sendo que na zona de queima a temperatura efetiva foi de 780-800° C . Podem ser confirmados todas as características discutidas anteriormente para este tipo de argila; a média dos valores de resistência a compressão foi de 20 Mpa, sendo que o tempo médio de moagem foi de 26,6 horas para atingir a granulometria estabelecida para os ensaios.

Tabela 5.12 - Resultados de ensaios IAP para a argila tipo A calcinada em forno industrial (lotes de 5.700 t produzidas)

5.100 (produzidas)				
	ABSORÇÃO DE ÁGUA (% em peso)	TEMPO DE MOAGEM (hs)	% PESO RETIDA EM 325#	dias (mpa) (Mpa)
	23,1	22	4,7	20,3
	27,4	15	4,0	17,2
	25,6	27	5,7	18,5
	24,3	31	5,0	23,2
	20,7	30	8,0	23,8
	21,0	27	4,3	23,7
	26,0	27	6,0	27,0
	23,1	31	6,6	20,1
	22,5	30	5,0	28,9
	23,4	27	6,5	20,0
	22,9	25	3,5	25,6
	23,1	23	4,3	25,9
	23,2	34	5,5	19,0
	22,5	12	4,8	17,7
	23,7	13	9,5	15,0
	22,9	32	3,6	24,6
	23,1	44	4,4	26,8
	29,4	31	5,0	25,5
	30,7	30	9,4	15,9
	27,1	30	5,8	18,2
	25,8	17	5,4	11,6
	27,2	24	6,5	9,8
	27,7	31	10,0	12,6
	25,6	26	12,0	10,0
Média	24,7	26,6	6,1	20,0

Obs: Resistência a compressão após sete dias: RC 7D

Na tabela 5.13 são apresentados os resultados de laboratório referentes à argila do tipo B calcinada em forno industrial, a temperatura do forno oscilou entre 600 -700° C. A média dos valores de resistência a compressão foi de 7 Mpa com tempo de moagem inferior a 3 horas para atingir a granulometria estabelecida nos ensaios.

Tabela 5.13 - Resultados de ensaios para a argila tipo B calcinada em forno industrial (lotes de 4.300 t produzidas)

	ABSORÇÃO DE ÁGUA (% em peso)	TEMPO DE MOAGEM (hs)	% PESO RETIDA EM 325#	RC a 7 (Mpa)
	13,7	01:03	3	6,5
	14,7	02:40	2,7	6,7
	13,2	02:00	2,9	6,3
	13,5	01:30	2,5	6,4
	13,7	01:45	2,2	6,5
	14,2	01:30	2,8	6,7
	14,5	02:30	2,5	7,5
	12,6	02:30	2,5	7,1
	14,9	02:00	2,18	7,5
	16	02:00	2,5	6,2
	18,2	herzog	3,9	8,1
	14	herzog	3	7,5
	15,9	herzog	3,3	8
	13,7	herzog	4,3	8
	10,3	herzog	3,3	6,9
	8,5	herzog	2	6,7
	24,6	herzog	3	6,4
Média	14,5		2,9	7,0
Desvio Padrão	3,38		0,60	0,64

Obs: Herzog= moagem efetuada em moinho de anéis vibratórios marca herzog

Resistência a compressão após sete dias:RC7D

Com base nos resultados pode-se correlacionar as amostras selecionadas para ensaios tecnológicos, identificados como EcBrA e EcBrB, com as argilas aqui mencionadas como do tipo A e tipo B, cujo comportamento diferenciado foi confirmado nas amostras calcinadas no forno industrial.

Na tabela 5.14 são apresentados os resultados de laboratório referentes à argila do tipo C calcinada em forno industrial, a temperatura do forno oscilou entre 600 -700° C. A média dos valores de resistência a compressão foi de 7 Mpa com tempo de moagem inferior a 3 horas para atingir a granulometria estabelecida nos ensaios.

Tabela 5.14 - Resultados de ensaios para a argila tipo C calcinada em forno industrial (lotes de 900 t produzidas)

	ABSORÇÃO DE ÁGUA (% em peso)	TEMPO DE MOAGEM (hs)	% PESO RETIDA EM 325#	RC a 3 dias (Mpa)	RC a 7 dias (Mpa)
	25,0	0,2	3	4,4	6,2
	25,5	0,5	4,3	4,7	6,5
	25,5	0,0	1,5	6,5	9,5
Média	25,3	0,2	2,9	5,2	7,4

As argilas coluvionares, aqui identificadas como argilas do tipo C, apresentaram reatividade no ensaio de atividade pozzolânica com cal (NBR 5751/1992), além de possuírem óxidos corretivos na matéria prima para fabricação do clínquer, se prestam ao uso industrial como corretivos e como aditivos pozzolânicos, estes limitados atualmente pela coloração vermelha na queima. Vale ressaltar que estas argilas fazem parte do capeamento da jazida de de calcário, dos alteritos e das argilas sedimentares.

