

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DIEGO ANDRIGHETTI PEREIRA

**CORRELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E
MICROMORFOLÓGICAS DE SOLOS E ALTERITAS COM
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE MATERIAIS DE PERFIS DE
ALTERAÇÃO SOBRE ROCHAS GRANÍTICAS, GNÁISSICAS E
BASÁLTICAS**

(TF/06-15)

Monografia de Trabalho de Formatura
realizada no Instituto de Geociências, da
Universidade de São Paulo, como parte
do requisito para a graduação como
Geólogo

Orientadora: Prof^a Dr^a M. Cristina Motta de Toledo (IGc USP)
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Liedi L. B. Bernucci (EP USP).

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Correlação de características mineralógicas e
micromorfológicas de solos e alteritas com
características geotécnicas de materiais de perfis de
alteração sobre rochas graníticas, gnáissicas e
basálticas**

Diego Andrichetti Pereira



Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Profa. Dra. Maria Cristina Motta de Toledo

Profa. Dra. Maria Eugênia Bosco

Prof. Dr. Gianna Maria Garda

São Paulo

2006

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DIEGO ANDRIGHETTI PEREIRA

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024304

**CORRELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS E
MICROMORFOLÓGICAS DE SOLOS E ALTERITAS COM
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE MATERIAIS DE PERFIS DE
ALTERAÇÃO SOBRE ROCHAS GRANÍTICAS, GNÁISSICAS E
BASÁLTICAS**

(TF/06-15)



Monografia de Trabalho de Formatura
realizada no Instituto de Geociências, da
Universidade de São Paulo, como parte
do requisito para a graduação como
Geólogo

Orientadora: Prof^a Dr^a M. Cristina Motta de Toledo (IGc USP) *Juliana*.
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Liedi L. B. Bernucci (EP USP).

AGRADECIMENTOS

À Profª. M. Cristina Motta de Toledo pela orientação dada durante os cinco anos de graduação, na qual tive a felicidade de receber, onde pude aprender de sua experiência não só em momentos difíceis relacionados a este trabalho, mas também em dificuldades durante a graduação e na entrada para o mercado de trabalho. Sou realmente muito agradecido!

À Profª. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci pela co-orientação deste trabalho e pela permissão e todo o suporte dada desde 2003 na utilização do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da USP.

À Técnica Verônica Gabriel Santos do Laboratório de Análises Mineralógicas do Instituto de Geociências da USP pelo suporte e ajuda nas diversas preparações de amostras e realização de análises..

Ao Prof. Edson Moura pela atenção e suporte durante a realização dos ensaios geotécnicos e a ajuda do Sr. Erasmo no LTP.

A todos os profissionais dos diversos laboratórios do Instituto de Geociências pelo suporte durante a realização das diferentes análises. Aos profissionais Paulo Ernesto Mori, Sueli dos Santos, Dr. Flávio Machado de Souza Carvalho, Angélica Dolores de Mello Morente, Isaac Jamil Sayeg, meus agradecimentos.

Ao Laboratório de Pedologia da Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas da USP, pelo suporte durante a análise com a carta de cores de Munsell, principalmente ao técnico Marcos pela ajuda.

Ao CNPq pelo apoio a esta pesquisa através de bolsa de iniciação científica durante 2004/2005.

À FAPESP pelo apoio a este projeto através da concessão de bolsa de iniciação científica durante 2005/2006.

A todos os colegas da turma de ingresso 2002 pela ajuda em tantos momentos durante a graduação, principalmente aos “Clorítóides Intrusos”.

E com grande gratidão, sou a meus pais, Alberto José Maria Pereira e Agda Andrichetti Pereira, pelo apoio em todos os sentidos durante todos estes anos de estudo. Aos meus irmãos Denis Andrichetti Pereira e Kelma Andrichetti Pereira, e a minhas avós Laura Mourão e Rosa Mourão, pelo apoio e ajuda nestes anos.

A meu Deus Jeová pelo equilíbrio que me ajudou a ter nestes anos da graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE QUADROS	7
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Considerações Iniciais	10
1.2 Metas e Objetivos	11
1.3 Breve Histórico	11
1.4 Organização do Trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Alteração de Rochas	15
2.1.1 Alteração de Granitos	15
2.1.2 Alteração de Rochas Básicas	18
2.2 Correlação entre Natureza dos Materiais e suas Propriedades Geotécnicas	19
2.2.1 Correlação entre composição Mineralógica e Graduação	19
2.2.2 Correlação entre a composição química dos argilominerais e seu comportamento geotécnico	19
2.3 Procedimentos do ensaio método das pastilhas	20
2.4 Análise Térmica Diferencial (ATD)	22
2.5 Difratometria de raios-x (DRX)	22
2.6 Determinação da cor do solo	23
2.7 Mineralogia e Micromorfologia dos Solos e Comportamento Geotécnico	25
2.7.1 Espatulação no Método das Pastilhas	26
2.7.2 Importância da mineralogia e micromorfologia no comportamento geotécnico	27
2.8 Correlações realizadas por Fernandes (2006)	28
2.9 O Ferro e a Resistência Mecânica dos solos	29

3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	31
3.1	Trabalho de Campo	31
3.2	Trabalhos de Laboratório	31
3.2.1	Descrição macroscópica das amostras	31
3.2.2	Preparação das Amostras	32
3.2.3	Ensaios Geotécnicos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação	33
3.2.3.1	Preparação das Amostras	33
3.2.3.2	Confecção das pastilhas e esferas	34
3.2.3.3	Reabsorção de água	35
3.2.3.4	Imersão de esfera de solo em água	36
3.2.3.5	Resistência ao esmagamento da esfera	36
3.2.3.6	Processamento dos resultados dos ensaios	36
3.2.3.7	Classificação Geotécnica das amostras	37
3.2.4	Análise Granulométrica	38
3.2.5	Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica	39
3.2.6	Difratometria de raios-x (DRX)	40
3.2.7	Microscopia Óptica (MO)	44
3.2.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	47
3.2.9	Análise Química por Fluorescência de raios-x (FRX)	49
3.2.10	Determinação da cor do solo	50
3.3	Dificuldades encontradas	52
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
4.1	Correlações entre classificação geotécnica pelo Método da Pastilhas e as propriedades dos solos	53
4.2	Comparação dos resultados atuais com os anteriores	56
4.3	Mineralogia, Estrutura, Coloração e Textura vs Comportamento Geotécnico	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		68
ANEXO A Nomenclatura das amostras		72
ANEXO B Tabelas com os resultados do ensaio Método das Pastilhas		74
ANEXO C Guia Classificatório do Método das Pastilhas		78
ANEXO D Tabela com os resultados da análise granulométrica		80

ANEXO E	Termogramas	82
ANEXO F	Difratogramas	91
ANEXO G	Imagens feitas por Microscopia Eletrônica de Varredura	100
ANEXO H	Imagens feitas por Microscopia Óptica	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Classificação geotécnica das amostras pelo Método das Pastilhas	37
Tabela 3.2 Resultados dos cálculos feitos sobre os resultados dos ensaios	38
Tabela 3.3 Análise da fração argila por difração de raios-x	42
Tabela 3.4 Picos característicos no difratograma após tratamento das amostras	42
Tabela 3.5 Resultado da difração de raios-x após glicolagem e aquecimento	43
Tabela 3.6 Minerais identificados através das análises por difração de raios-x, complementados por outras análises	44
Tabela 3.7 Composição química determinada por Fluorescência de raios-x, em % em peso dos óxidos	50
Tabela 3.8 Determinação da cor do solo	51
Tabela 4.1 Correlação entre teor em argila, tempo de ascensão e contração das pastilhas	54
Tabela 4.2 Correlação entre comportamento geotécnico e sua classificação	56
Tabela 4.3 Comparação de resultados do ensaio Método das Pastilhas	57
Tabela 4.4 Correlação entre caráter geotécnico, teor em ferro e presença de minerais	60
Tabela 4.5 Correlações entre mineralogia, coloração e resistência do solo, em amostras de horizonte B	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Espaço de Cor e Sólido de Cor Munsell	24
Figura 2.2 Símbolos para representar o matiz e respectiva relação	24
Figura 2.3 Escala de valor à esquerda, e de croma	25
Figura 2.4 Relação entre Limite de Liquidez e quantidade de espatulações	26
Figura 3.1 Pastilhas e esferas confeccionadas	34
Figura 3.2 Pastilhas e esferas na estufa	35
Figura 3.3 Avaliação de penetração por queda livre	36
Figura 3.4 Gráfico dos resultados da análise granulométrica	39
Figura 3.5 Comparação de difratogramas de amostra natural, após glicolagem e aquecimento	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 Heterogeneidade encontrada na amostra TFLPBC	58
Quadro 4.2 Comparação entre imagens por MEV dos torrões naturais e pastilhas	62
Quadro 4.3 Correlação entre caráter geotécnico, coloração e grau de alteração	64

RESUMO

PEREIRA, DIEGO A. (2006). *Correlação de características mineralógicas e micromorfológicas de solos e alteritas com características geotécnicas de materiais de perfis de alteração sobre rochas graníticas, gnáissicas e basálticas*. São Paulo, 2006. – Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Estudo mineralógico e micromorfológico (análise granulométrica, análise térmica diferencial e gravimétrica, difração de raios-x, fluorescência de raios-x, microscopia óptica e eletrônica de varredura, realizadas no Instituto de Geociências USP) em 14 amostras de perfis de solos e alteritas e sua correlação com o comportamento geotécnico (estudado por meio de ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica USP, com ênfase no Método das Pastilhas desenvolvido por Godoy e Bernucci (2002), mostrou que a resistência mecânica dos solos não está relacionada de modo simples à quantidade de ferro presente, nem à presença de goethita e hematita, mas sim à presença de produtos ferruginosos amorfos e suas relações espaciais com os argilominerais. Os resultados também indicaram que não é possível relacionar o caráter laterítico do solo com a mineralogia, pois não é a simples presença de certos minerais que garante elevada resistência do solo, mas sim a relação espacial entre as fases. Analogamente, não é possível relacionar a resistência do solo com sua coloração, pois aquela está ligada à associação dos produtos ferruginosos amorfos com os argilominerais, diferentemente da coloração, ligada principalmente à presença de goethita e hematita, além de matéria orgânica. Foi ainda percebido que os procedimentos laboratoriais de preparação das amostras, como a espatulação, podem alterar a relação entre os componentes, modificando sua resistência natural.

ABSTRACT

PEREIRA, DIEGO (2006). Correlation between mineralogical and micromorphological characteristics and geotechnical properties of soils and alterites developed from granitic, gnaissic and basaltic rocks. São Paulo, 2006 – Undergraduation Monography. Institute of Geosciences, University of Sao Paulo.

Mineralogic and micromorphologic study (granulometric analysis, differential and thermal gravimetric analysis, x-ray diffraction, x-ray fluorescence, optical and scanning eletronic microscopy, made at the Institute of Geosciences USP) of 14 samples from alterites and soils, and its correlation with the geotechnical behavior (studied at the Politechnic School, in the Technology and Pavimentation Lab, by means of geotechnical tests, mainly the tablet method, developed by Godoy and Bernucci, 2002), showed that soil mechanical resistance is not simply assigned to the iron content nor to the presence of goethite and hematite, but it is related to the presence of iron amorphous products and their distribution related to the clay minerals. The results also indicated that is not possible classify the lateritic geotheecnical character only by using the presence of certain tipical lateritic minerals, because it is not only the presence of certain mineral phases that give mechanical resistance to the soils, but the spacial relationship among the phases. Either, it is not possible associate the soil resistance to its color, because the resistance is associated to the type of spacial relation among iron products and clay minerals, and the color is related to the presence of certain mineral phases s goethite and hematite, and also organic matter. It coul be also realized tha some lab procedures, as spatulation, could modify the original spacial relationship among the soil components, modifying its natural resistance.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

Os solos são importantes fontes de material para obras de engenharia, principalmente em regiões de clima tropical, onde o perfil de alteração pode alcançar dezenas de metros.

Para determinado solo ser usado em uma obra de engenharia, é necessário apresentar características geotécnicas capazes de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços que serão solicitados na obra; por este motivo o solo, antes de sua utilização, precisa ser caracterizado do ponto de vista geotécnico, o que é feito através de determinações laboratoriais variadas, cujos resultados são utilizados inicialmente para a sua classificação e posteriormente para definir parâmetros geotécnicos de projeto.

A caracterização e classificação geotécnica dos solos são feitas por vários métodos. No entanto, no Brasil, os profissionais desse meio têm encontrado certas dificuldades pelo fato de que a maior parte dos métodos existentes foram elaboradas em países de clima temperado, cujos solos apresentam composição e organização próprias e, portanto, apresentam comportamento diferente dos de clima tropical.

Os solos tropicais apresentam certas peculiaridades de comportamento mecânico e hídrico. De uma forma simplificada, estas peculiaridades permitem dividir os solos do ponto de vista de engenharia em “lateríticos” e “não-lateríticos”. Os solos lateríticos, segundo Nogami (1978), são resultantes de processos pedológicos em condições bem drenadas e clima úmido tropical, e correspondem aos horizontes A, B e eventualmente parte do C. O mesmo autor enfatiza ainda que tal denominação (solos lateríticos) tem caráter essencialmente geotécnico, e não deve ser confundida com a designação usada na pedologia e na geologia.

O autor afirma ainda que os solos lateríticos são os mais desejados para obras de engenharia pelo fato de que, no estado natural, são menos suscetíveis à erosão do que os demais solos e por adquirirem elevada resistência e capacidade de suporte quando adequadamente compactados.

Muitos fatores influenciam as propriedades geotécnicas dos solos naturais, como a mineralogia, a distribuição granulométrica, a atividade da fração argila, resistência dos grãos, micro-estrutura, etc. Principalmente em solos tropicais, segundo diversos autores, a mineralogia tem um significado especial, por apresentar oxihidróxidos de ferro e alumínio que agem como cimentantes, agregando partículas. Desta forma, o estudo da mineralogia, textura e estrutura dos solos tem grande importância nas obras, pois são estas características que fornecem resistência ao solo.

Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo correlacionar propriedades mineralógicas e micromorfológicas com o comportamento geotécnico de alguns solos e

alteritas, tomando como exemplo os materiais provenientes da alteração de três tipos de rochas: graníticas, gnáissicas e basálticas, todas amostradas no Estado de São Paulo.

Esta pesquisa objetiva contribuir à melhor compreensão das relações entre as características mineralógicas e micromorfológicas dos solos e alteritas e seu comportamento geotécnico, podendo contribuir também para o esclarecimento das razões da heterogeneidade de comportamento entre materiais provenientes de distintos tipos de rocha, e entre materiais de diferentes setores ou partes num mesmo perfil de alteração.

1.2 - Metas e Objetivos

Devido à importância das propriedades mineralógicas e micromorfológicas para o comportamento geotécnico, esta pesquisa objetivou correlacionar estas características tomando como exemplo os materiais provenientes da alteração de três tipos de rochas: graníticas, gnáissicas e basálticas, todas amostradas no estado de São Paulo.

A idéia principal deste projeto foi contribuir à melhor compreensão das relações entre as características mineralógicas e micromorfológicas dos solos e alteritas e seu comportamento geotécnico, explicando através das propriedades dos solos, e tentando indicar seus graus de importância, para resistência mecânica apresentada nas amostras.

Buscou-se fazer uma revisão bibliográfica que contribuisse para os objetivos deste trabalho, a fim de podermos aprofundar o que já foi estudado por outros autores, e usar trabalhos específicos de mineralogia e micromorfologia para explicar comportamentos observados nos solos.

No Instituto de Geociências (IGc) foram realizadas diversas análises para a identificação mineralógica e micromorfológica dos solos estudados. Realizou-se descrição macroscópica das amostras, análise térmica diferencial, difração de raios-x (inclusive da fração argila), fluorescência de raios-x, análise granulométrica, análise por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura.

Na Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas (FFLCH), no Departamento de Geografia, foi realizada, no Laboratório de Pedologia, análise com a carta de cores de Munsell.

Na Escola Politécnica (EP), no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP), foram realizados ensaios geotécnicos que mensuram propriedades mecânicas e hídricas dos solos.

Como etapa final desta pesquisa, foram integrados e correlacionados todos os resultados encontrados das análises e ensaios, tentando explicar, através das propriedades mineralógicas e micromorfológicas dos solos, o comportamento geotécnico observado.

1.3 - Breve Histórico

Esta pesquisa desenvolveu-se através de quase toda a graduação do aluno. Iniciou-se em julho de 2003 no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da

USP, onde começou a familiarização com o ensaio que acabou se tornando o principal desta pesquisa, o Método das Pastilhas, desenvolvido por Godoy e Bernucci (2002), desenvolvido no próprio laboratório, que é coordenado pela Profa. Liedi L. B. Bernucci, co-orientadora desta pesquisa. Esta pesquisa desenvolveu-se principalmente em duas etapas.

A primeira etapa deu-se início no ano de 2004, apoiada pelo CNPq através de bolsa de iniciação científica (bolsa PIBIC) e teve como objetivo a correlação entre a qualidade geotécnica e características mineralógicas, geoquímicas e micromorfológicas de solos e alteritas provenientes de quatro perfis de alteração: dois em Piracicaba sobre diabásio, um formando latossolo (5 amostras) e outro vertissolo (3 amostras); um em Itu sobre granito formando latossolo (7 amostras); um em Campos do Jordão sobre gnaisses formando latossolo (2 amostras). Nesta primeira etapa, a caracterização mineralógica, geoquímica e micromorfológica do material de alteração sobre o granito de Itu e sobre os gnaisses de Campos do Jordão foi revisada pelo aluno, pois fazia parte de outros projetos de pesquisa (Iniciação Científica apoiado pelo CNPq - bolsa PIBIC no primeiro caso, e projeto de pesquisa apoiado pela Fapesp no segundo caso); os resultados desta revisão foram aproveitados. No caso dos perfis de alteração sobre diabásio da região de Piracicaba, foi feita a caracterização mineralógica e micromorfológica através de DRX qualitativa, ATD-TG e microscopia óptica pelo próprio aluno. A caracterização geotécnica das 17 amostras foi feita através do método das pastilhas desenvolvido por Godoy e Bernucci (2002). Todos os resultados encontrados foram correlacionados e mostraram a elevada resistência mecânica que os solos do horizonte B apresentam, indicando da importância da organização dos componentes e dos produtos ferruginosos para a resistência mecânica dos solos.

A segunda etapa desta pesquisa teve início no segundo semestre de 2005, com apoio da FAPESP através de bolsa de iniciação de científica, e foi usada como tema de trabalho de formatura. Nesta etapa, a revisão bibliográfica, as análises mineralógicas, micromorfológicas e geotécnicas foram aprofundadas, esclarecendo a importância de determinadas propriedades para a resistência mecânica dos solos. Nesta etapa da pesquisa foi necessária uma maior quantidade de material de cada amostra que estava sendo estudada, sendo então necessário um novo trabalho de campo. Isto resultou numa redução na quantidade de amostras estudadas, pois não foi possível coletar mais material de algumas amostras, devido a dificuldades encontradas no local da coleta, mas outras amostras foram incrementadas na pesquisa devido a características macroscópicas interessantes que apresentaram. Foram trabalhadas então nesta etapa as mesmas amostras trabalhadas anteriormente, para os materiais de Piracicaba; para os materiais de Itu, foram utilizadas 4 amostras do perfil formando latossolo, e em Campos do Jordão, 3 amostras do perfil formando latossolo. Esta nova coleta implicou na repetição das análises e ensaios já realizados com o objetivo de garantir a correlação do material coletado

com o que já estava sendo estudado. Isto também propiciou uma comparação entre os resultados das análises e dos ensaios já realizados na primeira etapa e as que foram feitas na segunda etapa, dando a oportunidade de observar mudanças de comportamento geotécnico significativas nos solos devido a pequenas e eventuais mudanças em suas propriedades, pelo fato de que a nova amostragem pode não ter representado exatamente o material anterior.

Desde o início da pesquisa, em 2003, até agora, em 2006, durante as duas etapas deste trabalho, cresceu a familiaridade do aluno com os ensaios e análises realizadas, o que facilitou para que, neste último ano, durante o desenvolvimento do trabalho de formatura, ocorresse um aprofundamento da reflexão e o alcance de conclusões significativas.

1.4 - Organização do Trabalho

Este trabalho foi elaborado em forma de monografia de trabalho de formatura nos moldes do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, estando dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo é a presente introdução e os demais foram organizados como descrito a seguir.

No capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica, destacando-se aspectos mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Além de abordarmos métodos analíticos usados para o estudo do solo e procedimentos para ensaios geotécnicos, nos preocupamos em mencionar resultados de outras pesquisas que pudessem contribuir de forma significativa para as correlações que pretendíamos fazer, além de fornecer idéias importantes para as conclusões.

No capítulo três apresentamos o desenvolvimento do trabalho, desde a etapa de campo feita no começo da segunda etapa da pesquisa, a preparação das amostras para as diferentes análises e ensaios, até as explicações dos métodos analíticos e ensaios geotécnicos usados, além da apresentação e interpretação dos resultados.

No capítulo quatro abordamos as considerações finais, nas quais são mostradas as correlações entre as características estudadas nas amostras, através das diferentes técnicas analíticas, e o comportamento geotécnico observado. Discutimos, neste capítulo, a importância de certas propriedades para a resistência mecânica do solo, e para isto foram de grande importância as conclusões apresentadas em outras pesquisas realizadas por diversos autores, conforme a revisão bibliográfica apresentada neste trabalho.

O capítulo cinco é uma síntese da discussão realizada no capítulo quatro, com as principais conclusões da pesquisa.

Finalizando, encontram-se as referências bibliográficas usadas e/ou citadas neste trabalho, e os anexos, que incluem tabelas, figuras e fotos com os resultados das diferentes análises e ensaios realizados.

2.1 - Alteração de Rochas

A maior parte da superfície da Terra é o produto das transformações que as rochas sofrem na interação com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera, produzindo assim modificações de ordem física e química às rochas aflorantes. Como resultado, são produzidos rocha alterada e os solos.

O que controla a ação do intemperismo é o clima, ou seja, a variação de temperatura ao longo do ano e a distribuição e intensidade das chuvas. O relevo também tem grande participação na ação do intemperismo, pois influí no regime de infiltração e drenagem das águas pluviais. A fauna e a flora também participam na alteração das rochas, pois fornecem matéria orgânica para reações químicas.

A formação do solo ocorre quando o intemperismo modifica as rochas não só química e mineralogicamente, mas também estruturalmente, ocorrendo transferência e reorganização de minerais formadores de solo, como argilominerais e oxihidróxidos de ferro e alumínio, nos níveis superficiais do manto de alteração.

2.1.1 - Alteração de Granitos

Tem sido de grande interesse dos pesquisadores estudar o comportamento dos granitos diante dos processos intempéricos. Isto se dá pelo fato do granito apresentar certas características que favorecem a observação dos fenômenos de alteração, tais como a textura grosseira e a existência de minerais com diferentes graus de alterabilidade, quais sejam, quartzo, feldspato e mica.

O perfil clássico de alteração, segundo Cerri (1974), pode ser assim apresentado:

Acima da rocha fresca, o material começa a perder sua coesão. A seguir, à medida que os feldspatos entram em decomposição, o material passa progressivamente para uma formação plástica onde a textura da rocha primitiva se conserva. Quando a alteração dos feldspatos se completa encontra-se um nível de argila vermelha, essencialmente caulinítica, e o único mineral primário encontrado é o quartzo, mais ou menos fraturado e pulverizado, que pode apresentar algum grau de dissolução.

A alteração que ocorre na rocha fresca, na realidade, corresponde a uma hidrólise intensa que degrada todos os minerais do granito, em especial o feldspato, que é consumido totalmente. Assim, a camada superficial restante passa a ter uma composição química diferente da rocha de origem.

O perfil de alteração varia de acordo com a topografia e com a natureza da rocha matriz. Em locais onde a topografia é relativamente plana, a rocha matriz se altera mais intensamente produzindo perfis de alteração superiores a 50 m. Já em locais mais

acentados, os horizontes superficiais podem ser remanejados por erosão ou podem apresentar espessuras maiores por coluvionamento.

Dentre os minerais presentes normalmente em granitos, o plagioclásio é o primeiro a ser alterado, o que é responsável pela perda inicial de coesão da rocha fresca. Estudando a alteração do granito de Itu (SP), Cerri (1974) percebeu, pelo exame mineralógico, que a alteração da rocha inicia-se com um crescimento progressivo do sistema de microfraturas nos grãos de plagioclásio, tendendo a se alargar com o progresso da alteração. Através de estudos por difração de raios X, ATD, microscopia óptica e microssonda eletrônica, o mesmo autor reconheceu dois tipos principais de alteração do plagioclásio: alteração em gibbsita e em caulinita, sendo esta alteração direta ou através de fase amorfa. Ainda no mesmo trabalho, através de microscopia óptica, o autor percebeu que, no decorrer do processo de alteração, ao longo das fraturas ou clivagens dos plagioclásios, há o aparecimento de um material amorfo de comportamento isótropo. Este material evolui permitindo a formação de cristais de minerais do grupo da caulinita. Por causa de sua facilidade de alteração, num perfil, quanto mais superficial o horizonte a ser estudado, menos plagioclásio será encontrado.

O feldspato potássico, por ser mais resistente à alteração que os plagioclásios, é encontrado em todos os horizontes de um perfil de alteração. No granito fresco, os grãos de feldspato potássico do granito de Itu são róseos. No material alterado são encontrados com a mesma coloração, mas com menos coesão, pois percebe-se, mesmo a olho nu, certas fissuras em seus planos de clivagem. Seddoh (1973), estudando grãos de feldspato fresco e alterado, percebeu que, no início da alteração, são modificações físicas que predominam no feldspato potássico, sendo estas bem lentas. Nos estágios mais avançados de alteração, percebe-se que, paralelamente às fissuras, aparecem fendas mais largas que recortam o cristal. Nestas fendas observa-se o acúmulo de um material amorfo proveniente da recombinação de elementos químicos liberados pela alteração de minerais vizinhos mais frágeis. Este material amorfo evolui e dá origem às argilas. Cerri (1974) concluiu após seus estudos que o feldspato potássico altera-se similarmente ao plagioclásio, diferindo apenas na velocidade e na inexistência de evolução direta para gibbsita, pois este evolui para caulinita através de uma fase amorfa.

A biotita, ao longo dos processos de alteração, perde sua cor característica e torna-se castanha avermelhada. Outra alteração que é percebida a olho nu é a individualização das suas placas constituintes. Estudando os materiais de alteração do granito de Itu, Cerri (1974) constatou, com o auxílio de microssonda eletrônica, a presença de uma hidrobiotita, onde os valores de potássio, magnésio e sódio eram sensivelmente mais baixos comparados com a biotita da rocha fresca, sendo esta hidrobiotita uma transição da biotita para caulinita.

O trabalho de Cerri (1974) ainda traz várias observações com relação às questões mineralógicas e geoquímicas da alteração de granitos, com base no exemplo do granito de Itu:

Embora seja um mineral bastante resistente à alteração, o quartzo, diferente do que muitos imaginam, também se altera, mas muito lentamente. Muitas vezes a solubilidade do quartzo é freada ou mesmo impedida por causa de uma película ferruginosa que se desenvolve ao redor de seus cristais, e também pelo fato de as soluções de alteração apresentarem-se muitas vezes saturadas em sílica. Esta saturação é facilmente encontrada no nível do lençol freático. Nos horizontes acima e abaixo do lençol, as águas de percolação, não estando saturadas, promovem uma alteração mais rápida e eficaz dos cristais de quartzo.

Os minerais ferromagnesianos, ao serem alterados, liberam ferro que terminam por precipitar na forma de oxihidróxidos de ferro, imediatamente ou após certa migração em fissuras das rochas. Isto explica as manchas ferruginosas às vezes observadas.

O material argiloso encontrado no perfil caracteriza-se pela presença abundante de caulinita. Podem ser encontrados também goethita e gibbsita, tanto mais abundantes quanto mais básica for a rocha.

Quanto menos sílica houver na rocha, mais facilmente será formada gibbsita (Al(OH)_3), pois, na ausência de sílica, o alumínio reage com a hidroxila da solução e, então, precipita-se (Al(OH)_3). Quando há abundância de sílica no ambiente, esta reage com o alumínio e então se precipita a caulinita e, neste caso, a goethita será formada, se houver ferro no meio. Contudo, em condições de má drenagem, onde há abundância de sílica, haverá, preferencialmente, a formação de argilominerais 2:1 ao invés da caulinita; neste caso, o ferro presente no meio será consumido nesta neoformação, e não aparecerá como oxihidróxido livre.

Não só a quantidade de sílica na rocha define os minerais secundários, mas também a drenagem local, determinada pelo relevo e pela permeabilidade do perfil de alteração. Em ambientes bem drenados, com boa circulação, a sílica é lixiviada e então há maior precipitação de gibbsita e goethita; em ambientes mal drenados, há menos lixiviação de sílica, precipitando caulinita e, no caso de haver excesso de sílica em relação à composição da caulinita, formar-se-á montmorillonita (argilomineral 2:1).

A montmorillonita pode formar-se a partir dos granitos em condições de má drenagem, pois, com pouca lixiviação, há sílica suficiente para formar argilominerais 2:1. O material residual da alteração é sempre o quartzo em frações grosseiras e a muscovita (e hornblenda) dependendo da natureza da rocha, podendo haver também algum mineral acessório ou mesmo algum mineral ferromagnesiano mais resistente.

Se comparar a rocha sã com o produto da alteração, perceberemos que houve um acréscimo de oxigênio e água, e uma perda de uma parte da sílica.

Cerri (1974) conclui dizendo que a natureza do produto de alteração dos granitos parece estar ligada não só ao clima, mas também à sua mineralogia e textura, além da posição topográfica, que determina a drenagem interna.

2.1.2 - Alteração de Rochas Básicas

Os processos que levam à alteração dos granitos são os mesmos que alteram as rochas básicas. A posição topográfica e a drenagem interna também são de grande influência no produto da alteração. Devido ao período de cristalização destas rochas ser mais curto, elas adquiriram um caráter mais homogêneo, o que faz com que estas se comportem como materiais mais simples nos processos de intemperismo.

Devido à sua textura mais fina, minerais primários são dissolvidos logo no início da ação intempérica, fornecendo à rocha alta porosidade e fazendo com que as soluções percolantes adquiram certa homogeneidade.

Os principais minerais que participam na composição das rochas básicas são o plagioclásio, minerais ferro-magnesianos (ortopiroxênio, clinopiroxênio, anfibólio, olivina), opacos e vidros intersticiais. A seguir será descrito o comportamento de dois dos mais frequentes minerais das rochas básicas à ação do intemperismo.

Nas rochas básicas, a desestabilização dos plagioclásios pode resultar numa variedade de produtos. Sieffermann (1973) e Eswaran & De Conninck (1971) descrevem que em meio ferralítico os produtos mais comuns são argilominerais 1:1 (caulinita, haloisita, metahaloisita) e, segundo vários outros autores, como Boulange (1984) e Rosello (1984), o produto da alteração pode resultar também em géis alumino-silicosos, materiais amorfos e, quando a dessilificação é mais intensa, pode resultar em gibbsita.

Gonçalves (1987), ao estudar as transformações mineralógicas à ação intempérica de rochas vulcânicas básicas, observou que, mesmo na rocha sã, os plagioclásios iniciam uma fraca transformação, traduzida por uma leve perda de Ca e pela presença de pequenas porcentagens de Fe, embora as características ópticas desses minerais tenham se mantido. Essa mesma autora percebeu ainda que "a alteração dos plagioclásios se inicia por uma microfissuração intensa sem orientação preferencial e por microexpansões das linhas de clivagem, evidenciadas pela deposição de plasmas ocre-amarelos (cor de mel), ferruginosos. Dos bordos para o centro, os plagioclásios são pseudomorfoseados por um plasma incolor e amarelo-pálido, isotrópico, no seio do qual subsistem partes residuais de cristal quase inalterado."

Assim como o plagioclásio, a alteração do piroxênio pode resultar numa grande variedade. O mesmo autor percebeu em suas pesquisas que a alteração do piroxênio se inicia segundo microfissurações sobre os planos de clivagem. Um certo plasma birrefringente se cristaliza nas microfissuras e áreas periféricas, polarizando em tons ocre-amarelo acidentados, e extinguindo juntamente com o cristal original. A autora ainda observa acúmulos de oxihidróxidos de Fe, na forma de cristais de goethita, nas

microfissuras e clivagens do mineral, que se destacam pela sua alta birrefringência. Delvigne (1965) aponta que a transformação do piroxênio em goethita é determinada por uma forte drenagem interna. Segundo Delvigne (1983) o piroxênio pode ainda se alterar em talco e esmectita em condições hidrotermais, e em caulinita, hematita e hidróxidos de ferro por evolução supérigena.

2.2 – Correlação entre Natureza dos Materiais e suas Propriedades Geotécnicas

O autor Carlos de Souza Pinto, em seu livro “Curso Básico de Mecânica dos Solos” (Pinto, 2000), faz uma breve correlação entre propriedades como graduação, composição mineralógica e comportamento geotécnico na presença de água.

As principais idéias citadas por este autor estão resumidamente apresentadas a seguir.

2.2.1 - Correlação entre composição Mineralógica e Graduação (Pinto, 2000)

A composição e graduações de um solo dependem das características das rochas das quais foi formado. Partículas maiores, como pedregulhos, freqüentemente são constituídas de agregados de minerais distintos. Dentre as partículas constituídas de um único mineral, o quartzo (que é bastante resistente à alteração intempérica) forma grãos de silte e areia. Minerais como feldspato, gibbsita, calcita e mica, também podem ser encontrados nestas dimensões. Partículas de argila encontradas em um solo são predominantemente argilominerais, geralmente provenientes da alteração dos feldspatos.

