



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

# **ESTUDO DA ARGILA POZOLÂNICA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO: ÁREA BONSUCESSO - REGIÃO DE PLANALTINA - DF**

**MAX LÂNIO LACERDA**

**Dissertação de Mestrado Nº 200**

**BRASÍLIA - DF  
2005**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

# **Estudo da argila pozolânica utilizada na produção de cimento: área Bonsucesso - região de Planaltina - DF**

**MAX LÂNIO LACERDA**

**Dissertação de Mestrado Nº 200**

**ORIENTADOR: Dr. Carlos José Souza de Alvarenga (UnB)**

**EXAMINADORES: Dra. Edi Mendes Guimarães (UnB)  
Dr. Jorge Kazuo Yamamoto (USP)**

Brasília, 2005

À memória de meu filho,  
Álex Sales Lacerda,  
minha luz espiritual.

## RESUMO

A dissertação de mestrado aqui apresentada tem por principal objetivo comparar os métodos utilizados para estudar o perfil Bonsucesso, verificar a aplicação de cada um deles e compreender e identificar a gênese da caulinita que ocorre no perfil estudado.

A mina Bonsucesso a nordeste do Distrito Federal foi estudada por diferentes métodos que incluem: difratometria de raios-X, análises químicas, microscopia eletrônica de varredura, microscopia ótica, análises físicas de medição de resistência mecânica de corpos-de-prova, análises químicas baseadas na combinação do hidróxido de cálcio com a pozolana e critérios de cor.

Os resultados permitiram identificar o perfil Bonsucesso como produto de intemperismo a partir de rochas metassedimentares. A caulinita é a fase mineral responsável pela atividade pozolânica da argila e pelo processo de “esbranquecimento” do perfil em direção ao topo. É formada inicialmente no saprolito a partir de ilita detrítica, produzindo o politipo 1Md e transforma-se no politipo 1A no *solum*.

A intemperização de Bonsucesso configura um processo de intemperismo químico por hidrólise típico de clima intratropical. O processo de caulinitização possivelmente continua ocorrendo no presente.

A argila da mina Bonsucesso se torna pozolânica por calcinação a 800 °C por 30 minutos e o pacote formado pelo minério possui 15m de espessura de pozolanas de boa qualidade, apresentando resultados de resistência mecânica com o hidróxido de cálcio de 16 MPa e de 69% da resistência mecânica do cimento de referência.

O método físico, índice de atividade pozolânica da argila calcinada + hidróxido de cálcio, é o único método conclusivo acerca da pozolanicidade das argilas. Deve ser combinado com a verificação de cor da argila calcinada para confirmar a viabilidade do uso industrial da pozolana.

Os métodos baseados em critérios geológicos ou mineralógicos ou químicos ou de densidade, cada um combinado com os parâmetros de cor, podem substituir o método combinado do índice de atividade pozolânica + cor no controle de lavra e, na prospecção de áreas de mineralogia similar a de Bonsucesso.



## ABSTRACT

The main objective of this master thesis was to compare the methods used in order to understand the Bonsucesso profile, to verify the utilization of each of them and to understand and to identify the kaolinite genesis that occurs in the studied profile.

The Bonsucesso quarry is located in the northeast of the Distrito Federal and was studied by different methods that include: X-ray diffraction, chemical analyses, scanning electron microscope, petrographic microscopy, physical analyses of mechanical performance, chemical analyses of  $\text{Ca(OH)}_2$  with pozzolan and color criteria.

The results has allowed identifying the Bonsucesso profile as a product of weathering from metasedimentary rocks. The kaolinite is the mineral phases responsible to provide the pozzolanic activity of the clay and also is responsible to turn the profile more “white” in direction to the top. It is formed first in the saprolite from the detritic illite, producing the 1Md politipe. After that the 1Md politipe changes into 1A politipe in the *solum*.

The weathering process of Bonsucesso configures a chemical weathering by hydrolysis very common in intratropical climate. The kaolinitization process is believed to keep going on the present day.

The Bonsucesso clay becomes pozzolanic by calcination at 800 °C to 30 minutes and the layer of ore is 15 meters thickness, consisting of a good quality pozzolan. It exhibits compressive strengths with  $\text{Ca(OH)}_2$  of 16 MPa and 69% of the compressive strengths of the compared cement.

The physical method – index of pozzolanic activity of the calcined clay +  $\text{Ca(OH)}_2$  – is the only conclusive method to confirm the pozzolanic properties of the clays. In order to confirm the viability to industrial use of the pozzolan this method must be used combined with the color criteria.

The methods supported by geologic or mineralogical or chemical or density criteria, each one agreement with the color parameters, may substitute the index of pozzolanic activity combined with color criteria in the quarry control and in the prospection of similar areas in mineralogy to Bonsucesso.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por me permitir a realização desta obra. Agradeço a todos, indistintamente, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução do presente trabalho.

Ao Instituto de Geociências da UnB, representado por todos os docentes, servidores e aos colegas discentes, minha gratidão pela convivência e suporte que me forneceram durante esta jornada. Em especial, meus sinceros agradecimentos aos docentes Dr. Carlos José Souza de Alvarenga e Dra. Edi Mendes Guimarães que disponibilizaram, irrestritamente, seu conhecimento e seu tempo ao meu aprendizado.

Ao Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura, ao Renato Wiliam Pereira e ao Fernando Souza Cavalcante, que gentilmente ofereceram seu apoio e ajuda no Laboratório de Geoquímica do IG-UnB, meu muito obrigado.

A secretaria do Instituto de Geociências, nas pessoas de Valdeci da Silva Reis, Francisca Rodrigues Freitas, Maristela Menezes Araújo, Rômulo Franco de Melo, Lusilene de Oliveira Leal Ramos, os meus sinceros agradecimentos por seu apoio em todos os momentos que precisei.

À Francisca da Chagas Moraes e Adalgisa Ferreira dos Santos por seus ensinamentos e apoio na preparação das lâminas petrográficas no laboratório de lâminas do IG-UnB, meus sinceros agradecimentos.

Ao Rogério Lourenço Balbino e Abel Nunes de Oliveira por sua prontidão e disponibilidade para nos ajudar no CPD do IG-UnB, meu muito obrigado.

Ao Marcos Macilo Sobral e ao Sr. Ricardo Ribeiro da Silva por seu importante apoio na área de fotocópias, muito obrigado.

Aos colegas da pós-graduação gostaria de registrar minha gratidão por seu apoio incondicional e por seu sincero companheirismo e, em especial, aos colegas de convivência mais próxima, Camila Wense Dias dos Anjos, Glória Josevina Obando, Ricardo Piazza Meireles e Cláudio.

Ao colega Geólogo Samuel Fernandes da Costa Neto por sua prontidão tanto na preparação da amostra como auxílio à interpretação dos resultados no laboratório de difratometria de Raios-X do IG-UnB, meu muito obrigado.

Meus sinceros agradecimentos ao amigo Geólogo Wiliam Marcelino Coelho por sua disponibilidade para debates e trocas de idéias que tanto contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro provido ao projeto, sem o qual sua viabilização teria sido de difícil consecução.

Meus agradecimentos ao Laboratório de FURNAS, Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia, especialmente ao Engenheiro Alfredo Santos Liduário, ao Engenheiro Flávio de Lima Vieira, à Engenheira Luciana dos Anjos Farias, à Geóloga Ana Livia Zeitune, ao Engenheiro Marcos Daniel de Almeida Soares, ao Engenheiro Álvaro Donizeti Lopes e aos Técnicos Dorival Tizzo, Érico Ribeiro Fatoreto, Alicio José da Costa, Danilo José Dias, Ademir José da Costa e Wiliam Sobreira Costa por sua importante dedicação e apoio da realização das análises.

Meus agradecimentos à Votorantim-Cimentos, representada pelo Engenheiro Paulo Henrique Ataíde, por acreditar que o trabalho científico pode contribuir para o progresso de uma indústria.

À minha família, em especial, agradeço por sua compreensão e incondicional apoio à realização do mestrado, sempre firme ao meu lado.

Finalmente, dedico este trabalho à memória de meu filho Álex Sales Lacerda. A você meu amado filho, muito obrigado por tudo que nos ensinou e por sua convivência tão feliz nestes intensos anos que passamos juntos.

# Índice

|                        |      |
|------------------------|------|
| Resumo .....           | I    |
| Abstract.....          | II   |
| Agradecimentos.....    | III  |
| Índice Geral.....      | .V   |
| Índice de Figuras..... | VII  |
| Índice de Tabelas..... | VIII |

## **Índice Geral**

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I - Introdução .....                                                                | 1  |
| II – Contexto Geológico.....                                                        | 4  |
| II.1 – Faixa Brasília.....                                                          | 4  |
| II.2 – Grupo Paranoá .....                                                          | 6  |
| II.2.1 – Sistema Depositional da Sequência Paranoá.....                             | 8  |
| II.2.2 – Geologia Estrutural.....                                                   | 9  |
| II.3 – Geologia Local.....                                                          | 9  |
| III – Cimento Portland.....                                                         | 18 |
| III.1 – Fabricação do Cimento Portland.....                                         | 18 |
| III.2 – Cimento Portland: conceitos, tipos principais e resistências mecânicas..... | 20 |
| III.3 – Processos de Hidratação e Endurecimento do Cimento Portland.....            | 22 |
| III.4 – Cimento Portland Composto e Cimento Portland Pozolânico.....                | 22 |
| IV – Pozolanas.....                                                                 | 24 |
| IV.1 – Definições e Conceitos Básicos de Argilas e Argilominerais.....              | 24 |
| IV.2 – Argilomineral: gênese da caulinita.....                                      | 25 |
| IV.3 – Calcinação de Argilominerais: caulinita.....                                 | 26 |
| IV.4 - Mecanismo Químico da Atividade Pozolânica.....                               | 28 |
| IV.5 - Classificação das Pozolanas.....                                             | 29 |
| IV.5.1 - Classificação das Pozolanas Baseada em Atividade-tipo.....                 | 29 |
| IV.5.2 - Classificação das Pozolanas Baseada na Natureza da<br>Matéria-Prima.....   | 30 |
| IV.6 – Vantagens do Uso de Pozolana no Cimento.....                                 | 33 |
| V – Materiais e Métodos.....                                                        | 34 |
| V.1 – Materiais.....                                                                | 34 |
| V.1.1 – Amostragem e Preparação das Amostras.....                                   | 34 |
| V.2 – Métodos.....                                                                  | 37 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| V.2.1 – Difração de Raios-X.....                                                       | 37 |
| V.2.2 – Análises Químicas.....                                                         | 40 |
| V.2.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura.....                                       | 40 |
| V.2.4 – Calcinação da Argila Pozolânica.....                                           | 40 |
| V.2.5 – Métodos Baseados na Medição da Resistência Mecânica de<br>Corpos-de-Prova..... | 41 |
| V.2.5.1 – Determinação de Atividade Pozolânica com Cal.....                            | 41 |
| V.2.5.2 – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento.....                        | 42 |
| V.2.6 – Método Baseado na Combinação da Cal com a Pozolana:<br>Método de Fratini.....  | 42 |
| V.2.7 – Análise Petrográfica.....                                                      | 44 |
| VI – Resultados.....                                                                   | 45 |
| VI.1 – Difração de Raios-X.....                                                        | 46 |
| VI.2 – Análises Químicas.....                                                          | 52 |
| VI.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura.....                                        | 59 |
| VI.4 – Calcinação da Argila Pozolânica.....                                            | 62 |
| VI.5 – Determinação de Atividade Pozolânica.....                                       | 65 |
| VI.6 – Método de Fratini.....                                                          | 71 |
| VII – Discussões. ....                                                                 | 74 |
| VIII – Conclusões.....                                                                 | 77 |
| IX – Referências Bibliográficas.....                                                   | 80 |
| X – Anexos.....                                                                        | 86 |

## Índice Figuras

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura I – Mapa de Localização.....                                                                            | 3  |
| Figura II.1 – Mapa Geológico da Faixa Brasília.....                                                            | 5  |
| Figura II.2 - Coluna litoestratigráfica da Sequência deposicional Paranoá.....                                 | 7  |
| Figura II.3 – Vista geral da região da área de Bonsucesso.....                                                 | 10 |
| Figura II.4 – Mapa geológico da área Bonsucesso.....                                                           | 11 |
| Figura II.5 – Vista geral da área estudada.....                                                                | 12 |
| Figura II.6 – Vista do talude da base.....                                                                     | 13 |
| Figura II.7 – Vista do talude intermediário.....                                                               | 13 |
| Figura II.8 – Trincheira de pesquisa.....                                                                      | 14 |
| Figura II. 9 – Fotomicrografia de quartzito.....                                                               | 14 |
| Figura II. 10 – Fotomicrografia de quartzito.....                                                              | 15 |
| Figura II. 11 – Fotomicrografia de quartzito.....                                                              | 15 |
| Figura II.12 – Descrição geológica do perfil vertical da área Bonsucesso.....                                  | 16 |
| Figura II.13 – Difractogramas de amostra total dos quartzitos.....                                             | 17 |
| Figura III.1 – Desenho esquemático do processo de fabricação do cimento portland.....                          | 19 |
| Figura III.2 – Fotografia do clínquer portland.....                                                            | 19 |
| Figura III.3 - Curva esquemática da evolução das reações de hidratação.....                                    | 23 |
| Figura V.1 – Amostragem de canal.....                                                                          | 35 |
| Figura V.2 - Preparação de amostras passo a passo.....                                                         | 36 |
| Figura V.3 – Fluxograma de preparação de lâminas na fração argila para DRX.....                                | 39 |
| Figura V.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio.....                                              | 44 |
| Figura VI.1 – Politipos da caulinita no perfil Bonsucesso.....                                                 | 49 |
| Figura VI.2 – Difractogramas de amostra total de Bonsucesso.....                                               | 50 |
| Figura VI.3 – Difractogramas de amostra total de Bonsucesso.....                                               | 51 |
| Figura VI.4 – Correlação entre os teores de $\text{SiO}_2$ e $\text{Al}_2\text{O}_3$ e a coluna amostrada..... | 56 |
| Figura VI.5 – Correlação entre os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ e a coluna amostrada.....                  | 56 |
| Figura VI.6 – Correlação entre os teores de $\text{MgO}$ e $\text{CaO}$ e a coluna amostrada.....              | 57 |
| Figura VI.7 – Correlação entre os teores de álcalis com a coluna amostrada.....                                | 57 |
| Figura VI.8 – Correlação entre os teores de $\text{TiO}_2$ e a coluna amostrada.....                           | 58 |
| Figura VI.9 – Correlação entre os teores dos elementos menores e a coluna amostrada.....                       | 58 |
| Figura VI.10 – Imagem de MEV da amostra C11; vista geral da caulinita.....                                     | 59 |
| Figura VI.11 – Imagem de MEV da amostra C11; grumos de caulinita.....                                          | 60 |
| Figura VI.12 – Espectro da massa que compõe a caulinita.....                                                   | 60 |
| Figura VI.13 – Imagem de MEV da amostra C11; cristal de quartzo.....                                           | 61 |
| Figura VI.14 – Espectro da massa do quartzo.....                                                               | 61 |
| Figura VI.15 – Comparação da variação de cor.....                                                              | 63 |
| Figura VI.16 – Comparação da variação de cor em corpos de prova de cimento.....                                | 64 |
| Figura VI.17 – Índice de atividade pozolânica: cal + argila.....                                               | 70 |
| Figura VI.18 - Índice de atividade pozolânica: cimento + argila.....                                           | 70 |
| Figura VI.19 – Evolução da densidade da argila <i>in natura</i> .....                                          | 71 |
| Figura VII – Correlação dos métodos.....                                                                       | 76 |

## Índice Tabelas

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela III.1 - Cimentos Portland brasileiros.....                                     | 21 |
| Tabela III.1 - Classe de resistências dos cimentos portland brasileiros.....          | 21 |
| Tabela IV.1 – Classificação básica de materiais pozolânicos.....                      | 29 |
| Tabela IV.2 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto ao componente ativo..... | 30 |
| Tabela IV.3 – Classificação das pozolanas quanto à natureza da matéria-prima.....     | 31 |
| Tabela IV.4 – Classificação das pozolanas por classes.....                            | 32 |
| Tabela IV.5 – Classificação das pozolanas por exigências químicas.....                | 32 |
| Tabela IV.6 – Classificação das pozolanas por exigências físicas.....                 | 32 |
| Tabela V.1 – Localização e identificação das amostras da área Bonsucesso.....         | 34 |
| Tabela V.2 – Mapa de identificação da difratometria.....                              | 38 |
| Tabela VI.1 – Composição mineralógica das argilas do perfil Bonsucesso.....           | 46 |
| Tabela VI.2 – Distribuição mineralógica.....                                          | 48 |
| Tabela VI.3 – Análises químicas para elementos maiores.....                           | 54 |
| Tabela VI.4 – Análises químicas para elementos menores.....                           | 55 |
| Tabela VI.5 – A atividade pozolânica e densidade.....                                 | 68 |
| Tabela VI.6 – Atividade pozolânica da argila <i>in natura</i> e calcinada.....        | 69 |
| Tabela VI.7 – Resultados simplificados do método Fratini.....                         | 73 |

## **Anexo 1 – Difratomogramas da Argila in natura – amostra total do Perfil de Bonsucesso**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura A1.1 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2    | 88 |
| Figura A1.2 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4    | 89 |
| Figura A1.3 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6    | 90 |
| Figura A1.4 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2    | 91 |
| Figura A1.5 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C3 e C4    | 92 |
| Figura A1.6 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C5 e C6    | 93 |
| Figura A1.7 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C7 e C8    | 94 |
| Figura A1.8 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C9 e C10   | 95 |
| Figura A1.9 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C11 e C12  | 96 |
| Figura A1.10 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C13 e C14 | 97 |
| Figura A1.11 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C15 e C16 | 98 |

## **Anexo 2 – Difratomogramas da Argila in natura – fração argila do Perfil de Bonsucesso**

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A2.1 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2   | 100 |
| Figura A2.2 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4   | 101 |
| Figura A2.3 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6   | 102 |
| Figura A2.4 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11 | 103 |
| Figura A2.5 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13 | 104 |
| Figura A2.6 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C14       | 105 |

## **Anexo 3 – Difratomogramas da Argila Calcinada do Perfil de Bonsucesso**

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A3.1 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2    | 107 |
| Figura A3.2 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4    | 108 |
| Figura A3.3 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6    | 109 |
| Figura A3.4 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2    | 110 |
| Figura A3.5 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C4 e C5    | 111 |
| Figura A3.6 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C6 e C7    | 112 |
| Figura A3.7 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C8 e C9    | 113 |
| Figura A3.8 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11  | 114 |
| Figura A3.9 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13  | 115 |
| Figura A3.10 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C14 e C15 | 116 |
| Figura A3.11 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C16       | 117 |



#### **Anexo 4 – Isotermas de Solubilidade do Hidróxido de Cálcio a 40 °C, em Presença de Álcalis, da Argila Calcinada da Área Bonsucesso**

118

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A4.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A1                               | 120 |
| Figura A4.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A2                               | 121 |
| Figura A4.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A3                               | 122 |
| Figura A4.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A4                               | 123 |
| Figura A4.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A5                               | 124 |
| Figura A4.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A6                               | 125 |
| Figura A4.7 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C1                               | 126 |
| Figura A4.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C2                               | 127 |
| Figura A4.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C3                               | 128 |
| Figura A4.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C4                              | 129 |
| Figura A4.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C5                              | 130 |
| Figura A4.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C6                              | 131 |
| Figura A4.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C7                              | 132 |
| Figura A4.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C8                              | 133 |
| Figura A4.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C9                              | 134 |
| Figura A4.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C10                             | 135 |
| Figura A4.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C11                             | 136 |
| Figura A4.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C12                             | 137 |
| Figura A4.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C13                             | 138 |
| Figura A4.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C14                             | 139 |
| Figura A4.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C15                             | 140 |
| Figura A4.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C16                             | 141 |
| Figura A4.23 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio : amostra cimento de referência | 143 |

**Anexo 5 – Isotermas de Solubilidade do Hidróxido de Cálcio a 40 °C, em Presença de Álcalis, da Argila in natura da Área Bonsucesso** 144

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A5.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A1   | 146 |
| Figura A5.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A2   | 147 |
| Figura A5.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A3   | 148 |
| Figura A5.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A4   | 149 |
| Figura A5.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A5   | 150 |
| Figura A5.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio A6   | 151 |
| Figura A5.7 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C1   | 152 |
| Figura A5.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C2   | 153 |
| Figura A5.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C3   | 154 |
| Figura A5.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C4  | 155 |
| Figura A5.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C5  | 156 |
| Figura A5.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C6  | 157 |
| Figura A5.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C7  | 158 |
| Figura A5.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C8  | 159 |
| Figura A5.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C9  | 160 |
| Figura A5.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C10 | 161 |
| Figura A5.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C11 | 162 |
| Figura A5.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C12 | 163 |
| Figura A5.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C13 | 164 |
| Figura A5.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C14 | 165 |
| Figura A5.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C15 | 166 |
| Figura A5.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio C16 | 167 |

# **I – Introdução**

A área objeto do presente trabalho localiza-se a 32 km a NE de Brasília na Região Administrativa VI Planaltina, Região de Bonsucesso - Sítio Mantiqueira – ao longo da margem esquerda do Rio Maranhão, região limítrofe com o Município de Planaltina de Goiás. As coordenadas geográficas da área da mina são 15° 30' 47", latitude sul e 47° 35' 23", longitude oeste. O acesso é feito pela Br-020 e pelas vias secundárias 128 e 205 (Figura I).

A região do Distrito Federal possui duas fábricas de cimento instaladas na região administrativa de Sobradinho na localidade denominada Fercal. Desde 2002 vêm sendo produzidos cimentos pozolânicos nessas unidades industriais a partir de matérias-primas do Distrito Federal e entorno.

Historicamente nessas Unidades industriais não são encontrados registros de experiências em fabricação de cimentos pozolânicos com a utilização de matérias-primas do DF, portanto, o aproveitamento de argilas regionais na produção de cimentos pozolânicos constitui-se em uma experiência nova.

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar o estudo de uma jazida fornecedora de matéria-prima para cimentos pozolânicos. Para tanto, foi escolhida a área de Bonsucesso que entre 2004 e 2005 vinha sendo uma das fontes provedoras de argilas pozolânicas utilizadas na fabricação do cimento pozolânico de uma das plantas industriais.

A lavra é realizada por critérios físicos de medições da atividade pozolânica das argilas, combinado com o impacto de cor no cimento. Visando indicar outros possíveis critérios para o controle de extração do minério, apresentamos os objetivos específicos desta pesquisa:

- 1- Correlacionar e comparar os métodos utilizados neste trabalho para caracterizar o perfil amostrado com o método físico de medição da atividade pozolânica e buscar compreender a relação entre eles;
- 3- Verificar a possibilidade de utilização de outros métodos que possam substituir, no controle da lavra e eventualmente na prospecção, o critério físico de medição de atividade pozolânica de maior custo e maior tempo de resposta para obtenção de resultados;
- 3- Compreender e identificar a gênese da caulinita.

Esta dissertação foi dividida em duas partes principais, incluindo estudos bibliográficos e teóricos na primeira e a apresentação de dados e interpretações na segunda. No capítulo II é tratado o contexto geológico da área de estudo e no III é apresentada uma exposição básica sobre o cimento portland, enquanto no IV são apresentadas as características da pozolana.

No capítulo V são apresentados os Materiais e Métodos utilizados neste trabalho, contendo as indicações da coleta de amostras de superfície e por trado motorizado e descrição das amostras e os procedimentos analíticos para: difração de raios-X, análises químicas, análises físicas para medição da atividade pozolânica, análises químicas pelo método Fratini e análises petrográficas de quartzitos da base da área estudada. No capítulo VI são apresentados os resultados das análises e no VII são discutidas as propostas e sugestões levantadas nos objetivos em função dos resultados apresentados. Finalmente, no capítulo VIII são apresentadas as conclusões do trabalho.

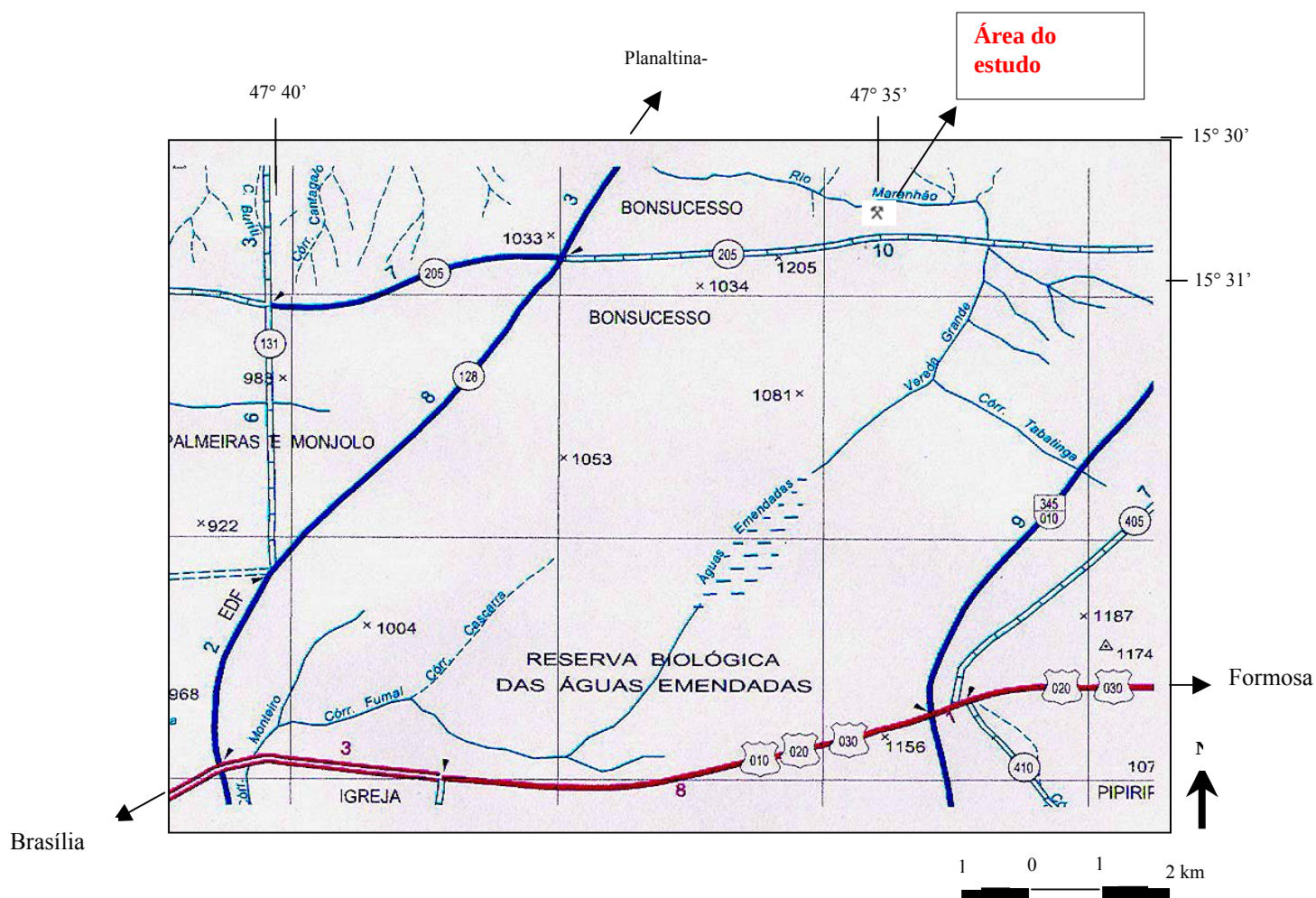
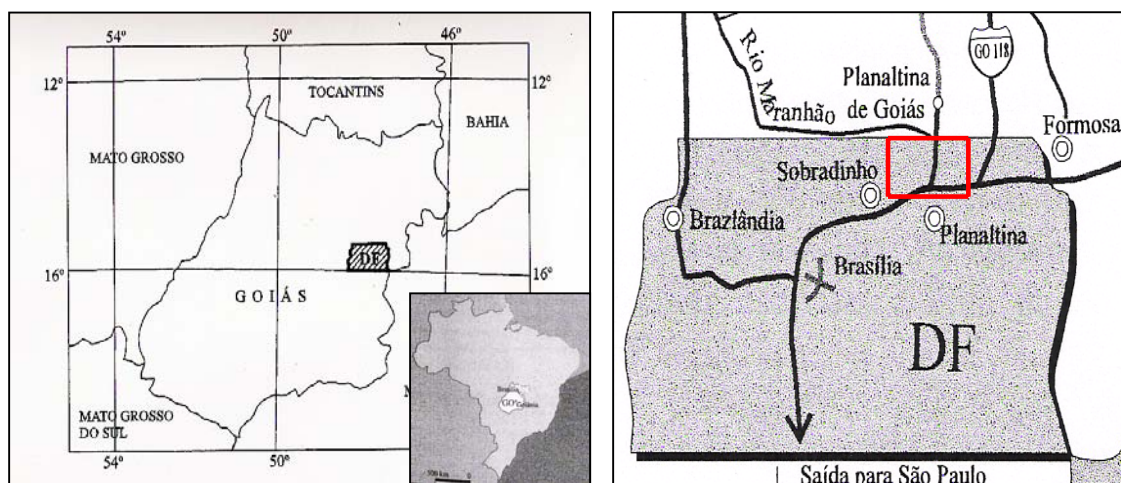


Figura I – Localização e acesso à área Bonsucesso (adaptado de DNIT, 2002).

## II – Contexto Geológico

A área de trabalho está inserida na Unidade Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá (Faria, 1995), localizada na zona externa da Faixa de Dobramentos Brasília (Figura II.1).

### II.1 Faixa de Dobramentos Brasília (FDB)

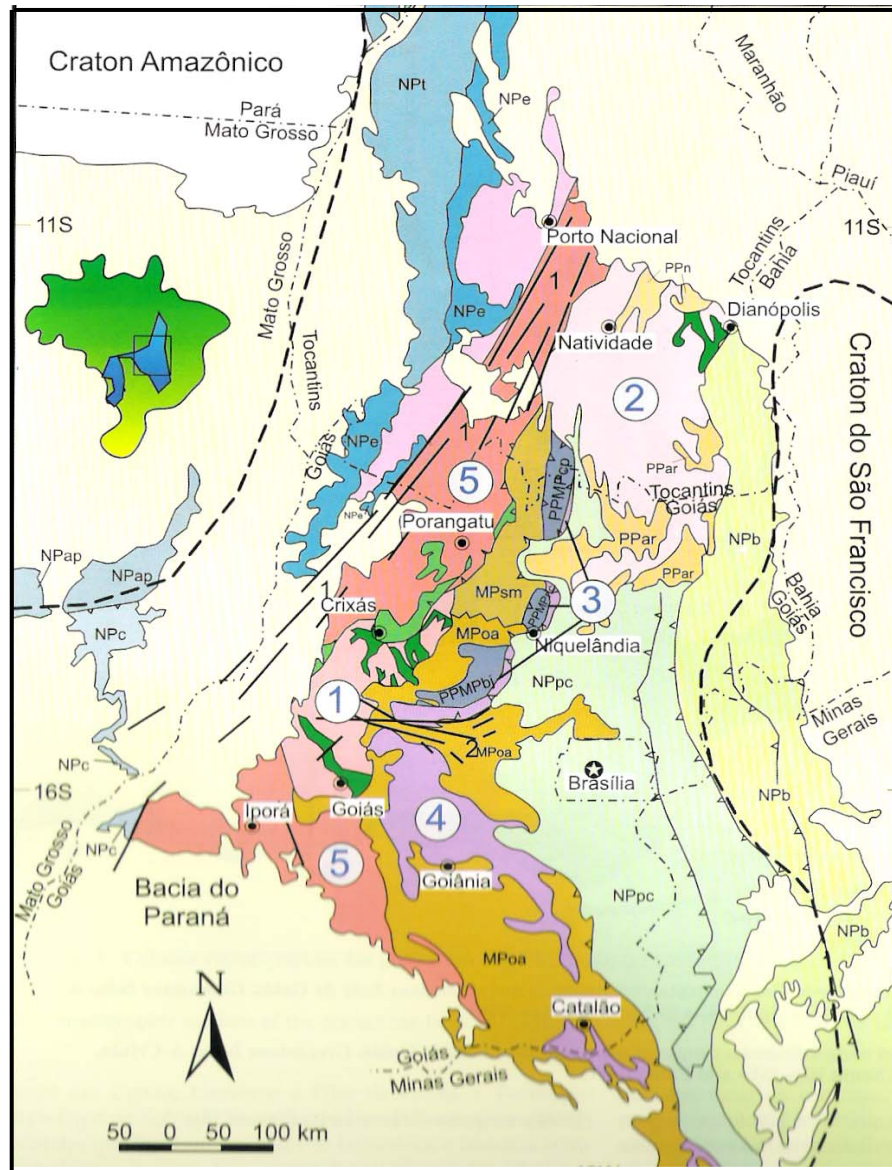
A FDB é constituída por um extenso sistema de dobramentos Neoproterozóicos de mais de 1000 Km de extensão que está situada na borda ocidental do Cráton do São Francisco (Figura II.1). Originalmente foi denominada Geossinclíneo Brasília (Almeida, 1967) e posteriormente caracterizada como sendo um miogeossinclíneo do Proterozóico Superior tectonicamente sotoposto ao Grupo Araxá, cujos sedimentos foram deformados e metamorfizados no evento tectono-orogênético Uruçuano (Almeida, 1968, 1977; Almeida *et al.*, 1976, 1977). Ao modelo acima é contraposto o modelo de um ciclo tectônico único cujas rochas metassedimentares e metavulcânicas de mais alto grau, pertencentes ao Grupo Araxá e Canastra compõem a zona interna da FDB (Dardenne 1978 a, b; Strieder 1990; Fuck 1990, 1994; Fuck *et al.* 1993, 1994; Dardenne, 2000; Pimentel *et al.* 2004; Valeriano *et al.* 2004).

A FDB divide-se em porção Setentrional de orientação NE e outra Meridional de orientação NW. Essas duas porções da FDB se encontram na altura do paralelo de Brasília formando a Megainflexão dos Pirineus com orientação geral WNW-ESSE (Araújo Filho 1978, 1981; Valeriano *et al.* 2004).

As unidades de seqüências de rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico pertencentes aos grupos Araí e Serra da Mesa, aos grupos Paranoá e Canastra, aos grupos Araxá, Ibiá e Vazante, e ao Grupo Bambuí, fazem parte de unidades da FDB. Incluem também os complexos Máfico-ultramáfico de Niquelândia, Cana Brava e Barro Alto, granitos anorogênicos da sub-província dos rios Paranã e Tocantins, as seqüências vulcano-sedimentares de Juscelândia, Palmeirópolis e Indaianópolis, o magmatismo granítico e máfico-ultramáfico e o Arco Magmático de Goiás formado pela seqüência vulcano-sedimentar de Mara Rosa e Chapada e pelas rochas tonalíticas/granodioríticas que ocorrem em extensas áreas na porção oeste da FDB.

Além das unidades descritas, a FDB envolve o Maciço de Goiás, a unidade mais antiga - terrenos arqueanos granito-greenstone de Goiás Velho, Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás -, o embasamento granito-gneisse de Calvacante, as seqüências vulcano-sedimentares de Santa Terezinha, Almas, Dianópolis e São Domingos e a seqüência meta-sedimentar de Ticunzal (Dardenne, 2000).





#### Faixa Brasília

##### Zona Externa

**Npb** Grupo Bambuí Group (inclui cobertura do Craton do São Francisco)

**NPpc** Grupos Paranoá e Canastra

**PPar** Grupo Araí **PPn** Grupo Natividade

**Greenstone belts / Ortognaisse**

##### Zona Interna

**MPoa** Melange Ofiolítica / Grupo Araxá

**Granulito + ortognaisse + paragnaisse**  
(Complexo Anápolis-Itaçu)

#### Simbologia

**1** - Lineamento Transbrasiliano  
**2** - Sintaxe dos Pireneus

Thrust Faults

Contatos

Limites da Província Tocantins

Limites entre estados

Figura II.1 – Mapa geológico da Faixa Brasília (Adaptado de Pimentel *et al*, 2004)

## II.2 Grupo Paranoá

As rochas do Grupo Paranoá afloram predominantemente na direção norte-sul ao longo da zona externa da FDB, ocorrendo desde o Distrito Federal até o norte da cidade de Minaçu (GO). Às rochas do Grupo Paranoá é atribuída idade Mesoproterozóica a Neoproterozóica (Cloud & Dardenne 1973; Dardenne & Campos Neto 1976; Dardenne 1978a; Cassedane & Cassedane 1978).

O Grupo Paranoá primeiramente foi denominado por Formação Paranoá (Andrade Ramos 1958) é considerada como formação inferior e lateral ao Grupo Bambuí (Braun 1968). Posteriormente, no final da década de 60 e na década de setenta, foi proposta a ordem estratigráfica da Formação Paranoá (Barbosa *et al.* 1969 e Baeta Jr *et al.* 1978). Dardenne (1974) separou a Formação Paranoá do Grupo Bambuí, atribuindo-lhe o *status* de Grupo. Essa divisão para o Grupo Paranoá foi formalizada com Dardenne (1978), limitando-a na base pelo Conglomerado São Miguel e no topo pelo recobrimento da Formação Jequitaiá.

Dardenne & Faria (1985) propuseram nova estratigrafia para o Grupo Paranoá, definindo nove unidades litoestratigráficas na região de Alto Paraíso de Goiás e São João D'Aliança. Faria (1995) e Faria & Dardenne (1995) forneceram dados sobre a estratigrafia, ambiente sedimentar e geotectônica do Grupo Paranoá obtidos do estudo das regiões de Cristalina, Distrito Federal e Alto Paraíso – São João D'Aliança.

A estratigrafia considerada nesta dissertação (Faria, 1995), compõe-se de 12 unidades litoestratigráficas para o Grupo Paranoá. Na Região do Distrito Federal estão ausentes as unidades basais aflorantes em São João D'Aliança – Alto Paraíso de Goiás. (figura II.2). Este trabalho limitou-se na descrição da estratigrafia do Grupo Paranoá na região do Distrito Federal.

No Distrito Federal, os afloramentos expõem a litofácies ardósia (A) como unidade inferior. É composta por ardósias vermelhas a roxas, com bandamento amarelos esbranquiçados que destacam o acamamento (So). Próximo ao topo, contém ocasionais bancos de quartzito fino, lenticular de base erosiva e espessura centimétrica até 1,5 m e ocasionais leitos de metassiltito e quartzito fino que localmente mostra estratificação cruzada *hummocky*.



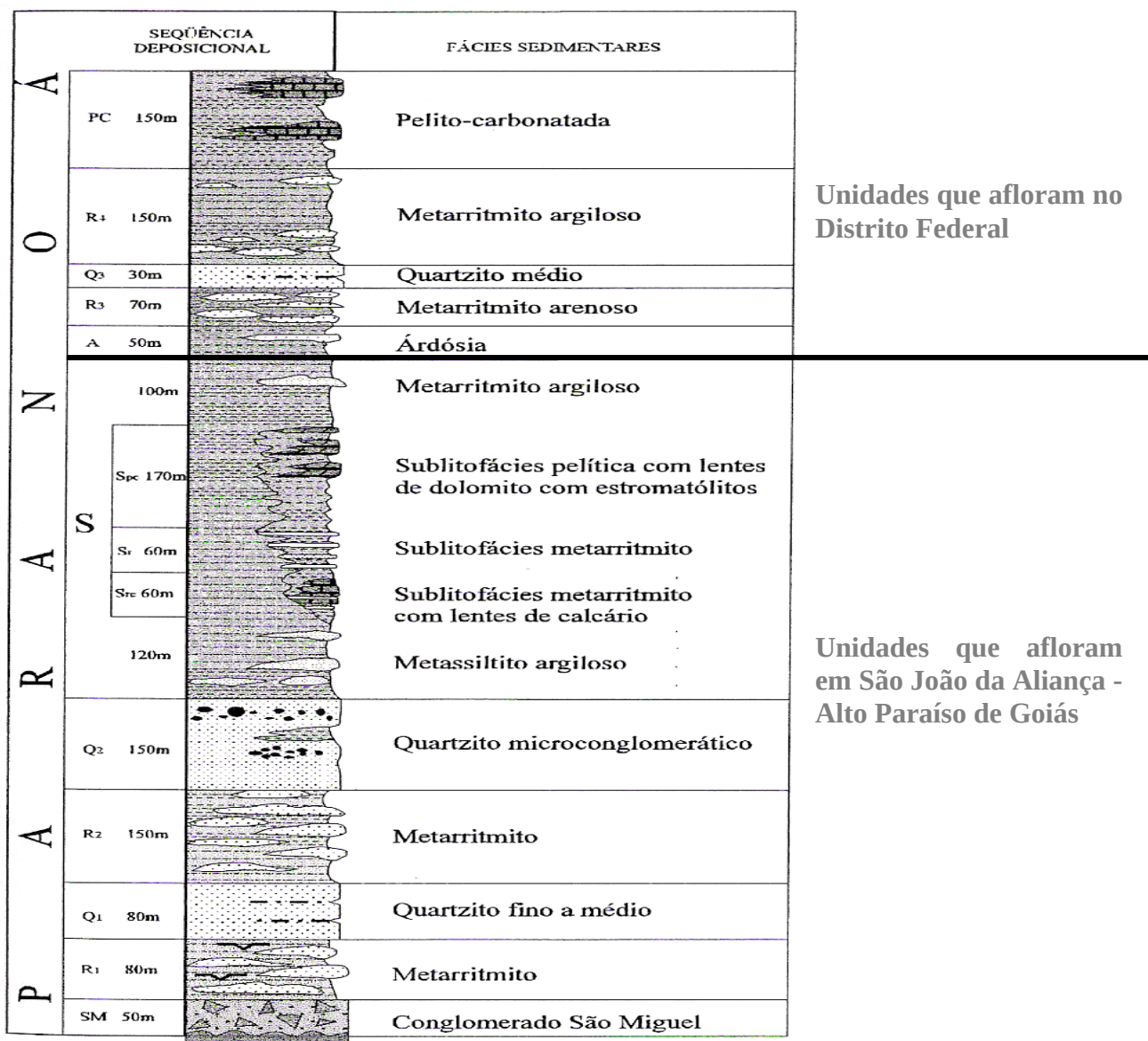


Figura II.2 - Coluna litoestratigráfica da Seqüência deposicional Paranoá: Região de Alto Paraíso – São João D’Aliança - GO (adaptado de Faria, 1995)

Os metarritmitos arenosos (R3) na região do Distrito Federal são subdivididos em duas sublitofácies. A inferior (R3a) é constituída por quartzitos finos a muito finos, em banco centimétricos até 1 m de espessura, vermelhos a amarelos, feldspáticos, laminados, sericíticos, com ocasionais laminações siltico-argilosas, têm geometria lenticular-ondulada, de base plana, as vezes erosiva, topo ondulado. As estruturas são laminações plano-paralelas, estratificações cruzadas *hummocky*, marcas onduladas e evidências de fluidização. A sublitofácia superior (Ra3) é caracterizada por metarritmitos laminados e de cores variadas, com alternância de quartzitos, metassiltitos e metargilitos e as estruturas de contração são marcantes, além de marcas onduladas e laminações cruzadas por ondas.

A unidade quartzítica (Q3) na região do Distrito Federal, está em contato concordante e gradacional sobre a litofácies (R3a). Ela é composta por quartzitos de granulação média a fina, com raros leitos de granulação grossa, constituídos essencialmente de grãos bem arredondados de quartzo, de cor rosa ou branca e cinza claro, silicificados e bem selecionados. Domina o acamamento plano-paralelo e ocorrem ainda estratificações cruzadas tabular cruzada acanalada, cruzada tipo espinha de peixe e marcas onduladas.

As rochas da unidade metarritmito argiloso (R4), na região do Distrito Federal, repousam em contato concordante e gradacional sobre a litofácies (Q3) e são compostas pela alternância de metassiltitos, metargilitos e quartzitos finos. Os metapelitos são de cor vermelha, verde clara e branca, de aspecto laminado e localmente maciço. Os quartzitos laminados são, às vezes, feldspáticos e contêm estruturas do tipo *hummocky* próximo à base e na porção superior. Possui também marcas onduladas e estruturas de contração.

A unidade Pelito-carbonatada sobrepõe a unidade R4, constitui o topo do Grupo Paranoá e contém a área em estudo. Na região do Distrito Federal essa unidade exhibe espessura da ordem de 150 a 180 m. Inicia-se com metargilitos e ocasionais intercalações de metassiltitos, na cor amarela e rosa, bastante sericíticos, maciços e laminados. Ocorre também quartzito de granulação média com leitos conglomeráticos finos, que em fratura fresca, emite odor fétido; é argiloso de cor amarela, localmente preta, com grãos bem selecionados e bem arredondados.

No topo da unidade os metapelitos incluem calcário dolomítico microcristalino cinza, com bandas siltico-argilosas e laminações biogênicas, contendo também estromatólitos colunares, cônicos (*Conophyton*) e laminações convexas. Apresentam geometria lenticular, com espessura aflorante da ordem de 10 m.

## **II.2.1 – Sistemas Depositionais da Seqüência Paranoá**

O Grupo Paranoá é considerado uma megasseqüência deposicional marinha rasa, predominantemente transgressiva. É limitado na base e no topo por superfícies de discordância. Na parte inferior assenta-se o paraconglomerado São Miguel (SM) sobre o Grupo Araí. Na superior, os diamictitos Jequitáí sublinham a discordância que marca o início da sedimentação relacionada ao Supergrupo São Francisco (Faria, 1995).

A seqüência deposicional Paranoá é constituída basicamente por alternâncias de quartzitos e metassiltitos, com lentes de carbonatos. As unidades quartzíticas representam litofácies geradas sob condições de alta energia, os metarritmitos e pelitos sugerem ambiente de baixa energia, com participação de tempestades ocasionais que geraram intercalações de tempestitos. As interpretações paleoambientais para o Grupo Paranoá consideradas nesta dissertação estão de acordo com Faria (1995) e Faria e Dardenne (1995).

Os metarritmitos R3b são interpretados como sistema deposicional intermaré, com ação de ondas e eventos periódicos de tempestades. Os quartzitos Q3 tinham um ambiente de deposição plataforma arenosa dominada por ondas e eventos periódicos de tempestades. Nos metarritmitos R3a ( fácies proximal) era o sistema deposicional de plataforma de terrígenos dominada por ação de tempestades.

Os depósitos das ardósias (A) e dos pelitos da litofácies pelito-carbonatada (PC) representam sistema deposicional de plataforma terrígena, em ambiente profundo e de baixa energia, com participação episódica de processos por ação de ondas de tempestade. As ardósias e os pelitos da litofácies PC caracterizam uma plataforma de lama, com mais baixa energia (suspensão), representando o ambiente mais profundo da seqüência deposicional Paranoá, porém numa profundidade nunca superior a 80-100 m. Os calcários, dolomitos e margas representam um sistema deposicional de plataforma carbonática. Os calcários de cor cinza têm características de ambiente dominado por correntes de maré e ondas. O calcário preto é de águas mais profundas e estagnadas, num ambiente de submaré, protegido da ação das correntes. As margas representam ambiente de submaré, com baixa energia, numa transição do domínio siliciclástico para carbonático.

## II.2.2 – Geologia Estrutural

As rochas do Grupo Paranoá foram afetadas, durante o Ciclo Brasileiro, por dois eventos deformacionais D1 e D2 (Faria, 1995). A intersecção entre os dois eventos gera estruturas dômicas de amplitude regional. A compressão W-E (D1) gera dobras que indicam transporte tectônico em direção ao Cráton do São Francisco. Esse evento provoca empurrões e a formação de *nappes* que jogam os metassedimentos Canastra sobre o Grupo Paranoá e este sobre o Grupo Bambuí.

Considerando o grau de intensidade e estilo das deformações geradas pela 1ª e 2ª fases deformacionais, foram classificados 4 domínios lito-estruturais da FDB (Faria 1995). O domínio 3 refere-se ao Distrito Federal e ocupa superfície pouco maior do que seu quadrilátero. Esse domínio é marcado pela ocorrência dos dois eventos deformacionais, dominados por dobramentos de *trends* N-S e E-W, apertados, que geram padrões de domos e bacias assimétricas, e falhamentos de empurrão em nível crustal raso, que forma *klippen* e janelas onde afloram os Grupos Canastra e Paranoá. A foliação de plano axial de dobras é bastante penetrativa nos filitos e ardósias.

## II.3 – Geologia Local

A área estudada está restrita aos limites de uma cava de lavra com superfície aproximada de 30 mil m<sup>2</sup> e está situada na região de Bonsucesso paralela a margem esquerda da cabeceira do rio Maranhão (Figura I; II.3;II.5). Está inserida na unidade Pelito-carbonatada (PC) do Grupo Paranoá (Figura II.4) e em superfície, latossolos recobrem rochas pelíticas bastante alteradas (Figura II.3). O local foi estudado a partir dos cortes da cava de lavra que expõem 16 metros verticais de afloramento, pela coleta de 6 m de testemunhos de sondagem realizada no piso inferior da cava, por uma trincheira escavada topograficamente abaixo da área de lavra e caminhamentos de reconhecimento nas adjacências da mina (Figura II.5; II.8).

O perfil amostrado é constituído por um manto de alteração intempérica constituído da base até o sétimo metro de matriz argilo-siltosa com fragmentos de metalamitos bastante alterados de granulometria argilo-siltosa, raras laminações plano-paralela, coloração amarela nos dois primeiros metros, com tons vermelhos no quarto e quinto metros e

amarelo até o sétimo metro, constituindo saprolito. A partir do sétimo metro não se consegue distinguir as estruturas originárias da rocha matriz, constituindo-se *solum* de cor creme com pigmentações em vermelho mais próximo à base, tornando-se creme claro em direção ao topo (Figura II.5; II.6; II.7 II.12).

Topograficamente abaixo da base da área amostrada ocorrem algumas exposições de quartzitos. Em trincheira de pesquisa obteve-se um afloramento de lente métrica de quartzito alterado, friável, de granulometria fina, de cor branca intercalada em matriz argilo-siltosa (Figura II.8).

Ao microscópio ótico os quartzitos revelam a presença de quartzo junto a uma matriz indistinta. É preciso observar, entretanto, que no processo de preparação da lâmina houve uma perda expressiva da parte fina da rocha, em virtude dessa ser muito friável. Nesses termos, a interpretação petrográfica deve ser vista com parcialidade (Figura II.9; II.10; II.11). A massa indistinta ao microscópio ótico foi identificada por difratometria de raios-X, sendo seus constituintes o quartzo, a caulinita e a illita (Figura II.13).

Inicialmente, houve interesse em se conhecer um pouco melhor esses quartzitos no sentido de se obter informações que pudessem contribuir no entendimento da área estudada. Porém, à medida que os estudos avançaram, verificou-se que a utilidade dos quartzitos se restringiu, basicamente, à caracterização geológica da área. Ressalva-se, ainda, que esse breve estudo considerou apenas uma lente métrica de uma rocha muito alterada que pode não ter representatividade regional e, por isso, deve ser tomado com restrições quanto às correlações litológicas na Unidade Pelito-carbonatada PC (Figura II.12).



Figura II.3 – Vista geral da região da área de Bonsucesso. Notar piso argiloso no local da tomada da película, representando o padrão geral da região com escassos afloramentos rochosos.



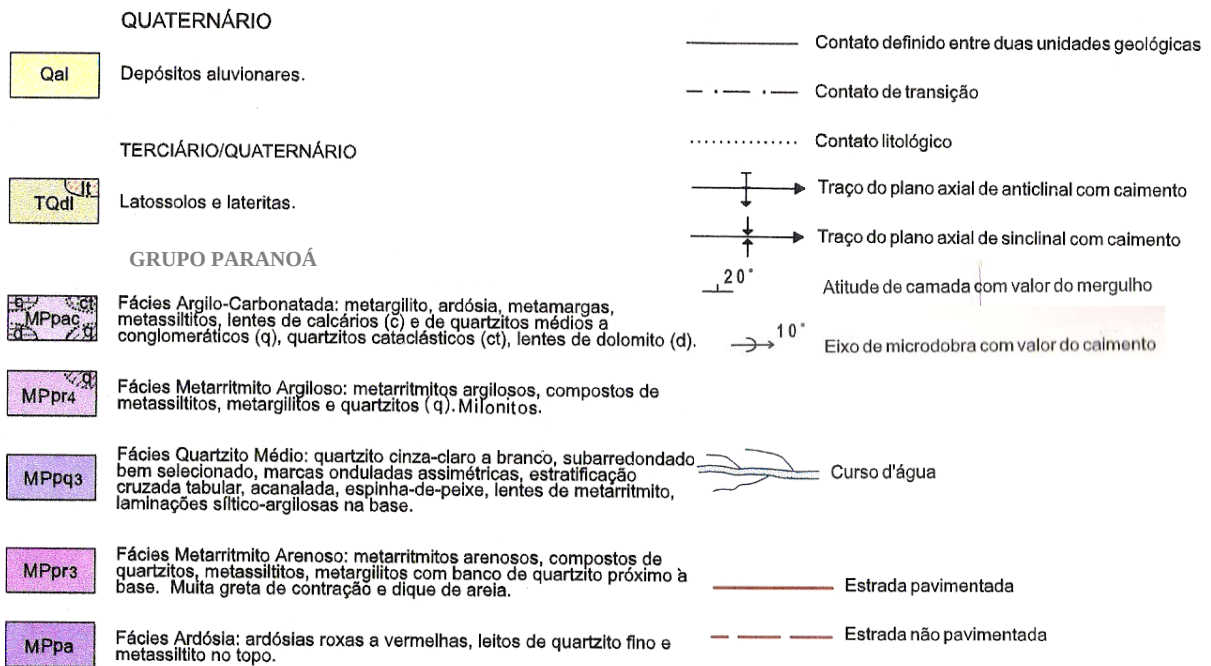
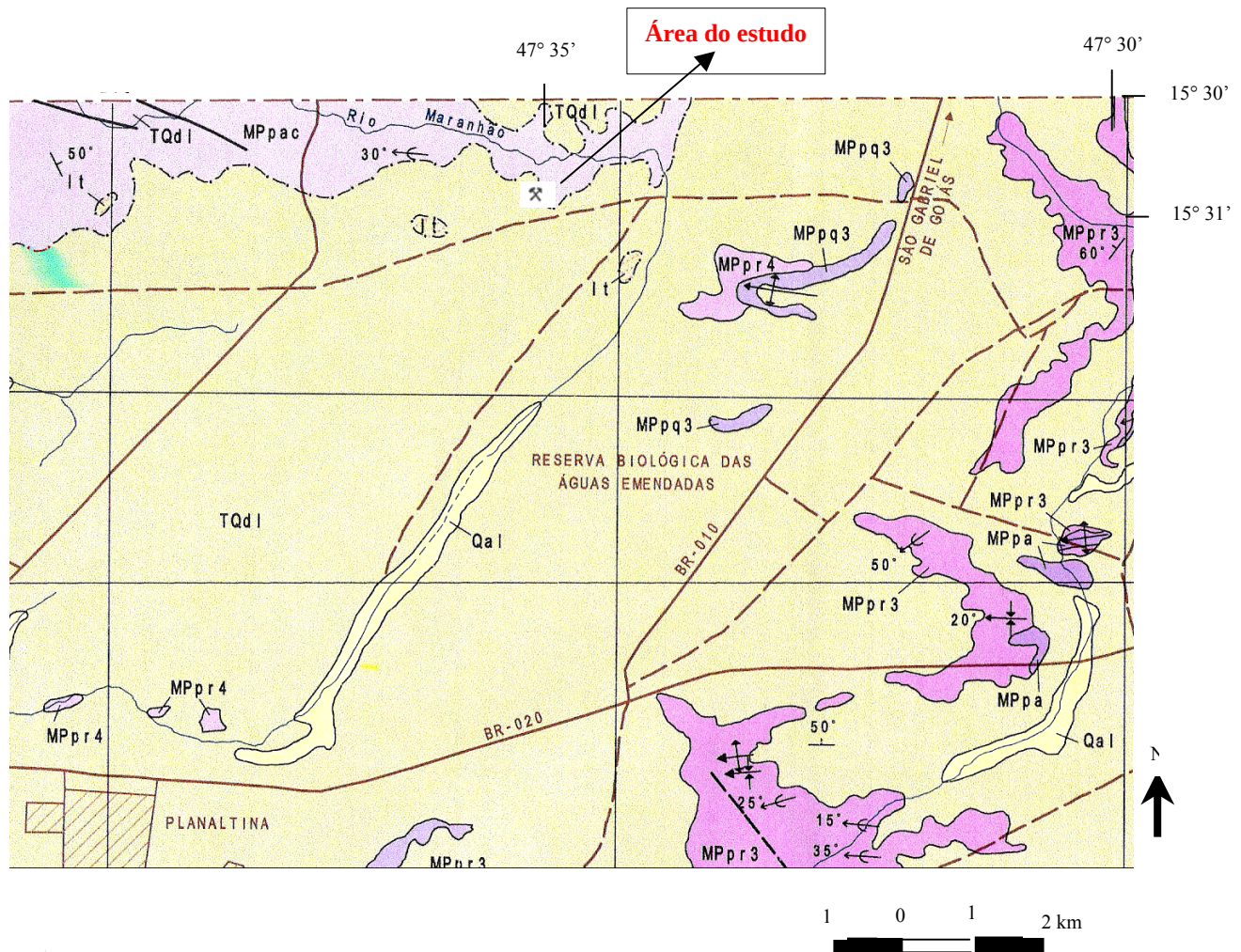


Figura II.4 – Mapa geológico da área Bonsucesso (adaptado de Faria *et al*, 1997).



Figura II.5 – Vista geral da área estudada. Há 3 níveis de lavra com taludes de 5 m de altura. No canto esquerdo do piso inferior ocorrem metalamitos alterados de cor amarela e a direita predomina tom creme com vermelho e em direção ao topo cor creme claro, dominante na área. A quadricula marcada representa a foto II.6 e as linhas verticais o perfil amostrado no talude; o furo de sonda foi feito na mesma sequência 6 metros abaixo.





Figura II.6 – Vista do talude da base, exibindo, no canto inferior esquerdo, metalamitos alterados de cor amarela; nas demais áreas predominam tons cremes com vermelho.



Figura II.7 – Vista do talude intermediário, exibindo um manto de alteração predominantemente na cor creme claro. Esse padrão se repete no talude superior.





Figura II.8 – Trincheira de pesquisa topograficamente abaixo da área de lavra exibindo lente métrica de quartzito friável intercalada em metalamito amarelo bastante alterado.

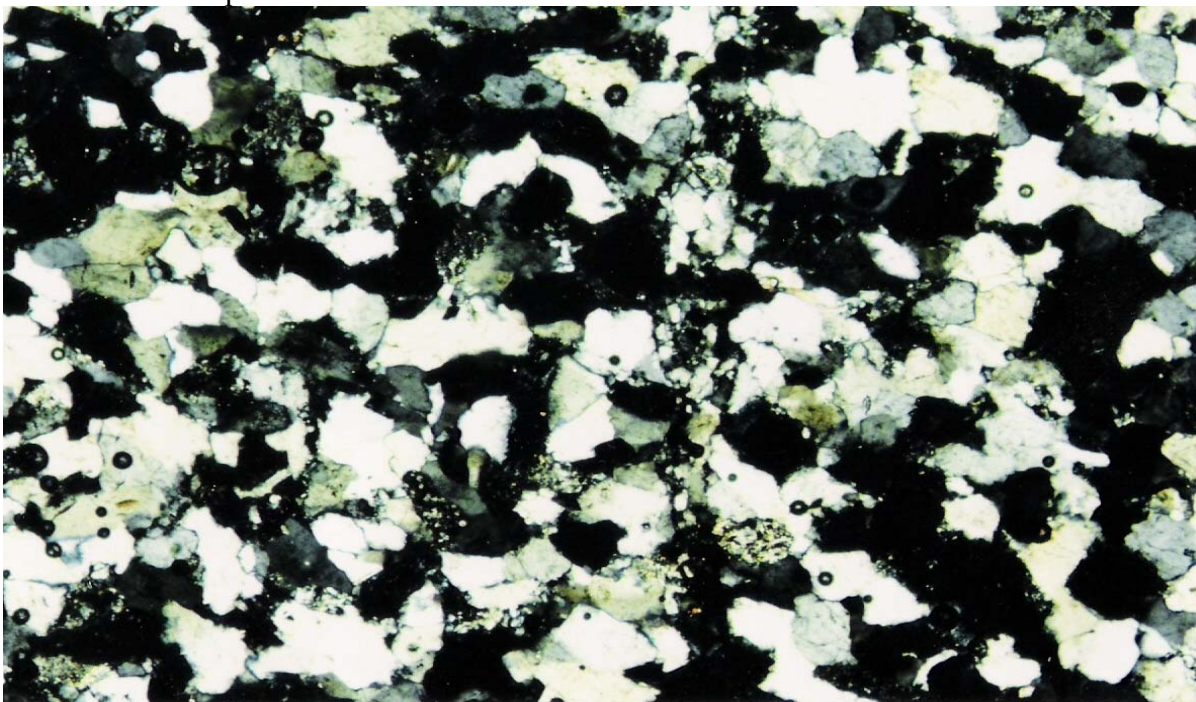


Figura II.9 – Fotomicrografia de quartzito, com grãos de quartzo e massa indistinta ao longo do plano observado. Luz polarizada, aumento de 4 vezes.



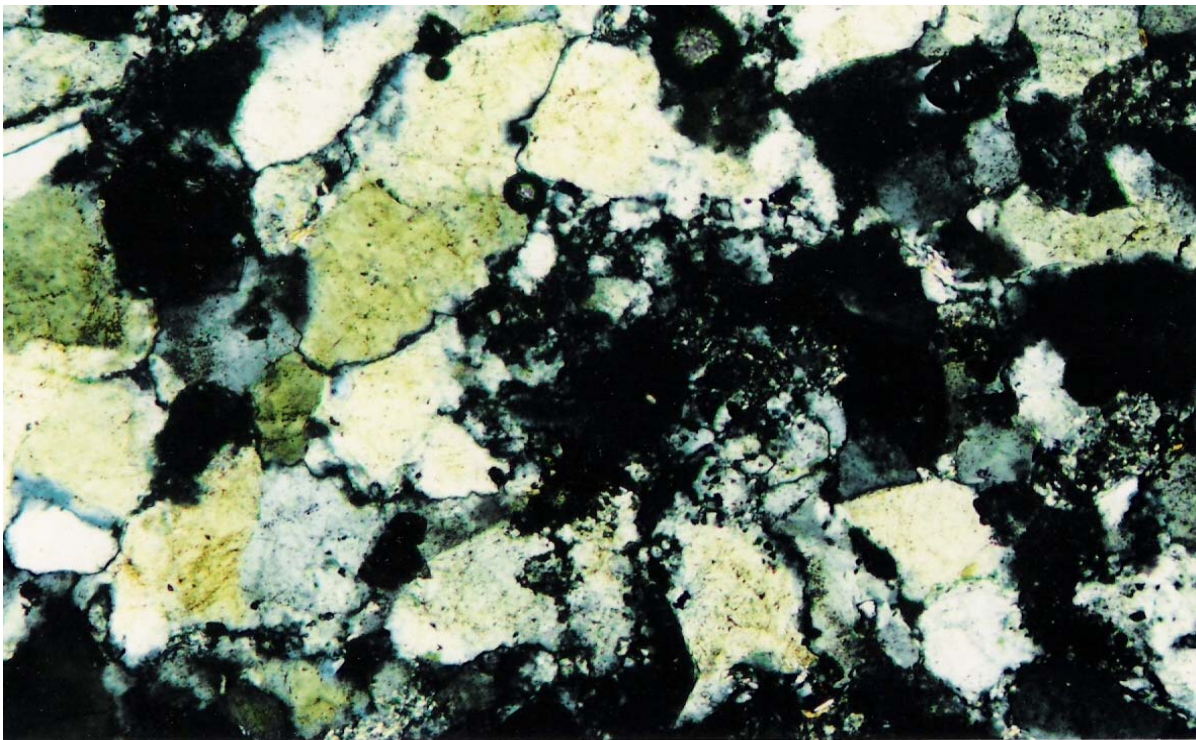


Figura II.10 – Fotomicrografia de quartzito, exibindo detalhe da figura 11.10 com grãos de quartzo e massa indistinta. Luz polarizada, aumento de 40 vezes.