5.1.5.2 Índice de atividade pozzolânica com cimento – NBR 5752/92

Para as argilas identificadas como do tipo B as correlações de campo e características tecnológicas verificadas em laboratório apontaram para um material que deve ser utilizado com cautela no processo industrial, devido à sua qualidade inferior. Para tais argilas foram efetuados testes de resistência a compressão com cimento, simulando de fato as características do cimento pozzolânico, onde através da substituição parcial do clínquer por pozzolana pode-se avaliar o resultado.

Os dados da tabela 5.14 referem-se a ensaios de resistência à compressão realizados em laboratório com as argilas calcinadas em forno industrial, simulando, portanto, a produção do cimento. Verifica-se que a reatividade com cimento para a pozzolana do tipo B, considerada de qualidade inferior, atendendo as especificações de reatividade com cal atendeu, também, as especificações NBR 5736 (1991).

Tabela 5.15 - Resistência à compressão da argila tipo B calcinada em escala industrial

TIPO	ABSORÇÃO	7 dias CAL	1 dia CIM	1 dia PAD	3 dias CIM	3 dias PAD	7 dias CIM	7 dias PAD
B	18,1	7,6	16,6	21,2	29,6	32,4		38,4
B	18,2	8,1	18,3	21,2	29,5	32,4		38,4
B	14,0	7,5	18,4	21,2	29,5	32,4		38,4
B	15,9	8,0	15,2	21,2	30,2	32,4	34	38,4
B	13,7	8,0	15,6	21,2	29,0	32,4		38,4
B	20,0	6,9	17,2	21,2	31,0	32,4		38,4
B	29,8	7,1	17,0	21,2	30,6	32,4		38,4
B	24,6	6,4	14,2	21,2	28,8	32,4		38,4
média	19,29	7,45	16,56	21,20	29,78	32,40	34,00	38,40

Obs: CIM - Fibrocimento (Clinker+filler+gesso) com 16% de pozolana

PAD - Fibrocimento (Clinker+filler+gesso)

Para adição de 16% de pozolana, verifica-se que as resistências no ensaio de compressão axial a 1 dia, atendem em média o especificado pela norma (NBR 5736 – 1991), o que acontece também para resistências obtidas para 3 dias (17% acima do estabelecido pela norma). Se projetarmos estes valores para 28 dias poderemos verificar que a resistência atenderá com folga o limite mínimo estabelecido pela norma.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

A importância do uso de argilas calcinadas para aplicação como aditivo pozolânico na fabricação de cimento está na oferta de um produto tecnologicamente superior, no acesso abundante de materiais com estas características, por vezes capeando a própria jazida de calcário, e na demanda crescente do uso de escórias de alto forno por misturadores e pelas próprias siderúrgicas.

Foram alvo de prospecção rochas vulcânicas ácidas intemperizadas, arcósios, alinhamentos estruturais, planícies de inundação e localidades topograficamente planas ou com pequena inclinação, além de pequenas bacias. Nos alvos investigados, a sua maioria se reportou a pequenas ocorrências aluvionares de difícil aproveitamento sem métodos prévios de beneficiamento, destacando-se duas que atendiam às necessidades da fábrica de cimento localizada em Itaú de Minas. A área denominada Lagoa Pequena, com grandes dimensões, se trata provavelmente de um depósito sedimentar (dolina?) que futuramente atenderá a demanda da fábrica. Em função de atendimento aos aspectos legais, além de ocorrer na área da jazida de calcário, o alvo denominado Eucalipto foi escolhido para investigação e uso imediato, composto por argilas sedimentares e alteritas de rochas metassedimentares (filitos).

No depósito estudado, dimensionado em 478.000 t, as argilas sedimentares apresentaram características superiores, tanto em qualidade nos aspectos físicos e mineralógicos, como em operacionalidade, do que as argilas de alteritas.

Alteritas de rochas metassedimentares (sericitas filitos e quartzo xistos), ricas em filosilicatos, podem apresentar resultados satisfatórios se calcinadas em temperaturas elevadas, valendo-se também da desestruturação de outros argilominerais, além das caulinitas. A reatividade está relacionada com a quantidade de caulinita presente nas argilas e o teor de silicatos do clínquer, ressaltando que a reação só irá ocorrer quando possuir hidróxido de cálcio disponível, independente da quantidade de alumino silicatos amorfisados. O inconveniente operacional para uso de alteritas está relacionado com a friabilidade destes materiais.