2.2.2 - Correlação entre a composição química dos argilominerais e seu comportamento geotécnico (Pinto, 2000)

O tamanho reduzido dos argilominerais faz com que suas partículas tenham um comportamento diferenciado em relação às partículas de silte e areia, principalmente na presença de água.

Nos argilominerais existem dois tipos de estrutura básica: uma de tetraedros formados por um átomo de silício ligado a quatro átomos de oxigênio (SiO_2), e outra de octaedros formados por um átomo de alumínio ligado a oxigênio ou hidroxilos $[\text{Al}(\text{OH})_3]$. Estas estruturas podem se ligar por meio de átomos de oxigênio pertencentes simultaneamente às duas formando camadas de tetraedros e octaedros.

Alguns argilominerais são constituídos pelo arranjo de uma camada de tetraedros e outra de octaedros (arranjo este denominado de estrutura 1:1), determinando uma espessura de 7 Å, como a caulinita, por exemplo. Outros argilominerais são formados pelo arranjo de duas camadas de tetraedros com uma camada de octaedros entre elas (estrutura 2:1), determinando a espessura de 14 Å, como a esmectita, montmorillonita e vermiculita.

Na caulinita, as camadas de octaedros e tetraedros estão fortemente empacotadas através de ligações de hidrogênio que impedem sua separação. No caso da esmectita e

vermiculita, estas camadas são unidas através de ligações mais fracas, o que as deixa mais livres. Esta diferença nas ligações faz com que a esmectita, por exemplo, apresente superfície específica 100 vezes maior do que a caulinita. Como as forças de superfície são muito importantes no comportamento mecânico dos argilominerais, a maior quantidade de área específica faz com que um solo tenha um comportamento diferenciado na presença de água.

A esmectita e demais argilominerais 2:1 apresentam estruturas semelhantes. Outros minerais de estrutura 2:1, de espessura menor, de 10Å, como a illita, podem absorver menos água do que os de 14Å. Isto é explicado por se encontrar entre as camadas tetraédricas da illita, íons de potássio que provocam uma ligação mais firme entre elas. Portanto, o comportamento na presença de água da illita é intermediário entre a caulinita e a esmectita.

A previsão do comportamento das argilas se torna mais difícil devido às imperfeições e heterogeneidades em sua composição mineralógica. É comum encontrar-se um átomo de alumínio (Al^{3+}) substituindo um de silício (Si^{4+}), nas unidades tetraédricas, e átomos de alumínio sendo substituídos por outros átomos de menor valência, como magnésio (Mg^{++}), por exemplo. Estas substituições resultam em cargas negativas nas partículas dos argilominerais.

Para neutralizar as cargas negativas, cátions livres no solo sofrem adsorção nas partículas. Estes cátions atraem placas de argilominerais, com força relativamente pequena, o que impede a entrada de água entre estas. Esta liberdade de movimento entre as placas explica a elevada capacidade de absorção e expansão em contato com a água, e sua contração considerável ao secar.

Os cátions são facilmente trocáveis por causa da percolação de água. O tipo de cátion também condiciona o comportamento da argila. Uma esmectita com sódio adsorvido, por exemplo, é mais sensível a água do que se houvesse cálcio adsorvido. Estes fatores explicam a complexidade da revisão do comportamento das argilas e a dificuldade que existe em correlacioná-los por meio de índices empíricos.

2.3 - Procedimentos do ensaio método das pastilhas

De acordo com Godoy e Bernucci (2002) o desenvolvimento deste ensaio teve como objetivo adaptar o método das pastilhas para ser usado no campo, a fim de conseguir identificar, de maneira expedita, os diversos tipos de ocorrências das camadas constituintes dos perfis de solos.

Os procedimentos podem ser divididos em itens conforme descritos abaixo:

Secagem das amostras naturais, a 60°C, com exaustão, por duas horas, para eliminar a umidade.

Peneiramento, com peneiras de 2 e de 0,425 mm. Usa-se almofariz com pistilo protegido por borracha para o destorramento da amostra. Limitação: porcentagem de cerca de 80% passante na peneira 0,425 mm para ser aplicado o método.

Espatulação de aproximadamente 60 ml de solo que passa na peneira de 0,425 mm, umedecido com água destilada, sobre uma placa de vidro (lado fosco), vigorosa e continuamente com o auxílio de uma espátula, por 8 minutos. A amostra deve apresentar uma penetração de cerca de 5 mm, de penetrômetro cônico de 60° de abertura e 60 gramas de peso, numa massa do solo homogeneizada e acondicionada dentro de anel de PVC de 7 cm de diâmetro por 1 cm de altura, deixado cair por queda livre.

Confecção das pastilhas e esferas. **Pastilhas:** O solo, nas condições de pasta definidas no item anterior, é acondicionado em 2 anéis de aço inox de 35 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura, sobre uma base plana recoberta com plástico, para um melhor acabamento inferior. Com auxílio dos dedos, o solo em pasta é moldado dentro do anel, para que não fiquem vazios na base da pastilha. **Esferas:** A massa de solo restante da moldagem das pastilhas é utilizada para confecção de esferas de solo. Moldar uma terceira pastilha, de igual modo anterior, retirar o anel e cortar a massa de solo ao meio com a espátula. Com cada uma das metades de massa de solo, molda-se uma esfera nas palmas das mãos. Nos solos muito arenosos, de pouca coesão, agregar uma pequena quantidade de água para se obter uma agregação mínima das partículas.

Secagem das pastilhas e esferas, numa estufa com exaustão, a 60°C, por cerca de 3 horas, na posição vertical.

Pesagem do material para controle de umidade e medidas de contração das pastilhas. Após a secagem, esperar que o material esfrie por cerca de 10 minutos. Proceder a pesagem dos anéis, nas seguintes condições: 1) Pastilha de solo mais anel ; 2) Pastilha de solo sem o anel. Na sequência, medir a contração das pastilhas de solo com auxílio de um paquímetro. São feitas 3 medições de diâmetro, uma a cada 120° com relação a anterior; o valor utilizado é a média dessas 3 medidas. É aceitável um desvio de 0,2 mm entre as leituras.

Reabsorção de água pela pastilha de solo em pedra porosa e avaliação do tempo de ascensão da água na pastilha. Cada pastilha de solo seco é colocada sobre uma placa porosa, saturada em água, recoberta com papel filtro também saturado. Deixar em repouso por cerca de 3 horas. Observa-se o tempo necessário para que a água penetre em toda a superfície da amostra. Após 3 horas, medir o peso da pastilha de solo juntamente com o papel filtro na balança. O papel de filtro umedecido é pesado posteriormente ou anteriormente ao ensaio.

Imersão de esfera de solo em água, em um recipiente de cerca de 50 ml com água destilada para a avaliação da sua interação com esse meio. São avaliados o tempo de interação e o produto final. O tempo necessário e suficiente para a interação é de no

máximo 2 horas. Como produto final são observadas a formação de: pastas (silte), partículas (areia), blocos de alguns milímetros de lado ou esferas que não se alteram.

Avaliação da expansão, trincas e penetração. Após 3 horas de reabsorção de água em pedra porosa, a expansão é avaliada medindo-se, com auxílio de um paquímetro, o diâmetro da pastilha após a reabsorção. Quanto às trincas, é feita uma descrição sintética do tipo de trincamento que pode ocorrer nas pastilhas. Em seguida é feita, em uma primeira pastilha, as avaliações de penetração com cones de 60° de abertura e com pesos de 10 e 30 gramas.

Resistência ao esmagamento. Esta é uma avaliação da coesão a seco da esfera de solo. Pega-se a esfera de solo e tenta-se quebrá-la nas seguintes condições: 1) entre os dedos polegar e indicador; 2) entre os dedos polegar e uma superfície plana dura (por exemplo o tampo de uma mesa).

2.4 - Análise Térmica Diferencial (ATD)

Esta análise consiste em se aquecer a amostra em velocidade constante juntamente com uma substância termicamente inerte, que servirá como padrão de comportamento, e registrar as diferenças de temperatura entre elas. É produzido através destes registros uma curva denominada termograma, onde nas abscissas é marcada a temperatura em graus centígrados, e nas ordenadas a deflexão do galvanômetro.

O galvanômetro detecta a diferença de temperatura, para mais ou para menos, da amostra em relação à substância inerte. Deste modo pode-se produzir nas ordenadas do termograma uma deflexão da curva negativa ou positiva, dependendo se a transformação ocorrida na amostra foi endo ou exotérmica.

Através da análise do termograma e a observação dos picos endo e exotérmicos e a comparação com comportamentos conhecidos de diferentes materiais registrados em livros, atlas e fichas, é possível identificar a presença desses na amostra.

O aparelho utilizado, como um todo comprehende de um bloco de metal refratário com duas cavidades de igual volume e dispostas simetricamente. Numa é colocada a substância inerte e na outra a amostra estudada. A substância inerte usada pode ser óxido de alumínio cristalino coríndon ou alfa-Al₂O₃. Em cada uma dessas cavidades é colocado um par termelétrico do cromel/alumel, que é ligado em oposição (positivo com positivo e negativo com negativo), e é colocado entre eles um galvanômetro de escala graduada com a finalidade de medir a diferença de temperatura. A temperatura do sistema é medida com um pirômetro termelétrico e o aquecimento é feito por meio de um forno elétrico cuja velocidade de aquecimento é de 10°C a 15°C por minuto controlada por um autotransformador.

2.5 - Difratometria de raios X (DRX)

O princípio desta análise consiste no estudo do comportamento dos raios-x emitidos sobre a estrutura de um cristal. Após a emissão de raios-x sobre uma estrutura cristalina, os

raios são dispersos com certa posição e intensidade, e através destes dados pode-se identificar minerais e estudar suas estruturas.

Os elétrons dos átomos do cristal ao receberem a emissão do raio-x são excitados, tornando-se uma fonte de ondas eletromagnéticas de mesma freqüência e mesmo comprimento de onda do raio-x incidente. Os diversos elétrons dos átomos da estrutura cristalina combinam as ondas eletromagnéticas produzidas, podendo assim dizer que os átomos difratam a radiação-x. Portanto, quanto mais átomos contiver a estrutura do cristal, mais intenso será a difração provocada.

As ondas difratadas na direção de reflexão do plano atômico do cristal contêm certo ângulo que pode ser medido, sendo este característico da estrutura estudada, pois se relaciona com a distância entre os planos de átomos do cristal. Assim, todas estas posições de difração dependem das dimensões da cela unitária do cristal, podendo então, minerais diferentes com estruturas idênticas apresentarem resultados de difratometria iguais.

Na identificação de minerais o primeiro passo é obter as distâncias interplanares através dos ângulos de reflexão medidos na análise, e as intensidades resultantes da emissão de raios-x na amostra. Estes resultados podem ser comparados com coleções de tabelas padrão produzidas com as distâncias interplanares e ângulos de reflexão característicos de cada mineral, resultando na identificação dos minerais da amostra estudada.

2.6 - Determinação da cor do solo

A determinação da cor do solo é feita através de comparações com padrões de cor utilizando um sistema de origem americana que é um dos mais conhecidos e utilizados no caso dos solos – sistema de cores de Munsell. Neste sistema a cor é definida através de três parâmetros: matiz, valor e croma. Estas variáveis podem variar independentemente de modo que podem ser dispostas em um espaço tridimensional designado Espaço de Cor de Munsell. Qualquer cor ocorre numa região específica do Sólido de Cor de Munsell, sendo este de forma irregular devido aos limites de croma variarem dependendo do valor.

O matiz no Sólido de Cor de Munsell varia de acordo com o ângulo em relação ao eixo central, referindo-se então à cor espectral dominante, indicando se a cor é vermelha, amarela, verde, azul, roxa ou intermediária entre elas. O conjunto dos matizes são divididos em 100 intervalos iguais, sendo cada matiz identificado por um número compreendido entre 0 e 100. Mas a simbologia em geral adotada é a associação de um número e letras, para isso o conjunto de matizes sendo dividido em 10 conjuntos de 10 matizes, cada conjunto sendo representado pelas iniciais de sua designação em inglês em maiúsculas.

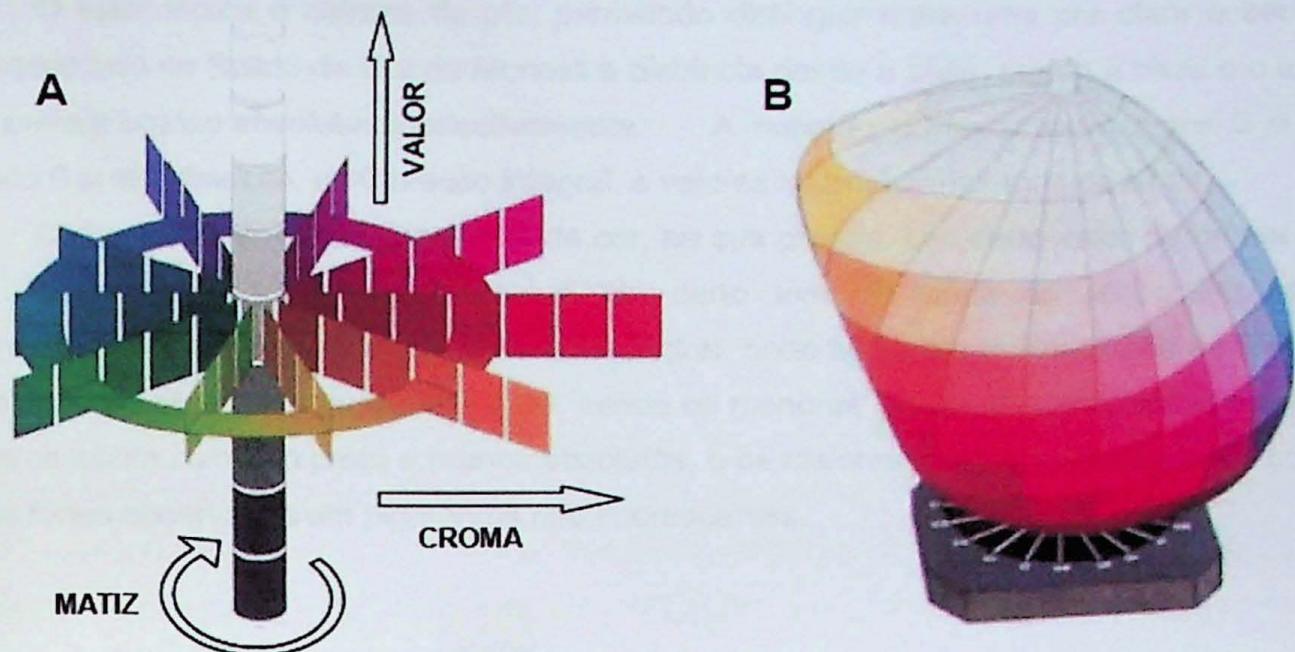


FIGURA 2.1 – Espaço de Cor (A) e Sólido de Cor Munsell (B) (Retirado de PINTO RICARDO 1972/1973)

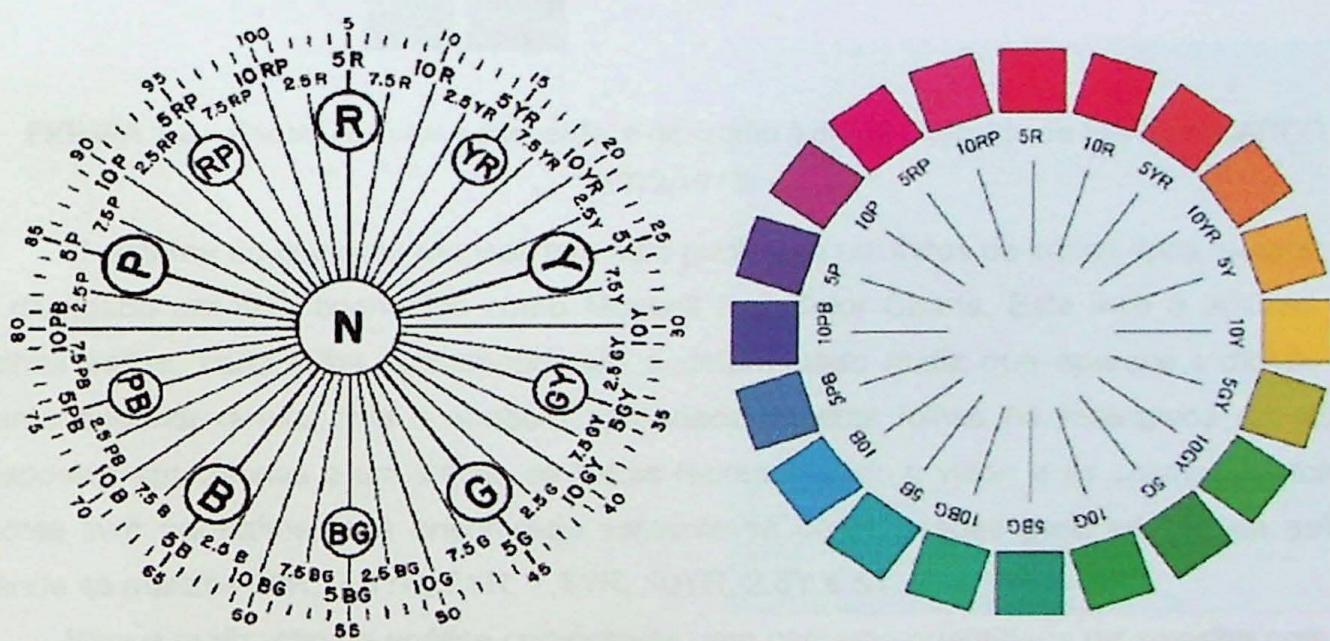


FIGURA 2.2 – Símbolos para representar o matiz e respectiva relação à esquerda (Retirado de PINTO RICARDO 1972/1973)

Dentro de cada grupo os 10 matizes são identificados por um número entre 0 e 10. De modo que cada matiz é representado pela(s) letra(s) do grupo precedida pelo número referente a posição no grupo. Neste modo de representar a matiz o número cinco sempre representará a posição central do grupo, sendo a cor pura sem interferências, e o valor 10 ou 0 a posição de transição entre os grupos, indicando uma cor transitória entre duas cores principais.

O valor indica a clareza da cor, permitindo distinguir entre uma cor clara e escura, representada no Sólido de Cor de Munsell a distância desde a base, sendo a base e o topo, um preto e branco absolutos respectivamente. A notação do valor varia entre 0 e 10, sendo 0 preto absoluto, e 10 branco integral, e valores intermediários tons de cinza.

O croma refere-se a intensidade da cor, ou sua pureza. Um certo valor de croma é a cor da respectiva matiz adicionada a um certo tom de cinza do respectivo valor, representando assim a distância até o eixo central, onde se localizam os cinzas neutros. O valor da notação usada varia de 0 a 20, sendo os menores números referentes aos cinzas neutros assim como ao preto e branco absolutos, e os maiores números referentes às cores mais fortes observadas em pigmentos não fluorescentes.



FIGURA 2.3 – Escala de valor à esquerda, e de croma à direita (Retirado de PINTO RICARDO 1972/1973)

O sistema de cores de Munsell tem sido publicado em livros de vários tipos, para solos é divulgado um livro conhecido como *Munsell Soil Color Charts*. Este livro é editado em folhas soltas, cada folha correspondendo a determinado matiz que aparece indicado no canto superior direito com o símbolo apropriado. Nestas folhas há retângulos de cores dispostos em colunas e em linhas, as linhas representando o valor, e as colunas o croma. Neste livro normalmente é encontrado somente as cores usadas para análise de solos, sendo as matizes 10R, 2,5YR, 5YR, 7,5YR, 10YR, 2,5Y e 5Y.

Para a realização da análise compara-se uma pequena quantidade da amostra com os diferentes padrões que constituem as diferentes folhas, até se encontrar um padrão próximo da cor do solo ou que corresponda a cor exatamente igual. Para notar determinada cor, geralmente escreve-se o seu nome complementado pelos respectivos parâmetros em parênteses – matiz, valor e croma, por esta ordem, separando-se o valor e o croma por uma barra oblíqua.

2.7 - Mineralogia e Micromorfologia dos Solos e Comportamento Geotécnico

Diversos autores abordam este assunto, alguns correlacionando características pedogênicas, outros mineralogia e micromorfologia, com o comportamento geotécnico dos solos. Encontra-se também trabalhos que discutem a possível modificação do estado do

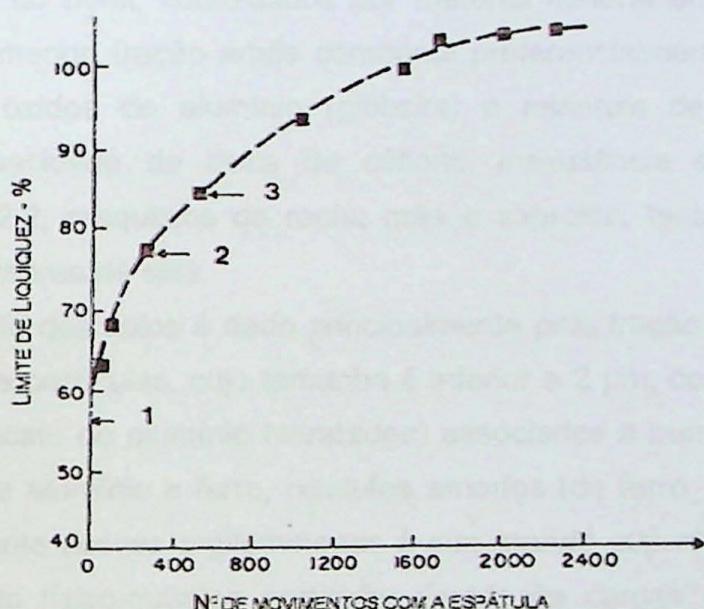
material quando submetido a certos aspectos dos ensaios geotécnicos, como por exemplo a espatulação, utilizada no método das pastilhas.

No presente trabalho apresenta-se as principais idéias revisadas, que foram julgadas importantes.

2.7.1 – Espatulação no Método das Pastilhas

O método das Pastilhas tem sido bastante utilizado na caracterização geotécnica dos solos. Diversas particularidades destes ensaios tem sido discutidas e muitas vezes mudanças foram propostas. No Método das Pastilhas utilizado neste trabalho, desenvolvido por Godoy e Bernucci (2002), a espatulação pode ser discutida.

Para a confecção das pastilhas as amostras de solo são espatuladas sobre uma placa de vidro de lado fosco e amassada e revolvida, vigorosa e continuamente com o auxílio da espátula por 8 minutos. Como o comportamento geotécnico depende das condições dos constituintes mineralógicos do solo, a espatulação vigorosa neste ensaio poderia por dúvida na preservação das condições originais do solo.



(1) 10 minutos; (2) 45 minutos; (3) 3 horas

FIGURA 2.4 – Relação entre Limite de Liquidez e quantidade de espatulações

Trabalhos como de Sherwood (1967) discutem este assunto. Este autor afirma que quanto mais manipulado é o material, maiores são as diferenças encontradas no Limite de Liquidez determinado entre o material natural e o material espatulado (Figura 2.4). Este autor encontrou resultados que mostram que numa argila laterítica a espatulação por 8 minutos não alterou significativamente o limite de liquidez inicial do material. Isto reforça a afirmação de Bernucci (2005, comunicação verbal) de que a espatulação no Método das Pastilhas tem como objetivo homogeneizar a amostra sem mudar as condições dos agregados.

2.7.2 – Importância da mineralogia e micromorfologia no comportamento geotécnico

Os trabalhos de diversos autores mostram a relação direta das características dos solos com seu comportamento geotécnico. Nóbrega (1995) é um exemplo, pois afirma que o comportamento mecânico do material está intimamente relacionado com a microestrutura da fase argilosa e do solo como um todo.

Gidigasu (1976) afirma também que o comportamento dos solos lateríticos é influenciado por sua gênese, características morfológicas, grau de intemperismo e composição química e mineralógica. O mesmo autor afirma ainda que no campo os solos que apresentam elevada resistência mecânica (solos lateríticos), podem ser interpretados através dos seguintes parâmetros: gênese e fatores pedogenéticos; grau de intemperismo; teor e mineralogia da fração argila.

Oliveira et al. (1992) percebeu características peculiares em solos de comportamento laterítico. São provenientes de latossolos, sendo assim de perfis espessos, textura homogênea ao longo do perfil, constituídos por material mineral em estado avançado de intemperismo, apresentando fração argila composta preferencialmente por óxidos de ferro (hematita, goethita), óxidos de alumínio (gibbsita) e minerais de argila do grupo 1:1 (caulinita), baixa capacidade de troca de cátions, inexistência de minerais primários alteráveis (<4%), $Ki < 2,2$, resquícios da rocha mãe e saprolito, textura franco-arenosa ou mais fina com baixos teores de silte.

O comportamento dos solos é dado principalmente pela fração argila, e esta consiste de uma assembléia de partículas, cujo tamanho é inferior a $2 \mu\text{m}$, composta principalmente por argilominerais (silicato de alumínio hidratados) associados a outros constituintes, como óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, produtos amorfos (de ferro, alumínio e sílica), etc. Característica importante desses argilominerais é sua grande superfície específica que lhe dá um comportamento físico-químico particular devido às cargas elétricas negativas na superfície. Estes constituintes argilosos formam, segundo Tessier & Pedro (1984), verdadeiros “sistemas”, que têm uma individualidade própria e cujas propriedades de conjunto decorrem essencialmente das possibilidades de “interação” entre as diferentes fases. Portanto, qualquer modificação na proporção, natureza e estado destas fases afeta as características globais do sistema.

Chauvel et al. (1976) descreve a importância do ferro em associação com argilominerais para o comportamento laterítico dos solos. Segundo este autor, o ferro mantém uma parte da argila inibida e relativamente estável no interior dessas partículas mais grosseiras, fazendo com que os solos, apesar do teor elevado em argila, não revelem uma textura argilosa. O autor afirma ainda que, a presença do ferro parece modificar certas características das argilas, principalmente a sua reatividade e comportamento. Os autores ainda advertem que não é todo ferro presente no solo responsável por modificar o

comportamento das argilas, sendo necessário distinguir os diferentes estados em que se encontra este elemento. O autor apresenta um exemplo: um solo de comportamento laterítico continha 11,9% de Fe₂O₃, retirou-se 0,3% de Fe₂O₃, e mesmo ainda contendo 11,6% de Fe₂O₃, o solo não mais apresentava um comportamento laterítico, e as argilas se comportavam como livres ao invés de "bloqueadas". Isto mostrou que apenas 0,3% de Fe₂O₃ contido na amostra desempenhava um papel ativo nos fenômenos de comportamento, os outros 11,6% provavelmente se individualizavam sobre a forma de hidrato férrico, podendo ser considerados inativos deste ponto de vista. Portanto, a modificação do comportamento resulta de uma ação específica dos íons de ferro, que se fixam nas bordas. Os hidratos férricos também se depositam sobre as faces basais ou se precipitam independentemente, mas não são essas formas que desempenham o papel principal.

2.8 - Correlações realizadas por Fernandes (2006)

Com o objetivo de correlacionar os resultados de diferentes métodos de classificação de solos com suas características físicas e mecânicas, Fernandes (2006) entre outras coisas, realizou correlações entre resultados obtidos pelo ensaio Método das Pastilhas (Godoy & Bernucci 2002), e análises por difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, atividades estas também realizadas neste trabalho. Apresentamos abaixo os métodos usados e as conclusões tiradas, esperando fornecer uma contribuição para este trabalho.

Seguindo a premissa de que os solos que apresentam comportamento laterítico caracterizam-se por possuírem a sua fração argila constituída pelo argilomineral caulinita, e elevada porcentagem de óxihidróxidos de ferro e alumínio que recobrem a caulinita, conferindo ao conjunto um aspecto "cimentado", diferentemente dos solos saprolíticos, Fernandes (2006) procurou diferenciar os solos lateríticos dos saprolíticos através das imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O aspecto "cimentado" (óxihidróxidos recobrindo argilominerais) dos minerais observado nas imagens foi o parâmetro usado para classificar as amostras como lateríticas e não-lateríticas.

Esta classificação feita através das imagens por MEV, foi comparada pelo mesmo autor com a classificação feita por ensaios geotécnicos, resultando em apenas 5% de discordância, mostrando quão contrastante é a micromorfologia dos solos lateríticos comparando-se com os não-lateríticos, demonstrada através das imagens aumentadas cerca de 3000 vezes.

Realizou-se também neste trabalho a classificação das amostras como lateríticas e não-lateríticas através da análise por difração de raios-x (DRX). Amostras onde foram identificados argilominerais mais ativos, como esmectitas e illitas, e ausência de óxidos e/ou hidróxidos, foram definidas como não-lateríticas, e onde há predominância de caulinita e presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio foram definidas como lateríticas. Os

solos onde identificou-se caulinita, e não óxidos e hidróxidos, foram definidas tanto como lateríticos como não-lateríticos, para fins de comparação com outros resultados.

As classificações das amostras feitas através da DRX concordaram com as classificações pelos ensaios geotécnicos, mostrando a correlação que existe entre a presença de certo conjunto de minerais e o comportamento geotécnico. Nas considerações finais deste trabalho se tentará explicar através da gênese dos minerais o êxito desta correlação.

2.9 - O Ferro e a Resistência Mecânica dos solos

Há muito tempo o elevado grau de estabilidade estrutural de muitos solos tem sido associado à presença de óxidos de ferro, inclusive neste trabalho. Isto acontece principalmente em regiões tropicais com solos do horizonte B, que mostram-se mais resistentes mecanicamente do que solos do horizonte C ou A, que contêm teores significativamente baixos de ferro livre.

Os argilominerais especificamente são bastante influenciados pela presença de óxidos de ferro, pois estes modificam suas características naturais como flocação e agregação, implicando em consequências físico-químicas nas propriedades dos solos como capacidade de retenção de água e permeabilidade.

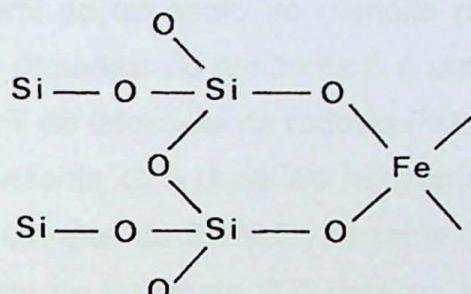
Embora a associação dos óxidos de ferro com os argilominerais tenha sido abordada por alguns autores, a maneira pela qual os óxidos de ferro estabelecem a ligação com as partículas de argila não é ainda perfeitamente compreendida. Mas, muitas características já compreendidas podem ser abordadas neste trabalho, facilitando a compreensão do comportamento dos solos conhecidos como lateríticos pelos engenheiros e que apresentam elevada resistência mecânica.

A revisão feita por Abreu (1986) menciona que os óxidos de ferro normalmente formam nos argilominerais um revestimento interno e externo. Neste contexto, Greenland e Oades (1968) concluíram, em seu trabalho, que "a associação argila-ferro apenas ocorre em condições ácidas. Para valores de pH elevados (básicos) necessários à formação da goethita bem cristalizada, os produtos obtidos são essencialmente uma mistura de cristais de goethita e caulinita". Estes mesmos autores, ao determinarem as cargas e superfície específica da fração argila com e sem óxidos de ferro, afirmam que estes, em solos vermelhos altamente oxidados, estão normalmente presentes como partículas de pequena dimensão cristalina e portadoras de carga negativa, não revestindo, deste modo, a superfície das argilas. Somando-se a isso, Borggaard (1982) e Jones e Uehara (1973) afirmam que óxidos de ferro amorfos são mais ativos do que sua fase cristalina.

Conforme as afirmações dos referidos autores, pode-se concluir que a reatividade dos óxidos de ferro está relacionada mais à sua superfície específica do que à sua forma mineralógica, e ainda que a superfície específica aumenta com o decréscimo de sua cristalinidade. Portanto, a associação da fase amorfa dos óxidos de ferro com os

argilominerais é importante na alteração das características físico-químicas dos solos. Os óxidos de ferro cristalinos constituem a fase inativa do ferro, não tendo relação direta com os cristais de argila, não promovendo seu revestimento e consequentemente não contribuindo para a sua agregação. Os compostos de ferro não cristalinos podem estabelecer ligações com os argilominerais desempenhando um papel fundamental na hidratação e microestruturação dos solos, mas se ocorrer condições de desidratação intensas, estes compostos evoluem rapidamente para um estado cristalino levando a uma modificação irreversível das propriedades do solo, assim como sua capacidade de retenção de água. Estes compostos de ferro são esferas de 30-100 Å de diâmetro, com carga positiva e atividade inversamente proporcional ao seu tamanho, promovendo assim maior floculação de argilominerais quanto menor seu tamanho.

Abreu (1986), Huang e Stumm (1973), e Schindler et al. (1976), têm explicado a adsorção de Fe e Al à superfície dos filossilicatos, propondo o seguinte modelo de adsorção do ferro à superfície do quartzo:



Neste modelo, o ferro assumiria coordenação tetraédrica, algo já conhecido da condição do Fe^{3+} na estrutura de outros minerais.

3 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 - Trabalho de Campo

Um trabalho de campo para observação dos perfis e coleta de amostras foi realizado, já que havia necessidade de maior quantidade de amostras do que o disponível, do conjunto coletado anteriormente. Os perfis revisitados foram nos mesmo locais, ou seja, na rodovia Itu-Jundiaí (onde foi coletada uma amostra extra, de horizonte B de latossolo sobre gnaisse do embasamento), no planalto de Campos do Jordão e em cortes da rodovia Piracicaba-Rio das Pedras. Os horizontes foram novamente identificados no perfil e coletados cerca de 10Kg de cada amostra.