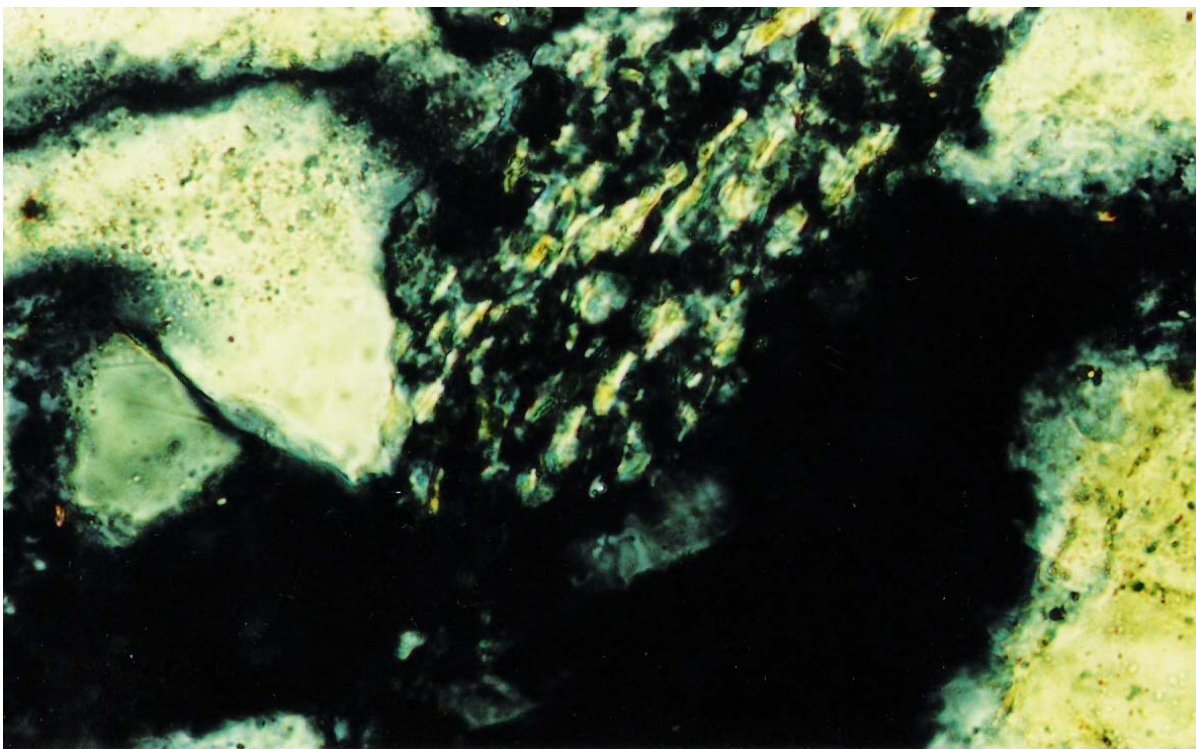


Figura II.11 – Fotomicrografia de quartzito: em detalhe porção da secção, representando massa indistinta, sugerindo ilita (?). Luz polarizada, aumento de 40 vezes.

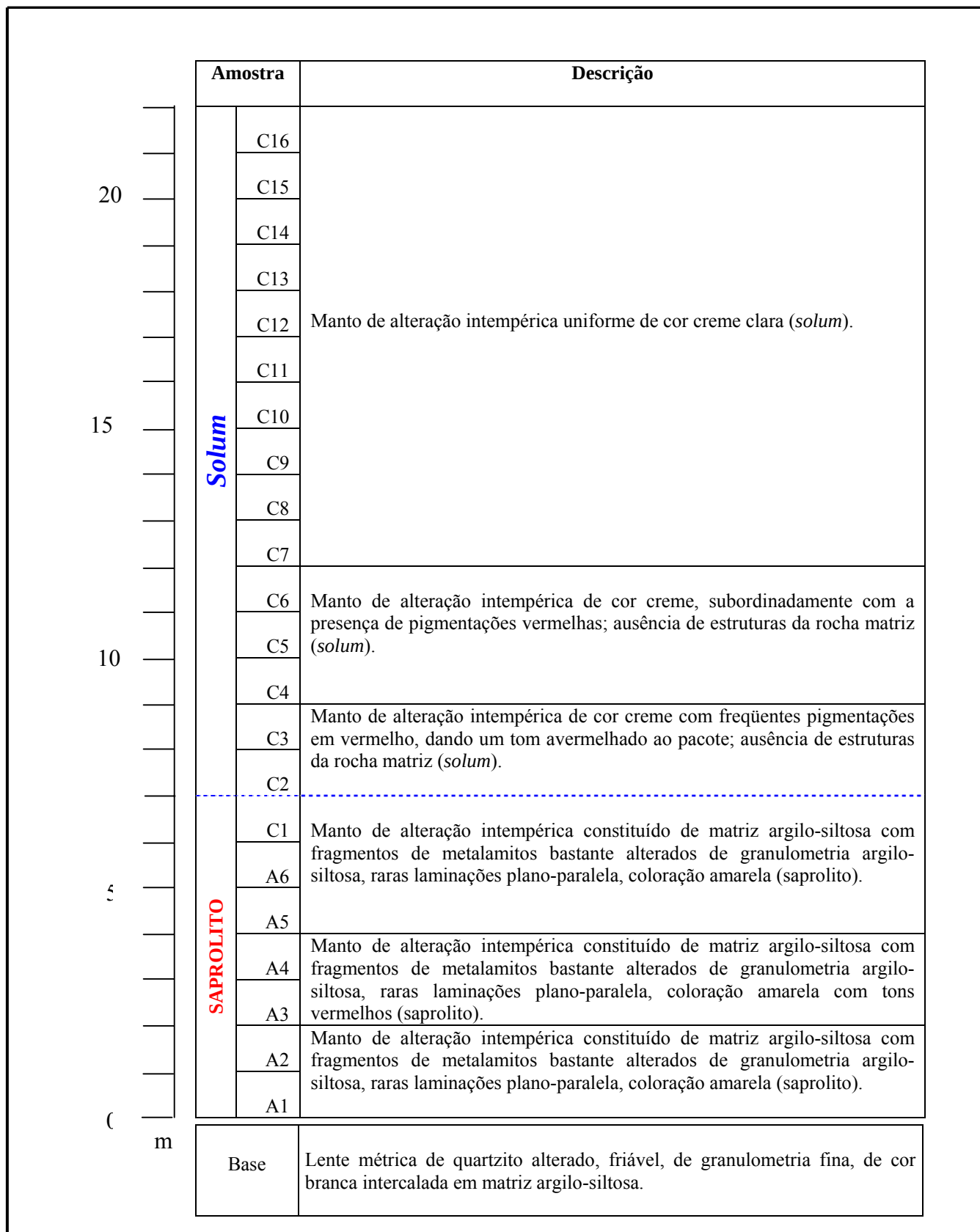


Figura II.12 – Descrição geológica do perfil vertical da área Bonsucesso; intervalos: A1 a A6 furo de sonda a trado e C1 a C16 amostragem de canal no talude da cava da mina; a base foi obtida na adjacência da área amostrada e topograficamente abaixo.

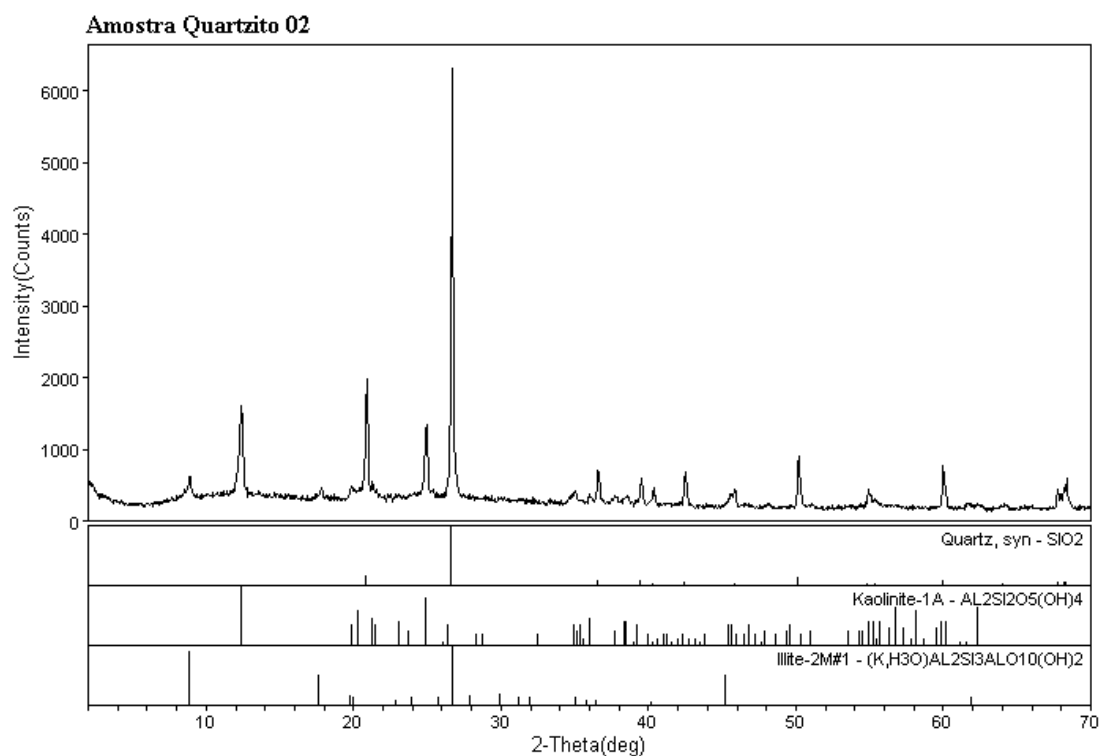
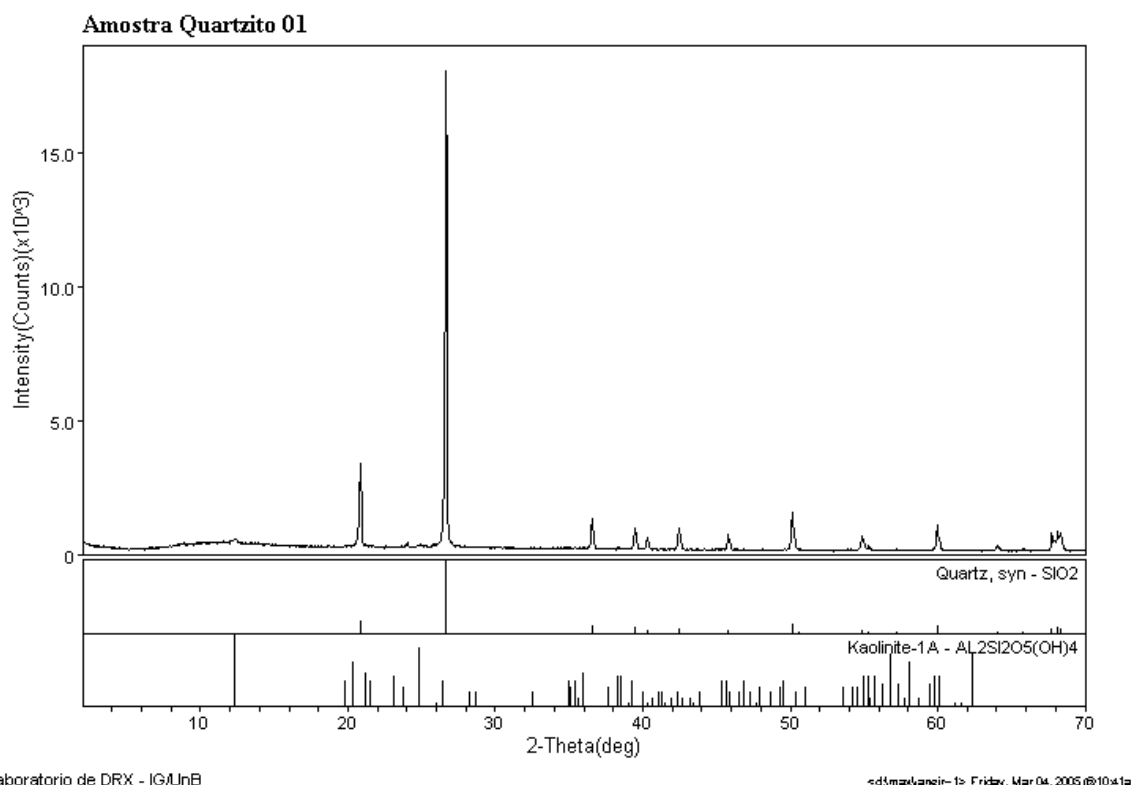


Figura II.13 – Difractogramas de amostra total dos quartzitos localizados topograficamente abaixo da área da mina Bonsucesso.

### **III – Cimento Portland**

A invenção do cimento portland é creditada a Joseph Aspdin, um construtor de Leeds, Inglaterra, que aos 21 de outubro de 1824 patenteou o “Cimento Portland”. Portland se refere à cidade inglesa de onde as rochas calcárias, utilizadas para a fabricação de cimento, foram extraídas (Lea 1970).

Em 1838, o Engenheiro Brunel registrou o uso do cimento portland na obra do túnel sob o rio Tamisa, marcando a partir de então, o surgimento definitivo da indústria de cimento portland (Goma 1979).

No Brasil, as primeiras tentativas de produção de cimento portland ocorreram em 1888, quando se iniciou a implantação de uma fábrica de cimento no Estado de São Paulo. Entretanto, essa e outras tentativas foram experiências descontínuas e, somente em 1924, em Perus, São Paulo, foi implantada, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, a primeira fábrica de cimento com produção contínua e distribuição ao mercado consumidor.

Atualmente o Brasil satisfaz suas necessidades internas de cimento e uma pequena parcela é exportada, sendo esse cimento produzido através de um complexo processo, mecanizado, com controles automatizados e com linhas de produção de elevada capacidade.

#### **III.1 – Fabricação do Cimento Portland**

A fabricação de cimento compreende quatro etapas maiores (Figura III.1). As principais matérias-primas para a fabricação de cimento portland são o calcário e argilas silicosas, aluminosas e ferruginosas. A lavra dessas matérias-primas constitui a primeira etapa do processo. Posteriormente, os materiais extraídos são britados, dosados, moídos, homogeneizados e armazenados em silos. Como resultado se produz uma mistura química e fisicamente adequada denominada farinha crua, constituindo a etapa preparação da farinha crua. Essa mistura é retomada dos silos e é submetida à queima em fornos rotativos de grandes dimensões a temperaturas elevadas (por volta de 1450 °C) e que tem um resfriamento brusco (por volta de 150 a 90 °C). Essa etapa produz um material químico e fisicamente modificado de tamanho centimétrico a subcentimétrico em forma de pelotas de cor cinza escura, denominado clínquer portland (Figura III.2).

A moagem do clínquer portland com aditivos constitui a última fase do processo de fabricação do cimento portland. Os aditivos utilizados dependem do tipo de cimento produzido, mas em todos os cimentos se utiliza o sulfato de cálcio (gipso ou gesso sintético) o qual é a substância reguladora do tempo de “pega” ou endurecimento inicial durante o processo de hidratação do cimento portland. Os demais aditivos mais comuns são calcário, escórias de alto forno e os materiais pozzolânicos. Estes basicamente podem ser de duas naturezas principais: natural e artificial. As pozzolanas naturais são provenientes dos materiais geológicos e as artificiais são produtos de processos industriais tais como argilas calcinadas, cinzas volantes geradas na queima do carvão mineral em usinas termoeletricas, microsilica, entre outros.



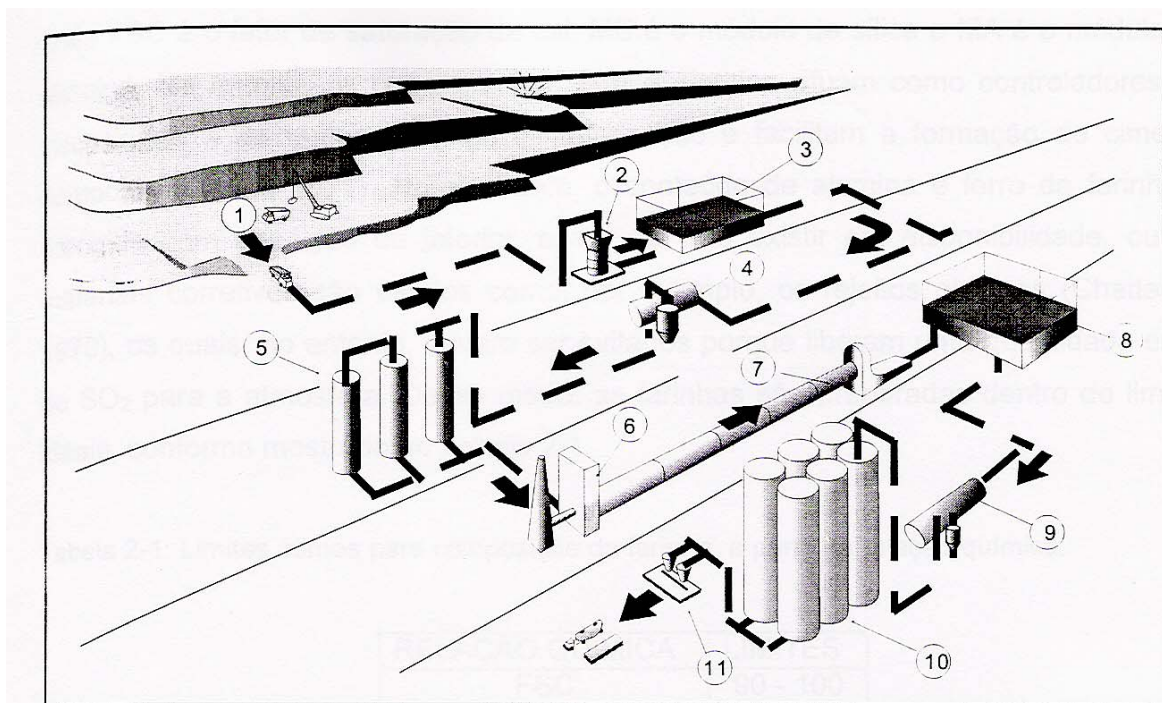


Figura III.1 – Desenho esquemático do processo de fabricação do cimento portland. 1) jazidas; 2) britador; 3) depósito de matéria-prima; 4) moinho de farinha; 5) silos de farinha; 6) preaquecedor; 7) forno rotativo; 8) depósito de clínquer e gesso; 9) moinho de cimento; 10) silos de estocagem de cimento; 11) despacho (Kihara *et al*, 1990).



Figura III.2 – Fotografia do clínquer portland, obtido através da queima da farinha crua em forno rotativo a temperaturas por volta de 1450 °C

### III.2 – Cimento Portland: conceitos, tipos principais e resistências mecânicas

Pode-se conceituar cimento de modo geral como “um material particulado que, em contato com água dá origem a misturas plásticas, as quais, após algum tempo, se solidificam e, gradativamente, adquirem resistência mecânica”. “Cimento portland” é o “aglomerante hidráulico obtido pela queima a temperaturas elevadas de uma mistura adequada de calcário e argila a qual, após o processo de queima, transforma-se em um material sinterizado e peletizado denominado clínquer portland”. O cimento portland básico constitui-se unicamente de uma mistura de clínquer finamente moído e sulfato de cálcio, caracterizando o que se convencionou denominar cimento portland comum (Zampieri 1993).

“Aglomerantes” ou “materiais cimentícios” são entendidos como compostos de uma ou mais substâncias capazes de endurecer de forma rápida ou lenta e, em consequência, unir materiais heterogêneos de distintas naturezas. (Centurione, 1999). Os aglomerantes hidráulicos só endurecem através de reações com a água e formam um produto resistente à água.

Por sinterização entende-se o processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das redes cristalinas.

O clínquer portland (Figura III.2) é constituído das seguintes fases minerais: silicato tricálcico – alita ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), silicato bicálcico - belita ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Na indústria cimenteira estas fases são abreviadas, respectivamente, pelas siglas  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , em que C é CaO; S é  $\text{SiO}_2$ ; A é  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; e F é  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

O cimento portland pode ser “comum”, como acima denominado, ou pode ser do tipo composto. Os “cimentos compostos” têm sido a área de maior desenvolvimento nas indústrias cimenteiras nas últimas 2 décadas, principalmente em função dos seus melhores desempenhos e também por ter um menor custo de produção. Os dois principais materiais utilizados nas adições do cimento portland são as escórias granuladas de alto-forno de indústrias siderúrgicas e os materiais pozolânicos.

No Brasil os requisitos químicos, físicos e de desempenho para produção de cimentos portland é controlada por um conjunto de normas de cimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Atualmente são produzidos e comercializados cerca de dez tipos de cimento portland, dos quais dois deles utilizam materiais pozolânicos: CP II – Z e CP IV (Tabela III.1).



| Cimento Portland                              | Sigla        | Materiais Constituintes (%)               |          |          |         | Norma<br>ABNT<br>(NBR) |
|-----------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|----------|----------|---------|------------------------|
|                                               |              | Clinker<br>+ Gesso                        | Calcário | Pozolana | Escória |                        |
| Comum                                         | CP I         | 100                                       | 0        |          |         | 5732/91                |
|                                               | CP I – S     | 95 – 99                                   | 1 – 5    |          |         |                        |
| Composto                                      | CP II – E    | 56 – 94                                   | 0 - 10   | 0        | 6 - 34  | 11578/91               |
|                                               | CP II – Z    | 76 – 94                                   | 0 - 10   | 6 - 14   | 0       |                        |
|                                               | CP II - F    | 90 – 94                                   | 0 - 10   | 0        | 0       |                        |
| Alto-Forno                                    | CP III       | 25 – 65                                   | 0 - 5    |          | 35 – 70 | 5735/91                |
| Pozolânico                                    | CP IV        | 45 – 85                                   | 0 - 5    | 15 - 50  | 0       | 5736/91                |
| Alta Resistência Inicial (ARI)                | CP V – ARI   | 95 – 100                                  | 0 – 5    | 0        | 0       | 5733/91                |
| Resistentes a Sulfatos                        | RS           | Equivalente aos cimentos dos quais deriva |          |          |         | 5737/92                |
| Destinados à cimentação de poços petrolíferos | CPP classe G | 100                                       | 0        |          |         | 9831/91                |

Tabela III.1 - Cimentos Portland brasileiros normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Um dos principais requisitos físicos para o controle dos cimentos Portland é a medição da resistência à compressão. Os cimentos brasileiros são subdivididos em três “classes de resistência”, definidas em função da resistência mínima apresentada por corpos-de-prova padronizados após 28 dias de hidratação. Assim, um cimento classe 32 deve apresentar uma resistência à compressão superior ou igual a 32 MPa. A tabela III.2 exibe estas 3 “classes de resistência” com seus respectivos limites inferiores e superiores de acordo com a norma NBR 7215/91 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

| Cimento Portland                                                                                      | Classe | Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)* |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-----------------|
|                                                                                                       |        | Limite Inferior                             | Limite Superior |
| Comum (CP I, CP I-S),<br><b>Composto</b> (CP II-F, <b>CP II-Z</b> , CP II-E) e<br>Alto-Forno (CP III) | 25     | 25,0                                        | 42,0            |
|                                                                                                       | 32     | 32,0                                        | 49,0            |
|                                                                                                       | 40     | 40,0                                        | -               |
| <b>Pozolânico (CP IV)</b>                                                                             | 25     | 25,0                                        | 42,0            |
|                                                                                                       | 32     | 32,0                                        | 49,0            |
| Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)                                                                   | -      | Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)*  |                 |
|                                                                                                       |        | Limite Inferior                             | Limite Superior |
|                                                                                                       |        | 34,0                                        | -               |

Tabela III.1 - Classe de resistências dos cimentos portland brasileiros

\* 1 MPa (MegaPascal) = 10,1977 kgf/cm<sup>2</sup>

### **III.3 – Processos de Hidratação e Endurecimento do Cimento Portland**

De uma maneira geral, a hidratação do cimento portland pode ser entendida como a transformação das fases anidras e metaestáveis do clínquer portland (alita, belita, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico), cujos campos de estabilidade envolvem temperaturas superiores a 1000 °C, em novas fases hidratadas estáveis sob condições ambientes. Dessa forma, ao se adicionar água ao cimento portland tem-se, quase que instantaneamente, o início de uma série de reações de dissolução e de formação de novas fases, responsáveis, após algum tempo, pelo endurecimento do cimento do produto (Zampieri 1993).

O processo de hidratação do cimento portland pode ser dividido em quatro períodos distintos. O primeiro período caracteriza-se por reações quase instantâneas e intensas. Posteriormente, por cerca de 2 a 3 horas, ocorre uma fase de baixa atividade, denominada período de indução ou dormente. Em seguida inicia-se o período de aceleração (duração de 3 a 12 horas) com uma nova intensificação das reações de hidratação e a mistura deixa o estado plástico e adquire coesão e resistência mecânica. É nesse período que ocorre o fenômeno da “pega” do cimento. O declínio da intensidade das reações de hidratação caracteriza o período de desaceleração. As reações de hidratação são tipicamente exotérmicas sendo possível acompanhar o desenvolvimento dessas reações baseado em medições calorimétricas - quantidade de calor liberado pelas reações de hidratação, em função do tempo (Figura III.3).

As reações pozolânicas envolvendo argilas termicamente ativadas e o hidróxido de cálcio liberado pelo clínquer no processo de hidratação são similares àquelas observadas durante a hidratação isolada do cimento portland. Em essência são reações de dissolução e formação de novas fases, estáveis nas novas condições impostas ao material (Zampieri 1989).

### **III.4 – Cimento Portland Composto e Cimento Portland Pozolânico**

Esses cimentos têm sua base nas propriedades das pozolanas, em que o material pozolânico é definido como aquele que não apresenta propriedades cimentícias na presença de água, mas que, se finamente moído e na presença de umidade reage, à temperatura ambiente, com hidróxido de cálcio liberado pelo clínquer portland no processo de hidratação e produz compostos com propriedades cimentícias. Assim, o cimento portland cuja adição de material pozolânico varie de 6 a 14% é denominado de CP II – Z, enquanto que aquele com os limites de adição de material pozolânico entre 15 a 50% são denominados CP IV (NBR 11.578/91 e 5736/91, respectivamente).

Embora a norma brasileira permita a adição de até 50% de material pozolânico, a adição máxima seria inferior a esse valor, pois o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado a partir do clínquer anidro, após 28 dias, é limitada e equivaleria a uma massa menor do que a proporção de pozolana adicionada. Zampieri (1993) pondera que essa adição máxima seria de 30%. Entretanto, o valor ótimo de pozolana que se pode adicionar ao cimento deverá ser obtido a partir de experimentos laboratoriais próprios e irá depender tanto da

pozolana considerada como do clínquer. O primeiro varia entre as jazidas e o último varia em função do processo de fabricação.

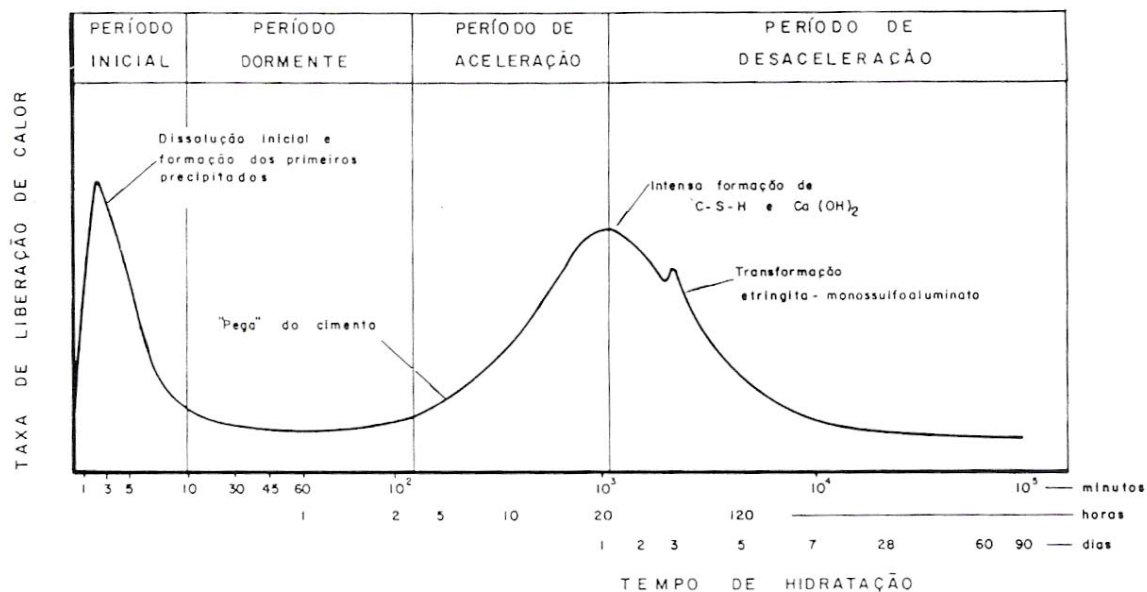


Figura III.3 - Curva esquemática da evolução das reações de hidratação exibindo a taxa de liberação de calor em cada uma de suas etapas (Zampieri, 1993)

## IV – Pozolana

O termo pozolana advém do Monte “Puzzuoli” nas proximidades do Vesúvio na Itália. Como as argilas dessa região eram consideradas as de melhor qualidade, se atribuiu a esses materiais a designação de pozolanas, termo que mais recentemente foi também estendido a outros materiais, naturais ou artificiais, que exibem igual comportamento. Os materiais pozolânicos são utilizados em argamassas e concretos contendo cimento há cerca de vinte séculos.

Atualmente se considera pozolânico todo material natural ou artificial, silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só não possua nenhuma atividade hidráulica - não reage isoladamente na presença de água. Entretanto, se finamente moído exibe a capacidade de se combinar com hidróxido de cálcio em presença de água e a temperatura ambiente, proporcionando a formação de novos compostos com propriedades cimentícias e insolúveis em água (Zampieri, 1989).

### IV.1 – Definições e Conceitos Básicos de Argilas e Argilominerais

A palavra “argila” é oriunda do latim *argilla* e esta do grego *argos* ou *argilos*. Ela é usada para designar um depósito natural, inconsolidado, de aspecto terroso e de baixa granulometria, que geralmente apresenta uma certa plasticidade quando em contato com a água. Outra designação refere-se somente à granulometria sem considerar sua composição e é utilizada para caracterizar os materiais que ocorrem na “fração argila”, ou seja, na fração inferior a 2 $\mu$ m. No presente trabalho será adotado o termo argila, quando empregado de forma isolada e será especificado como fração argila quando se referir ao aspecto granulométrico. (Bailey, 1980; Gomes, 1986; Chamley, 1989; Moore & Reynolds, 1989; Weaver, 1989; Zampieri, 1989).

O conceito de argilomineral refere-se especificamente a um grupo de minerais que ocorrem preferencialmente na fração argila. Pertencem ao grupo dos filossilicatos e composicionalmente são classificados como aluminossilicatos em folhas hidratadas. A estrutura cristalina dos argilominerais apresenta um padrão lamelar estratificado definido por folhas contínuas de tetraedros de SiO<sub>4</sub>, que se ligam e se alternam com outras folhas de composição essencialmente aluminosa e magnésiana, em que a unidade elementar possui uma coordenação octaédrica. A combinação dessas duas folhas elementares – tetraédrica e octaédrica – forma as camadas em diversos arranjos e que podem ocorrer separadas entre si por moléculas de água, cátions e moléculas orgânicas. A morfologia em camadas e uma perfeita clivagem no plano (001) é uma característica comum desses minerais. Essas camadas podem ser do tipo 1:1, constituídas por uma folha de cada tipo, ou 2:1, quando 2 folhas tetraédricas englobam a folha octaédrica (Souza Santos, 1975; Gomes, 1986; Chamley, 1989; Moore & Reynolds, 1989; Weaver, 1989).

Os argilominerais são produto de alteração de uma grande variedade de rochas contendo minerais silicáticos, notadamente de silicatos de alumínio e ocorrem nas argilas conjuntamente com outros materiais e minerais associados como quartzo, feldspatos, micas, óxido e hidróxidos de ferro e alumínio, matéria orgânica, entre outros.

Os argilominerais são classificados em 8 grupos em função da constituição da camada (1:1 ou 2:1), a carga da camada e a ocupação do espaço intercamada. Cada grupo é caracterizado por um valor “d” correspondente à distância interplanar ao longo do parâmetro 001. Os grupos são partidos em subgrupos baseado no tipo de folha octaédrica: dioctaédrica ou trioctaédrica, conforme o cátion seja  $R^{+3}$  ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) ou  $R^{+2}$  ( $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ), respectivamente (Bailey, 1980; Chamley, 1989).

Na área de Bonsucesso, os argilominerais encontrados são do grupo serpentina-caulinita e illita, respectivamente subgrupos caulinita e illita.

## IV.2 – Argilominerais: gênese da caulinita

Os argilominerais derivam de minerais primários ou de argilominerais preexistentes ou de suspensões coloidais ou de íons em solução aquosa e podem ser detríticos ou neoformados ou transformados de argilominerais preexistentes.

Os argilominerais do grupo da caulinita - caulinita, haloisita, diquita e nacrita - são essencialmente de mesma composição química, mas diferem no arranjo de suas estruturas. A caulinita é a mais comum e é formada ou como produto de intemperismo ou pela alteração hidrotermal ou como mineral sedimentar autigênico. A caulinita primária se forma *in situ* pela alteração de silicatos e essa alteração é resultado do intemperismo de superfície ou dos movimentos de água sob a superfície ou por ação hidrotermal. As caulinitas secundárias são sedimentares e são depositadas em camadas ou lentes associadas com outras rochas sedimentares. (Millot, 1963; Chamley, 1989; Espejo, *et al.*, 1992; Kotschoubey *et al.*, 1996; Kotschoubey *et al.* 1999; Oliveira *et al.* 2000; Biondi *et al.*, 2004).

A haloisita ocorre em saprolitos como produto de intemperismo e como um mineral hidrotermal. A diquita e a nacrita são dois polimorfos da caulinita. A primeira ocorre como mineral hidrotermal e ocasionalmente como mineral sedimentar autigênico. A nacrita é um mineral raro e ocorre somente em ambientes hidrotermais. Haloisita, diquita e nacrita são relativamente raras (Gomes, 1986; Murray, 1988; Chamley, 1989; Gomes & Massa, 1992).

A caulinita perfaz a maioria dos depósitos econômicos conhecidos. Ocorre em depósitos hidrotermais, residuais e sedimentares. Os depósitos hidrotermais e os residuais são classificados como primários e os depósitos sedimentares como secundários. A haloisita é incomum em depósitos sedimentares.

A hidrólise, reação de alteração que ocorre na transformação dos silicatos em argilominerais, pode se processar em etapas como função das condições físico-químicas da solução de alteração no processo de intemperismo, com pH reinante na faixa de 5 a 9. Tomando-se o feldspato potássico como referência há três reações de hidrólise típicas, em que uma delas irá produzir caulinita. Em função do grau de eliminação do potássio podem ocorrer duas reações de hidrólise parcial. Se 87% do potássio e 46% da sílica forem lixiviados o produto será a esmectita e tem-se o processo de bissialitização. Se 100% do potássio e 66% da sílica forem eliminados, então será produzida a caulinita no processo da





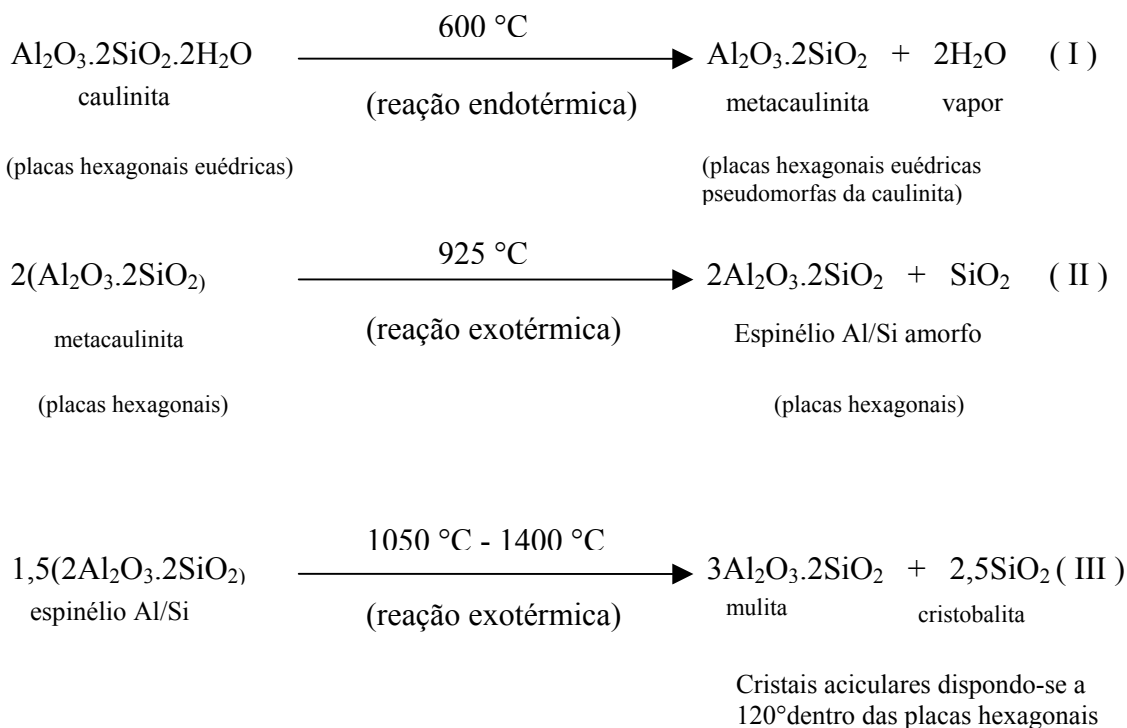
que as condições de calcinação e o tipo mineralógico dos argilominerais eram fatores importantes na obtenção de pozolanas de qualidade adequada (Mielenz *et al.*, 1951). Foi na Índia, através de norma interna daquele país, que se estabeleceram critérios e diretrizes para a calcinação de argilas (IS 1344, 1968).

De acordo com a experiência acumulada pelos indianos e sintetizada na norma referida, a temperatura de queima ideal é aquela necessária para provocar a desestruturação do argilomineral e essa deve ser obtida por experimentos próprios. Derivados das diversas experiências foram propostas faixas de temperatura consideradas como adequadas para ativação de certos grupos de argilominerais que deveriam ser tomadas como referência, apenas: Esmectitas de 600 a 800 °C; caulinitas de 700 a 800 °C; ilitas de 900 a 1000 °C.

As argilas naturais que não apresentam a pozolanicidade mínima estabelecida pela NBR 12653/92 ou mesmo que apresentem valores baixos, mesmo dentro da faixa, normalmente são submetidas ao tratamento térmico que visa provocar desordem no retículo cristalino dos argilominerais, com o conseqüente aumento de sua atividade pozolânica.

Nas argilas cauliniticas ocorrem transformações mineralógicas entre 500 a 900 °C, com a formação da fase metacaulinita contendo alumina e sílica em elevado grau de desordem cristalino e, portanto, de elevada área específica e grande atividade química (Souza Santos, 1975). A temperatura ótima de queima é aquela necessária à desestruturação e seu valor exato deve ser determinado através de experimentos específicos, analisando-se as resistências e demais propriedades dos corpos-de-prova de pozolana com cal ou cimento. Os valores obtidos geralmente variam significativamente entre argilas cauliniticas similares de áreas distintas, e mesmo de argilas cauliniticas semelhantes de uma área única.

Pode-se estabelecer uma seqüência de transformações, partindo-se da caulinita até a formação da mulita, conforme as equações abaixo (Campos e Souza Santos, 1978):



A calcinação de argilas se presta ainda à verificação de alteração de cor. No caso da produção de um cimento é muito relevante que após a mistura do “clinker + gesso + calcário” com o material pozzolânico calcinado não haja mudança significativa na cor final do cimento, quando comparado com o cimento “tradicional” que se pretenda substituir. Esse aspecto é principalmente devido ao impacto que a cor provoca no consumidor do produto. Normalmente, se o cimento passa a ter uma coloração diferente, a leitura que o mercado consumidor faz é que o produto tem qualidade inferior, pois associam a adição de argila inerte ao cimento. Por outro lado, a verificação da alteração da cor pode ser útil para o lançamento de cimentos diferenciados para aplicações específicas, obviamente se houver disponibilidade de reserva mineral e mercado consumidor.

Para a utilização como produto industrial, normalmente são realizadas diversas baterias de testes laboratoriais para materiais coletados dos vários níveis da área a ser minerada. Sendo aprovados, lotes de massas maiores são extraídos e submetidos à “queima industrial” através de fornos rotativos, em que a temperatura de partida é aquela obtida nos ensaios de laboratório. Após algumas seqüências de testes, determinam-se as faixas ótimas de trabalho e o processo de queima industrial em caráter de produção industrial é então aprovado.

#### IV.4 - Mecanismo Químico da Atividade Pozzolânica

A propriedade fundamental de uma pozolana é sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio na presença de umidade e à temperatura ambiente para prover características cimentícias, conforme as reações pozzolânicas abaixo (Montanheiro 1999):



As reações pozzolânicas acima dependem da composição do material pozzolânico. Para materiais silicosos, a primeira reação é que se desenvolve. Se for silico-aluminoso, como caulinitas, por exemplo, as reações ( II ) e ( III ) se processarão.

Considera-se que a atividade pozzolânica é tanto maior quanto maior o teor de sílica amorfa, isto é, não-cristalina no material em questão. Não há, contudo, uma linha de separação quanto ao teor de sílica para que um material possa ser considerado como pozzolana. Após estudos de diversos autores (Souza Santos, 1975), concluiu-se que a composição química de uma pozzolana não é bom índice de sua capacidade de combinação com o hidróxido de cálcio.

Para as argilas o mecanismo químico da atividade pozzolânica está correlacionado com as alterações estruturais que ocorrem em função das variações de temperatura. No caso

específico das argilas cauliníticas ocorrem transformações no argilomineral caulinita entre 500 a 900 °C, em que se forma a fase metacaulinita contendo alumina e sílica em elevado grau de desordem cristalino e, portanto, de elevada área específica e grande atividade química (Souza Santos, 1975).

#### IV.5 - Classificação das Pozolanas

A base para denominação pozolana a um material é função da sua capacidade de combinar com o hidróxido de cálcio na presença de umidade a temperatura ambiente. A maior ou menor proporção dessa combinação definirá a maior ou menor atividade pozolânica de um dado material e as classificações existentes seguem basicamente essa linha de mensuração. Apesar de não haver uma unanimidade mundial em classificação de pozolanas há o consenso de que as pozolanas se dividem em duas categorias básicas: as naturais e as artificiais. Entretanto, há divergências quanto à classificação das argilas calcinadas: ora são consideradas naturais ora artificiais.

Autores como Kitsopoulos & Dunkan (1996) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR5736/91) classificam como pozolanas naturais todos os produtos geológicos encontrados na natureza, em que os produtos calcinados são especificados como artificiais. Autores como Mielenz *et al.* (1951) e Mehta (1987) consideram também como naturais, os produtos geológicos submetidos à calcinação com destaque para argilas (Tabela IV.1).

| Pozolanas Naturais            | Pozolanas Artificiais               |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Rochas vulcânicas ácidas      | Escórias de alto forno              |
| Tufos vulcânicos              | Cinzas volantes (fly ash)           |
| Terra diatomácea              | Folhelho betuminoso – após extração |
| Arenitos e folhelhos opalinos | Microssílica                        |
| Argilas calcinadas            |                                     |

Tabela IV.1 – Classificação básica de materiais pozolânicos; a classificação das argilas calcinadas pode ser considerada natural ou artificial em função do autor adotado

##### IV.5.1 - Classificação das Pozolanas Baseada em Atividade-tipo

Baseado na identificação do componente ativo, Mielenz *et al.* (1951) propõem a classificação das pozolanas naturais por atividade-tipo. As substâncias que são pozolânicas, ou que possam ser induzidas por calcinação, foram identificadas (Tabela IV.2).

| Atividade-tipo |   | Substância                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1              |   | Vidro vulcânico. Tufos e pumicitos riolíticos: tufos e pumicitos dacíticos; alguns tufos e cinzas andesíticos podem ser reativos; tufos e cinzas basálticos e andesíticos são inferiores ou totalmente insatisfatórios em qualidade |
| 2              |   | Opala. Terra diatomácea e cherts opalinos                                                                                                                                                                                           |
| 3              |   | Argilas (obtidas através de calcinação)                                                                                                                                                                                             |
| 3 a            |   | Argila tipo caulinítica                                                                                                                                                                                                             |
| 3 b            |   | Argila tipo montmorillonita                                                                                                                                                                                                         |
| 3 c            |   | Argila tipo ilita                                                                                                                                                                                                                   |
| 3 d            |   | Argila misturada com vermiculita alterada                                                                                                                                                                                           |
| 3 e            |   | Paligorskita                                                                                                                                                                                                                        |
| 4              |   | Zeólitas (clinoptilolita, ptilolita e analcima)                                                                                                                                                                                     |
| 5              |   | Óxidos de alumínio hidratados. Bauxitas                                                                                                                                                                                             |
| 6              | ↓ | Não pozolânico. Minerais estáveis não reativos com a cal. Quartzo, feldspato, carbonatos, anfibólios, piroxênios, micas e a maioria dos minerais formadores de rochas.                                                              |

Tabela IV.2 – Classificação dos materiais pozolânicos quanto ao componente ativo; a atividade pozolânica decresce no sentido da seta (adaptado de Mielenz *et al.* 1951).

#### IV.5.2 - Classificação das Pozolanas Baseada na Natureza da Matéria-Prima

No Brasil, de acordo com a norma brasileira NBR 5736/91, há dois grupos maiores de pozolanas: as naturais compostas de rochas de origem vulcânica, geralmente ácidas, ou de origem sedimentar e, as artificiais formadas por materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

As pozolanas artificiais são subdivididas em três grupos. Pozolanas calcinadas, cujos materiais são provenientes da calcinação de determinadas argilas que, quando tratadas a temperatura entre 500 °C e 900 °C, adquirem a propriedade para reagir com o hidróxido de cálcio. Cinzas volantes compostas por resíduos finamente divididos, provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado. E outros materiais como pozolanas artificiais, materiais não tradicionais como escórias siderúrgicas ácidas, microsílica, rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral (Tabela IV.3).

| <b>Pozolanas naturais</b>                                                                        |                                                          |                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Materiais de origem vulcânica ou sedimentar                                                      |                                                          |                                                                                                                                                             |
| <b>Pozolanas artificiais</b>                                                                     |                                                          |                                                                                                                                                             |
| Materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica |                                                          |                                                                                                                                                             |
| <b>Subdivisão das pozolanas artificiais</b>                                                      |                                                          |                                                                                                                                                             |
| <u>Pozolanas calcinadas</u>                                                                      | <u>Cinzas volantes</u>                                   | <u>Outros materiais</u>                                                                                                                                     |
| Argilas calcinadas que adquirem propriedade para reagir com o hidróxido de cálcio                | Resíduos da combustão de carvão pulverizado ou granulado | Escórias siderúrgicas ácidas; microssílica; rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo; cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral |

Tabela IV.3 – Classificação das pozolanas quanto à natureza da matéria-prima (adaptado NBR 5736/91)

A norma NBR 12653/92 detalha a classificação da tabela IV.3 e define as exigências químicas e físicas para que os materiais pozolânicos estejam em conformidade com a mesma (Tabela IV.4; IV.5; IV.6).

Nas propriedades químicas (Figura IV.5) está incluído o somatório dos óxidos de alumínio, sílica e ferro em que seu total deve ser superior a 70% para as classes N e C e 50% para a classe E. A inclusão do ferro nessa propriedade para os casos de pozolanas cauliníticas, caso da área em estudo, poderia ser questionada, pois a influência sobre a pozolanicidade das argilas depende do  $\text{SiO}_2$  e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e não do ferro (Secção IV.4). Neste trabalho foi adotado o sistema formado apenas por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Entre as propriedades físicas (Figura IV.6) o índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias também é o objeto de controvérsia. A norma fixa em 75% o valor mínimo a ser obtido. Entretanto esse valor é dependente da compatibilidade entre pozolana e cimento e pode variar, para uma mesma pozolana, se utilizados cimentos, química e mineralogicamente diferentes, mesmo sendo de tipo e classe equivalentes (Secção V.2.5). Nesse caso, o critério mais adequado, no entendimento do trabalho, deveria ser a utilização do índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias como critério de restrição, enquanto o índice de atividade pozolânica com cimento deveria ser utilizado como referência, apenas. Por essa razão, nesse trabalho, foi adotado, como controle de pozolanicidade, somente o índice de atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, servindo o índice de atividade com cimento como referência no controle e como objeto de estudo e comparação entre os métodos.



| <b>Pozolanas</b>                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                   |                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Classe N</u>                                                                                                                                                                              | <u>Classe C</u>                                                                                                                   | <u>Classe E</u>                                                                                          |
| Pozolanas naturais que obedecem aos requisitos aplicáveis nesta norma, como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. | Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas que obedece aos requisitos aplicáveis nesta norma. | Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes N e C, como as pozolanas calcinadas, por exemplo. |

Tabela IV.4 – Classificação das pozolanas por classes (adaptado NBR 12653/92)

| <b>Propriedades Químicas</b>                                           | <b>Classe N</b> | <b>Classe C</b> | <b>Classe E</b> |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% mín) | 70              | 70              | 50              |
| $\text{SO}_3$ ( % 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 $\text{Na}_2\text{O}$ ( % máx)                  | 1,5             | 1,5             | 1,5             |

Tabela IV.5 – Classificação das pozolanas por exigências químicas (adaptado NBR 12653/92)

| <b>Propriedades Físicas</b>                                                             | <b>Classe N</b> | <b>Classe C</b> | <b>Classe E</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Material retido na peneira 45 micra ( % máx)                                            | 34              | 34              | 34              |
| Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle ( % mín) | 75              | 75              | 75              |
| Índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias ( MPa)                              | 6,0             | 6,0             | 6,0             |
| Água requerida* ( % máx )                                                               | 115             | 110             | 110             |

\* em relação à água inicial da mistura só com cimento

Tabela IV.6 – Classificação das pozolanas por exigências físicas (adaptado NBR 12653/92)

A classificação baseada na natureza das matérias-primas (NBR 5736/91 e 12653/92) é adotada neste trabalho porque permite diferenciar a atividade pozolânica das argilas em naturais e termicamente ativadas. Esse procedimento tem sido de melhor aplicação e praticidade no estudo de argilas caulínicas que ora precisam ser calcinadas para exibir atividade pozolânica e ora não.

#### **IV.6 – Vantagens do Uso de Pozolana no Cimento**

O uso de pozolana é especialmente vantajoso em grandes estruturas maciças de concreto estrutural, como barragens (Souza Santos, 1975). Mas, além dessa aplicação específica de pozolana através do cimento CP IV, seu uso tem, ainda, outras significativas vantagens que a tornam atrativa aos fabricantes de cimento, aos consumidores e ao meio-ambiente, sendo as mais relevantes: menor custo de produção, menor emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera, redução do calor de hidratação, melhora da resistência ao ataque de águas sulfatadas, retardo ou eliminação das reações álcali-agregado, melhor plasticidade do concreto, diminuição da permeabilidade do concreto, armazenagem de longa duração e a céu aberto.

Dentre essas vantagens, o custo é uma das mais importantes. O custo de produção do cimento portland composto com pozolana (CP II – Z; adição de 6 a 14%) é cerca de 30% mais baixo do que o cimento portland sem essa adição que ele substitui (CP II – F). A redução de custo do cimento portland pozolânico (CP IV; adição de 15 a 50%) é da ordem de 60% menor do que seu equivalente, o cimento portland de alto-forno (CP III com adição de escória siderúrgica de 35 a 70%). Nesse último caso, a redução é bem mais expressiva porque a pozolana substitui a escória de valor bem mais elevado, principalmente em função da distância da sua origem de produção até a fábrica de cimento consumidora e também, obviamente, porque os valores substituídos são expressivamente superiores ao cimento CP II -Z. Esses valores foram calculados considerando a distância da jazida Bonsucesso e as duas plantas industriais instaladas na região Fercal no Distrito Federal, cerca de 35 km (Lacerda, 2001).

A expressiva redução do custo de produção se deve à energia térmica, um dos componentes de custos de maior peso no processo de fabricação de cimento. Para o tratamento térmico das pozolanas se utiliza cerca de 450 kcal para cada tonelada de pozolana produzida, enquanto que se consome cerca de 780 kcal para produzir uma tonelada de clínquer. Também os custos de energia elétrica, extração, britagem e moagem são significativamente menores do que os equivalentes para produção de clínquer. Como a relação de substituição de clínquer por pozolana é direta, os ganhos são imediatos.

As desvantagens do uso de pozolana são menores. As jazidas supridoras de pozolana normalmente estão mais distantes da unidade fabril do que a mina de calcário que usualmente está adjacente; a extração da pozolana no Distrito Federal é restritiva por razões ambientais; e os cimentos produzidos com pozolana requerem mais água na mistura da pasta em função da maior superfície específica da pozolana.

## V – Materiais e Métodos

### V.1 – Materiais

Na área Bonsucesso - região de Planaltina-DF - ocorre argila pozolânica inconsolidada que vem sendo explorada pela indústria cimenteira do Distrito Federal desde 2002. Até 2005 a lavra vinha sendo realizada em 3 bancos com taludes de 5 metros de altura. Da base para o topo, o perfil é constituído por argilas na fração argila e silte de cor amarelo com tons vermelhos na base. No primeiro banco de lavra ela grada de tons amarelados na base para cor creme a esbranquiçado em direção ao topo do talude (Figura II.6). Nos dois níveis superiores ela é de cor creme a esbranquiçada. (Figura II.5; II.7; II.12). De uma forma geral apresentam predominantemente textura argilosa, sendo untuosa ao tato.

#### V.1.1 – Amostragem e Preparação das Amostras

Foi feita coleta sistemática em um perfil vertical de 22 metros, da base para o topo, com espaçamento de um metro entre as amostragens. Dois métodos de coleta foram adotados. Na base da mina foi feito um furo vertical de 6 metros de profundidade, utilizando trado motorizado convencional. Nos 16 metros superiores foi utilizado o método amostragem de canal na frente de lavra da base para o topo da mina (Figura V.1). Além disso, fora da área de lavra e topograficamente abaixo, foram coletadas amostras de quartzito, visando subsidiar informações complementares à caracterização geológica.

Identificação da amostragem (Figura II.12):

| Localização da amostragem                                  | Rótulo das amostras     |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Base da mina – piso inferior (sondagem a trado motorizado) | A1, A2, A3, A4, A5, A6  |
| Piso inferior até piso intermediário                       | C1, C2, C3, C4, C5, C6  |
| Piso intermediário até piso superior                       | C7, C8, C9, C10, C11    |
| Piso superior até terreno natural                          | C12, C13, C14, C15, C16 |
| Fora da área de lavra – quartzitos                         | 1, 2, 3 e 4             |

Tabela V.1 – Localização e identificação das amostras da área Bonsucesso

As coletas por trado representaram cerca de 4 kg por amostra. Os canais das coletas construídos ao longo dos taludes dos 3 níveis foram feitos com o auxílio do martelo de geólogo e seu sulco teve dimensões médias da ordem de 15 cm de largura por 10 cm de profundidade que representou cerca de 18 kg por amostra.

A preparação das amostras de cada nível coletado foi feita em laboratório do IG-UnB, atendendo dois princípios fundamentais: homogeneização das amostras a cada nível e redução da quantidade. A quantidade em excesso foi preservada para eventuais necessidades futuras, visto que as frentes de lavra de onde foram coletados os materiais não existem mais, pois foram extraídas para fins de utilização industrial. Tratamentos posteriores, como moagem, pulverização, secagem, mistura, foram realizadas ou não em função do método a qual se destinou o material (Figura V.2).



Figura V.1 – Amostragem de canal. A foto exhibe amostragem na base na mina Bonsucesso



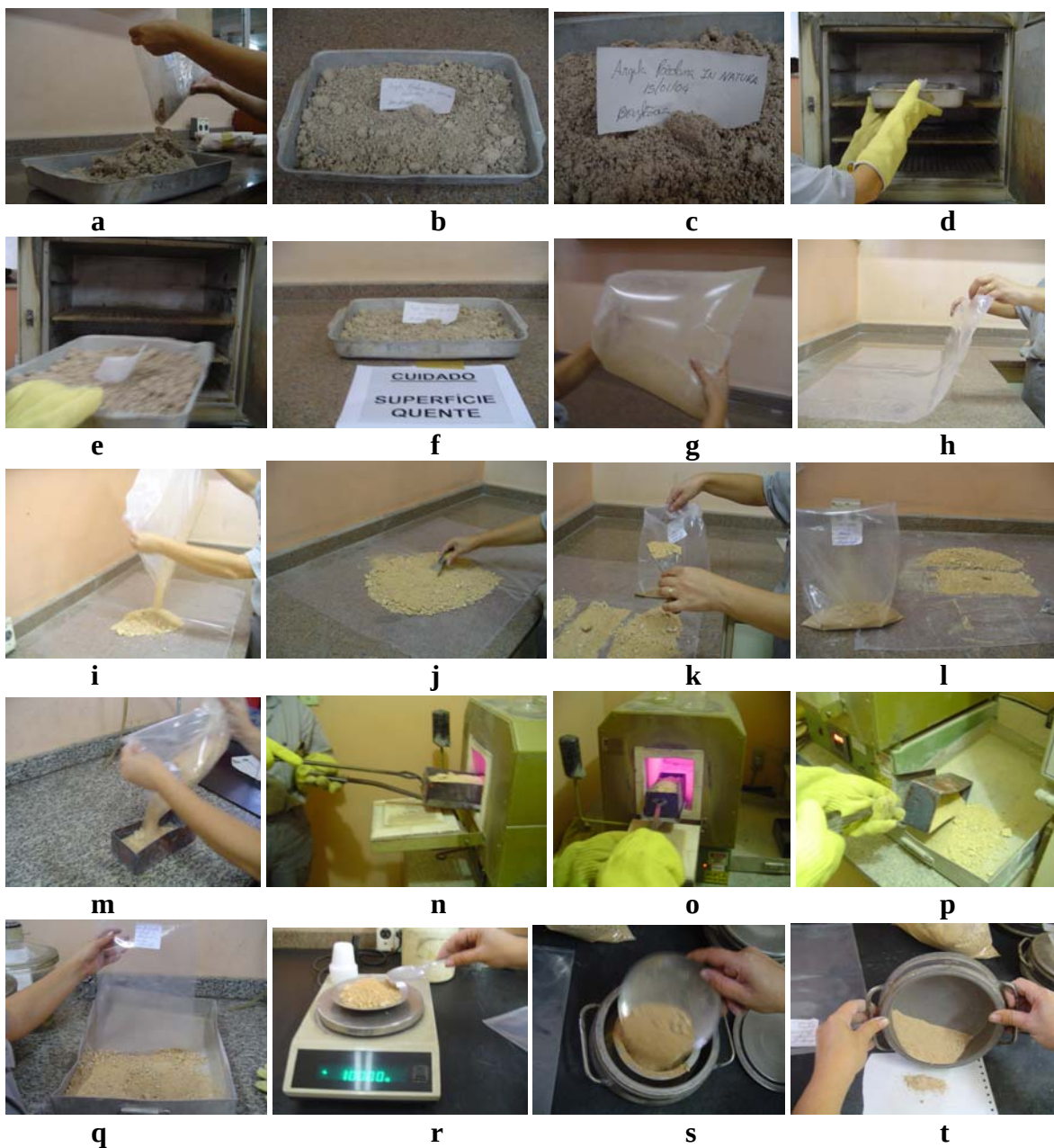


Figura V.2 - Preparação de amostras passo a passo: **a b c** – recebimento; **d e f** - secagem em estufa; **g h i j** – homogeneização; **k l m** - separação das partes; **n o p** – calcinação; **q r s t** - pesagem e moagem.

## V.2 – Métodos

A argila da área Bonsucesso foi submetida a análises por difração de raios-X (argila *in natura* e calcinada), a análises químicas, a microscopia eletrônica de varredura, a calcinação, a determinação de atividade pozolânica com cal e com cimento (argila *in natura* e calcinada) e a ensaios pelo método de Fratini. Os quartzitos foram submetidos a análises petrográficas e também a análises por difração de raios-X.

### V.2.1 – Difração de Raios-X

As análises difratométricas e a interpretação dos resultados foram realizadas no laboratório de raios-X do IG-UnB.

A difração dos raios-X permite a caracterização das estruturas cristalinas, e a partir delas, a identificação dos minerais, sendo a técnica mais adequada à definição dos argilominerais que têm dimensões ínfimas, geralmente menor do que 4  $\mu\text{m}$ . Desse modo, como os constituintes das argilas estudadas encontram-se predominantemente na fração argila e silte, essa técnica se mostrou de grande importância no presente trabalho.

A preparação das amostras seguiu as técnicas convencionais para análise de argilominerais, consistindo na separação, concentração e preparação de lâminas. O difratômetro utilizado foi o modelo Rigaku-D/MAX – 2 A/C, equipado com tubo de cobre e filtro de Ni, operando com 40 kv e 20 mA

As análises foram feitas na amostra total e na fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ). Para a confecção de lâminas da amostra total, foi utilizada a técnica de *back loading*, que consiste em pressionar o pó da amostra em lâmina vazada de alumínio. A partir da fração argila, separada obedecendo à lei de Stokes e rotinas do laboratório (Figura V.3), foram preparadas lâminas, utilizando-se a técnica do *esfregaço* que orienta os argilominerais segundo o plano 001, intensificando as suas reflexões características. A amostra total foi submetida a uma varredura de  $2\theta$  de 2 a  $65^\circ$  e a fração argila de 2 a  $35^\circ$ , com aquisição contínua de  $2^\circ$  por minuto para ambas. Após ser lida no DRX, a lâmina orientada foi saturada com etileno-glicol em câmara de vácuo por 12 horas e depois foi aquecida em estufa a  $490^\circ\text{C}$  por 3:00 horas. A amostra total também foi aquecida em estufa a  $490^\circ\text{C}$  por 3:00 horas. Entretanto, as condições do aquecimento diferem da lâmina orientada, pois a massa submetida ao aquecimento é bastante superior na amostra total - alíquotas de 3 a 5 g de argila disposta em cadinhos de alumínio.