As alteritas fazem parte dos sericita filitos e quartzo xistos do Grupo Araxá - Canastra que sobrepõem tectonicamente a jazida de calcário pertencente ao Grupo Bambuí. Foram classificadas em função de sua qualidade como argilas do TIPO B. Constituídas basicamente por quartzo, caulinita, muscovita e subordinadamente minerais de titânio e feldspatos, possuem coloração variável entre tons amarelados e brancos, texturalmente são

untuosas ao tato, extremamente finas, de difícil perfuração e de fácil moagem. Quimicamente apresentam características sílico-aluminosas (média de 65,5% SiO₂, 20,6% Al₂O₃, 2,3% Fe₂O₃, 0,5% CaO, 1,68% MgO, 5,04% K₂O). Mostram-se reativas com cal (7 Mpa a 7 dias) e cimento (29,7 Mpa a 3 dias) superando o limite mínimo de resistência à compressão especificado pela norma brasileira quando calcinadas, porém fazem-se necessárias misturas adequadas para melhor aproveitamento no processamento industrial. Podem ainda ser utilizadas como corretivos de alumínio e álcalis na composição da farinha (matéria prima para fabricação do clínquer).

As argilas sedimentares têm origem em deposições recentes em pequenas depressões e encontram-se sobrepostas e por vezes intercaladas às alteritas. Foram classificadas em função de sua qualidade, como argilas do TIPO A. Constituídas basicamente por caulinita e quartzo e subordinadamente muscovita, minerais de titânio e feldspato, possuem coloração em tons cinza a branco. Texturalmente possuem aspecto compacto, com pequenos grânulos de quartzo em sua matriz e restritas concreções ferruginosas; mostram baixa resistência à escavação e boa porosidade. Quimicamente apresentam características aluminosas (51,2% SiO₂; 33,10% Al₂O₃; 2,25% Fe₂O₃; 0,96% CaO; 0,47% MgO; 1,08% K₂O). Mostram-se altamente reativas com cal, com valores de resistência à compressão da ordem de 20 Mpa quando calcinadas, constituindo-se no principal minério para uso como pozolanas.

O capeamento coluvionar apresenta características físicas semelhantes à argila do TIPO A, ocorre em grande extensão na região sobreposto às rochas do Grupo Araxá-Canastra e do Grupo Bambuí separado destes por linha de seixos, chegando a atingir dezenas de metros de profundidade. Constituído por quartzo, caulinita e gibbsita, subordinadamente minerais de titânio e hematita, possui coloração em tons vermelhos a roxo. Quando calcinado a temperaturas próximas a 800 °C em mufla ou em forno industrial apresentou reatividade no ensaio com cal (9,3 Mpa) constituindo uma opção para fabricação de cimentos corados, como já produzidos em outra unidade industrial. Pode ser utilizado como corretivo de ferro e sílica em substituição parcial do minério de ferro atualmente utilizado na composição da farinha (matéria prima para fabricação do clínquer).

As investigações efetuadas no capeamento foram destacadas em função de sua grande abundância no entorno do empreendimento, por apresentar aspectos químicos, físicos e mineralógicos interessantes para uso como pozolanas ou mesmo como corretivos de óxidos na produção da farinha e também por capear jazidas de calcário. Em função da cor de queima, atualmente para o pequeno consumidor, a cor do cimento representa alto valor

agregado, fato que restringe a utilização de matérias primas com coloração distinta da cor tradicional.

Cada jazida de argila, seja de alteração (intempérico, diagenético ou hidrotermal) ou de origem sedimentar, possui características peculiares relacionadas com aspectos geológicos, físicos e químicos do material, sendo necessário caracterizar tecnologicamente para determinação das condições ideais de processamento. As condições de processamento se vinculam às características dos diferentes tipos de argilas, se calcinadas individualmente ou em misturas controladas, além de serem função do tipo de combustível, podendo ser aplicados modelos pré-determinados apenas quando conhecida a variabilidade das características das argilas na jazida.

A pesquisa de jazida de argilas a serem utilizadas como pozolanas envolve procedimentos peculiares de prospecção e de avaliação, com estreita relação com o estudo das características tecnológicas destas argilas que se mostram, junto com a logística da ocorrência, como os parâmetros decisivos para seu aproveitamento. Na prospecção com o objetivo de obter ganhos de agilidade é fundamental considerar os aspectos litológicos composições mineralógicas, feições estruturais, feições morfológicas e o clima da região.

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NENES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural province: na introduction. *Earth Science Reviews*, n. 17, p. 1-29, 1981.