No perfil na rodovia Itu-Jundiaí foram coletadas novas amostras em pontos próximos aos inicialmente selecionados: uma amostra no horizonte C e duas no horizonte B (somando 3 amostras); mais uma amostra foi coletada na mesma rodovia, sobre o gnaisse, em horizonte B de latossolo. No perfil de latossolo no planalto de Campos do Jordão foram coletadas amostras dos mesmos materiais do horizonte B e uma nova amostra no horizonte C (somando 3 amostras). No perfil de latossolo na rodovia Piracicaba-Rio das Pedras foram coletadas duas amostras no horizonte C e duas no horizonte B (somando 4 amostras). Ainda em Piracicaba, dentro do campus da ESALQ, no perfil de vertissolo foram coletadas uma amostra no horizonte C, uma no horizonte B e uma no horizonte vertical (somando 3 amostras).

A fim de garantir a identidade das amostras encontradas e coletadas e ter resultados de análises e ensaios das novas amostras, todas as 14 amostras foram submetidas às mesmas análises e ensaios feitos anteriormente. Isto permitiu também uma comparação entre os resultados das análises e dos ensaios já realizados na pesquisa anterior (em amostras coletadas dos mesmos horizontes, a menos da amostra nova de horizonte B sobre gnaisse da rodovia Itu-Jundiaí) com as que foram feitas, dando a oportunidade para observar se há mudanças de comportamento geotécnico significativas nos solos devido a pequenas mudanças em suas propriedades que, eventualmente, ocorram com a variação de localização devido ao trabalho de amostragem ter sido realizado com cerca de alguns meses ou um ano de diferença.

3.2 - Trabalhos de Laboratório

3.2.1 – Descrição macroscópica das amostras

Um primeiro reconhecimento das amostras foi realizado junto de uma breve descrição. Todas as amostras trabalhadas nesta etapa foram nomeadas com a sigla TF (Trabalho de Formatura) na frente, para distinguir das mesmas amostras coletadas na etapa anterior.

a - Amostras de latossolo proveniente da rodovia Itu-Jundiaí sobre granito de Itu

TFLIC – horizonte C, poucos torrões, arenosa, muitos minerais primários.

TFLIB1 – horizonte B, a 150 cm da superfície, torrões friáveis, quartzo de granulação grossa.

TFLIB2 – horizonte B, a 50 cm da superfície, torrões friáveis, granulação grossa com muitos grãos de quartzo, presença de raízes.

b - Amostras de latossolo proveniente da rodovia Itu-Jundiaí sobre gnaisse

TFLIB – horizonte B, argilosa, poucos grãos de quartzo e mais torrões.

c – Amostras de latossolo do planalto de Campos do Jordão sobre gnaisse

TFLCC – horizonte C, muitos torrões, muitos minerais primários em alteração.

TFLCBA – horizonte B amarela, bastante argilosa com torrões muito resistentes e presença de alguma muscovita de granulação grossa.

TFLCBv – horizonte vermelho, argiloso, com torrões mais friáveis do que anterior, mineral branco (talvez caulinita), abundância de quartzo de granulação fina.

d – Amostras de latossolo proveniente da alteração do diabásio de Piracicaba

TFLPC – horizonte C, muitos torrões, arenoso, preservação de certa foliação.

TFLPCB – horizonte C superior, presença de mineral branco em alguns torrões (talvez caulinita).

TFLPBC – horizonte B inferior, argiloso, muitos torrões, presença de raízes.

TFLPB – horizonte B, argiloso, presença de raízes.

e - Amostras de vertissolo proveniente da alteração de diabásio de Piracicaba

TFVPC – horizonte C, argiloso, torrões friáveis.

TFVPBi – horizonte B, argiloso, torrões friáveis. Amostra similar às anteriores.

TFVPV – horizonte vértico, muitos torrões pequenos e resistentes, grande quantidade de matéria orgânica.

3.2.2 – Preparação das Amostras

As amostras foram descritas em laboratório e depois sofreram separação de alíquotas para diversas análises e procedimentos da seguinte forma:

- Dois frascos de material representativo para moagem em moinho de bolas para obtenção de pó para análises químicas globais, térmicas e difratométricas.
- Um frasco com alguns fragmentos naturais, inclusive pequenos torrões que mostraram resistência ao esmagamento diferenciado, para posterior observação na microscopia eletrônica de varredura.
- Um ou dois fragmentos maiores (cerca de 20 a 40 cm³) para impregnação e posterior confecção de lâminas delgadas.
- Um saco plástico com cerca de 200g de amostra representativa para posterior análise granulométrica.

▪ O restante das amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP (LTP) onde serão realizados os ensaios geotécnicos.

Os frascos das quatorze amostras separados para moagem foram moídas em moinho de bolas SPEX, parte do resultante pó foram encaminhadas para análise térmica diferencial e gravimétrica no laboratório do IGc-USP (São Paulo) e para difração de raios-X no laboratório da ESALQ (Piracicaba).

As amostras separadas para a confecção de lâminas delgadas sofreram impregnação através do seguinte processo: foi preparada a mistura de resina, endurecedor e acetona; aplicou-se esta mistura nos vasilhames de plástico que continham as amostras cuidadosamente identificadas; foram submetidos a vácuo para facilitar o preenchimento dos poros da amostra com a mistura; foram colocados na estufa a 40°C para secagem e endurecimento. Após a impregnação foi escolhido o local para o corte das amostras endurecidas seguido da escolha das faces a serem laminadas.

Os sacos plásticos com amostras separadas para análise granulométrica foram encaminhadas para laboratório do Instituto de Geociências onde foram feitas quantificação e separação qualitativa das diversas frações para possível análise.

Os sacos com amostras encaminhadas para o LTP foram completamente peneiradas sob peneira #10 (2mm), para o uso nos ensaios geotécnicos. Cerca de 100g foram peneiradas sob peneira #40 (0,425mm) para a utilização no Método das Pastilhas.

3.2.3 - Ensaios Geotécnicos no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação

As amostras dos quatro perfis de alteração estudados foram levados ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP onde foram realizados os ensaios geotécnicos através do método das pastilhas, baseando-se na descrição de Godoy & Bernucci (2002).

3.2.3.1 - Preparação das Amostras

Os solos de cada amostra foram deixados expostos ao ar até que perdessem sua umidade natural para ser possível seu peneiramento. A seguir foi usado um almofariz de porcelana com pistilo protegido por borracha para o destorroamento da amostra. Usou-se as peneiras de 2mm (#10) e de 0,425mm (#40) de abertura nominal para o peneiramento da amostra seca. O controle do ponto ótimo de destorroamento foi feito pelo tato, de forma que a fração retida na peneira de 0,425 mm, ao ser friccionada, entre os dedos não liberava mais partículas de materiais finos. Os solos friáveis sem coesão, como as areias, mostraram-se com destorroamento muito fácil em oposição aos solos argilosos, conforme afirmado por Godoy & Bernucci (2002).

3.2.3.2 - Confecção das pastilhas e esferas



FIGURA 3.1 – Pastilhas e esferas confeccionadas

Separou-se, com o auxílio de uma proveta, cerca de 60 ml de cada solo passante na peneira #40, colocou-se sobre uma placa de vidro fosco para a espatulação, adicionou-se água no solo, de modo que a umidade inicial de espatulação seja a que confere ao solo uma consistência não tão dura ou tão mole que não possa ser remexida. As amostras foram amassadas e revolvidas, continuamente com o auxílio de uma espátula durante 8 minutos, adicionando-se água destilada em pequenos incrementos, na medida em que a massa de solo ficava mais seca. Após este processo de espatulação, a massa de solo homogeneizada foi colocada dentro de um anel de PVC de 70mm de diâmetro por 10mm de altura, e medida sua consistência através de um penetrômetro cônico de 60° de abertura e 60 gramas de peso, colocando-o junto à superfície da pasta e deixado cair por queda livre, sendo a penetração de 5mm indicativo da consistência ideal para a confecção das pastilhas e esferas. Muitas vezes a massa de solo não apresentou a consistência certa para esta confecção, precisando assim acrescentar água ou deixar secar, até atingir a consistência correta.

Ao atingir a consistência correta, parte da massa de solo foi imediatamente acondicionada com o auxílio dos dedos, em 2 anéis de aço inox de 35 mm de diâmetro interno e 10 mm de altura, a fim de amoldar as pastilhas. Isso foi feito sobre uma base plana recoberta com material plástico para evitar a aderência do solo sobre a base. A parte superior do anel foi rasada com o auxílio de um fio de nylon para retirar o excesso de solo. As pastilhas moldadas foram pesadas, e esses valores anotados.



FIGURA 3.2 – Pastilhas e esferas na estufa

As esferas foram confeccionadas com a massa de solo restante da moldagem das pastilhas. E para isso, foi moldada uma terceira pastilha, retirado o anel e dividido ao meio obtendo-se duas metades de pastilha. Com cada uma destas metades foi moldada uma esfera com as palmas das mãos, obtendo-se assim duas esferas para cada amostra de solo.

As esferas e pastilhas confeccionadas foram colocadas em estufa a 60°C, por no mínimo 5 horas e trinta minutos, acondicionadas em cápsulas de alumínio no caso das esferas e na posição vertical no caso das pastilhas.

Após o período de secagem, retirou-se as pastilhas e esferas da estufa, e esperou-se esfriar por cerca de 10 minutos. Procedeu-se então à pesagem da pastilha de solo seca com e sem o anel. Mediu-se a contração das pastilhas de solo através do seu diâmetro; foram feitas 3 medidas de diâmetro a cada 120°, sendo utilizado a média aritmética das 3 medidas.

3.2.3.3 - Reabsorção de água

A pastilha de solo seca é colocada sobre uma placa porosa recoberta com papel filtro, ambos dentro de um recipiente com água até o nível superior da placa porosa. Nestas condições a pastilha reabsorve água por capilaridade. Deixou-se em repouso por cerca de 3 horas, ficando-se atento para não deixar faltar água no recipiente onde foi colocado a placa porosa. A ascensão da água foi avaliada, marcando-se o tempo em que esta levou para penetrar toda a pastilha.

Após 3 horas, a expansão da pastilha é avaliada medindo-se o diâmetro com o auxílio de um paquímetro. As trincas observadas na pastilha são avaliadas através de três atribuições: 1) Ausência de trincas sem expansão ou ocorrência de poucas trincas, sem expansão, formando blocos resistentes; 2) Presença de certo trincamento com expansão; 3) Muito trincado ou ausência de trincas visíveis a olho nu com expansão.

Em seguida é feita nas pastilhas uma avaliação de penetração com cones de 60° de abertura e com pesos de 10 e 30 gramas. Inicialmente, utilizou-se do cone de 10 gramas, usando-se o de 30 gramas em seguida. Anotou-se a penetração nos dois casos.



FIGURA 3.3 – Avaliação de penetração por queda livre

Na seqüência, a pastilha de solo foi pesada juntamente do papel filtro, e após isto o papel filtro foi pesado separadamente para a subtração das massas. Todos os dados obtidos neste ensaio foram anotados.

3.2.3.4 - Imersão de esfera de solo em água

Este ensaio foi realizado concomitantemente com a reabsorção de água pelas pastilhas de solo seco, conforme descrito no item anterior. Uma das esferas de solo foi imersa em um recipiente de cerca de 50ml com água destilada para a avaliação de sua interação com este meio. Foram avaliados o tempo de interação e o produto final. Para a avaliação do produto final, foram usadas as seguintes atribuições: 1) Esfera trinca ou não se altera; 2) Blocos de dimensões milimétricos; 3) Partículas identificáveis a olho nu; 4) Pasta.

3.2.3.5 - Resistência ao esmagamento da esfera

Com a outra esfera, fez-se uma avaliação da coesão a seco. Tentou-se quebrar a esfera nas seguintes condições: 1) entre os dedos polegar e indicador; 2) entre o dedo polegar e uma superfície plana (tampo de uma mesa). Foram usadas as seguintes atribuições: 1) Esfera quebra-se entre os dedos polegar e indicador; 2) Esfera quebra-se entre o dedo polegar e uma superfície plana dura; 3) Esfera não se quebra.

3.2.3.6 - Processamento dos resultados dos ensaios

Tendo-se todos os resultados dos ensaios, procedeu-se em seu processamento realizando-se cálculos para se definir características de cada amostra, como por exemplo: umidade de moldagem, contração, expansão e reabsorção de água pelas pastilhas, assim como o índice de reabsorção de água. Através destes resultados classifica-se o caráter geotécnico de cada amostra.

A *Umidade de moldagem* das pastilhas compreende no valor em porcentagem da massa de água contida na pastilha recém moldada em relação à massa da pastilha seca.

A *Contração da pastilha* consiste no valor em porcentagem da diferença de diâmetro da pastilha recém moldada (valor interno dos anéis que é igual a 35mm) e a seca em relação ao diâmetro inicial.

A *Expansão da pastilha* é o valor em porcentagem da diferença de diâmetro da pastilha de solo antes e depois da reabsorção de água, em relação ao diâmetro da pastilha seca.

A *Reabsorção de água* pela pastilha compreende no valor em porcentagem da diferença entre a massa da pastilha após reabsorção de água e a massa seca, em relação à massa seca.

O *Índice de reabsorção de água* consiste no valor entre a diferença das porcentagens de água reabsorvida e a umidade de moldagem em relação à porcentagem de umidade de moldagem.

Estes resultados são apresentados na tabela 3.2.

3.2.3.7 - Classificação Geotécnica das amostras

Através dos resultados obtidos de todos os ensaios e cálculos foi possível classificar a qualidade geotécnica de cada amostra, principalmente utilizando-se o *índice de reabsorção* e as penetrações dos cones de 10 e 30g sobre as pastilhas após a reabsorção de água, bem como a tabela classificatória proposta por Godoy & Bernucci (2002) (anexo C). A classificação obtida desta forma foi ligeiramente adaptada conforme orientação da co-orientadora deste trabalho (Profa. Liedi Bernucci), a partir de sua experiência. Assim, o caráter geotécnico de cada amostra foi determinado, podendo-se comparar os resultados. A classificação proposta encontra-se apresentada na tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Classificação geotécnica das amostras pelo Método das Pastilhas.

Amostra	Classificação	Amostra	Classificação
Latossolo de Itu - granito		Latossolo de Piracicaba	
TFLIB2	Laterítico típico	TFLPB	Laterítico argiloso
TFLIB1	Laterítico típico	TFLPBC	Não Laterítico argiloso
TFLIC	Não Laterítico siltoso	TFLPCB	Não Laterítico argiloso
Latossolo de Itu - gnaisse		TFLPC	Não Laterítico argiloso
TFLIB	Laterítico típico		
Latossolo de Campos do Jordão		Vertissolo de Piracicaba	
TFLCBa	Laterítico argiloso	TFVPV	Não Laterítico orgânico
TFLCBv	Não Laterítico siltoso	TFVPBi	Não Laterítico argiloso
TFLCC	Não Laterítico arenoso	TFVPC	Transicional argiloso

TABELA 3.2 – Resultados dos cálculos feitos sobre os resultados dos ensaios.

Amostra	Umidade de Moldagem	Contração	Expansão	Reabsorção de água	Índice de reabsorção de água
Latossolo de Itu - granito					
TFLIB2	34%	8%	1,6%	26%	-0,23
TFLIB1	39%	9%	2%	25%	-0,34
TFLIC	38%	3%	9,2%	60%	0,6
Latossolo de Itu - gnaisse					
TFLIB	49%	11%	1,9%	30%	-0,39
Latossolo de Campos do Jordão					
TFLCBA	60%	8%	9,1%	72%	0,2
TFLCBV	36%	4%	11,4%	58%	0,6
TFLCC	40%	5%	7,2%	60%	0,51
Latossolo de Piracicaba					
TFLPB	54%	14%	10,6%	45%	-0,17
TFLPBC	60%	16%	21,3%	93%	0,55
TFLPCB	55%	13%	15,8%	69%	0,26
TFLPC	49%	9%	12%	84%	0,7
Vertissolo de Piracicaba					
TFVPV	43%	13%	15,3%	53%	0,23
TFVPBi	44%	15%	18,3%	71%	0,59
TFVPC	43%	10%	9,6%	70%	0,62

3.2.4 – Análise Granulométrica

Os resultados de análise granulométrica são bastante importantes para a compreensão do comportamento geotécnico dos solos, pois é devido aos argilominerais e suas propriedades físico-químicas que os solos adquirem características desejáveis para obras de engenharia. Por isso, as 14 amostras foram analisadas quantitativamente e qualitativamente.

A análise granulométrica qualitativa foi feita por decantação e peneiramento. Após desagregação e secagem ao ar, foi eliminada a matéria orgânica com água oxigenada e dispersão com pirofosfato de sódio. A fração argila (0 a 0,002mm) e silte fino (0,002 a 0,02mm) foram separados das frações mais grosseiras por lavagens sucessivas com sifão, considerando o tempo de decantação (lei de Stokes) das partículas maiores que as frações

argila e silte fino. As frações maiores, silte grosso (0,02 a 0,05mm), areia fina (0,05 a 0,2mm), areia grossa (0,2 a 2mm) foram separadas por peneiramento.

A análise quantitativa foi feita pelo Método da Pipeta de "Robinson". Após o solo ter secado ao ar, foi peneirado e dispersado com pirofosfato de sódio por agitação após a destruição de matéria orgânica pela água oxigenada. As frações argila, silte fino foram determinadas nas alíquotas feitas pela pipeta de "Robinson", após um tempo de sedimentação segundo a lei de Stokes. As frações silte grosso, areia fina, areia grossa, areia muito grossa e grânulos foram determinadas por peneiramento.

Os resultados das frações menores que 2mm foram obtidas no laboratório do Instituto de Geociências da USP, e as frações maiores, areia muito grossa (2 a 4,76mm) e grânulos (4,76 a 9,52mm), foram obtidas no laboratório da Escola Politécnica da USP. Todos os dados foram unidos, processados, retirando-se os erros obtidos e os valores de umidade encontrados. A tabela com todos os valores estão apresentados no anexo D.

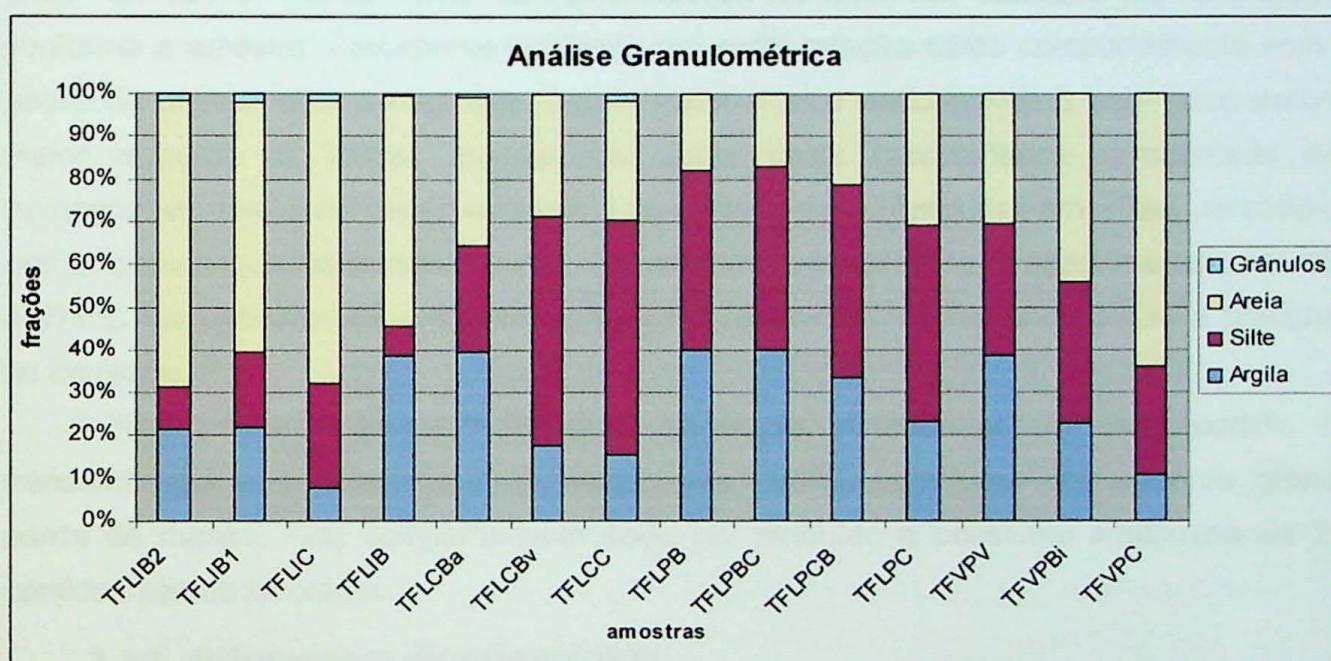


FIGURA 3.4 – Gráfico dos resultados da análise granulométrica

3.2.5 - Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

Esta análise foi aplicada nas 14 amostras agora trabalhadas tendo como objetivo a identificação dos argilominerais e seus constituintes, ajudando na interpretação dos resultados de outras análises realizadas nesta pesquisa. A posição nos termogramas, a forma e a intensidade dos picos endo e exotérmicos, pode ajudar na identificação dos argilominerais, seus constituintes e suas misturas. No entanto, quando se trata de misturas, segundo Santos (1975), como é o caso das amostras deste trabalho, esta análise fica restrita, pois a posição, os picos e intensidade das transformações são alteradas. Com estas informações em mente os termogramas (anexo E) foram estudados e interpretados.

Primeiramente pode-se notar um certo padrão em certos comportamentos nos diferentes gráficos. Todos os termogramas apresentaram um pico endotérmico numa temperatura menor que 100°C, variando em intensidade, com uma consequente perda de massa, também variada, que revela provavelmente a presença de água preenchendo capilares na argila com talvez uma contribuição da matéria orgânica, sendo mais intenso o pico, quanto maior a quantidade de água. Isto pode explicar a consequente perda de massa nesta temperatura, tanto maior quanto mais água capilar contida na amostra, por isso é que percebe-se uma relação íntima entre a perda de massa e a intensidade do pico endotérmico.

Percebe-se também que alguns resultados apresentaram um pico endotérmico em geral de pouca intensidade entre 100-300°C, sendo característico das transformações da matéria orgânica, das águas capilar e adsorvida e, ainda, da hidroxila ligada aos cátions.

Um outro padrão presente em todas as amostras é uma transformação endotérmica entre 450-600°C, característica da desidroxilação da caulinita, variando em intensidade conforme a amostra. Percebe-se também uma certa relação deste comportamento com a perda de massa, pois parece que quanto maior o pico endotérmico a esta temperatura, maior a perda de massa apresentada. Junto desta característica apresentada nos termogramas que identificam o estado e a quantidade de caulinita nas amostras, percebe-se outras duas pequenas transformações, endotérmica e exotérmica, a aproximadamente 950 e 975°C respectivamente, presentes em alguns resultados, confirmado assim a presença de caulinita.

Nas amostras do perfil formando vertissolo, percebe-se um certo padrão de transformação endotérmico a aproximadamente 400°C, com uma consequente grande perda de massa. Este comportamento pode ser atribuído a possíveis argilominerais 2:1 contidos nestas amostras.

3.2.6 - Difratometria de raios-X (DRX)

As análises realizadas e interpretadas de DRX tiveram como objetivo principal analisar o grau de cristalização de cada mineral, quer seja minerais primários em alteração, quer secundários se formando, fortalecendo a análise por microscopia óptica. Deu-se atenção especial à presença e às características dos oxi-hidróxidos de Fe e Al, pois são essenciais na presente pesquisa por terem grande importância no comportamento dos solos lateríticos estudados.

Estas análises foram feitas no NUPEGEL-USP utilizando-se de um difratômetro Philips PW1830. Os difratogramas de amostra total foram obtidos com θ variando de 3 a 65 graus, contagem de 1 segundo por passo de 0,05grau/ θ . Na interpretação dos difratogramas foi utilizada a coleção de fichas ICDD (International Center for Diffraction Data 1992) para o reconhecimento dos picos.

Em todas as amostras há quartzo, e isto representa uma dificuldade para a análise de pequenas frações da amostra como os argilominerais e oxihidróxidos, pois o quartzo inibe o aparecimento de seus picos no difratograma. Por isso, a fim de aumentar o grau de detecção, e detalhar mais a análise dos argilominerais e dos oxihidróxidos, as amostras foram submetidas a decantação para separar a fração argila, eliminando assim grãos maiores, como os de quartzo. Esta fração separada, ainda úmida, foi adicionada a uma placa de vidro de 30x30mm no lado liso, e deixada sob temperatura ambiente para secagem.

Encontrou-se certa dificuldade neste procedimento, devido a propriedade de contração da fração argila ao secar, fazendo com que esta descole da lâmina de vidro. Depois de muitas tentativas mal sucedidas de fazer com que a argila permanecesse colada na lâmina de vidro depois da secagem, percebeu-se que quanto menor a espessura da camada de argila aplicada na lâmina de vidro, mais fácil seria permanecer colada depois da secagem. Outro meio usado também, foi colar os fragmentos soltos da argila com cola tipo bastão. Aplicando-se cola sobre outra placa de vidro, e pressionando-a sobre a que continha a argila solta, estas deixavam a placa de vidro anterior e grudavam quase que perfeitamente sobre a nova placa. O uso da cola não prejudica a análise, pois é amorfia, ou seja, não contém estrutura cristalina, não criando picos no difratograma. A análise da fração argila pode identificar os minerais apresentados na tabela 3.3.

Na difração de raios-X, muitos grupos de argilominerais acabam sendo difíceis de serem corretamente identificados devido a sua semelhança cristalina. Por exemplo: o pico a 14Å da face 001 da estrutura cristalina da esmectita, clorita e da vermiculita são iguais; ou o pico a 7Å correspondente da face 001 da caulinita, pode ser confundida com o pico também a 7Å da face 002 da esmectita, e assim por diante. Por isso, outras preparações com a fração argila podem ajudar a distinguir no difratograma cada grupo de argilominerais. O aquecimento a 500°C por exemplo, reduz o pico a 14Å correspondente da face 001 da esmectita e da vermiculita para 10Å; a glicolagem faz com que o pico a 14Å correspondente da face 001 da esmectita, aumente para 18Å. Assim, a glicolagem e o aquecimento das amostras onde aparecem no difratograma pico a 14Å, faz com que diferencie os diversos grupos de argilominerais, conforme mostrada na tabela 3.4.

As amostras que apresentaram pico a 14Å foram submetidas a glicolagem, e aquecimento a 500°C por 4 horas, para se identificar corretamente o mineral presente, e em seguida analisadas por difração de raios-X, obtendo-se os resultados apresentados na tabela 3.5.

TABELA 3.3 - Análise da fração argila por difração de raios-x

Amostra	Minerais identificados
Latossolo de Itu - granito	
TFLIB2	Caulinita; gibbsita; goethite
TFLIB1	Caulinita; gibbsita; goethite
TFLIC	Caulinita
Latossolo de Itu - gnaisse	
TFLIB	Caulinita; gibbsita; goethite
Latossolo de Campos do Jordão - gnaisse	
TFLCBa	Caulinita
TFLCBv	Caulinita
TFLCC	Caulinita; gibbsita; goethite
Latossolo de Piracicaba - diabásio	
TFLPB	Caulinita; goethite
TFLPBC	pico a 7 e 14Å(?); Goethita;
TFLPCB	pico a 7 e 14Å(?); goethita
TFLPC	pico a 7 e 14Å(?)
Vertissolo de Piracicaba - diabásio	
TFVPV	pico a 7 e 14Å(?)
TFVPBi	pico a 7 e 14Å(?)
TFVPC	Caulinita; goethita

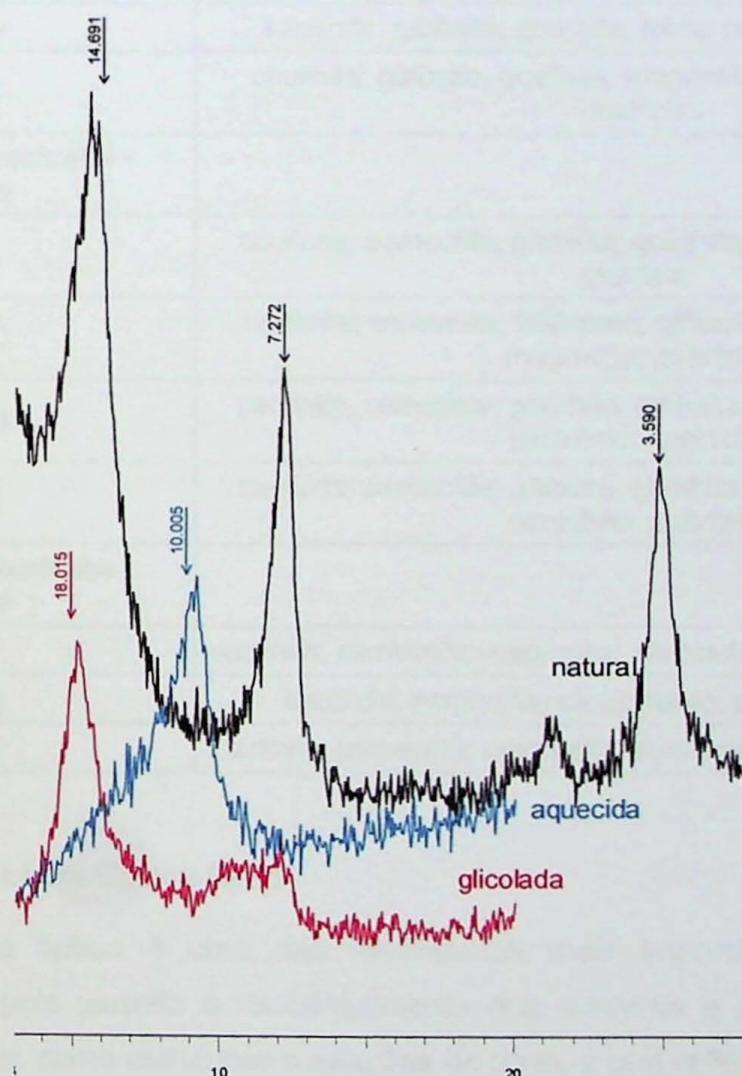
TABELA 3.4 – Picos característicos no difratograma após tratamento das amostras

Minerais	Pico sob condições naturais	Pico após glicolagem	Pico após aquecimento a 500°C
Esmectita	14 Å	18 Å	10 Å
Clorita	14 Å	14 Å	14 Å
Vermiculita	14 Å	14 Å	10 Å
Caulinita	7 Å	7 Å	-

TABELA 3.5 – Resultado da difração de raios-x após glicolagem e aquecimento

Amostra	Após glicolagem	Após aquecimento a 500°C	Mineral presente
Latossolo de Piracicaba - diabásio			
TFLPBC	Pico a 7 e 18Å	Pico a 10Å	Esmectita e caulinita
TFLPCB	Pico a 7 e 18Å	Pico a 10Å	Esmectita e caulinita
TFLPC	Pico a 7 e 18Å	Pico a 10Å	Esmectita e caulinita
Vertissolo de Piracicaba - diabásio			
TFVPV	Pico a 7 e 18Å	Pico a 10Å	Esmectita e caulinita
TFVPBi	Pico a 7 e 18Å	Pico a 10Å	Esmectita e caulinita

FIGURA 3.5 – Comparação de difratogramas de amostra natural, após glicolagem e aquecimento



As análises das amostras naturais, fração argila, e em algumas amostras após glicolagem e aquecimento para a identificação mais exata de argilominerais, resultaram na identificação dos minerais contidos na tabela 3.6. Os difratogramas estão apresentados no anexo F.

TABELA 3.6 – Minerais identificados através das análises por difração de raios-x, complementados por outras análises

Amostra	Minerais identificados
Latossolo de Itu - granito	
TFLIB2	caulinita; feldspato; gibbsita; goethita; mica; magnetita; quartzo; vermiculita;
TFLIB1	caulinita; feldspato; gibbsita; goethita; magnetita; mica; quartzo; vermiculita;
TFLIC	caulinita; feldspato; gibbsita; mica; quartzo;
Latossolo de Itu - gnaisse	
TFLIB	caulinita; gibbsita; goethita; mica; quartzo;
Latossolo de Campos do Jordão - gnaisse	
TFLCBa	caulinita; feldspato; gibbsita; goethita; mica; quartzo;
TFLCBv	caulinita; gibbsita; goethita; mica; plagioclásio; quartzo;
TFLCC	caulinita; gibbsita; goethita; magnetita; mica; plagioclásio; quartzo;
Latossolo de Piracicaba - diabásio	
TFLPB	caulinita; esmectita; gibbsita; goethita; hematita; magnetita; quartzo;
TFLPBC	caulinita; esmectita; feldspato; gibbsita; goethita; hematita; magnetita; quartzo;
TFLPCB	caulinita; esmectita; goethita; gibbsita; hematita; magnetita; piroxênio; quartzo;
TFLPC	caulinita; esmectita; gibbsita; goethita; hematita; magnetita; piroxênio; quartzo;
Vertissolo de Piracicaba - diabásio	
TFVPV	caulinita; esmectita; magnetita; plagioclásio; piroxênio; quartzo;
TFVPBi	caulinita; esmectita; plagioclásio; piroxênio; quartzo;
TFVPC	caulinita; esmectita; magnetita; plagioclásio; piroxênio; quartzo;

3.2.7 - Microscopia Óptica (MO)

O microscópio óptico é uma das ferramentas mais importantes no estudo dos materiais naturais, pois permite o reconhecimento dos minerais e as relações espaciais entre os constituintes, como estruturas e relações de corte, o que reflete aspectos genéticos. Materiais intemperizados são de observação mais difícil devido às reduzidas dimensões em que ocorrem; mesmo assim, são observados pois os agregados podem ser reconhecidos e

os minerais pelo menos em parte identificados. Esta técnica permite uma identificação estrutural das associações minerais, e mesmo a observação de estruturas orgânicas no solo, quando presentes.