A partir dos difratogramas, os minerais foram identificados por meio do software JADE 3.0 da MDI e a pesquisa de possíveis minerais no banco de dados mineralógicos do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Por esse método foram estudados: argilas *in natura*, argilas calcinadas (Secção V.2.4) e quartzitos (Secção II.3). As argilas *in natura* foram caracterizadas por amostra total, por amostra total aquecida e por fração argila da amostra total aquecida, essa última, somente a seleção - A1, A3, A5 e C10 a C14. As argilas *in natura* também foram caracterizadas na fração argila por amostra normal e aquecida - seleção A1 a A6 e C10 a



C14 - e por saturação com etileno-glicol - seleção A2, A4, A6. A argila da amostra total foi calcinada a 800 °C por 30 minutos e todas as amostras foram analisadas, exceto a amostra C3 (Tabela V.2; Anexo 1; 2; 3). Duas amostras de quartzitos foram selecionadas e caracterizadas por amostra total (Figura II.13).

A execução dessa bateria de análises difratométricas teve como propósito a identificação da abundância relativa das fases minerais, verificação do comportamento da caulinita na amostra total, verificação do conteúdo mineral na fração argila, da presença ou não de argilominerais interestratificados e das alterações mineralógicas ocorridas após o tratamento térmico, simulando condições industriais – calcinação a 800 °C por 30 minutos.

A mineralogia do perfil Bonsucesso foi determinada baseada nos difratogramas da amostra total *in natura* e nos difratogramas da amostra total calcinada (Tabela VI.2).

| Amostra | Argila <i>in natura</i> - amostra total |          |                           | Argila <i>in natura</i> - fração argila |                |          | Argila total calcinada |
|---------|-----------------------------------------|----------|---------------------------|-----------------------------------------|----------------|----------|------------------------|
|         | total                                   | aquecida | fração argila da aquecida | normal                                  | etileno-glicol | aquecida |                        |
| C16     | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C15     | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C14     | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| C13     | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| C12     | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| C11     | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| C10     | X                                       | X        |                           | X                                       |                | X        | X                      |
| C9      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C8      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C7      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C6      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C5      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C4      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C3      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          |                        |
| C2      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| C1      | X                                       | X        |                           |                                         |                |          | X                      |
| A6      | X                                       | X        |                           | X                                       | X              | X        | X                      |
| A5      | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| A4      | X                                       | X        |                           | X                                       | X              | X        | X                      |
| A3      | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |
| A2      | X                                       | X        |                           | X                                       | X              | X        | X                      |
| A1      | X                                       | X        | X                         | X                                       |                | X        | X                      |

Tabela V.2 – Mapa de identificação da difratometria por amostra versus status da argila caracterizada

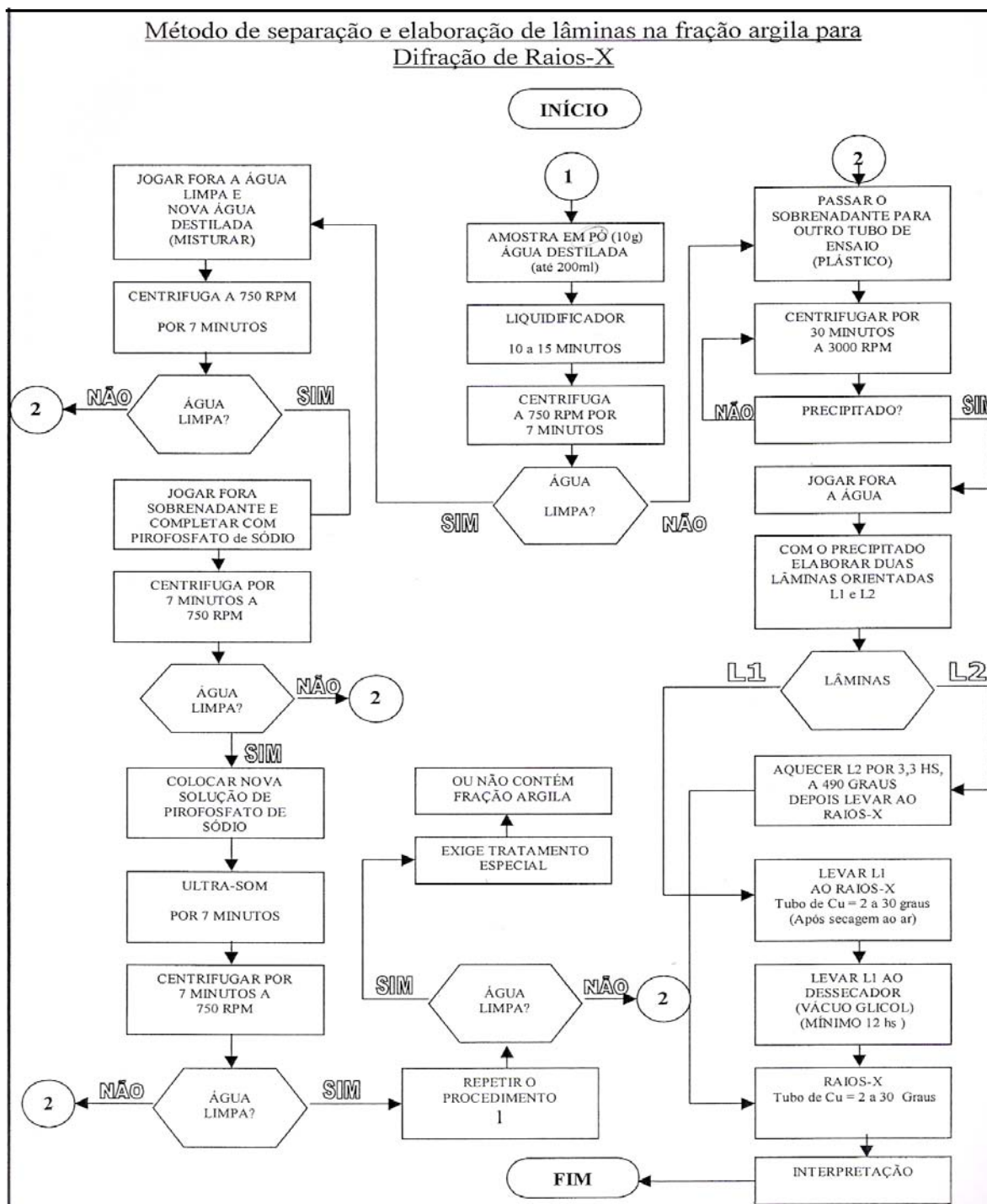


Figura V.3 – Fluxograma de preparação de lâminas na fração argila para DRX

### V.2.2 – Análises Químicas

Para os métodos de análise química, a associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12653/92 requer a determinação dos valores dos componentes e propriedades seguintes: perda de Umidade (P.U.), perda ao fogo (PF),  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$ .

Neste trabalho foram realizadas análises químicas das 22 amostras pelos métodos de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) e Espectrometria de Emissão Atômica (ICP-AES). Os ensaios foram executados no Laboratório de Geoquímica do IG-UnB. Obteve-se resultados para os óxidos dos elementos maiores:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  e PF; e para os elementos menores: Sr, Cu, Zn, Y, Zr, Be, Co, Ba, Mn, V, Ni e Cr.

As análises químicas não são utilizadas como método para definição da reatividade pozolânica do material (Souza Santos, 1975). Porém, são importantes como parâmetro de controle de uniformidade e regularidade do jazimento e, também se prestam para a determinação do teor de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) e o teor de  $\text{MgO}$  que são restritivos para a fabricação do cimento e devem ser controlados em seus limites superiores. Neste trabalho servirão também para correlações entre os diversos métodos.

### V.2.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura

Essas análises foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás. A amostra *in natura* C11 foi selecionada em função de ser representativa do pacote do minério em processo de extração. As análises realizadas visaram avaliar a microestrutura da amostra principalmente quanto à caulinita e ao quartzo.

A imagem foi obtida utilizando conjuntamente os detectores de elétrons secundários (SE) e os de elétrons retroespalhados (QBSE), e a microanálise, utilizando o espectrômetro por energia dispersiva de Raios-X (EDS).

### V.2.4 – Calcinação da Argila Pozolânica

A calcinação das pozolanas foi realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás.

Esse método teve por função principal, a preparação do material para a determinação de atividade pozolânica no método físico (Seção V.2.5). Complementarmente, as amostras calcinadas foram submetidas à análise de difração de raios-X no laboratório de raios-X do IG-UnB, visando verificar as alterações mineralógicas impressas no perfil. A calcinação teve como objetivo também, a verificação de alterações de cores da argila calcinada.

Cerca de 250 gramas de cada amostra do perfil Bonsucesso foi calcinada em mufla a 800 °C por 30 minutos. O procedimento foi repetido para cada uma das amostras em recipiente próprio e individual. Após calcinação a argila foi moída. (Figura V.2).

## V.2.5 – Métodos Baseados na Medição da Resistência Mecânica de Corpos-de-prova

Na literatura técnica existe um consenso de que os ensaios mecânicos constituem a melhor forma de avaliação da reatividade dos materiais pozolânicos, uma vez que a manifestação da resistência mecânica exige a geração de compostos ou fases mineralógicas de propriedades ligantes que só se formarão se ocorrer uma reação química entre a pozolana e a cal disponível. Há dois grandes grupos para a avaliação da reatividade das pozolanas: os que utilizam hidróxido de cálcio (cal) e os que utilizam cimento. A norma brasileira estabelece os procedimentos pertinentes a cada um deles, respectivamente através da NBR 5751/92 e 5752/92, adotadas neste trabalho.

Ao se utilizar o cimento para a avaliação da reatividade dos materiais pozolânicos é preciso de que se esteja consciente que a significativa influência das características físicas e mineralógicas do cimento sobre a qualidade dos resultados pode tornar difícil a avaliação da qualidade das pozolanas, uma vez que há afinidades físicas e mineralógicas diferentes entre a mesma pozolana e os diferentes cimentos. No caso desse trabalho as comparações serão feitas entre as amostras para um mesmo cimento e, portanto, os resultados serão comparáveis entre si ainda que os valores obtidos não possam ser tomados como absolutos.

Então, com o objetivo de compensar essa deficiência, a atividade pozolânica é investigada através da cal hidratada que possui uma uniformidade e pureza de melhor controle, tornando os resultados mais absolutos do que com o cimento. Entretanto, não se pode perder de vista que o hidróxido de cálcio está muito longe de reproduzir a complexidade das pastas de cimento portland.

### V.2.5.1 – Determinação de Atividade Pozolânica Com Cal

A determinação de atividade pozolânica com cal foi realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás. Todas amostras foram ensaiadas com pozolana *in natura* e com pozolana calcinada

Através do procedimento da norma NBR 5751/92, a amostra deve ser seca em estufa a 110 °C até que se caracterize constância na massa. A partir da amostra de pozolana prepara-se uma argamassa, que deve conter 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.

A moldagem de três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura utiliza os seguintes materiais e quantidades: hidróxido de cálcio – 104 gramas; areia normal – 234 gramas de cada uma das frações; e material pozolânico –  $2 \times \delta_{\text{poz}} / \delta_{\text{cal}} \times 104\text{g}$ , em que  $\delta_{\text{poz}}$  e  $\delta_{\text{cal}}$  são os valores da massa específica do material pozolânico e cal hidratada, respectivamente. A quantidade de água adicionada é utilizada para obtenção de uma consistência normal.

O resultado da atividade pozolânica é dado pelo valor da resistência mecânica dos corpos-de-prova rompidos aos 7 dias, sendo expresso em MegaPascal (MPa).

### V.2.5.2 – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento

A determinação de atividade pozolânica com cimento foi realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás. Todas amostras foram ensaiadas com argila *in natura* e com argila calcinada.

Através do procedimento da norma NBR 5752/92, a amostra de argila é seca em estufa a 110 °C. São preparadas duas argamassas: uma só com cimento e outra com cimento – o cimento utilizado foi o CP II – F.- e argila. Para a moldagem de três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, são utilizados os seguintes materiais e quantidades:

#### Argamassa A

cimento portland – 312,0 gramas

areia normal – 936,0 gramas

água - X

#### Argamassa B

cimento portland – 202,8 gramas;

material pozolânico –  $109,2 \times \delta_{\text{poz}}/\delta_{\text{cim}}$

areia normal – 936,0 gramas

água - Y

em que  $\delta_{\text{poz}}$  e  $\delta_{\text{cim}}$  são os valores da massa específica do material pozolânico e do cimento, respectivamente e, X e Y são as quantidades de água necessárias para produzir índices de consistência de  $225 \pm 5$  mm. As proporções acima equivalem a uma adição de 35% de material pozolânico em relação ao cimento

O índice de atividade pozolânica com cimento portland é dado pela relação entre a resistência média aos 28 dias , dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B) e a resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A) e são expressos em valores percentuais. Normalmente se considera uma pozolana de boas características quando os valores são superiores a 75%, devendo-se tomar esse valor com ressalvas em função da compatibilidade da pozolana com o cimento utilizado.

### V.2.6 – Métodos Baseados na Combinação da Cal com a Pozolana: método de Fratini

Sob condições experimentais bem definidas e padronizadas, a evolução do conteúdo de  $\text{Ca(OH)}_2$  com o tempo pode ser de grande importância na definição da qualidade de uma pozolana e, a princípio, quanto mais rápido e intenso for o decréscimo do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , mais reativa seria uma pozolana (Zampieri, 1989).

O ensaio baseado na combinação da cal com a pozolana é um procedimento químico que tem como princípio a capacidade de fixação da cal -  $\text{Ca(OH)}_2$  - pelas pozolanas. Os ensaios que permitem a medição da fixação do hidróxido de cálcio pelas pozolanas são realizados pelos métodos de Chapelle (Raverdy *et. al.*, 1980) e de Fratini

(Fratini, 1954). O método de Chapelle é utilizado para avaliar a pozolanicidade de materiais potencialmente pozolânicos, enquanto o último verifica se determinado cimento é pozolânico ou não.

No método de Chapelle a taxa da reação de pozolanicidade é determinada por um teste acelerado que consiste em uma solução aquosa contendo material pozolânico e cal suspensos em banho-maria e agitada durante 16 horas à temperatura constante. O resultado da atividade pozolânica é expresso pela relação mg de óxido de cálcio / g de material pozolânico e permite graduar o nível de reatividade de uma pozolana em função da redução do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Neste trabalho apenas o método de Fratini foi utilizado visto que o laboratório de Furnas em Aparecida de Goiânia, Goiás, suporte para essas análises, não dispunha ainda do método de Chapelle normalizado em seus procedimentos.

### Método de Fratini

O método de Fratini está normalizado pela NBR 5753/92, e sua aplicação é restrita aos cimentos portland pozolânicos. É um processo químico que visa a determinação da quantidade de hidróxido de cálcio que pode saturar um meio de alcalinidade definida – hidróxido de cálcio e alcalinos. A partir dessa assertiva, o método se fundamenta na capacidade de fixação de hidróxido de cálcio pelas pozolanas e parte do princípio de que na solução que banha intimamente uma pasta de cimento hidratado, praticamente só se dissolvem a cal de hidrólise e os hidróxidos alcalinos derivados da hidratação das fases do cimento.

Pelo estudo do equilíbrio entre a fase aquosa intersticial e o cimento foi possível determinar a quantidade de hidróxido de cálcio que pode saturar um meio de alcalinidade definida (Fratini, 1954). No caso da norma brasileira se admite que em 7 dias esse equilíbrio é alcançado. Se após 7 dias os cimentos pozolânicos dão ainda soluções supersaturadas em hidróxido de cálcio há duas possibilidades: ou o cimento possui pouca pozolanas em sua composição e / ou as pozolanas são fracamente reativas.

As soluções que banham os cimentos portland pozolânicos exibem uma concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  tipicamente inferior ao limite de saturação, devido à fixação da cal pela pozolana. Por isso, a concentração de hidróxido de cálcio na fase aquosa em contato com o cimento hidratado pode ser admitida com parâmetro de controle da eficácia de um cimento portland. Porém, os resultados obtidos por esse método têm um valor relativo e devem ser aceitos com cautela, uma vez que o processo químico de fixação da cal pela pozolana não assegura por si só um desempenho mecânico satisfatório do cimento, pois nada impede que uma dada substância venha a reagir com o hidróxido de cálcio, embora o produto gerado a partir dessa reação não apresente qualquer propriedade cimentícia (Zampieri, 1989).

De acordo com o procedimento da NBR 5753/92, deve-se misturar 20 g de cimento a 100 cm<sup>3</sup> de água destilada, à temperatura de 40 °C. Após 7 dias em recinto termostato, retirar 50 cm<sup>3</sup> da solução filtrada e determinar a alcalinidade total e o teor em óxido de



cálcio. Os resultados, marcados sobre as isotermas do diagrama (Figura V.4), representam a concentração de saturação de CaO na solução, em função da concentração do íon hidroxila.

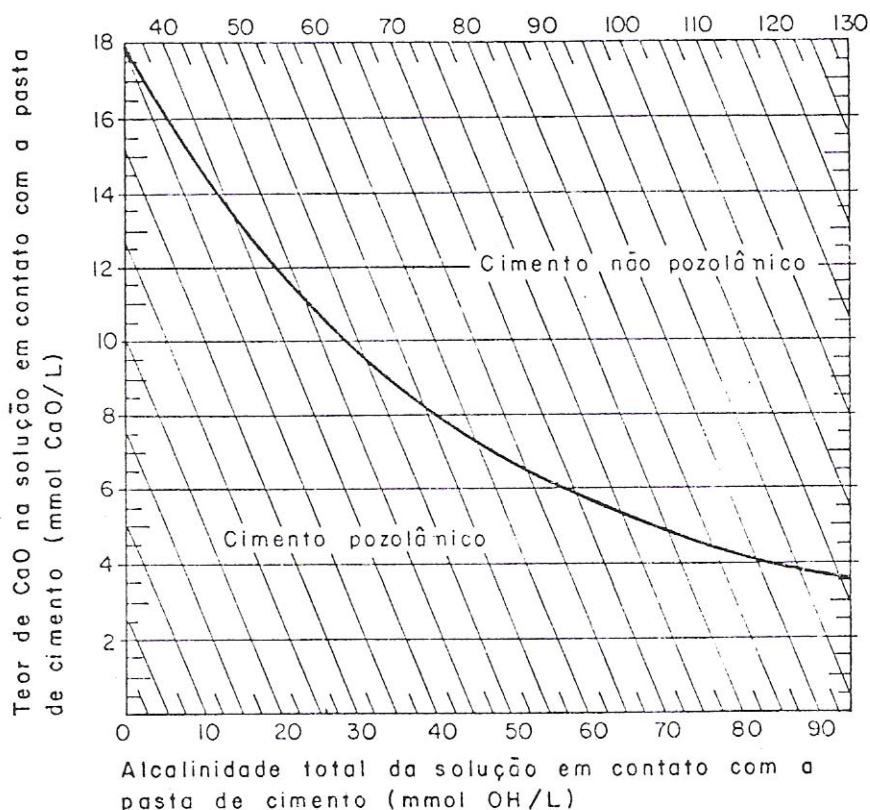


Figura V.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C na presença de álcalis (NBR 5751/92).

Neste trabalho foram analisadas por esse método todas as amostras do perfil para argila calcinada e as amostras de A1 até A4 para a argila *in natura*.

Os ensaios químicos pelo método de Fratini foram realizados no Laboratório Químico de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, Goiás que adota em seus procedimentos o uso de multidosador com precisão na casa dos centésimos, permitindo trabalhar com 25 cm<sup>3</sup> da solução filtrada ao invés de 50 cm<sup>3</sup> como estabelecido acima.

### V.2.7 – Análise Petrográfica

Foram realizadas quatro secções delgadas das rochas quartzíticas, segundo as técnicas consagradas: corte, polimento, colagem e desbaste com pó abrasivo até a espessura de 30 µm. Essa análise teve como objetivo principal a determinação petrográfica dos quartzitos intercalados aos metargilitos e metassiltitos. Esses ensaios foram executados nos laboratórios do IG-UnB.

## VI – Resultados

### VI.1 – Difração de Raios-X

Para caracterizar as fases minerais das argilas do perfil de Bonsucesso e as possíveis alterações impostas pela calcinação de suas argilas (800 °C por 30 minutos), foram feitas três baterias distintas de ensaios (Tabela V.2; Anexo 1; 2; 3).

Na primeira etapa os resultados foram obtidos a partir da amostra total *in natura* (Tabela VI.2). Posteriormente, a fim de se verificar o colapso da estrutura da caulinita, da ordem de 3 a 5 gramas dessa argila foram aquecidas a 490 °C durante 3 horas. Os resultados dessa etapa mostraram que a caulinita presente na parte inferior do perfil até a amostra A6 não colapsou, enquanto que a partir de A6 até o topo o colapso da caulinita foi completo, exceto nas amostras C11 e C13, cujo colapso da caulinita foi parcial, provavelmente devido a variação da massa aquecida. Para verificar o comportamento da caulinita na fração argila da amostra aquecida analisou-se uma seleção do perfil – A1, A3, A5 e C10 a C14 - e observou-se que a caulinita permaneceu sem colapso de sua estrutura na parte inferior (Anexo 1).

Na segunda etapa, a fim de se verificar o comportamento das fases minerais na fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), foi tomada a seleção de A1 a A6 e C10 a C14 para amostra orientada e aquecida. Essa análise permitiu avaliar o conteúdo das fases minerais nessa fração e atestar o colapso da estrutura da caulinita. Para investigar a presença de argilominerais interestratificados, foi tomada a seleção de A2, A4, A6 para saturação com etileno-glicol (Tabela V.2; Anexo 2).

No presente trabalho era importante verificar as mudanças mineralógicas que ocorreriam no processo industrial e, por isso, simulou-se a calcinação nos termos industriais – 800 °C por 30 minutos (Secção V.2.4). Desse modo, na terceira etapa obteve-se os difratogramas para todas as amostras calcinadas, exceto C10 (Tabela V.2; VI.2; Anexo 3).

A definição da abundância relativa das fases minerais na amostra total *in natura* e na amostra total calcinada foi realizada pela comparação das intensidades das suas reflexões características. Para a caulinita e a illita foram utilizadas as reflexões do pico em  $d(001)$  de 7,5Å e 10Å, respectivamente. Para o quartzo, o anatásio, a goethita, o rutilo e a hematita, utilizou-se as reflexões “d” de 4,26Å, 3,52Å, 4,18Å, 3,25Å e 2,69Å, respectivamente (Tabela VI.1; VI.2).

A partir da comparação dessas reflexões, foram atribuídos os códigos M, m e tr, para os constituintes maiores, menores e traços, respectivamente. As reflexões dos constituintes traços são de baixa intensidade, e em geral não estão todas presentes, tornando incerta a identificação dos minerais mais escassos das amostras como, por exemplo, o rutilo (Tabela VI.2).

A mineralogia obtida por amostra total da argila *in natura* - fração granulométrica  $< 270 \mu\text{m}$  - é composta predominantemente por caulinita – constituinte maior ao longo de todo

o perfil; por quartzo - ocorre em todo perfil, mas como constituinte menor ou traço; ilita e goethita - ocorrem na parte inferior do perfil como menor ou como traço; e anatásio – ocorre na parte superior do perfil como menor e traço (Tabela VI.2; Anexo 1).

Na fração argila (<2µm), amostra orientada, as fases minerais são aproximadamente as mesmas da amostra total, porém nessa fração estão mais concentradas a caulinita, goethita e anatásio. O quartzo por vezes desaparece ou se torna um constituinte traço na amostra. As amostras aquecidas exibem o colapso total da caulinita da parte inferior e confirma o colapso da caulina parte superior do perfil. A saturação com etileno-glicol não evidenciou a presença de argilomineral interestratificado (Anexo 2).

A caulinita é o constituinte predominante do perfil e é identificada pela reflexão  $d(001) \approx 7,1 \text{ \AA}$  (Tabela VI.1). Foram caracterizados dois politipos da caulinita: na base do perfil da amostra A1 até A5, ocorre o politipo 1Md e na parte superior do perfil a partir de C2 ocorre o politipo 1A. O intervalo entre A5 e C1 evidencia a transição desses politipos (Figura VI.1; VI.3).

| <b>Mineral</b> | <b>Fórmula química</b>                                                             | <b>d característico (Å)</b> |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Caulinita      | $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$                                    | 7,1 e 3,56                  |
| Ilita          | $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | 3,33 e 10,0                 |
| Quartzo        | $\text{SiO}_2$                                                                     | 3,34 e 4,26                 |
| Anatásio       | $\text{TiO}_2$                                                                     | 3,52                        |
| Goethita       | $\text{FeO}(\text{OH})$                                                            | 4,18 e 2,69                 |
| Rutilo         | $\text{TiO}_2$                                                                     | 3,25                        |
| Hematita       | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                                            | 2,51 e 2,69                 |

Tabela VI.1 – Composição mineralógica das argilas do perfil Bonsucesso, identificada por difratometria de raios-X

Ao ser submetida por aquecimento a 490 °C, a caulinita, via de regra, apresenta a desestruturação de seu retículo cristalino, formando uma fase amorfa – metacaulinita. A caulinita do perfil Bonsucesso apresenta duas respostas distintas ao aquecimento e que coincidem com a mudança de politipo. O politipo 1Md da parte inferior apresenta um grau de dificuldade maior para seu colapso do que o politipo 1A da parte superior, às mesmas condições de aquecimento. Isso ficou bem evidente nos ensaios da primeira etapa com a argila total calcinada. Naquela experiência, a massa tomada para ser aquecida foi elevada quando comparada aos padrões dos experimentos em lâmina - na fração argila – e, como visto nessa última condição, toda caulinita do perfil teve o colapso de sua estrutura. Isso significou que o aquecimento na experiência da argila total não deve ter sido completo e permitiu, ao mesmo tempo, a constatação acima.

A ilita é caracterizada pela reflexão  $d(001) \approx 10 \text{ \AA}$  e se mantém constante nos tratamentos sob etileno-glicol e aquecimento (Tabela VI.1). Ela ocorre na parte inferior do

perfil desde a amostra A1 até a amostra C1 como constituinte menor e como traço até a amostra C7, exibindo um processo de diminuição gradativa em direção ao topo (Tabela VI.2; Figura VI.3).

Com base na intensidade das reflexões características do quartzo da amostra total, verificou-se que seu conteúdo relativo varia ao longo do perfil, havendo um enriquecimento na parte superior, mas sem tendência definida (Figura VI.2; VI.3). O enriquecimento do quartzo em direção ao topo é indicativo de sua formação neste horizonte do perfil (Figura VI.13). Observou-se ainda que a amostra C5 é a amostra do perfil mais rica em quartzo.

A goethita ocorre na parte inferior do perfil, sendo predominante nos primeiros 4 metros, menor a partir da amostra A4 até a amostra C1 e como traço nas amostras C2 e C3, evidenciando, como a ilita, um decréscimo gradacional em direção ao topo do perfil (Tabela VI.2). No horizonte entre a amostra A3 e A4 é o intervalo do perfil em que a goethita tem a maior intensidade de suas reflexões características.

O anatásio está presente na parte superior do perfil, ocorrendo como traço nas amostras C2 e C3 e como elemento menor de C3 até o topo, sendo constante nessa parte do perfil (Tabela VI.2).

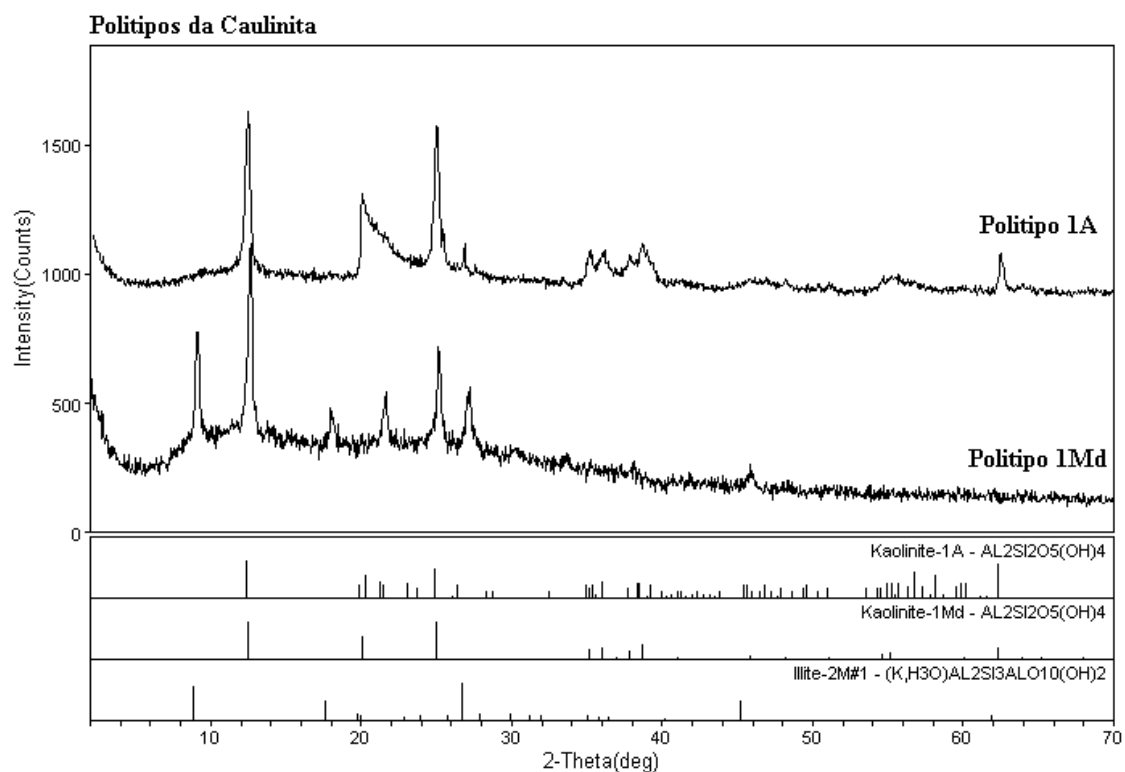
A amostra total calcinada difere da amostra total *in natura* por que a calcinada foi moída enquanto a *in natura*, não. Entretanto, esse fato não afetou a comparação entre os difratogramas. Na calcinada houve o colapso da caulinita em todo perfil, excetuando-se a amostra C10 em que parece existir traço de caulinita. Houve modificação na intensidade dos picos da ilita que sugere a mudança de politipo, passando do politipo 2M#1 na amostra total *in natura* para o politipo 2M#2 na amostra total calcinada. O conteúdo de ilita não se altera com a calcinação, mas ela se torna um constituinte predominante na parte inferior do perfil. A goethita desapareceu e a hematita foi formada como resultado da desidratação dessa última, ( $2\text{FeO}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ). O rutilo aparece como constituinte traço possivelmente formado por alteração do seu polimorfo anatásio, que coexiste com o rutilo na amostra calcinada. O quartzo tornou-se constituinte predominante na parte superior do perfil e foi observada sua formação, provavelmente utilizando parte da sílica disponibilizada no processo do colapso da caulinita (Tabela VI.2; Anexo 3).

Foram obtidos difratogramas para duas amostras de quartzito coletadas fora da área de estudo que evidenciaram a presença de quartzo, caulinita e ilita (Figura II.13).

Os resultados foram conclusivos e permitiram a divisão do perfil estudado em dois grupos mineralógicos. A Parte Basal da argila *in natura* é constituída por caulinita, ilita, quartzo e goethita; a Parte Superior por caulinita, quartzo, anatásio e traços de ilita e traços de goethita. (Tabela VI.2; Anexo 1, 2).

A Parte Basal argila calcinada é constituída por ilita, quartzo, hematita, traços de rutilo e traços descontínuos de anatásio; enquanto a Parte Superior é constituída por quartzo, anatásio, traços de ilita e traços descontínuos de rutilo (Tabela VI.2; Anexo 3).





Laboratório de DRX - IG/UnB

<d:\max\novemb-1\laueci-1> Wednesday, Nov 23, 2005 09:12:04a

Figura VI.1 – Polítipos da caulinita no perfil Bonsucesso. O polítipo 1Md ocorre na parte basal do perfil, até amostra A5; na parte superior a partir de C2 ocorre o polítipo 1A; O intervalo entre A5 e C1 evidencia a transição desses polítipos; o difratograma da parte basal refere-se à amostra total A2 e da parte superior à amostra total C10.

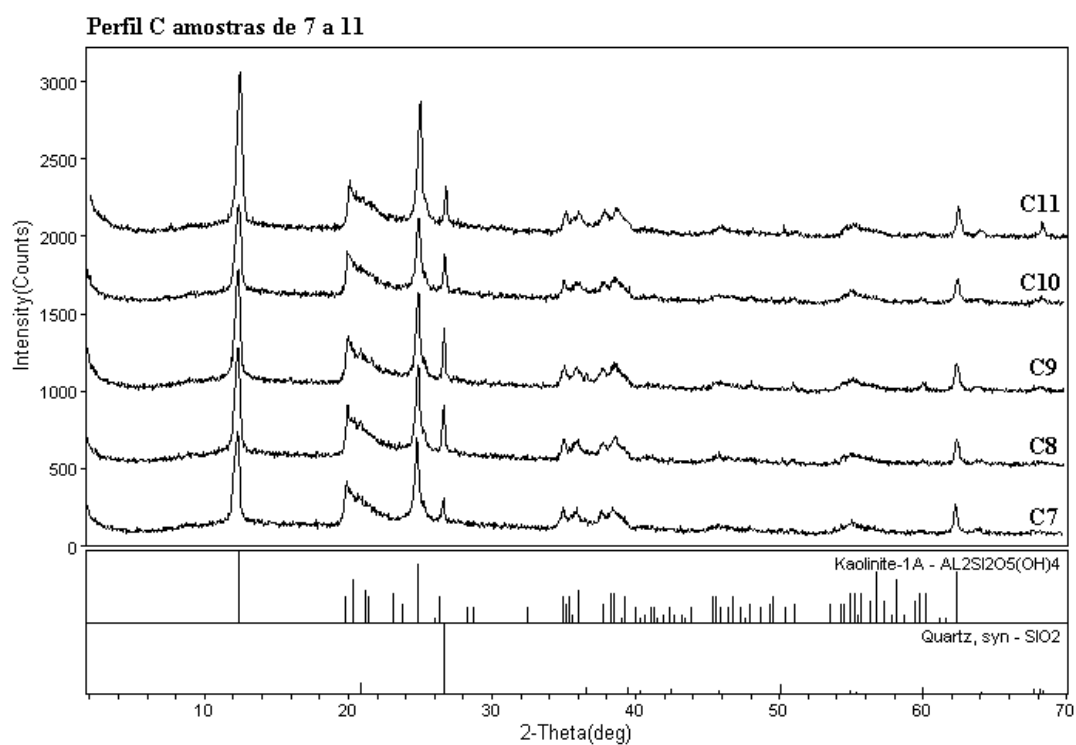
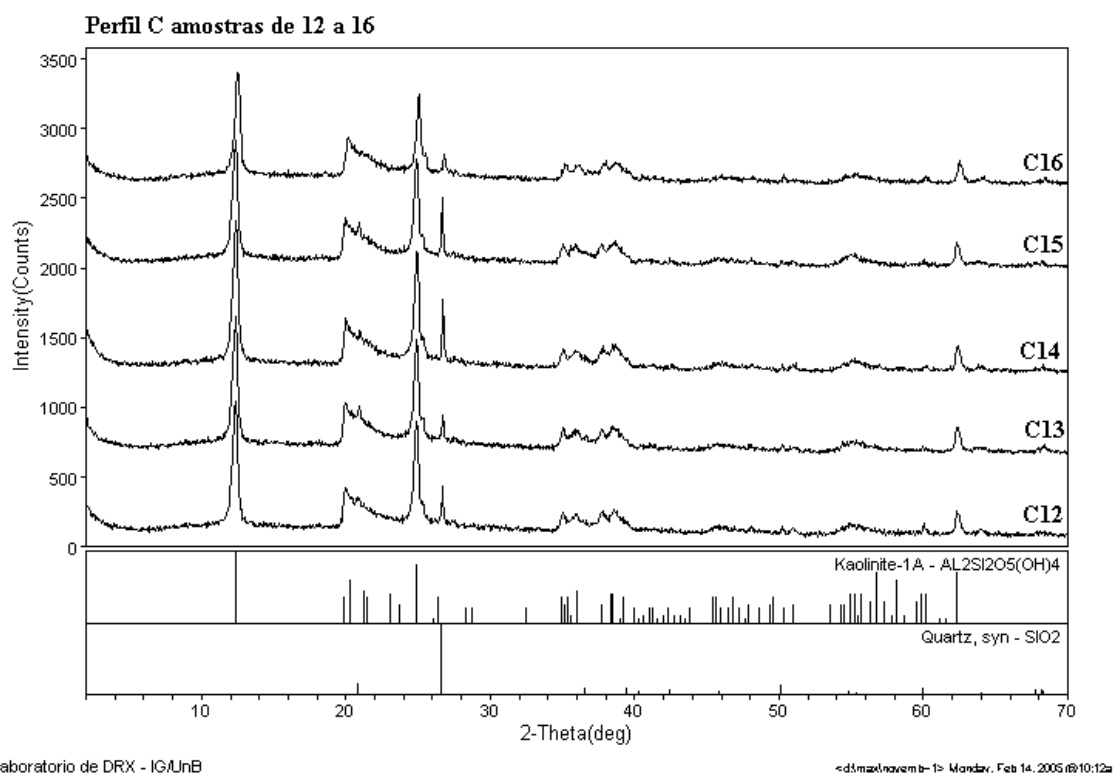


Figura VI.2 – Difratomogramas de amostra total de Bonsucesso – C7 a C11; C12 a C16. Notar as diferenças nas intensidades dos picos de quartzo, evidenciando seu conteúdo relativo e a relativa silimilaridade dos difratogramas.



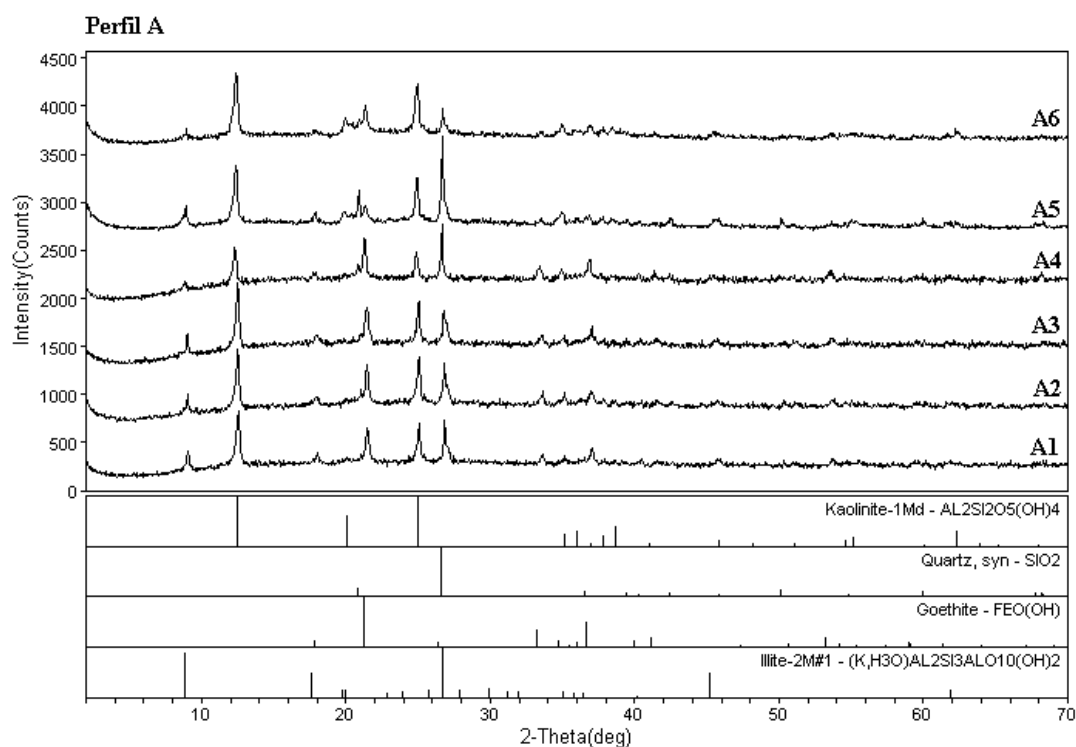
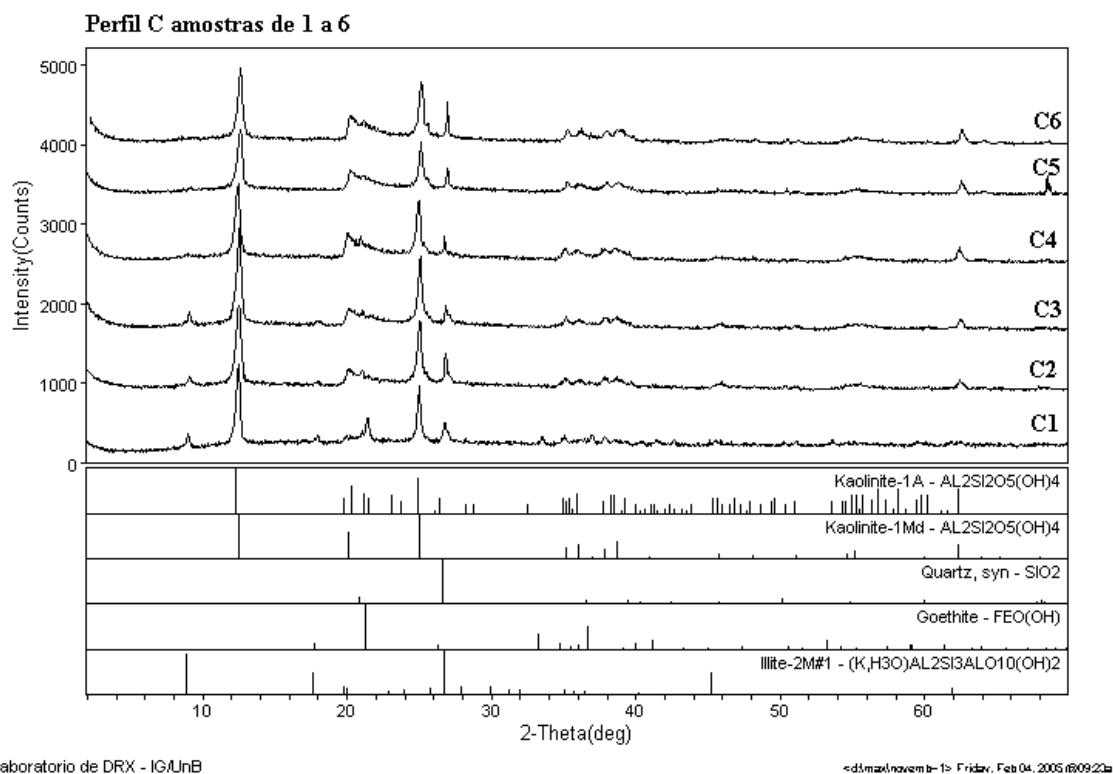


Figura VI.3 – Difrátogramas de amostra total de Bonsucesso - A1 a A6 e C1 a C6. Notar ausência de illita a partir de C3, diferenças nas intensidades dos picos de quartzo, evidenciando seu conteúdo relativo e transição de politipos da caulinita entre A5 e C1.

## VI.2 – Análises Químicas

Baseado na análise das composições químicas dos elementos maiores das amostras de Bonsucesso (Tabela VI.3) foi possível fazer importantes constatações:

1 – O  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são os reagentes fundamentais do sistema “pozolana + cal + água” (Secção IV.5). A distribuição do par ao longo do perfil exhibe dois comportamentos distintos. Na base do perfil apresenta valores variáveis, porém crescentes em tendência até a amostra C2, que caracteriza uma transição de  $\text{SiO}_2$ . A partir da amostra C2 seus valores tornam-se praticamente estáveis até o topo, exceto o  $\text{SiO}_2$ , que na amostra C16 tem seu valor diminuído aos níveis da amostra C2 (Figura VI.4).

2 – O comportamento do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é similar ao sistema  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , porém decrescente e a transição é marcada pelas amostras C2 e C3. De C3 ao topo o sistema torna-se estável (Figura VI.5). Destaca-se aqui a presença de níveis bastante elevados em A3 e A4, acusando um nível mais rico de goethita, conforme visto na secção anterior.

3 - O comportamento do  $\text{MgO}$  e do  $\text{CaO}$  equivale ao do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , notadamente para o magnésio. A transição é marcada em C3 e a partir da amostra C3 tornam-se estáveis, porém com uma ligeira tendência de queda para o  $\text{MgO}$ . Nota-se um ligeiro aumento de  $\text{CaO}$  em C16 (Figura VI.6).

4 – O comportamento dos álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) variam basicamente por influência do  $\text{K}_2\text{O}$  é equivale ao do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a transição é marcada por C3 e C4. Há dois pontos anômalos no topo em C14 e C16 (Figura VI.7).

5 – A curva do  $\text{TiO}_2$  é similar à do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mas não há uma transição nítida como no primeiro. Seus valores se estabilizam por volta de 1,80% a partir da amostra C6 até o topo, similar ao comportamento do rutilo visto em difratometria de raios-X (Figura VI.8).

As alterações da sílica, do cálcio e do potássio no topo do perfil poderiam ser interpretadas como sendo influência das atividades bioquímicas que normalmente estão presentes nas regiões de influência da flora e da fauna, como é o caso

A análise de forma globalizada mostra uma transição química desde a amostra C1 até a C4 e como estabelecido pela mineralogia no item anterior, também pelo método químico é possível estabelecer uma divisão da área Bonsucesso em Parte Basal e Parte Superior (Tabela VI.3).

Os valores de álcalis observados na parte superior estão totalmente dentro dos limites aceitáveis para a fabricação de cimento. De forma geral são aceitos valores abaixo de 2,5%. Entretanto, esse valor irá variar em função da particularidade das matérias-primas e do processo de fabricação de cimento de cada planta, entre outros. A norma brasileira limita apenas o teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  em 1,5% e, portanto, os valores constantes na área estão bem abaixo desses valores (Figura IV.5). Outro limitador no processo de fabricação de cimento é  $\text{MgO}$ . Os valores limites irão depender fortemente do teor desse elemento nas matérias-primas utilizadas na fabricação do clínquer, notadamente o calcário, de forma que quanto

maior seu teor nessa matéria-prima tanto menor o teor possível de MgO oriundo da pozolana. Para o caso da área em estudo, os teores podem ser considerados desprezíveis nesse quesito, pois são inferiores a 0,50% na parte superior da área amostrada.

A análise dos elementos menores não é um procedimento seguido nem quando se prospecta pozolanas e nem quando se explora a jazida. Neste trabalho, foram realizadas análises para elementos menores, visando observar seu comportamento (Tabela VI.4). O que se constatou de importante na análise desses elementos é que seu padrão (Figura VI.9), em linhas gerais, segue o padrão dos elementos maiores, reforçando o consenso que existe na literatura técnica da desnecessidade de sua utilização para estudos de pozolanas.

|    |                | Amostra | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | PF    |
|----|----------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|
|    |                |         | %                |                                |                                |      |      |                   |                  |                  |                               |       |
| 20 | PARTE SUPERIOR | C16     | 46,85            | 34,35                          | 1,78                           | 0,09 | 0,18 | 0,34              | 1,84             | 1,88             | 0,04                          | 13,98 |
|    |                | C15     | 48,50            | 34,41                          | 1,44                           | 0,10 | 0,10 | 0,22              | 0,22             | 1,91             | 0,04                          | 13,43 |
|    |                | C14     | 48,00            | 34,71                          | 1,40                           | 0,09 | 0,10 | 0,22              | 1,84             | 1,90             | 0,04                          | 13,42 |
|    |                | C13     | 48,07            | 34,53                          | 1,54                           | 0,08 | 0,12 | 0,21              | 0,22             | 1,86             | 0,04                          | 13,32 |
|    |                | C12     | 48,83            | 33,80                          | 1,50                           | 0,11 | 0,08 | 0,22              | 0,22             | 1,85             | 0,04                          | 13,90 |
|    |                | C11     | 49,02            | 34,24                          | 1,37                           | 0,09 | 0,14 | 0,19              | 0,21             | 1,87             | 0,04                          | 13,21 |
|    |                | C10     | 48,40            | 34,49                          | 1,43                           | 0,13 | 0,13 | 0,19              | 0,22             | 1,88             | 0,04                          | 13,21 |
|    |                | C9      | 48,00            | 35,38                          | 1,42                           | 0,11 | 0,14 | 0,19              | 0,28             | 1,87             | 0,04                          | 13,25 |
|    |                | C8      | 47,88            | 35,44                          | 1,38                           | 0,17 | 0,14 | 0,19              | 0,30             | 1,90             | 0,05                          | 13,33 |
|    |                | C7      | 47,87            | 35,38                          | 1,53                           | 0,20 | 0,14 | 0,19              | 0,36             | 1,90             | 0,04                          | 13,38 |
| 15 | PARTE SUPERIOR | C6      | 47,38            | 35,19                          | 1,69                           | 0,19 | 0,18 | 0,34              | 0,32             | 1,89             | 0,05                          | 13,16 |
|    |                | C5      | 48,63            | 33,29                          | 1,36                           | 0,16 | 0,11 | 0,30              | 0,38             | 1,71             | 0,05                          | 13,36 |
|    |                | Tr      | 48,76            | 33,08                          | 1,58                           | 0,21 | 0,09 | 0,26              | 0,46             | 1,52             | 0,05                          | 13,28 |
|    |                | C3      | 48,12            | 33,23                          | 2,53                           | 0,65 | 0,33 | 0,32              | 1,08             | 1,60             | 0,06                          | 12,35 |
|    |                | C2      | 46,83            | 33,37                          | 3,67                           | 0,77 | 0,31 | 0,30              | 1,32             | 1,53             | 0,06                          | 12,19 |
|    |                | C1      | 42,52            | 26,13                          | 16,65                          | 0,63 | 0,30 | 0,32              | 1,37             | 1,47             | 0,04                          | 11,05 |
|    |                | A6      | 38,18            | 24,23                          | 16,79                          | 0,56 | 0,17 | 0,24              | 1,37             | 1,18             | 0,10                          | 10,62 |
|    |                | A5      | 50,87            | 23,89                          | 12,23                          | 1,30 | 0,17 | 0,22              | 2,87             | 0,98             | 0,07                          | 8,99  |
|    |                | A4      | 33,28            | 15,53                          | 39,86                          | 0,58 | 0,17 | 0,22              | 1,42             | 0,68             | 0,08                          | 9,90  |
|    |                | A3      | 34,41            | 15,53                          | 38,36                          | 0,57 | 0,06 | 0,26              | 1,47             | 0,71             | 0,08                          | 10,09 |
| 5  | PARTE BASAL    | A2      | 43,82            | 22,73                          | 18,15                          | 1,20 | 0,14 | 0,30              | 2,69             | 0,95             | 0,05                          | 9,30  |
|    |                | A1      | 41,43            | 19,47                          | 26,70                          | 0,90 | 0,26 | 0,28              | 1,95             | 0,82             | 0,07                          | 9,26  |
|    |                |         |                  |                                |                                |      |      |                   |                  |                  |                               |       |

Tabela VI.3 – Análises químicas para elementos maiores das amostras de Bonsucesso (Tr = Zona de transição)

|  | Amostra | Sr    | Cu     | Zn    | Y     | Zr     | Be   | Co    | Ba     | Mn   | V      | Ni    |
|--|---------|-------|--------|-------|-------|--------|------|-------|--------|------|--------|-------|
|  |         | (ppm) |        |       |       |        |      |       |        |      |        |       |
|  | C16     | 65,15 | 11,50  | 25,42 | 18,12 | 325,81 | 1,12 | -     | 53,39  | 0,00 | 143,80 | -     |
|  | C15     | 66,53 | 14,07  | 24,94 | 17,95 | 292,74 | 1,12 | 1,11  | 41,75  | 0,00 | 145,78 | -     |
|  | C14     | 69,68 | 12,23  | 25,23 | 20,93 | 313,97 | 1,13 | -     | 41,21  | 0,00 | 157,02 | -     |
|  | C13     | 74,19 | 11,72  | 25,70 | 22,44 | 319,44 | 1,16 | 2,36  | 68,17  | 0,00 | 162,16 | -     |
|  | C12     | 72,87 | 11,69  | 24,66 | 23,36 | 314,96 | 1,17 | 1,44  | 47,93  | 0,00 | 177,87 | -     |
|  | C11     | 70,82 | 11,77  | 26,84 | 19,12 | 324,84 | 1,19 | 3,27  | 50,53  | 0,00 | 180,00 | 2,97  |
|  | C10     | 74,95 | 11,34  | 29,87 | 20,85 | 339,16 | 1,21 | 1,86  | 57,32  | 0,00 | 179,25 | 2,65  |
|  | C9      | 87,42 | 11,54  | 33,89 | 19,78 | 306,71 | 1,30 | 6,46  | 64,22  | 0,00 | 189,69 | 8,52  |
|  | C8      | 84,08 | 11,29  | 36,97 | 19,63 | 382,61 | 1,29 | 4,93  | 71,18  | 0,00 | 182,76 | 7,54  |
|  | C7      | 86,21 | 12,08  | 40,19 | 19,96 | 306,97 | 1,35 | 6,80  | 74,94  | 0,00 | 187,03 | 8,19  |
|  | C6      | 83,59 | 11,82  | 33,49 | 21,74 | 378,00 | 1,28 | 4,59  | 69,19  | 0,00 | 196,39 | 6,88  |
|  | C5      | 85,82 | 12,15  | 41,38 | 20,05 | 289,95 | 1,36 | 3,75  | 77,75  | 0,00 | 173,52 | 7,21  |
|  | C4      | 81,91 | 14,36  | 48,08 | 20,08 | 347,64 | 1,44 | 4,85  | 92,49  | 0,00 | 179,59 | 14,09 |
|  | C3      | 76,33 | 13,77  | 38,85 | 22,67 | 314,21 | 1,54 | 3,75  | 134,55 | 0,00 | 204,49 | 14,09 |
|  | C2      | 79,91 | 19,93  | 36,47 | 21,37 | 323,00 | 1,61 | 6,54  | 124,12 | 0,00 | 344,75 | 8,19  |
|  | C1      | 57,53 | 54,67  | 36,77 | 21,59 | 339,98 | 1,71 | 12,77 | 150,61 | 0,00 | 548,45 | 4,26  |
|  | A6      | 79,95 | 60,08  | 40,94 | 24,41 | 317,56 | 1,81 | 7,94  | 169,51 | 0,00 | 649,87 | 5,74  |
|  | A5      | 53,38 | 48,59  | 36,17 | 23,04 | 295,28 | 2,09 | 5,27  | 215,96 | 0,00 | 380,19 | 8,68  |
|  | A4      | 33,84 | 123,90 | 64,36 | 18,08 | 290,25 | 1,79 | 25,94 | 116,63 | 0,01 | 225,55 | 22,93 |
|  | A3      | 38,93 | 119,04 | 67,83 | 18,46 | 221,76 | 1,81 | 31,19 | 115,97 | 0,02 | 198,20 | 26,53 |
|  | A2      | 46,30 | 76,25  | 40,19 | 19,27 | 359,01 | 2,12 | 7,30  | 158,83 | 0,00 | 518,85 | 11,14 |
|  | A1      | 39,60 | 99,66  | 53,14 | 19,13 | 239,41 | 1,95 | 16,70 | 128,46 | 0,01 | 297,36 | 16,05 |

Tabela VI.4 – Análises químicas para elementos menores das amostras de Bonsucesso

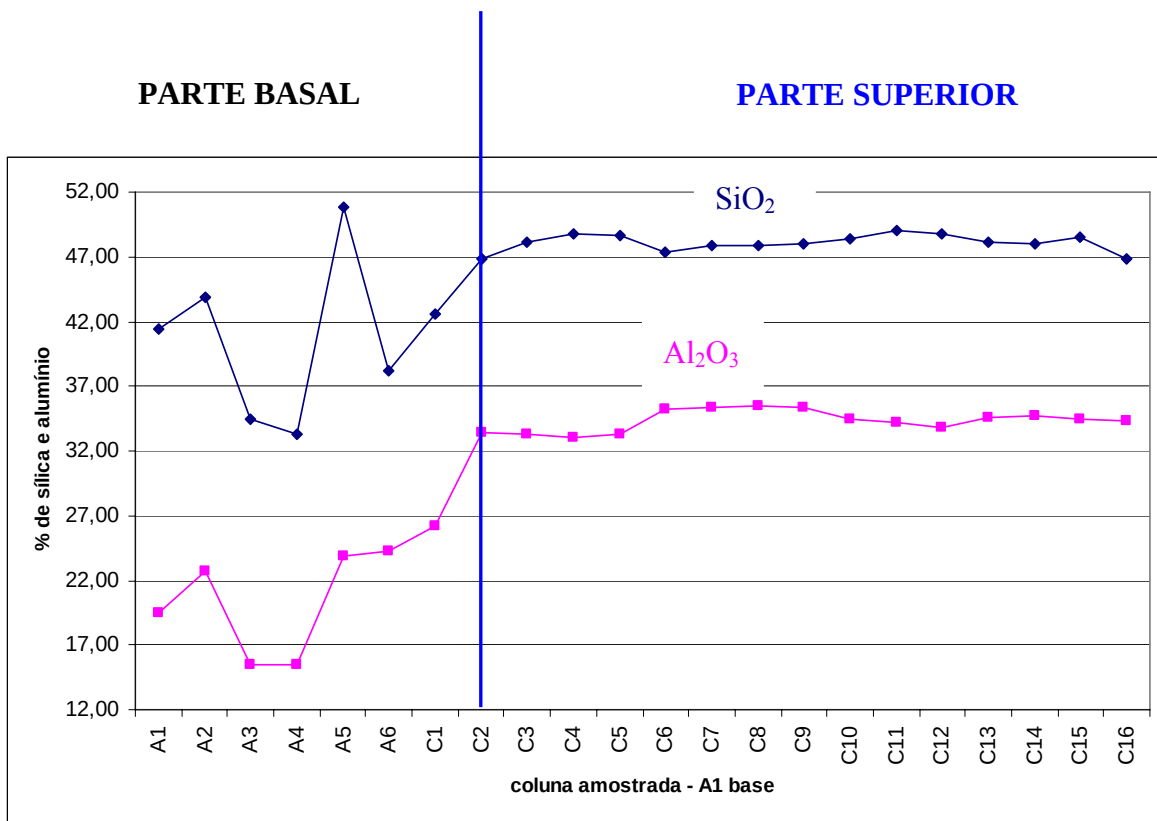


Figura VI.4 – Correlação entre os teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a coluna amostrada na área de Bonsucesso.

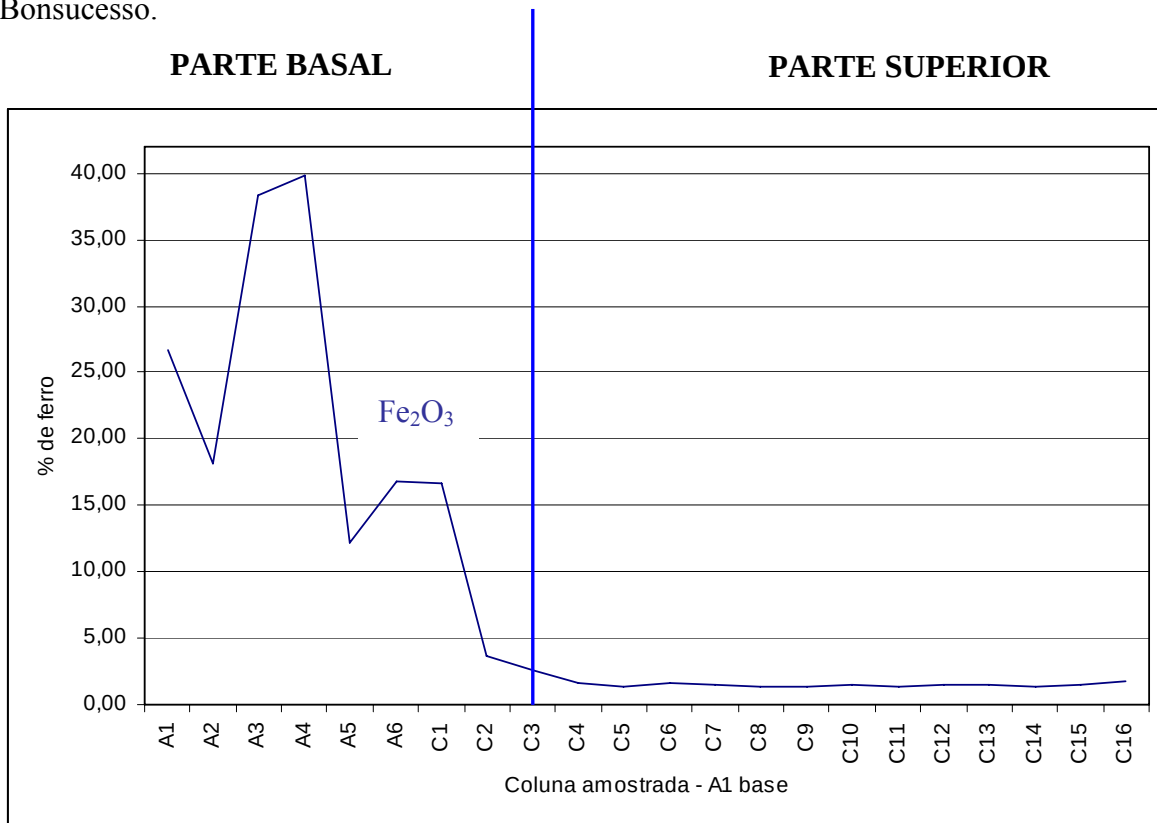


Figura VI.5 – Correlação entre os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a coluna amostrada na área de Bonsucesso. Notar valores anômalos em A3 e A4, indicando enriquecimento em goethita.