AMBROISE, J.; MARTIN-CALLE, S.; PÉRA, J. Pozzolan behavior of thermally activated kaolin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. *Proceedings...* S.I.: ACI/CANMET, 1992. v. 1, Sp-132, p. 731-761.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Cimento Portland: atuais especificações e suas aplicações*. São Paulo, 2001. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Cimento Portland: atuais especificações e suas aplicações*. *Revista IBRACON*, n. 43, p. 59-60, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23: cimento Portland, determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 76: cimento Portland, determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine)*. Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR 7215: cimento Portland, determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

_____. *NBR 12826: cimento Portland e outros materiais em pó, determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico*. Rio de Janeiro, 1993.

_____. *NBR 12653: materiais pozolânicos*. Rio de Janeiro, 1992a. 3 p.

_____. *NBR 5751: materiais pozolânicos, determinação da atividade pozolânica, índice de atividade pozolânica com cal*. Rio de Janeiro, 1992b. 3 p.

_____. *NBR 5752: materiais pozolânicos, determinação da atividade pozolânica com cimento Portland, índice de atividade pozolânica com cimento*. Rio de Janeiro, 1992c. 3 p.

_____. *NBR 5732: cimento Portland comum*. Rio de Janeiro, 1991a. 5 p.

_____. *NBR 11578: cimento Portland composto*. Rio de Janeiro, 1991b. 5 p.

_____. NBR 5736/EB-758: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991c. 6 p.

BAILEY, S. W. (Ed.). *Micas. Reviews in Mineralogy*, v. 13, 584p, 1984.

BRENNER, T. L.; TEIXEIRA, N. A.; OLIVEIRA, J. A. L.; FRANKE, N. D.; THOMPSON, J. F. H. The O'tooke nickel deposits, Morro do Ferro, Brazil. *Economic Geology*, v. 85, n. 5, p. 904-920, 1990.

BRISTOW, C. M. Worldkaolins: genesis, exploitation and application. *Industrial Minerals*, v. 3, n. 8, p. 45-59, 1987.

CARVALHO, S. G.; CHOUDHURI, A.; FIORI, A. P.; OLIVEIRA, M. A. F.; SOARES, P. C. Paragêneses e possível: origem dos xistos básicos e ultrabásicos em Fortaleza de Minas e Arredores – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 1982. v. 2, p. 641-647.

CARVALHO, S. G.; SOARES, P. C.; ANGELI, N. Os processos formadores e deformadores das concentrações de cobre, zinco e níquel nos terrenos granito gresstone de Alpinópolis-MG. *Geociências*, Rio Claro, v. 15, n. esp., p. 9-39, 1996.

CAVALCANTE, J. C.; CUNHA, H. C.; CHIEREGATHI, L. A.; KAEFFER, L. Q.; ROCHA, J. M.; DAITX, E. C.; COUTINHO, M. G.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. *Projeto Sapucaí: relatório final de geologia*. Brasília: MME: DNPM, 1979. 299 p., 4 mapas.

DARDENNE, M. A. The Brasília Fold Belt: tectonic evolution South America. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. *Abstracts...* Rio de Janeiro: s.n., 2000. p. 231-263.

DEL LAMA, E. A. *Petrologia das Rochas Metamórficas de alto grau do Complexo Campos Gerais e correlações com o Complexo Varginha Guaxupé: estudos termobarométricos*. 1993. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1993

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. *Sumário mineral: 2004*. Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/sumárioMineral2004/sumáriomineral2004.htm>. Acesso em: 31 jan. 2005.

DÉSIR, J. M.; ALEXANDRE, J.; CASTRO, A. M. Estudo da atividade pozolânica da Metacaulinita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2001. 1 CD-ROM.

- DUARTE, A. L. S. *Caulim do Morro do Felipe, Baixo Rio Jarí, Estado do Amapá: contexto geológico e gênese*. 1996. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.
- FAVA, N.; TORRES, M. G.; LENHARO, S. L. R.; MARTINS, E. S.; BOAVENTURA, G. R.; GASPAR, J. C. Caracterização e Quantificação de argilo-minerais por difratometria de raios X e termogravimetria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1999. p. 1-15.
- FERNANDES, N. H. *Origem e evolução das Formações Ferríferas Bandadas no Sudoeste do Estado de Minas Gerais*. 2002. 190 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2002.
- FERNANDES, N. H.; CARVALHO, S. G.; BRENNER, T. L.; ZANARDO, A. Caracterização geológica, petrográfica e química das formações ferríferas relacionadas com o depósito Fortaleza de Minas no Sudoeste de Minas Gerais: In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 5., 1997, Penedo-Itatiaia, RJ. *Anais...* S.l.: SBG, 1997. v. 1, p. 412-413.
- FRITZSON, J. R.; BIONDI, J. C.; CHABAN, N. Geologia da Região de Pium-hí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1980, Camboriu, SC. *Anais...* São Paulo: SBG, 1980. v. 5, p. 2906-2917.
- GIESE, R. F. Kaolin minerals: structures and stabilities. *Reviews in Mineralogy*, v. 19, p. 29-66, 1988. Tema do volume: Hydrous phyllosilicates. Bailey.
- GOMES, C. S. F. *Minerais industriais: matérias primas cerâmicas*. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Científica, 1990. 247 p.
- GUGGENHEIM, S.; GROOS, A. F. K. Baseline studies of the Clay Minerals Society Course Clays: the thermal analysis. *Clay and Clay Minerals: journal of the Clay Minerals Society*, v. 49, n. 5, p. 433-443, 2001.
- HASUI, Y.; OLIVEIRA, M. A. F. Província Mantiqueira: setor central. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Coord.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. p. 308-344.
- HE, C.; MAKOVICKY, E.; OSBÆCK, B. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite. *Applied Clay Science*, v. 17, n. 3, p.141-161, 2000.
- _____; _____. Thermal treatment and pozzolanic activity of Na- and Ca-montmorillonite. *Applied Clay Science*, v. 10, n. 351-368, 1996.
- _____; _____. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. *Applied Clay Science*, v. 9, n. 5, p. 337-354, 1995a.