A análise por microscopia óptica foi realizada no IGc-USP, com lâminas delgadas com espessura média de 30 μ m, e visou à identificação de minerais tendo como base os resultados da difração de raios-x, e observou-se as características e relações entre elas. Deu-se atenção especial às características dos argilominerais e como se relacionavam com os produtos ferruginosos, sempre tentando encontrar relações com o comportamento geotécnico observado. Alguns minerais não identificados pela difração de raios-x foram encontrados nesta análise, complementando assim a identidade mineral das amostras.

As observações das lâminas delgadas por microscopia óptica, junto dos resultados por difração de raios-x, resultaram nas seguintes descrições sobre cada amostra:

a - Amostras de latossolo proveniente do planalto de Campos do Jordão sobre Gnaiss

TFLCC – apresenta pouca evolução pedogenética, o plasma secundário ferruginoso está distribuído heterogeneamente, encontra-se minerais primários em alteração ou seus pseudomorfos preservados. A magnetita encontra-se produzindo plasma ferruginoso, este alocando-se principalmente ao seu redor e em descontinuidades intraminerais da biotita; há a preservação de alguns poucos grãos de muscovita e plagioclásio, assim como de grande quantidade de quartzo; gibbsita e caulinita no fundo matricial e ocupando antigas posições do plagioclásio, e pseudomorfos de biotita preservados.

TFLCBA – Há ainda a preservação da estrutura da rocha primária, típica de gnaiss, com grande quantidade de quartzo distribuída homogeneamente, encontra-se poucos minerais primários, mas observa-se ainda alguns fragmentos de feldspato e mica, e/ou seus pseudomorfos de gibbsita e caulinita. Os produtos ferruginosos encontram-se pouco distribuído, se concentrando ainda próximo do local de sua formação.

TFLCBv – mais evoluído pedogeneticamente, os grãos de quartzo estando mais bem distribuídos, ainda há presença de pseudomorfos de mica, plasma ferruginoso mais homogeneizado mas ainda com certa heterogeneidade indicada pela diferença de intensidade de ferro em várias partes da amostra, e em algumas zonas dando alguma evidência do início da formação de agregados. Ainda alguns poucos grãos esqueléticos de plagioclásio e muscovita, esta última se fragmentando e apresentando plasma ferruginoso em suas descontinuidades intraminerais; muita gibbsita nas descontinuidades intercristalinas de quartzo. Há a formação de goethita e caulinita.

b – Amostras de latossolo de corte da rodovia Itu-Jundiaí sobre granito

TFLIC – grãos esqueléticos de magnetita, fragmentos de feldspato, e grande quantidade de quartzo em granulação grossa, alguns arredondados e faltando pedaços. Plasma contendo cristais de gibbsita e caulinita, e em algumas áreas mais ferruginoso.

Ocorre vermiculita como pseudomorfo da biotita com goethita nas descontinuidades intraminerais, muitas vezes com bordas de caulinita, ilustrando bem a evolução pedogenética ocorrida com a lixiviação no perfil; em muitos pseudomorfos encontra-se restos de biotita residuais.

TFLIB1 – ainda ocorre quartzo em grande quantidade, mas agora mais fragmentado e com fissuras; esqueletos de biotita, feldspato, e de magnetita com minerais acessórios inclusos. Permanece ainda a ocorrência de vermiculita como pseudomorfo da biotita, mas em menor quantidade e mais fragmentados; mais visíveis a presença de caulinita nas bordas. Fundo matricial ferruginoso distribuído mais uniformemente, mas com alguns locais ainda mais avermelhados pelo Fe do que outros; contendo goethita, gibbsita e caulinita. Plasma secundário formando agregados.

TFLIB2 – características similares a horizonte B1 anterior, mas com evidências de maior evolução pedológica. Ainda ocorre quartzo bem distribuído na amostra, de granulação grossa, esqueletos de feldspato, biotita e magnetita; encontrando-se sobre o feldspato pequenos cristais de gibbsita. Observa-se ainda vermiculita como pseudomorfo da biotita, mas em menos quantidade e menos preservados do que no horizonte C, e muitas vezes com aglomerações de cristais de caulinita associados. Plasma secundário ferruginoso com goethita formando agregados, mais intensamente do que horizonte B1.

c – Amostra de latossolo proveniente da alteração do gnaisse de Itu

TFLIB – mais evoluído pedologicamente do que anteriores, com a preservação de alguns minerais residuais, como principalmente quartzo que se encontra bastante fragmentado e bastante distribuído, assim como eventuais fragmentos de mica. Fundo matricial bastante ferruginoso, distribuído homogeneamente, com possivelmente caulinita, gibbsita e goethita, com formação intensa de agregados.

d – Amostras de latossolo proveniente da alteração do diabásio de Piracicaba

TFLPC – ocorrência de quartzo e outros minerais primários em fase de alteração com a formação de minerais secundários. Concentrações de gibbsita ocupando antigas posições do feldspato associados talvez com restos deste; concentrações de plasma ferruginoso associado a grãos de magnetita em alteração, contendo principalmente goethita e hematita onde ocorre maiores concentrações deste plasma; piroxênio alterando-se para esmectita com caulinita e goethita ocupando descontinuidades interminerais. Plasma ferruginoso distribuído de forma heterogênea, textura característica de início de evolução pedogênica, mas algumas vezes aparentando nas concentrações de ferro início da formação de agregados.

TFLPCB – textura geral apresentando maior evolução pedogenética do que horizonte C anterior, com diminuição de grandes concentrações de ferro localizadas, pois agora apresentam-se mais distribuídas, mas ainda com goethita e hematita, e associadas com a magnetita e piroxênio em alteração, estes estando mais fragmentados. Encontra-se ainda

gibbsita como pseudomorfo do feldspato; grãos de piroxênio alterando-se para diferentes fases minerais, como esmectita, caulinita e gibbsita, mostrando a heterogeneidade de percolação d'água encontrada neste horizonte, tendo em vista estes minerais serem característicos de sistemas de drenagens diferentes. Há ainda microtubos com materiais orgânicos em sua parte interna.

TFLPBC – mesmo estando mais alterado e evoluído do que horizontes inferiores descritos anteriormente, ainda há a preservação de restos de minerais primários, como feldspato. Ainda ocorre magnetita em grande quantidade associado ao plasma ferruginoso, mas agora encontra-se mais distribuído, quase que homogeneamente na amostra e de forma mais concentrada, formando goethita e hematita, associando-se com caulinita no fundo matricial. Permanece também a presença de indicações de atividade orgânica, como a ocorrência de microtubos com aglomerações orgânicas em sua parte interna. Ocorre mais frequentemente a presença de gibbsita nos restos de pseudomorfo de piroxênio. Há também aparentemente início de formação de agregados.

TFLPB – Maior evolução pedogenética do perfil, com a presença de poucos grãos de quartzo, menor tamanho de magnetita, e plasma ferruginoso ainda com goethita e hematita, agora ainda mais homogêneo com início da formação de agregados. Ocorrem pseudomorfos de piroxênio com esmectita, caulinita e gibbsita, indicando ainda certa heterogeneidade de percolação d'água neste horizonte.

e - Amostras de vertissolo proveniente da alteração de diabásio de Piracicaba

TFVPC – presença de muitos minerais primários, como plagioclásio, magnetita e piroxênio, muitos sãos, outros apresentando diferentes estágios de alteração. Formação de esmectita e caulinita como pseudomorfos do piroxênio. Indicação do início da formação de agregados.

TFVPBi – menos quantidade de plagioclásio e piroxênio, mais alterados, mesma quantidade de magnetita, e a esmectita como produto de alteração do piroxênio se misturando no fundo matricial. Há uma maior indicação da formação de agregados.

TFVPV – horizonte diferenciado em relação aos outros dois deste perfil, pois não acompanha a seqüência de evolução traçada pelas outras duas amostras. Se separa em dois materiais, uma pequena parcela se assemelha muito com os outros horizontes, e o resto da amostra apresenta um fundo matricial fino com esmectita e caulinita, grãos esqueléticos de plagioclásio, quartzo, piroxênio e presença de matéria orgânica. Magnetita encontra-se alterada contribuindo com a produção do plasma secundário. Há a formação intensa de agregados, bem evidente na amostra.

As imagens realizadas nesta análise estão apresentadas no anexo H.

3.2.8 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permite a observação de materiais em grandes aumentos e, quando acoplada ao sistema de dispersão de energia (EDS ou EDX), permite

ainda a análise química qualitativa microlocalizada, o que auxilia também na identificação mineralógica. No estudo de materiais geológicos, bem como em outras aplicações, são de interesse as observações de morfologia, dimensões e relações espaciais entre as partículas e agregados constituintes.

Tem como fundamento a formação de uma imagem eletrônica ampliada através de uma lente, formada pelo comportamento óptico dos raios-X gerados pela interação do feixe eletrônico com o objeto de estudo.

O equipamento é constituído por três partes principais: a) uma fonte emissora de elétrons, que são acelerados pelo anodo, b) um sistema de formação de imagem constituído por lentes objetivas e c) um sistema de conversão da imagem, formado por um anteparo fluorescente que converte a imagem eletrônica em uma fotografia ou uma imagem de televisão.

Um feixe de elétrons, gerado num filamento submetido a alta voltagem, no canhão, é desmagnificado por um conjunto de lentes eletromagnéticas que agem como condensadores. Este feixe é focalizado sobre a amostra, e passa por bobinas defletoras, perfazendo uma varredura sobre pequena região da mesma. Como consequência, são emitidos, entre os quais destacam-se inicialmente os elétrons secundários. Estes elétrons são captados por um detector cuja resposta modula o brilho de um tubo de raios catódicos, e que é varrido em sincronismo com o feixe eletrônico. Portanto, a cada ponto da amostra corresponde um ponto da tela, e nele é mapeada a resposta do objeto ao feixe de excitação.

Apenas as amostras TFLIC e TFLIB2 foram submetidas a esta análise. Estas foram escolhidas devido a serem amostras de um mesmo perfil de alteração e por apresentarem maior contraste de comportamento geotécnico, respectivamente não-laterítico e laterítico típicos, do horizonte C e B. Foram escolhidos fragmentos representativos de torrões naturais destas duas amostras. Esta escolha teve como objetivo propiciar uma comparação de estrutura entre duas amostras, observando o contraste da ação dos óxihidróxidos de ferro e alumínio como “cimentadores” de agregados, evidenciando sua importância para o comportamento geotécnico apresentado.

A observação das imagens destas duas amostras permitiu comparar suas estruturas, evidenciando a ação dos óxihidróxidos como revestidores de argilominerais. Foram observados facilmente na amostra TFLIC cristais de caulinita, assim como estruturas de minerais primários em alteração, e em alguns locais, de forma heterogênea, ocorre um plasma secundário preenchendo poros e revestindo argilominerais. Já na amostra TFLIB2, percebe-se facilmente, principalmente na imagem geral aumentada 50 vezes, agregados, não sendo mais observados poros livres nem caulinita com facilidade, pois ocorre um plasma secundário preenchendo poros e dando um aspecto “cimentado” na amostra, assim como observado por Fernandes (2006). Este plasma secundário é, provavelmente, um

produto ferruginoso que envolve argilominerais de forma homogênea em toda a amostra, sendo certamente responsável pela elevada resistência mecânica observada.

Concomitantemente a isto, foram analisados também fragmentos de pastilhas destas duas amostras, as mesmas utilizadas no ensaio geotécnico apresentado, após suas preparações normais. Isto propiciou uma comparação da estrutura dos torrões naturais com a das pastilhas, tentando mostrar até que ponto sua preparação, incluindo espatulação, altera suas condições, influindo em seu comportamento geotécnico.

A observação das imagens das pastilhas mostrou que o contraste de estrutura notado nas imagens dos torrões naturais não permaneceu, pois ambas pastilhas mostram-se pouco porosas, não explicitando argilominerais, e com o aspecto “cimentado” característico dos solos lateríticos. Isto se torna principalmente importante para a amostra TFLIC, pois no seu estado natural mostrava-se porosa, com os argilominerais sem recobrimento, mudando estas características após a confecção das pastilhas. É importante salientar que somente material de granulometria menor que 0,425mm é utilizado na confecção das pastilhas, fazendo assim com que haja maior organização entre os constituintes do solo e consequentemente uma menor porosidade.

As imagens realizadas nesta análise estão apresentadas no anexo G.

3.2.9 – Análise Química por Fluorescência de Raios-x (FRX)

A mineralogia das amostras já foi definida de forma qualitativa e estudada através de outras análises. No entanto, a composição química dos materiais estudados não foi identificada por outras técnicas, e isso é importante, pois embora os minerais tenham sua composição química definida, existem produtos mal cristalizados, além de substituições de elementos que podem ocorrer dentro dos minerais.

Principalmente no que diz respeito aos produtos mal cristalizados, como os ferruginosos, são muito importantes para o comportamento geotécnico segundo diversos autores, e portanto poderão ser melhor estudados através desta análise.

Os valores apresentados na tabela 3.7 (% em peso dos óxidos) foram obtidos por análises por fluorescência de raios-x, com amostras preparadas com pastilhas prensadas, sendo que o valor da perda ao fogo foi obtido por gravimetria.

Os resultados da análise química das amostras mostraram uma relação direta com seu material de origem, pois as proporções entre os elementos se mantiveram similares ao que se espera da rocha sã. As amostras de Itu que apresentam grande quantidade de quartzo, e menor de biotita e feldspato, mostraram elevada porcentagem de SiO_2 e menor de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , assim como as amostras de Campos do Jordão que seguiram a mesma tendência; as amostras de Piracicaba mostraram-se diferentes, mas também seguindo a composição de sua rocha de origem, que tem menor quantidade de quartzo e maior de minerais ferromagnesianos, como piroxênio e biotita, apresentando-se assim com menor porcentagem de SiO_2 e maior de Fe_2O_3 e MgO .

TABELA 3.7 – Composição química determinada por Fluorescência de raios-x, em % em peso dos óxidos

Latossolo de Itu - granito	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Perda Fogo
TFLIB2	74,81%	13,73%	0,03%	0,01%	0,02%	0,02%	2,14%	0,36%	0,03%	2,82%	5,56%
TFLIB1	69,45%	17,37%	0,03%	0,01%	0,03%	0,02%	2,08%	0,41%	0,04%	3,32%	6,46%
TFLIC	62,60%	23,35%	0,12%	0,02%	0,01%	0,02%	1,03%	0,41%	0,07%	3,54%	8,42%
Latossolo de Itu - gnaisse											
TFLIB	72,32%	15,33%	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%	0,18%	0,68%	0,04%	4,16%	6,72%
Latossolo de Campos do Jordão											
TFLCBa	55,59%	24,85%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	1,00%	0,70%	0,04%	7,57%	10,45%
TFLCBv	56,10%	28,10%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,84%	0,55%	0,09%	4,24%	10,21%
TFLCC	56,79%	28,92%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,71%	0,41%	0,06%	3,23%	10,38%
Latossolo de Piracicaba											
TFLPB	37,01%	20,05%	0,27%	0,66%	0,23%	0,02%	0,28%	5,46%	0,16%	25,79%	9,65%
TFLPBC	37,05%	18,76%	0,38%	1,25%	0,37%	0,06%	0,43%	5,18%	0,11%	26,20%	9,81%
TFLPCB	39,85%	18,44%	0,36%	1,36%	0,32%	0,06%	0,45%	4,89%	0,12%	24,08%	9,42%
TFLPC	41,90%	17,83%	0,43%	1,22%	0,35%	0,15%	0,61%	4,97%	0,09%	22,90%	8,80%
Vertissolo de Piracicaba											
TFVPP	48,22%	12,99%	0,20%	0,55%	1,18%	0,49%	0,95%	6,58%	0,31%	17,69%	9,87%
TFVPPBi	48,30%	16,18%	0,14%	1,25%	3,03%	1,33%	1,40%	4,15%	0,47%	17,88%	6,40%
TFVPC	48,90%	15,14%	0,14%	1,42%	3,65%	1,56%	1,43%	3,87%	0,51%	17,21%	5,21%

A composição química das amostras mostram também uma relação direta do seu material de origem e suas frações granulométricas, isto devido aos processos de intemperismo e de pedogênese. A fração areia é basicamente reflexo do quartzo presente na rocha mãe, que não foi intemperizado, ou que o foi apenas parcialmente, enquanto a fração argila, mais fina, representa essencialmente os minerais formados pelas reações de intemperismo; a fração silte pode tanto representar parte do quartzo bastante fragmentado como parte dos minerais supérgenos em agregados não destruídos durante a análise, como também, ainda, casos excepcionais de minerais supérgenos em cristais desenvolvidos em dimensões maiores que as normais. Por isso, quanto maior a granulometria maior o teor em SiO₂ da amostra.

3.2.10 - Determinação da cor do solo

Para se determinar a cor do solo foi usado a tabela de cores de Munsell (Munsell Soil Color Charts – 1994 – revised edition) no laboratório de Pedologia da Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas da USP. Uma pequena porção de solo foi comparada com os diversos padrões que constituem a tabela de cores, até se encontrar um padrão próximo da cor do solo ou que corresponda a cor exatamente igual, e anotado o matiz, valor e croma do padrão identificado. A determinação da cor do solo depende de vários fatores, como a

influência pessoal, condições de iluminação, etc., por isso esta análise foi feita com o maior cuidado e de maneira mais normalizada possível.

Todas as amostras analisadas foram expostas às condições naturais de temperatura e umidade por mais de 24 horas para que adquirissem praticamente as mesmas condições de umidade, pois este é um fator determinante para a coloração da amostra. Como algumas mudam sua coloração bruscamente dependendo da quantidade de água contida, as amostras foram analisadas nas seguintes condições:

- seco – após 24 horas expostas a condições ambientais
- úmido – com pequena quantidade de água, padronizado em todas amostras
- molhado – saturado

Os resultados estão apresentados na tabela 3.8.

TABELA 3.8 – Determinação da cor do solo

Amostra	Seco	Úmido	Molhado
Latossolo de Itu - granito			
TFLIB2	10YR 6/6 Amarelo Pardacento	10YR 6/6 Amarelo Pardacento	10YR 6/6 Amarelo Pardacento
TFLIB1	10YR 7/6 Amarelo	10YR 5/6 Pardo Amarelado	10YR 6/6 Amarelo Pardacento
TFLIC	10YR 7/6 Amarelo	10YR 6/6 Amarelo Pardacento	10YR 6/6 Amarelo Pardacento
Latossolo de Itu - gnaisse			
TFLIB	10YR 6/8 Amarelo Pardacento	10YR 5/8 Pardo Amarelado	10YR 6/8 Amarelo Pardacento
Latossolo de Campos do Jordão			
TFLCBA	10YR 8/8 Amarelo	10YR 7/8 Amarelo	10YR 7/8 Amarelo
TFLCBv	2,5YR 6/4 Vermelho fraco	2,5YR 5/4 Vermelho fraco	2,5YR 5/6 Vermelho
TFLCC	2,5YR 7/4 Vermelho Pálido	2,5YR 6/6 Vermelho	2,5YR 5/8 Vermelho
Latossolo de Piracicaba			
TFLPB	5YR 5/6 Vermelho amarelado	5YR 4/6 Vermelho amarelado	5YR 5/6 Vermelho amarelado
TFLPBC	5YR 5/6 Vermelho amarelado	5YR 4/6 Vermelho amarelado	5YR 5/6 Vermelho amarelado
TFLPCB	5YR 8/4 Rosado	5YR 7/6 Amarelo avermelhado	7,5YR 5/8 Pardo forte
TFLPC	10YR 7/8 Amarelo	7,5YR 5/8 Pardo forte	7,5YR 5/8 Pardo forte
Vertissolo de Piracicaba			
TFVPV	5YR 2,5/1 Preto	5YR 2,5/1 Preto	5YR 2,5/1 Preto
TFVPBi	2,5Y 4/4 Pardo oliváceo	2,5Y 3/3 Pardo oliváceo escuro	2,5Y 3/3 Pardo oliváceo escuro
TFVPC	2,5Y 6/6 Amarelo oliváceo	2,5Y 5/6 Pardo oliváceo claro	2,5Y 4/4 Pardo oliváceo

3.3 – Dificuldades encontradas

Planejava-se para esta etapa da pesquisa a realização dos ensaios Mini-Proctor e Mini-CBR para todas as amostras estudadas, mas devido ao tempo estipulado para um trabalho de formatura, somente foi possível realizar estes ensaios em 4 amostras (TFLIB2, TFLIC, TFLPB e TFLPC). Encontrou-se problemas nos resultados destes ensaios, tentou-se repeti-los, mas ainda assim os resultados foram completamente inesperados. Por não conseguirmos explicar os resultados dentro do tempo para este trabalho, resolvemos não apresenta-los. Mas uma possível continuidade desta pesquisa, com a repetição destes ensaios e/ou a execução de outros procedimentos diferentes, e com um maior tempo para a interpretação e análise dos resultados, poderiam ajudar a chegar a explicações aceitáveis.

Mas o fato de analisar e obter resultados inesperados e ainda ter a capacidade de perceber problemas na correlação de resultados fez parte do aprendizado científico, dando-nos a idéia da complexidade dos materiais e de seu comportamento, além de mostrar a importância dos estudos de longo prazo e com aprofundamento para avanço científico.

Encontrou-se também dificuldade em compatibilizar terminologia e perspectivas das duas áreas trabalhadas, geologia e engenharia, sendo estas de diferentes ramos do conhecimento, com tradições e objetivos diferentes, apesar de ter um objeto de estudo em comum, o solo.

Antes de começarmos a discutir os resultados e apresentarmos as conclusões deste trabalho gostaríamos de esclarecer e definir certos termos bastante usados. Neste trabalho os termos “caráter laterítico”, “solo laterítico” ou “solo não-laterítico”, se refere ao ponto de vista da engenharia, e não deve-se ser confundido com a designação usada na pedologia e na geologia. O uso do termo “laterítico” na engenharia foi bem definido por Nogami (1978) como solos que no estado natural são menos suscetíveis à erosão do que os demais solos e por adquirirem elevada resistência e capacidade de suporte quando adequadamente compactados. Já este termo na geologia se refere a solos que estão submetidos a processos de lixiviação que carregam elementos alcalinos, alcalinos terrosos, e parte da silica, e ocorrendo monossialitização e ferralitização, formando minerais como caulinita e goethita.

Alguns trabalhos revisados, como de Bernucci & Balducci (1994), explicam que a resistência mecânica dos solos é devido a presença de oxihidróxidos de ferro e alumínio que recobrem argilominerais. Neste atual trabalho, assim como Chauvel et. al. (1976), não foi percebida participação significativa dos produtos aluminosos para a resistência mecânica do solo, mas sim dos produtos ferruginosos. Os produtos aluminosos são muito pouco citados na bibliografia como responsáveis pela resistência do solo, mas podem ter propriedades semelhantes aos dos produtos ferruginosos, mas como podem existir sem colorir os materiais aos quais se associam, inclusive podendo ser coloridos pelos produtos ferruginosos, acabam passando desapercebidos. Talvez estejam em muitos materiais estudados, mas são ocultados pelos produtos ferruginosos na análise por microscopia óptica, e podem não aparecer na difração de raios-x devido ao seu estado amorfo, ou pela pequena dimensão de seus cristais. Certamente um trabalho mais específico sobre estes materiais, e com maior tempo para a realização de análises específicas e detalhadas, poderiam chegar a conclusões importantes sobre o papel dos produtos aluminosos para a resistência mecânica dos solos.

Neste trabalho nos reservaremos a usar o termo “produtos ferruginosos” ao nos referirmos aos responsáveis pela resistência mecânica dos solos, sendo estes, os materiais amorfos e cristalizados de ferro.

4.1 – Correlações entre Classificação Geotécnica pelo Método das Pastilhas e as propriedades dos Solos

Os resultados obtidos dos diversos ensaios geotécnicos realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação mostram certa interligação. A predominância de frações granulométricas menores (argila), por exemplo, faz com que a amostra tenha baixa permeabilidade e assim maior será o fator “tempo de ascensão”, e o inverso também é

verdeiro. De forma similar, a granulometria também relaciona-se com o fator “contração”, pois solos mais argilosos têm maior contração, e solos mais arenosos têm menor contração. Logo, quanto menor o “tempo de ascensão” (material menos argiloso), menor será a “contração”.

TABELA 4.1 – Correlação entre teor em argila, tempo de ascensão e contração das pastilhas

	Argila (%)	Tempo de ascensão	Contração	Resistência ao esmagamento*
Latossolo de Itu - granito				
TFLIB2	21,28%	45min	8%	3
TFLIB1	21,95%	36min	9%	3
TFLIC	7,87%	4min	3%	2
Latossolo de Itu - gnaisse				
TFLIB	38,52%	32min	11%	3
Latossolo de Campos do Jordão				
TFLCBA	39,51%	11min	8%	2
TFLCBV	17,66%	6min	4%	2
TFLCC	15,64%	5min	5%	2
Latossolo de Piracicaba				
TFLPB	39,76%	60min	14%	3
TFLPBC	40,04%	4min	16%	3
TFLPCB	33,36%	11min	13%	3
TFLPC	23,04%	9min	9%	3
Vertissolo de Piracicaba				
TFVPV	38,50%	12min	13%	3
TFVPBi	22,69%	6min	15%	3
TFVPC	10,70%	15min	10%	3

*Obs: Atribuições: 1) Esfera quebra-se entre os dedos polegar e indicador; 2) Esfera quebra-se entre o dedo polegar e uma superfície plana dura; 3) Esfera não se quebra.

Outros resultados encontrados podem ser relacionados à mineralogia das amostras. A presença de produtos ferruginosos ativos, nos solos lateríticos, dá ao solo resistência mecânica, não perdendo a capacidade de suporte mesmo na presença de água. Bernucci & Balducci (1994) afirmam que isto se dá porque “recobrem os argilominerais, tornando-os menos ativos e menos plásticos, agindo ainda como agentes cimentantes de partículas, responsáveis por formação de agregações”. Ainda segundo esses autores, após a perda de umidade, a desidratação destes produtos é em parte irreversível, sendo a reabsorção de água parcial, e em consequência, pouco expansivos; essa cimentação natural torna o

material mais rígido, permitindo a baixa perda de resistência no reumedecimento e baixa expansão. Abreu (1986) explica essa irreversibilidade dizendo que sob condições de desidratação intensas, os produtos ferruginosos ativos, ou seja, amorfos, evoluem para um estado cristalino, sendo esta condição irreversível.

As idéias apresentadas por estes autores explicam os diferentes comportamentos observados nos ensaios. As penetrações feitas com cones de 10 e 30g nas pastilhas depois de reabsorverem água mostraram baixa penetração nos solos lateríticos, e alta nos solos não-lateríticos, mostrando a atuação dos produtos ferruginosos no aumento da capacidade de suporte em um solo sob a ação da água. Quanto maior as penetrações, menor o caráter laterítico apresentado pelo solo, sendo a penetração de 0mm típica dos solos lateríticos. De forma similar, o “tipo de trincamento”, relaciona-se à atuação dos produtos ferruginosos como cimentantes de partículas, pois estas impedem o solo de expandir sob a ação da água, formando poucas trincas nas pastilhas, diferentemente dos solos não-lateríticos que apresentam alta expansão e muitas trincas sobre as pastilhas.

O “tempo de interação” das esferas imersas em água pode ser relacionado tanto com a granulometria da amostra quanto com seu caráter laterítico. A rápida interação entre a esfera e a água pode ser o resultado de granulometria mais grossa, elou ao seu baixo caráter laterítico. Mas, o “tipo de produto” desta interação pode afirmar o caráter de uma amostra, pois esferas inalteráveis, ou fragmentadas em blocos, evidenciam a ação dos produtos ferruginosos como cimentantes de agregados, diferentemente de pastas e pequenas partículas como resultados da interação que logo indicam baixo caráter laterítico.

O “índice de reabsorção de água” é um dos parâmetros mais importantes para identificar o caráter laterítico de um solo entre os demais, pois, ao secar, a desidratação dos óxidos é em parte irreversível, muitas vezes não chegando a reabsorver o teor de água presente na “umidade de moldagem”. Um solo laterítico típico reabsorve menos água do que o encontrado na sua “umidade de moldagem”, tendo assim um “índice de reabsorção” negativo, mostrando assim a atuação eficaz da cimentação por parte dos produtos ferruginosos em agregar partículas e inibir a manifestação da atividade dos argilominerais expansivos que se encontram recobertos por estes materiais. Portanto, quanto maior o caráter laterítico de um solo, menor será seu “índice de reabsorção”.

De modo similar a “expansão” é tanto maior quanto menor o seu caráter laterítico, isto porque a quantidade de produtos ferruginosos ativos é reduzida em relação aos argilominerais mais ativos, e mais expansivos.

A “resistência ao esmagamento” que mede a coesão a seco do solo, pode ser facilmente relacionada com a granulometria. As amostras mais argilosas apresentam uma resistência maior ao esmagamento, diferentemente das amostras mais arenosas. A tabela 4.1 mostra esta relação, que, muitas vezes, não é linear, o que certamente se deve a

atuação de outros fatores, como o teor de outras frações nas amostras, assim como ao modo qualitativo deste ensaio.

TABELA 4.2 – Correlação entre comportamento geotécnico e sua classificação

	Tipo de trincamento *	Tipo de produto**	Expansão	Classificação
Latossolo de Itu - granito				
TFLIB2	1	2	1,60%	Laterítico típico
TFLIB1	1	2	2%	Laterítico típico
TFLIC	2	4	9,20%	Não Laterítico siltoso
Latossolo de Itu - gnaisse				
TFLIB	1	1	1,90%	Laterítico típico
Latossolo de Campos do Jordão				
TFLCBA	2	4	9,10%	Laterítico argiloso
TFLCBV	2	4	11,40%	Não Laterítico siltoso
TFLCC	2	4	7,20%	Não Laterítico arenoso
Latossolo de Piracicaba				
TFLPB	1	2	10,60%	Laterítico argiloso
TFLPBC	2	3	21,30%	Não Laterítico argiloso
TFLPCB	2	2	15,80%	Não Laterítico argiloso
TFLPC	2	2	12%	Não Laterítico argiloso
Vertissolo de Piracicaba				
TFVPV	2	2	15,30%	Não Laterítico orgânico
TFVPBi	2	2	18,30%	Não Laterítico argiloso
TFVPC	2	2	9,60%	Transicional argiloso

*Obs: Atribuições: 1) Ausência de trincas sem expansão ou ocorrência de poucas trincas, sem expansão, formando blocos resistentes; 2) Presença de certo trincamento com expansão; 3) Muito trincado ou ausência de trincas visíveis a olho nu com expansão.

**Obs: Atribuições: 1) Esfera trinca ou não se altera; 2) Blocos de dimensões milimétricas; 3) Partículas identificáveis a olho nu; 4) Pasta.

4.2 - Comparação dos resultados atuais com os anteriores

Devido à dificuldade de encontrar, identificar e coletar todas as amostras trabalhadas na primeira etapa deste projeto, algumas delas não serão novamente trabalhadas. Das 14 amostras que foram estudadas para este trabalho, 9 já o foram no projeto anterior e, para garantir a identidade delas e reforçar os resultados obtidos, estas amostras foram novamente submetidas ao ensaio do Método das Pastilhas e caracterizadas

geotecnicamente. Esta repetição do ensaio não só teve como objetivo garantir a confiabilidade das correlações feitas com as análises mineralógicas, micromorfológicas e químicas, mas também permitir uma comparação dos resultados obtidos anteriormente com os atuais, possibilitando observar se pequenas mudanças nas propriedades dos solos (devidas a pequenas variações do exato local de coleta) possibilitem uma classificação geotécnica diferente.

As principais características do ensaio Método das Pastilhas que caracterizam o solo são as penetrações dos cones de 10 e 30 gramas e o Índice de reabsorção. Baseado nisso apresenta-se na tabela 4.3 a comparação dos dados obtidos atualmente com os anteriormente e suas respectivas classificações.

TABELA 4.3 – Comparação de resultados do ensaio Método das Pastilhas

Amostra	Penetrações dos cones		Índice de reabsorção de água	Classificação
	Cone de 10g	Cone de 30g		
Latossolo de Campos do Jordão				
LCBa	3,5mm	6mm	0,23	Laterítico argiloso
TFLCBA	3mm	6mm	0,2	Laterítico argiloso
LCBv	6mm	10mm	0,62	Não Laterítico siltoso
TFLCBv	7mm	12mm	0,6	Não Laterítico siltoso
Latossolo de Piracicaba				
LPB	1,5mm	3mm	-0,08	Laterítico argiloso
TFLPB	1mm	2mm	-0,17	Laterítico argiloso
LPBC	4mm	8mm	0,28	Transicional argiloso
TFLPBC	8mm	14mm	0,55	Não Laterítico argiloso
LPCB	7mm	14mm	0,6	Não Laterítico argiloso
TFLPCB	5mm	9mm	0,26	Não Laterítico argiloso
LPC	4mm	10mm	0,49	Não Laterítico argiloso
TFLPC	6mm	13mm	0,7	Não Laterítico argiloso
Vertissolo de Piracicaba				
VPV	1mm	2mm	0,27	Não Laterítico orgânico
TFVPV	3mm	5mm	0,23	Não Laterítico orgânico
VPBi	2,5mm	5,5mm	0,43	Transicional argiloso
TFVPBi	4mm	8mm	0,59	Não Laterítico argiloso
VPC	7,5mm	14mm	0,34	Não Laterítico argiloso
TFVPC	3mm	8mm	0,62	Transicional argiloso

Observações: As amostras que apresentaram diferenças de comportamento na comparação estão destacadas com bordas vermelhas, e as que não tem a sigla TF são da coleta anterior e só foram usadas neste trabalho para estas comparações.