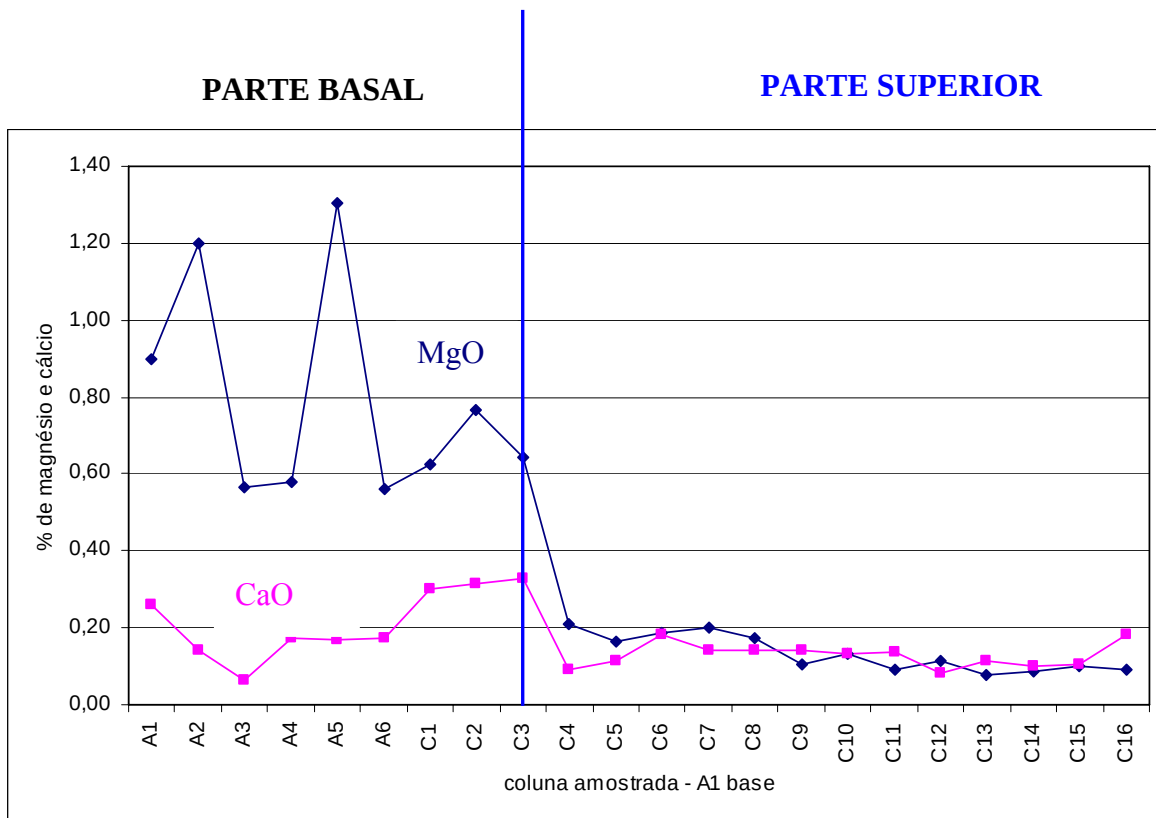


Figura VI.6 – Correlação entre os teores de MgO e CaO e a coluna amostrada na área de Bonsucesso.

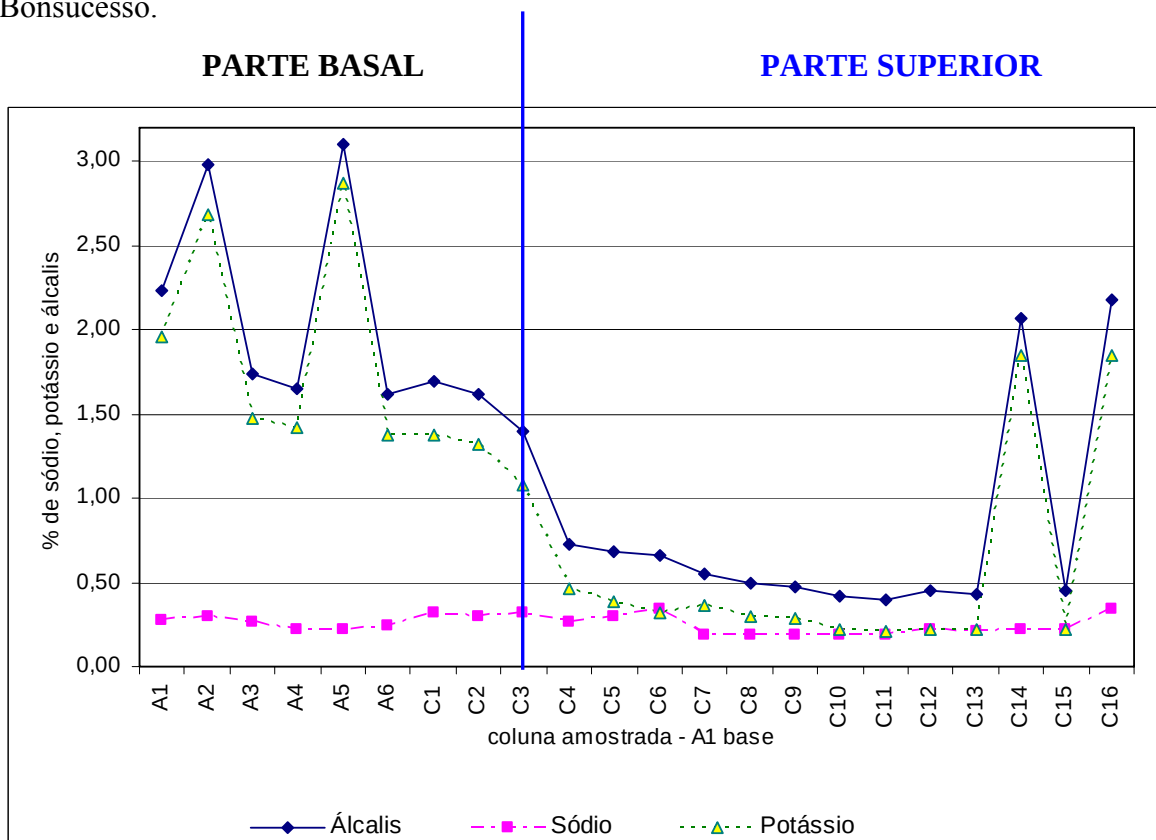


Figura VI.7 – Correlação entre os teores de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ),  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  com a coluna amostrada na área de Bonsucesso.



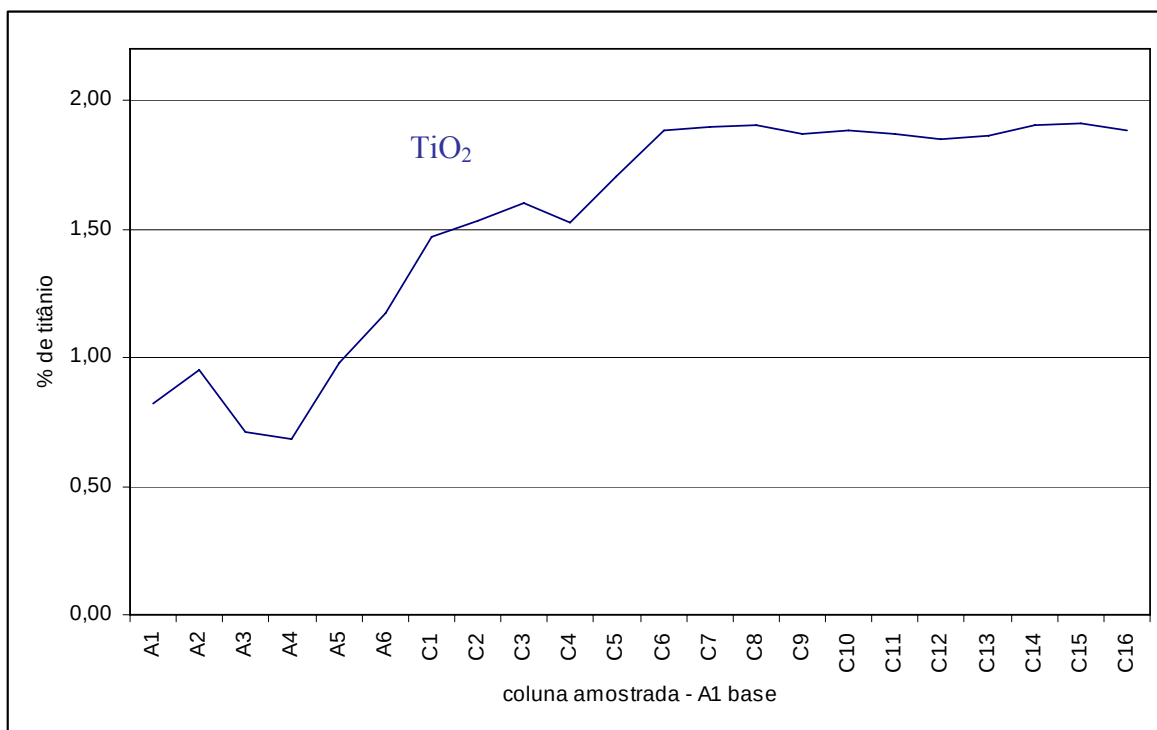


Figura VI.8 – Correlação entre os teores de  $\text{TiO}_2$  e a coluna amostrada na área de Bonsucesso.

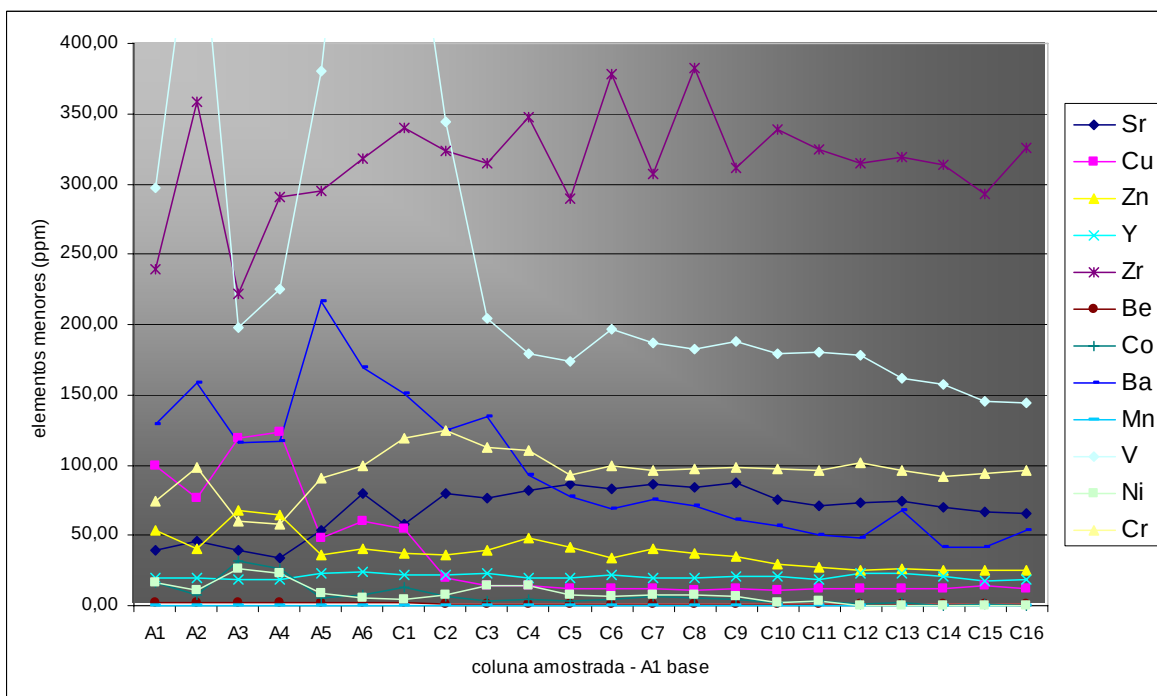


Figura VI.9 – Correlação entre os teores dos elementos menores e a coluna amostrada na área de Bonsucesso.

### VI.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises microscópicas tiveram ênfase na investigação da caulinita e do quartzo com suas respectivas microanálises. O corte feito não obedeceu a nenhum plano específico do argilomineral e as imagens obtidas exibem massas compactas de caulinita, que, provavelmente, está parcialmente “cimentada por ferro e titânio”, formando grumos de caulinita. Essa interpretação não é conclusiva, pois os valores de Ti e Fe obtidos na microanálise são muito baixos e, possivelmente, não seriam suficientes para essa cimentação. Desse modo, para uma interpretação conclusiva, seria necessário realização de trabalhos mais aprofundados que esse mestrado não se propôs (Figura VI.10; VI.11; VI.12; 13; 14).

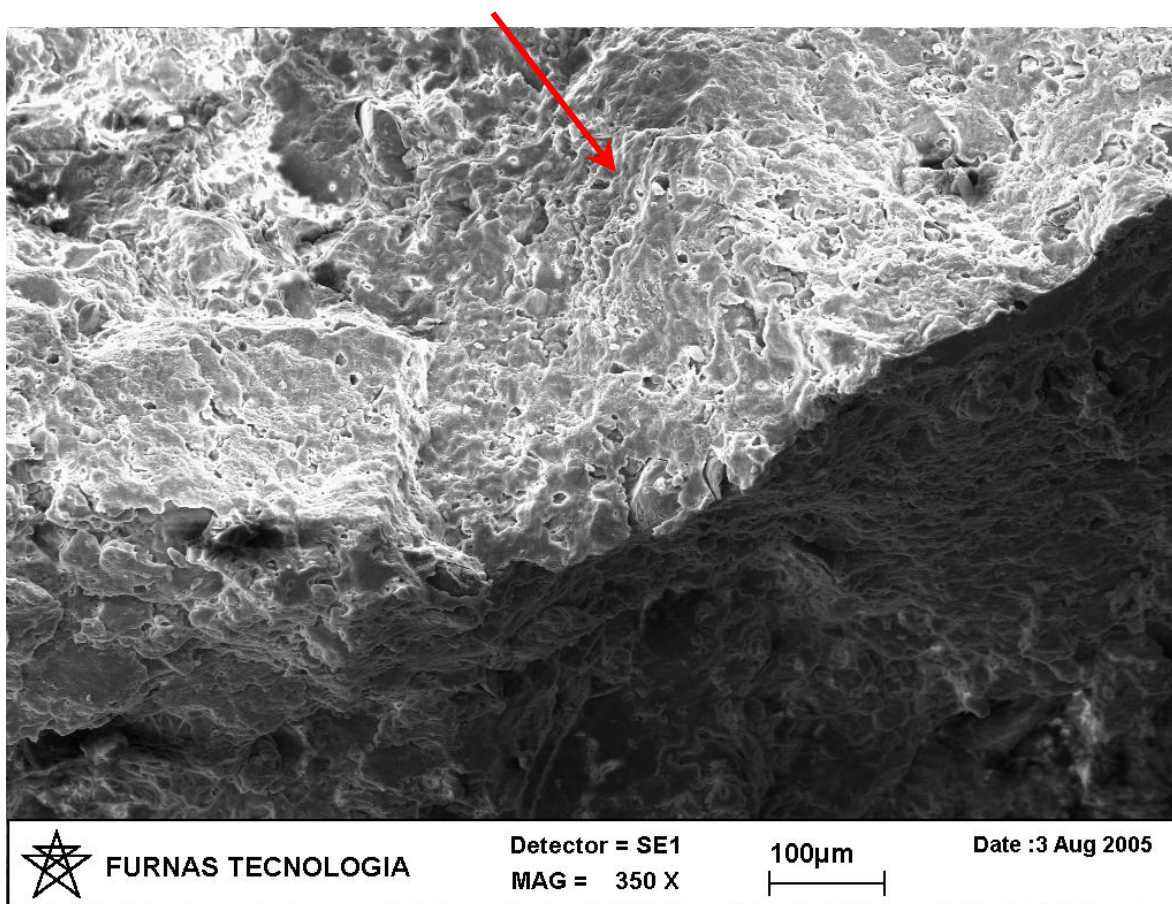


Figura VI.10 – Imagem de MEV da amostra C11; vista geral da caulinita (aumento de 350 vezes). O corte não obedeceu a nenhum plano específico do argilomineral, mas é possível identificar placas da caulinita (seta).

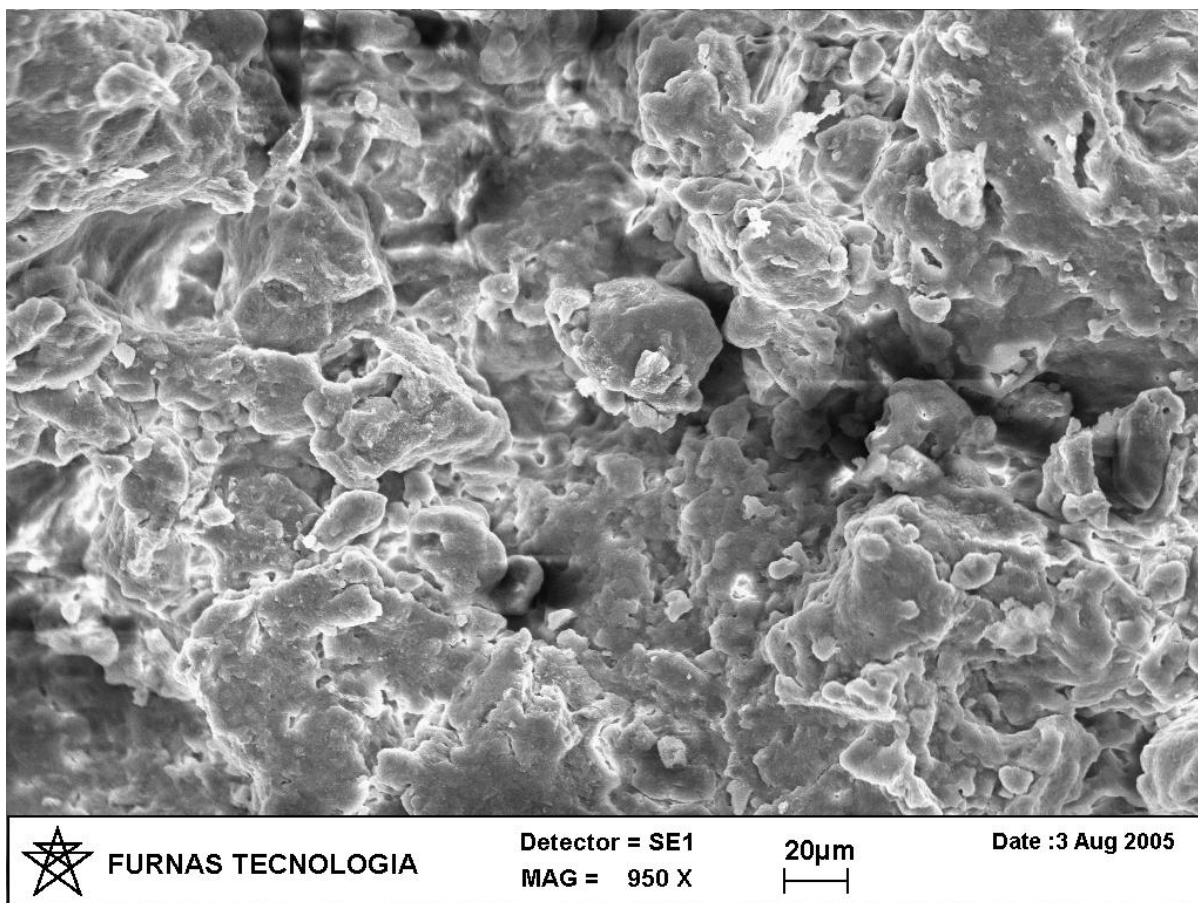


Figura VI.11 – Imagem de MEV da amostra C11; massa compacta de caulinita “cimentada por ferro e titânio”, formando grumos de caulinita (?) - aumento de 950 vezes.

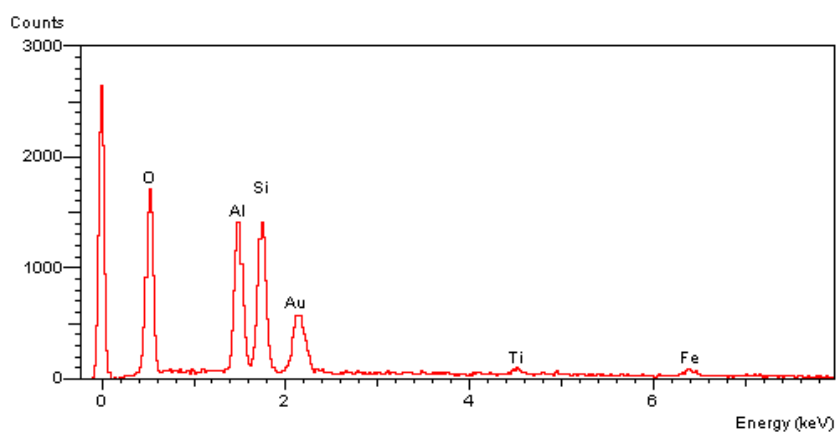


Figura VI.12 – Espectro da massa que compõe a caulinita da figura VI.11. O ouro presente é oriundo da metalização da amostra.



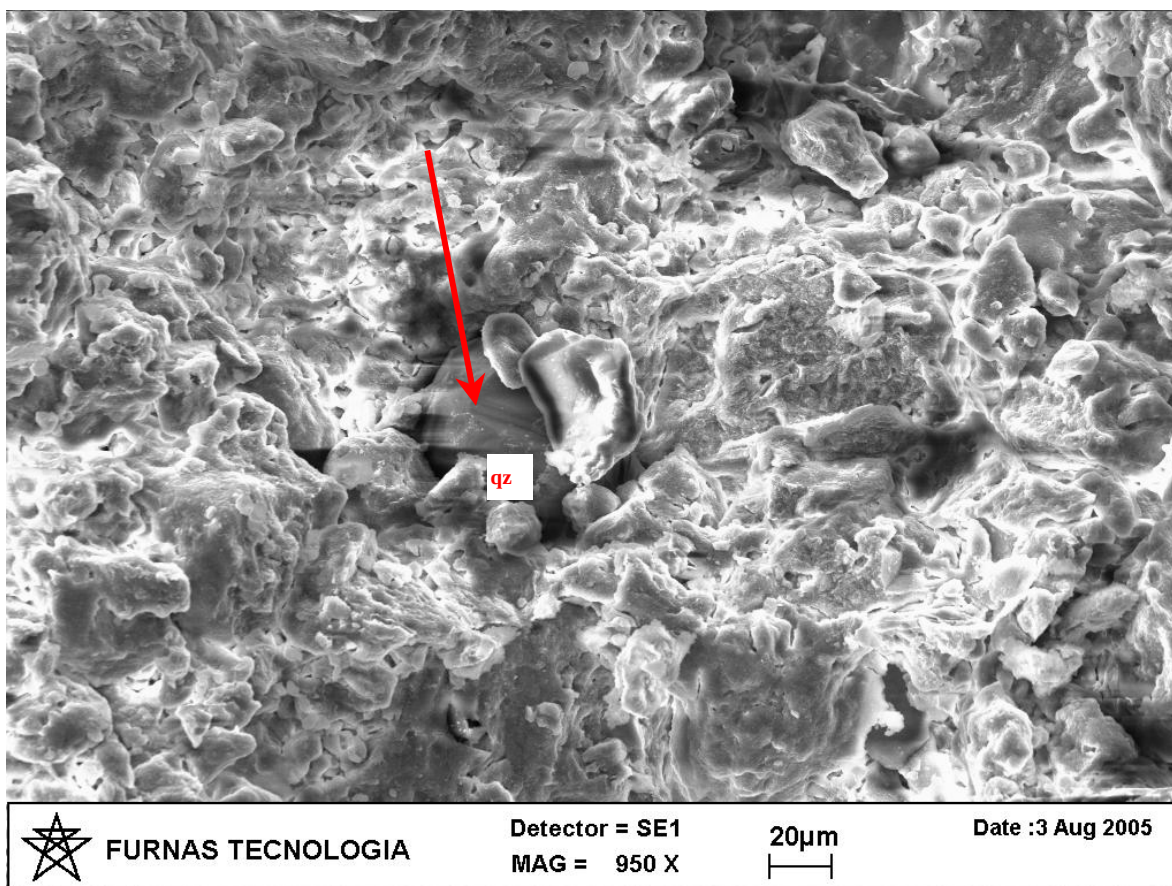


Figura VI.13 – Imagem de MEV da amostra C11; detalhe da figura VI.11, mostrando cristal de quartzo envolvido pela massa de caulinita (seta); aumento de 950 vezes.

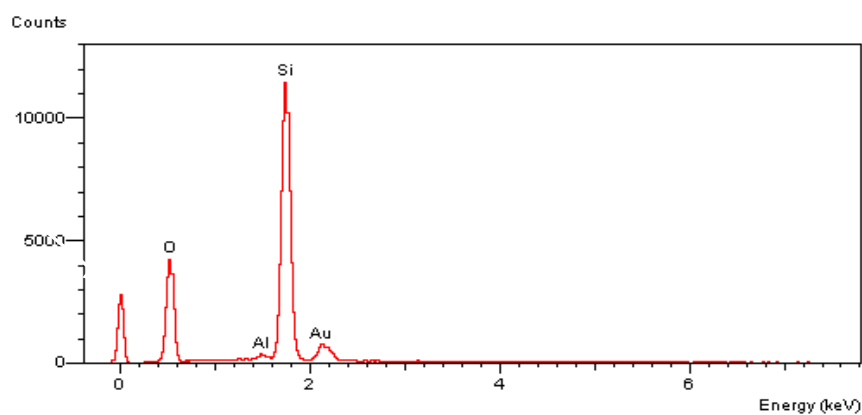


Figura VI.14 – Espectro da massa do quartzo. O ouro presente é oriundo da metalização da amostra.

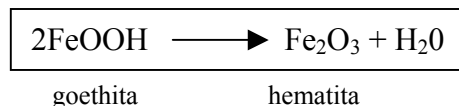
## VI.4 – Calcinação da Argila Pozolânica

A argila calcinada foi utilizada nos ensaios de difração de raios-X (Secção VI.1), para a determinação de atividade pozolânica (Secção VI.5), para os ensaios químicos pelo método Fratini (Secção VI.6) e para interpretação de restrição de cor na produção de cimento.

A partir da comparação de cor entre as amostras *in natura* e as amostras calcinadas, foi possível estabelecer os limites de aproveitamento industrial das argilas. Primeiramente foi feita a comparação da mudança de cor entre as próprias argilas. Nesse caso, convencionou-se, baseado na prática em fabricação de cimento, que as cores amarelas e vermelhas são impróprias para produção de cimento, uma vez que provocariam mudanças significativas na cor do cimento a ser produzido (Figura VI.15). Posteriormente, a mesma comparação foi realizada, porém tomando o cimento (CP II – F) como referência de cor. Para tanto, foram utilizados os corpos-de-prova resultantes dos ensaios da determinação de atividade pozolânica de cimento com pozolana *in natura* e com pozolana calcinada (Figura VI.16).

Baseado nas restrições que as mudanças de cor impõem ao aproveitamento da pozolana na produção de cimento (Secção IV.3; V.2; VII.1), o perfil amostrado pode ser dividido em Parte Basal e Parte Superior. Em ambos os critérios de comparação de cor a amostra C1 foi o divisor entre essas partes (Figura VI.15; VI.16).

Observa-se que a principal alteração de cor na parte basal foi a passagem do amarelo para o vermelho. Isso foi causado pela desidratação da goethita que se transformou em hematita (Secção VI.1), conforme equação abaixo. Nas amostras A3 e A4, tanto das argilas calcinadas como dos corpos-de-prova, é possível perceber que os tons vermelhos são mais fortes, refletindo o maior conteúdo de ferro desse horizonte.



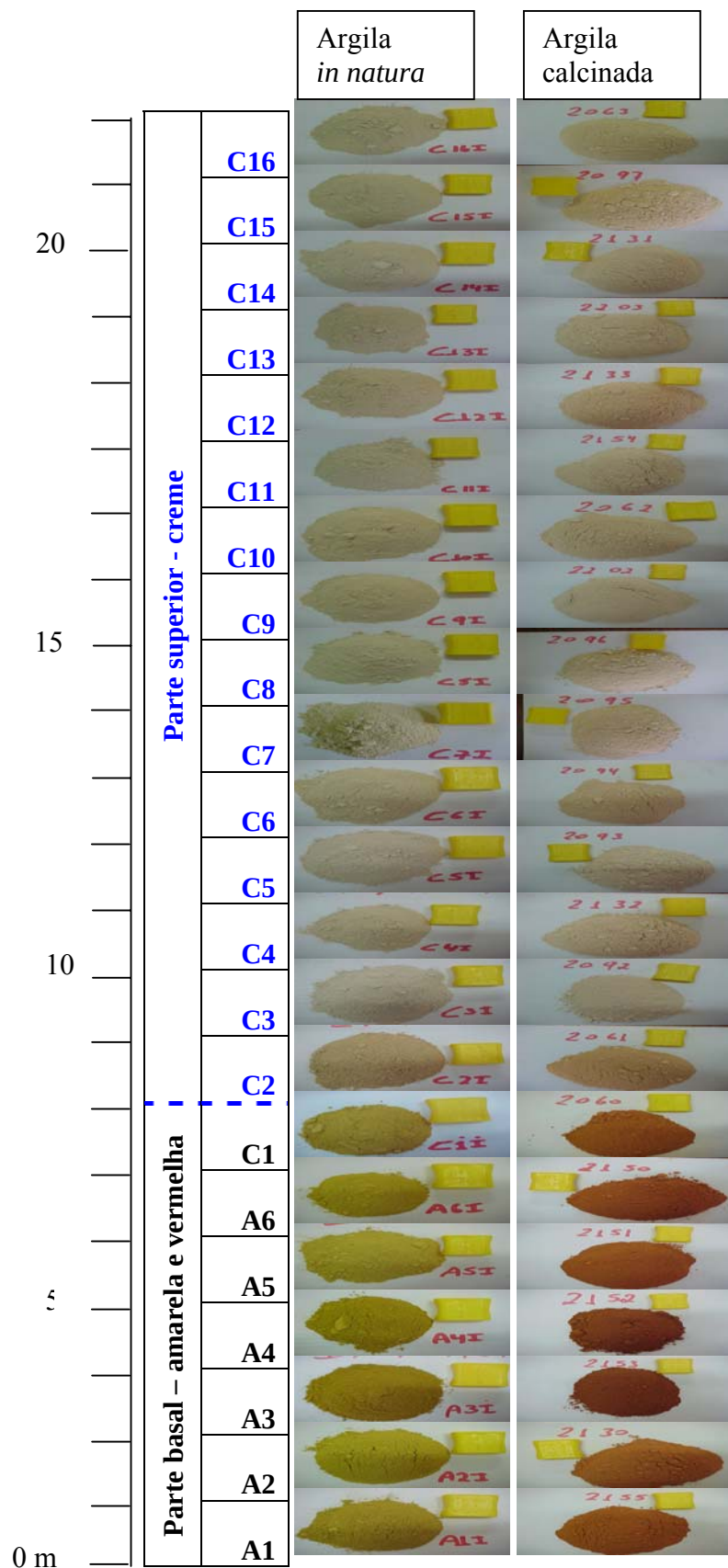


Figura VI. 15 – Comparação de cor entre argila *in natura* e argila calcificada a 800 °C por 30 min. no perfil Bonsucesso. A parte basal (até C1) é imprópria à produção de cimento pozolânico em função das cores amarela e vermelha, *in natura* e calcificada respectivamente.



Figura VI.16 – Comparação da variação de cor em corpos-de-prova de cimento com argila *in natura* e com argila calcinada. Em ambas o lado esquerdo de cada foto representa o topo, o lado direito a base e o corpo-de-prova cinza na extrema direita refere-se à referência de cimento. Nos dois experimentos a amostra C1 divide o perfil amostrado em parte basal e parte superior.



## VI.5 – Determinação de Atividade Pozolânica

### Atividade pozolânica com argila *in natura*

Conforme exigências da norma brasileira NBR 12653/92, o índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal precisa ser de 6 MPa de resistência mecânica de corpos-de-prova rompidos aos 7 dias (Tabela IV.6; Seção V.2.5.1). Os resultados dos ensaios com a argila *in natura* para o perfil amostrado exibiram todos os valores abaixo de 6 MPa, caracterizando-a como argila não pozolânica (Tabela VI.5; VI.6 e Figura VI.17; VI.18). Portanto, os ensaios da pozolana *in natura* com cimento aos 28 dias deixam de ter significado do ponto de vista econômico, pois seria necessário primeiro satisfazer a condição normativa acima. Ainda assim, esses ensaios têm importante significado para o entendimento das argilas formadoras do perfil estudado, como poderá ser visto abaixo.

### Atividade pozolânica com argila calcinada

As argilas da área Bonsucesso, quando calcinadas e submetidas aos ensaios físicos de atividade pozolânica com a cal, exibiram valores bastantes satisfatórios e, somente as amostras A3 e A4 (5,8 e 5,9 MPa, respectivamente) não atenderam a condição estabelecida pela norma brasileira (Tabela IV.6). Deve-se observar que esses pontos coincidem com aqueles em que o ferro tem seus maiores valores pelo enriquecimento da goethita neste horizonte, com o empobrecimento proporcional de caulinita, argilomineral esse que possui atividade pozolânica para as condições em que argila foi calcinada (800 °C por 30 minutos). Então, por esse ensaio toda área foi considerada pozolânica, exceção ao referido intervalo entre o terceiro e o quarto metro da coluna amostrada (Tabela VI.5; VI.6; Figura VI.17; VI.18).

### Análise da curva: hidróxido de cálcio com argila *in natura* (Figura VI.17)

O comportamento da curva para a argila *in natura* com hidróxido de cálcio exibe um discreto crescimento da base para o topo. Esse crescimento parece evidenciar haver uma parcela pouca significativa de caulinita (e ilita ?) estruturalmente desorganizada no pacote amostrado, mas suficiente para justificar o crescimento das resistências ao longo do perfil, ainda que inferior aos termos requeridos pela norma (Figura VI.17). Esse aspecto provavelmente poderia estar associado com a mudança de politipo que ocorre no perfil, já que foram identificados dois politipos da caulinita: o 1Md na parte inferior do perfil, o 1A na parte superior e uma transição no intervalo entre as A5 e C1 (Figura VI.1; VI.3). Os valores de resistência mecânica da argila *in natura* com hidróxido de cálcio crescem em direção ao topo, indicando que politipo 1A tende a ser mais propício ao maior desarranjo estrutural do que o politipo 1Md. Além do politipo 1A se mostrar mais favorável à desorganização estrutural, o crescimento da resistência em direção ao topo é ainda favorecido pela maior proporção de caulinita.

### Análise da curva: hidróxido de cálcio com argila calcinada (Figura VI.17)

A curva do hidróxido de cálcio com argila calcinada inicia-se em 12 MPa em A1, cai de A2 até A3 e tem forte crescimento de resistência a partir de A4 com estabilização em

três patamares diferentes e crescentes: o primeiro de 14,5 MPa entre C2 e C7, o segundo em 17 MPa entre C8 e C13 e o terceiro superior a 19 MPa entre C14 a C15. A amostra C16 situa-se pouco abaixo de 16 MPa e o valor da resistência mecânica em C1 sugere a transição entre a parte inferior e superior do perfil. O valor estabelecido de 6 MPa pela NBR 12653 é bastante superado pela argila calcinada e o valor médio dos três patamares de 16 MPa é suficientemente adequado à produção de cimento pozolânico. (Figura VI.17).

A queda do IAP em direção a A4 seria função do enriquecimento da hematita com o empobrecimento proporcional de metacaulinita (e ilita ?), enquanto o aumento do IAP em direção ao topo seria função da maior proporção de metacaulinita. Além disso, tal como na análise da curva anterior, esse crescimento de resistência poderia estar associado à mudança de politipo da caulinita. Na secção VI.1 verificou-se que o politipo 1Md - parte inferior do perfil -, quando sob aquecimento a 490 °C, oferece maior dificuldade ao colapso estrutural do que o politipo 1A - parte superior do perfil. Como não foram realizados experimentos específicos para as condições da calcinação em termos da verificação da resposta dos politipos ao aumento da temperatura, não é possível concluir que o politipo 1A tenha alguma parcela nesse ganho de resistência, mas é sugestivo, podendo justificar estudo mais aprofundado no futuro. Finalmente, o aumento do IAP poderia, ainda, estar associado a uma possível mudança de politipo da ilita de 2M#1 quando na condição *in natura* para 2M#2 quando calcinada. Do mesmo modo que para a caulinita, essa verificação necessitaria de trabalhos complementares.

#### Análise da curva: argila *in natura* com cimento (Figura VI.18)

O comportamento da curva da argila *in natura* com o cimento é bastante estável a partir de C6 e é razoavelmente equivalente ao que ocorre com os ensaios com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , atestando uma homogeneidade a argila *in natura* nesse intervalo do perfil. É importante ainda observar que os valores de IAP obtidos nessa curva devem-se, essencialmente, aos valores de resistência do próprio cimento, contribuindo, a argila *in natura*, de forma discreta (Figura VI.18).

#### Análise da curva: argila calcinada com cimento (Figura VI.18)

Não exibe tendência no crescimento do IAP e apresenta os dois maiores valores do IAP em A1 e A2. Algumas indagações surgem, então: por que a curva não exibe um padrão no crescimento do IAP e por que o IAP em A1 e A2, base do perfil, são os maiores valores? A resposta, como tratado anteriormente, seria função, basicamente, da compatibilidade do cimento com a pozolana. Enquanto o  $\text{Ca(OH)}_2$  é um composto único na reação com a pozolana, o cimento tem uma complexidade muito maior, com uma variedade de compostos químicos e que não pode ser reproduzida pelo hidróxido de cálcio. Desse modo, a compatibilidade do cimento com a pozolana seria mais favorável em alguns pontos do que em outros, como, por exemplo, em A1 e A2. As tentativas de explicação em função do conteúdo da metacaulinita (e ilita ?) e de seus politipos feitas na interpretação da curvas com o hidróxido de cálcio, tornam-se subordinadas e imperceptíveis sob o contexto compatibilidade cimento:pozolana.

O valor médio da argila calcinada com cimento entre C2 a C16 de 69% é, neste trabalho, considerado adequado. Conjugado com o resultado de 16 MPa para o mesmo intervalo nos ensaios com o hidróxido de cálcio, não resta nenhuma dúvida de sua boa qualidade. Entretanto, para verificações mais conclusivas com vistas à aplicação industrial, e considerando a compatibilidade cimento:pozolana, é conveniente que os ensaios com cimento tomem como referência, o produto da planta industrial que irá utilizar a pozolana. Isso é extremamente útil, pois é plenamente possível alterar o processo industrial de produção de clínquer a fim de atender a compatibilização ótima entre pozolana e cimento.

#### Densidade da argila *in natura*

A massa específica da argila *in natura* é obtida para os cálculos dos ensaios de atividade pozolânica (Secção V.2.5). Como vemos, ela nos mostra um comportamento que também permite diferenciar o perfil amostrado em parte basal e parte superior (Tabela VI.5 e Figura VI.19). Seus valores são mais elevados na parte inferior do perfil até a amostra C1. A partir de C2 os valores da massa específica estabilizam-se até o topo do perfil. O horizonte C2 indica transição entre a parte inferior e a superior do perfil. Observa-se, aqui também, que ocorrem dois valores elevados em A3 e A4, pontos esses que equivalem ao nível mais rico em ferro da goethita, como esperado pela densidade desse mineral.

| Amostra |                            | Densidade<br>(argila<br><i>in natura</i> ) | Índice de Atividade Pozolânica – IAP |                       |                  |          |           |          |      |
|---------|----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------|----------|-----------|----------|------|
|         |                            |                                            | Ca(OH) <sub>2</sub> + Argila         |                       | Cimento + Argila |          |           |          |      |
|         |                            |                                            | <i>in natura</i><br>RC (MPa)         | Calcinada<br>RC (MPa) | <i>in natura</i> |          | calcinada |          |      |
|         |                            |                                            |                                      |                       | IAP (%)          | RC (MPa) | IAP (%)   | RC (MPa) |      |
| 20      | DENSIDADE - PARTE SUPERIOR | C16                                        | 2,56                                 | 1,3                   | 15,8             | 42,8     | 12,8      | 65,5     | 20,3 |
|         |                            | C15                                        | 2,56                                 | 1,8                   | 18,9             | 42,1     | 12,6      | 66,1     | 20,5 |
|         |                            | C14                                        | 2,58                                 | 1,9                   | 19,4             | 42,8     | 12,8      | 68,7     | 21,3 |
| C13     |                            | 2,58                                       | 1,7                                  | 16,7                  | 41,5             | 12,4     | 68,7      | 21,3     |      |
| C12     |                            | 2,58                                       | 2,3                                  | 17,5                  | 42,8             | 12,8     | 64,5      | 20,0     |      |
| C11     |                            | 2,56                                       | 2,0                                  | 16,2                  | 43,1             | 12,9     | 67,4      | 20,9     |      |
| C10     |                            | 2,58                                       | 2,1                                  | 17,0                  | 44,1             | 13,2     | 77,4      | 24,0     |      |
| C9      |                            | 2,58                                       | 1,7                                  | 17,7                  | 44,8             | 13,4     | 78,1      | 24,2     |      |
| C8      |                            | 2,56                                       | 1,4                                  | 16,9                  | 42,1             | 12,6     | 64,2      | 19,9     |      |
| C7      |                            | 2,58                                       | 1,6                                  | 14,5                  | 42,1             | 12,6     | 65,2      | 20,2     |      |
| C6      |                            | 2,58                                       | 1,9                                  | 15,0                  | 44,8             | 13,4     | 70,3      | 21,8     |      |
| C5      |                            | 2,56                                       | 1,8                                  | 13,9                  | 31,8             | 9,5      | 64,8      | 20,1     |      |
| C4      |                            | 2,56                                       | 1,2                                  | 14,0                  | 36,4             | 10,9     | 67,1      | 20,8     |      |
| 15      |                            | C3                                         | 2,56                                 | 0,9                   | 14,7             | 36,8     | 11,0      | 71,6     | 22,2 |
|         |                            | C2                                         | 2,62                                 | 0,9                   | 14,7             | 39,7     | 11,9      | 74,5     | 23,1 |
|         | C1                         | 2,76                                       | 0,6                                  | 13,3                  | 29,1             | 8,7      | 71,3      | 22,1     |      |
|         | A6                         | 2,84                                       | 0,6                                  | 9,8                   | 34,4             | 10,3     | 61,6      | 19,1     |      |
|         | A5                         | 2,82                                       | 0,0                                  | 8,1                   | 27,4             | 8,2      | 62,9      | 19,5     |      |
|         | A4                         | 3,04                                       | 0,3                                  | 5,9                   | 38,5             | 11,5     | 67,7      | 21,0     |      |
|         | A3                         | 3,06                                       | 0,0                                  | 5,8                   | 35,1             | 10,5     | 63,9      | 19,8     |      |
|         | A2                         | 2,74                                       | 0,0                                  | 8,4                   | 27,8             | 8,3      | 79,0      | 24,5     |      |
|         | A1                         | 2,76                                       | 0,7                                  | 11,8                  | 32,1             | 9,6      | 82,2      | 25,5     |      |

|    | Amostra | IAP para Argila <i>in natura</i> + |             |
|----|---------|------------------------------------|-------------|
|    |         | Ca(OH) <sub>2</sub> (MPa)          | Cimento (%) |
| 20 | C16     | 1,3                                | 42,8        |
|    | C15     | 1,8                                | 42,1        |
|    | C14     | 1,9                                | 42,8        |
|    | C13     | 1,7                                | 41,5        |
|    | C12     | 2,3                                | 42,8        |
|    | C11     | 2,0                                | 43,1        |
|    | C10     | 2,1                                | 44,1        |
|    | C9      | 1,7                                | 44,8        |
|    | C8      | 1,4                                | 42,1        |
|    | C7      | 1,6                                | 42,1        |
|    | C6      | 1,9                                | 44,8        |
|    | C5      | 1,8                                | 31,8        |
|    | C4      | 1,2                                | 36,4        |
|    | C3      | 0,9                                | 36,8        |
|    | C2      | 0,9                                | 39,7        |
|    | C1      | 0,6                                | 29,1        |
| 15 | A6      | 0,6                                | 34,4        |
|    | A5      | 0,0                                | 27,4        |
|    | A4      | 0,3                                | 38,5        |
|    | A3      | 0,0                                | 35,1        |
|    | A2      | 0,0                                | 27,8        |
|    | A1      | 0,7                                | 32,1        |

|    | Amostra | IAP para Argila <i>calcificada</i> + |             |
|----|---------|--------------------------------------|-------------|
|    |         | Ca(OH) <sub>2</sub> (MPa)            | Cimento (%) |
| 20 | C16     | 15,8                                 | 65,5        |
|    | C15     | 18,9                                 | 66,1        |
|    | C14     | 19,4                                 | 68,7        |
|    | C13     | 16,7                                 | 68,7        |
|    | C12     | 17,5                                 | 64,5        |
|    | C11     | 16,2                                 | 67,4        |
|    | C10     | 17,0                                 | 77,4        |
|    | C9      | 17,7                                 | 78,1        |
|    | C8      | 16,9                                 | 64,2        |
|    | C7      | 14,5                                 | 65,2        |
|    | C6      | 15,0                                 | 70,3        |
|    | C5      | 13,9                                 | 64,8        |
|    | C4      | 14,0                                 | 67,1        |
|    | C3      | 14,7                                 | 71,6        |
|    | C2      | 14,7                                 | 74,5        |
|    | C1      | 13,3                                 | 71,3        |
| 15 | A6      | 9,8                                  | 61,6        |
|    | A5      | 8,1                                  | 62,9        |
|    | A4      | 5,9                                  | 67,7        |
|    | A3      | 5,8                                  | 63,9        |
|    | A2      | 8,4                                  | 79,0        |
|    | A1      | 11,8                                 | 82,2        |

Tabela VI.6 – A tabela à esquerda mostra os resultados de atividade pozolânica da argila *in natura* com cal e cimento. Os resultados com cal estão abaixo das exigências da NBR 12653, caracterizando toda a área de argila *in natura* como não pozolânica. A tabela à direita mostra os resultados de atividade pozolânica da argila calcificada com cal e cimento. Após a calcinação toda área, exceto o intervalo entre A3 e A4, tornou-se pozolânica.

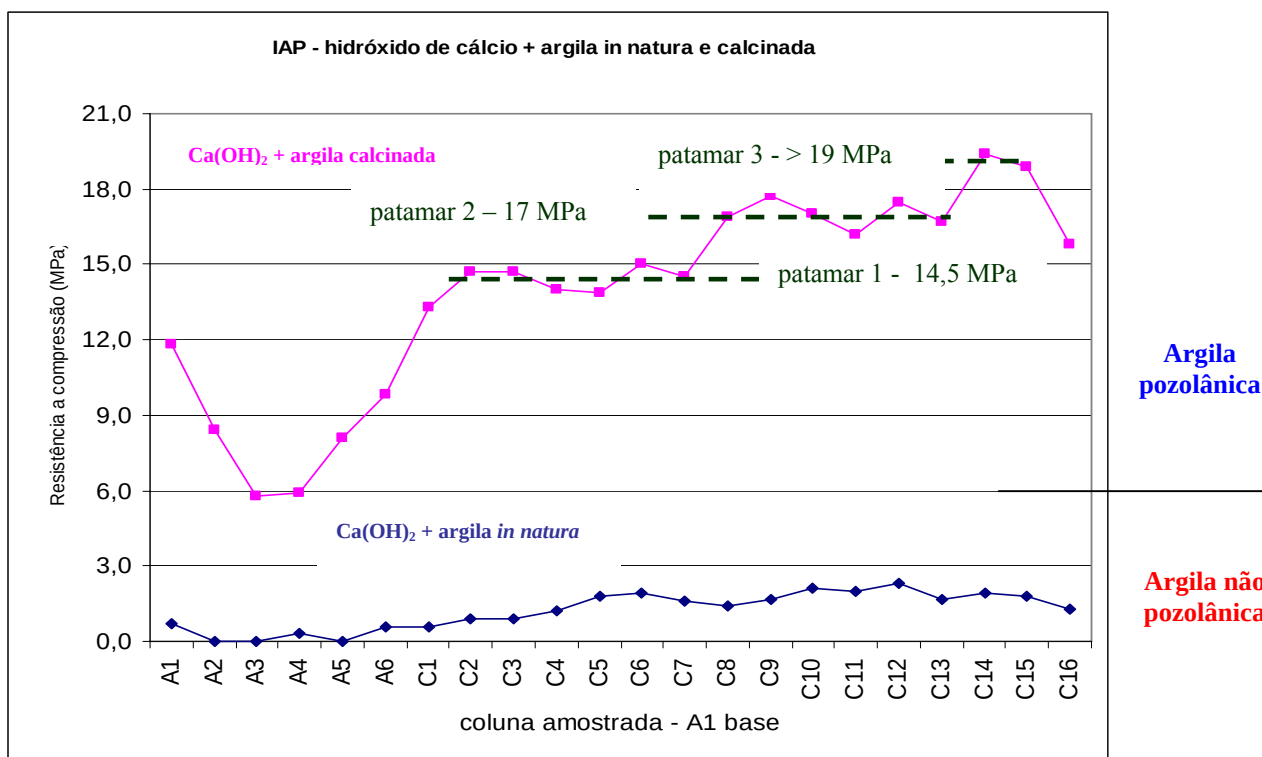


Figura VI.17 – Índice de atividade pozolânica – IAP, exibindo a evolução das resistências à compressão dos corpos-de-prova de cal + argila (*in natura* e calcinada). Notar o expressivo ganho de resistência após a calcinação a 800 °C por 30 minutos

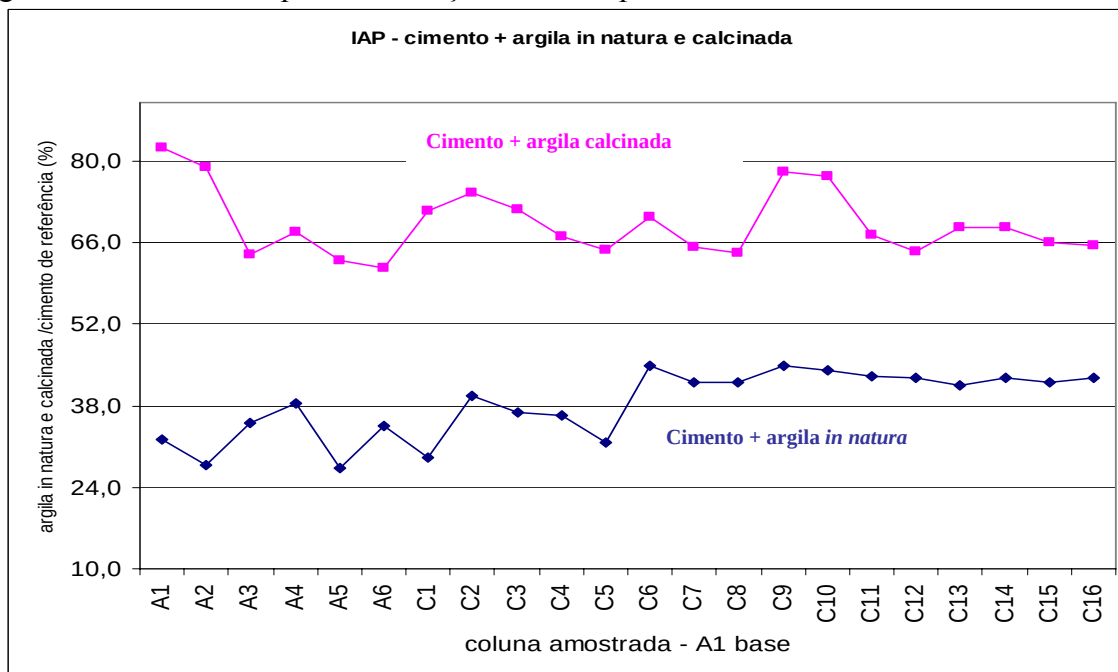


Figura VI.18 - Índice de atividade pozolânica – IAP, exibindo a evolução das resistências à compressão dos corpos-de-prova com cimento + argila (*in natura* e calcinada) comparados com o corpo de prova do cimento de referência. Notar o expressivo ganho de resistência após a calcinação a 800 °C por 30 minutos

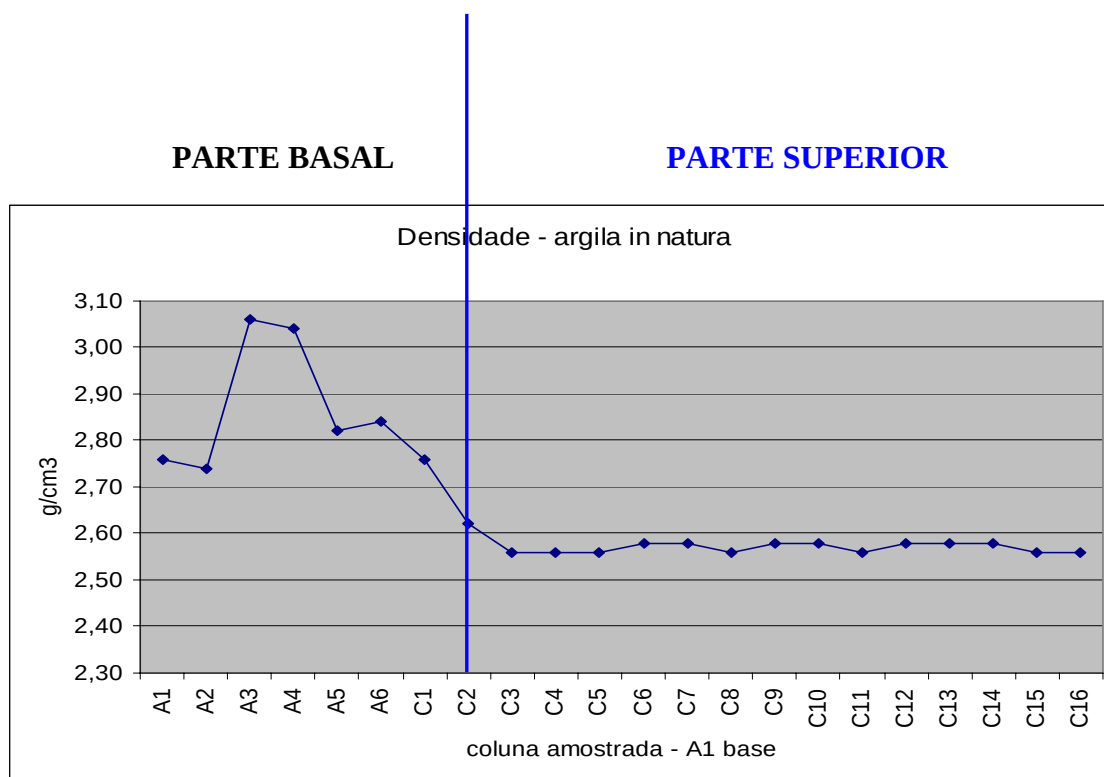


Figura VI.19 – Evolução da densidade da argila *in natura* ao longo do perfil Bonsucesso. No intervalo entre o terceiro e quarto metro ocorrem valores anômalos que equivalem ao nível mais rico em ferro da goethita

## VI.6 – Método de Fratini

O método naturalmente mais adequado para a avaliação da pozolanicidade das argilas do perfil estudado seria o método de Chapelle que verifica a fixação do hidróxido de cálcio pelas pozolanas diretamente. Porém, como isso não foi possível, foi utilizado o método de Fratini que define se um cimento é pozolânico ou não, permitindo, a partir disso, extrapolar se há ou não pozolana contida no cimento (Secção V.2.6).

Então para se chegar ao resultado de interesse do trabalho – definir se as argilas *in natura* e calcinada são pozolânicas ou não – adotou-se o expediente de “produzir um cimento pozolânico” hipotético constituído de 35% de pozolana e 65% de cimento CP II – F, mantendo os mesmos critérios utilizados nas análises físicas do índice de atividade pozolânica com cimento (Secção V.2.5.2). A experiência se mostrou adequada e foi possível atingir o propósito do trabalho.

Os resultados pelo método Fratini com as argilas calcinadas evidenciaram que todo o perfil de Bonsucesso é classificado como cimento pozolânico, indicando que o perfil é formado integralmente por argila com atividade pozolânica. (Tabela VI.7; Anexo 4; 5).

Os resultados com a argila *in natura* para o intervalo ensaiado - do zero ao quarto metro do perfil – se mostram negativos, ou seja, não há atividade pozolânica nesse intervalo do perfil (Tabela VI.7 e Anexo 5).



O método não especifica um grau de pozolanicidade em termos numerais, mas apenas enquadra o resultado em dois quadrantes distintos e, por isso, não permite uma graduação da atividade pozolânica do cimento, mas apenas uma classificação binária. Além disso, o método se baseia no processo químico de fixação da cal pela pozolana o que não garante por si só um desempenho mecânico satisfatório do cimento (Secção V.2.6). De fato, os resultados obtidos pelo IAP da argila calcinada com hidróxido de cálcio não exibiram atividade pozolânica, nos termos na norma NBR 12653 – 6 MPa -, para o intervalo do perfil compreendido pelas amostras A3 e A4. Então, poder-se-ia interpretar essa divergência entre os métodos como sendo, provavelmente, função de reações do hidróxido de cálcio com outras substâncias, não identificadas neste estudo, que tenham gerado um produto sem qualquer atividade cimentícia (Zampieri, 1989). Neste trabalho, portanto, os resultados pelo método de Fratini, foram utilizados com restrição, combinando-os com o índice de atividade pozolânica da argila calcinada com cimento.

| Amostra                                           | Argila Calcinada   |              |                    | Argila <i>in natura</i> |              |                    |
|---------------------------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------------------|--------------|--------------------|
|                                                   | Alcalinidade total | Teor de CaO  | Resultado: cimento | Alcalinidade total      | Teor de CaO  | Resultado: cimento |
|                                                   | (mmol OH/l)        | (mmol CaO/l) |                    | (mmol OH/l)             | (mmol CaO/l) |                    |
| ARGILA CALCINADA - COM ATIVIDADE POZOLÂNICA (CAP) | C16                | 27,41        | pozolânico         | 41,67                   | 14,99        | não pozolânico     |
|                                                   | C15                | 25,99        | pozolânico         | 42,64                   | 15,51        | não pozolânico     |
|                                                   | C14                | 19,70        | pozolânico         | 40,03                   | 14,43        | não pozolânico     |
|                                                   | C13                | 27,91        | pozolânico         | 42,60                   | 15,67        | não pozolânico     |
|                                                   | C12                | 25,83        | pozolânico         | 43,22                   | 15,78        | não pozolânico     |
|                                                   | C11                | 28,66        | pozolânico         | 42,93                   | 15,76        | não pozolânico     |
|                                                   | C10                | 23,32        | pozolânico         | 39,51                   | 14,04        | não pozolânico     |
|                                                   | C9                 | 20,97        | pozolânico         | 40,34                   | 14,57        | não pozolânico     |
|                                                   | C8                 | 31,23        | pozolânico         | 41,32                   | 14,81        | não pozolânico     |
|                                                   | C7                 | 30,16        | pozolânico         | 42,44                   | 15,29        | não pozolânico     |
|                                                   | C6                 | 29,36        | pozolânico         | 41,92                   | 15,46        | não pozolânico     |
|                                                   | C5                 | 30,51        | pozolânico         | 42,35                   | 15,56        | não pozolânico     |
|                                                   | C4                 | 32,78        | pozolânico         | 43,3                    | 16,01        | não pozolânico     |
|                                                   | C3                 | 32,55        | pozolânico         | 42,81                   | 15,69        | não pozolânico     |
|                                                   | C2                 | 29,22        | pozolânico         | 44,51                   | 16,3         | não pozolânico     |
|                                                   | C1                 | 33,76        | pozolânico         | 44,97                   | 16,42        | não pozolânico     |
|                                                   | A6                 | 40,44        | pozolânico         | 44,78                   | 15,99        | não pozolânico     |
|                                                   | A5                 | 40,07        | pozolânico         | 43,88                   | 15,92        | não pozolânico     |
|                                                   | A4                 | 40,75        | pozolânico         | 44,31                   | 16,43        | não pozolânico     |
|                                                   | A3                 | 40,40        | pozolânico         | 44,62                   | 16,32        | não pozolânico     |
|                                                   | A2                 | 42,46        | pozolânico         | 45,07                   | 16,46        | não pozolânico     |
|                                                   | A1                 | 31,27        | pozolânico         | 44,76                   | 16,22        | Não pozolânico     |

Tabela VI.7 – Resultados simplificados do método Fratini. Foi utilizada pasta constituída por 65% de pozolana e 35% de cimento CP II – F. O cimento de referência: alcalinidade total de 49,22 e CaO de 15,19.

## VII – Discussões

Os métodos utilizados no trabalho para caracterizar o perfil amostrado são de natureza diversa e quando correlacionados exibem algumas similaridades e incompatibilidades. Com o propósito de verificar a possibilidade da utilização de um método ou de métodos combinados na caracterização do perfil da área de estudo ou mesmo extensível a novas áreas de características equivalentes, foi feita a apreciação combinada entre eles (Figura VII).

### 1) Métodos: geológicos, mineralógicos, químicos, de densidade e de calcinação

Os métodos baseados em critérios geológicos ou mineralógicos ou químicos ou de densidade ou de calcinação têm em comum a divisão do perfil Bonsucesso em uma parte inferior e outra parte superior. Em comum entre eles ainda, é também a demarcação desse limite pela amostra C1 no horizonte do sétimo metro da coluna.

Entretanto, foram diferenciadas zonas de transição pelo critério químico e de densidade não caracterizadas nos outros métodos acima. Pelo critério químico as transições são marcadas por diferentes compostos químicos: a sílica no intervalo entre C2 e C3; e o ferro, magnésio e potássio no intervalo entre C3 e C5. A massa específica tem sua transição demarcada no intervalo entre as amostras C2 e C3, como ocorreu com a sílica. Nas pozolanas caulínicas o mecanismo químico de sua atividade pozolânica é dependente da disponibilidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para reagir com o hidróxido de cálcio e prover características cimentícias ao produto da reação (Secção IV.4) e, por essa razão, neste trabalho considerar-se-á o limite dessa transição, o limite da sílica (Figura VII).

### 2) Métodos: físicos e de Fratini

Os métodos baseados em critérios físicos de resistência mecânica e os químicos baseados na combinação do hidróxido de cálcio e a pozolana – Fratini - exibem resultados discrepantes apenas no intervalo do perfil entre as amostras C3 e C4, considerado sem atividade pozolânica (SAP) pelo critério físico. A combinação do índice de atividade pozolânica da argila calcinada com hidróxido de cálcio e o método de Fratini deve ser adotada em função das restrições inerentes a esse último (Secção VI.6).

### Correlação entre os grupos de métodos 1 e 2

O estudo resultou, então, na classificação de dois grupos de métodos: o primeiro divide a área em dois intervalos distintos sem uma definição conclusiva sobre a atividade pozolânica do perfil, enquanto o segundo, basicamente definido pelo índice de atividade pozolânica com cimento, é o método conclusivo quanto à atividade pozolânica, tornando-se, necessariamente, a referência na comparação entre métodos e reforçando o consenso que existe na literatura científica (Secção V.2.5).

Do ponto de vista de aproveitamento econômico será necessário estabelecer a combinação entre métodos. A cor da pozolana é o parâmetro de partida para qualquer

combinação, uma vez que ela impõe restrições ao aproveitamento da pozolana na produção de cimento (Secção VI.4). A primeira combinação a ser feita, então, é entre a cor dos corpos-de-prova (Figura VI.16) e o índice de atividade pozolânica da argila calcinada + cimento. Essa combinação resulta na divisão do perfil em duas porções: parte inferior do perfil, classificada com estéril e a parte superior classificada como minério. A amostra C1 estabelece o limite entre o estéril e o minério, configurando o perfil resultado final (Figura VII). Nesses termos, a área possui uma espessura de 15 metros de pozolana aproveitável industrialmente.