_____; _____. Pozzolan reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 8, p. 1691-1702, 1995b.

_____; _____. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Applied Clay Science*, v. 9, n. 3, p.165-187, 1994.

HEILBRON, M.; VALERIANO, M.; ZIMBRES, E.; CHRISPIM, S. J.; SIMOES, L. S. A.; SOUZA, M. A. T. O contato basal do grupo Canastra entre Itaú de Minas e Carmo do Rio Claro, MG. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 4., 1987, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, SBG/MG, 1987. Boletim 7, p. 179-198.

KIHARA, Y. ; ESPER, M. W. *Perfil dos cimentos Portland pozolânicos brasileiros*. 2.ed. rev. atual. São Paulo: ABCP, 1986. 36 p.

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA. *Caracterização tecnológica de matérias-primas minerais*. Curso de extensão, março de 2000.

MACHADO, N.; SCHRANK, A. Geocronologia U/PB no maciço de Pium-hí: resultados preliminares. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5., 1989, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, SBG/MG, 1989. p. 47-79.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolan and cementitious materials. In: ADVANCES in concrete technology. Ottawa: Gordon and Breach, 1996. v. 1, 191 p.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. (Ed.). *LEA'S chemistry of cement and concrete*. 4. ed. London: Butterworth Heinemann, 2001. p. 471-636.

MEHTA, P. K. Role of pozzolan & cementitious by-products in sustainable development of the concrete industry in the Sixth CANMET/ACI/JCI Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, 1998. *Environmental Building News*: the leading newsletter on environmentally responsible design and construction. Disponível em: <<http://www.buildinggreen.com>>. Acesso em: 30 dez. 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994.

MIELENZ, R. C.; GREENE, K. T.; SCHIELTZ, N. C. Natural pozzolan for concrete. *Economic Geology*, v. 46, p. 311-328, 1951.

MONTANHEIRO, T. J. *Prospecção e caracterização de pozolanas na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo*. 1999. 226 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1997. 378 p.

MORALES, N.; HASUÍ, Y. Evolução tectônica da porção ocidental do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 7., 1993, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SBG/MG, 1993. p. 292-296.

MORSY, M.; SAAD, EL ENEIN; HANNA, G.B Microstructure and hidratation characteristics of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n.9, 1307-1312, 1997.

MOTTA, J. F.; ZANARDO, A.; CABRAL JR., M. As matérias-primas cerâmicas. Parte I: o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2, p. 30-39, 2001.

MURAT, M. Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. II: influence of mineralogical properties of the raw-kaolinite on the reactivity of metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, v. 13, p. 511-518, 1983.

MURRAY, H. H. Traditional and new application for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, v. 17, p. 207-221, 2000.

_____. Overview: clay mineral applications. *Applied Clay Science*, v. 5, p. 379-395, 1991.

MURRAY, H. H.; BUNDY, W. M.; HARVEY, C. C. (Ed.). *Kaolin genesis and utilization*. The Boulder, Colorado: Clay Minerals Sociey, 1993. 341 p.

ORSI, E. *Fabricação de pozolanas de argilas calcinadas: estudo de caso em uma indústria cimenteira*. 2004. 62 p. Monografia (Especialização em Gestão da Produção) – Universidade de Franca, Franca, São Paulo, 2004.

PATTERSON, S. H.; MURRAY, H. Kaolin, refractory clay, ball clay and halloysite in Norte America, Hawai, and the Caribeian Region. *Geological Survey Professional Paper*, n. 1306, 56p. 1984.