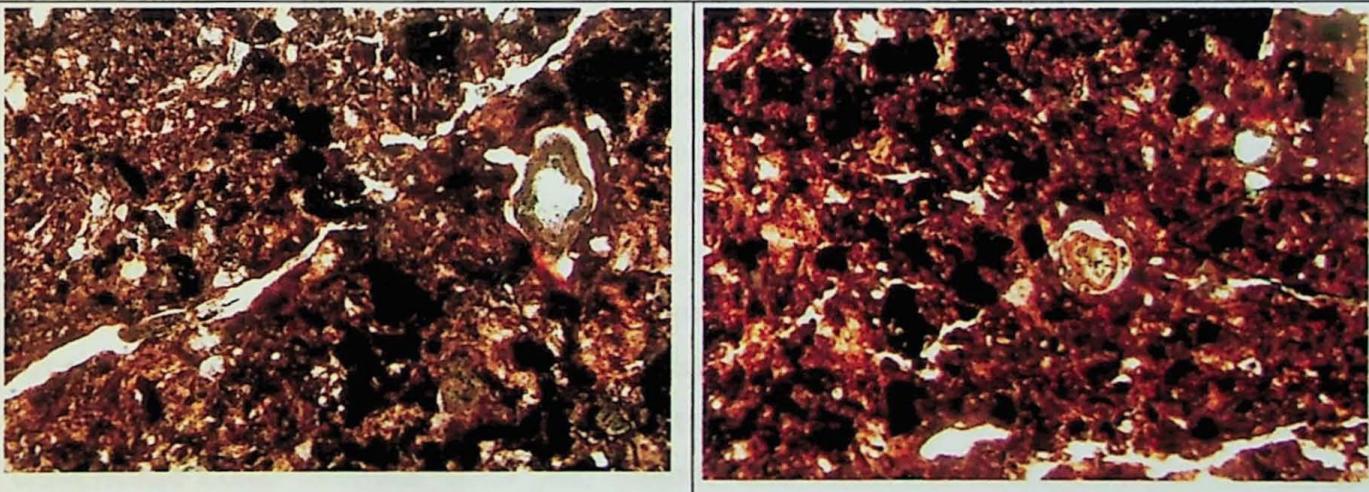
Percebe-se, nas comparações entre os ensaios anteriores e os atuais, das 9 amostras, que, no geral, os resultados não mudam significativamente mantendo, assim, a mesma classificação geotécnica. No entanto, mesmo mantendo a classificação, os resultados destes ensaios apresentaram mudanças, às vezes até consideráveis, na penetração dos cones de 10 e 30 gramas, indicando uma diferença na capacidade de suporte destes solos. O mesmo acontece com o Índice de Reabsorção de água, indicando uma diferente ação dos produtos ferruginosos como inibidores da reabsorção de água dos argilominerais.

Em outras 3 amostras (destacadas na tabela 4.3 com borda vermelha), as diferenças de comportamento foram maiores a ponto de mudar a classificação geotécnica. Em algumas delas, a mudança na classificação se deu porque a diferença de comportamento foi grande (como no caso de VPC/TFVPC e LPBC/TFLPBC), e em outras porque os resultados se encontravam na transição de classificações (como no caso de VPBi/TFVPBi).

Uma análise destes solos mostrou que não apresentam diferenças significativas de mineralogia, textura, estrutura e coloração. Mas percebeu-se, na análise textural por microscopia óptica, uma clara heterogeneidade em algumas amostras, às vezes variando sua textura em poucos milímetros. É o caso da amostra TFLPBC, onde, em um lado da lâmina delgada, o material está mais alterado do que no outro, diferindo o grau de alteração de seus minerais primários e a quantidade e homogeneização do produto ferruginoso formado.

Quadro 4.1 – Heterogeneidade encontrada na amostra TFLPBC

Amostra TFLPBC (aumento de 4 vezes)



As fotos obtidas por microscopia óptica de uma mesma lâmina delgada mostram a diferença na alteração dos minerais primários e na quantidade e distribuição dos produtos ferruginosos (a foto mais avermelhada a direita, apresenta maior alteração e quantidade de produto ferruginoso), demonstrando a heterogeneidade lateral de apenas poucos milímetros que pode existir em um perfil de alteração.

A heterogeneidade encontrada na amostra TFLPBC ilustra bem o que pode ocorrer em diferentes graus em um perfil de alteração. Muitos fatores podem fazer com que ocorra esta heterogeneidade, como a distribuição dos minerais primários e a presença e distribuição de fraturas na rocha de origem, assim como também o tipo de drenagem e a porosidade presente em microsistemas no solo, etc.

Portanto, as diferenças encontradas, mesmo que pequenas, na resistência apresentada entre materiais dos mesmos locais, pode ser também atribuída a esta heterogeneidade existente nos perfis de alteração. É claro que diversos outros fatores, incluindo talvez pequenas diferenças ocorridas na realização do ensaio, podem ter se somado para a resultante diferença de comportamento apresentada.

4.3 – Mineralogia, Estrutura, Coloração e Textura vs Comportamento Geotécnico

Todos os dados obtidos nas diversas análises realizadas permitiram correlacionar diversas propriedades dos solos com seus comportamentos geotécnicos, principalmente aqueles referentes ao ensaio Método das Pastilhas, com os quais pode-se de certa forma quantificar a resistência mecânica do solo através das penetrações com cones de 10 e 30g, e a correlacioná-las com as análises feitas, levando a conclusões importantes.

De grande importância para as correlações e as conclusões foi o trabalho de Abreu (1986) e outros trabalhos citados na revisão bibliográfica, os quais esclarecem as principais propriedades dos óxihidróxidos para a elevação da resistência mecânica. Segundo eles, a reatividade dos produtos ferruginosos está mais relacionada a sua superfície específica do que a sua forma mineralógica, aquela aumentando quanto menor sua cristalinidade. Portanto, fases cristalinas do ferro não são interessantes para a elevação da resistência mecânica dos solos, sendo suas fases amorfas de maior importância. E isto devido à carga positiva que carregam, que é maior quanto menor sua superfície específica, sendo negativas no seu estado cristalino, dificultando assim sua adsorção pelos argilominerais. E é essa adsorção que, segundo autores como Bernucci & Balducci (1994), já citados neste trabalho, aumentam a resistência mecânica dos solos, pois estes óxihidróxidos recobrem argilominerais, tornando-os menos ativos e menos plásticos, agindo ainda como agentes cimentantes de partículas, responsáveis por formação de agregados.

Estes agregados foram observadas em algumas amostras, como a TFLIB2, que foi classificada como laterítica típica pelo Método das Pastilhas. Diferentemente de outras amostras, embora tenha apresentado pouca quantidade de Fe_2O_3 , revelou elevada resistência. Os resultados da difração de raios-X ajudaram a explicar isto, pois o ferro se encontra pouco cristalizado, em sua maioria em um estado amorfo, sendo então mais reativo. Por isso é que amostras com maior teor em ferro, ou com grande quantidade de minerais ferruginosos, como goethita e hematita, apresentam menor resistência mecânica

como demonstrado nas amostras do latossolo de Piracicaba, que embora apresentem maior teor em ferro e em minerais como goethita e hematita, não demonstraram tanta resistência como as amostras lateríticas do latossolo de Itu. Isto então nos mostra que a quantidade de ferro presente na amostra não está relacionada de forma simples com sua resistência, mas sim a quantidade de ferro reativo presente, ou seja, ferro num estado amorfo, que tem maior superfície específica e maior quantidade de cargas positivas, sendo, portanto mais fácil de ser adsorvido pelos argilominerais de carga negativa.

Outra característica importante que ajudou a perceber que não existe relação direta entre o comportamento geotécnico e a mineralogia é a relação entre os componentes. A simples presença dos minerais caulinita, goethita e gibbsita, sendo estes respectivamente, argilomineral 1:1, oxihidróxido de Fe e hidróxido de alumínio, típicos de solos lateríticos, não garantem uma elevada resistência mecânica do solo, mas sim a presença de produtos ferruginosos, com pouca cristalinidade, envolvendo argilominerais, que elevam a resistência do solo. Por isso, é a relação entre estes componentes do solo, e não apenas sua presença, pode ser relacionada ao caráter laterítico do solo.

TABELA 4.4 – Correlação entre caráter geotécnico, teor em ferro e presença de minerais.

	Penetrações dos cones		Índice de reabsorção de água	Classificação	Fe ₂ O ₃	Minerais Identificados
	Cone de 10g	Cone de 30g				
Latossolo de Itu - granito						
TFLIB2	0mm	0mm	-0,23	Laterítico típico	2,82%	Caulinita; gibbsita; goethita
TFLIB1	0mm	0mm	-0,34	Laterítico típico	3,32%	Caulinita; gibbsita; goethita
TFLIC	8mm	13mm	0,6	Não Laterítico siltoso	3,54%	Caulinita
Latossolo de Piracicaba						
TFLPB	1mm	2mm	-0,17	Laterítico argiloso	25,79%	Caulinita; goethita
TFLPBC	8mm	14mm	0,55	Não Laterítico argiloso	26,20%	esmectita; caulinita; goethita;
TFLPCB	5mm	9mm	0,26	Não Laterítico argiloso	24,08%	esmectita; caulinita; goethita
TFLPC	6mm	13mm	0,7	Não Laterítico argiloso	22,90%	esmectita; caulinita

Embora tenham teor em ferro menor, as amostras do latossolo de Itu apresentaram maior resistência mecânica do que as amostras do latossolo de Piracicaba. Assim, somente a presença de minerais típicos de solos lateríticos não garante elevada resistência, pois as amostras dos dois perfis apresentaram basicamente os mesmos minerais, mas não as mesmas resistências.

Comentários a partir de Fernandes (2006)

Com o exposto no item anterior, podemos confirmar e explicar as conclusões tiradas por Fernandes (2006) citadas na revisão bibliográfica. Sua tentativa de correlação entre o comportamento geotécnico com o aspecto “cimentado” apresentado nas imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), resultaram em 95% de concordância, mostrando a importância que existe entre a íntima relação entre os argilominerais e os produtos ferruginosos para o caráter laterítico do solo, dando o aspecto “cimentado” nas imagens por MEV. O êxito também encontrado por este autor na correlação entre a presença dos minerais caulinita, e oxihidróxidos de Fe e Al, com o caráter laterítico do solo pode ser explicado. Estes minerais são característicos de ambientes bem drenados e alterados do solo, podendo então sua alta quantidade ser relacionada com a distribuição homogênea dos produtos ferruginosos no solo, recobrindo argilominerais, e dando-lhe elevada resistência. Por isso, podemos relacionar o grau de alteração do solo com a presença abundante destes minerais e sua distribuição homogênea, e essa grande quantidade facilitou a identificação por difração de raios-x, tendo assim êxito na correlação com a resistência do solo.

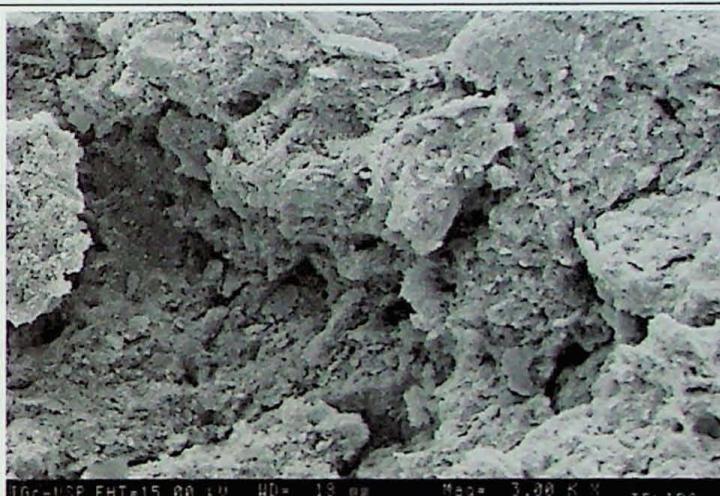
No entanto, as reflexões feitas até agora sobre as relações entre todos os dados mostram claramente que apenas a presença do conjunto de minerais tidos como típicos dos materiais lateríticos (caulinita, oxihidróxidos de Fe e Al) não garante a resistência do solo, mas sim a relação que existe entre os produtos ferruginosos e os argilominerais. Então, pode-se imaginar que o alto grau de concordância entre o comportamento geotécnico e as análises mineralógicas por difração de raios-x encontrado por Fernandes (2006) em seu trabalho deve-se aos tipos de materiais utilizados, que não apresentavam a complexidade muitas vezes existentes em materiais intemperizados e pedogeneizados heterogêneos dos climas tropicais.

Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens obtidas por MEV permitiram comparar a estrutura dos torrões naturais de uma amostra laterítica típica com uma não-laterítica, assim como com a estrutura de suas respectivas pastilhas confeccionadas. Esta comparação evidenciou o contraste que existe entre a estrutura de um solo laterítico com um não-laterítico, e reforçou a importância dos produtos ferruginosos como agentes agregadores de argilominerais. A comparação feita entre a estrutura dos torrões naturais com a das pastilhas mostrou que a sua preparação altera a relação entre os componentes do solo; as pastilhas de solos não-lateríticos perderam a porosidade presente nos torrões naturais e seus argilominerais ganharam uma relação maior com os outros produtos supérigenos do plasma secundário, como os produtos ferruginosos. A perda de porosidade pode ser em parte atribuída ao uso apenas da fração

granulométrica menor que 0,425mm para a confecção das pastilhas, contribuindo para que os componentes se organizem melhor.

Quadro 4.2 – Comparação entre imagens por MEV dos torrões naturais e pastilhas

Latossolo de Itu (imagens com aumento 3000 vezes)							
Amostra TFLIC – horizonte C				Amostra TFLIB2 – horizonte B			
							
Torrão natural				Torrão natural			
							
Pastilha				Pastilha			
Penetração		Índice de Reabsorção	Classificação	Penetração		Índice de Reabsorção	Classificação
Cone 10g	Cone 30g			Cone 10g	Cone 30g		
8mm	13mm	0,60	Não Laterítico siltoso	0mm	0mm	-0,23	Laterítico Típico

O contraste de comportamento entre estas duas amostras pode ser atribuída ao contraste de sua estrutura. Nos torrões naturais, a ausência do plasma secundário nos poros da amostra TFLIC e a presença na TFLIB2 dando a esta um aspecto “cimentado”, podendo ser esta a explicação para o aumento de sua resistência mecânica. Praticamente inexiste, nas imagens das pastilhas, o contraste apresentado entre as imagens dos torrões naturais, mostrando que a preparação das pastilhas altera sua porosidade e a distribuição de seus constituintes.

Estas observações ajudaram a concluir que a preparação das pastilhas muda as características naturais do solo, principalmente a relação entre os seus componentes, sendo esta relação fundamental para o caráter geotécnico. A distribuição heterogênea dos produtos ferruginosos nas amostras não-lateríticas (que apresentam baixa resistência mecânica) faz com que a espatulação tenha um efeito grande nestas amostras, por homogeneizar os materiais, podendo dar a elas um melhor comportamento mecânico do que em seu estado natural. Mas se esta mudança é significativa nestes tipos de solos ainda nos resta dúvidas, pois a ação dos agentes homogeneizadores naturais de oxihidróxidos de Fe e Al nos solos de caráter não-laterítico tonando-os lateríticos pode ser mais eficiente do que esta mesma homogeneização causada pela espatulação no Método das Pastilhas.

As imagens mostraram que o contraste morfológico existente entre os torrões naturais não ocorriam entre as imagens das pastilhas, sendo estas bastante parecidas, ambas com aspecto “cimentado” e com pouca porosidade. Mas através de uma investigação mais profunda, com aumentos bem maiores, poderia ser notado características diferentes entre as duas pastilhas, até porque seus comportamentos nos ensaios foram bem diferentes. Ficando então aqui um possível caminho para um eventual detalhamento da investigação.

Coloração das Amostras

A coloração geral das amostras mostrou certa correlação com sua mineralogia, pois minerais de Fe como goethita e hematita deixam suas colorações características impregnadas nas amostras, sendo estas amareladas e avermelhadas respectivamente, com a contribuição dos produtos ferruginosos amorfos. A alteração de minerais primários como biotita, magnetita e piroxênio tem produzido estes minerais nas amostras. Desde o horizonte mais basal até o mais superficial, observou-se a formação destes dois minerais secundários a partir de minerais primários, diferenciando apenas a sua distribuição, pois horizontes inferiores, menos alterados, apresentaram um produto ferruginoso concentrado mais próximos de seus minerais primários de origem, diferente de horizontes superficiais, onde o produto ferruginoso se apresentava mais homogeneizado e distribuído na amostra, de forma que foi percebido que a coloração geral das amostras não mudou substancialmente a medida que seu grau de alteração aumentava. De forma similar, não foi percebida mudança significativa de coloração em amostras que apresentavam comportamentos geotécnicos contrastantes. Isto porque a coloração geral da amostra é definida pela presença ou não de determinados minerais, enquanto que o caráter laterítico depende da interação entre os diferentes componentes do solo, principalmente entre os argilominerais e os produtos ferruginosos. Segundo Abreu (1986), cristais de goethita dão coloração amarelada ao solo, mas a hematita, devido a seu alto poder de pigmentação, mesmo tendo uma quantidade 6 vezes menor do que goethita, dá ao solo uma coloração avermelhada. E esta coloração, segundo o mesmo autor, pode ser encontrada em solos que não apresentaram hematita na

difração de raios-x (DRX), devido ao fato de seu poder de pigmentação ser tanto maior quanto menor forem seus cristais. Por isso, a DRX pode não identificar hematita em solos avermelhados devido ao pequeno tamanho de seus cristais e seu alto poder de avermelhamento neste estado.

Portanto, a coloração da amostra não pode ser usada diretamente para a antecipação do caráter geotécnico de um solo, pois os fatores que regem estas duas características são diferentes. A coloração do solo depende da quantidade e tamanho dos cristais minerais e independe do teor em ferro livre, e a resistência do solo depende do ferro livre e de sua distribuição.

Quadro 4.3 – Correlação entre caráter geotécnico, coloração e grau de alteração.

Latossolo de Itu - granito			
Amostra TFLIC – horizonte C		Amostra TFLIB2 – horizonte B	
Classificação	Coloração	Classificação	Coloração
Não Laterítico siltoso	10YR 6/6 Amarelo Pardacento	Laterítico típico	10YR 6/6 Amarelo Pardacento
A medida que aumenta a alteração dos minerais primários, os argilominerais e os produtos ferruginosos formados tendem a se homogeneizar no solo, aumentando assim sua resistência mecânica. A coloração da amostra não muda significativamente com o aumento da alteração, mostrando a ineficiência desta característica para antecipar o caráter laterítico do solo.			

As amostras analisadas do vertissolo apresentaram colorações diferenciadas em relação às outras amostras dos outros perfis, e comportamentos geotécnicos sem correspondência com grau de alteração. Isto ocorre devido a seu diferencial de formação e composição em relação às demais amostras. Estas amostras formadas sob condições hídricas especiais, com baixa lixiviação e reações de hidrólise parcial favoreceram a bissialitização, contribuindo para a formação de argilominerais 2:1, como a esmectita. Sob

estas condições, minerais como goethita, hematita, gibbsita e os produtos ferruginosos amorfos não se formaram de forma ampla, em princípio. Portanto, com a ausência de quantidade significativa destes materiais e com a abundância de esmectita, estas amostras apresentaram cores diferenciadas, e baixo caráter laterítico. Devido também à presença de matéria orgânica, em abundância em algumas amostras, a pequena resistência mecânica encontrada foi atribuída a ela, pois estas substâncias agem como cimentantes, da mesma maneira que os produtos ferruginosos.

Goethita, Hematita e o comportamento geotécnico

A correlação do comportamento das amostras com a mineralogia fez-nos concluir que, em princípio, certos minerais tinham graus de influência diferentes para o comportamento geotécnico, pois percebeu-se que amostras em que o Fe ocorre principalmente como goethita, demonstraram uma melhor capacidade de suporte do que aquelas nas quais o Fe foi cristalizado simultaneamente como goethita e hematita, dando uma idéia de que a goethita teria um papel mais importante do que a hematita para um maior caráter laterítico. Mas a pesquisa bibliográfica mostrou, segundo Kemp (1985), que a formação da hematita está ligada à "desidratação total de óxidos de ferro hidratados amorfos", este processo ocorrendo sob "a ação muito prolongada dos fatores de formação do solo e/ou climas quentes". Por isso, devido à importância dos produtos ferruginosos amorfos para a resistência do solo em que a hematita não foi formada, menos produto ferruginoso foi cristalizado, resultando em maior caráter laterítico. Portanto, podemos concluir indiretamente que quanto menos hematita no solo, maior será a quantidade de produto ferruginoso amorfo, sendo maior a resistência do solo.

Com o conjunto de análises e observações realizadas, pode-se perceber a importância da relação entre os diferentes componentes do solo para seu caráter geotécnico. Amostras com os mesmos componentes apresentaram resistências diferenciadas nos ensaios, devido às diferenças de interação. A produção do produto ferruginoso a partir de minerais primários e sua homogeneização na amostra são de grande importância para seu comportamento laterítico, por isso percebe-se a importância de condições hídricas adequadas para a formação de jazidas de solos lateríticos para a utilização em obras de construção rodoviária.

TABELA 4.5 – Correlações entre mineralogia, coloração e resistência do solo, em amostras de horizonte B

	Contém Mineral	Coloração	Penetrações dos cones		Índice de reabsorção de água
			Cone de 10g	Cone de 30g	
Latossolo de Itu - granito					
TFLIB2	caulinita; gibbsita; goethita	10YR 6/6 Amarelo Pardacento	0mm	0mm	-0,23
TFLIB1	caulinita; gibbsite; goethite	10YR 5/6 Pardo Amarelado	0mm	0mm	-0,34
Latossolo de Itu - gnaisse					
TFLIB	caulinita; gibbsita; goethita;	10YR 5/8 Pardo Amarelado	0mm	0mm	-0,39
Latossolo de Campos do Jordão - gnaisse					
TFLCBA	caulinita; gibbsita; goethita	10YR 7/8 Amarelo	3mm	6mm	0,2
TFLCBv	caulinita; gibbsite; goethita	2,5YR 5/4 Vermelho fraco	7mm	12mm	0,6
Latossolo de Piracicaba - diabásio					
TFLPB	caulinita; goethita; hematita	5YR 4/6 Vermelho amarelado	1mm	2mm	-0,17
TFLPBC	caulinita; goethita; hematita	5YR 4/6 Vermelho amarelado	8mm	14mm	0,55

5 – CONCLUSÕES

A partir das correlações e das discussões realizadas no capítulo anterior, podemos concluir neste trabalho que:

- A resistência mecânica dos solos não está relacionada de modo simples com a quantidade de ferro presente, nem com a presença de goethita e hematita, mas sim com a quantidade de produto ferruginoso amorfo, por conter cargas positivas e maior facilidade de adsorção pelos argilominerais que possuem carga negativa.
- Não é possível relacionar o caráter laterítico do solo de modo simples com a mineralogia, pois não é a presença de minerais que garante elevada resistência do solo, mas sim a relação espacial entre os componentes do solo. A associação dos produtos ferruginosos amorfos com os argilominerais é que podem ser relacionados com o caráter laterítico.
- A espatulação no Método das Pastilhas altera a relação espacial entre os componentes do solo, e assim pode alterar sua resistência natural. Isto pode ocorrer principalmente em solos não-lateríticos que contêm produtos ferruginosos distribuídos heterogeneamente, mas nos restam dúvidas quanto a se a homogeneização dos produtos ferruginosos causada na espatulação poderia ser tão eficiente quanto ao dos processos naturais formadores de solo, a fim de aumentar significativamente a resistência do solo.
- Não é possível relacionar a resistência do solo com sua coloração, pois a resistência do solo está ligada à associação dos produtos ferruginosos amorfos com os argilominerais, diferentemente da coloração que está ligada principalmente à simples presença de minerais cristalizados como goethita e hematita, assim como também de matéria orgânica.
- Como a resistência do solo está ligada principalmente aos produtos ferruginosos amorfos, podemos concluir indiretamente que quanto menos cristais de goethita e hematita, maior será a quantidade de produtos ferruginosos amorfos, e assim maior poderá ser a resistência do solo.
- Os produtos aluminosos podem desempenhar um papel semelhante ao dos produtos ferruginosos, mas, apesar desta possibilidade ser mencionada na bibliografia, ela é muito menos estudada e, no caso do presente trabalho, não foi possível tecer considerações a respeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Constam desta lista tanto as referências bibliográficas mencionadas neste trabalho como as que têm sido consultadas pelo aluno em seus estudos e revisões bibliográficas.

ABREU, M. M. S. N. R. (1986) Aspectos do comportamento do ferro na crusta de meteorização. Lisboa. 249p. (Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa)

BERNUCCI & BALDUCCI (1994) Características de comportamento quanto à expansão e à contração de solos tropicais. In: VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 1994, Recife. Anais do VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 1, p.287-298.

BORGGAARD, O. K.(1982) The influence of iron oxides on the surface area of soil. J. Soil Sci.

BOULANGE, B. (1984) Les formations bauxitiques latéritiques de Côte d'Ivoire. Les faciès, leur transformations, leur distribution et l'evolution du modelé. Trav. et Docum. Orstom, 175:363p.

CERRI, C.C. (1974) Contribuição ao estudo das arenas graníticas (caracterização mineralógica e química de uma topossequência da região de Itu, SP). São Paulo. 130p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – USP).

CERRI, C.C. (1979) Alteração e pedogênese em áreas graníticas situadas sob diferentes condições bioclimáticas encontradas no Brasil. São Paulo. 241p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências – USP).

CHAUVEL, A.; PEDRO, G. & TESSIER, D. (1976) Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. Science du Sol, (2): 101-113.

DELVIGNE, J. (1965) Pédogenese en zon tropical. La formation des mineraux secondaires en milieu ferrallitique. Mém. Orstom, 13:117p.

DELVIGNE, J. (1983) Micromorphology of the alteration and weathering of pyroxenes in the Koua Bocca ultramafic intrusion (Ivory Coast). Sci. Géol., Mém., 72:57-68.

DELVIGNE, J. (1998) Atlas of Micromophology of Mineral Alteration and Weathering. The Canadian Mineralogist. Special Publication 3. Min. Assoc. of Canada and Editions ORSTOM. Ottawa. 494p.

- ESWARAN, H. & DE CONNINCK, F. (1971) Clay mineral formations and transformations in basaltic soils in tropical environment. Bull. Soc. Belge de Pedologie. XXI, 2: 181-210.
- FERNANDES, E. (2006) Estudo comparativo da aplicação de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. São Carlos. 106p. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP).
- GIDIGASU, M. D. (1976) Laterite soil engineering. Amsterdam, Elsevier. 554p. (Developments in Geotechnical Engineering 9).
- GODOY, H. (1992) Características geológicas e geotécnicas dos produtos de alteração de granitos e gnaisses nos arredores da cidade de São Paulo. São Paulo. 148p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – USP).
- GODOY, H. (1997) Identificação e classificação geotécnica de latossolos do estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT. São Paulo. 132p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências – USP).
- GODOY, H. (2000) (Relatório final de pós-doutoramento, Escola Politécnica – USP).
- GODOY & BERNUCCI (2002) O método das pastilhas na compreensão das propriedades geotécnicas básicas dos solos: um resumo didático. In: XVI Congresso de Pesquisa em Transportes, 2002, Natal. Anais do XVI Congresso de Pesquisa em Transportes. Rio de Janeiro: ANPET, 2002. v. 1. p. 145-156.
- GONÇALVES, N.M.M. (1987) Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas à alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da bacia do Paraná setentrional – (região de Ribeirão Preto – SP, Brasil). São Paulo. 212p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências – USP).
- GREENLAND, D.J.; J.M. OADES (1968) Iron hydroxides and clay surfaces. Trans. of 9th Intern. Cong. of Soil Sci., Adelaide, Austrália.
- HUANG, C.P. e W. STUMM (1973) Specific adsorption of cations on hydrous Y-Al₂O₃. J. Colloid Interface Sci., 43.
- JONES, R.C.; G. UEHARA (1973) Amorphous coatings on mineral surfaces. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37.
- KEMP, R.A. (1985). A consideration of the use of the terms "Paleosol" and "Rubification". Quaternary Newsletter, 45.
- KEMP, R.A. (1985) The cause of redness in some buried and nonburied soils in eastern England. J. Soil Sci., 36.

- KEMP, R.A. (1985) The Valley Farm Soil in Southern East Anglia. In: J. Boardman (Editor). Soils and Quaternary Landscape Evolution. John Wiley and Sons.
- LOUGHNAN, F.C. (1969) Chemical weathering of silicate minerals. American Elsevier Publishing Co., 154p.
- MELFI, A.J. (1967) Intemperismo de granitos e diabásios no município de Campinas e arredores, Estado de São Paulo. São Paulo. 166p. (Tese de Doutoramento, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras – USP).
- MUNSELL (1994) Munsell Soil Color Charts – revised edition
- NÓBREGA, M.T (1995) Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental. São Paulo. 247p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências – USP).
- NICOLA, S.C.N. (1993) Sistemas pedológicos desenvolvidos sobre basalto, na região de ilha solteira (estado de São Paulo – Brasil): Gênese e transformações. São Paulo. 116p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências – USP).
- NOGAMI, J.S. (1967) Os solos residuais do Estado de São Paulo – sua caracterização em bases geológicas para fins rodoviários. São Paulo, 89p. (Tese de Doutoramento, Escola Politécnica – USP).
- NOGAMI, J.S. (1978) A tecnologia rodoviária e as peculiaridades dos nossos solos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 2. São Paulo, 1978. Anais. São Paulo, ABGE. P.95-104.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. (1992) Classes gerais de solos do Brasil. Jaboticabal, FUNEP, 201P.
- PINTO, C.S. (2000) Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas 247p. (livro didático, Oficina de Textos, São Paulo).
- PINTO RICARDO, R. (1972/1973) Pedologia e Conservação do Solo. Aulas práticas. AEA, Lisboa.
- ROSELLO, V. (1984) Les sols bruns des Hauts (Ile de La Reunion). Caractérisation minéralogique et microstructurale des matériaux andosoliques. Reconnaissance expérimentale de leur comportement. Thèse Doct. Sp. Geol. Appl.-Univ. Paris VII: 200p.
- SANTOS, P. S (1975) Tecnologia de Argilas (livro didático, cap.13 - Análise Térmica Diferencial-ATD).

SCHINDLER, P.W.; B. FURST; R. DICK; P.U. WOLF (1976). Ligand properties of surface silanol groups. I. Surface complex formation with Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} . *J. Colloid and Interface Sci.*, 55(2).

SEDDOH, F.K. (1973) Alteration des roches cristallines du Morvan. (Granites, granophyrites, rhyolites). Etude mineralogique, geochemique et micromorfologique. Tese de doutoramento.

SHERWOOD, P.T. – 1967 – Classification test on African red clays and Keuper merrl. Q. J. Eng. Geol., 1(1): 47-55.

SIEFFERMANN (1973) Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse Sc. Strasbourg, França. Mem. Orstom, nr. 66: 93p.

TARDY, Y. (1997) Petrology of laterites and tropical soils. Balkema, Rotterdam, 408p.

TEIXEIRA, W; TOLEDO, M.C.M de; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. (2000) Decifrando a Terra. São Paulo, 558p.

TESSIER, D. & PEDRO,G. (1984) Recherches sur le rôle des mineraux argileux dans l'organisation et comportement des sols. In: AFES, Livre Jubilaire du Cinquantenaire, p.223-235.

TOLEDO-GROKE, M. C. (1981) Evolução geoquímica mineralógica e micromorfologica no processo de bauxitização. Estudo comparativo dos depósitos de Mogi das Cruzes, Curucutu e Lavrinhas, SP, associados a diferentes tipos litológicos São Paulo. 106p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – USP).

VAZ, L.F. (1996) Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. (cap. 19, p.117-136, livro Solos e Rochas, São Paulo).