A coluna resultado final constitui-se, então, a referência que foi utilizada na comparação com os demais métodos, visando verificar a efetividade da utilização de outros métodos em substituição ao método IAP com argila calcinada +  $\text{Ca(OH)}_2$ , tanto no controle de lavra como na prospecção.

| Comparação entre os métodos utilizados para caracterização do perfil Bonsucesso |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|--|
| Amostra                                                                         | Argila <i>in natura</i> |                                                                       |                                                                                |                        | Argila calcinada |                         |                                |                                |                 |  |
|                                                                                 | geológico               | mineralógico                                                          | Químico (%)                                                                    | Densidade (g/cm³)      | cor: argila      | cor : corpo-de-prova    | IAP com cal                    | Fratini                        | RESULTADO FINAL |  |
| C16                                                                             | Solum                   | Caolinita 1A, Quartzo, Anatásio, Traços de Ilita e Traços de Goethita | Média SiO <sub>2</sub> = 48,16<br>Média Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 34,32 | Densidade Média = 2,57 | Argila Creme     | Corpo-de-Prova Cinza    | Com Atividade Pozolânica (CAP) | Com Atividade Pozolânica (CAP) | M i n é r i o   |  |
| C15                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C14                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C13                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C12                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C11                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C10                                                                             |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C9                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C8                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C7                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C6                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C5                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C4                                                                              | Saprolito               | Caolinita 1Md, Ilita, Goethita e Quartzo                              | Média SiO <sub>2</sub> = 40,64<br>Média Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 21,07 | Densidade Média = 2,86 | Argila Vermelha  | Corpo-de-Prova Vermelho | CAP SAP                        | Com Atividade Pozolânica (CAP) | E s t é r i l   |  |
| C3                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C2                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| C1                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A6                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A5                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A4                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A3                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A2                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |
| A1                                                                              |                         |                                                                       |                                                                                |                        |                  |                         |                                |                                |                 |  |

m Figura VII – Correlação dos métodos utilizados para caracterizar o perfil de Bonsucesso (Tr = zona de transição; SAP – sem atividade pozolânica).

## VIII – Conclusões

O presente estudo permitiu uma avaliação detalhada da área Bonsucesso e algumas conclusões e recomendações puderam ser extraídas.

### Atividade pozolânica e Correlação entre Métodos

Em função das restrições das normas brasileiras o perfil estudado foi caracterizado como não pozolânico quando a argila está na condição *in natura*, e como pozolânico quando a argila é calcinada a 800 °C por 30 minutos, excetuando-se o intervalo do segundo ao quarto metro do perfil que não exibiram atividade pozolânica mínima exigida.

A caulinita é o argilomineral responsável pela atividade pozolânica da mina Bonsucesso e é enriquecida em direção ao topo.

A caulinita quando calcinada produz atividade pozolânica, decorrente do desarranjo estrutural de seu retículo cristalino e conseqüente formação de metacaulinita.

O pacote analisado é considerado minério no intervalo da amostra C2 a C16 num total de 15 m de espessura, apresentando resultados de resistência mecânica com o hidróxido de cálcio de 16 MPa e de 69% da resistência mecânica do cimento de referência.

O intervalo compreendido pelas amostras A1 até C1 na parte inferior do perfil foi comercialmente inviabilizado para o uso industrial pela cor vermelha que a argila adquiriu após calcinação, tornando o cimento impróprio para comercialização, mesmo que tenha atividade pozolânica.

O método físico, índice de atividade pozolânica da argila calcinada + hidróxido de cálcio, é o único método conclusivo acerca da pozolanidade das argilas, mas deve ser combinado com a verificação de cor da argila calcinada para que possa ser confirmada viabilidade do uso industrial da pozolana.

A combinação índice de atividade pozolânica + cor é o único método conclusivo de pozolanidade, mas não é o único como controle de lavra e de prospecção, devendo os métodos estudados neste trabalho serem vistos como complementares entre si na definição da atividade pozolânica das argilas. A cor da pozolana é o parâmetro de partida para qualquer combinação entre os métodos e sua caracterização pode ser feita pela avaliação visual do perfil, quando exposto, e/ou dos testemunhos de sondagem.

Qualquer um dos métodos baseados em critérios geológicos ou mineralógicos ou químicos ou de densidade, cada um combinado com os parâmetros de cor, pode substituir o método combinado do índice de atividade pozolânica + cor, utilizado atualmente no controle de lavra da área Bonsucesso. A utilização de um ou de outro deve ser função da análise de fatores tais como: custo, praticidade, disponibilidade de equipamentos, entre outros.

Para prospecção de novas áreas sugere-se o uso do critério mineralógico como método inicial. Se houver compatibilidade mineralógica com a área Bonsucesso, podem ser adotados os mesmos métodos do controle de lavra, sendo recomendável submeter parte representativa da nova jazida ao método combinado do índice de atividade pozolânica + cor para aferir a reprodutibilidade do sistema da área Bonsucesso.

Para prospecção de novas áreas em que a mineralogia diferir do perfil Bonsucesso é recomendável empreender bateria de testes comparativos para verificação de suas respostas e conseqüentes decisões posteriores quanto a que método (ou métodos) melhor se aplica à determinada área.

### Mineralogia, Quimismo e a Gênese da Caulinita

A jazida caracterizada é produto de alteração intempérica de metargilitos e metassilitos da unidade Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá.

O perfil estudado configura um manto de intemperismo típico, formado pelo saprolito na parte inferior e pelo *solum* na parte superior, que sofreu um processo de lixiviação contínuo em direção ao topo, produzindo caulinita, a partir de ilita detrítica, e anatásio e quartzo.

Na parte inferior do perfil há predomínio de caulinita, politipo 1Md co-existindo com ilita detrítica. Também ocorre quartzo e goethita, essa última predominante nos primeiros 4 metros. Na parte superior do perfil há predomínio da caulinita - politipo 1A. Ocorre ainda quartzo - o conteúdo relativo é enriquecido sem tendência definida -, anatásio e traços de ilita e de goethita..

A lixiviação do perfil está muito bem marcada pelos parâmetros químicos, ocorrendo a solubilização do magnésio, do cálcio, do potássio, do sódio e do ferro, esse último caracterizando um processo de desferrificação do perfil. A fase residual é representada pelo alumínio, parte da sílica e titânio.

A caulinita é formada como produto da maturação intempérica do perfil por meio de reações de hidrólise – monossilificação. O primeiro estágio produziu caulinita 1Md a partir de ilita contida nos metassedimentos, configurando o saprolito, e segundo transformou o politipo 1Md para o politipo 1A, configurando o *solum*.

O resultado do processo de lixiviação foi a concentração da caulinita em direção ao topo, responsável pelo “esbranquecimento” do perfil.

O processo de intemperização de Bonsucesso teria iniciado no Terciário, gerando espessos perfis de latossolos, com pluviosidade anual superior a 1000 mm e com temperaturas ambientes altas, típicas dos climas intratropicais. O processo de caulinitização possivelmente continua ocorrendo no presente.



Os politipos do perfil estudado apresentam respostas diversas ao aquecimento a 490 °C. O politipo 1Md da parte inferior apresenta um grau de dificuldade maior para seu colapso do que o politipo 1A da parte superior, às mesmas condições de aquecimento.

A calcinação das argilas do perfil Bonsucesso a 800 °C por 30 minutos, gerou: desaparecimento da caulinita e da goethita; formação da hematita por desidratação da goethita, com alteração de cor de amarelo para vermelho; formação do rutilo por alteração do seu polimorfo anatásio; formação de quartzo; e possível mudança de politipo da illita do 2M#1 na amostra total *in natura* para o politipo 2M#2 na amostra total calcinada.

## **IX – Referências Bibliográficas**

- Almeida, F.F.M., 1967. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro. DGM/DNPM. (Bol.241), 36pp.
- Almeida, F.F.M., 1968. Evolução tectônica do Centro-Oeste brasileiro no Proterozóico Superior. Anais Acad. Brasil. Ciências, 40: 285-96.
- Almeida, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. Rev. Bras. Geoc., São Paulo, Brasil, 7: 349-364.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y. & Brito Neves, B.B. 1976. The Upper Precambrian of South America. Bol.IG/USP, 7: 45-80. São Paulo.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y. & Brito Neves, B.B. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. Atas 8º Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande, Recife, SBG/NNE, pp. 363-391.
- Andrade Ramos, I. R. 1958. Folha Geológica do Futuro Distrito Federal. Relatório Anual do Diretor, DNPM-DGM, 72-73, Rio de Janeiro.
- Araújo Filho, J. O. 1978. The Geology of Pirenópolis – Corumbá de Goiás, Central Brazil: a contribution. 6. Geowissenschaftliches Lateinamerika, Kolloquium, Stuttgart, p.7-8.
- Araújo Filho, J. O. 1981. Contribuição à estratigrafia e tectônica da região da Megainflexão dos Pirineus, Goiás Centro-meridional. Anais I Simpósio Geologia Centro Oeste, Goiânia, SBG, p. 24-26.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 9831/91: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5732/91: Cimento Portland comum.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5733/91: Cimento Portland de alta resistência inicial.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5735/91: Cimento Portland de alto forno.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5736/91: Cimento Portland pozolânico.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 7215/91: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 11578/91: Cimento Portland composto.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5737/92: Cimento Portland resistentes a sulfatos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5751/92: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal – Índice de atividade pozolânica com cal, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5752/92: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 12653/92: Materiais pozolânicos, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5753/92: Cimentos – Método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico, 5p.
- Baeta Jr., J. D. A.; Fogaça, C. C.; Ramos, J.B.; S<sup>o</sup>, J. A. G. de; Barbieri, M. 1978. Projeto Manganês no Centro-Sul de Goiás, Relatório Final, VII vol. Goiânia, DNPM, CPRM. 98p.
- Bailey, S. W. 1980. Structures of Layer Silicates. In: Brindley, G. W. & Brown, G. (ed.). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society, London, pp:2-23.
- Barbosa, O.; Baptista, M. B.; Braun, O. P. G.; Dyer, R. G.; Cotta, J. C. 1969. Geologia e Inventário dos Recursos Minerais do Projeto Brasília. Relatório Prospec/DNPM Rio de Janeiro – 148p.
- Braun, O. P. G. 1968. Contribuição à Estratigrafia do Grupo Bambuí. In: Anais do 22º Cong. Bras. Geol. Belo Horizonte (MG), p.155-166.
- Biondi, J. C.; Bartoszeck, M. K. & Vanzela, G. A. 2001. Controles Geológicos e Geomorfológicos dos Depósitos de caulim da Bacia de Campo Alegre (SC). Rev. Bras. Geoc., 31:13-20.
- Biondi, J. C.; Santos, E. R. 2004. Depósito de caulim de Tijucas do Sul (Mina Fazendinha, Tijucas do Sul- PR). Rev. Bras. Geoc., 34:243-252.
- Campos, T. W. & Souza Santos, H. 1978 – Estudo comparativo das mulitas formadas a partir de haloisita de Capão Bonito e do mineral caulinitico especial de Piedade, Estado de São Paulo. Cerâmica; 24: 1-15..

- Cassedane, J. P. & Cassedane, J. O. 1978. Os estromatólitos globulosos da Fazenda Serra Virgem (Minas Gerais). RBG, Núcleo São Paulo, Brasil, 8:219-234.
- Centurione, S.L. 1999. A Mineralização do Clinquer Portland e seus Benefícios Tecnológicos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 156p.
- Chamley, H. 1989. Clay Sedimentology. Springer-Verlag, Berlin, 623pp.
- Cloud, P. & Dardenne M. A. 1973. Proterozoic Age of the Bambuí Group in Brazil. Geol. Soc. Am. Bull, 84: 1973-1976.
- Dardenne, M. A. 1974. Geologia da região de Vazante (Minas Gerais), Brasil. In: 28º Cong. Bras. Geol., Porto Alegre. SBG. Bol. n° 1. p. 182-195.
- Dardenne, M. A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. Anais 30º Cong. Bras. Geol., Recife, SBG, 1: 299-308
- Dardenne, M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. Anais 30º Cong. Bras. Geol., Recife, SBG, 2: 597-610
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, V. G.; Milani, C. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds). Tectonic Evolution of South América. 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 231-263.
- Dardenne, M. A. & Campos Neto, M. C. 1976. Geologia da região de Lagamar (Minas Gerais). 29º Cong. Bras. Geol., Ouro Preto, Resumos. Ouro Preto, SBG, p. 17.
- Dardenne, M. A. & Faria, A., 1985. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região de Alto Paraíso – GO. Anais 2º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Geologia do Pré-Cambriano, Goiânia – GO. SBG/NCO, p. 65-71.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra – Estrutura de Transportes. 2002. Mapa Rodoviário – Distrito Federal. Escala 1:130.000.
- Espejo, M. A.; Vicente, E.; Molina, E. & Barragan, E. 1992. Kaolinite Formation from Feldspars: Study of a Weathering Profile in Gneiss from the Iberian Hercynian Massif. In: Mineralogica et Petrographica Acta. Mediterranean Clay Meeting, Vol. XXXV-A. p.209-216.
- Faria, A., 1995. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança – Alto Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Univ. de Brasília. 199p.
- Faria, A. & Dardenne, M. A.;1995. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região de Alto Paraíso - São João D’Aliança – GO. Anais V Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia – GO. SBG/NCO, p. 75-77.

- Faria, A. & Guimarães, E. M. & Figueiredo, A. N., 1997. Mapa Geológico do Distrito Federal. Escala 1:100.000. Programa Cartas de Síntese e Estudos de Integração Geológica. DNPM-UnB.
- Fratini, N. 1954. Controllo chimico dei cementi pozzolanici. *Ann. Chim.*, 44:709.
- Fuck, R. A. 1990. Dobramentos neoproterozóicos da margem ocidental do Cráton do São Francisco. *Cong. Bras. Geol.* 33, SBG, Bol. Resumo, P. 288-289.
- Fuck, R. A. 1994. A faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *Resumos Expandidos. Simp. Geol. Centro Oeste*: 184-187.
- Fuck, R. A., Jardim de Sá, Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Pedrosa Soares, A. C., 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese de conhecimentos. In: O Cráton do São Francisco. J. M. L. Dominguez & A. Misi (editores). SBG, SBG/BA, CNPq. p. 161-185.
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M. & Del-Rey, J. L. H., 1994. Compartimentação Tectônica da Porção Oriental da Província Tocantins. *Cong. Bras. Geol.* 38 – Camboriú. Bol. de Resumos Expandidos. Vol. I p. 215-216.
- Goma, F., 1979. El cemento portland y otros aglomerantes. Barcelona, Editores Técnicos Asociados S. A. 232p.
- Gomes, C., 1986. Argilas: o que são e para que servem. Fundação Caloute, 457 p.
- Gomes, C. S. F. & Massa, M. E. 1992. Allophane and Spherulitic halloysite, weathering Products of Trachytic Pumice Fall-outs in the Caldeira Velha area (S. Miguel-Azores). In: *Mineralogica et Petrographica Acta. Mediterranean Clay Meeting*, Vol. XXXV-A. p.283-288.
- Guimarães, E. M., 1997. Estudos de Proveniência e Diagênese com Ênfase na Caracterização dos Filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí, na Região de Bezerra-Cabeceiras (GO). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 270p.
- Indian Standards Institution (IS). 1968. Specification for burnt clay pozzolan; IS 1344. New Delhi.
- Kihara, Y.; Battagin, A. F.; Zampieri, V. A.; Centurione, S. L. & Pecchio, M. 1990. A microscopia do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos. In: ABCP, Congresso Brasileiro de Cimento, 2, São Paulo.
- Kitsopoulos, K. P. & Dunkam, A. C. 1996. Heulandite and mordenite-rich tuffs from Greece: a potential source for pozzolanic materials. *Mineralium Deposita*, 31:576-584.

- Kotschoubey, B.; Duarte, A. L. Z. & Truckenbrodt, W. & Hieronymus, B. 1999. Depósitos de Caolim e Argila Semi-Flint no Nordeste do Pará. *Rev. Bras. Geoc.*, 26:71-80.
- Kotschoubey, B.; Duarte, A. L. Z. & Truckenbrodt, W. 1999. Cobertura Bauxítica e Origem do Caulim do Morro do Felipe, Baixo Rio Jari, Estado do Amapá. *Rev. Bras. Geoc.*, 29:331-338.
- Lacerda, M. L. 2001. Estudo de viabilidade econômica para produção de cimentos pozolânicos na fábrica da Cimento Tocantins S.A.. Sobradinho-DF. Relatório interno ao Grupo Votorantim-Cimentos, 5p.
- Lea, F. M. 1970. *The chemistry of cement and concrete*. 3<sup>rd</sup> ed. Glasgow, Edward Arnold Pub. Ltda.
- Metha, K. 1987. "Natural Pozzalans." *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET-SP-86-8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa. V1, p.1-33.
- Mielenz, R. C.; Greene, K. T. & Schieltz, N. C. 1951. Natural pozzolans for concrete. *Economic Geology*, 46:311-328.
- Millot, G. 1963. *Géologie des Argiles: Altération, Sédimentologie, Géochimie*. Ed. Masson et C<sup>ie</sup>, Paris, 499 pp.
- Montanheiro, T. J. 1999. *Prospecção e caracterização de pozolanas na bacia do Paraná, Estado de São Paulo*. Instituto de Geociências. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 226 p.
- Moore, D. M. & Reynolds, R. C. 1989. *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Ed. Oxford University Press, 332 pp.
- Murray, H. H. 1988. Kaolin Minerals: Their Genesis and Occurrences. In Bailey, S. W. (ed.) *Hydrous Phyllosilicates, Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of América, pp: 67-89.
- Oliveira, M. T. G. de; Furtado, S. M. A.; Formoso, M. L. L.; Schenato, S. 2000. Alteração de rochas vulcânicas ácidas e formação de depósitos de caolim na bacia de Campo Alegre, SC, Brasil – Estudo da Mina Ceramarte. *Geochimica Brasiliensis*; 14:175-190.
- Pimentel, M. M., Jost, H. & Fuck, R. A. 2004. O Embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In Mantesso-Neto, V. et al. (ed) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p. 355-368.

- Raverdy, M., Brivot, F., Paillère, A. M., Duron, R. 1980. Appréciation de L'activité pouzzolanique des constituants secondaires. In: 7<sup>e</sup> Congrès International de la Chimie des Ciments, Vol III, communications, p. 36.
- Souza Santos, P. 1975. Tecnologia de argilas. São Paulo, Edgard Blucher. 2v.
- Strieder, A. J. 1990. Análise estrutural da região de Abadiânia (GO), Rev. Bras. Geoc., 20: 239-57.
- Valeriano, M. C., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A. & Seer, H. J. 2004. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In Mantesso-Neto, V., et al. (ed) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. p. 576-592.
- Weaver, C. E. 1989. Clays, Muds, and Shales. Ed. Elsevier, New York, 819 pp.
- Zampieri, V. A. 1989. Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 191 p.
- Zampieri, V.A. 1993. Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 233 p.



## **X – Anexos**

## **Anexo 1 – Difrátogramas da Argila *in natura* – amostra total do Perfil de Bonsucesso**

Figura A1.1 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2

Figura A1.2 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4

Figura A1.3 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6

Figura A1.4 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2

Figura A1.5 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C3 e C4

Figura A1.6 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C5 e C6

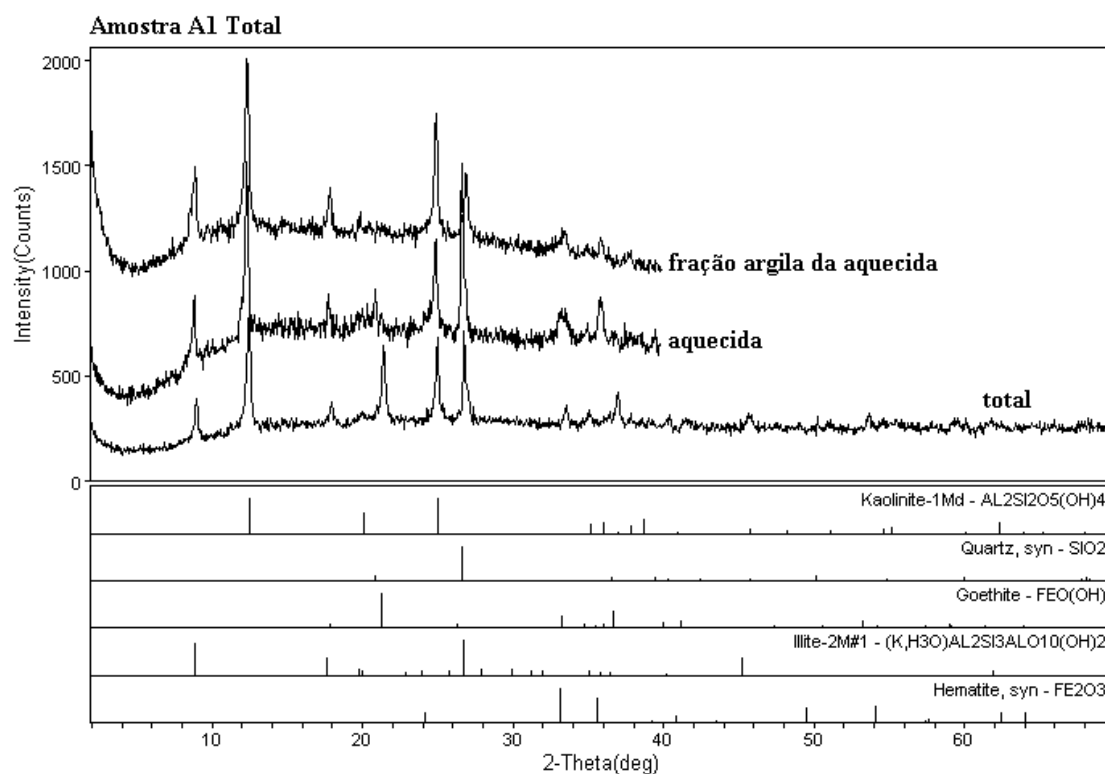
Figura A1.7 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C7 e C8

Figura A1.8 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C9 e C10

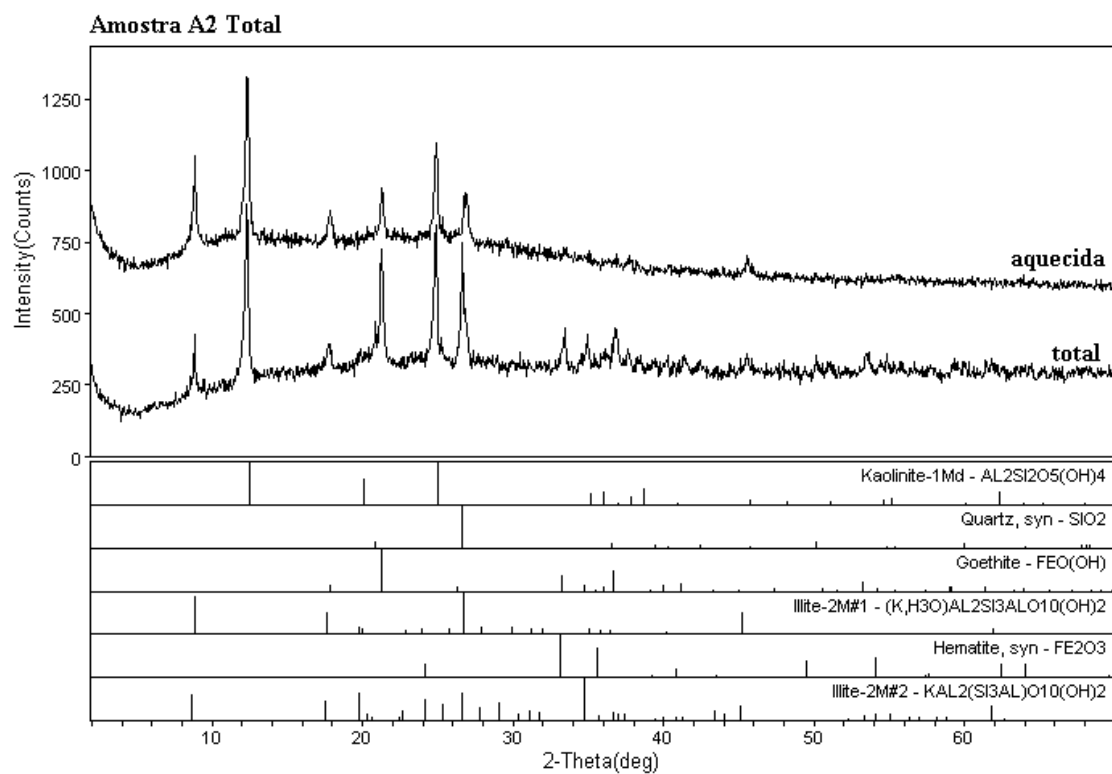
Figura A1.9 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C11 e C12

Figura A1.10 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C13 e C14

Figura A1.11 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C15 e C16



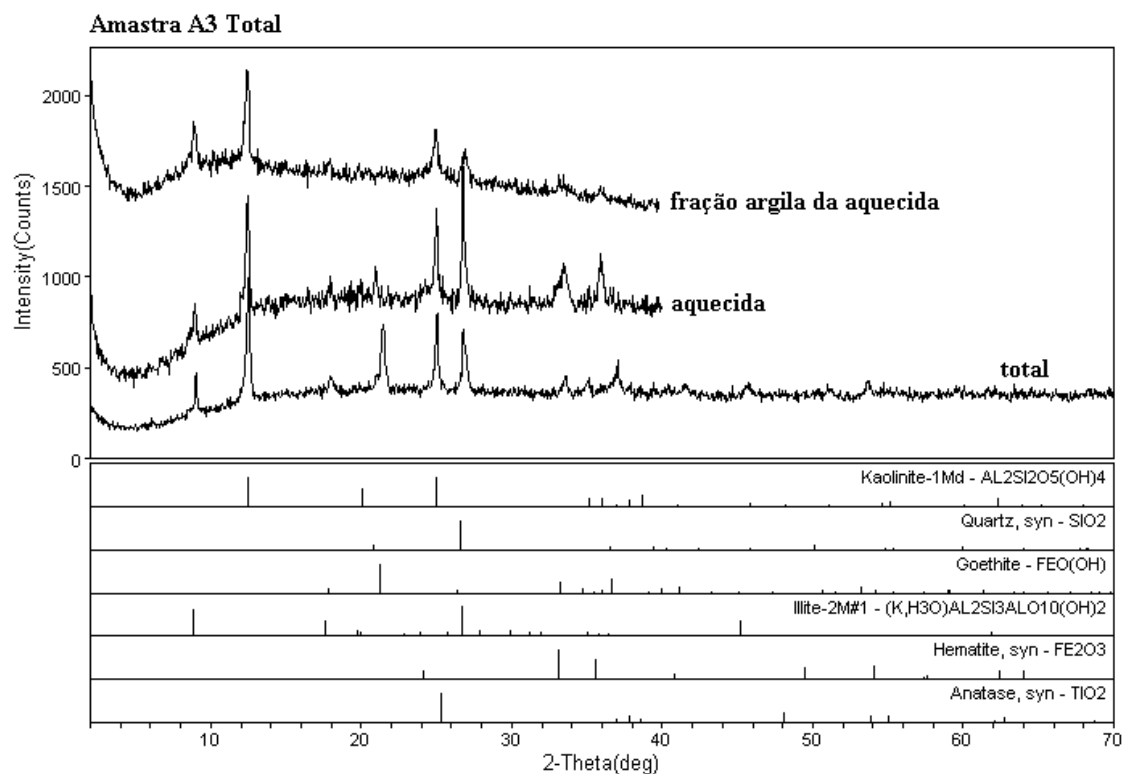
Laboratório de DRX - IG/UnB



Laboratório de DRX - IG/UnB

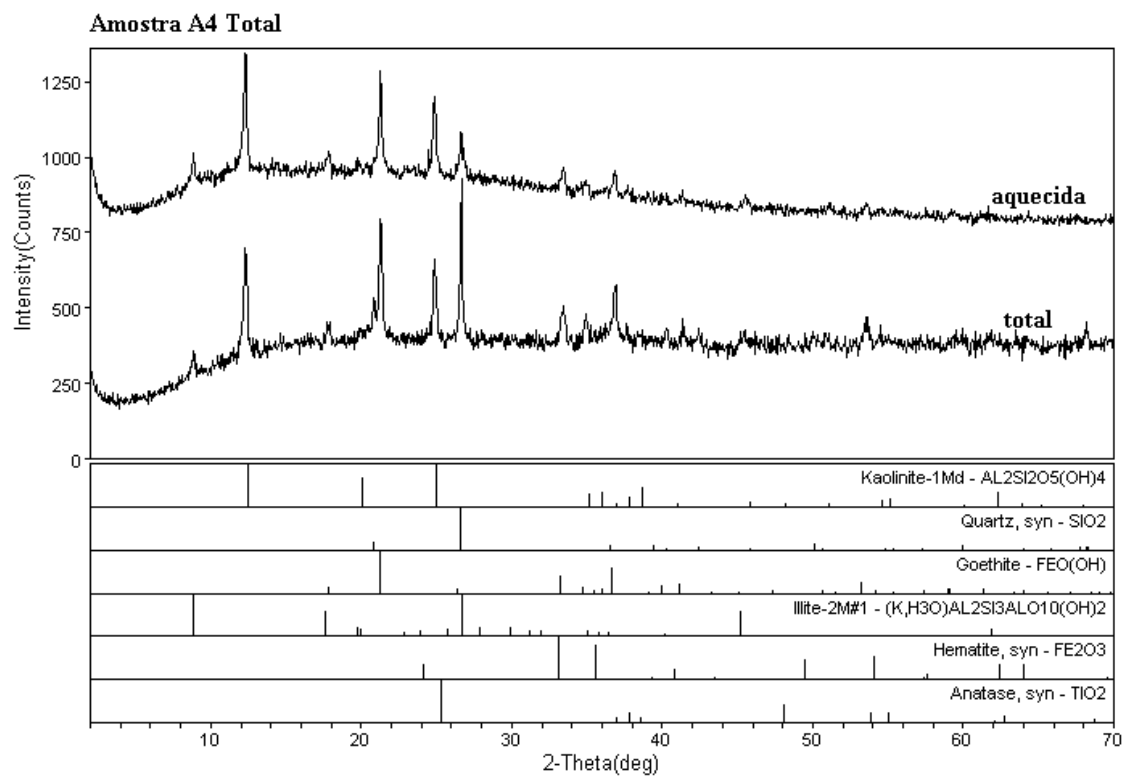
<d:\mxi\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:05a

Figura A1.1 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2



Laboratório de DRX - IG/UnB

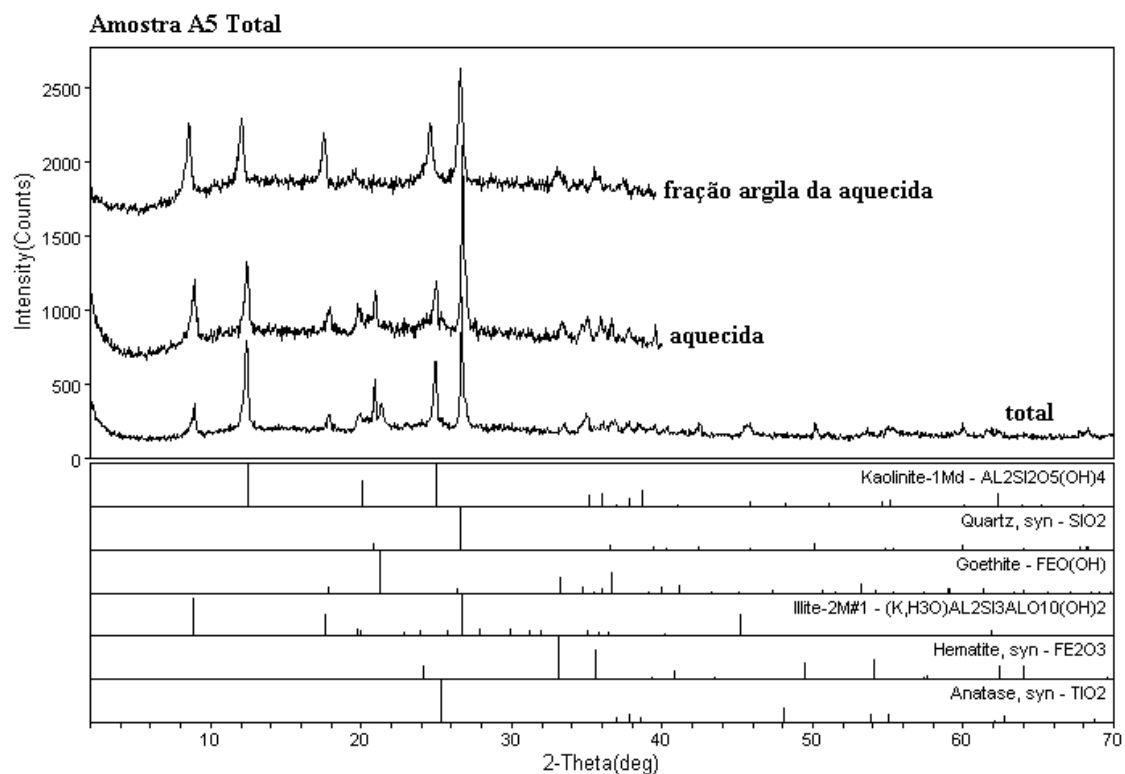
<dsmax\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:09a



Laboratório de DRX - IG/UnB

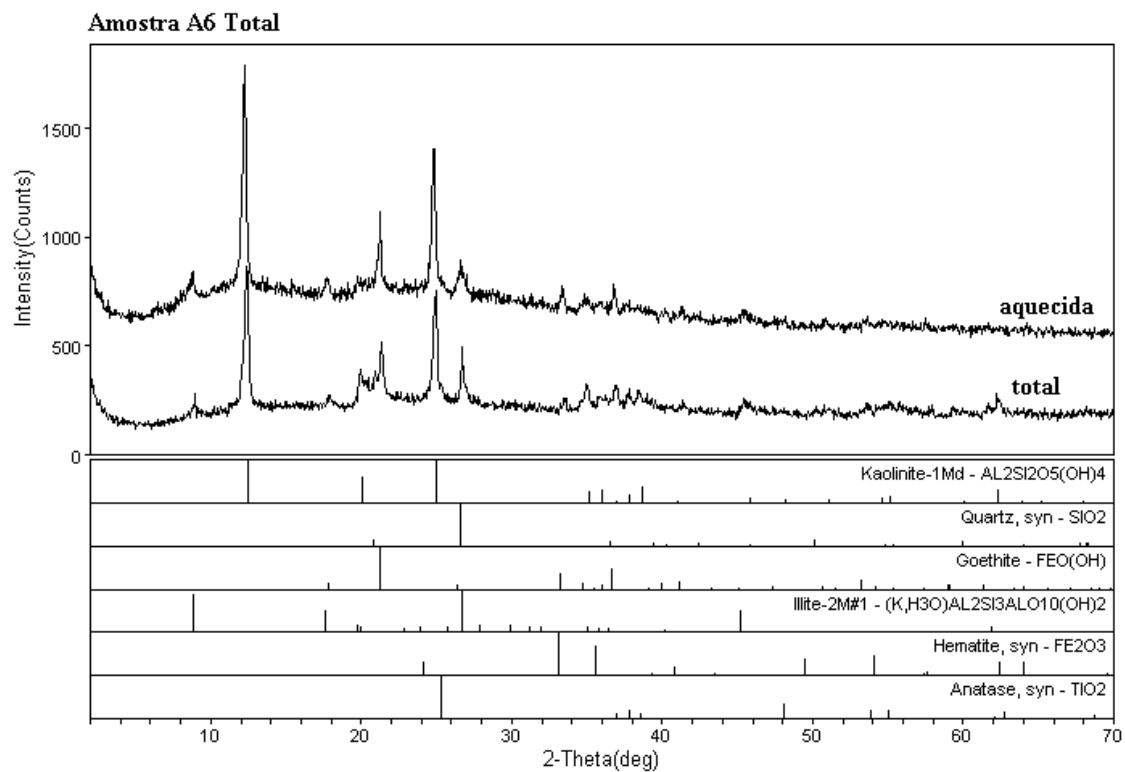
<dsmax\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:09a

Figura A1.2 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4



Laboratório de DRX - IG/UnB

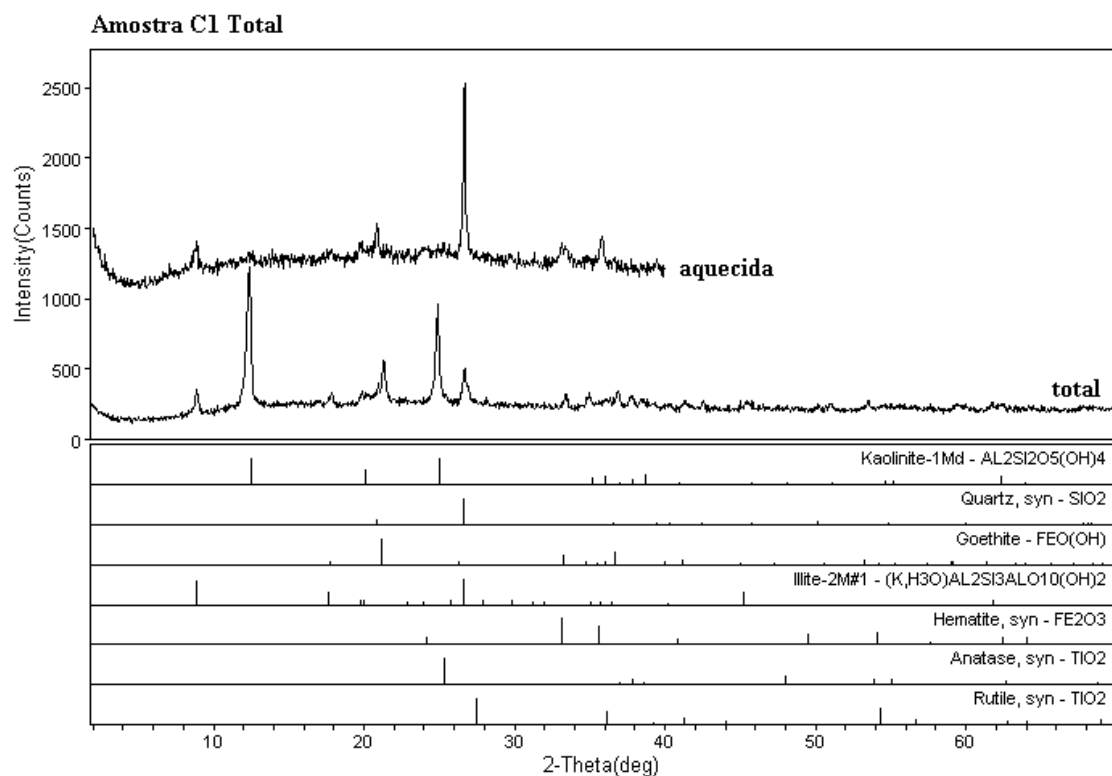
<d5maz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:13a



Laboratório de DRX - IG/UnB

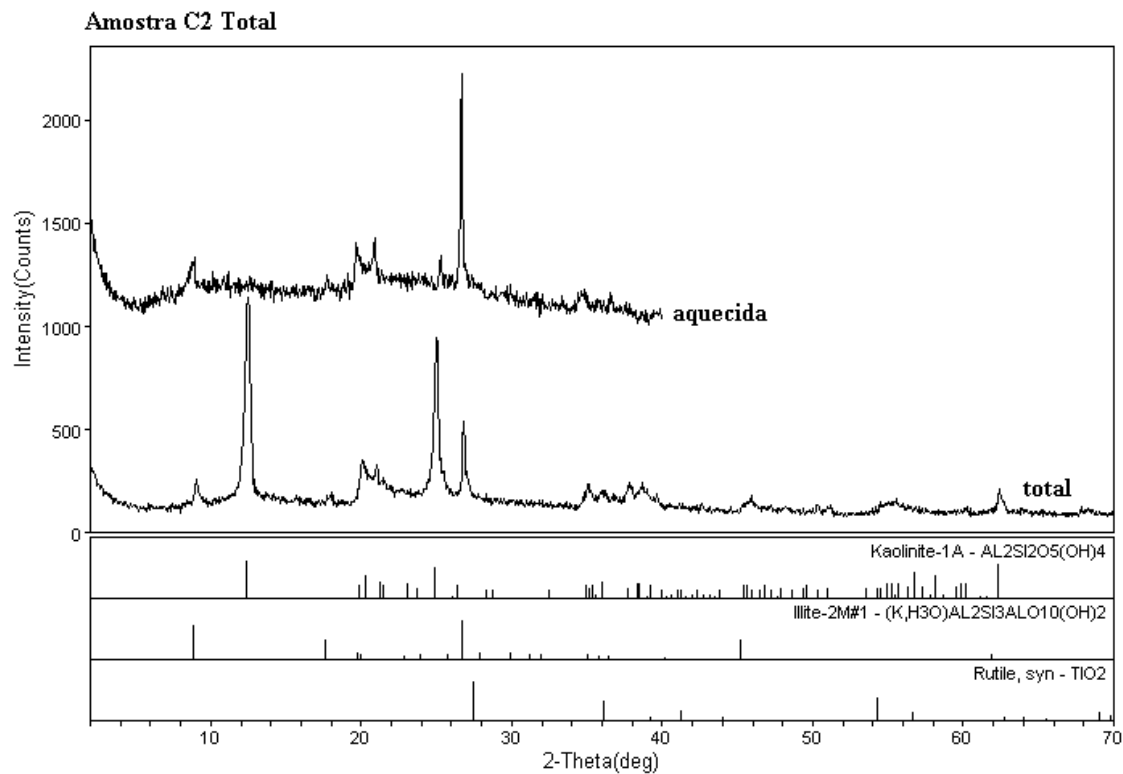
<d5maz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:15a

Figura A1.3 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6



Laboratório de DRX - IG/UnB

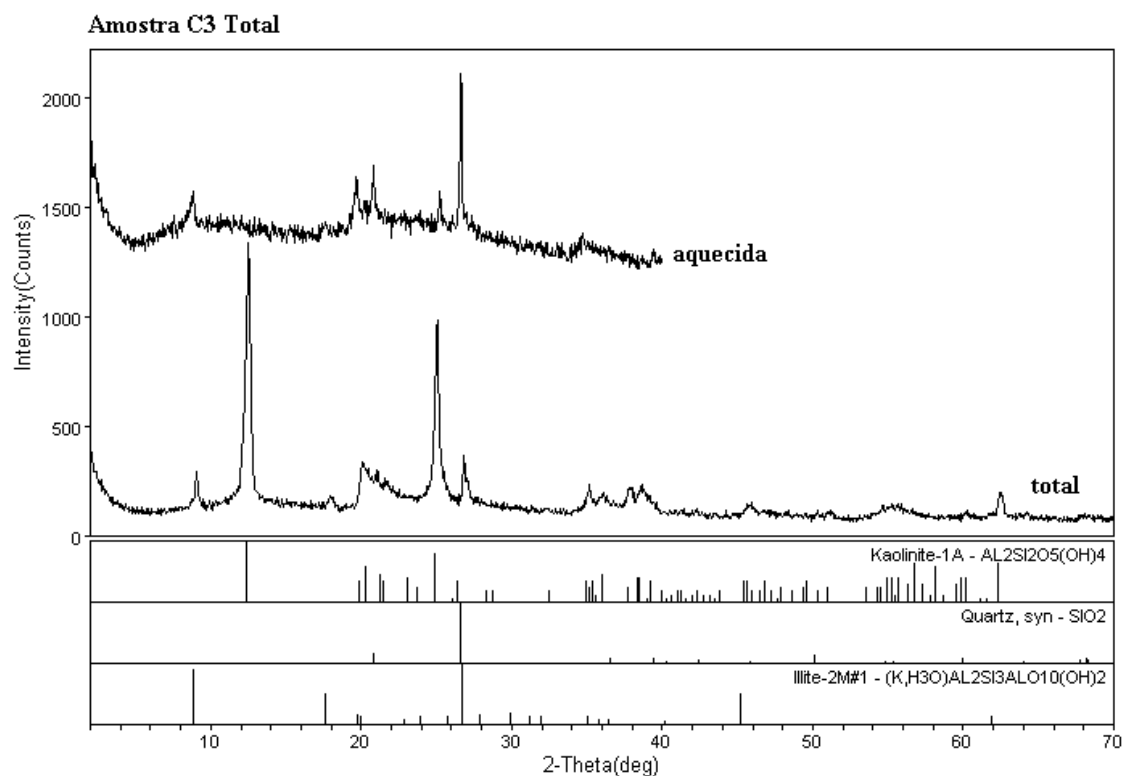
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:18a



Laboratório de DRX - IG/UnB

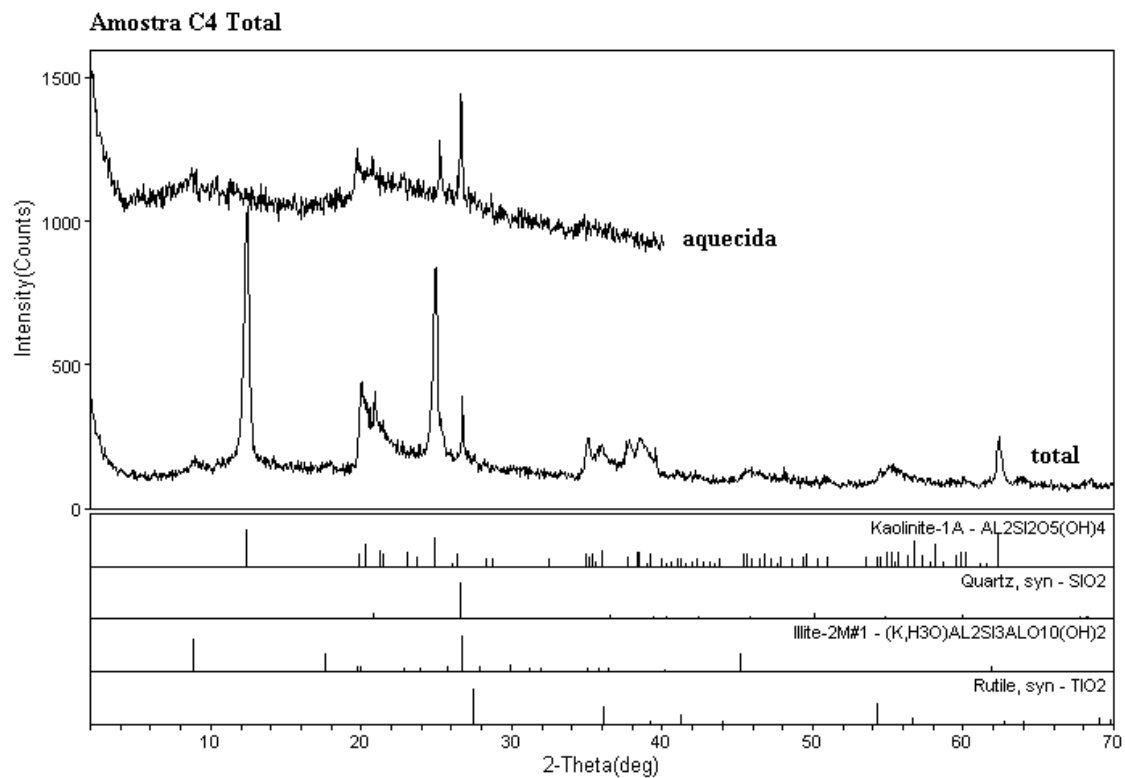
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:21a

Figura A1.4 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2



Laboratório de DRX - IG/UnB

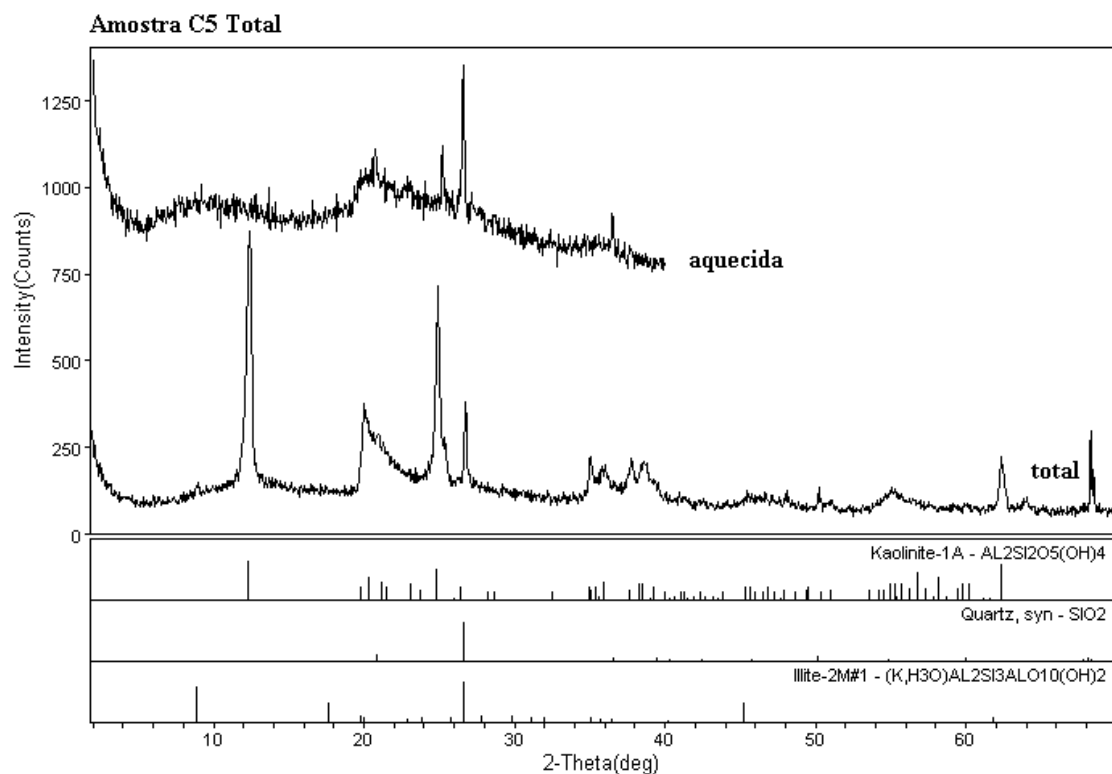
<dlmaz/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:22a



Laboratório de DRX - IG/UnB

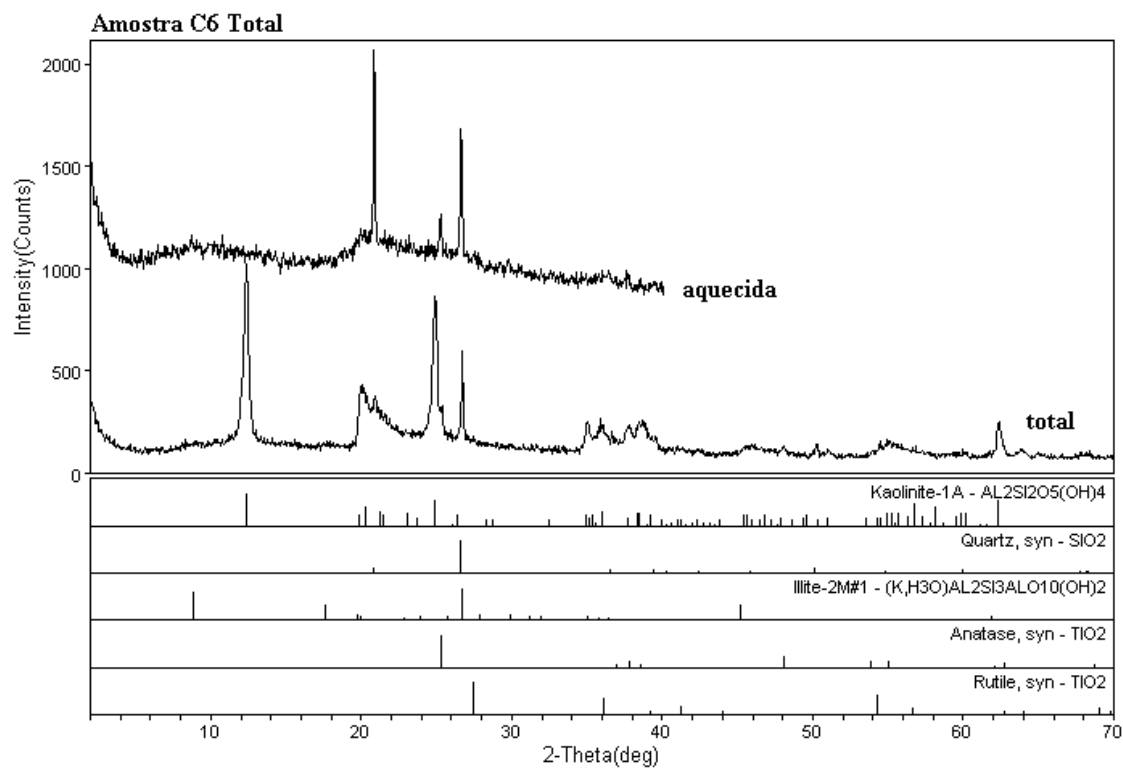
<dlmaz/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:26a

Figura A1.5 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C3 e C4



Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmax\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:02a

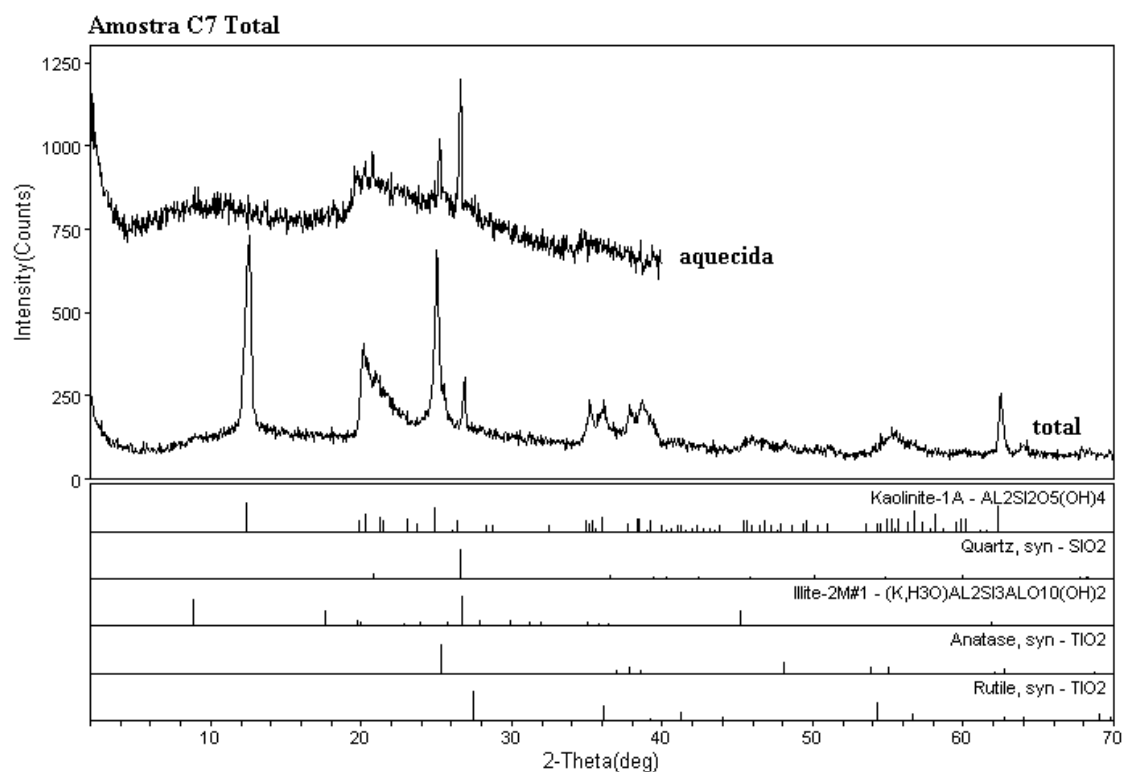


Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmax\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:04a

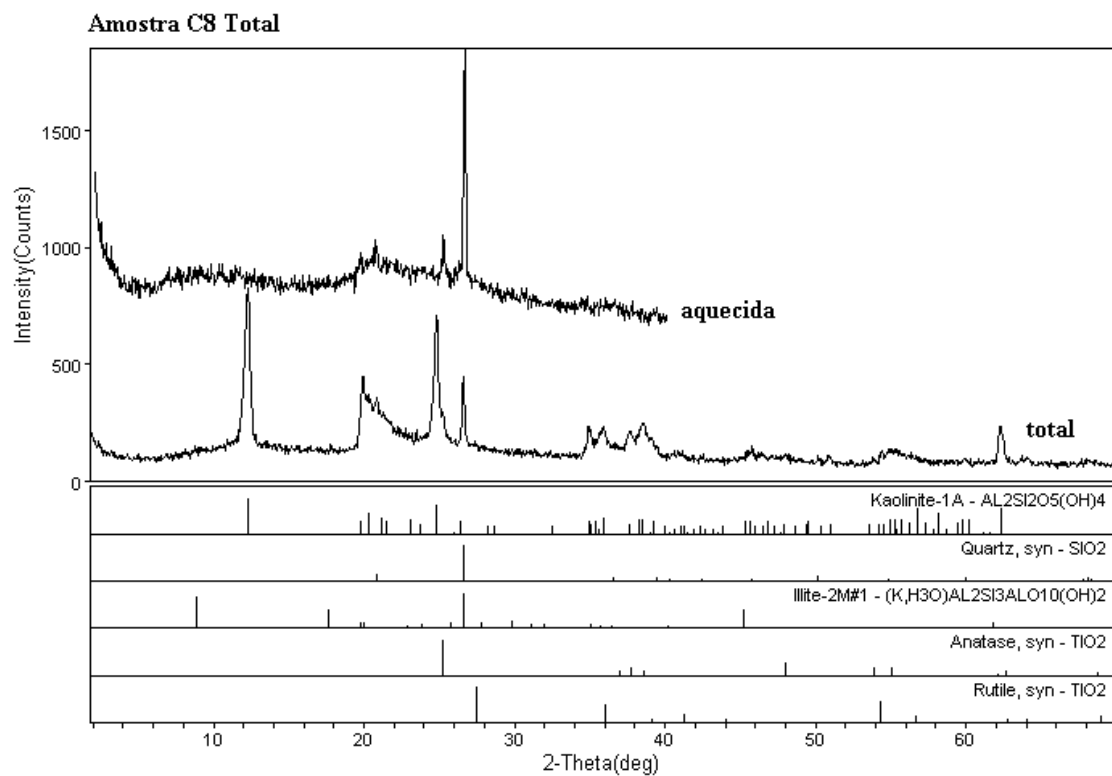
Figura A1.6 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C5 e C6





Laboratório de DRX - IG/UnB

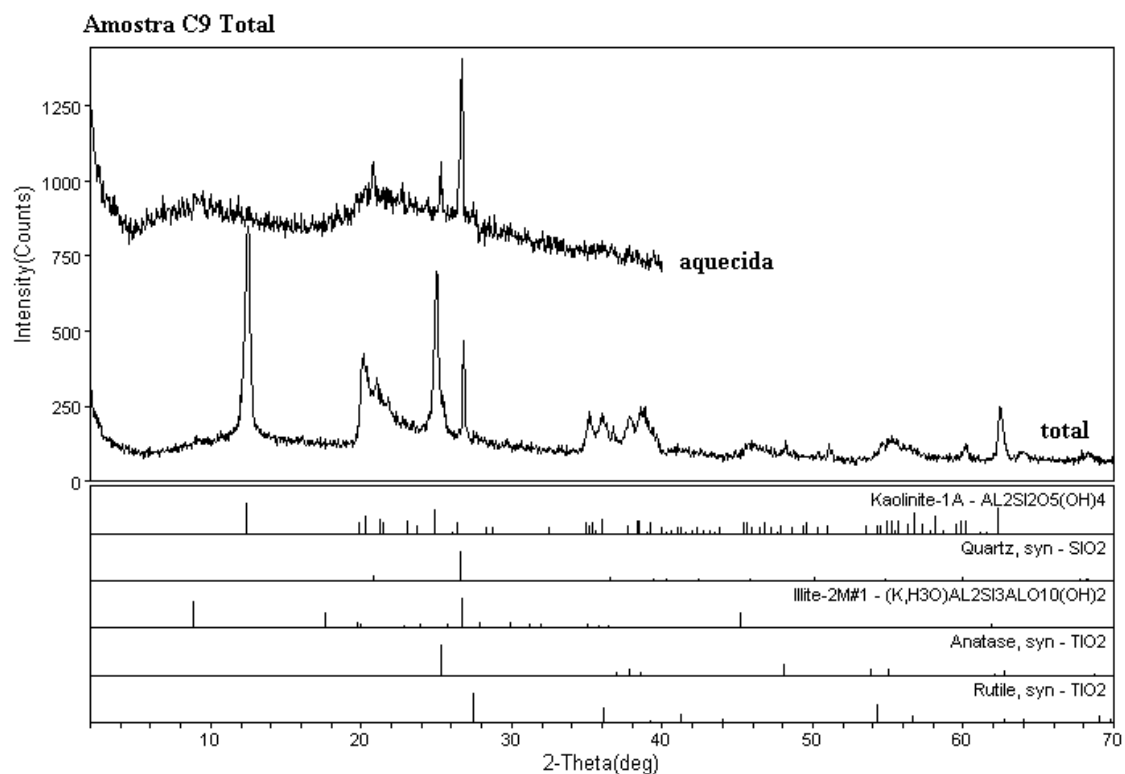
<dlmaz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:09a



Laboratório de DRX - IG/UnB

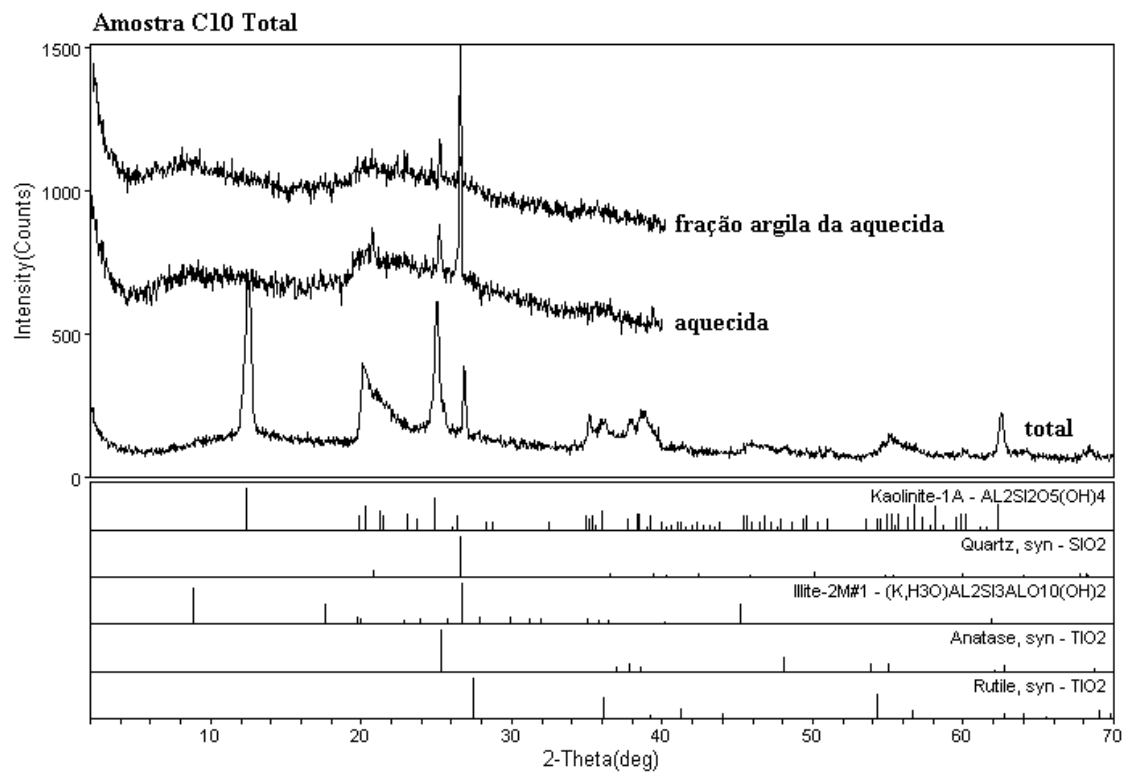
<dlmaz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:09a