PINHO, D. *Avaliação do Comportamento Térmico de Argilas da Região de Passos, MG, visando sua aplicação como pozolanas*. 2003. 33 p. Monografia (Trabalho de Formatura) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Orient. Profa. Dra. Lília Mascarenhas Sant'Agostino.

_____. *Avaliação tecnológica de finos de mineração de areia para aplicação como pozolanas*. 2002. 69 p. Relatório de Iniciação Científica – FAPESP. Orient. Profa. Dra. Lília Mascarenhas Sant'Agostino.

ROIG, H. L. *Caracterização da zona de sutura Jacuí-Conceição da Aparecida, MG: implicações geotectônicas e metalogenéticas*. 1993. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, 1993.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calniced clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, p. 441-454, 2001.

SAITO, M. M. *O potencial de aplicação de estéril da mineração de areia, em Mogi das Cruzes (SP), como matéria-prima cerâmica e pozzolânica*. 2002. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SANT'ANNA, L. *Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do rift continental do Sudeste do Brasil*. 1999. 293 f., il., anexos. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SCHRANK, A. *Petrologia des Komatiites et des roches associeeis de la ceinture vertu du Masif Precambrien de Pium-hí (Minas Gerais – Brésil)*. 1982. 272 p. These (Docteur-Ingenieur) – Université de Paris-Sud, Orsay, 1982.

SHI, C.; DAY, R. L. Comparison of different methods enhancing reativity of pozzolans. *Cements and Concrets Research*, v. 31, p. 813-818, 2001.

SIMÕES, L. S. A. *Evolução tectonometamórfica da Nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais*. 1995. 149 f. Tese (Doutoramento) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SIMÕES, L. S. A.; VALERIANO, C. M. Porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília: estágio atual dos conhecimentos e problemas de correlação estratigráfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v. 6, p. 2564-2575.

SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DE CIMENTO. *Anuário*: 2002. Rio de Janeiro, 2003. 58 p.

_____. *Anuário*: 2004. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em:
<<http://www.sindicatodocimento.com.br>>. Acesso em: 31 janeiro 2005.

_____. *Anuário*: 2003. Rio de Janeiro, 2004. 60 p.

_____. *Anuário*: 2000. Rio de Janeiro, 2001. 58 p.

_____. *Anuário*: 1999. Rio de Janeiro, 2000. 58 p.

_____. *Anuário*: 1998. Rio de Janeiro, 1999. 58 p.

_____. *45 Anos*: 1953-1997. Rio de Janeiro, 1998. 62 p.

SMYKATZ-KLOSS, W. Differential thermal analysis: application and results in mineralogy. *Mineral and rocks*, v. 11, 185p. 1974.

SOARES, P. C.; CARVALHO, S. G.; FIORI, A. P. Evolução tectônica dos terrenos máficos-ultramáficos na Margem sul do Cráton do São Francisco. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3., 1991, Rio Claro. *Boletim*. Rio Claro: UNESP: SBG, 1991. p. 66-68.

SOARES, P.C.; FIORI, A. P.; CARVALHO, S. G. Tectônica colisional oblíqua entre o Bloco Paraná e a margem sul do Craton do São Francisco, no Maciço Guaxupé. In: . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG, 1990. v. 6, p. 2723-2734.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia das argilas*. 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992. v. 1.

STRIEDER, A. J.; NILSON, A. A. Melange ofiolítica nos metassedimentos Araxá de Abadiania (GO) e implicações tectônicas regionais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 2, p. 204-215, 1992.

TANNO, L. C. *Geologia e características tecnológicas das argilas esmectíticas da região de Franca*. 1995. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

TANNO, L. C.; MOTTA, J. F. M. Panorama setorial: minerais industriais. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, p. 37-40, 2000.

TEIXEIRA, N. A.; DANNI, J. C. M. Contribuição a estratigrafia do Grupo Araxá na Região de Passos (MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife: SBG, 1978. v. 2, p. 700-710.

TEIXEIRA, N. A.; GASPAR, J. C.; BRENNER, T. L.; CHENEY, J. C.; MARCHETO, C. M. L. Geologia e implicações geotectônicas do Greenstone Belt Morro do Ferro (Fortaleza de Minas, MG). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 17, p. 209-220, 1987.

THOREZ, J. *Practical identification of clay minerals*: a handbook for teachers and students in clay mineralogy. Dison: Lelotte, 1976. 90 p.

VALERIANO, C. M. *Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da represa de Furnas, sudoeste de Minas Gerais*. 1992. 192 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

VALERIANO, C. M.; SIMOES, L. S. A. Geochimistry of proterozoic mafics rocks from the Passos Nape (Minas Gerais, Brazil): tectonic implications to the evolution of the southern Brasília Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 1, p. 99-110, 1997.