- ANEXO A -

NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

TABELA A1 – Nomenclatura das amostras

Amostra	Significado da Nomenclatura
Latossolo de Itu	
TFLIB2	Latossolo Itu horizonte B2
TFLIB1	Latossolo Itu horizonte B1
TFLIC	Latossolo Itu horizonte C
TFLIB	Latossolo Itu horizonte B
Latossolo de Campos do Jordão	
TFLCBa	Latossolo Campos do Jordão horizonte B amarelo
TFLCBv	Latossolo Campos do Jordão horizonte B vermelho
TFLCC	Latossolo Campos do Jordão horizonte C
Latossolo de Piracicaba	
TFLPC	Latossolo Piracicaba horizonte C
TFLPCB	Latossolo Piracicaba horizonte intermediário entre C e B, mais próximo do C
TFLPBC	Latossolo Piracicaba horizonte intermediário entre B e C, mais próximo do B
TFLPB	Latossolo Piracicaba horizonte B
Vertissolo de Piracicaba	
TFVPC	Vertissolo Piracicaba horizonte C
TFVPBi	Vertissolo Piracicaba horizonte B incipiente
TFVPV	Vertissolo Piracicaba Vértico

A sigla TF se refere a Trabalho de Formatura

- ANEXO B -

TABELAS COM OS RESULTADOS DO MÉTODO DAS PASTILHAS

TABELA B1 – Massas e diâmetros obtidos no Método das Pastilhas

Amostra	Pastilha úmida com anel	Pastilha seca com anel	Pastilha seca sem anel	Diâmetro da pastilha
Latossolo de Itu - granito				
TFLIB2	40,72g	36,33g	12,91g	32,17mm
TFLIB1	40,08g	35,42g	12,08g	31,87mm
TFLIC	40,19g	35,60g	12,21g	33,80mm
Latossolo de Itu - gnaisse				
TFLIB	39,57g	34,21g	10,92g	31,00mm
Latossolo de Campos do Jordão				
TFLCBa	38,47g	32,73g	9,49g	32,13mm
TFLCBv	40,46g	35,88g	12,57g	33,57mm
TFLCC	40,43g	35,64g	12,05g	33,20mm
Latossolo de Piracicaba				
TFLPB	39,59g	33,92g	10,49g	30,03mm
TFLPBC	39,35g	33,42g	9,94g	29,36mm
TFLPCB	39,18g	33,50g	10,37g	30,57mm
TFLPC	39,73g	34,34g	10,91g	31,7mm
Vertissolo de Piracicaba				
TFVPV	40,22g	35,13g	11,90g	30,53mm
TFVPBi	40,57g	35,29g	11,92g	29,83mm
TFVPC	40,37g	35,22g	11,98g	31,47mm

TABELA B2 – Resultados do ensaio de reabsorção de água.

Amostra	Tempo de ascensão	Tipo de trincamento *	Diâmetro após reabsorção	Penetrações dos cones		Massa após reabsorção
				Cone de 10g	Cone de 30g	
Latossolo de Itu - granito						
TFLIB2	45min	1	32,7mm	0mm	0mm	16,30g
TFLIB1	36min	1	32,5mm	0mm	0mm	15,14g
TFLIC	4min	2	36,9mm	8mm	13mm	19,57g
Latossolo de Itu - gnaisse						
TFLIB	32min	1	31,6mm	0mm	0mm	14,20g
Latossolo de Campos do Jordão						
TFLCBA	11min	2	44,7mm	3mm	6mm	16,35g
TFLCBv	6min	2	37,4mm	7mm	12mm	19,88g
TFLCC	5min	2	35,6mm	7mm	12mm	19,28g
Latossolo de Piracicaba						
TFLPB	60min	1	33,2mm	1mm	2mm	15,17g
TFLPBC	4min	2	35,6mm	8mm	14mm	19,14g
TFLPCB	11min	2	35,4mm	5mm	9mm	17,50g
TFLPC	9min	2	35,5mm	6mm	13mm	20,05g
Vertissolo de Piracicaba						
TFVPV	12min	2	35,2mm	3mm	5mm	18,17g
TFVPBi	6min	2	35,3mm	4mm	8mm	20,34g
TFVPC	15min	2	34,5mm	3mm	8mm	20,32g

TABELA B3 – Resultados do ensaio de imersão da esfera em água.

Amostra	Tempo de interação	Tipo de produto*	Amostra	Tempo de interação	Tipo de produto*
Latossolo de Itu - granito			Latossolo de Piracicaba		
TFLIB2	>60min	2	TFLPB	12min	2
TFLIB1	34min	2	TFLPBC	8min	3
TFLIC	2min	4	TFLPCB	4min	2
Latossolo de Itu - gnaisse			TFLPC	3min	2
TFLIB	34min	1			
Latossolo de Campos do Jordão			Vertissolo de Piracicaba		
TFLCBA	2min	4	TFVPV	15min	2
TFLCBv	2min	4	TFVPBi	11min	2
TFLCC	2min	4	TFVPC	10min	2

*Obs: Atribuições: 1) Esfera trinca ou não se altera; 2) Blocos de dimensões milimétricas; 3) Partículas identificáveis a olho nu; 4) Pasta.

TABELA B4 – Resultados do ensaio de esmagamento da esfera.

Amostra	Resistência ao esmagamento*	Amostra	Resistência ao esmagamento*
Latossolo de Itu - granito		Latossolo de Piracicaba	
TFLIB2	3	TFLPB	3
TFLIB1	3	TFLPBC	3
TFLIC	2	TFLPCB	3
Latossolo de Itu - gnaisse		TFLPC	3
TFLIB	3		
Latossolo de Campos do Jordão		Vertissolo de Piracicaba	
TFLCBA	2	TFVPV	3
TFLCBv	2	TFVPBi	3
TFLCC	2	TFVPC	3

*Obs: Atribuições: 1) Esfera quebra-se entre os dedos polegar e indicador; 2) Esfera quebra-se entre o dedo polegar e uma superfície plana dura; 3) Esfera não se quebra.

- ANEXO C -

GUIA CLASSIFICATÓRIO DO MÉTODO DAS PASTILHAS

TABELA C1 – Guia Identificatório de solos tropicais proposto por Godoy e Bernucci (2002)

NÃO-LATERÍTICOS	TRANSICIONAIS	LATERÍTICOS	Classes de solos	Grupos de solos	CONTRAÇÃO (%)	EXPANSÃO (%)	PENETRAÇÃO CONE 10g (mm)	PENETRAÇÃO CONE 30g (mm)	ÍNDICE DE REABSORÇÃO
			TÍPICOS		>2	<1	0	0	Negativo
			ARGILOSOS		≥ 6	$\leq 10,5$	≤ 4	≤ 6	$\leq 0,6$
			ARENOSOS		2 a 6				
			AREIAS		≤ 2				
			ARGILOSOS		≥ 6	5,5 a 13,0	3 a 5	6 a 8	0,3 a 0,9
			ARENOSOS		2 a 6				
			AREIAS		≤ 2				
			ARGILOSOS		≥ 6	>8	≥ 4	≥ 8	>0,4
			SILTOSOS		2 a 4	9 a 15	≥ 6	≥ 11	0,4 a 0,7
			ARENOSOS		2 a 6	>8	≥ 4	≥ 8	>0,4
			AREIAS		≤ 2	>5	≥ 4	≥ 8	>0,4

- ANEXO D -

TABELA COM OS RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

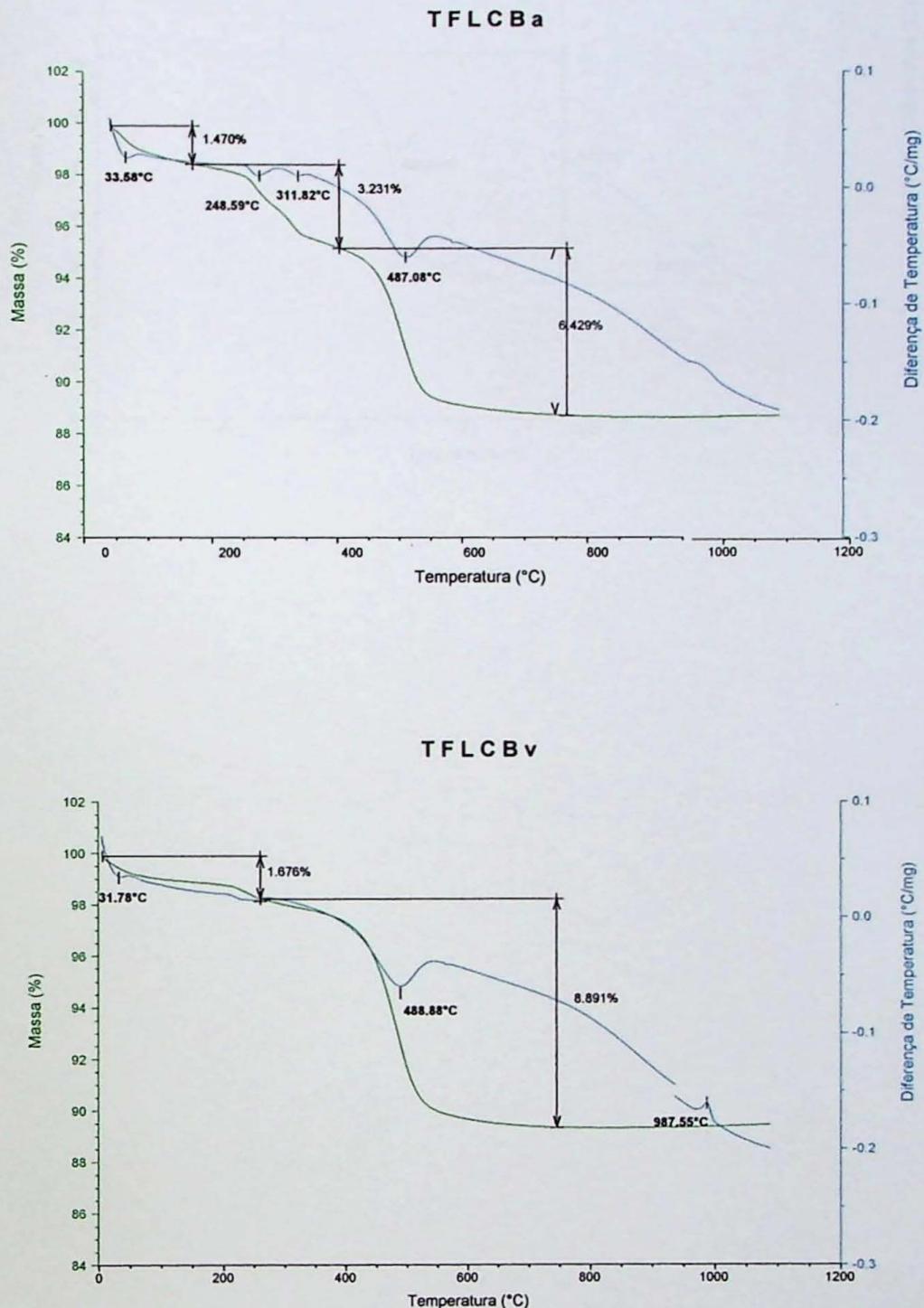
TABELA D1 – Resultado da Análise Granulométrica

Amostra	Argila	Silte fino	Silte grosso	Areia fina	Areia grossa	Areia muito grossa	Grânulos
Latossolo de Itu - granito							
TFLIB2	21,28%	7,16%	2,91%	7,42%	25,39%	34,03%	1,81%
TFLIB1	21,95%	14,21%	3,36%	7,01%	14,46%	36,72%	2,30%
TFLIC	7,87%	17,53%	6,74%	12,71%	31,72%	21,55%	1,88%
Latossolo de Itu - gnaisse							
TFLIB	38,52%	3,85%	3,00%	13,15%	27,98%	13,25%	0,26%
Latossolo de Campos do Jordão							
TFLCBa	39,51%	21,63%	3,16%	19,15%	11,95%	3,53%	1,07%
TFLCBv	17,66%	43,08%	10,71%	16,39%	11,62%	0,33%	0,21%
TFLCC	15,64%	43,19%	11,48%	16,43%	10,86%	0,68%	1,72%
Latossolo de Piracicaba							
TFLPB	39,76%	34,63%	7,77%	13,66%	4,18%	0%	0%
TFLPBC	40,04%	35,52%	7,38%	13,12%	3,95%	0%	0%
TFLPCB	33,36%	39,06%	6,18%	14,50%	6,90%	0%	0%
TFLPC	23,04%	39,12%	6,92%	20,26%	10,66%	0%	0%
Vertissolo de Piracicaba							
TFVPV	38,50%	19,36%	11,64%	18,74%	11,77%	0%	0%
TFVPBi	22,69%	20,70%	12,27%	26,48%	17,87%	0%	0%
TFVPC	10,70%	14,65%	10,89%	24,93%	38,82%	0%	0%