Figura A1.7 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C7 e C8



Laboratório de DRX - IG/UnB

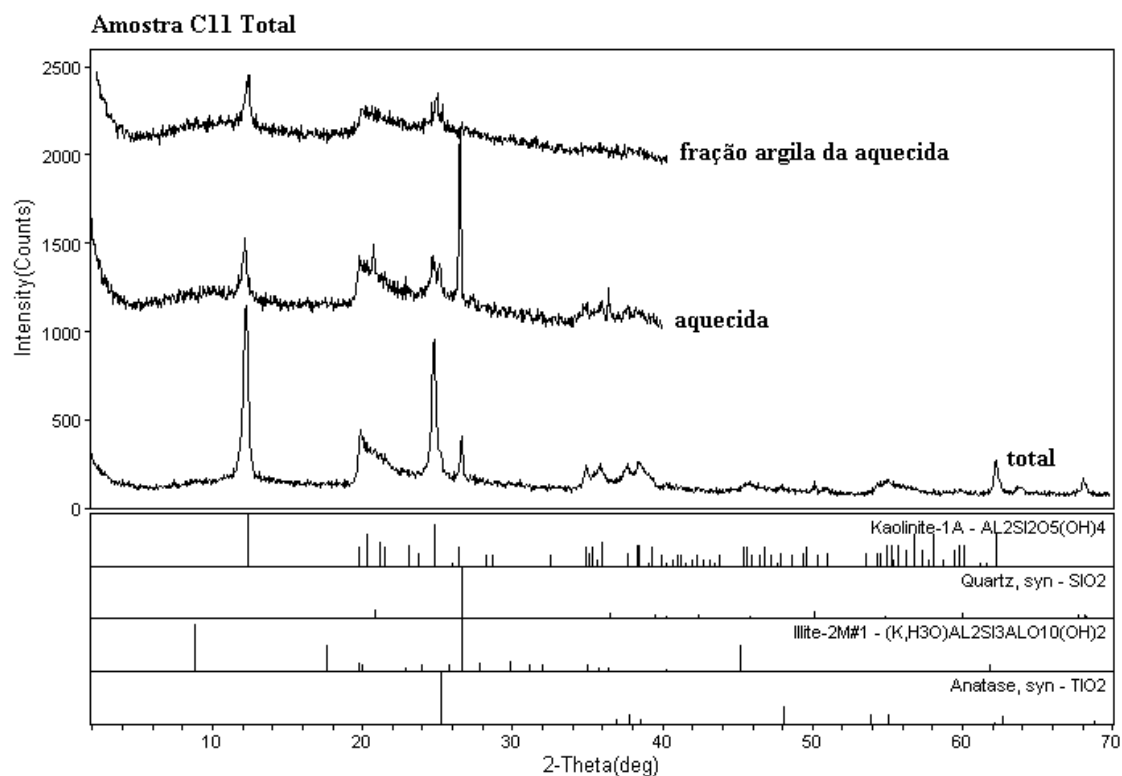
<d:\mz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:41a



Laboratório de DRX - IG/UnB

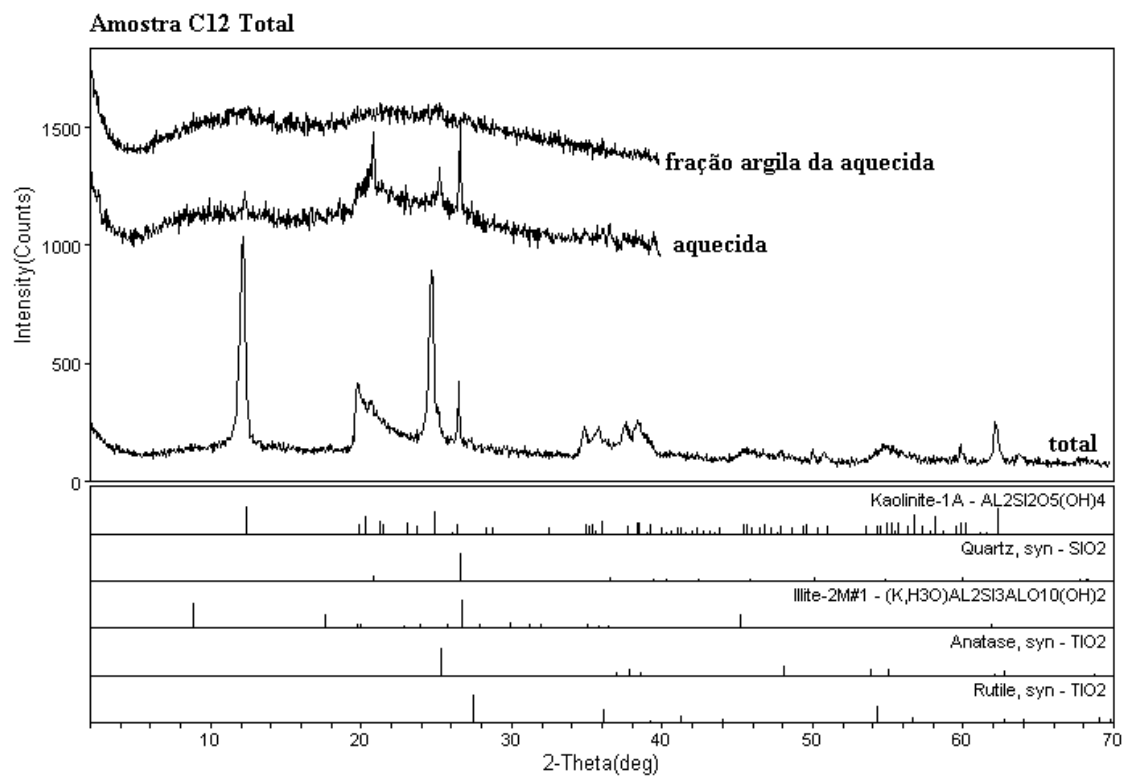
<d:\mz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:42a

Figura A1.8 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C9 e C10



Laboratório de DRX - IG/UnB

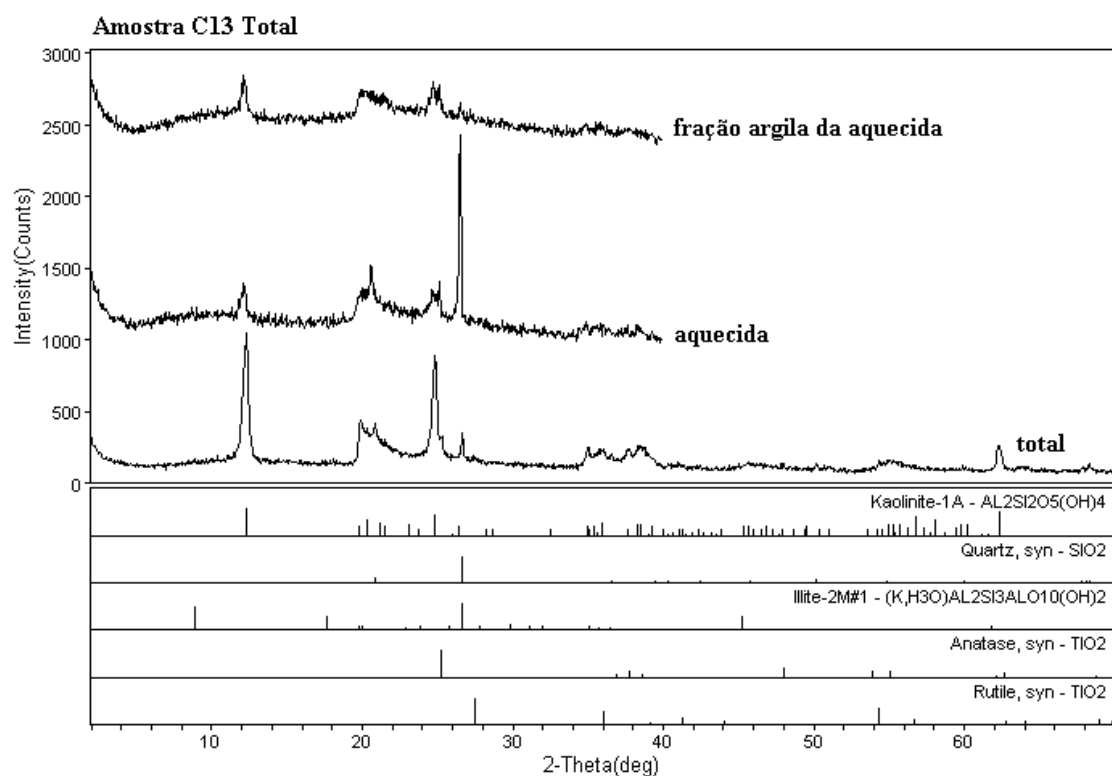
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:48a



Laboratório de DRX - IG/UnB

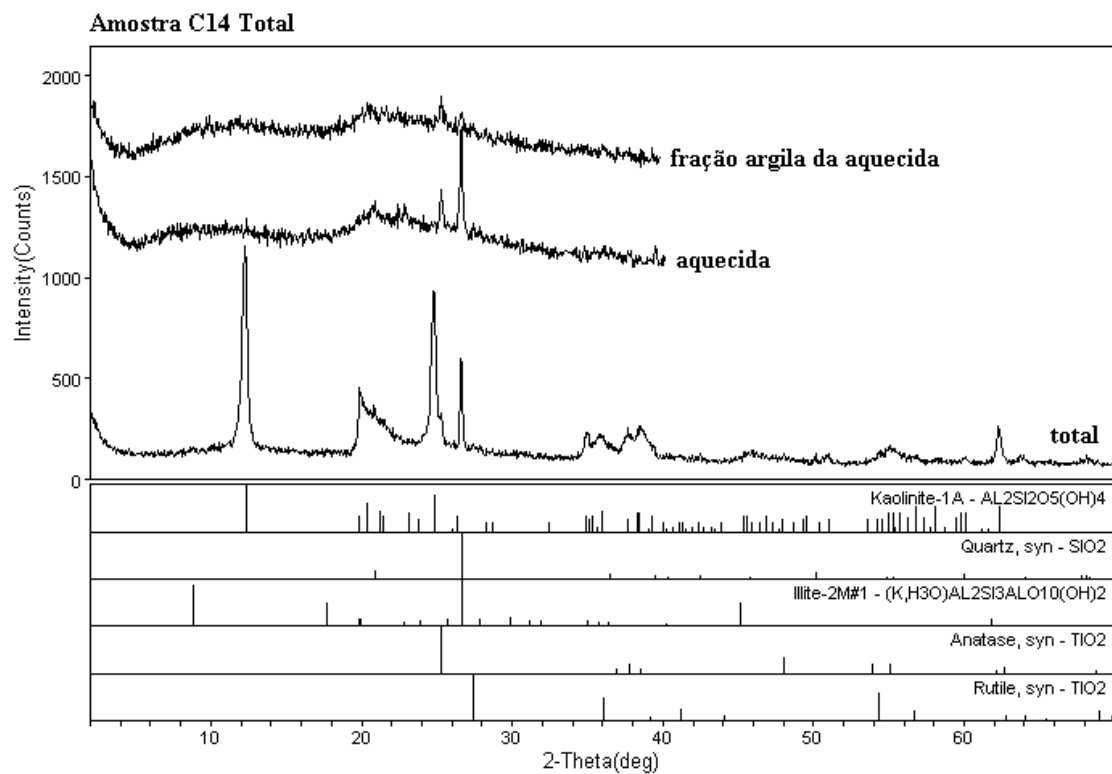
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:48a

Figura A1.9 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C11 e C12



Laboratório de DRX - IG/UnB

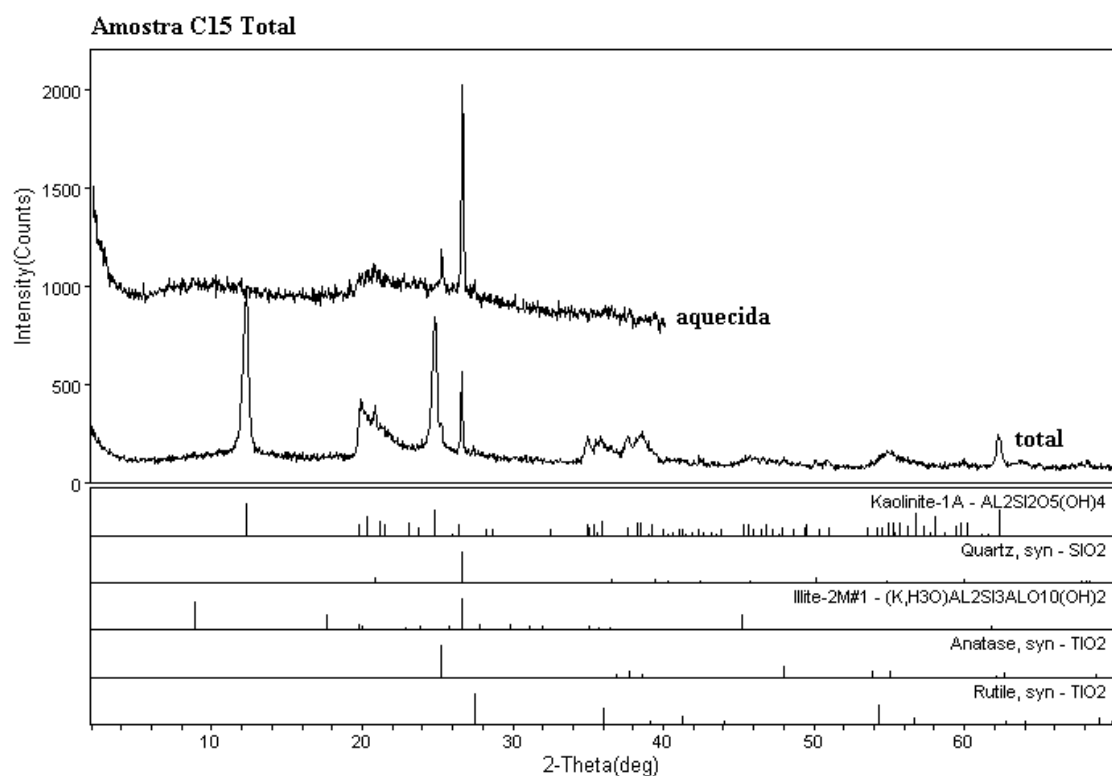
<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:49a



Laboratório de DRX - IG/UnB

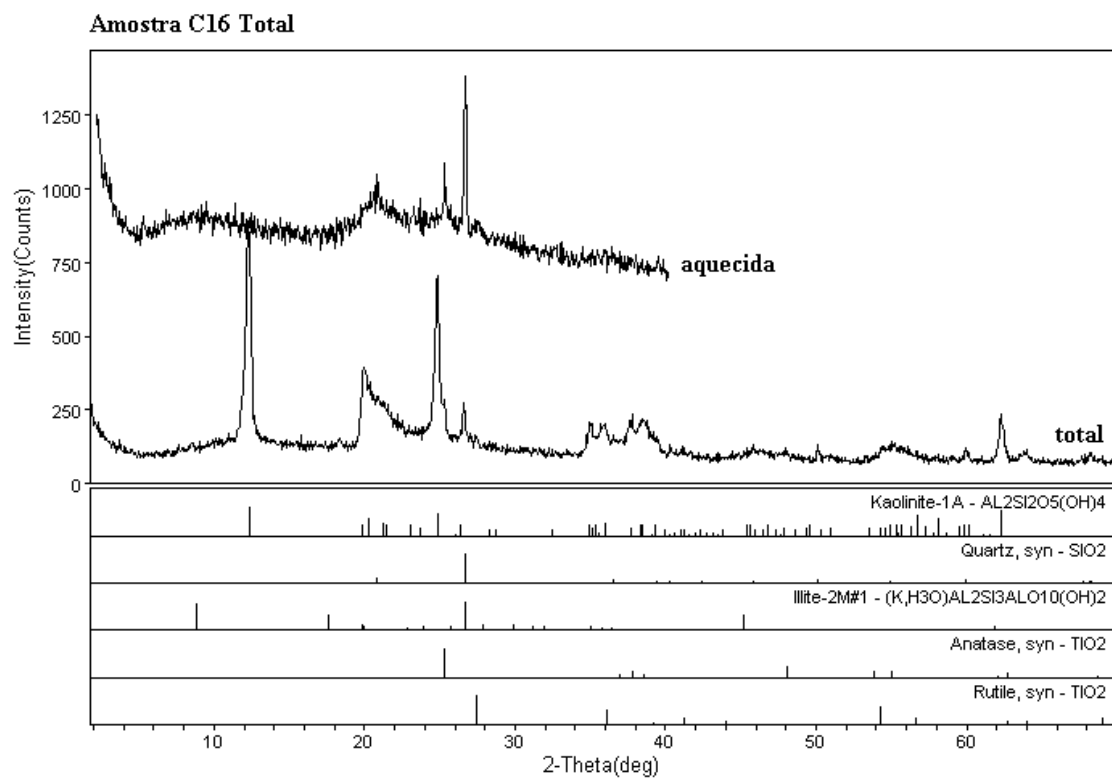
<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:55a

Figura A1.10 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C13 e C14



Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmaz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:57a



Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmaz/novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 12:00a

Figura A1.11 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C15 e C16

## **Anexo 2 – Difratomogramas da Argila *in natura* – fração argila do Perfil de Bonsucesso**

Figura A2.1 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2

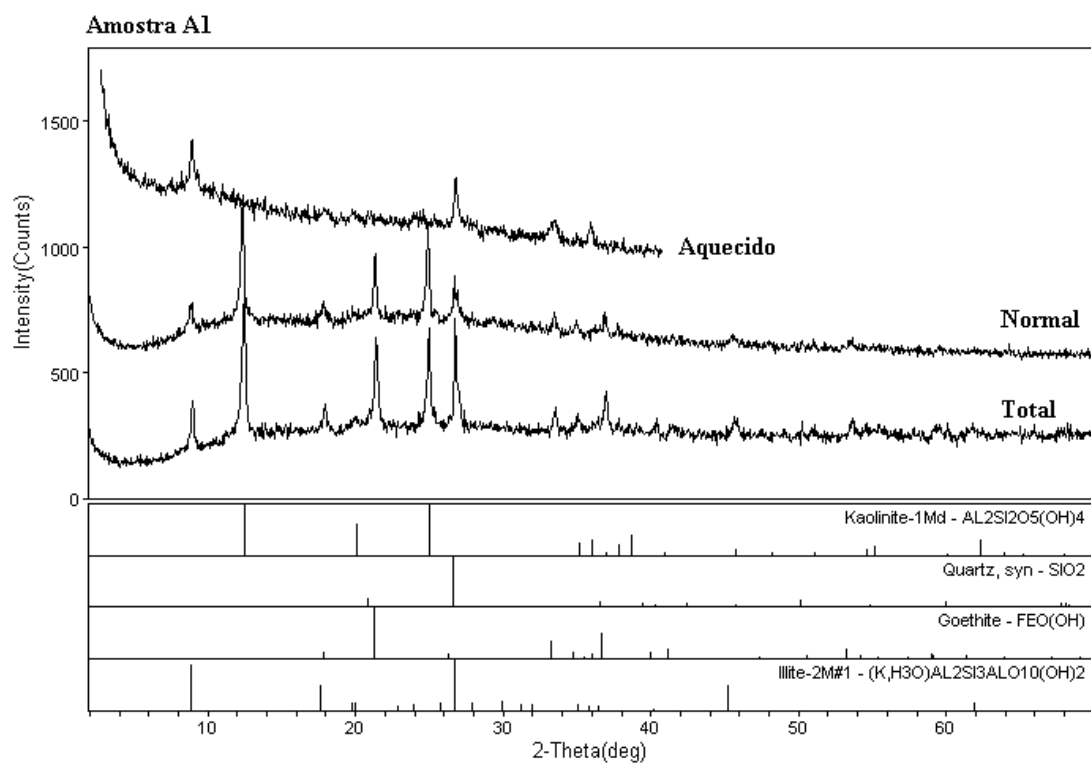
Figura A2.2 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4

Figura A2.3 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6

Figura A2.4 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11

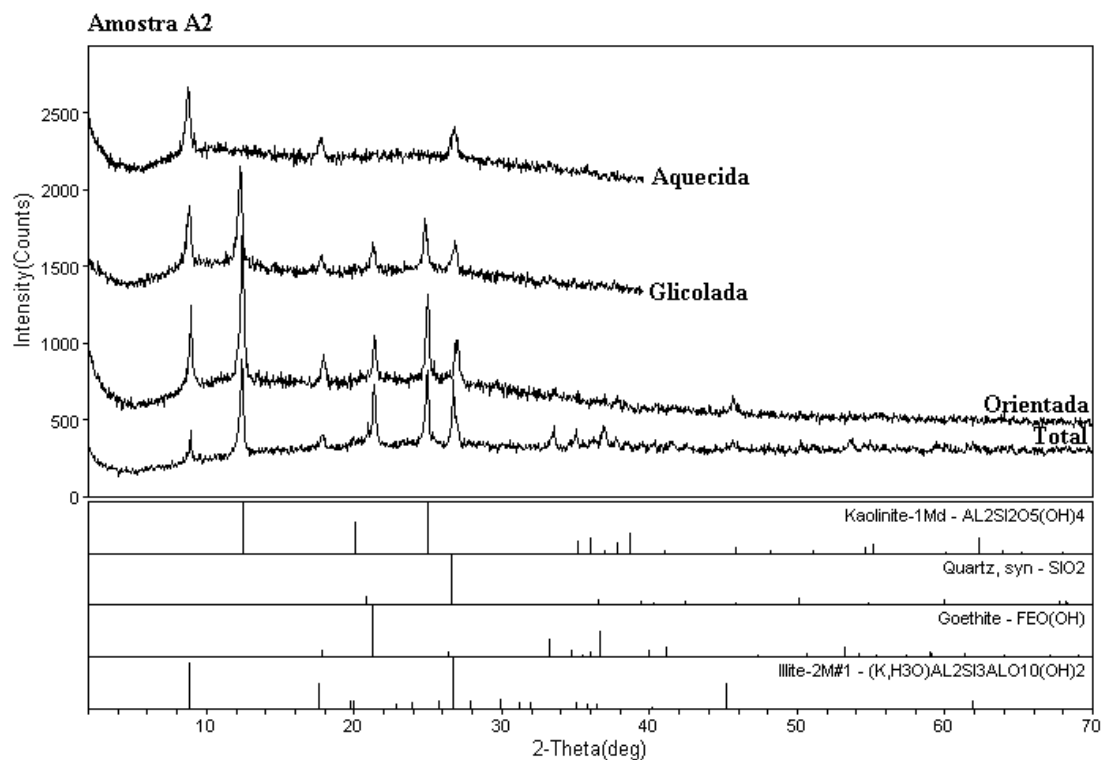
Figura A2.5 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13

Figura A2.6 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C14



Laboratório de DRX - IGAUnB

<dtmax(novemb-1s) Monday, Mar 07, 2005 @04:20a



Laboratório de DRX - IGAUnB

<dtmax(novemb-1s) Monday, Feb 14, 2005 @10:31a

Figura A2.1 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2

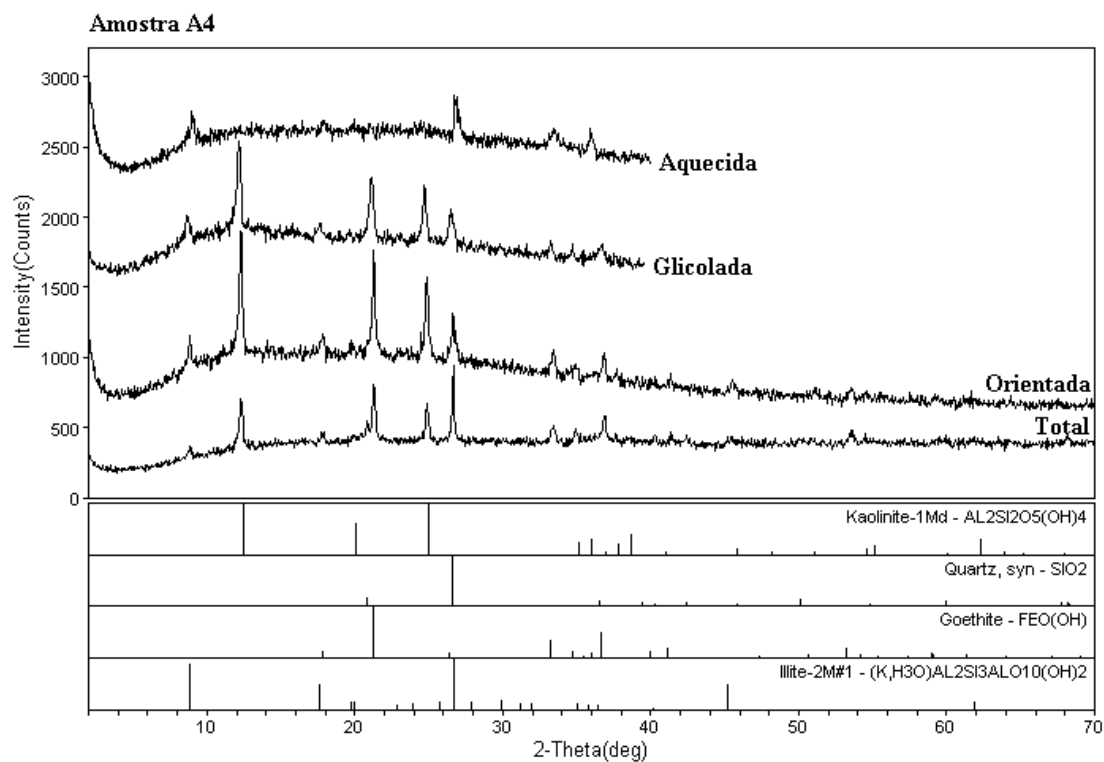
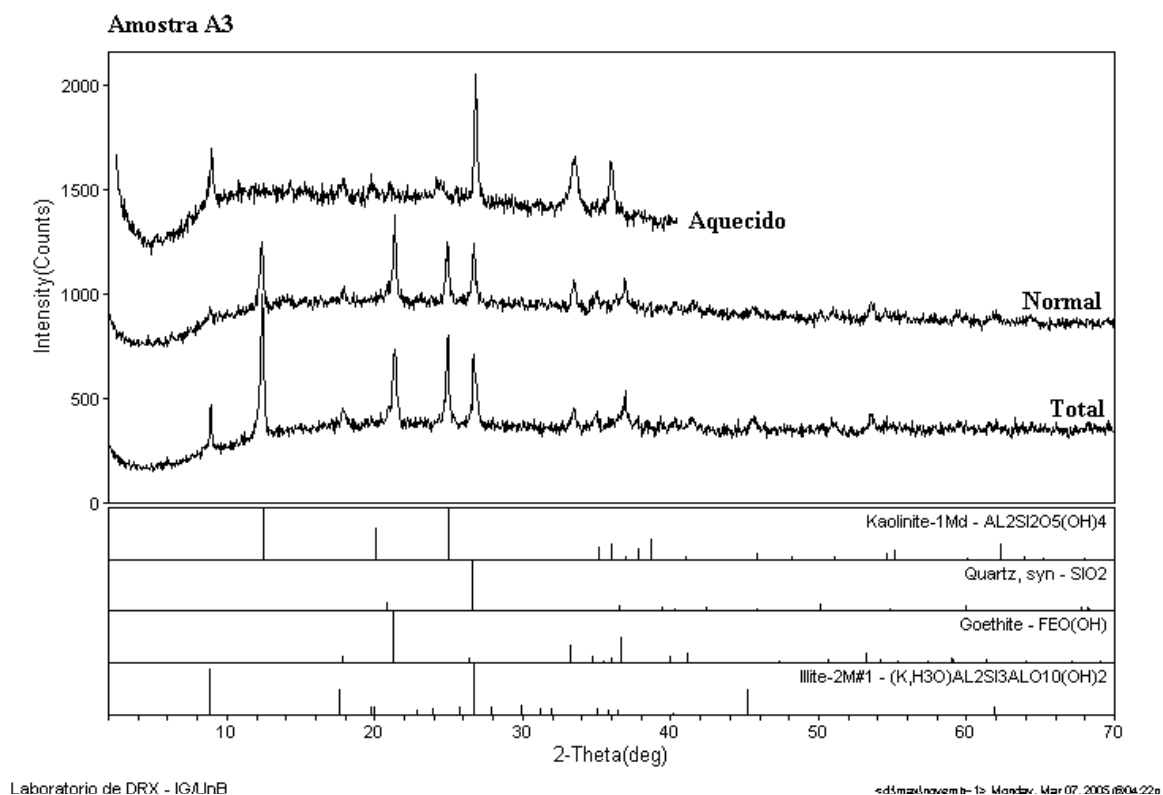
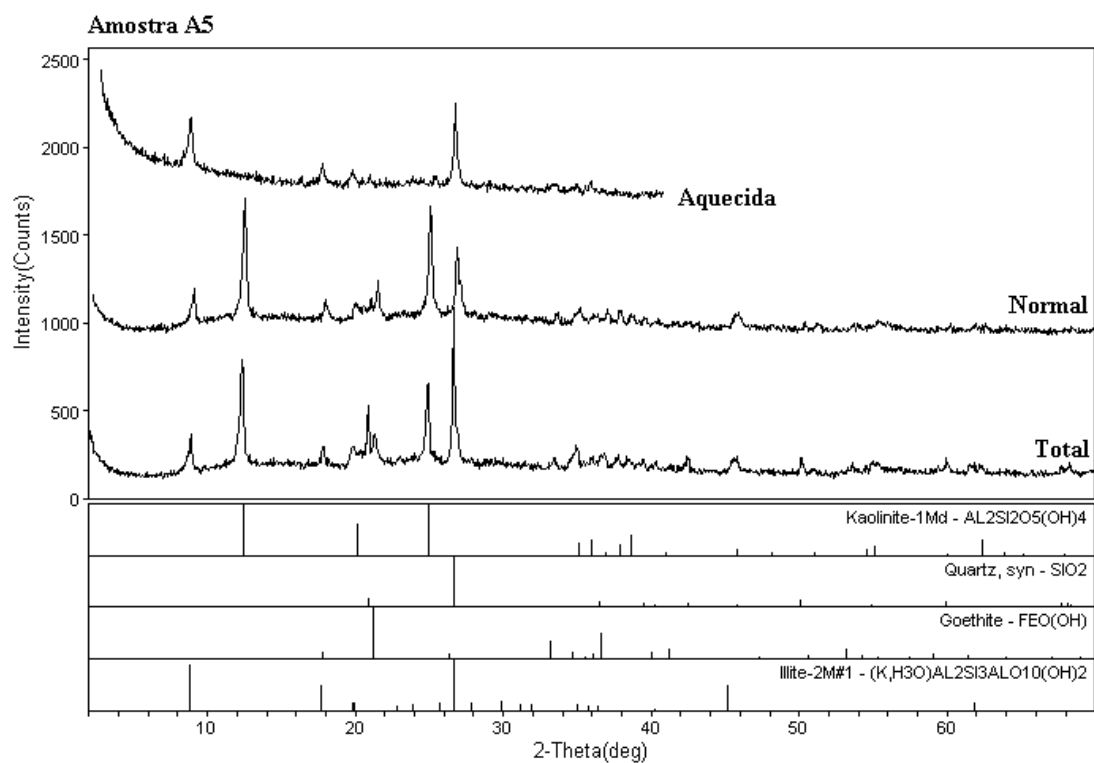


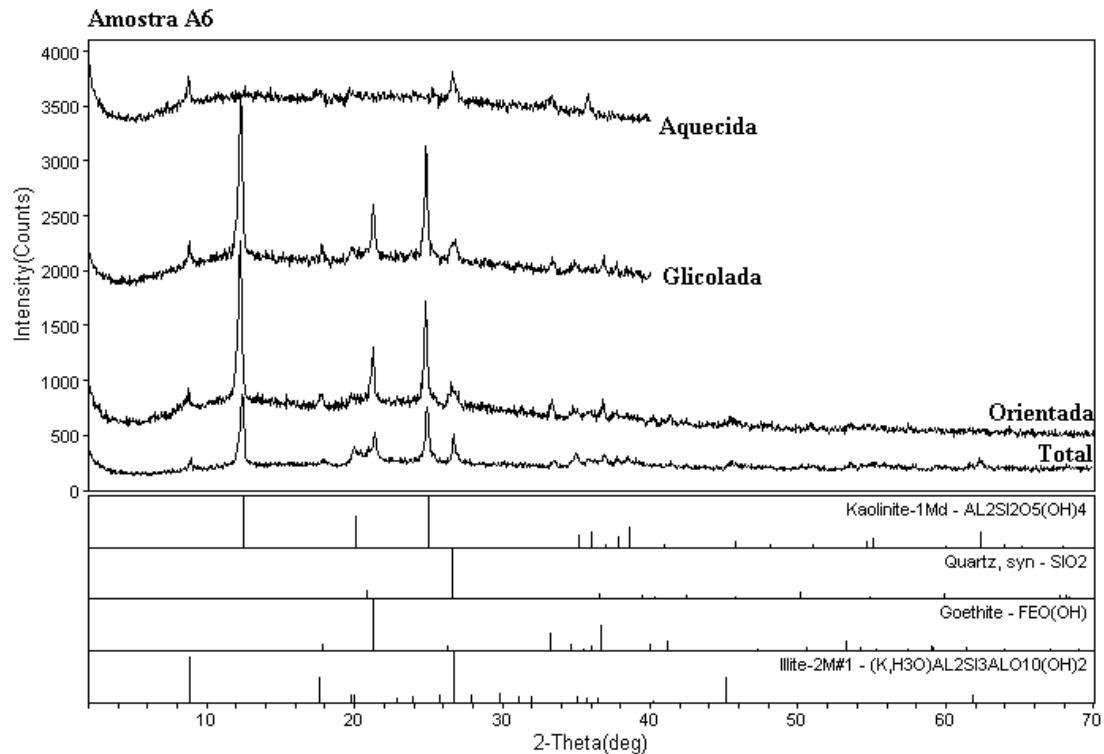
Figura A2.2 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4





Laboratório de DRX - IGA/UnB

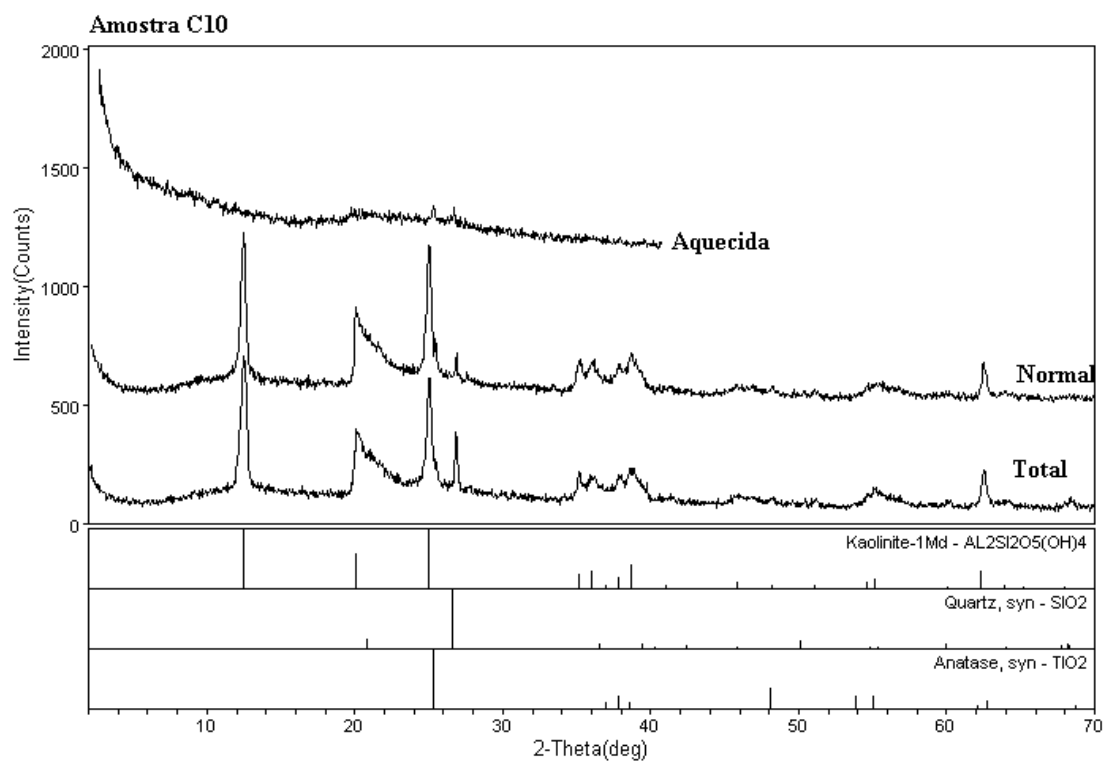
<dimax@novembr-1> Monday, Mar 07, 2005 @04:26a



Laboratório de DRX - IGA/UnB

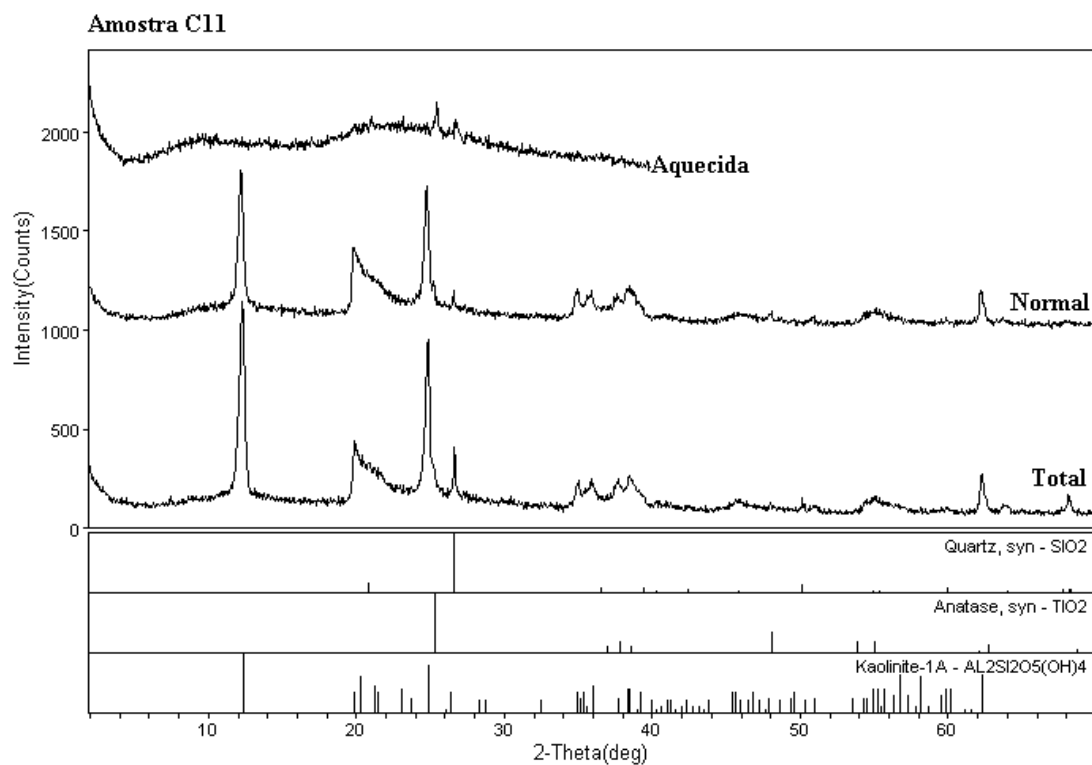
<dimax@novembr-1> Monday, Feb 14, 2005 @10:29a

Figura A2.3 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6



Laboratório de DRX - IGA/UnB

<d:\max(novemb-1> Mondav, Mar 07, 2005 @04:29a



Laboratório de DRX - IGA/UnB

<d:\max(novemb-1> Mondav, Mar 07, 2005 @04:35a

Figura A2.4 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11

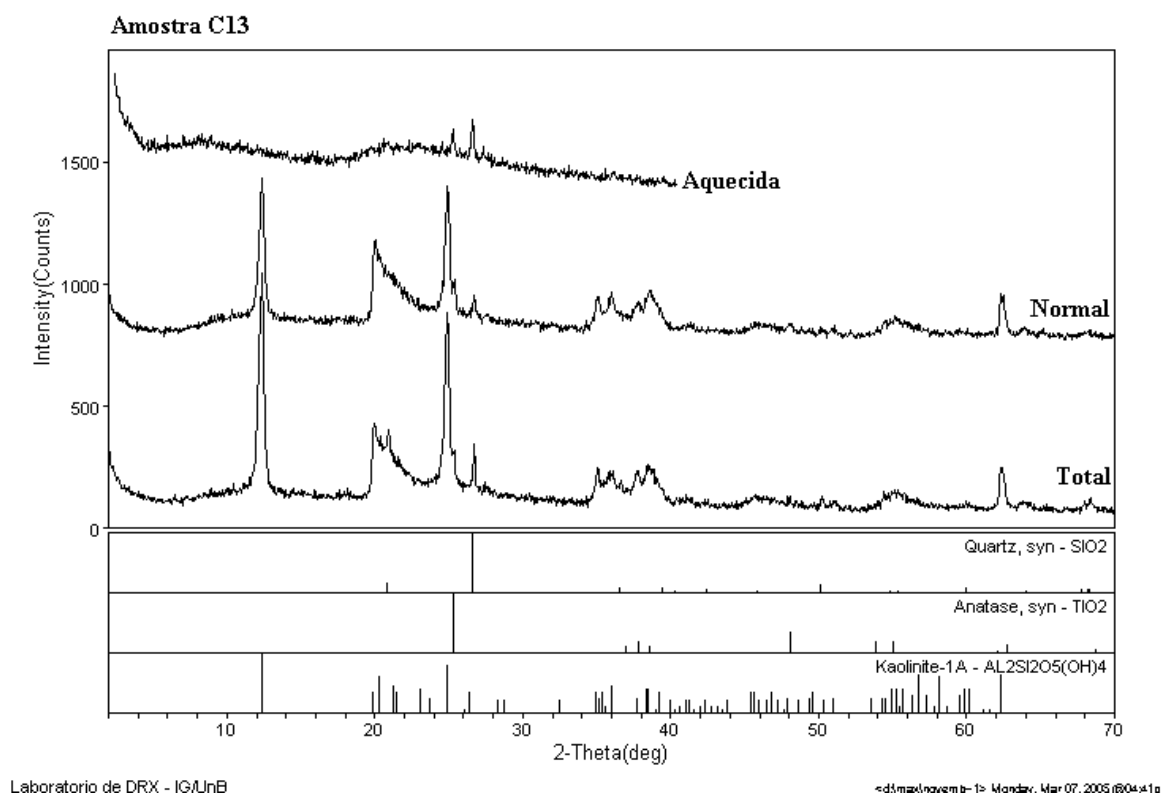
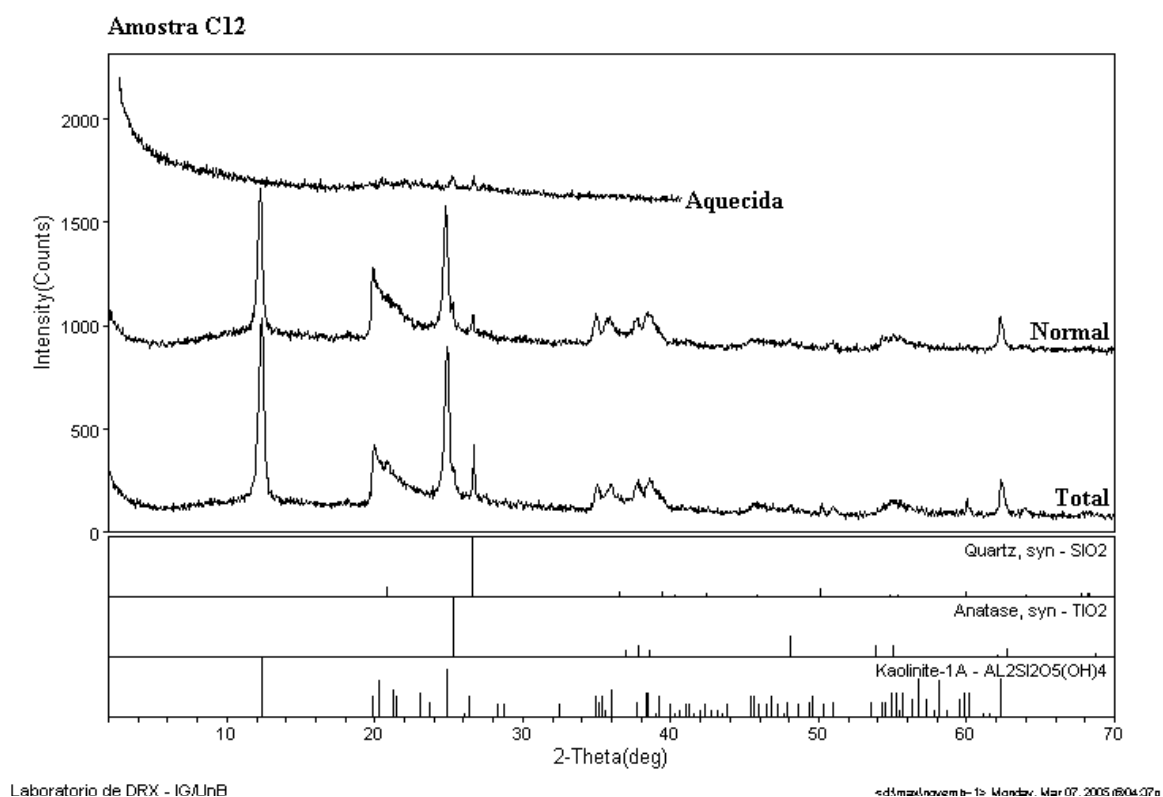
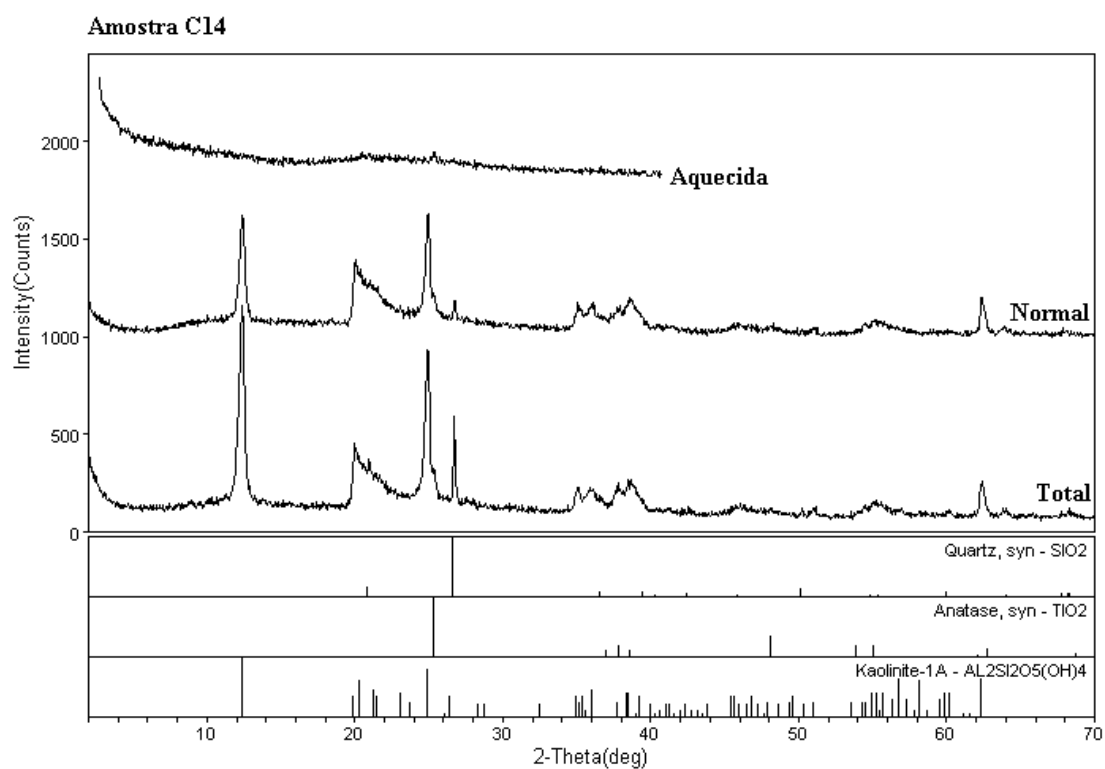


Figura A2.5 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d:\max\novemb-1> Monday, Mar 07, 2005 16:04:30

Figura A2.6 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras C14

### **Anexo 3 – Difratomogramas da Argila Calcinada do Perfil de Bonsucesso**

Figura A3.1 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2

Figura A3.2 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4

Figura A3.3 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6

Figura A3.4 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2

Figura A3.5 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C4 e C5

Figura A3.6 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C6 e C7

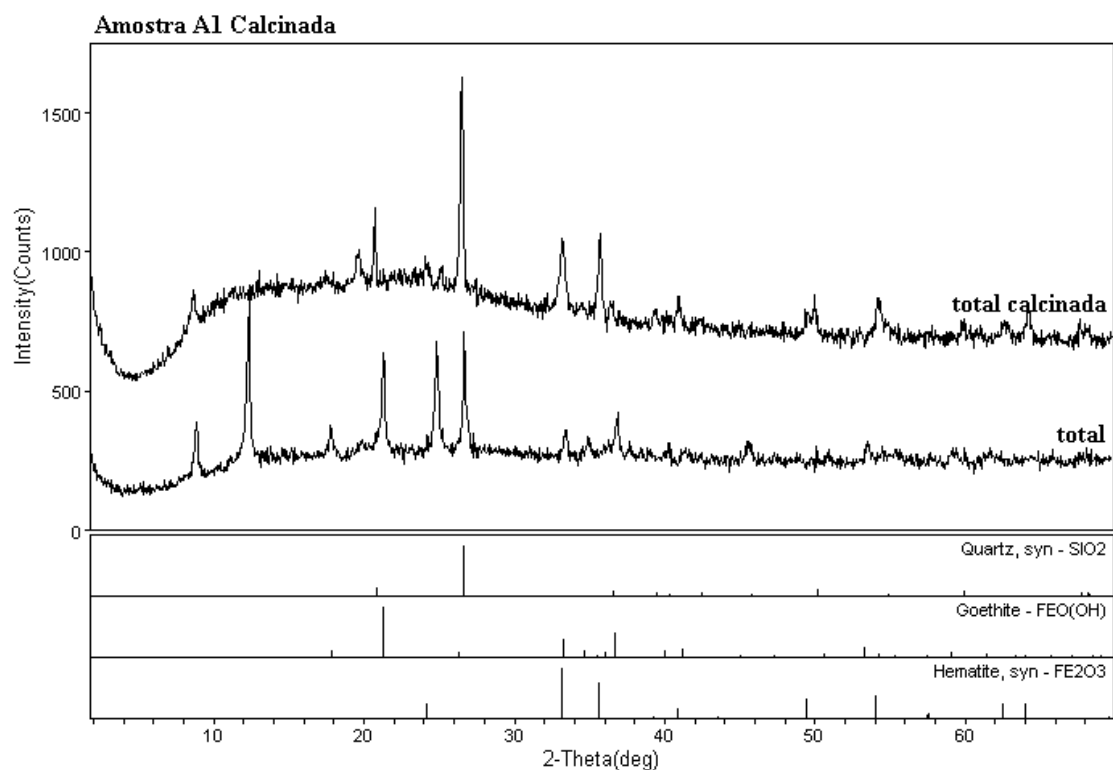
Figura A3.7 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C8 e C9

Figura A3.8 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11

Figura A3.9 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13

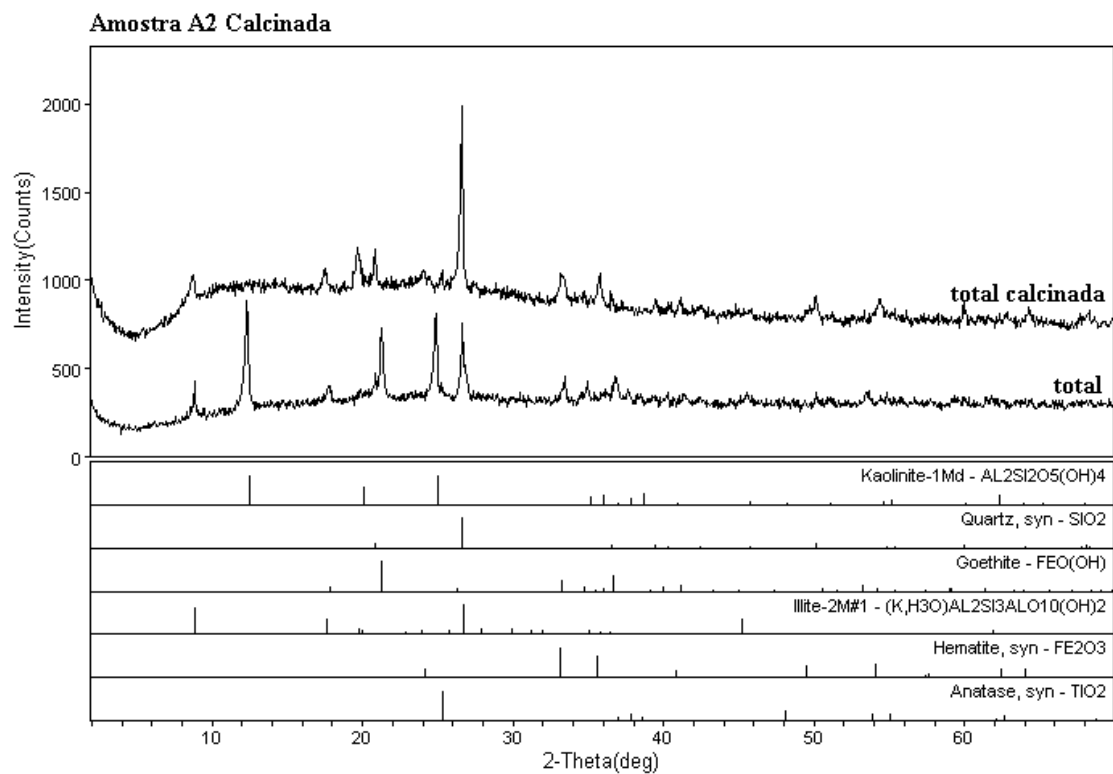
Figura A3.10 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C14 e C15

Figura A3.11 – Difratomogramas da área Bonsucesso: amostras C16



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:10:59a



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:06a

Figura A3.1 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A1 e A2

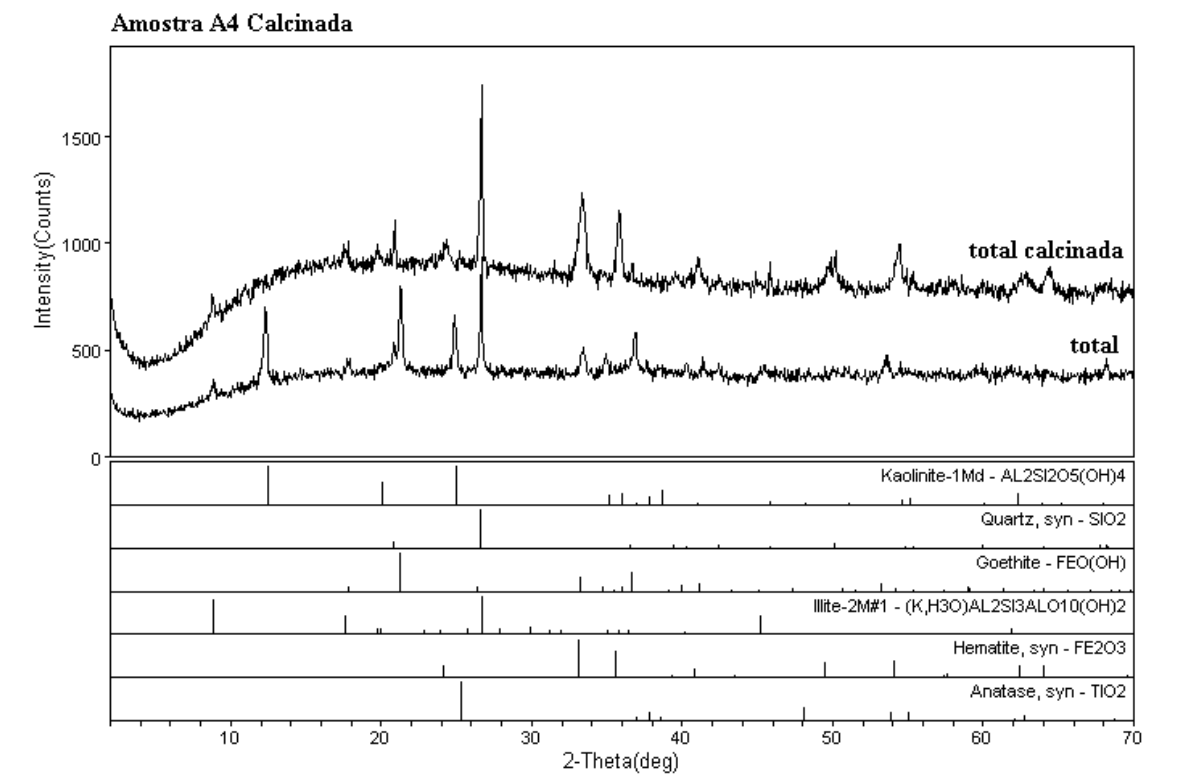
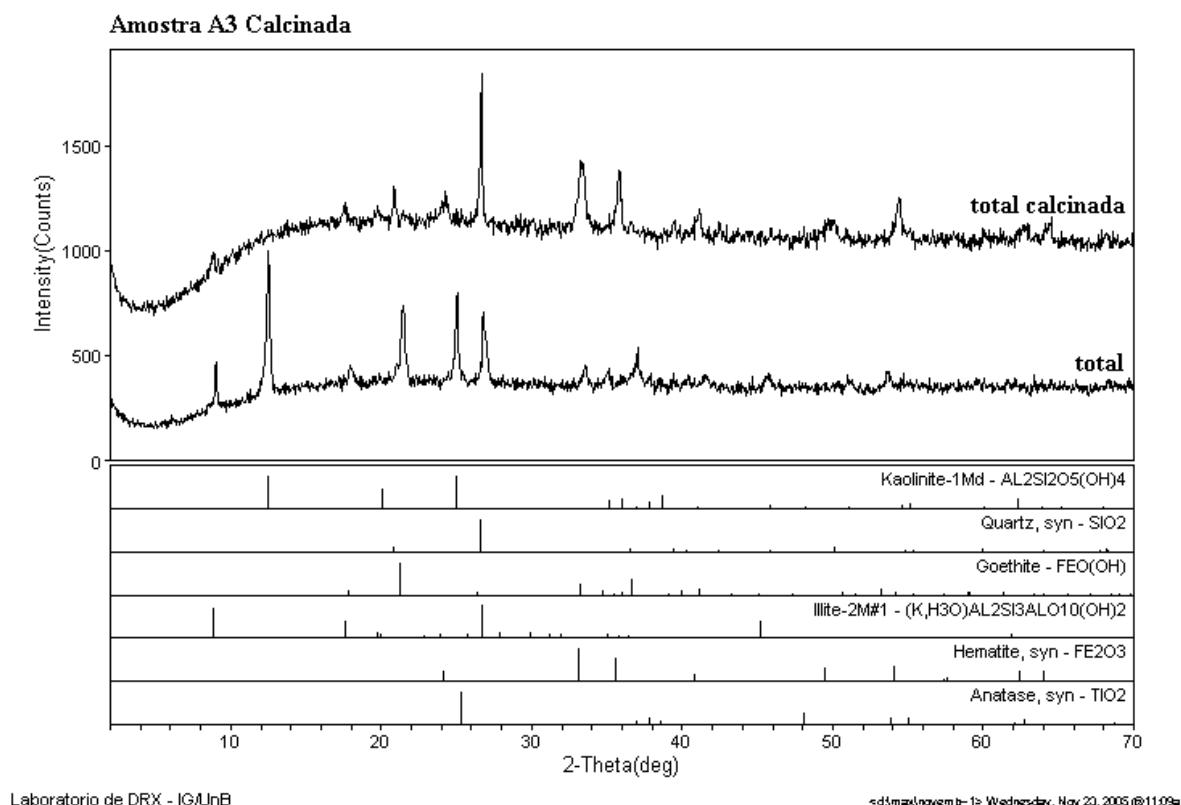
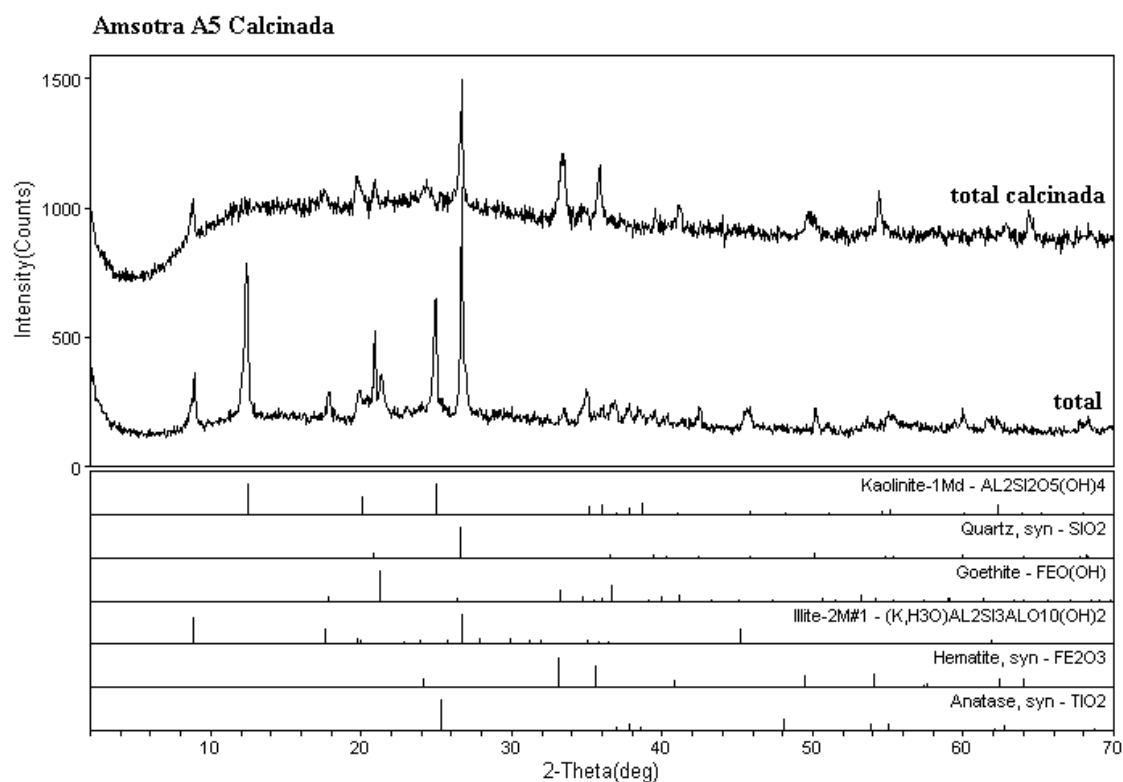
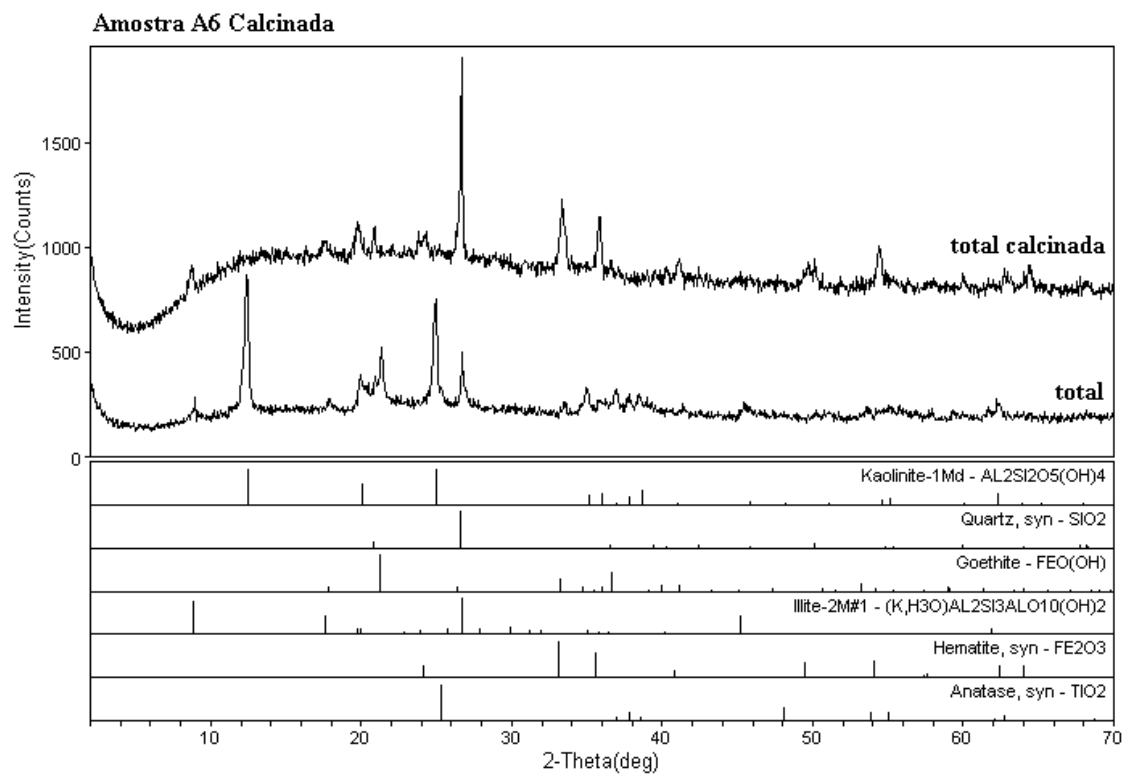