VELDE, B. *Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses, and environmental significance*. London; New York : Chapman & Hall, 1992. 198 p.

WERNICK, E.; ARTUR, A. C. Evolução policíclica dos terrenos arqueanos no leste do estado de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2., 1983, Belo Horizonte. *Boletim*. Belo Horizonte: SBG/MG, 1983. v. 12, p. 292-296.

YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y.; COIMBRA, A. M.; MONTANHEIRO, T. J. Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil. *Environmental Geosciences*, v. 4, n. 4, p. 192-206, 1997.

ZAMPIERI, V. A. *Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico*. 1993. 233 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. 1989. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZANARDO, A. *Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé – Passos – Delfinópolis (MG)*. 1992. 288 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1992.

ZANARDO, A.; DEL LAMA, E. A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M. A. F. Geologia da porção limítrofe entre os Blocos São Paulo e Brasília. *Geociências*, Rio Claro, v. 15, n. esp., 15p. 1996a.

ZANARDO, A.; OLIVEIRA, M. A. F.; DEL LAMA, E. A.; CARVALHO, S. G. Rochas máficas-ultramáficas da faixa Jacuí-Bom Jesus da Penha-Conceição da Aparecida (MG). *Geociências*, Rio Claro, v. 15, n. esp., p. 279-297, 1996b.

ZVYAGIN, B. B. Current problems with the nomenclature of phyllosilicates. *Clay and Clay Minerals*, v. 49, n. 6, p. 492-499, 2001.

ANEXO I - Composição Química das Amostras dos furos de sondagem

FURO	Profundidade (m)		Teores (% em peso)								
	DE (m)	ATE (m)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	PF
H0	5,5	17	64,4	20,9	2,28	0,37	1,77	5,11	0,15	0,05	4,77
F0	9	20	65,5	20,6	2,17	0,46	1,68	5,04	0,21	0,03	4,14
D8	5	7	45,8	35,07	3,16	0,64	0,2	0,72	0,01	0,1	14,1
D8	10	19	51,2	33,1	2,24	0,96	0,18	0,76	<0,01	0,14	11,3
J8	0	10	47,3	23,04	9,91	4,29	0,33	1,47	0,02	0,21	13,23
L0	2	7	51,26	30,29	2,97	3,02	0,32	1,76	0,06	0,1	10,02
J0	2,5	5	63,14	19,69	3,62	0,77	0,66	4,73	0,14	0,2	6,85
J0	5	9,5	62,83	21,12	2,86	0,6	0,74	5,18	0,12	0,05	6,3
H10	0	3,5	51,03	32,24	2,72	0,38	0,15	0,83	0,08	0,13	12,24
H2	10	16	62,73	21,66	2,47	0,6	0,7	4,87	0,09	0,08	6,6
H2	16	18	68,41	18,17	2,67	0,3	0,63	4,38	0,1	0,03	5,11
D4	6	12	52,45	29,98	2,13	4,59	0,24	0,92	0,02	0,27	9,2
D4	12	15	57,05	26,18	2,07	9,93	0,28	1,1	0,03	0,98	2,18
D4	15	20	61,54	22,77	2,1	3,11	0,62	3,75	0,04	0,16	5,71
F2	15	20	54,51	28,05	2,3	4,57	0,35	1,82	0	0,22	7,98
L4	6,5	11	47,73	32,4	3,92	1,68	0,19	0,83	0,03	0,1	12,92
L4	11	13	49,53	33,24	2,52	0,81	0,21	0,93	0,05	0,1	12,41
L4	17	20	48,96	32,68	3,36	0,95	0,2	0,88	0,04	0,06	12,67
H4	12	15	54,07	29,63	2,24	0,71	0,31	1,81	0,03	0,13	10,87
H12	0	2	51,02	31,2	3,22	0,56	0,17	0,86	0,1	0,08	12,59
H12	2	5,5	51	30,82	3,53	0,51	0,16	0,8	0,01	0,11	12,86
F4	14	20	56,88	23,56	3,94	0,61	0,54	3,43	0,01	0,09	10,74
J4	16	20	60,74	23,52	2,37	0,41	0,64	4,39	0,1	0,06	7,57
F10	0	12	51,22	32,45	3,5	1,17	0,16	0,77	0,01	0,13	10,34
L0	7	9	74,73	16,4	2,43	0,61	0,34	1,97	0,03	0,05	3,24

ANEXO II –Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica- IAP-para os furos de sondagem