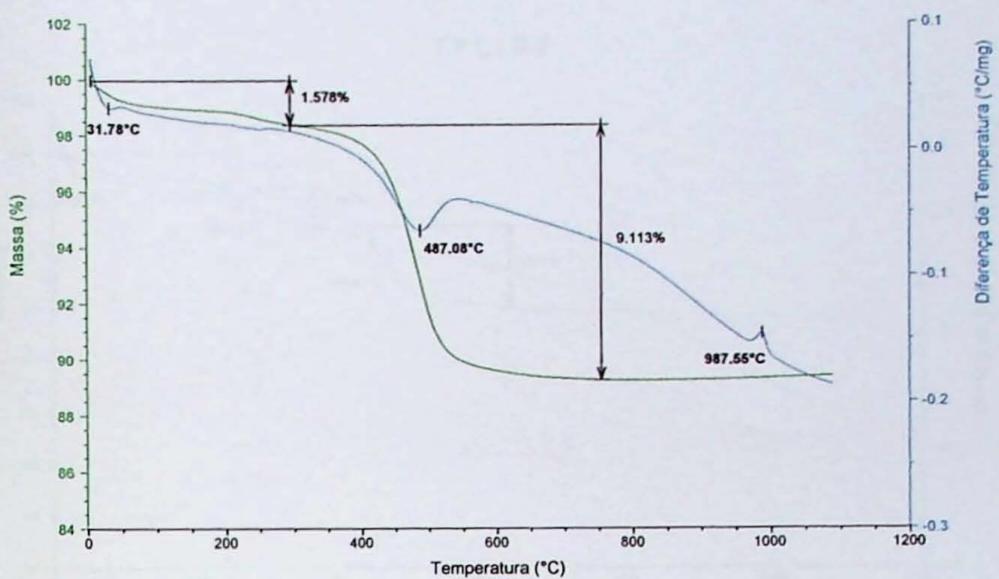
- ANEXO E -

TERMOGRAMAS

Termogramas E1 – Amostras do latossolo em Campos do Jordão

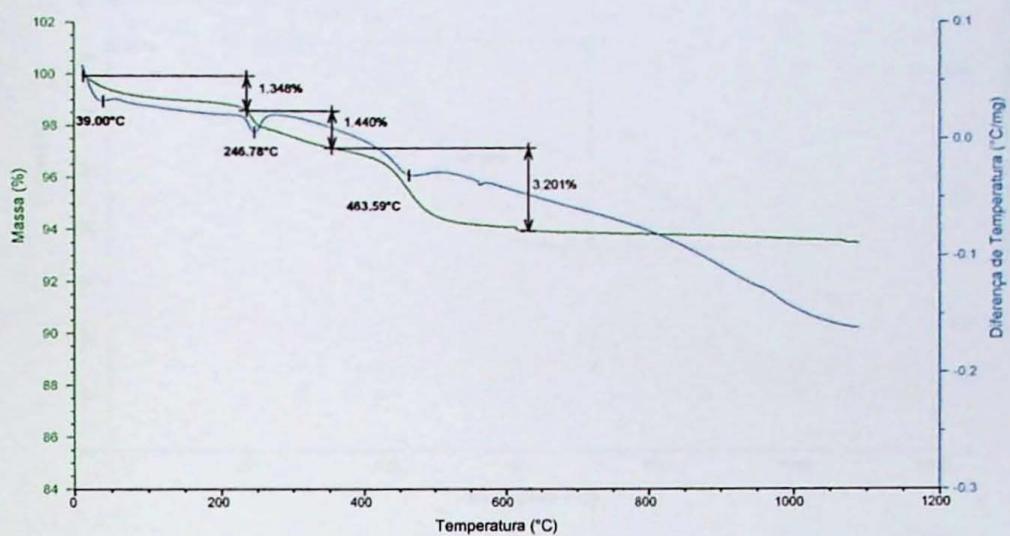


TFLCC

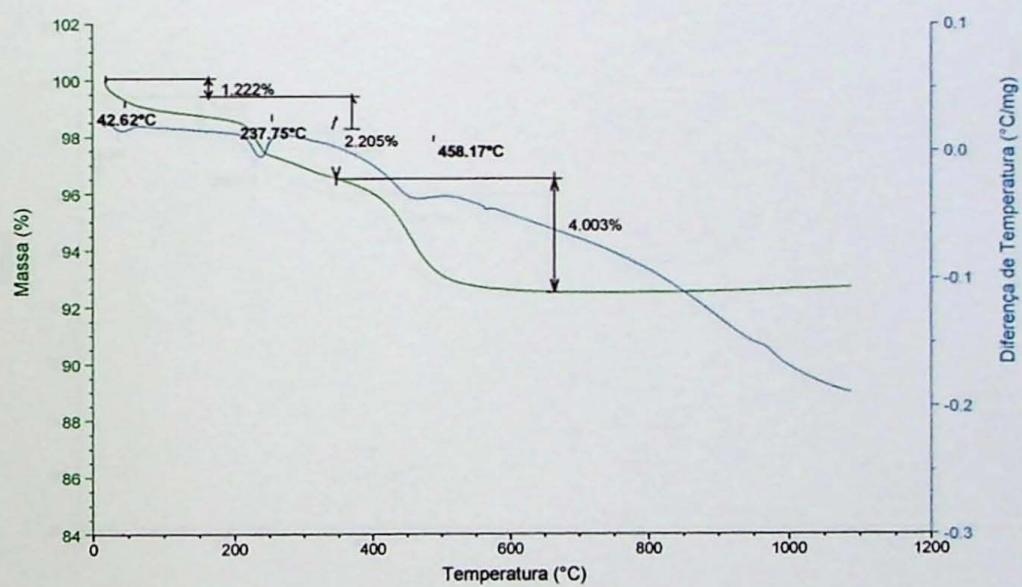


Termogramas E2 – Amostras do latossolo em Itu

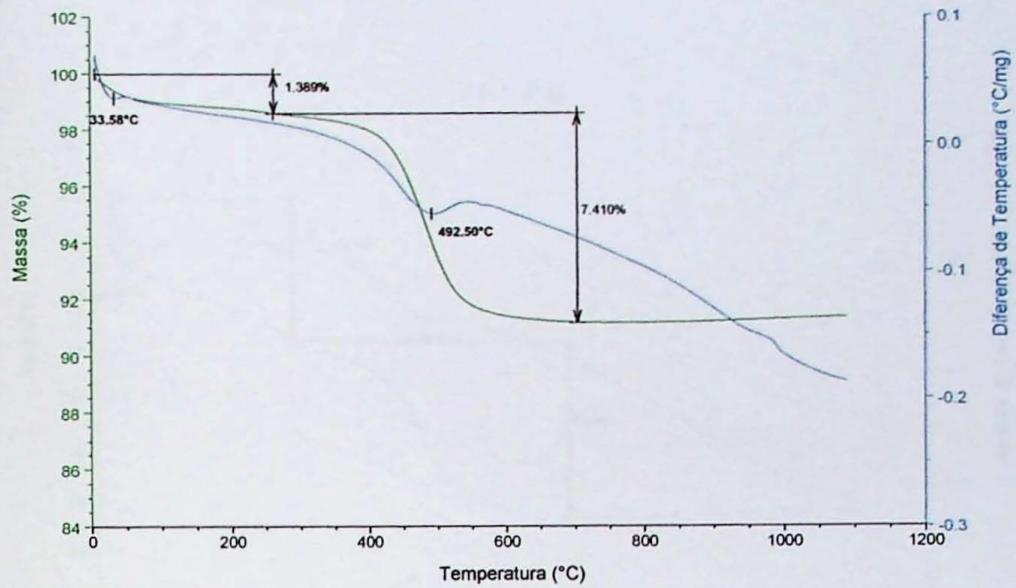
TFLIB 2



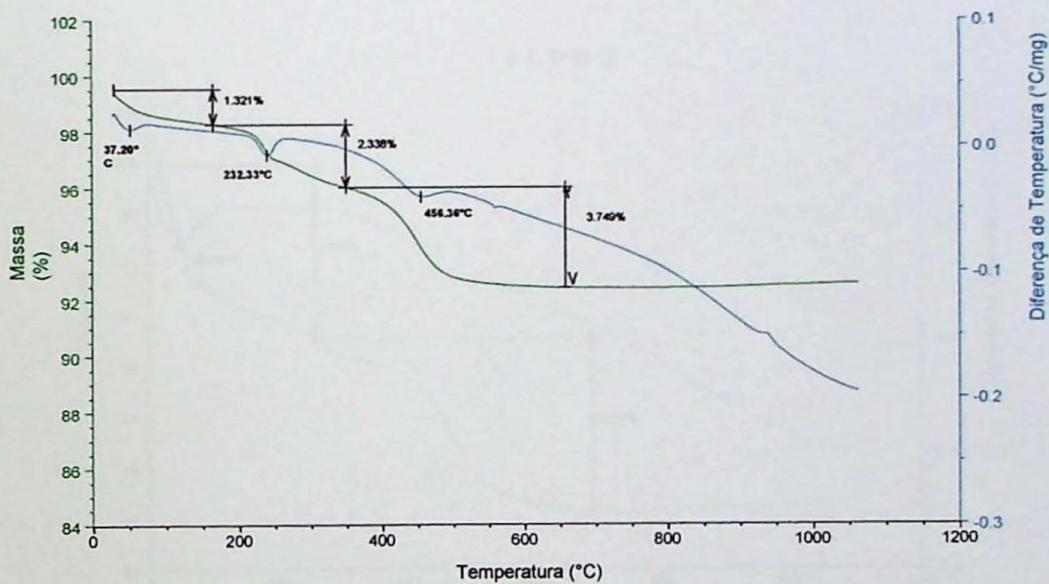
TFLIB 1



TFLIC

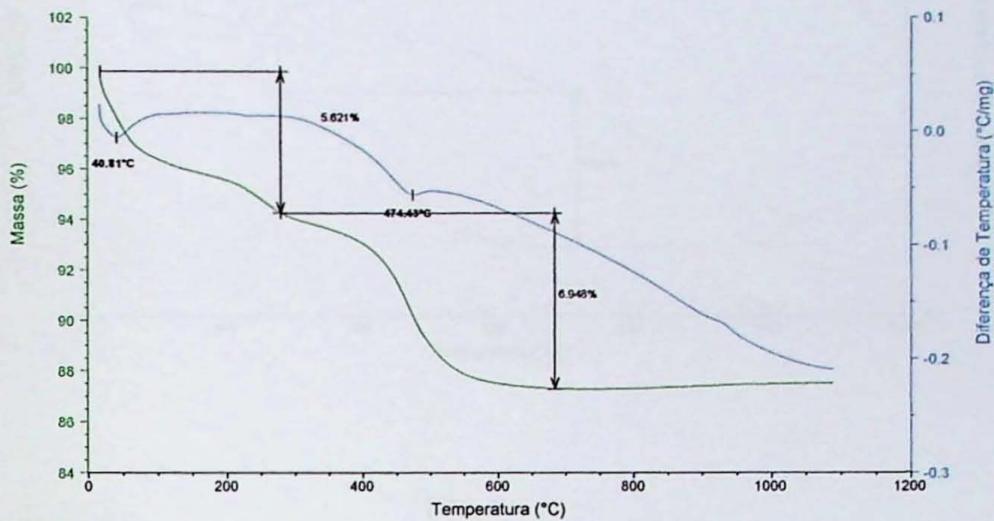


TFLIB

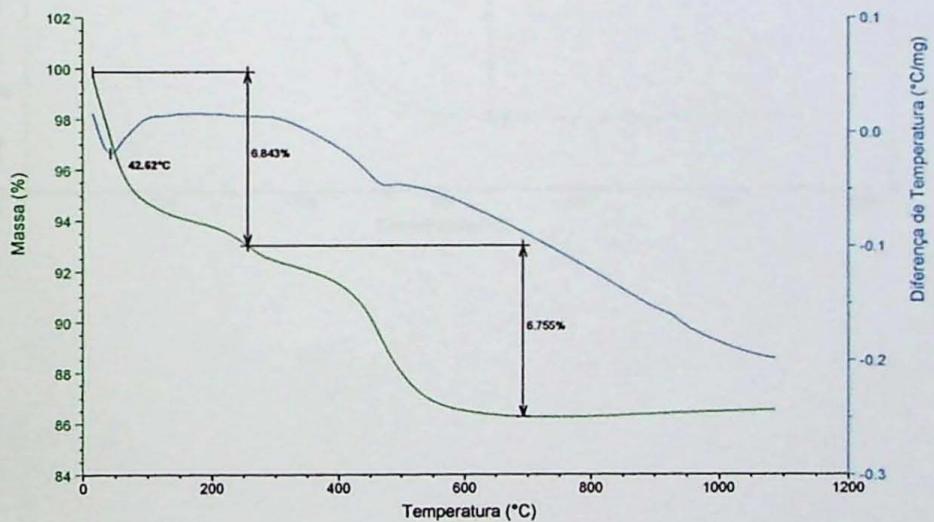


Termogramas E3 – Amostras do latossolo em Piracicaba

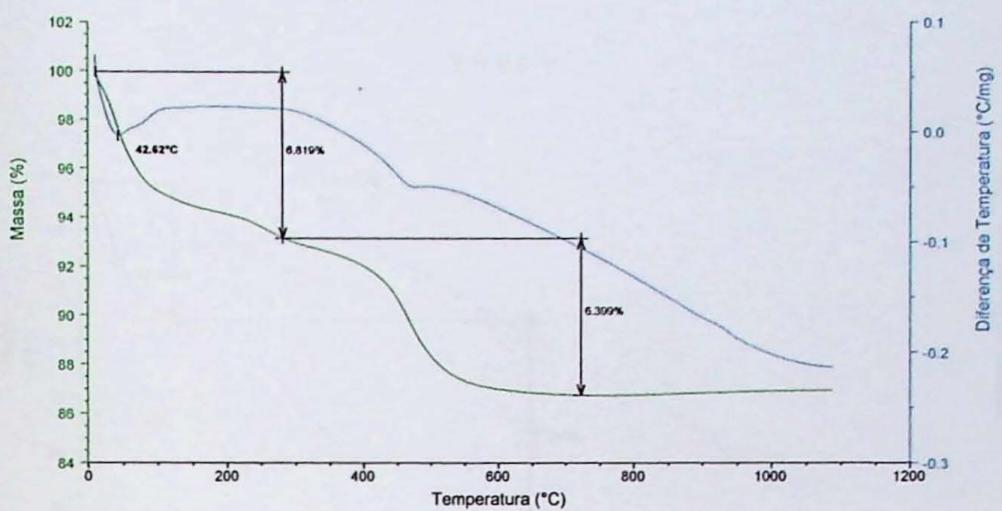
T F L P B



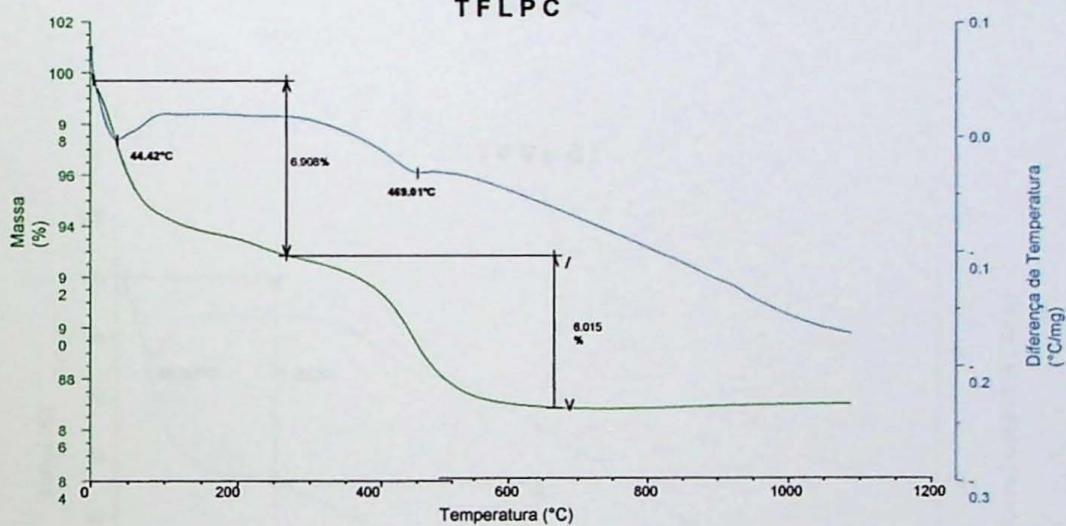
T F L P B C



TFLPCB

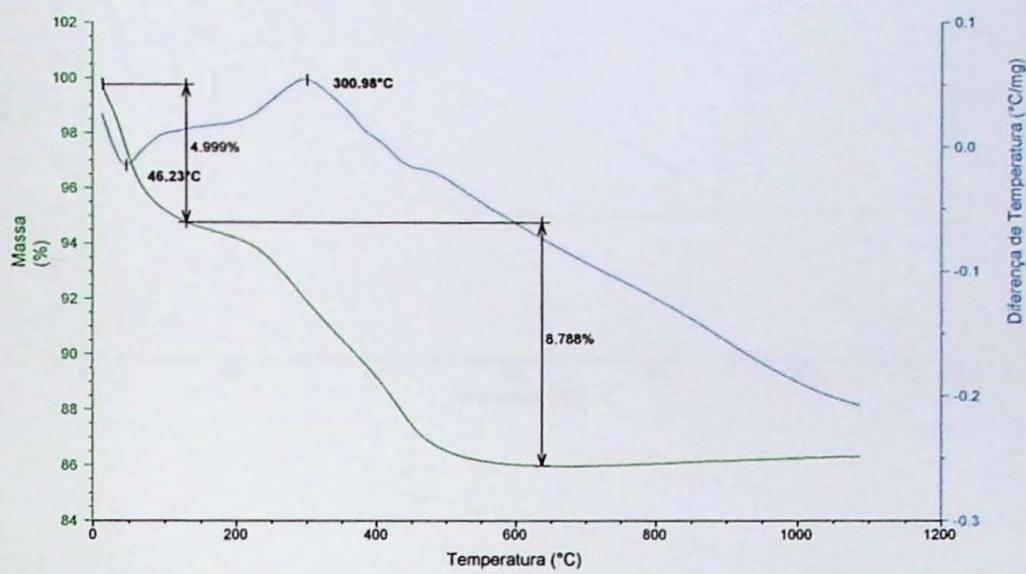


TFLPC

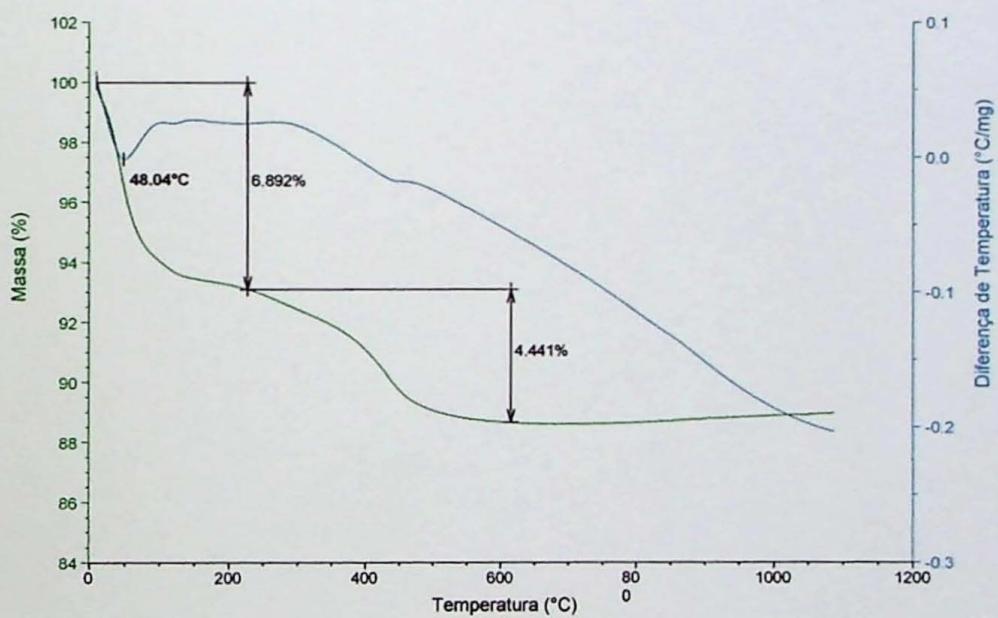


Termogramas E4 – Amostras do vertissolo em Piracicaba

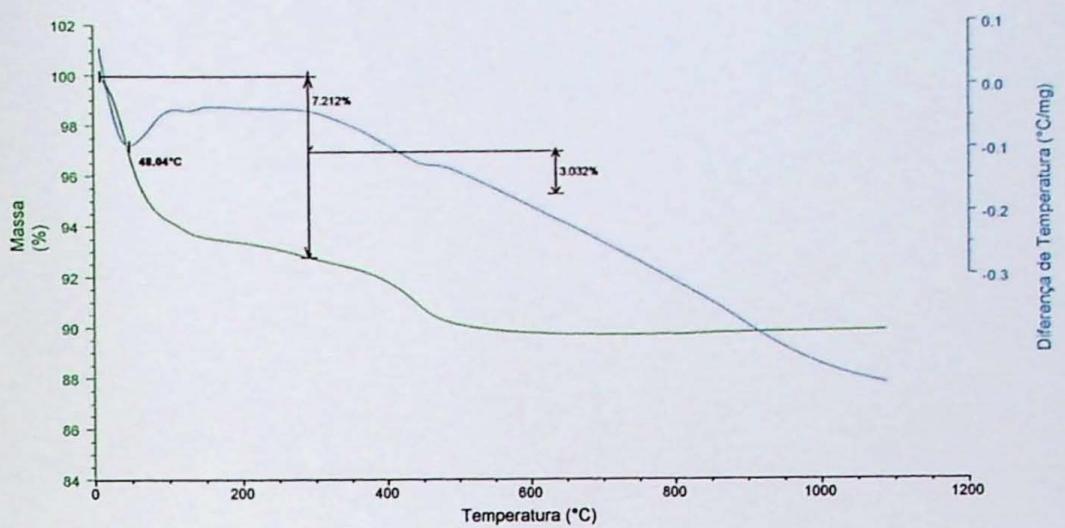
TFVPV



TFVPBi



TFVPC

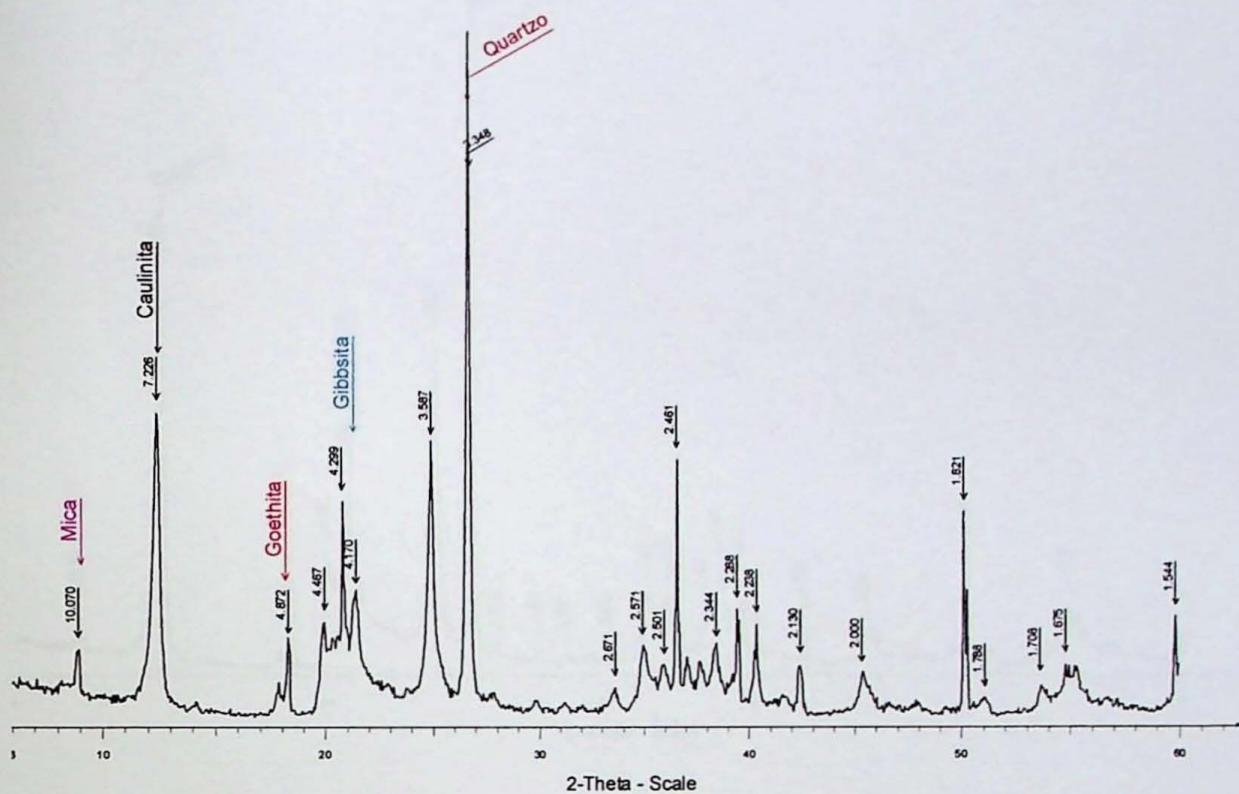


- ANEXO F -

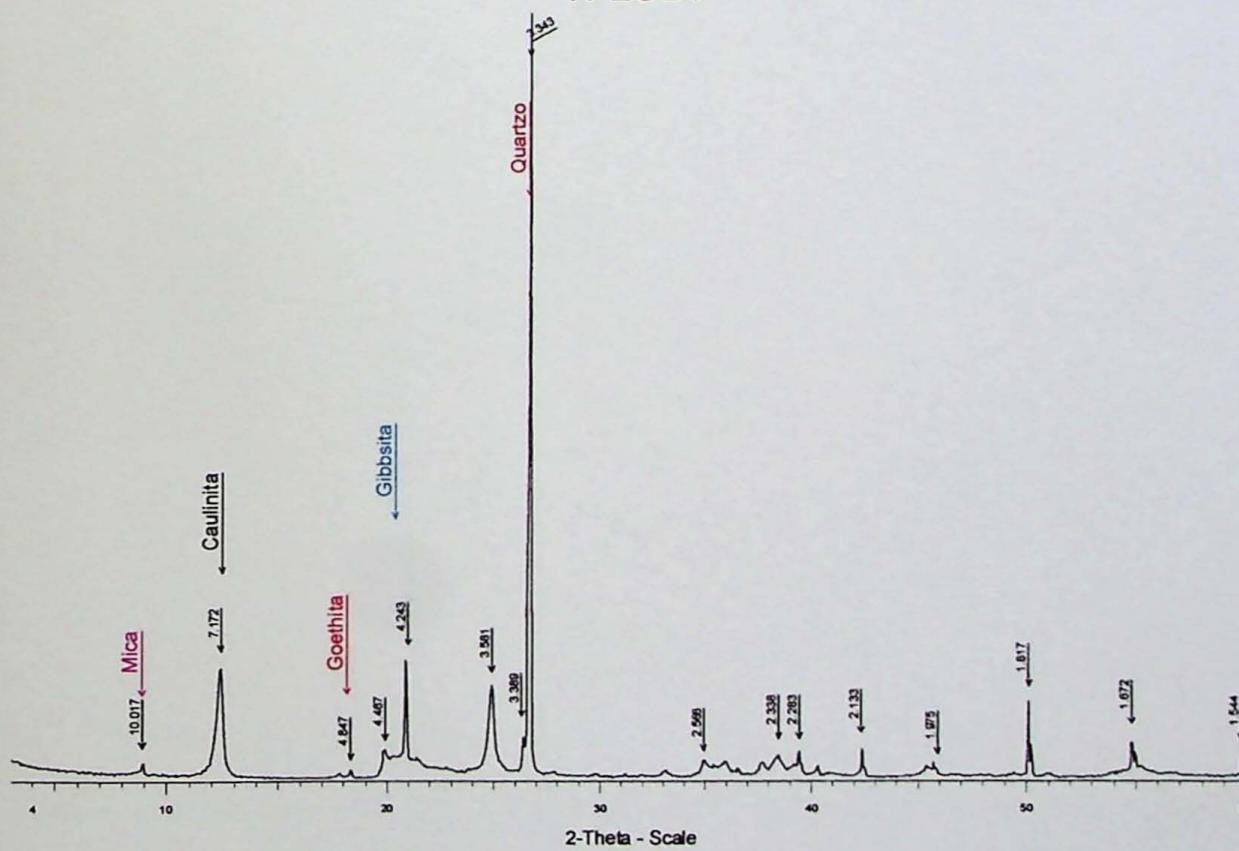
DIFRATOGRAMAS

Difratogramas F1 – Amostras do latossolo em Campos dos Jordão

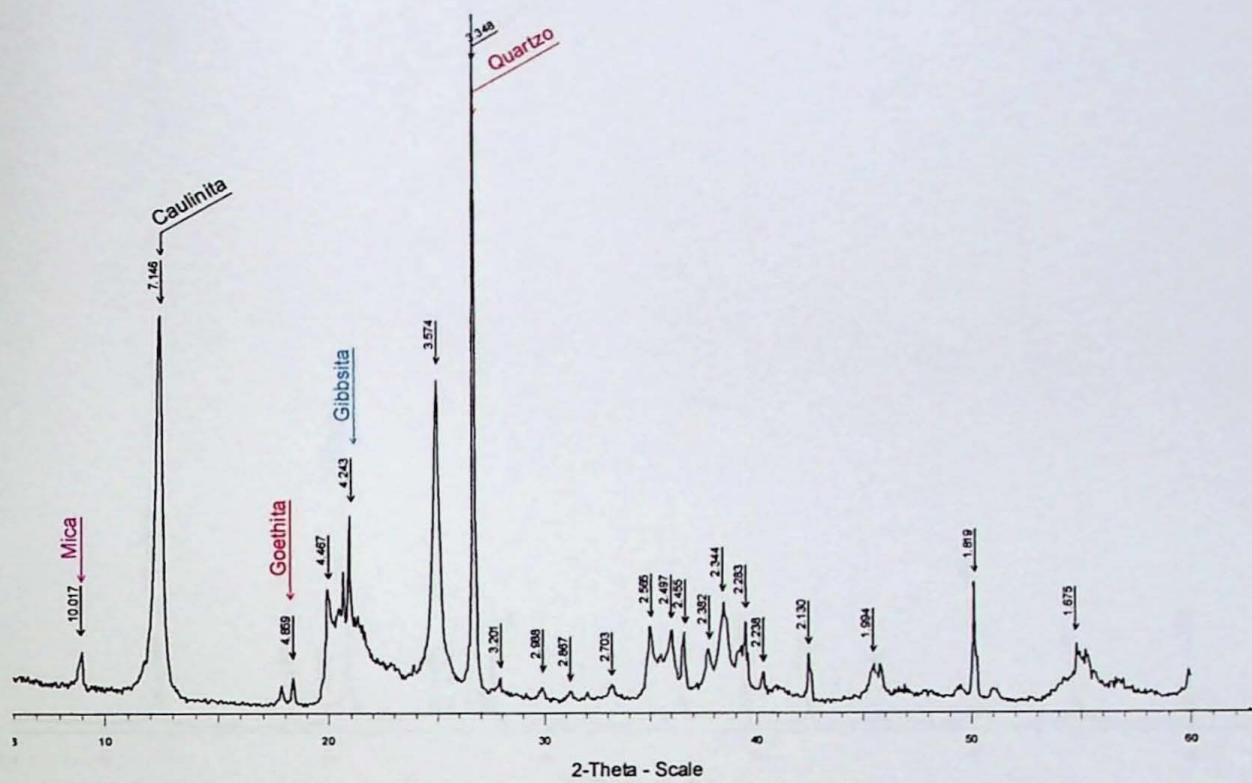
TFLCBa



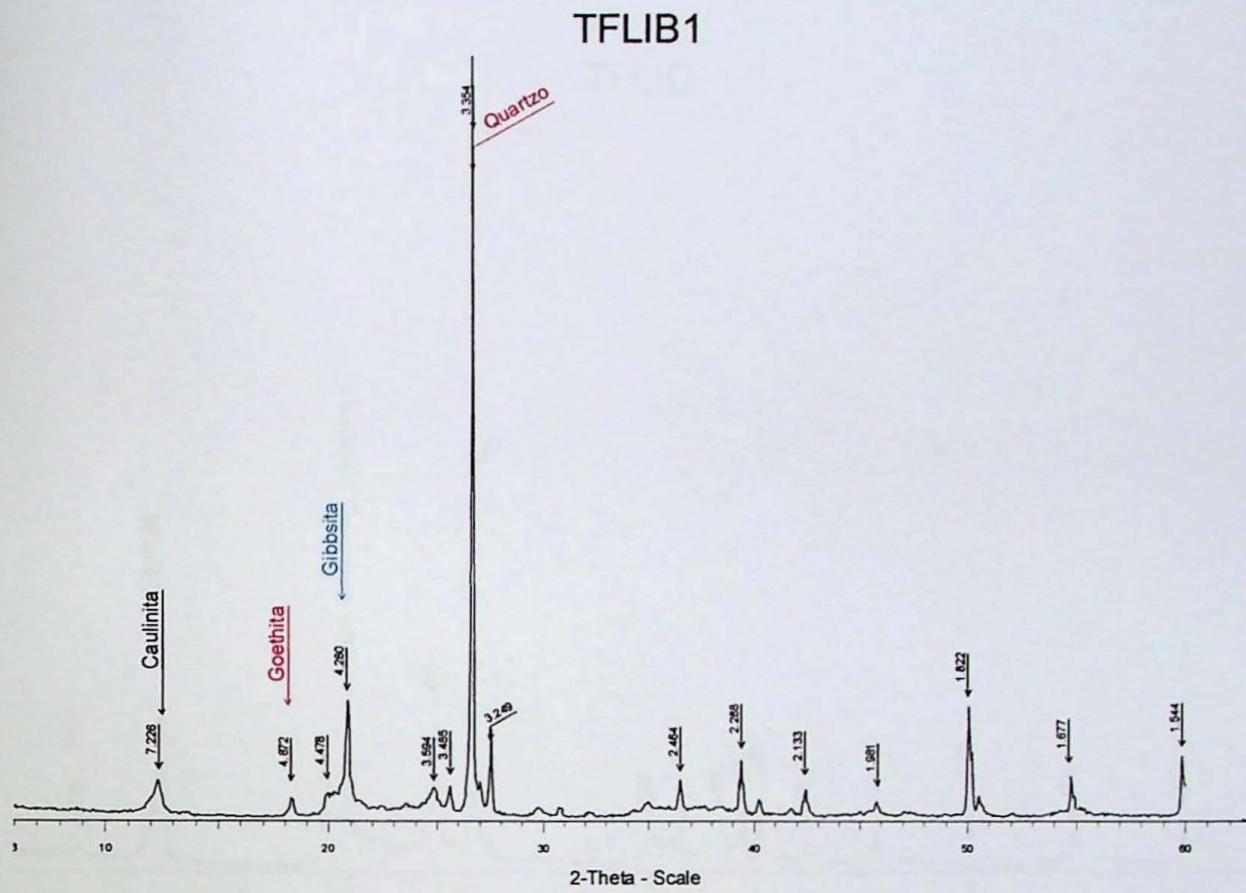
TFLCBv



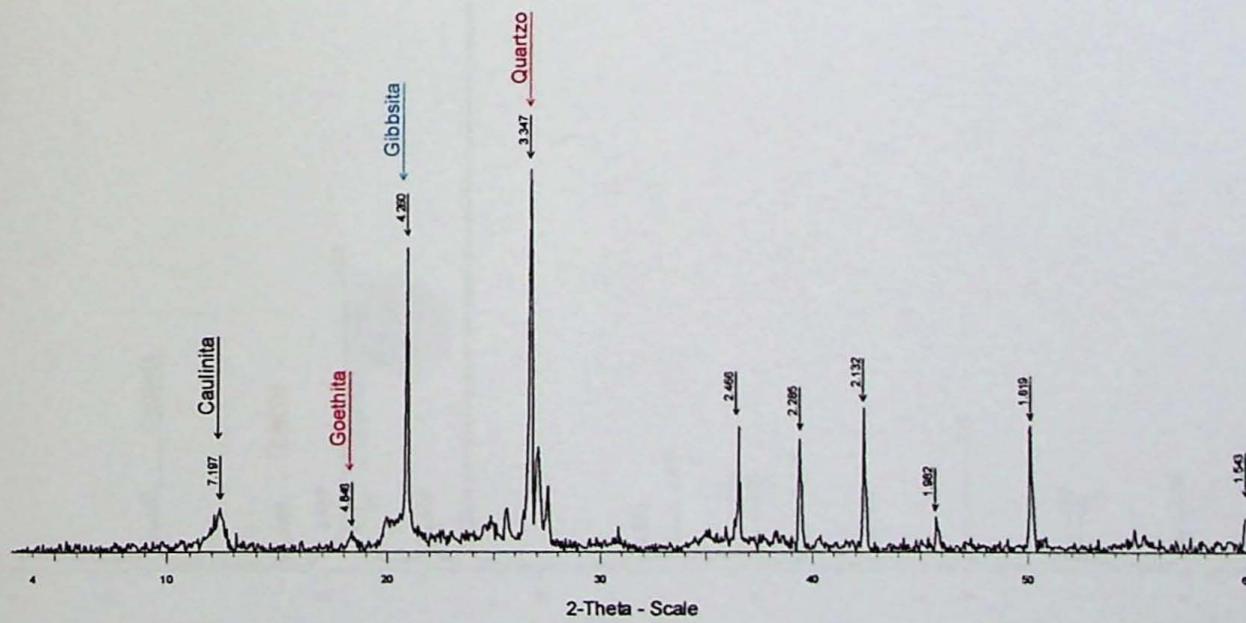
TFLCC



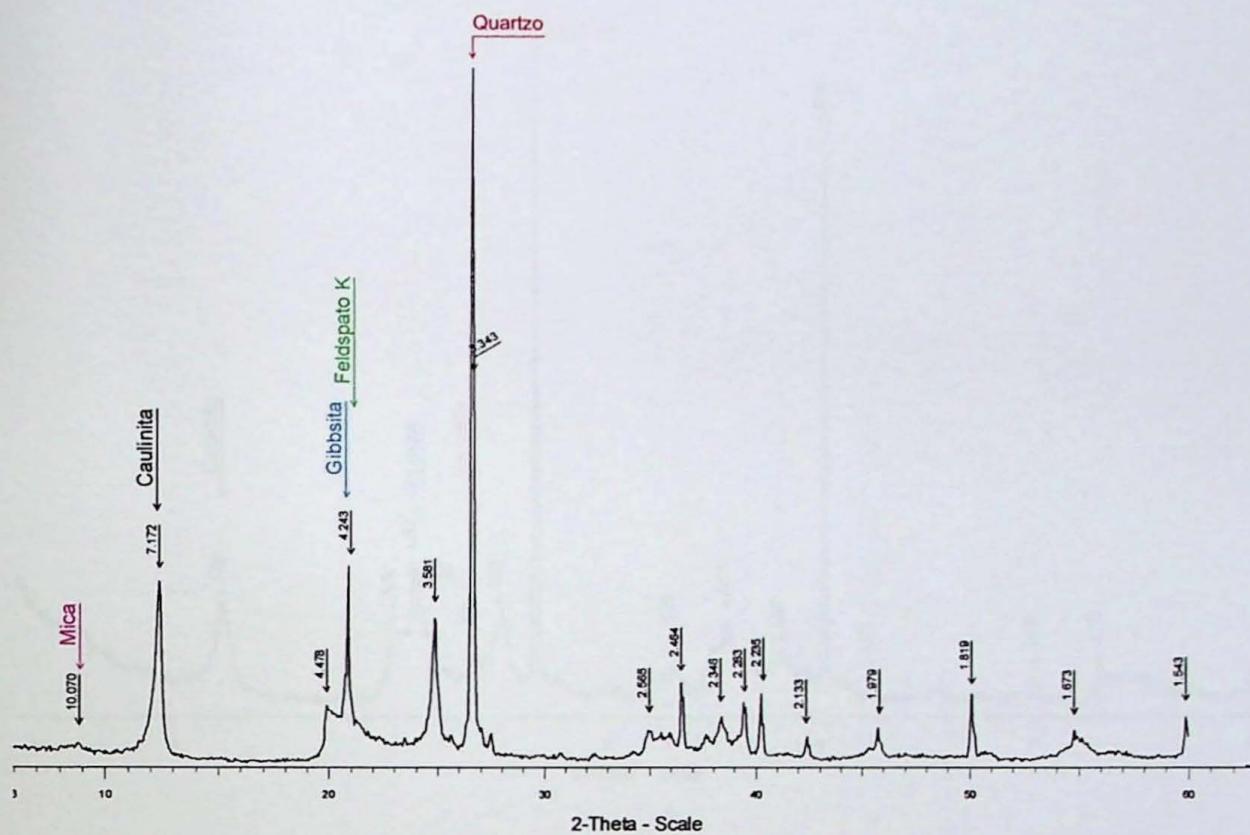
Difratogramas F2 – Amostras do latossolo em Itu