Figura A3.2 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras A3 e A4



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d5maz\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:14a

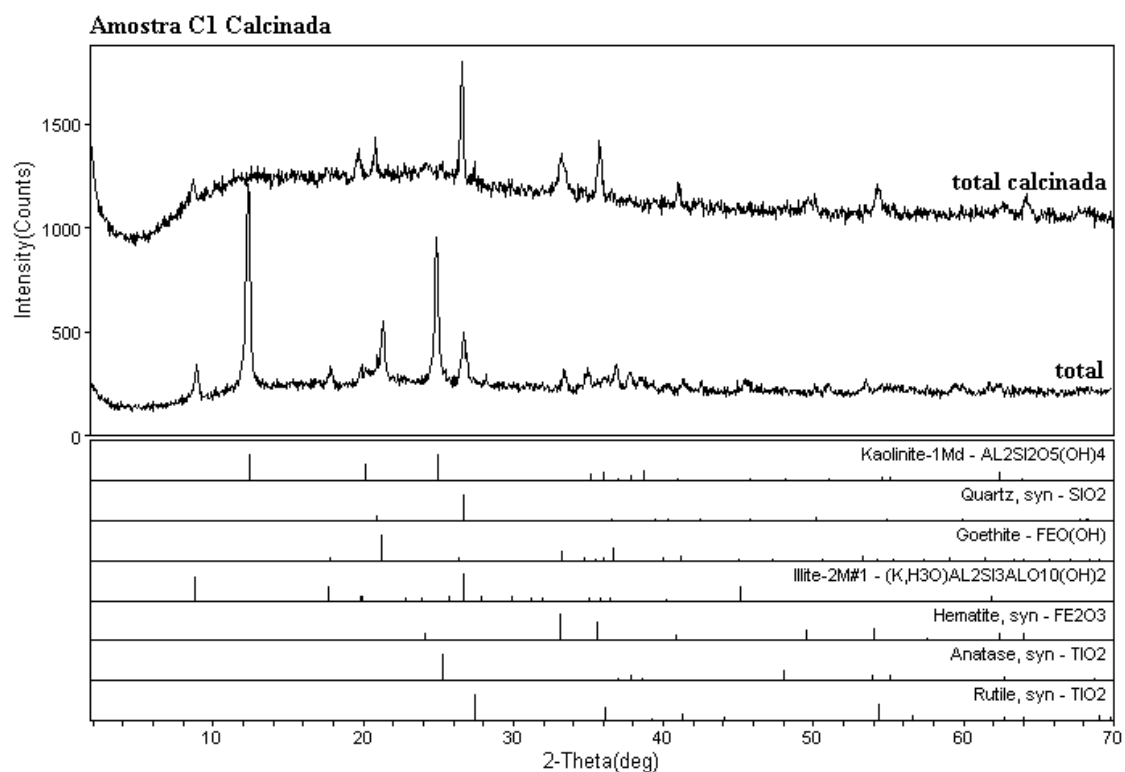


Laboratório de DRX - IG/UnB

<d5maz\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:17a

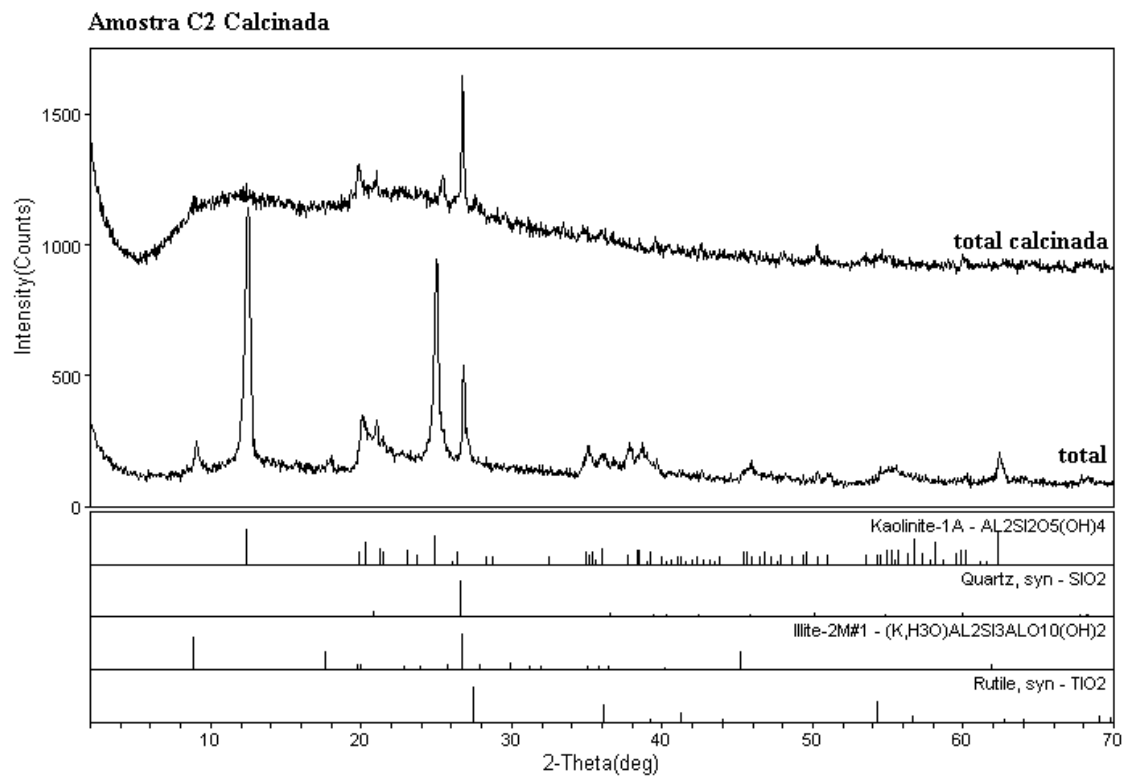
Figura A3.3 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras A5 e A6





Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmaz/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:20a



Laboratório de DRX - IG/UnB

<dlmaz/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:24a

Figura A3.4 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C1 e C2

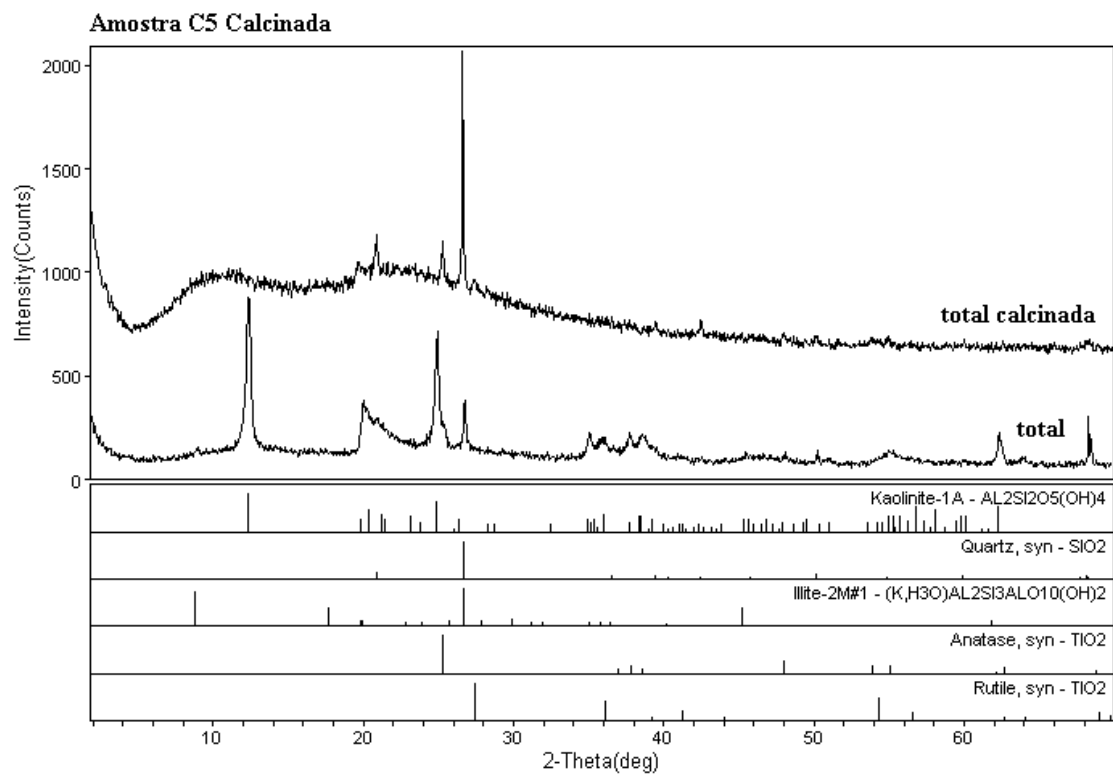
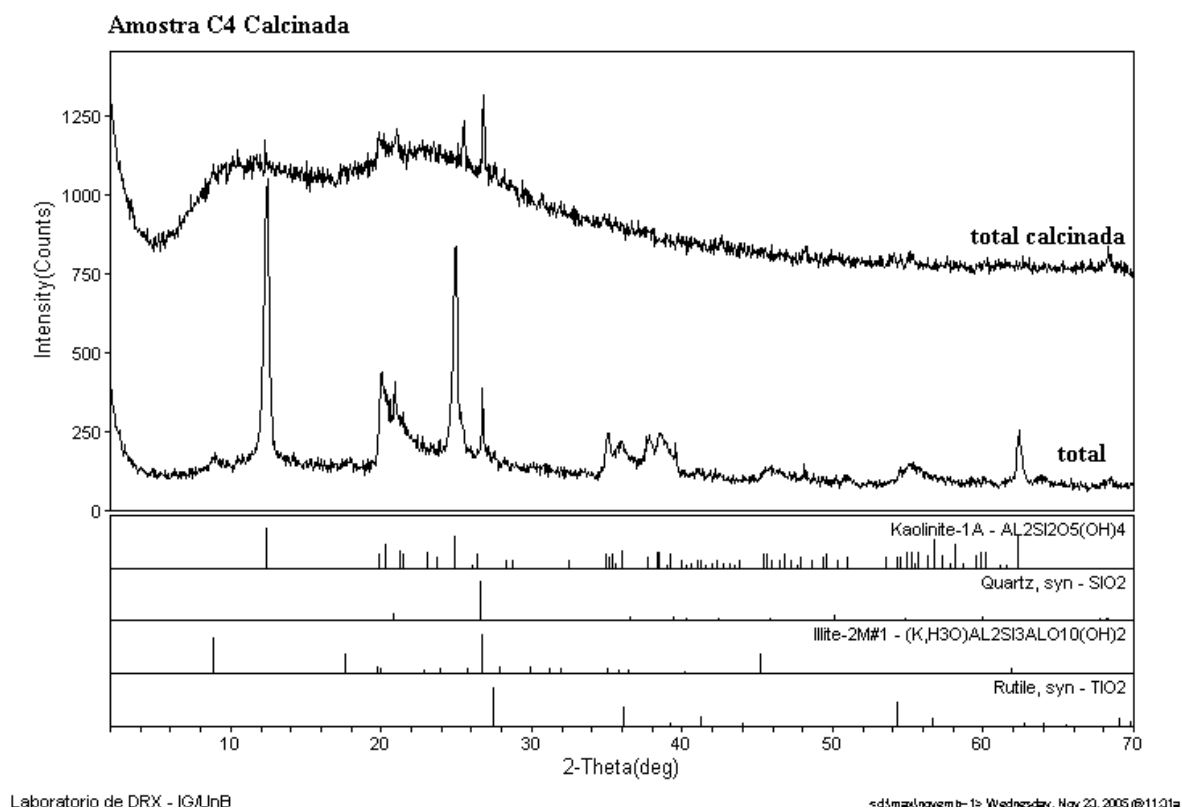
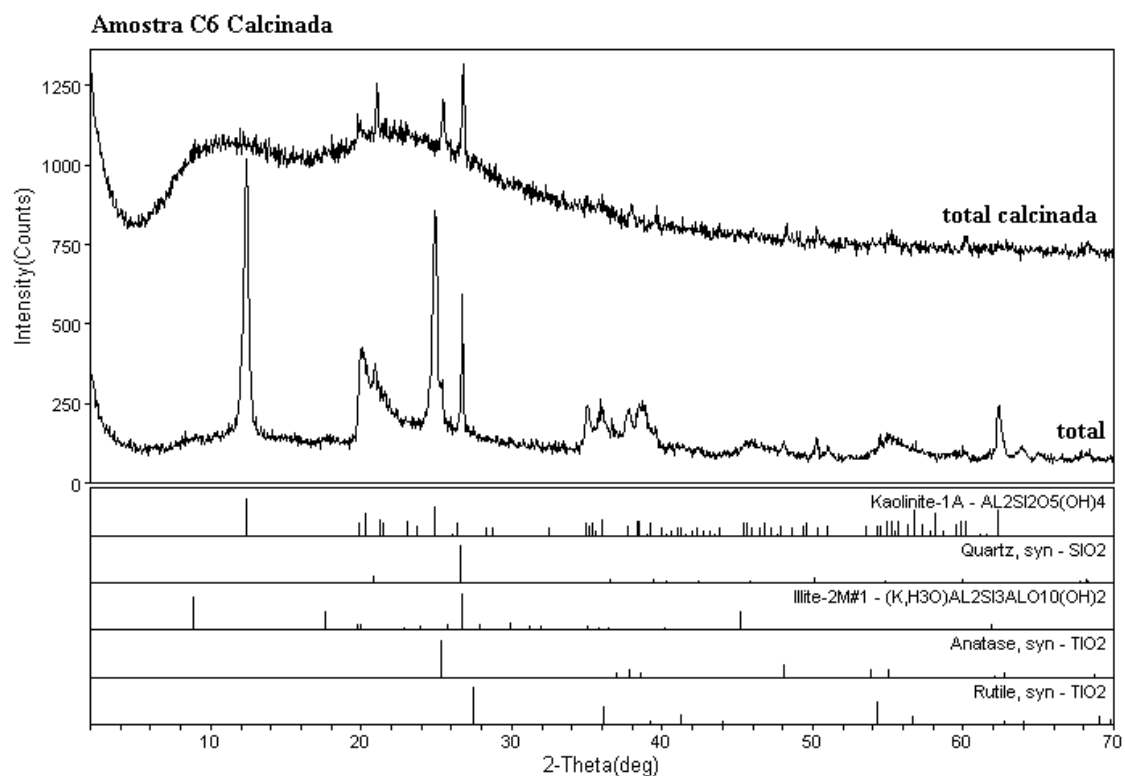
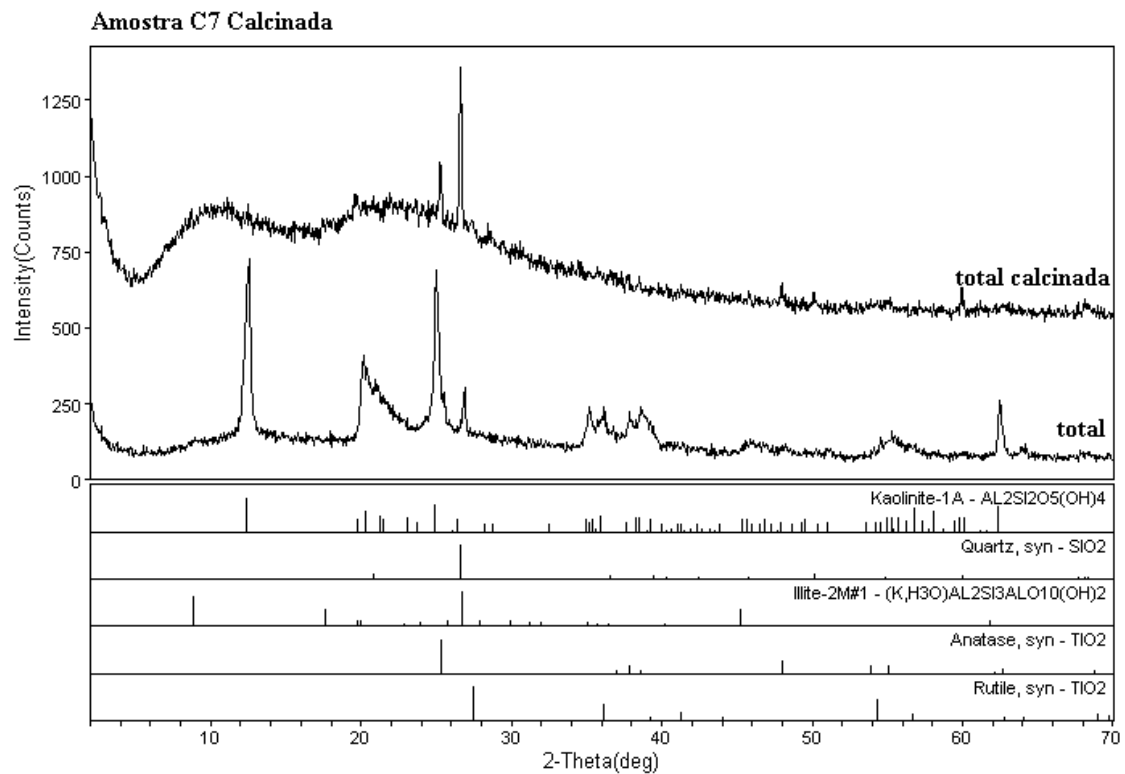


Figura A3.5 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C4 e C5



Laboratório de DRX - IG/UnB

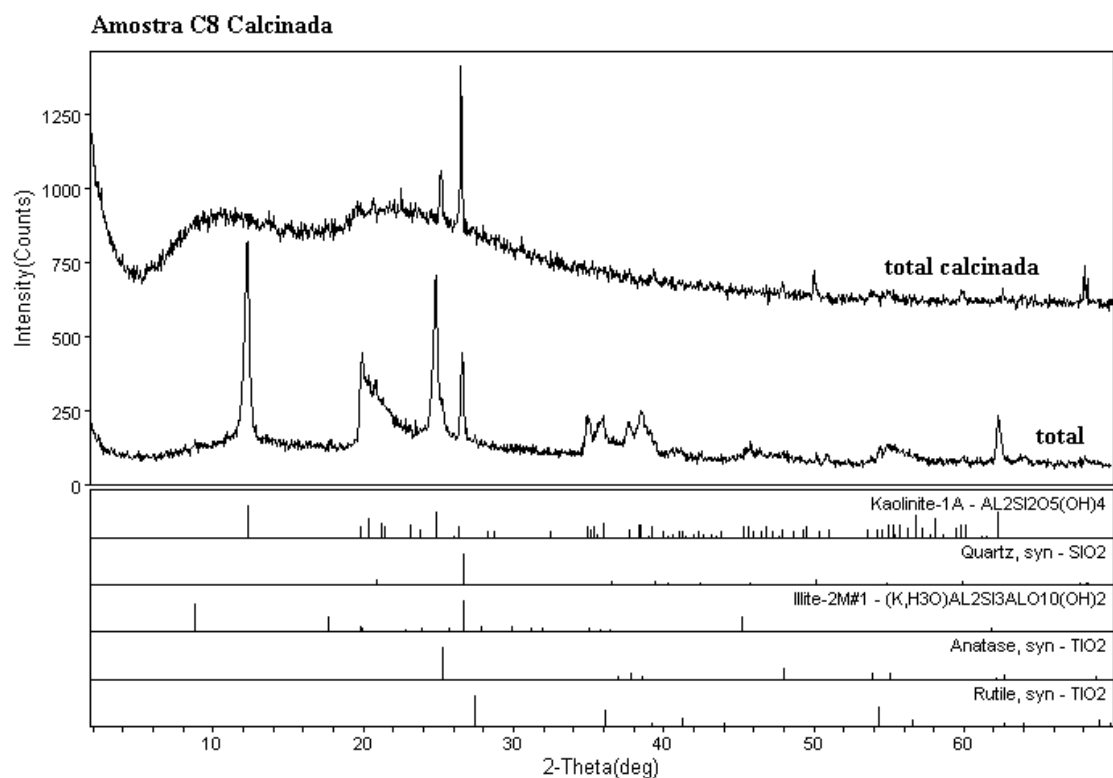
<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:35a



Laboratório de DRX - IG/UnB

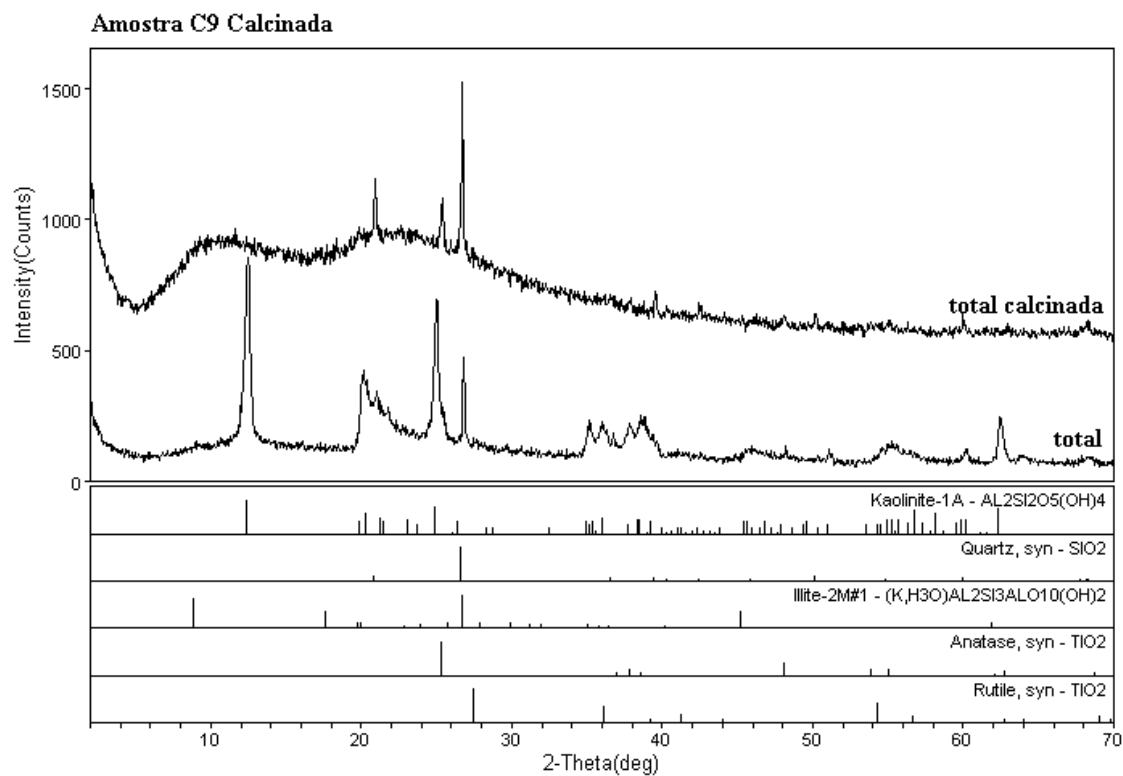
<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:35a

Figura A3.6 – Difratogramas da área Bonsucesso: amostras C6 e C7



Laboratório de DRX - IG/LnB

<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:40a



Laboratório de DRX - IG/LnB

<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:42a

Figura A3.7 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras C8 e C9

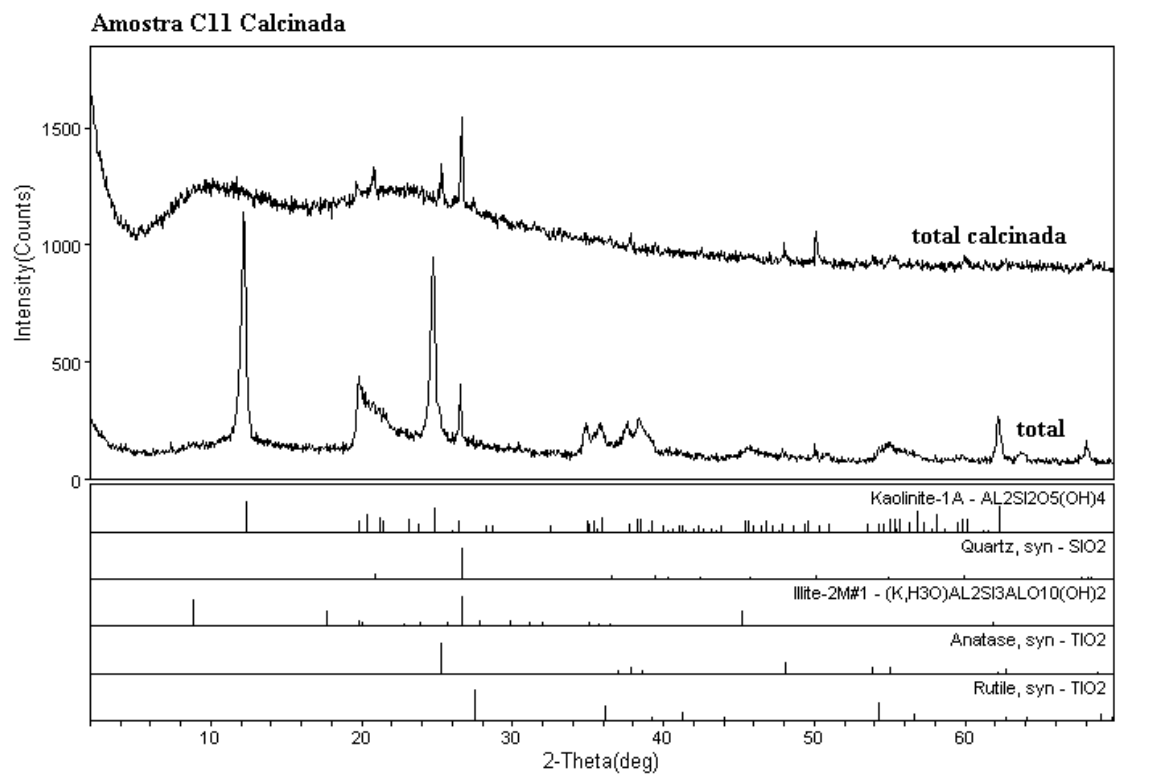
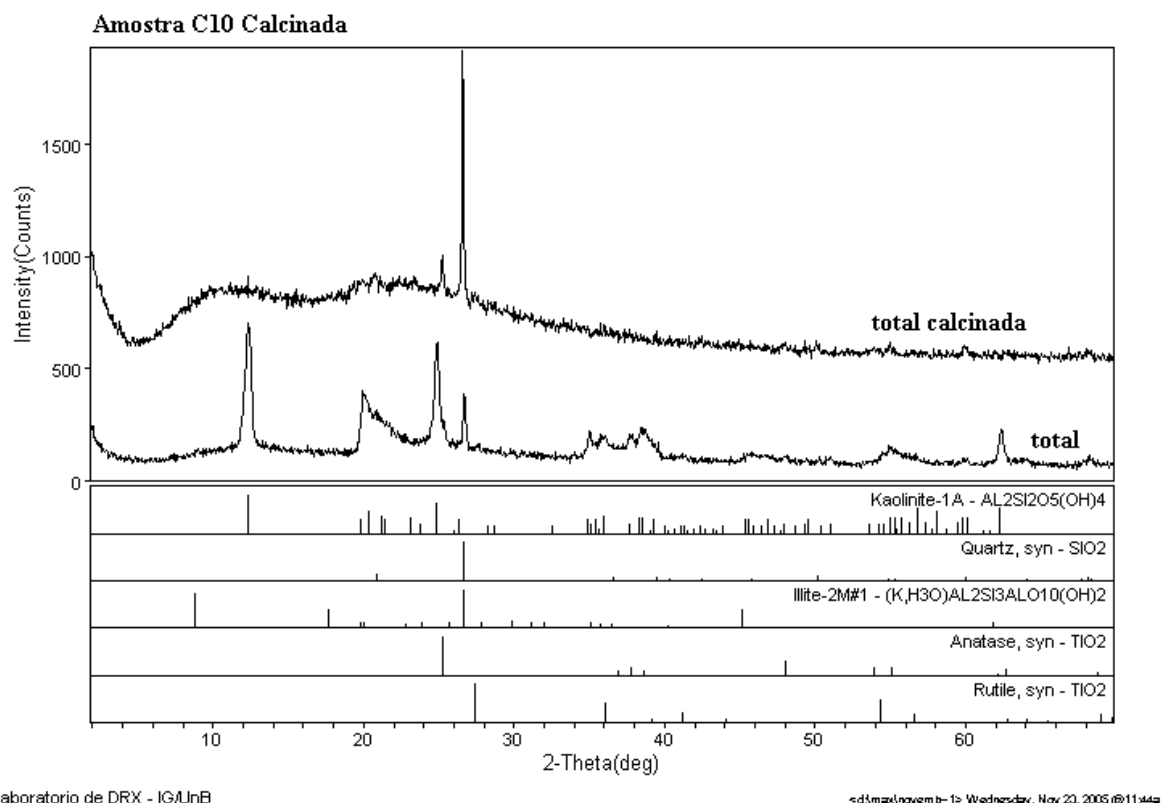
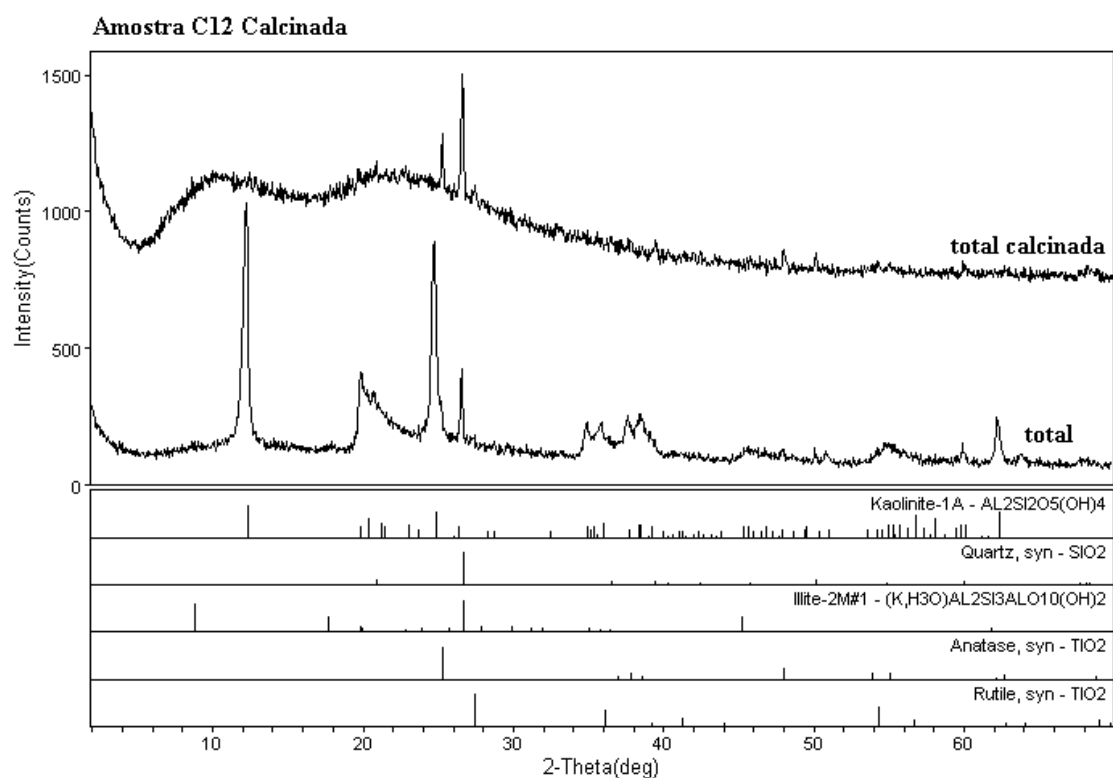
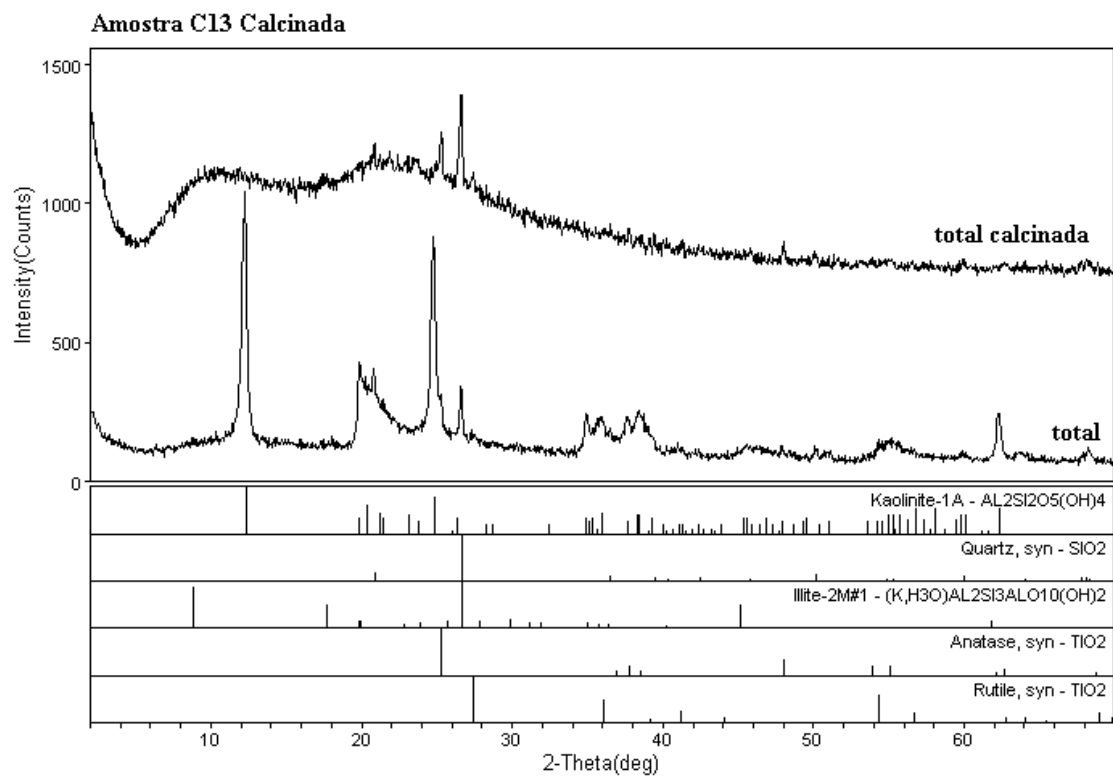


Figura A3.8 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras C10 e C11



Laboratório de DRX - IG/UnB

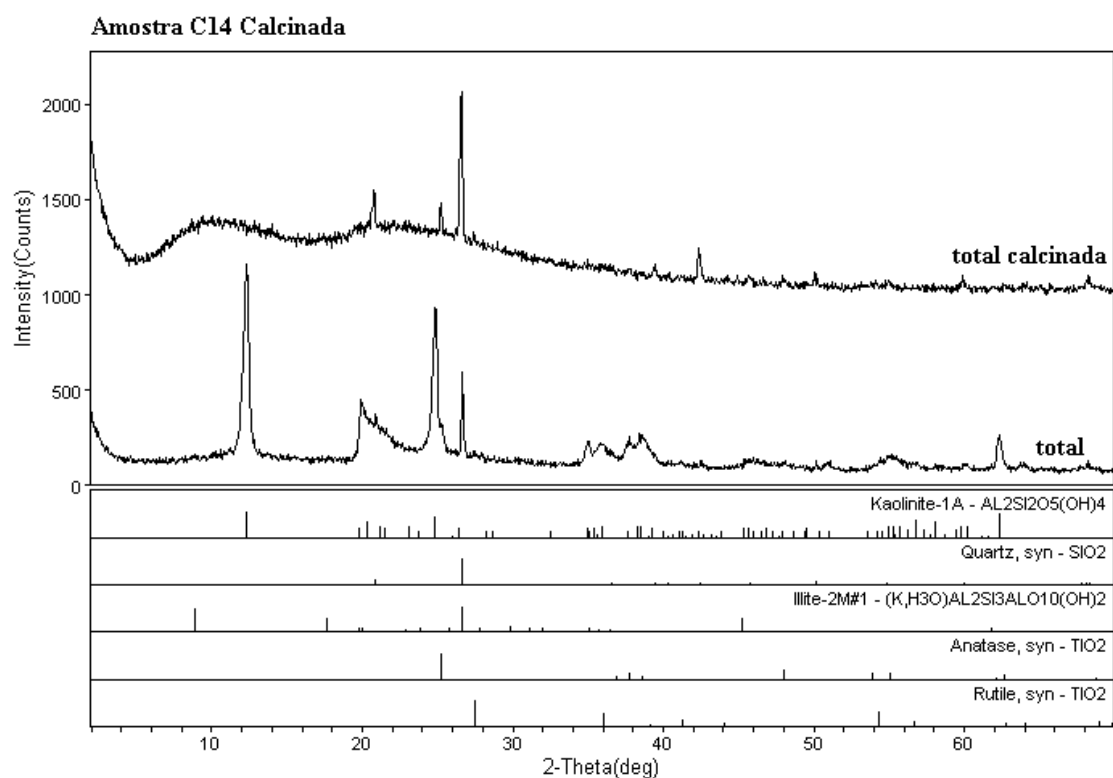
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:53a



Laboratório de DRX - IG/UnB

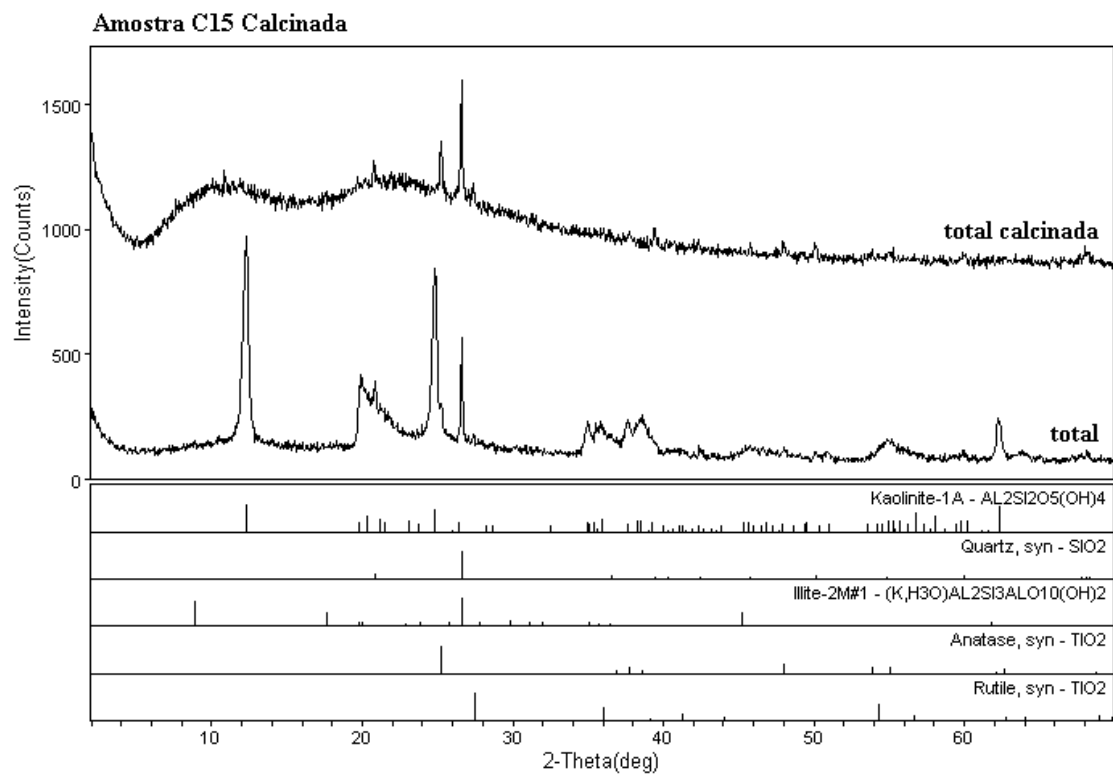
<d5maz\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:51a

Figura A3.9 – Difractogramas da área Bonsucesso: amostras C12 e C13



Laboratório de DRX - IG/UnB

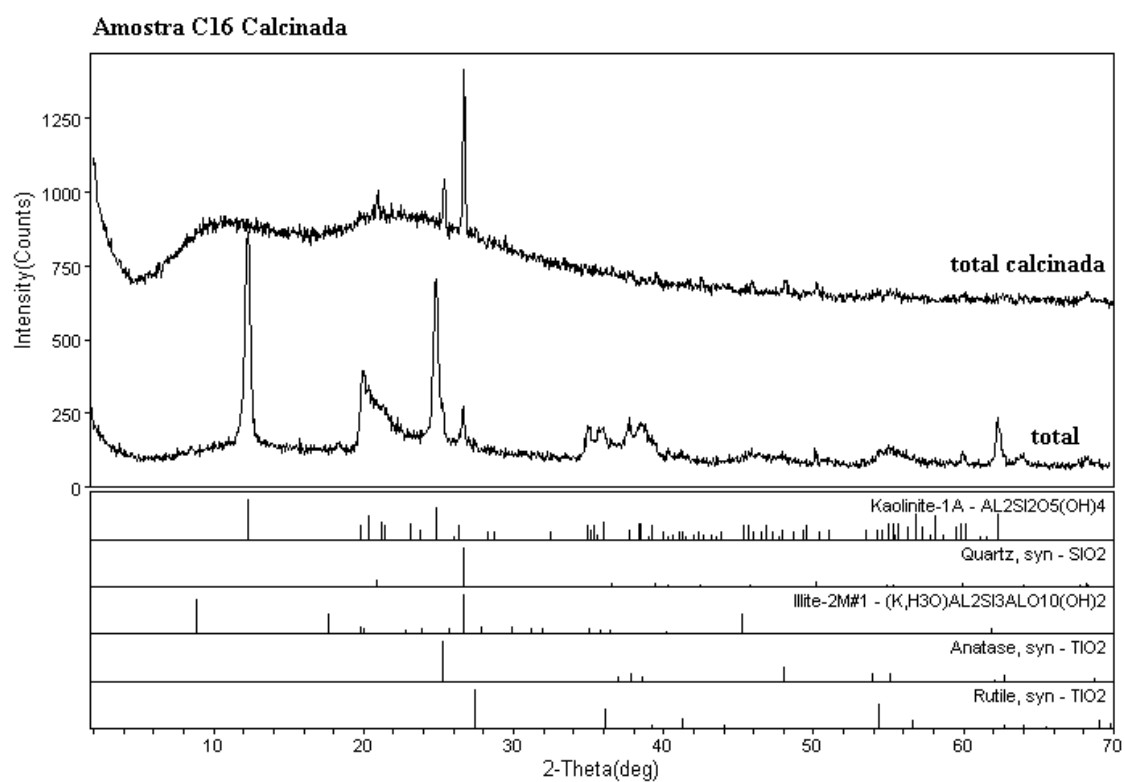
<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:59a



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d:\max\novemb-13> Wednesday, Nov 23, 2005 09:11:59a

Figura A3.10 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C14 e C15



Laboratório de DRX - IG/UnB

<d3max\novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 09:12:01a

Figura A3.11 – Difrátogramas da área Bonsucesso: amostras C16



## **Anexo 4 – Isotermas de Solubilidade do Hidróxido de Cálcio a 40 °C, em Presença de Álcalis, da Argila Calcinada da Área Bonsucesso**

Figura A4.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A1

Figura A4.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A2

Figura A4.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A3

Figura A4.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A4

Figura A4.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A5

Figura A4.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A6

Figura A4.7 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C1

Figura A4.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C2

Figura A4.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C3

Figura A4.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C4

Figura A4.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C5

Figura A4.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C6

Figura A4.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C7

Figura A4.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C8

Figura A4.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C9

Figura A4.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C10

Figura A4.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C11

Figura A4.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C12

Figura A4.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C13

Figura A4.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C14

Figura A4.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C15

Figura A4.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C16

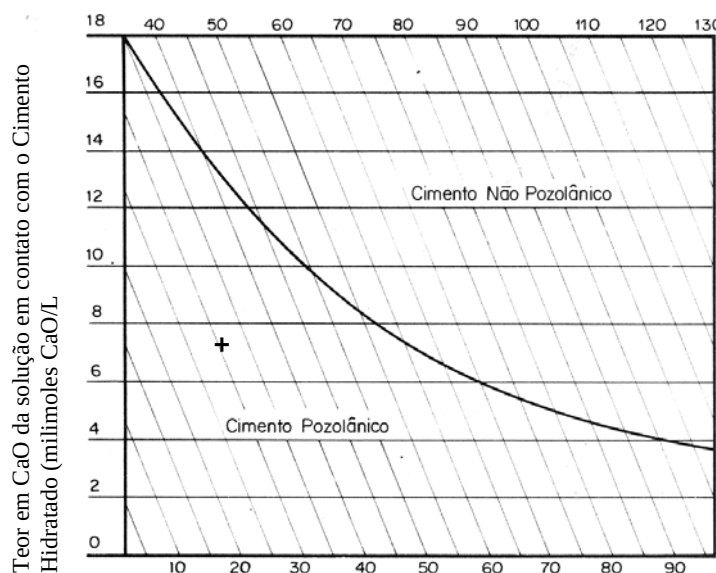
Figura A4.23 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra cimento de referência



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2155.2005 – A1     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----352                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>22/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |              |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|--------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,70                              | 31,66        | 31,27 | 9,35                               | 7,41          | 7,32  |
| 7,51                              | 30,88        |       | 9,13                               | 7,23          |       |
|                                   |              |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

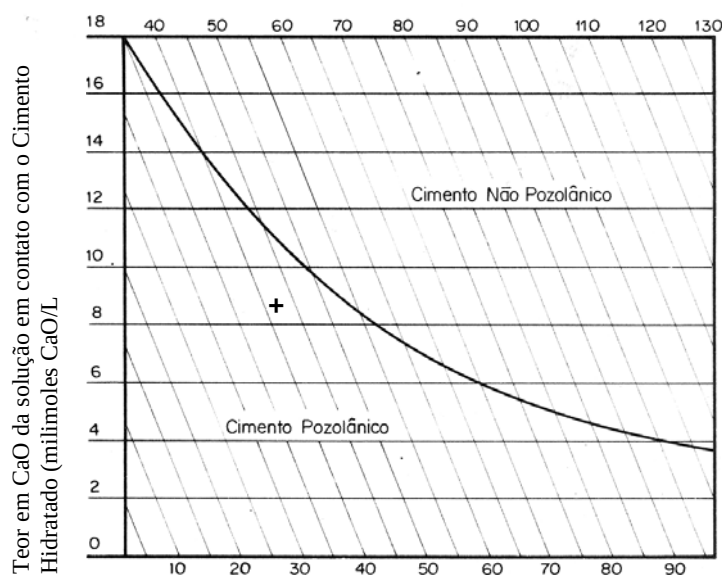
Figura A4.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A1



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2130.2005 – A2     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----353                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>22/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |              |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|--------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,30                             | 42,39        | 42,46 | 10,82                              | 8,57          | 8,64  |
| 10,33                             | 42,52        |       | 11,01                              | 8,72          |       |
|                                   |              |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH/L)  
Gráfico da Solubilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  em presença de álcalis a 40°C

Calculo:

a) Milimol OH/L  
 $(V_1 * F_1 * 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 * F_2 * 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

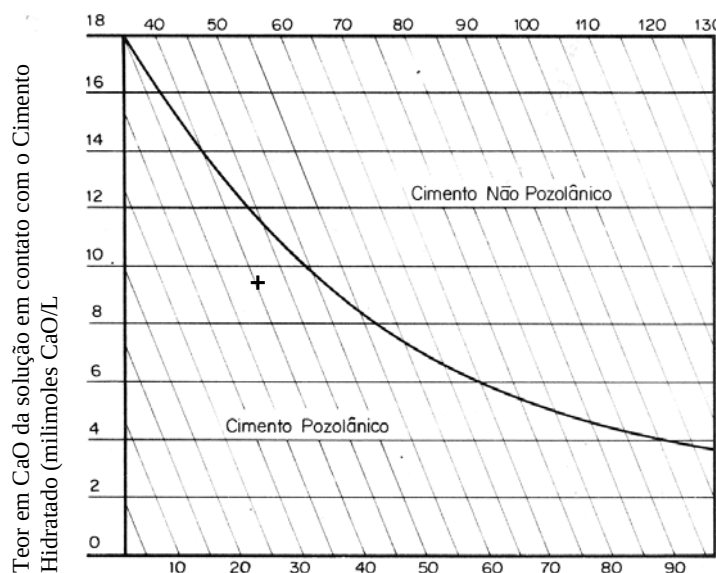
Figura A4.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A2



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2153.2005 – A3     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----350                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>20/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,86                              | 40,54                      | 40,40 | 12,00                              | 9,50          | 9,48  |
| 9,79                              | 40,26                      |       | 11,93                              | 9,45          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

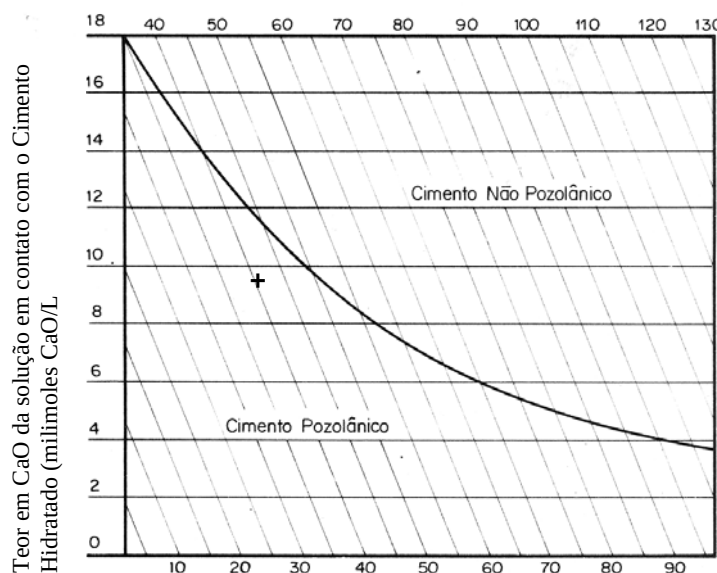
Figura A4.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A3



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2152.2005 – A4     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----349                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>15/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,95                              | 40,91                      | 40,75 | 12,04                              | 9,54          | 9,54  |
| 9,87                              | 40,59                      |       | 12,04                              | 9,54          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Calculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

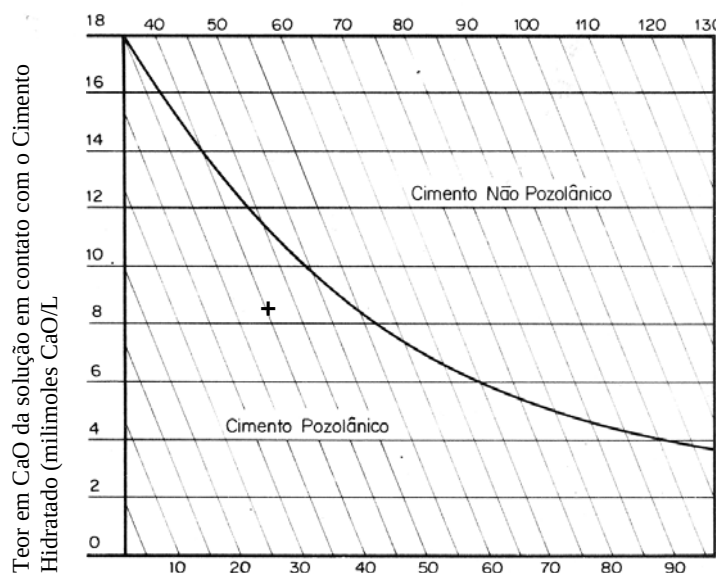
Figura A4.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A4



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2151.2005 – A5     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----348                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>15/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,74                              | 40,05                      | 40,07 | 10,80                              | 8,55          | 8,51  |
| 9,75                              | 40,09                      |       | 10,68                              | 8,46          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Calculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

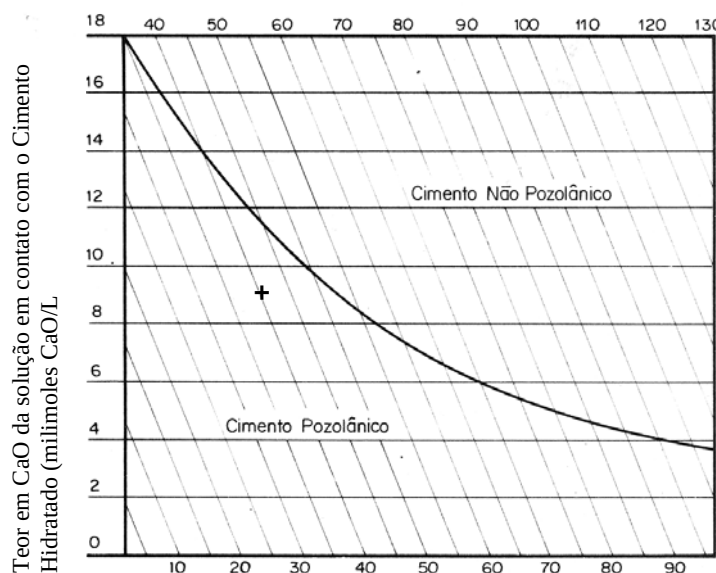
Figura A4.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A5



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2150.2005 – A6     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----347                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>13/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,86                              | 40,54                      | 40,44 | 11,86                              | 9,39          | 9,22  |
| 9,81                              | 40,34                      |       | 11,43                              | 9,05          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

Calculo:

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A4.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A6

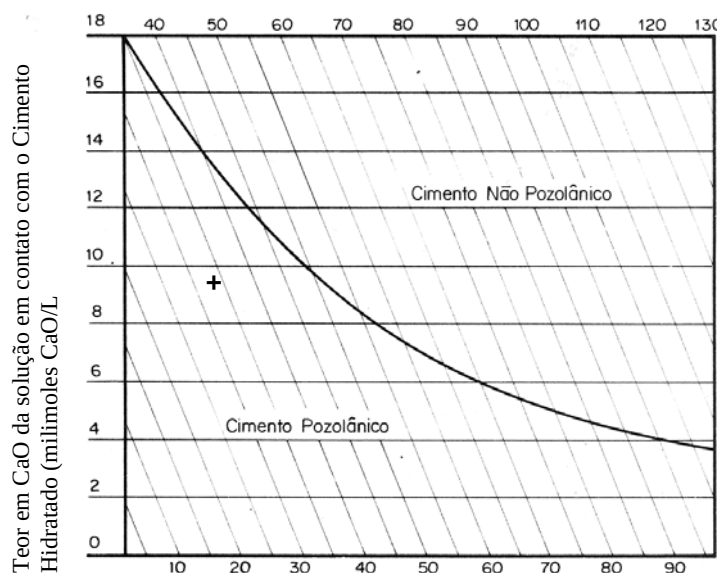




Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2060.2005 – C1     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----343                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>06/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 8,20                              | 33,72                      | 33,76 | 12,05                              | 9,54          | 9,46  |
| 8,22                              | 33,80                      |       | 11,84                              | 9,38          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

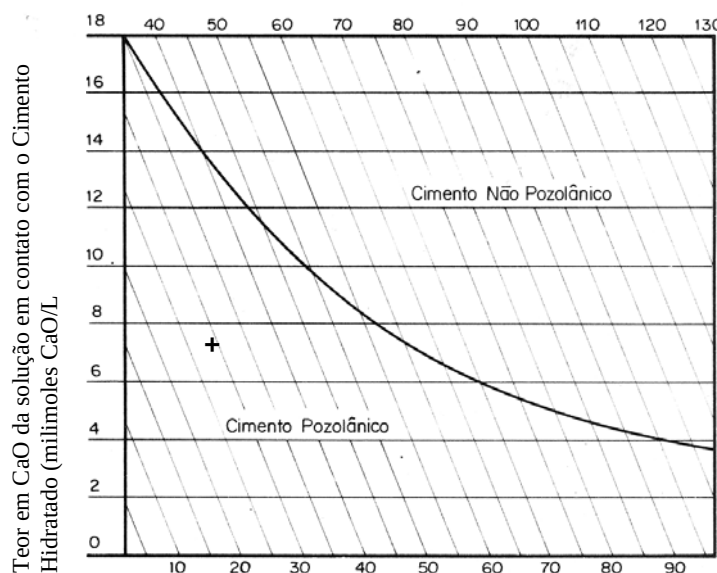
Figura A4.7 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C1



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2061.2005 – C2     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----344                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>08/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,08                              | 29,11                      | 29,22 | 8,97                               | 7,10          | 7,29  |
| 7,13                              | 29,32                      |       | 9,43                               | 7,47          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

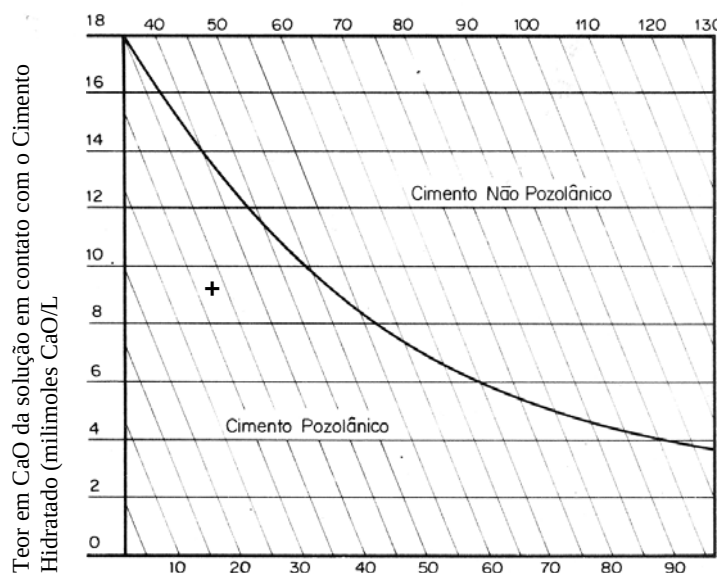
Figura A4.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C2



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2092.2005 – C3     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----337                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>26/08/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,90                              | 32,48                      | 32,55 | 11,68                              | 9,25          | 9,31  |
| 7,93                              | 32,61                      |       | 11,82                              | 9,36          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

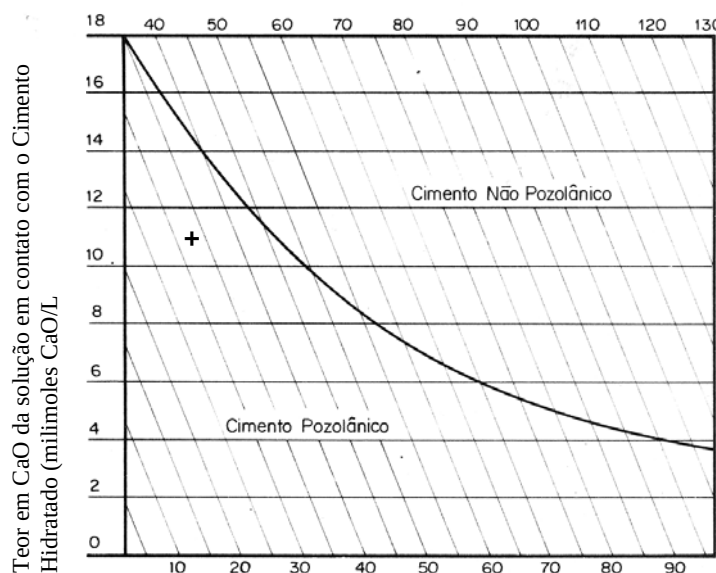
Figura A4.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C3



