

## **2** **Solos Residuais**

### **2.1.** **Introdução**

Os solos são produzidos através de dois processos geológicos, dos quais o mais comum é o processo de intemperismo, através da desagregação e decomposição “in situ” da rocha subjacente, dando origem aos denominados solos residuais. O segundo processo de formação de solos envolve a erosão, transporte e a deposição de materiais existentes na superfície, produzindo os solos transportados.

Esses dois processos são universais, diferenciando-se, nos climas tropicais, pela ação mais pronunciada do intemperismo químico, que se expressa pela grande espessura de solos residuais.

Os fatores que governam a formação dos solos são o clima (temperatura, chuva, evaporação, regime dos ventos, etc), os agentes biológicos (vegetais e animais), a rocha matriz, o relevo e o tempo. No caso dos solos residuais, a rocha matriz e o clima são os fatores principais que determinam a formação. O clima define, principalmente, a espessura e o número de horizontes do solo residual, enquanto a principal contribuição da rocha matriz é a definição da composição mineralógica do solo resultante.

Independente do processo geológico de origem do solo, a porção superficial está submetida aos processos pedogenéticos que promovem a adição, perda, transformação e transporte do material do solo. Os principais processos são o de eluviação e iluviação, respectivamente, processos de perda e adição de material; a lixiviação, que remove sais solúveis e a podzolização e a laterização, processos que levam à concentração de sílica e ferro. O agente principal dos processos pedogenéticos é a movimentação da água no solo, através da infiltração de águas de chuva e evaporação.

## 2.2.

### Classificação dos solos residuais

Vargas (1953) apresentou a primeira classificação genética dos solos tropicais brasileiros, distinguindo três horizontes: solo residual maduro, argiloso e poroso; solo residual jovem, silto-arenoso, com a presença de estruturas reliquiares e rocha alterada. Dentre outros autores que contribuíram com propostas de classificação de solos podem ser citados os trabalhos de Vaz, 1969; Deere e Patton, 1971; De Mello, 1972; Vargas, 1974 e outros, descritos com detalhe em Vaz (1996).

O conceito de intemperismo foi incorporado a estas propostas de classificação. Vargas (1985) apresenta uma classificação baseada em propriedades e comportamentos, identificando dois tipos de solos tropicais: residuais, derivados do intemperismo intenso e profundo da rocha subjacente e solos superficiais, derivados da evolução pedogenética de solos residuais e transportados. Para os solos residuais admite um horizonte inferior, com estruturas reliquiares da rocha matriz (saprolito), subdivido em dois níveis: um superior com poucos fragmentos da rocha matriz e outro inferior, com blocos e camadas de rocha.

Wolle et al. (1985) reconhecem seis horizontes de intemperismo, três de solo, um de transição e dois de rocha: solo superficial que pode ser residual, coluvionar ou sedimentar; solo residual maduro, solo residual jovem ou solo saprolítico, com estruturas da rocha matriz; saprolito, constituindo uma transição entre o solo e a rocha, com a presença de matações; rocha alterada e rocha sã.

Pastore (1992) estabelece seis horizontes, dois de solo, um com predominância de processos pedológicos (solo laterítico) e outro com estruturas reliquiares da rocha (solo saprolítico); um de transição solo/rocha (saprolito) e três de rocha: muito alterada, alterada e sã.

Vaz (1996) apresenta um perfil de intemperismo para regiões tropicais, com horizontes de solo e rocha definidos a partir dos métodos de escavação e perfuração. A subdivisão desses horizontes é feita associando-se critérios baseados na evolução pedogênica para solos e no grau de alteração mineralógica para a rocha, conforme apresentado na Figura 2.1. Estabelece cinco horizontes, dois de solo, o limite entre o solo e a rocha é definido pelo limite da perfuração à trado manual ou pelo limite para execução dos ensaios de penetração (SPT) nas sondagens à percussão.