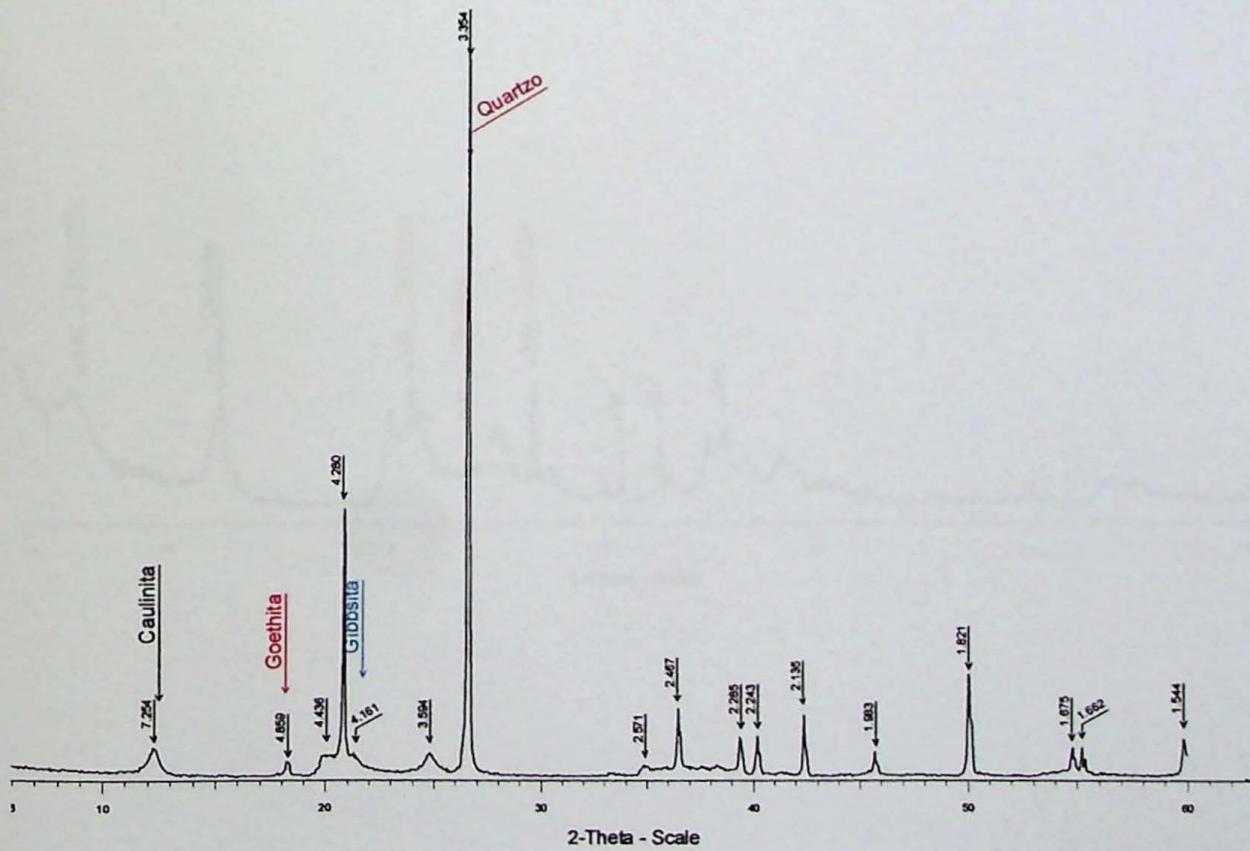
TFLIB2



TFLIC

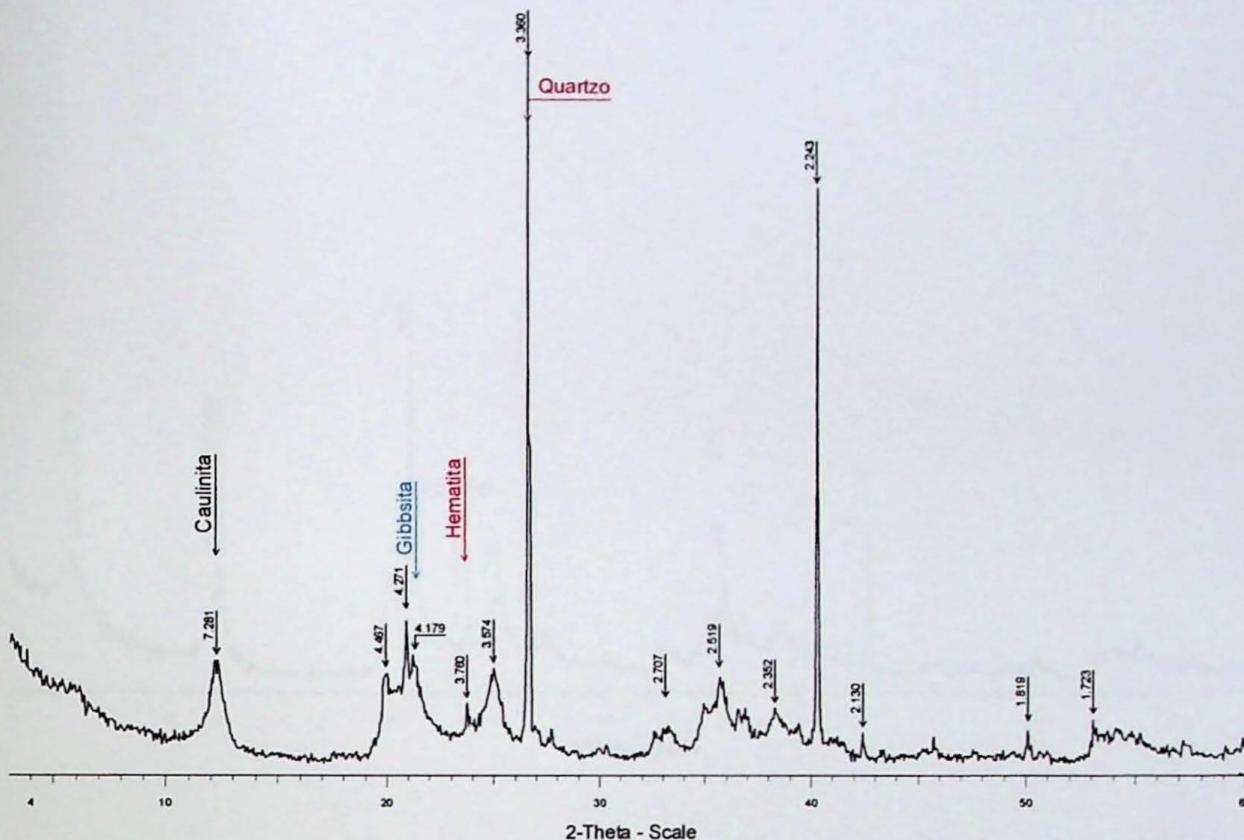


TFLIB

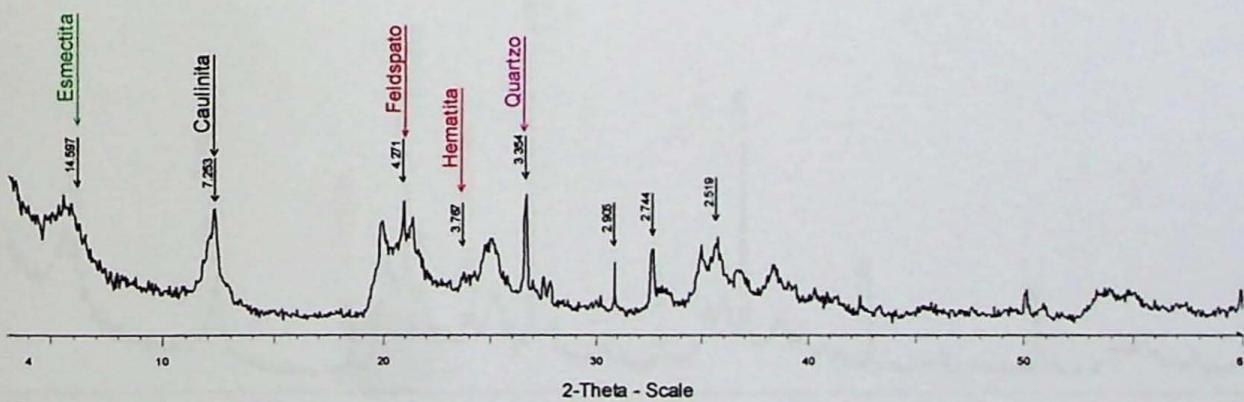


Difratogramas F3 – Amostras do latossolo em Piracicaba

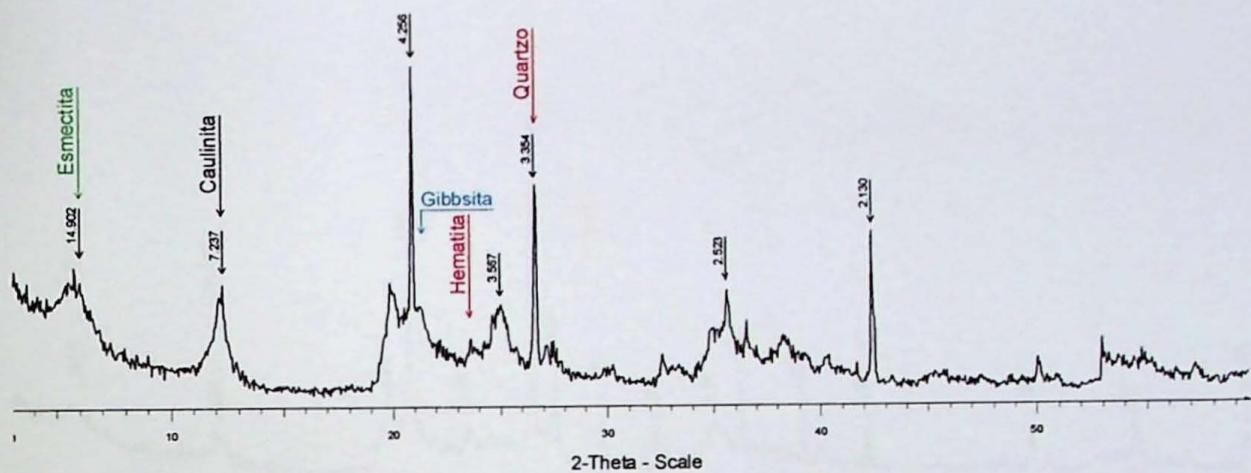
TFLPB



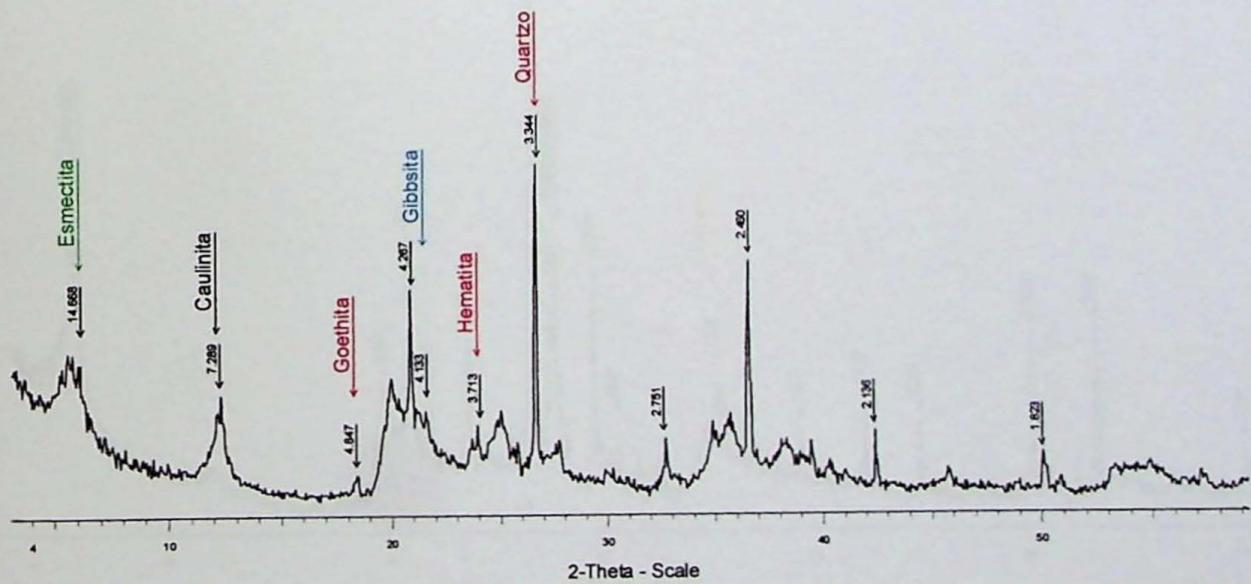
TFLPBC



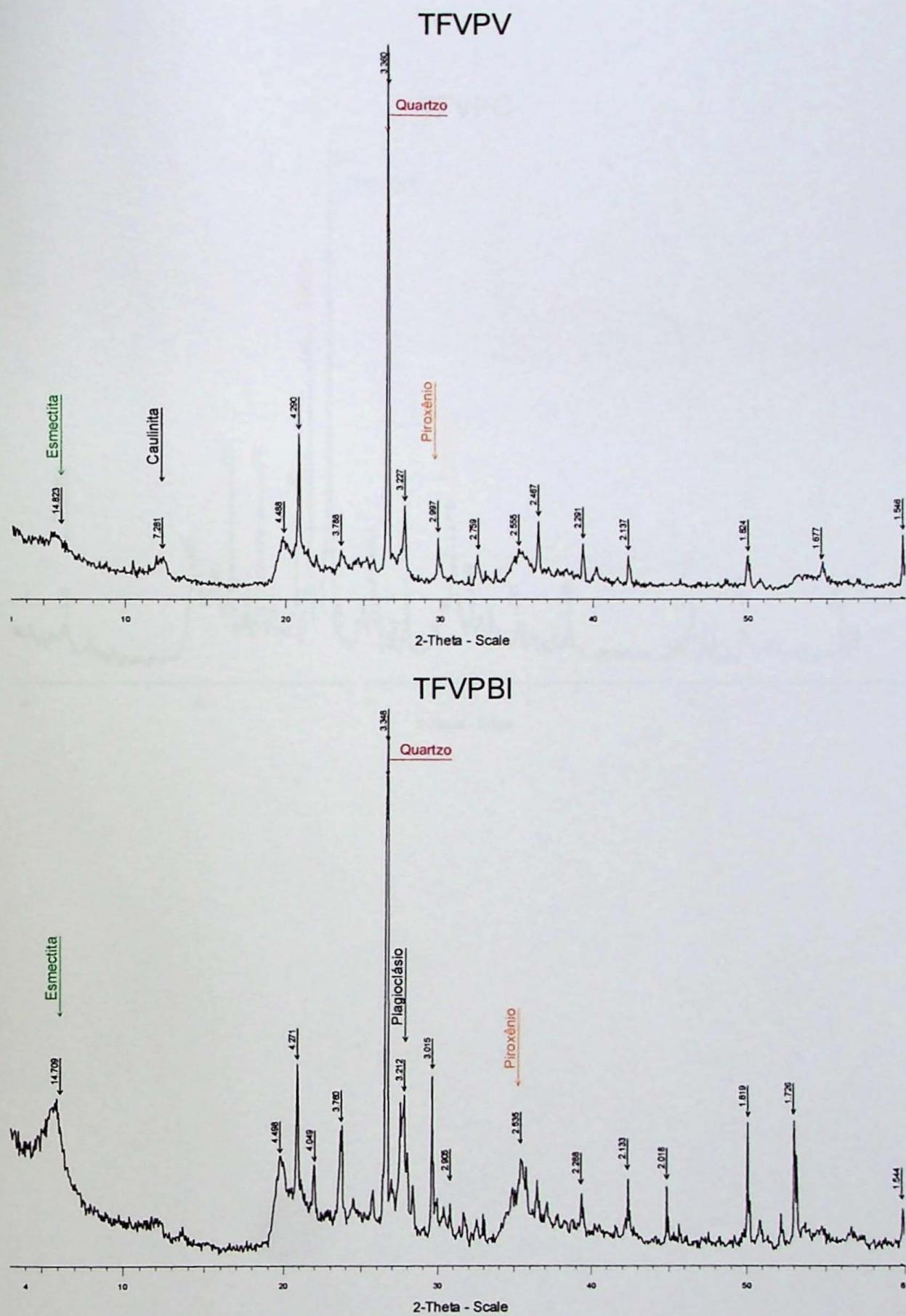
TFLPCB



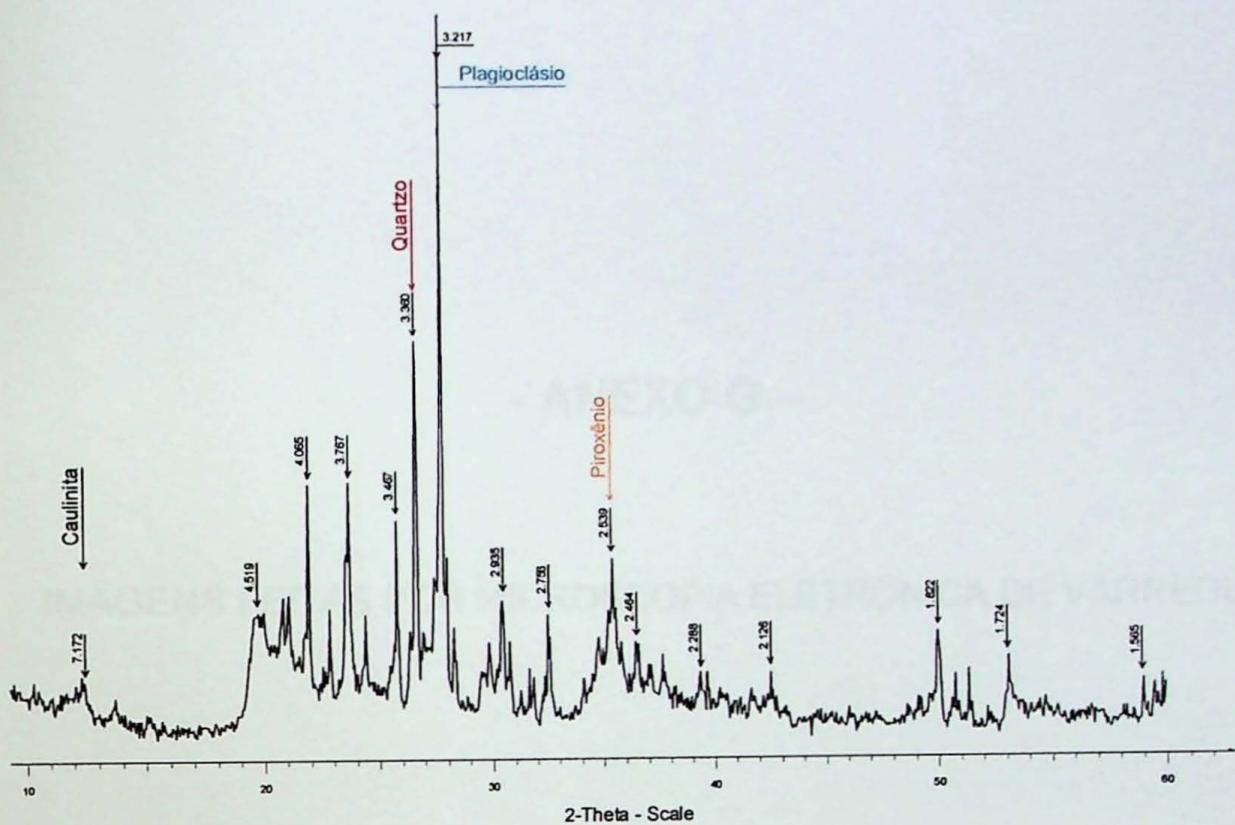
TFLPC



Difratogramas F4 – Amostras do vertissolo em Piracicaba



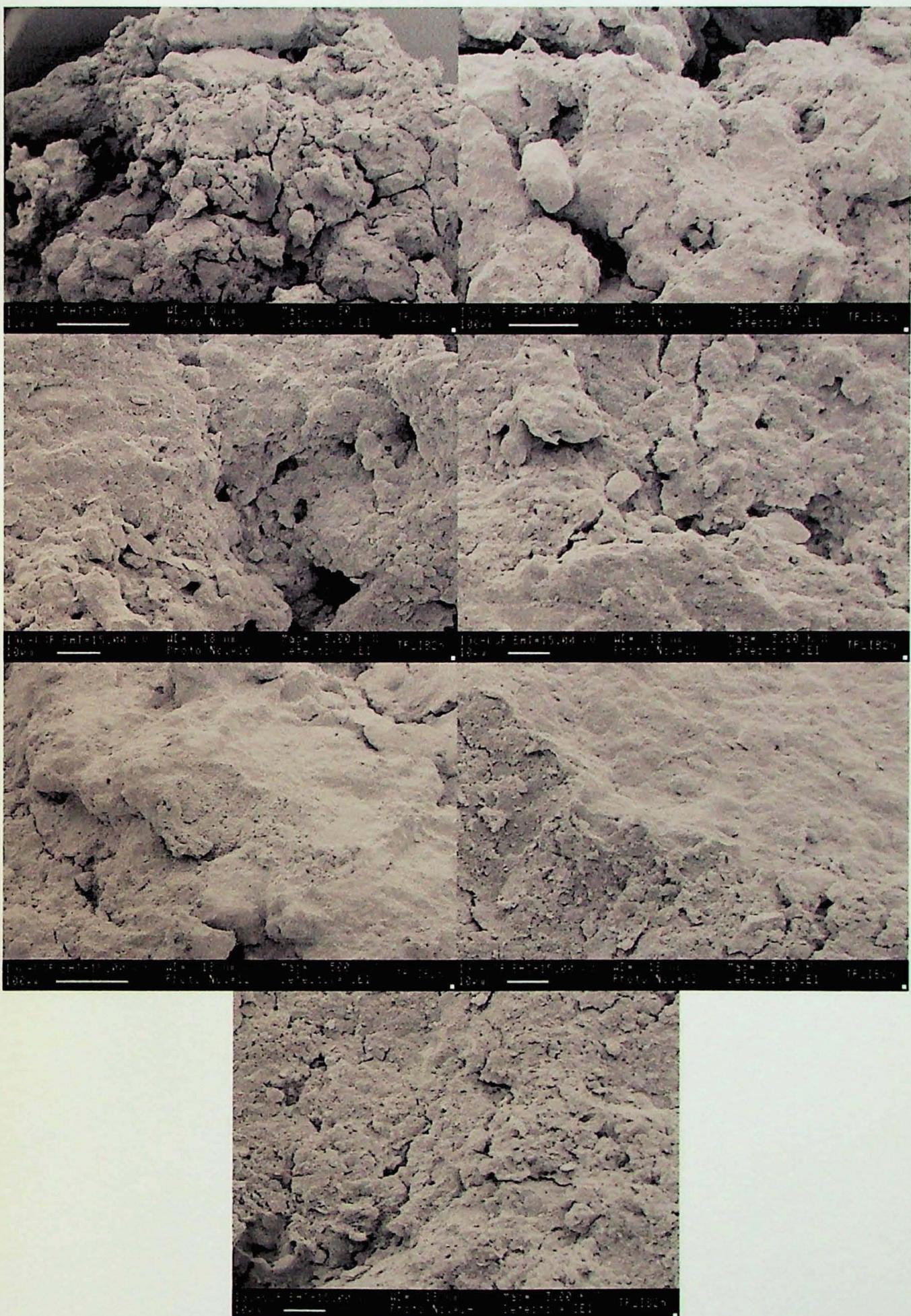
TFVPC



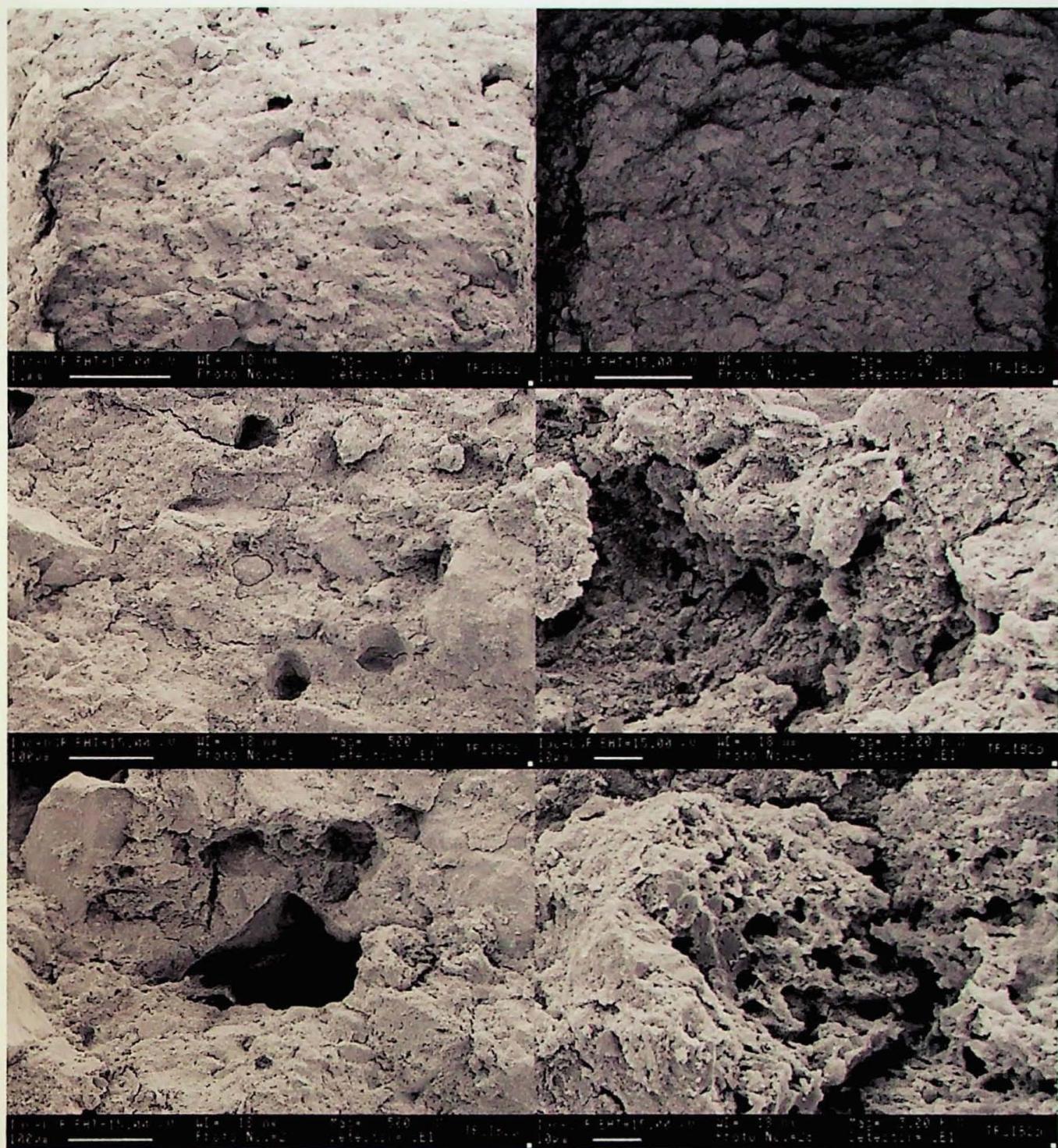
- ANEXO G -

IMAGENS FEITAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

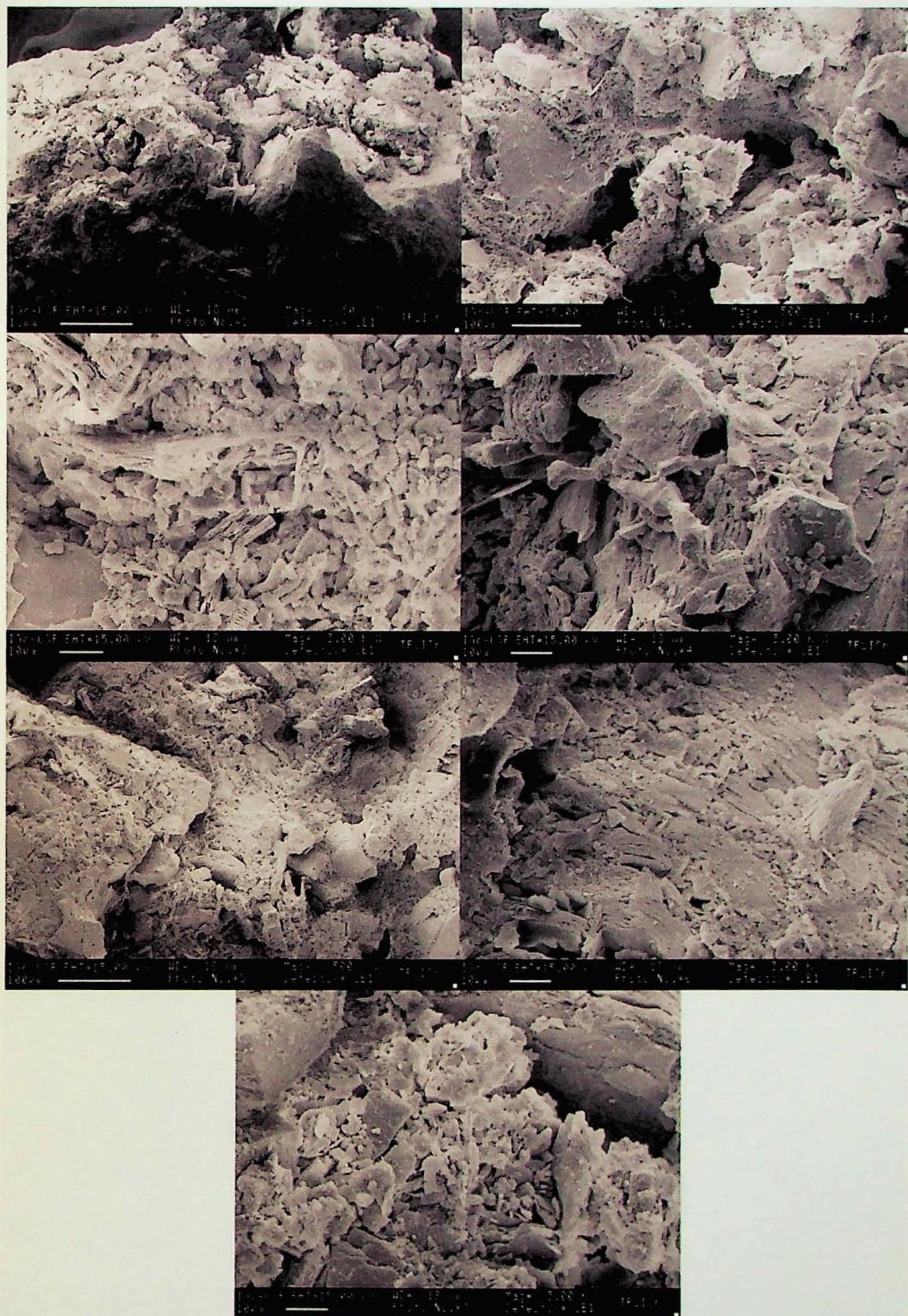
Imagens TFLIB2 – torrão natural



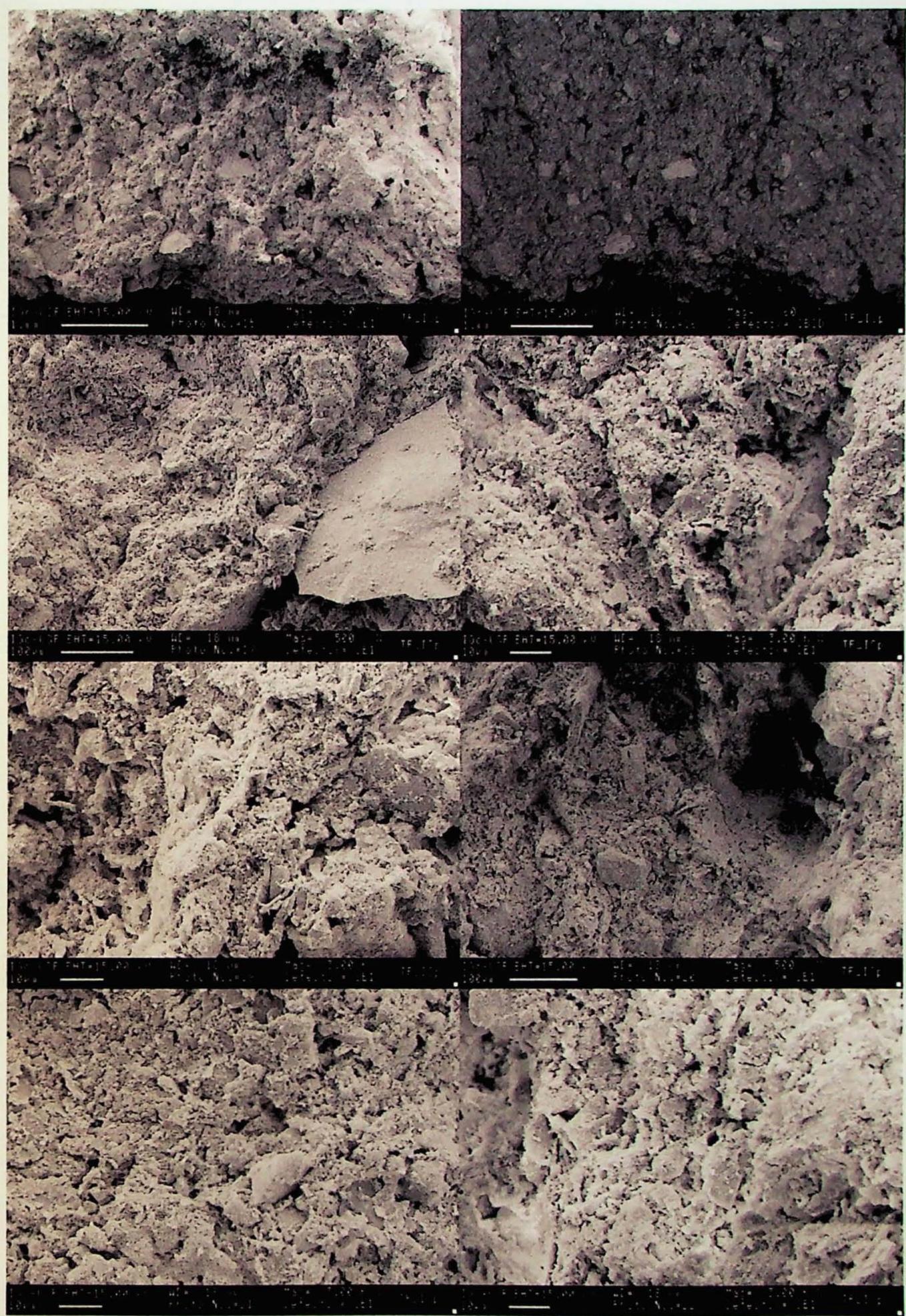
Imagens TFLIB2 – pastilha



Imagens TFLIC – torrão natural



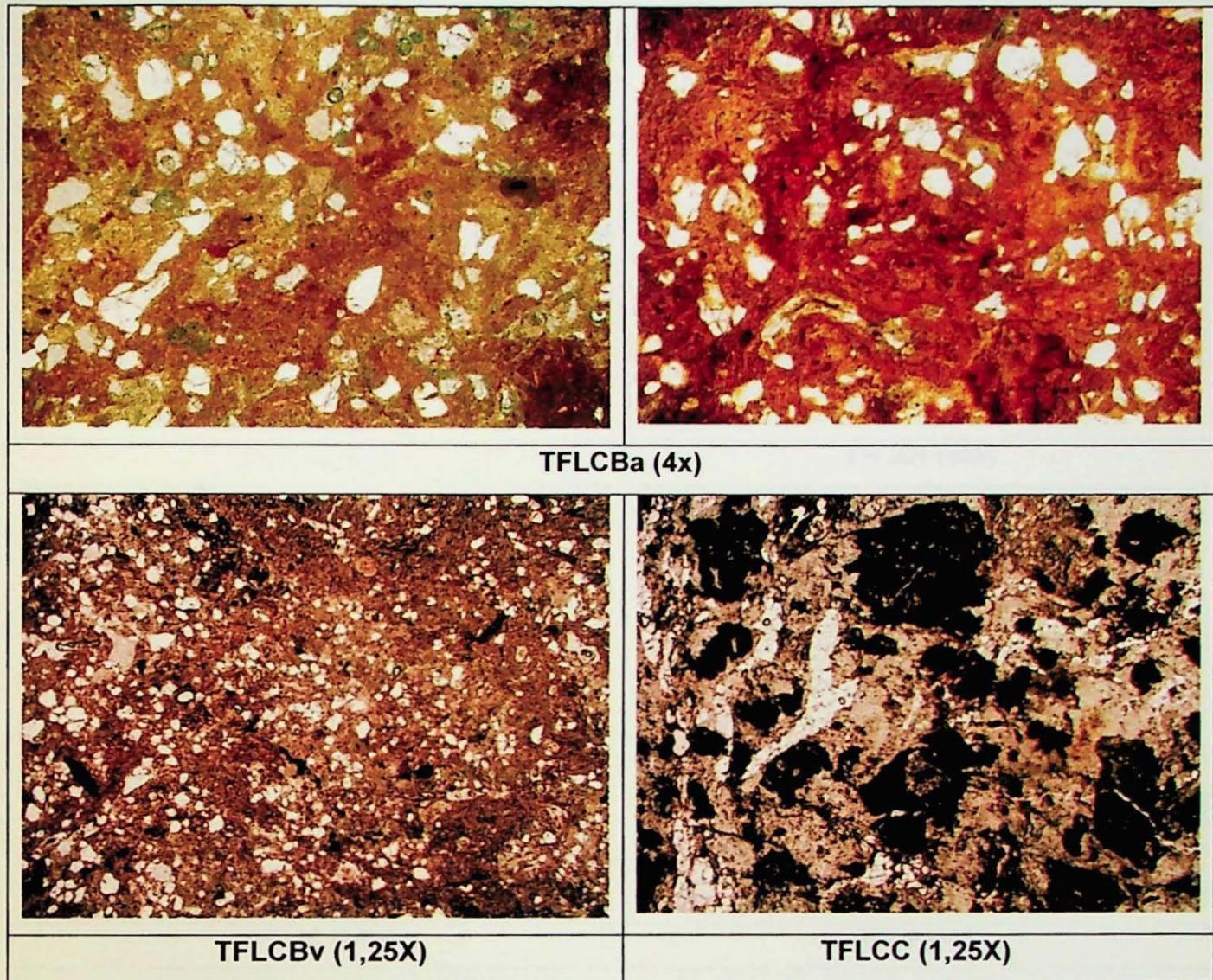
Imagens TFLIC – pastilha



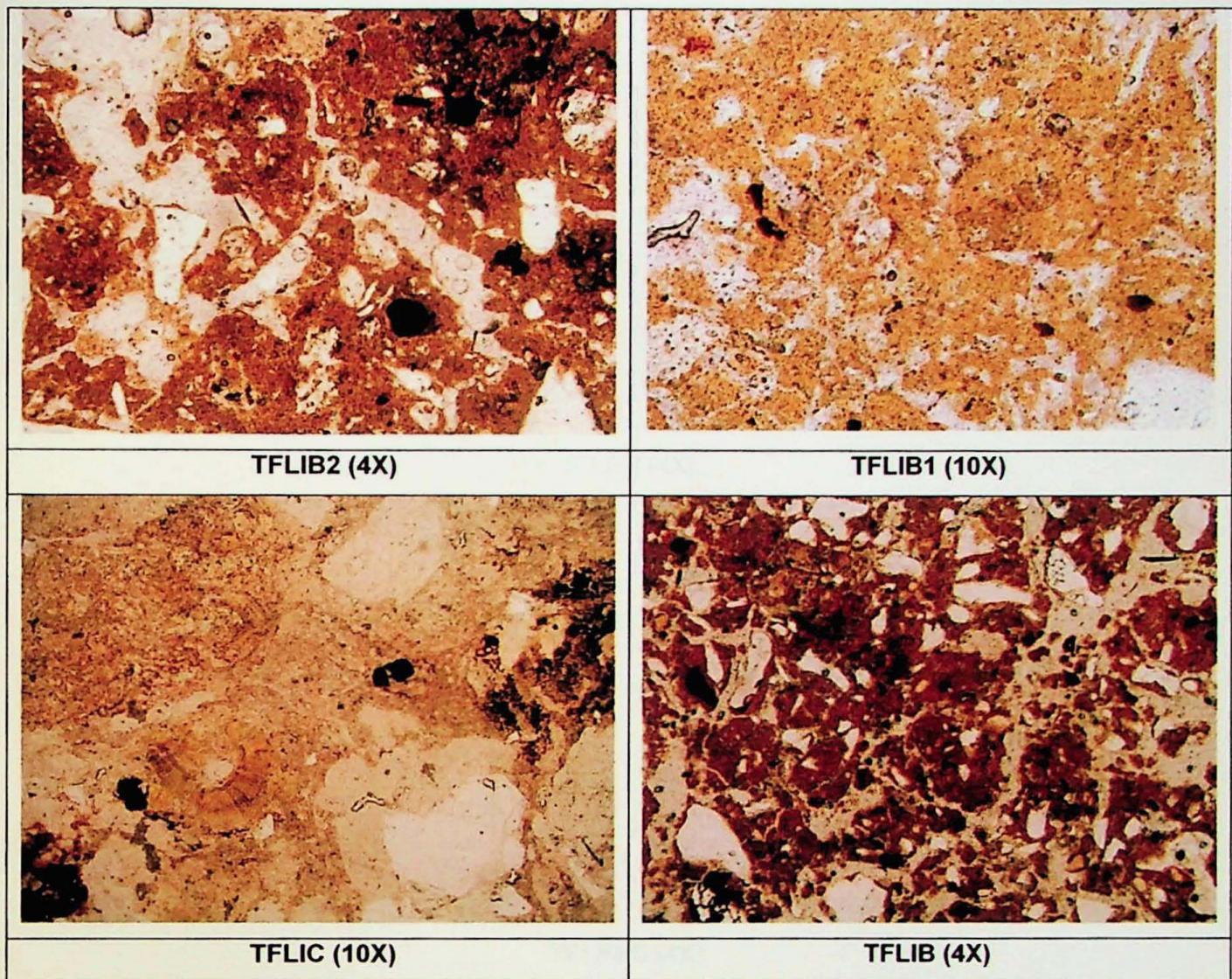
- ANEXO H -

IMAGENS FEITAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

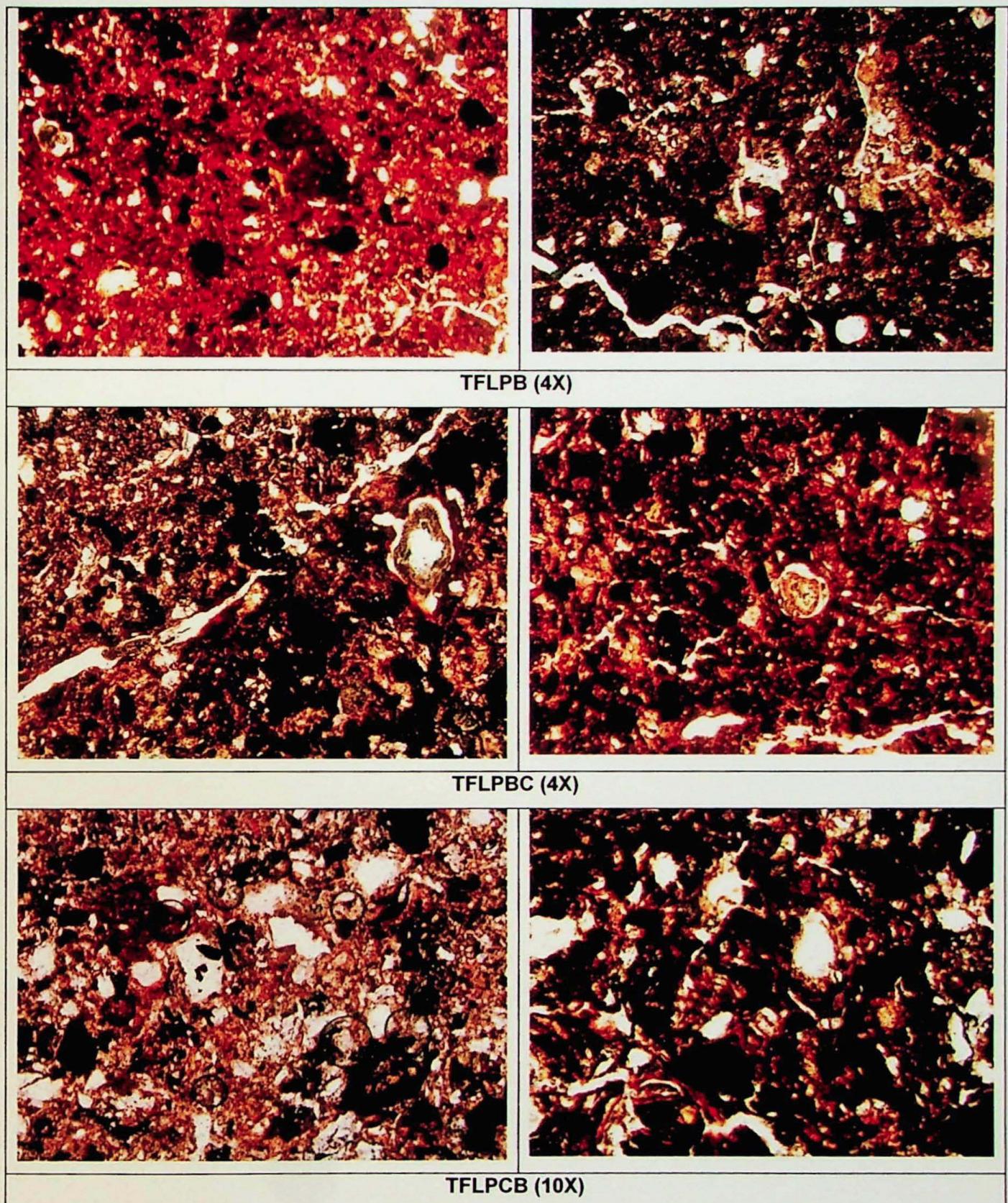
Imagens – Amostras do latossolo em Campos dos Jordão

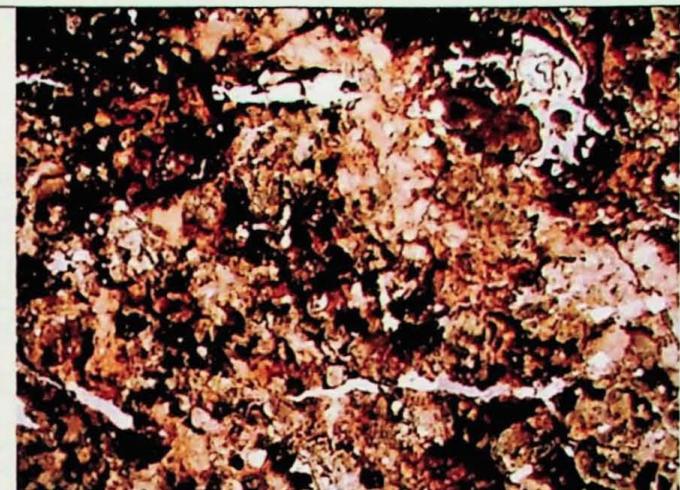


Imagens – Amostras do latossolo em Itu



Imagens – Amostras do latossolo em Piracicaba





TFLPC (1,25X)

Imagens – Amostras do vertissolo em Piracicaba