FURO	DE (m)	ATE (m)	Temperatura Calcinação (°C)	# 325 (%)	Massa Específica (%)	H2O	RC 7D (Mpa)	COR DA ARGILA
H0	5,5	17	700	4,4	2,64	167	3,8	BRANCA
			800	5,7	2,63	169	8,4	BRANCA
			900	9,4	2,63	167	11	BRANCA
H0	14	17	700	6,7	2,63	170	2,3	BRANCA
			800	9,6	2,66	168	9,2	BRANCA
			900	8,8	2,65	165	10,6	BRANCA
F0	9	20	700	1,7	2,61	228	4,8	BRANCA
			800	7,8	2,61	221	5	BRANCA
			900	7,4	2,63	197	9,4	BRANCA
D8	5	7	700	10	2,56	162	8,1	BRANCA
			800	6,1	2,66	170	13,8	BRANCA
			900	8	2,61	161	17	BRANCA
D8	10	19	700	8,4	2,58	284	15,6	BRANCA
			800					BRANCA
			900	8,5	2,67	266	14,6	BRANCA
L0	2	9	700	10,5	2,64	269	8,7	BRANCA
			800	8,4	2,64	267	7,7	BRANCA
			900	9,3	2,63	255	11,3	BRANCA
J0	5	9,5	700	4	2,58	169	4,3	BRANCA
			800	4,5	2,58	166	5,5	BRANCA
			900	4	2,62	167	11,3	BRANCA
H10	0	3,5	700	8,8	2,54	282	16,4	BRANCA
			800	8,5	2,53	267	14,3	BRANCA
			900	10	2,54	256	12,7	BRANCA
H2	10	18	700	2,4	2,59	165	4,7	BRANCA
			800	5,3	2,61	169	7,1	BRANCA
			900	10,2	2,64	163	10,2	BRANCA
D4	6	20	700	7,5		266	9,5	BRANCA
			800	7	2,61	244	12,5	BRANCA
			900	7,3	2,6	222	11,3	BRANCA
F2	15	20	700	5,6	2,56	295	11,4	BRANCA
			800	5,5	2,68	290	11,8	BRANCA
			900					BRANCA
H6	17	20	700	1,1	2,65	190	0	BRANCA
			800	10	2,68	188	0	BRANCA
			900	10,5	2,67	186	1,3	BRANCA
H4	12	17	700	9	2,59	263	8,1	BRANCA
			800	9,8	2,58	262	11,6	BRANCA
			900	7,5	2,64	257	11,2	BRANCA
F4	14	20	700		2,62	254	8,8	BRANCA
			800	5,5	2,65	239	12	BRANCA
			900	6,1	2,65	220	14,2	BRANCA
J4	16	20	700	2,5	2,65	238	5,5	BRANCA
			800	8	2,62	234	5,6	BRANCA
			900	8	2,62	228	7,2	BRANCA
F8	4	8,5	700	5,5	2,55	284	18,3	BRANCA
			800	5	2,74	276	18,8	BRANCA
			900	5	2,7	243	13	BRANCA
F10	12	17,5	700	7	2,55	288	10,9	BRANCA
			800	6	2,66	270	15,7	BRANCA
			900	7,5	2,69	248	13,3	BRANCA

obs: Porcentagem retida na peneira: # 325
 Água de consistência (amassamento) da argamassa com cal: H2O
 Resistência a compressão após sete dias: RC 7D

ANEXO III – Difrátogramas de Raios x para as amostras estudadas

ANEXO III – Difratoogramas de Raios x para as amostras calcinadas da Jazida Eucalipto

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (tal qual)

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (Calcina à 210°C)

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (Calcina à 410°C)

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (Calcina à 500°C)

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (Calcina à 700°C)

Difratograma de raio x para a amostra EcBrA2 (Calcina à 970°C)

Difratogramas de Raios x para amostras *in natura* e calcinadas à 700°C, 800°C, 900°C coletadas nas trincheiras (Alteritas de sericita filito, argilas sedimentares e argilas coluvionares).

Pico da muscovita para as argilas de alteritas, argilas sedimentares e colúvio.

Pico da Caulinita para as argilas de alteritas, argilas sedimentares e colúvio.

Pico da Muscovita e Caulinita para argilas coluvionares, *in natura*, calcinadas a 700°C, 800°C, 900°C. Não ocorre muscovita nas amostras. Destruição total da caulinita após aquecida (700°C, 800°C, 900°C).

Argilas de alteritas, argilas sedimentares e coluvionartes, *in natura* e calcinadas a 900°C. Presença caulinita, quartzo, muscovita e feldspatos..

Pico da Muscovita e Caulinita para argilas de Alteritas /Sericita filito, *in natura*, calcinadas a 700°C, 800°C, 900°C. Permanência de picos de muscovita após calcinação.

Pico da Muscovita e Caulinita para argilas sedimentares, *in natura*, calcinadas a 700°C, 800°C, 900°C. Não ocorre muscovita nas amostras. Destruição total da caulinita após aquecida (700°C, 800°C, 900°C).