CLASSIFICAÇÃO	CLASSES	PERFIL DE INTEMPERISMO	PROCESSOS	MÉTODOS DE		COMPORTAMENTO		
				ESCAVAÇÃO	PERFURAÇÃO			
SOLO RESIDUAL	SOLO VEGETAL		PEDOLÓGICOS	LÂMINA DE AÇO ("SCRAPER", ENXADÃO, FACA)	1g	HOMOGÊNICO ISOTRÓPICO		
	SOLO ELUVIAL (SE)						S1	A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM
ROCHA	SOLO DE ALTERAÇÃO (SA) saprolito		INTEMPÉRICOS QUÍMICOS	ESCARIFICADOR (PICARETA)	2g	DEPENDENTE DO TIPO DE ROCHA		
	ROCHA ALTERADA MOLE (RAM)						R3	A PERCUSSÃO COM LAVAGEM IMPENETRÁVEL A LAVAGEM POR TEMPO
	ROCHA ALTERADA DURA (RAD)						R2	ROTATIVA
	ROCHA Sã (RS)						R1	
	INCICIENTES OU AUSENTES	EXPLOSIVO	3g					

Figura 2.1 – Classificação proposta por Vaz (1996)

Como pode concluir-se observando as diferentes propostas, tentar estabelecer uma classificação rigorosa e única para os solos residuais é um enfoque pouco realista da natureza destes solos, o podem ser identificadas são características comuns aos diferentes perfis de intemperismo: como a existência de dois perfis de solo, o denominado de solo residual maduro (SRM) e o de solo residual jovem (SRJ).

O solo residual maduro apresenta características homogêneas em relação à cor, granulometria e composição mineralógica, ausência total da textura e da estrutura da rocha matriz (estruturas reliquiárias). A mineralogia destes solos é constituída, essencialmente, pelo grupo dos argilo-minerais e por minerais de rocha, quimicamente inertes, dos quais o mais comum é o quartzo. O solo residual jovem é a camada de solo que se encontra ainda em processo de alteração intempérica, onde os processos pedogênicos são incipientes ou muito

limitados. Este solo também é denominado como solo de alteração ou saprolítico e é tipicamente heterogêneo em relação à cor, textura e composição mineralógica. Esta heterogeneidade é decorrente da manutenção do arranjo dos minerais segundo a disposição na rocha matriz. Além disso, as estruturas presentes na rocha, tais como a xistosidade, estratificação, fraturas, etc, encontram-se preservadas no solo de alteração. A preservação destas estruturas torna estes solos anisotrópicos. A mineralogia dos SRJ é constituída por argilo-minerais neo-formados e minerais de rocha em processos de alteração química para argilo-minerais. Os minerais da rocha quimicamente inertes, como o quartzo, encontram-se tipicamente apenas mais fragmentados do que na rocha.

Neste capítulo são discutidos alguns fatores relevantes ao estudo de solos tropicais residuais, como são os aspectos mineralógicos, químicos e sua estrutura.

### **2.3.**

#### **Aspectos mineralógicos e químicos**

A mineralogia dos solos residuais, como já foi citado, é originária da composição mineralógica da rocha matriz e das condições de formação do solo.

Embora essa mineralogia seja muito dependente da rocha matriz, existem algumas características comuns à maioria dos solos formados em ambientes tropicais e subtropicais úmidos. Uma das mais marcante é que estes solos são ácidos, ou seja, apresentam um valor de  $\text{pH} < 7$ , o processo de intemperismo produz a lixiviação dos elementos alcalinos (Ca, Na, Mg, K) e a concentração de sílica, alumínio e sesquióxido de ferro. Baseados neste processo podem ser calculados diferentes índices químicos e mineralógicos e/ou micro-morfológicos que são utilizados para avaliar o grau de alteração do solo.

#### **2.3.1.**

##### **Índices químicos**

Os índices químicos de intemperismo são usualmente utilizados para caracterizar perfis de alteração. Em geral, eles são apresentados em gráficos vs profundidade, fornecendo uma representação da variação do intemperismo com a profundidade. A variação destes índices, com a profundidade, é contínua e sistemática para rochas homogêneas, como o granito (Sutton and Maynard,

1992). Porém para rochas heterogêneas o padrão desenvolvido não é necessariamente contínuo e progressivo (Ciampone et al, 1992), a presença de foliações, fraturas, etc, produz camadas com composições químicas e mineralógicas diferentes.

Uma grande variedade de índices encontra-se disponível na literatura, e têm sido utilizados para estudar diferentes perfis de alteração (e.g. Price and Velbel, 2003; Duzgoren-Aydin et al., 2002; Rahardjo et al., 2004; Soury et al., 2006; Otha and Arai, 2007; Munroe et al., 2007). Com o intuito de avaliar a aplicabilidade destes índices aos solos tropicais, a seguir será feita uma revisão dos índices químicos existentes indicando suas limitações e aplicabilidade.