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2132.2005 – C4     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----355                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>27/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 8,02                              | 33,01                      | 32,78 | 14,34                              | 11,36         | 11,02 |
| 7,91                              | 32,56                      |       | 13,50                              | 10,69         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

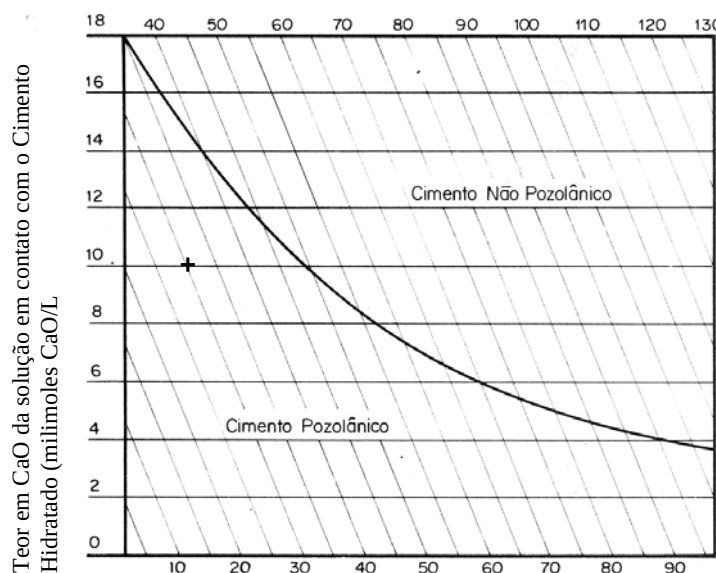
Figura A4.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C4



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2093.2005 – C5     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----338                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>30/08/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,37                              | 30,31                      | 30,51 | 12,72                              | 10,07         | 10,05 |
| 7,47                              | 30,72                      |       | 12,66                              | 10,03         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Calculo:

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

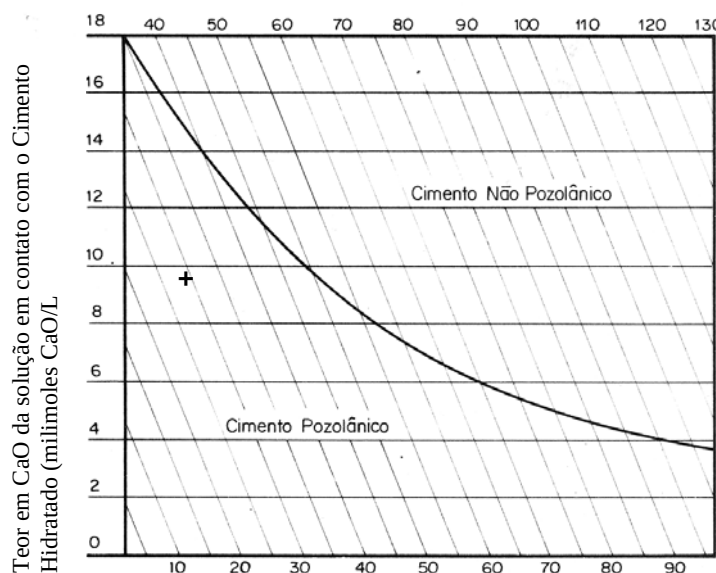
Figura A4.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C5



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2094.2005 – C6     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----339                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>30/08/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,10                              | 29,20                      | 29,36 | 11,93                              | 9,45          | 9,69  |
| 7,18                              | 29,52                      |       | 12,55                              | 9,94          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

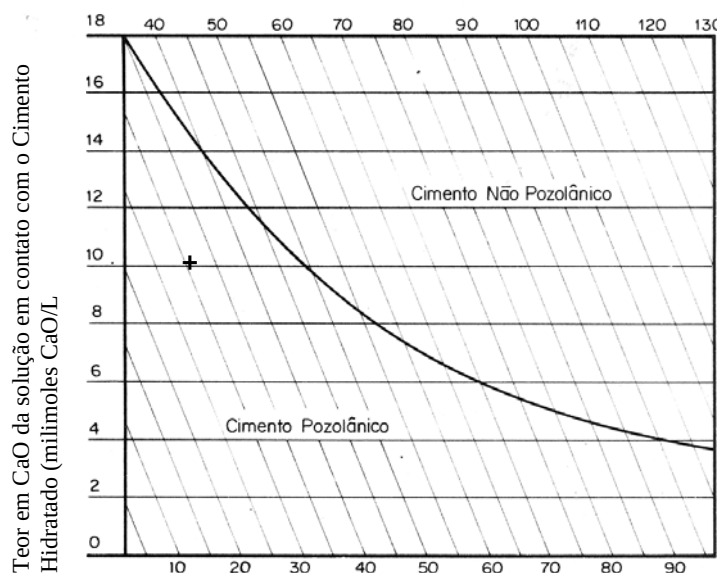
Figura A4.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C6



Norma: NBR 5753/9

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2095.2005 – C7     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----340                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>01/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,37                              | 30,31                      | 30,16 | 12,87                              | 10,19         | 10,07 |
| 7,30                              | 30,02                      |       | 12,55                              | 9,94          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

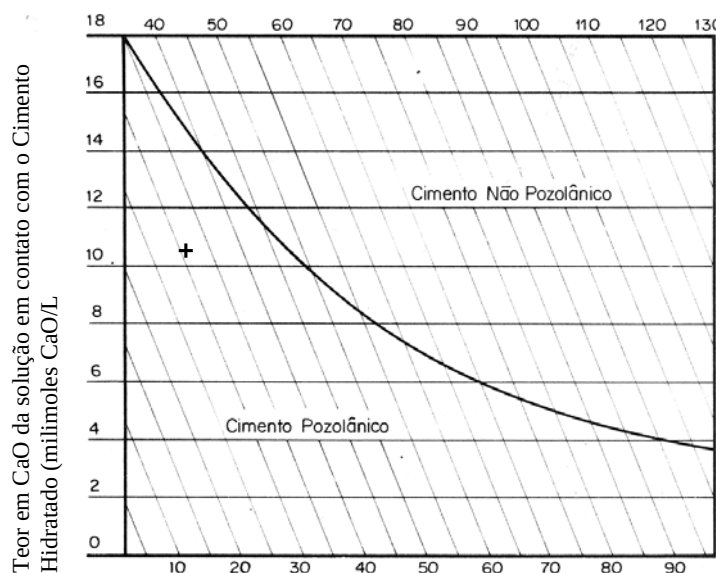
Figura A4.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C7



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2096.2005 – C8     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----341                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>01/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,49                              | 30,80                      | 31,23 | 13,16                              | 10,42         | 10,65 |
| 7,70                              | 31,66                      |       | 13,74                              | 10,88         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A4.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C8

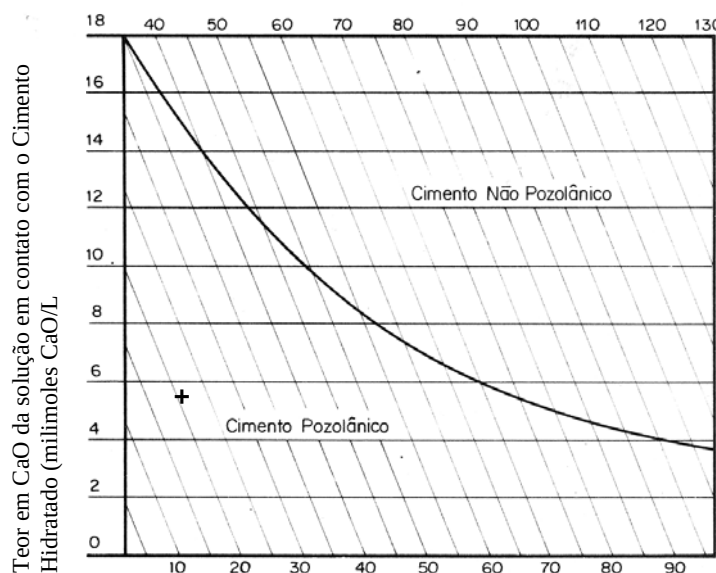




Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2202.2005 – C9     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----357                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>29/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 5,07                              | 20,87                      | 20,97 | 7,27                               | 5,76          | 5,63  |
| 5,12                              | 21,07                      |       | 6,95                               | 5,50          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

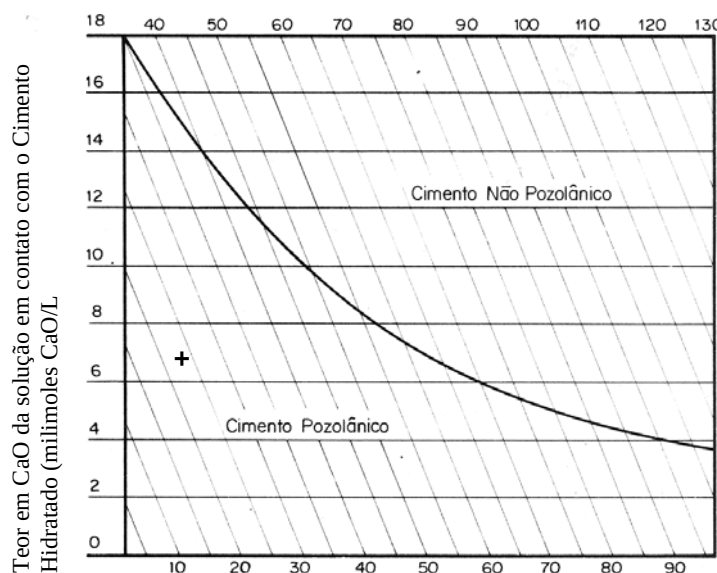
Figura A4.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C9



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2062.2005 – C10    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----345                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>08/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |              |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|--------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 5,67                              | 23,32        | 23,32 | 8,65                               | 6,85          | 6,85  |
| 5,67                              | 23,32        |       | 8,65                               | 6,85          |       |
|                                   |              |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

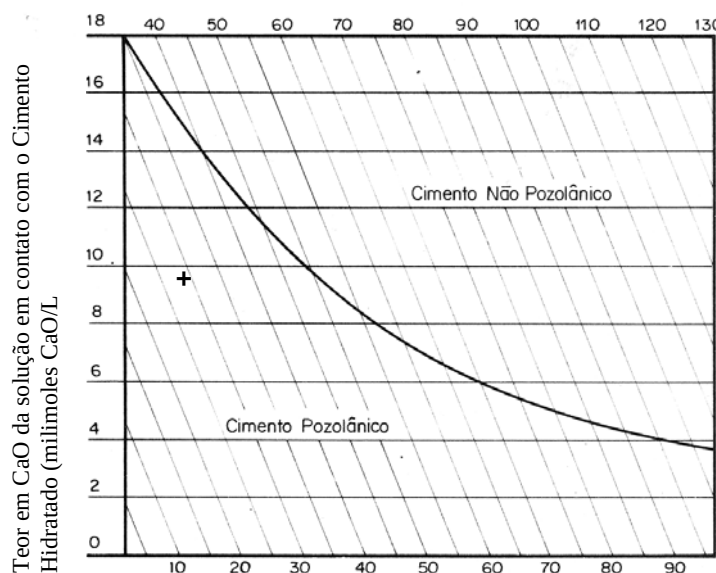
Figura A4.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C10



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2154.2005 – C11    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----351                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>20/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 7,10                              | 29,20                      | 28,66 | 12,74                              | 10,09         | 9,76  |
| 6,84                              | 28,13                      |       | 11,91                              | 9,43          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

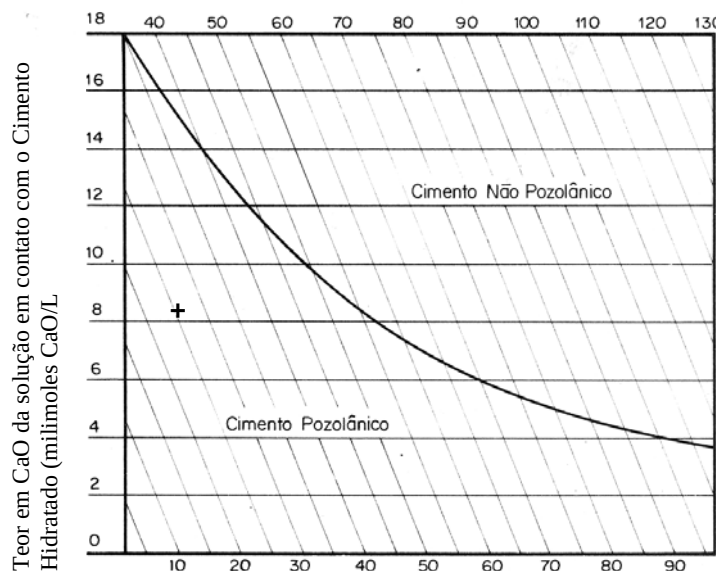
Figura A4.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C11



Norma: NBR

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2133.2005 – C12    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----356                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>29/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |               |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|---------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH⁻/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 6,90                              | 28,40         | 25,83 | 12,12                              | 9,60          | 8,24  |
| 5,65                              | 23,26         |       | 8,70                               | 6,89          |       |
|                                   |               |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH⁻/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH⁻/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

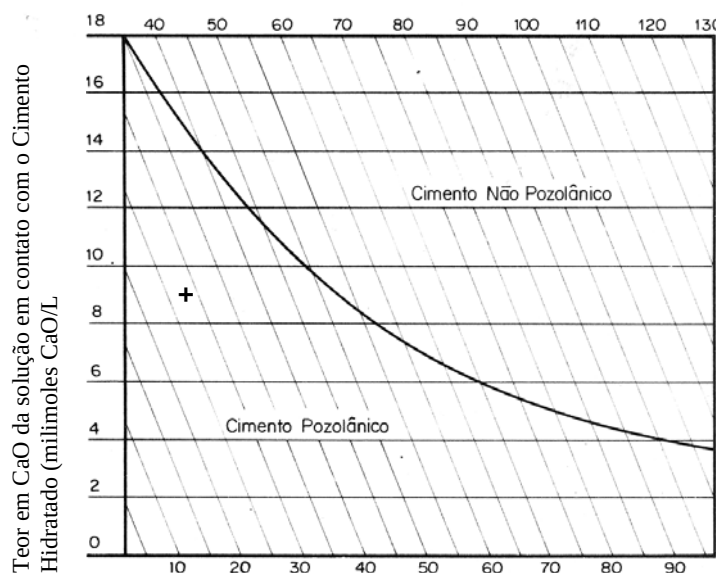
Figura A4.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C12



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2203.2005 – C13    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----358                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>04/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |               |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|---------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH⁻/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 6,80                              | 27,99         | 27,91 | 11,58                              | 9,17          | 9,15  |
| 6,76                              | 27,82         |       | 11,52                              | 9,12          |       |
|                                   |               |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH⁻/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH⁻/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

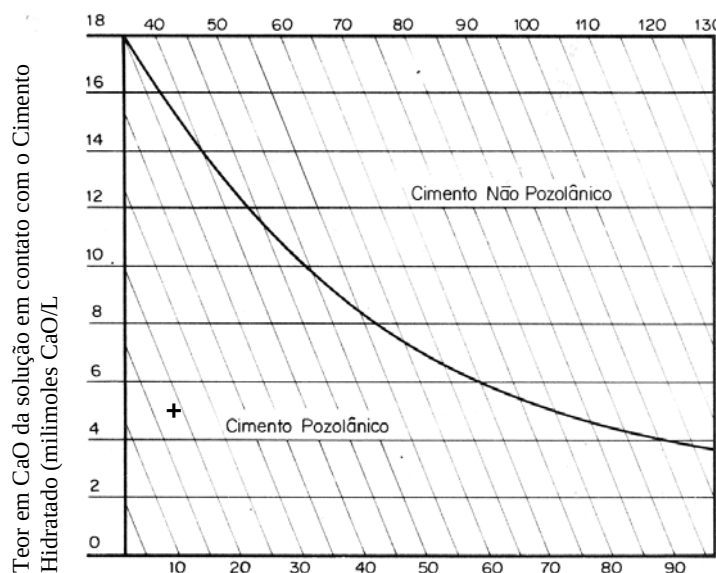
Figura A4.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C13



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2131.2005 – C14    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----354                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>27/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |               |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|---------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH⁻/L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 4,88                              | 20,09         | 19,70 | 6,49                               | 5,14          | 5,10  |
| 4,69                              | 19,30         |       | 6,38                               | 5,05          |       |
|                                   |               |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH⁻/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH⁻/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

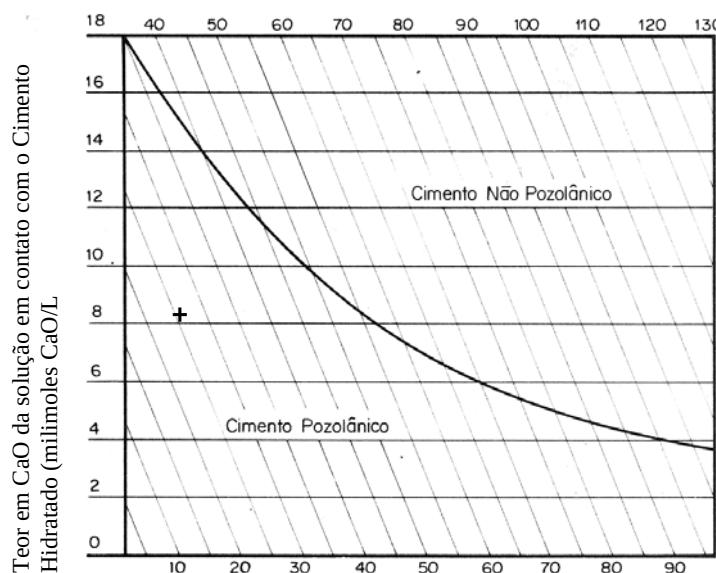
Figura A4.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C14



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2097.2005 – C15    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----342                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>06/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 6,40                              | 26,32                      | 25,99 | 10,40                              | 8,24          | 8,14  |
| 6,24                              | 25,66                      |       | 10,15                              | 8,04          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

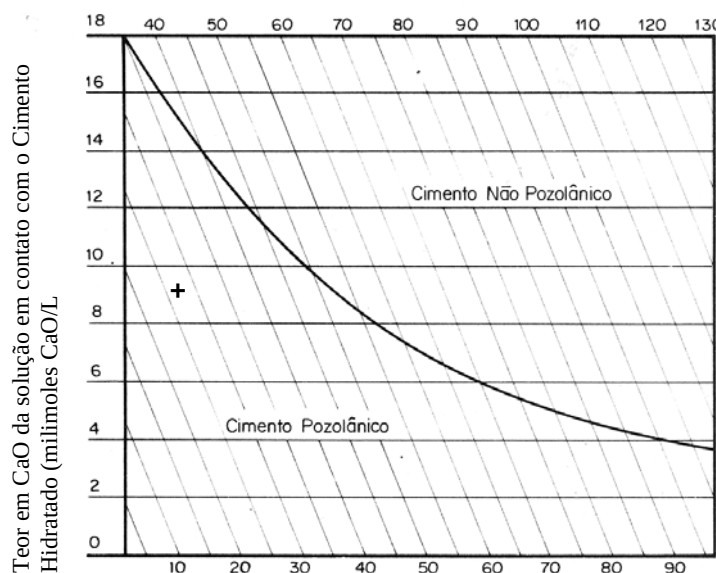
Figura A4.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C15



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila calcinada | Registro:<br>1.2063.2005 – C16    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----346                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>13/09/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 6,28                              | 25,82                      | 27,41 | 10,75                              | 8,51          | 9,14  |
| 7,05                              | 28,99                      |       | 12,32                              | 9,76          |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL) = 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A4.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C16

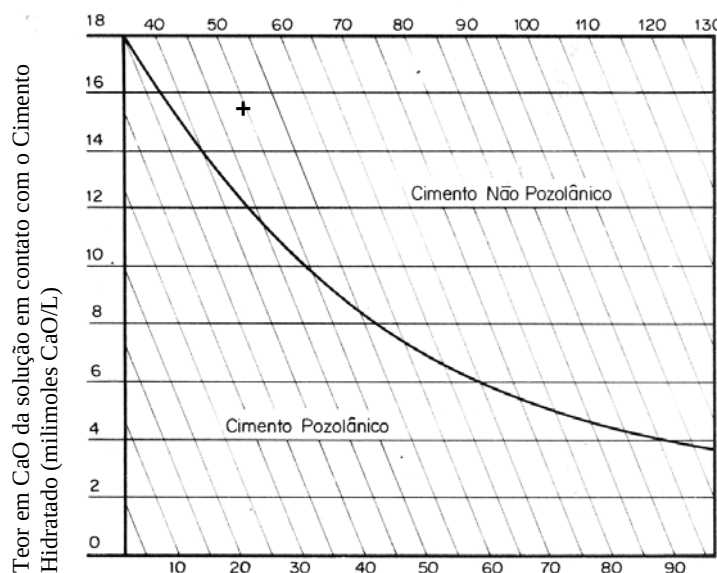




Nor

|                           |                                   |                             |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:      | Registro:                         | Teor de adição:             |
| Programa nº:<br>-----2077 | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----336    | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>26/08/05 |
| Executado por:            | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 12,02                             | 49,43                      | 49,22 | 19,27                              | 15,26         | 15,19 |
| 11,92                             | 49,02                      |       | 19,08                              | 15,11         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000)/V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000)/V$

V(mL)= 25

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| Reagentes | Status da manutenção |
|-----------|----------------------|

|                                                      |                            |
|------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                     | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                             | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1028 |                            |

|                                                           |                      |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|
| EDTA – Na                                                 | Multidosador         |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial ----- |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                      |

**DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA EM CIMENTO PORTLAND  
POZOLÂNICO (FRATINI)**

| PONTOS DE VERIFICAÇÃO                                                                            | ASSINATURA |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.Temperatura do recinto termostático, durante o período de ensaio ( $40 \pm 2^\circ \text{C}$ ) |            |
| 2.Período de estocagem no recinto termostático (7dias)                                           |            |
| 3.Calibração do pH-metro                                                                         |            |

**Rastreabilidade de Reagentes Químicos**

| Reagente\Solução                                |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| Solução EDTA (0,02 M )                          | 29.608/05 |
| Solução de hidróxido de potássio (20%)          | 14.572/05 |
| Solução de trietanolamina (50%)                 | 13.571/05 |
| Solução de indicador azul de hidroxinaftol (1%) | 42.575/05 |
| Solução ácido clorídrico (0,1N)                 | 1.594/05  |
| Solução de indicador metilorange (0.01%)        | 24.574/05 |

| EQUIPAMENTOS      | Nº PATRIMONIAL  |
|-------------------|-----------------|
| pHmetro           | 355 - 9 - 17087 |
| Fotocolorímetro   | 358 - 5 - 19706 |
| Multidosador      | 355 - 9 - 16569 |
| Balança Analítica | 355 - 0 - 16464 |

Figura A4.23 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a  $40^\circ \text{C}$ , em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra cimento de referência

## **Anexo 5 – Isotermas de Solubilidade do Hidróxido de Cálcio a 40 °C, em Presença de Álcalis, da Argila in natura da Área Bonsucesso**

Figura A5.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A1

Figura A5.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A2

Figura A5.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A3

Figura A5.4 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A4

Figura A5.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A5

Figura A5.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A6

Figura A5.7 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C1

Figura A5.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C2

Figura A5.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C3

Figura A5.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C4

Figura A5.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C5

Figura A5.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C6

Figura A5.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C7

Figura A5.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C8

Figura A5.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C9

Figura A5.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C10

Figura A5.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C11

Figura A5.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C12

Figura A5.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C13

Figura A5.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C14

Figura A5.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C15

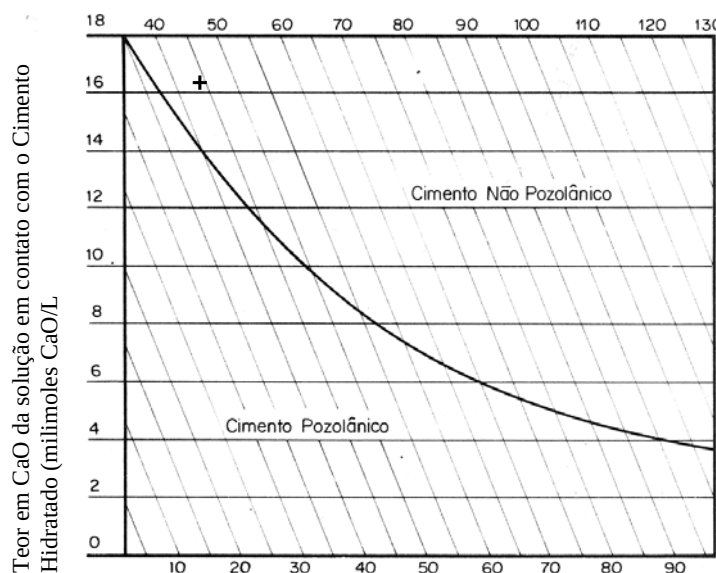
Figura A5.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C16



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0514.2005 – A1     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----359                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>04/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,86                             | 44,70                      | 44,76 | 20,42                              | 16,17         | 16,22 |
| 10,89                             | 44,82                      |       | 20,54                              | 16,27         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

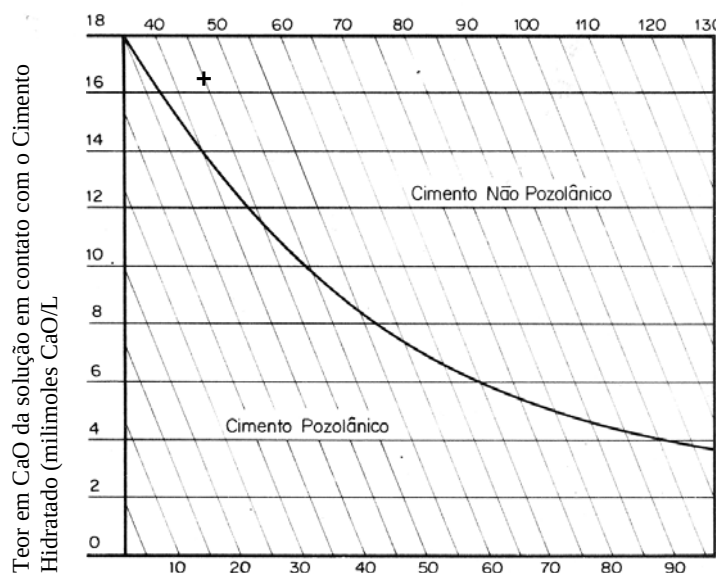
Figura A5.1 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A1



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0515.2005 – A2     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----360                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>06/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,97                             | 45,15                      | 45,07 | 20,80                              | 16,47         | 16,46 |
| 10,93                             | 44,99                      |       | 20,76                              | 16,44         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
 $(V_1 \cdot F_1 \cdot 1000) / V$

b) Milimol CaO/L  
 $(V_2 \cdot F_2 \cdot 1000) / V$

V(mL)= 25

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

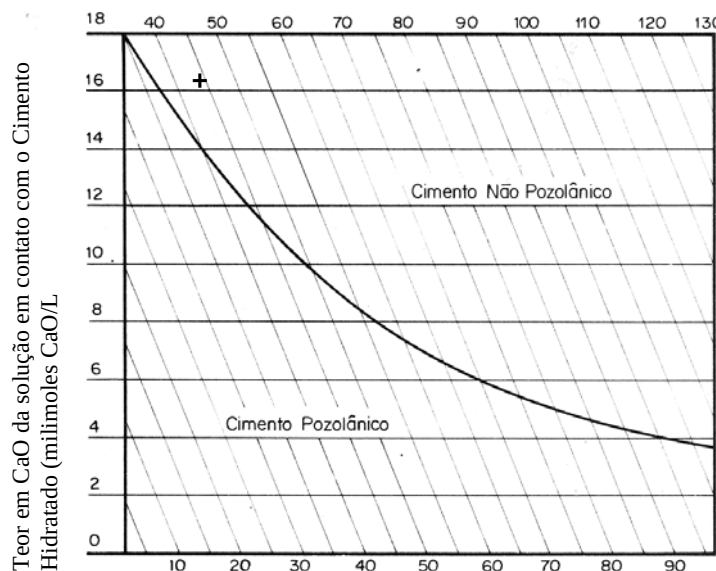
Figura A5.2 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A2



Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0516.2005 – A3     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----361                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>06/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,68                             | 43,96                      | 44,62 | 20,20                              | 16,00         | 16,32 |
| 11,00                             | 45,28                      |       | 21,00                              | 16,63         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

**Cálculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

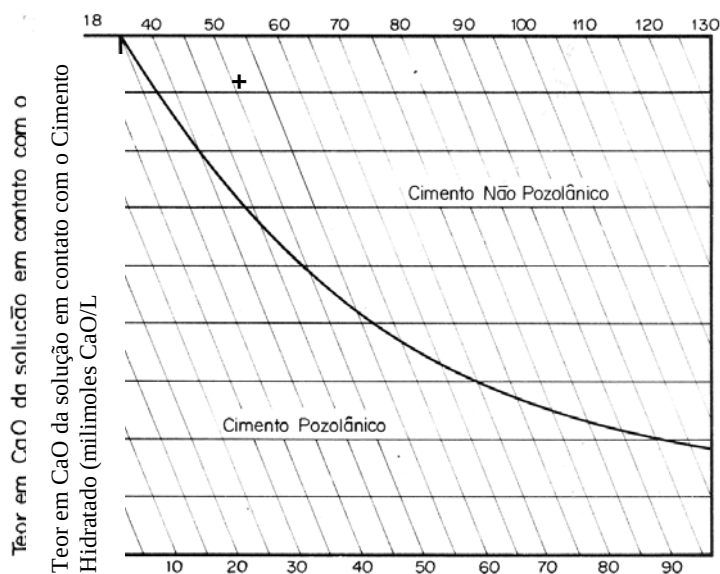
|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.3 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A3



|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0517.2005 – A4     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----362                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>11/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,77                             | 44,33                      | 44,31 | 20,66                              | 16,36         | 16,43 |
| 10,76                             | 44,29                      |       | 20,82                              | 16,49         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

|                                                           |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

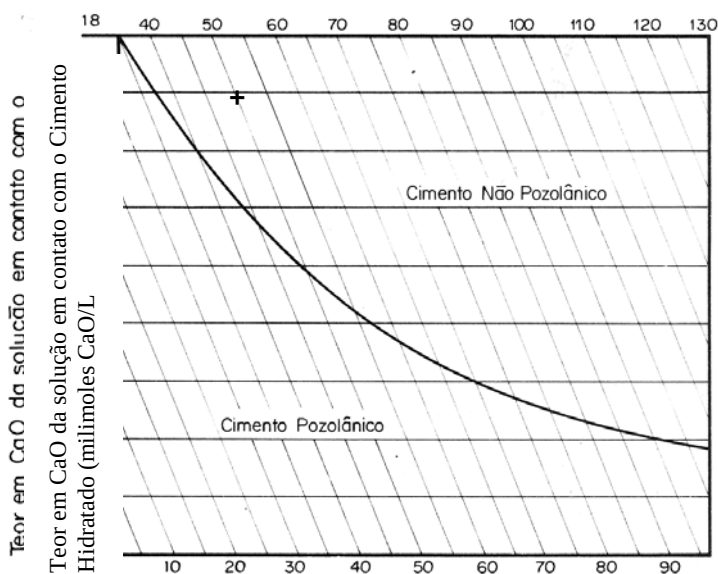
Figura A5.4 – Isotherma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A4





|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0518.2005 – A5     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----363                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>11/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,52                             | 43,30                      | 43,88 | 20,00                              | 15,84         | 15,92 |
| 10,80                             | 44,45                      |       | 20,21                              | 16,01         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

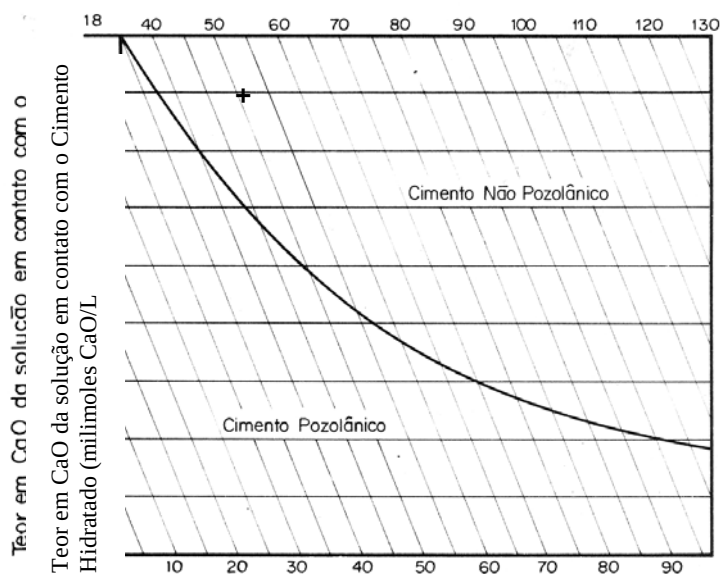
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.5 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A5



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0519.2005 – A6     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----364                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>13/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,82                             | 44,54                      | 44,78 | 20,23                              | 16,02         | 15,99 |
| 10,94                             | 45,03                      |       | 20,16                              | 15,97         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

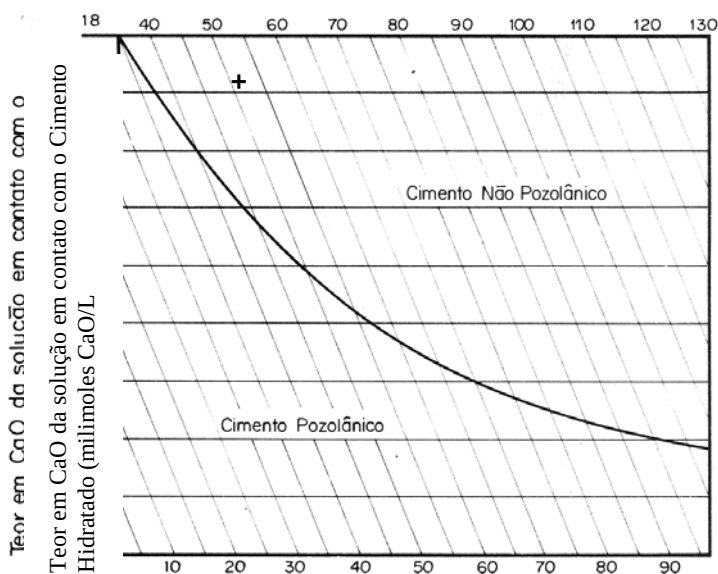
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.6 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra A6



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0520.2005 – C1     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----365                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>13/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,90                             | 44,86                      | 44,97 | 20,71                              | 16,40         | 16,42 |
| 10,95                             | 45,07                      |       | 20,75                              | 16,43         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

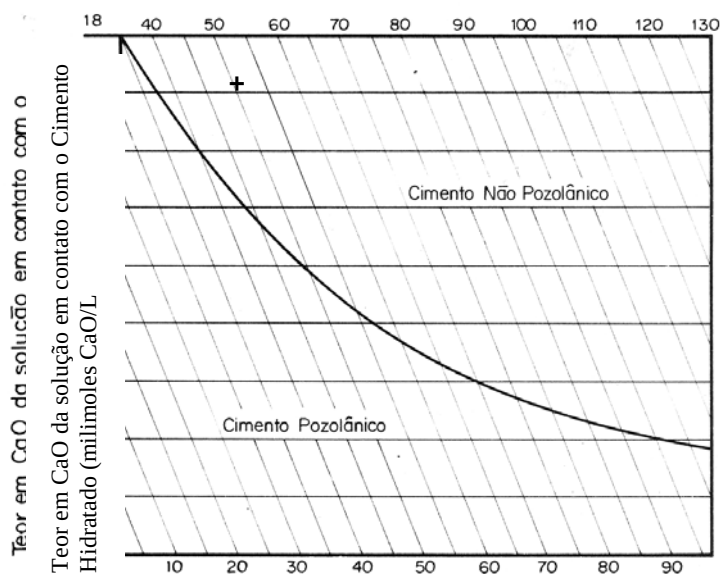
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.7 – Isotherma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C1



|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0521.2005 – C2     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----366                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>18/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,83                             | 44,58                      | 44,51 | 20,56                              | 16,28         | 16,30 |
| 10,80                             | 44,45                      |       | 20,60                              | 16,32         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

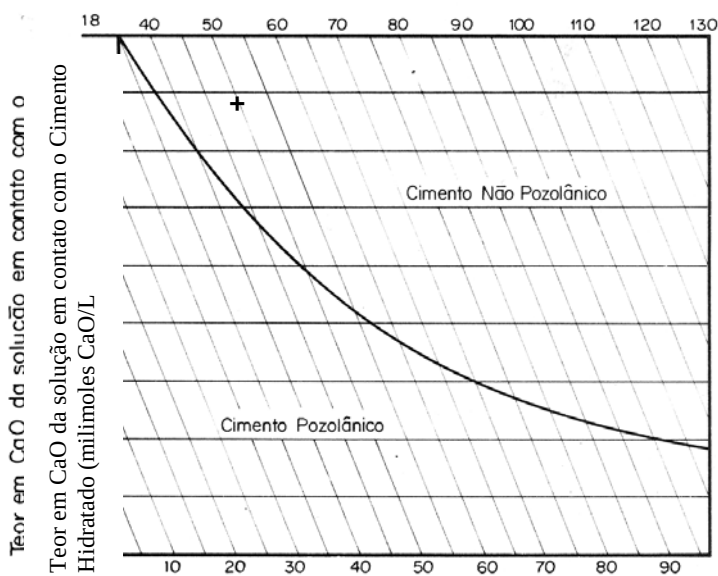
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.8 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C2



|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0522.2005 – C3     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----367                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>18/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,35                             | 42,60                      | 42,81 | 19,61                              | 15,53         | 15,69 |
| 10,45                             | 43,01                      |       | 20,01                              | 15,85         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

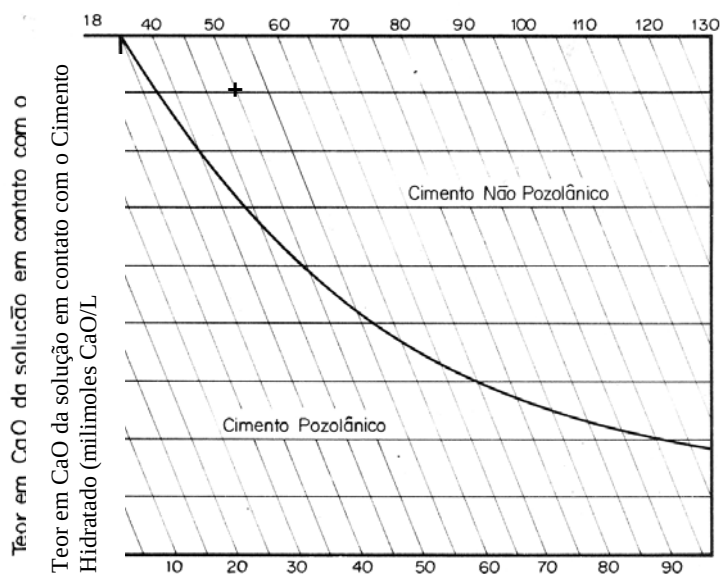
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.9 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C3



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0523.2005 – C4     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----368                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>20/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,50                             | 43,22                      | 43,30 | 20,15                              | 15,96         | 16,01 |
| 10,54                             | 43,38                      |       | 20,29                              | 16,07         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

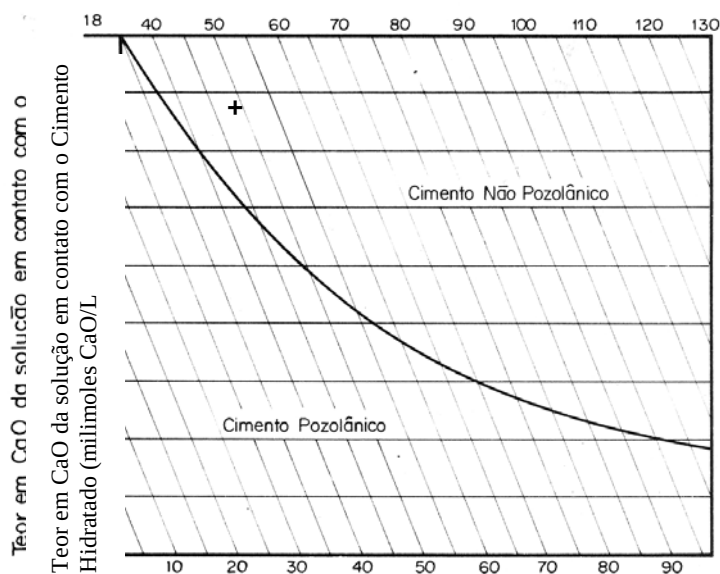
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.10 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C4



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0524.2005 – C5     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----369                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>20/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,30                             | 42,39                      | 42,35 | 19,64                              | 15,55         | 15,56 |
| 10,28                             | 42,31                      |       | 19,66                              | 15,57         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

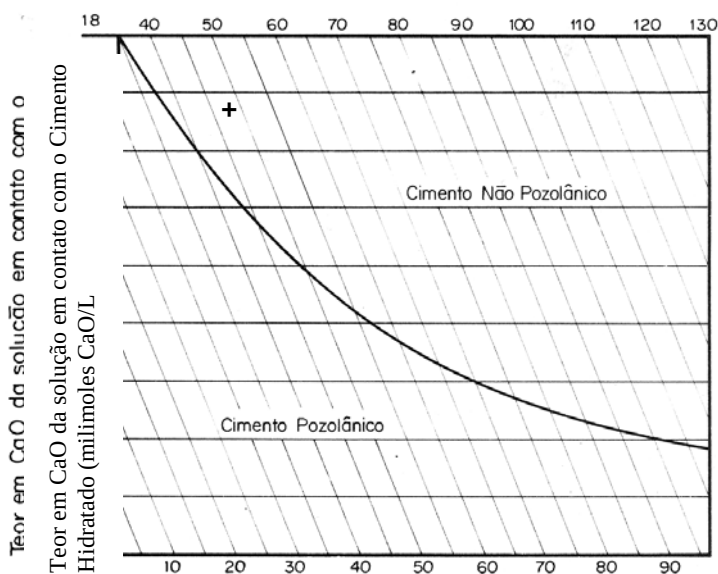
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.11 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C5



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0525.2005 – C6     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----370                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>25/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,09                             | 41,53                      | 41,92 | 19,29                              | 15,28         | 15,46 |
| 10,28                             | 42,31                      |       | 19,75                              | 15,64         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

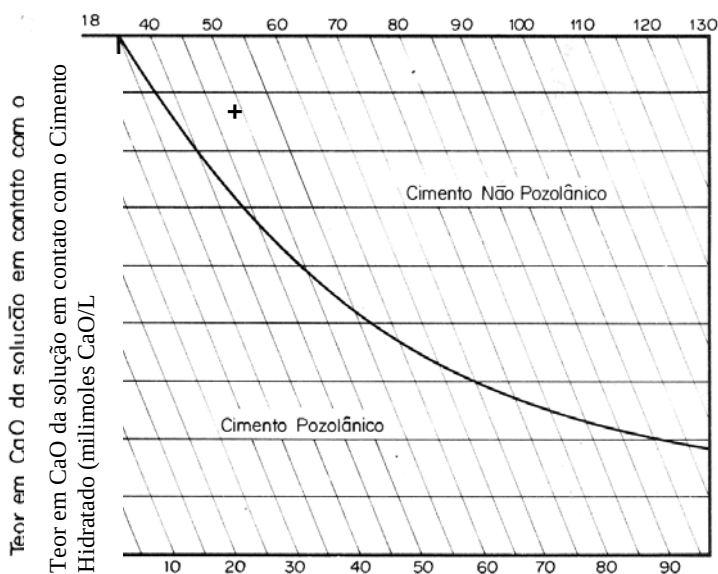
Figura A5.12 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C6





|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0526.2005 – C7     | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa n°:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n°:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n°:<br>-----371                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>25/10/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng° resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,32                             | 42,48                      | 42,44 | 19,29                              | 15,28         | 15,29 |
| 10,30                             | 42,39                      |       | 19,31                              | 15,29         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

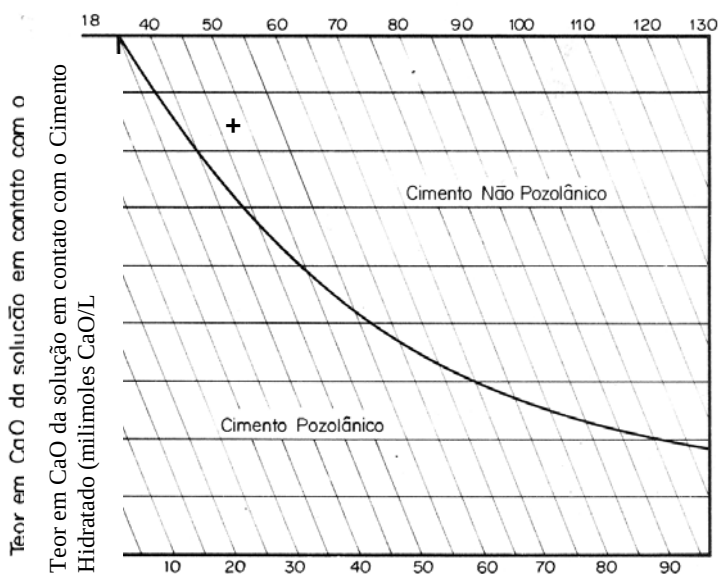
| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote n°:                                                  | N° patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote n°                                                   | N° patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.13 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C7



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0527.2005 – C8     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----372                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>27/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,97                              | 41,04                      | 41,32 | 18,50                              | 14,65         | 14,81 |
| 10,11                             | 41,61                      |       | 18,90                              | 14,97         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milomoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

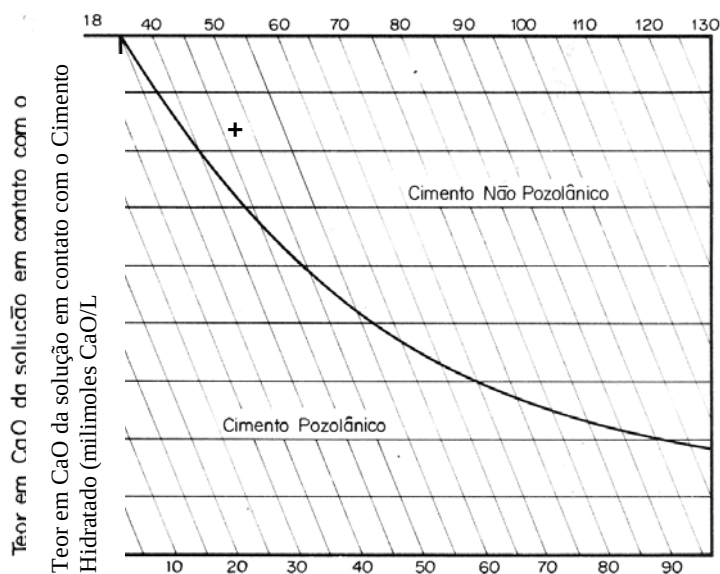
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.14 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C8



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0528.2005 – C9     | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----373                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>27/10/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,90                              | 40,75                      | 40,34 | 18,44                              | 14,60         | 14,57 |
| 9,70                              | 39,93                      |       | 18,36                              | 14,54         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.15 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C9

**FURNAS****CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

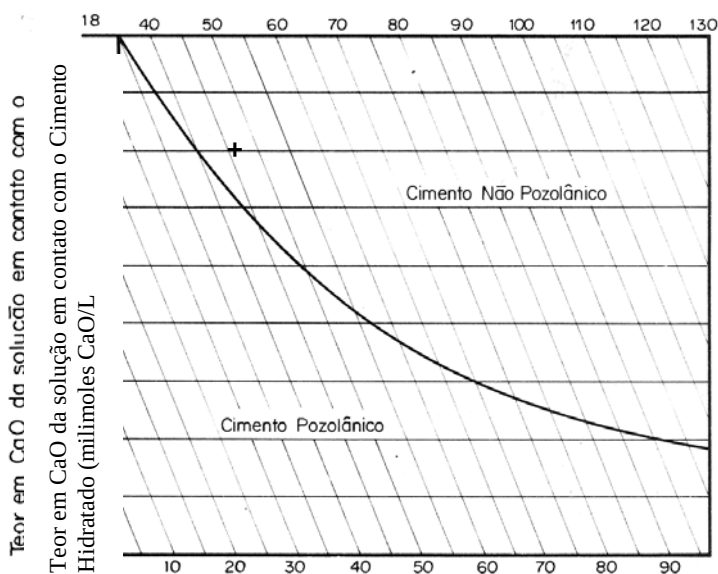
Ensaio de Atividade Pozolânica para Controle de Cimento Portland Pozolânico

Procedimento: 01.002.029

Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0529.2005 – C10    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----374                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>03/11/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total |                                |       | Determinação do teor de CaO |                               |       |
|----------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) $V_1$         | Milimol $\text{OH}^-/\text{L}$ | média | Volume EDTA<br>(mL) $V_2$   | Milimol $\text{CaO}/\text{L}$ | média |
| 9,67                             | 39,80                          | 39,51 | 17,78                       | 14,08                         | 14,04 |
| 9,53                             | 39,23                          |       | 17,68                       | 14,00                         |       |
|                                  |                                |       |                             |                               |       |

**Calculo:**a) a) Milimol  $\text{OH}^-/\text{L}$   
 $(V_1 * F_1 * 1000) / V$ b) b) Milimol  $\text{CaO}/\text{L}$   
 $(V_2 * F_2 * 1000) / V$  $V(\text{mL}) = 25$ Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles  $\text{OH}^-/\text{L}$ )  
Gráfico da Solubilidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em presença de álcalis a 40°C

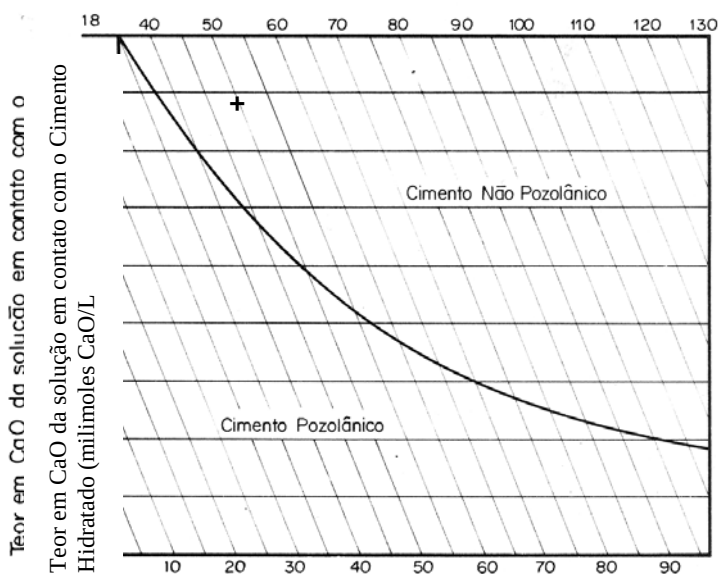
| Reagentes                                        | Status da manutenção       |
|--------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                 | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                         | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| $F_1$ = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                        | Multidosador               |
| Lote nº                                          | Nº patrimonial -----       |
| $F_2$ = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.16 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C10



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0530.2005 – C11    | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----375                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>03/11/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,42                             | 42,89                      | 42,93 | 19,97                              | 15,82         | 15,76 |
| 10,44                             | 42,97                      |       | 19,83                              | 15,71         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

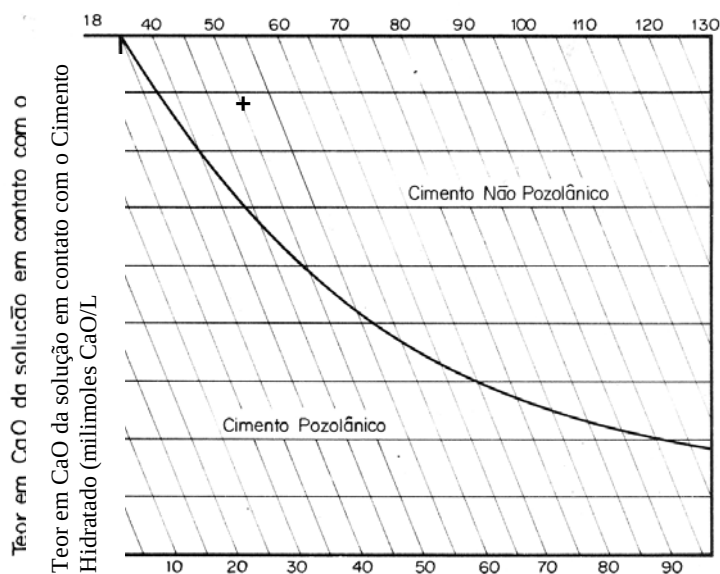
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.17 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C11



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0531.2005 – C12    | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----376                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>15/11/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,55                             | 43,42                      | 43,22 | 20,02                              | 15,86         | 15,78 |
| 10,45                             | 43,01                      |       | 19,82                              | 15,70         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



**Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

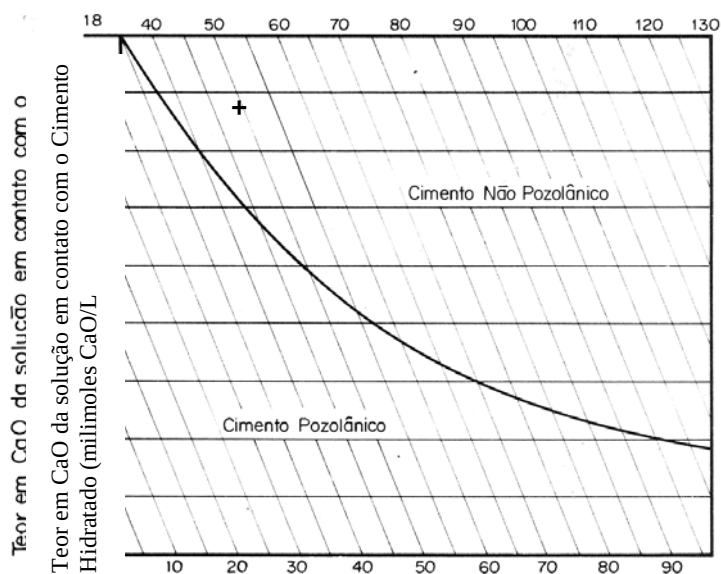
| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.18 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C12



|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0532.2005 – C13    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----377                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>15/11/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,34                             | 42,56                      | 42,60 | 19,86                              | 15,73         | 15,67 |
| 10,36                             | 42,64                      |       | 19,70                              | 15,60         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Cc **Calculo:**

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

| Reagentes                                                 | Status da manutenção       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                                  | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador               |
| Lote nº                                                   | Nº patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.19 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C13

**FURNAS****CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

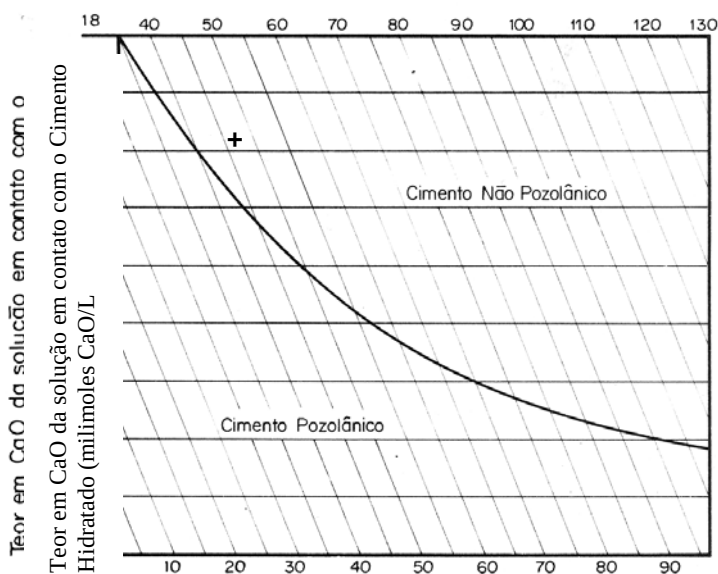
Ensaio de Atividade Pozolânica para Controle de Cimento Portland Pozolânico

Procedimento: 01.002.029

Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0533.2005 – C14    | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----378                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>17/11/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 9,76                              | 40,17                      | 40,03 | 18,26                              | 14,46         | 14,43 |
| 9,69                              | 39,88                      |       | 18,17                              | 14,39         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |

**Calculo:**a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/Vb) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.20 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C14



**FURNAS****CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

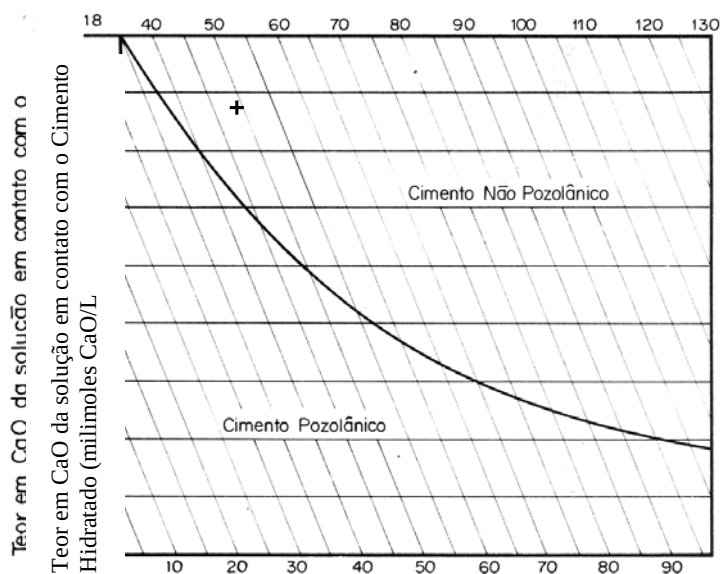
Ensaio de Atividade Pozolânica para Controle de Cimento Portland Pozolânico

Procedimento: 01.002.029

Norma: NBR 5753/92

|                                          |                                   |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0534.2005 – C15    | Teor de adição:<br>35 %     |
| Programa nº:<br>-----2077                | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro nº:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio nº:<br>-----379                   | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>17/11/05 |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Engº resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total |                                |       | Determinação do teor de CaO |                               |       |
|----------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) $V_1$         | Milimol $\text{OH}^-/\text{L}$ | média | Volume EDTA<br>(mL) $V_2$   | Milimol $\text{CaO}/\text{L}$ | média |
| 10,38                            | 42,72                          | 42,64 | 19,66                       | 15,57                         | 15,51 |
| 10,34                            | 42,56                          |       | 19,50                       | 15,44                         |       |
|                                  |                                |       |                             |                               |       |

**Calculo:**a) a) Milimol  $\text{OH}^-/\text{L}$   
 $(V_1 * F_1 * 1000) / V$ b) b) Milimol  $\text{CaO}/\text{L}$   
 $(V_2 * F_2 * 1000) / V$  $V(\text{mL}) = 25$ Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles  $\text{OH}^-/\text{L}$ )  
Gráfico da Solubilidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em presença de álcalis a 40°C

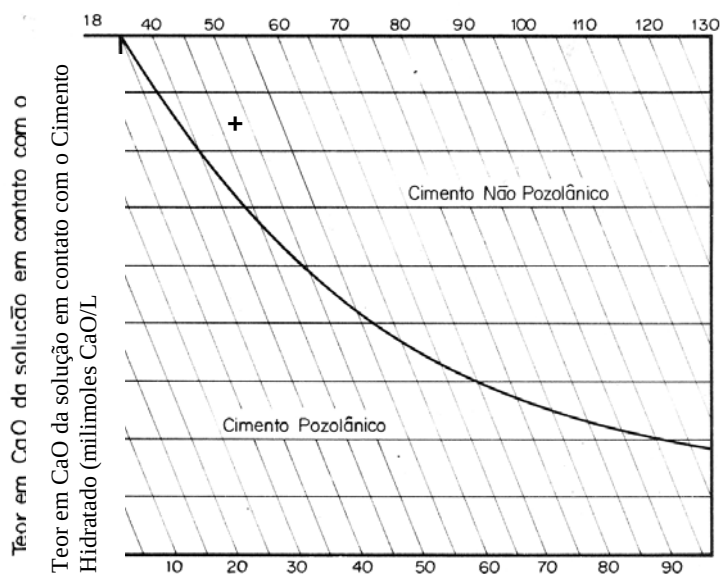
| Reagentes                                        | Status da manutenção       |
|--------------------------------------------------|----------------------------|
| Ácido clorídrico                                 | Recipiente termostático    |
| Lote nº:                                         | Nº patrimonial 358-5-19983 |
| $F_1$ = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                            |
| EDTA – Na                                        | Multidosador               |
| Lote nº                                          | Nº patrimonial -----       |
| $F_2$ = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                            |

Figura A5.21 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C15



|                                          |                                   |                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Material cimentício:<br>Argila in natura | Registro:<br>1.0535.2005 – C16    | Teor de adição:<br>35 %      |
| Programa n.º:<br>-----2077               | Material:<br>-----CP II F - 32    | Registro n.º:<br>1.0915.2005 |
| Ensaio n.º:<br>-----380                  | Data de entrada:<br>-----29/07/05 | Data do ensaio:<br>23/11/05  |
| Executado por:                           | Conferido por:                    | Eng.º resp.:                 |

| Determinação da alcalidade total  |                            |       | Determinação do teor de CaO        |               |       |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------------|-------|
| Volume HCl<br>(mL) V <sub>1</sub> | Milimol OH <sup>-</sup> /L | média | Volume EDTA<br>(mL) V <sub>2</sub> | Milimol CaO/L | média |
| 10,04                             | 41,32                      | 41,67 | 18,68                              | 14,79         | 14,99 |
| 10,21                             | 42,02                      |       | 19,17                              | 15,18         |       |
|                                   |                            |       |                                    |               |       |



Calculo:

a) a) Milimol OH<sup>-</sup>/L  
(V<sub>1</sub>\*F<sub>1</sub>\*1000)/V

b) b) Milimol CaO/L  
(V<sub>2</sub>\*F<sub>2</sub>\*1000)/V

V(mL)= 25

Alcalinidade total da solução em contato com o Cimento Hidratado (milimoles OH<sup>-</sup>/L)  
Gráfico da Solubilidade de Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de álcalis a 40°C

| Reagentes                                                 | Status da manutenção        |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Ácido clorídrico                                          | Recipiente termostático     |
| Lote n.º:                                                 | N.º patrimonial 358-5-19983 |
| F <sub>1</sub> = (normalidade da solução HCl) 0,1029      |                             |
| EDTA – Na                                                 | Multidosador                |
| Lote n.º                                                  | N.º patrimonial -----       |
| F <sub>2</sub> = (molaridade da solução EDTA – Na) 0,0198 |                             |

Figura A5.22 – Isoterma de solubilidade do hidróxido de cálcio a 40 °C, em presença de álcalis, da área Bonsucesso: amostra C16