Em geral todos os índices são uma relação entre elementos considerados pouco solúveis (imóveis) e que permanecem constantes (como o  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) e elementos cuja concentração diminui na medida em que o grau de intemperismo e a lixiviação aumentam ( $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$  e  $MgO$ ). A maioria destes índices está apresentada como relações moleculares entre os diferentes elementos e é calculada a partir de resultados de ensaios químicos de Fluorescência de Raios-X, também chamado de *Análise Química Total*. Nas Tabelas 2.1 a 2.6 estão apresentadas as diferentes propostas disponíveis na literatura, classificadas segundo a relação utilizada no cálculo dos índices.

Os índices que consideram a quantidade de sílica total, se usados para avaliar o intemperismo de rochas de caráter ácido, podem dar resultados questionáveis, pois com a evolução do intemperismo a sílica se concentra também sob a forma de quartzo provocando um acréscimo nestes índices (Tabela 2.2). O índice de Ruxton (1968) é um deles, é um índice simples que relaciona a perda de sílica com a alumina, considerando que o alumínio permanece constante com o intemperismo. Ruxton (1968) testou o índice em rochas ígneas e metamórficas em regiões úmidas e encontrou, para os materiais testados, uma boa correlação entre este índice e a perda de elementos.

O índice de Parker, ou Weathering Index of Parker (WIP), foi proposto para rochas silicatadas, considera na sua formulação a mobilidade individual dos elementos. A aplicação do índice de Parker aos solos residuais maduros, formados em ambientes tropicais, é limitada, já que ele é calculado a partir do conteúdo de álcalis, que em um solo maduro, em geral, é baixo.

O índice proposto por Miura (1973) considera a diferença de mobilidade entre as formas de ferro ferroso e de ferro férrico, já que o ferro ferroso tem uma mobilidade maior que o férrico. A desvantagem desta proposta é que é necessário identificar e quantificar as formas férrica e ferrosa. Também é

importante lembrar que em muitos perfis a concentração de ferro é controlada pela posição do nível freático atual ou antigo e não necessariamente pelo grau de intemperismo.

Os índices propostos por Nesbitt and Young, 1982 (CIA); Harnois, 1988 (CWI); Harnois and Moore, 1988 (ALK Ratio) e Fedo, 1995 (PIA), são índices que avaliam a transformação dos feldspatos em argila. Por esta razão são índices interessantes quando se quer avaliar a alteração dos feldspatos durante o processo de intemperismo. A diferença entre os índices propostos por Nesbitt and Young (1982) e por Harnois (1988) está na exclusão do  $K_2O$  na fórmula de Harnois (1988). Por isto, não é recomendável a utilização do índice CWI na avaliação de perfis derivados de rochas K-feldspáticas.

Tabela 2.1 – Índices baseados na relação mobilizável/imobilizável

Autor	Índice químico
Harrossowitz, 1926	$ba = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$ $ba_2 = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$
	$ba_1 = \frac{K_2O + Na_2O}{Al_2O_3}$ $ba_3 = \frac{K_2O + Na_2O + MgO}{Al_2O_3}$
Colman, 1982	$Bases : Al = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + MgO}{Al_2O_3}$
	$Bases : R_2O_3 = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + MgO}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$
Rocha Filho et al., 1985	$b_1 = \frac{Al_2O_3}{TiO_2}$
Chittleborough, 1991	$WR = \frac{CaO + MgO + Na_2O}{ZrO_2}$
Darmody et al., 2005	$WI - 1 = \frac{(SiO_2 + CaO)}{Fe_2O_3 + TiO_2}$
	$WI - 2 = \frac{(SiO_2 + CaO)}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2)}$

WR = weathering ratio, WI-1/WI-2 = weathering index

Tabela 2.2 – Índices baseados no conteúdo de sílica

Autor	Índice químico
Jenny, 1941	$SF = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$
	$\frac{Silica}{R_2O_3} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2}$
Reiche, 1943	$PI = 100 \times \frac{SiO_2}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + Al_2O_3}$
Ruxton, 1968	$R = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
de Jayawardena and Izawa, 1994	$STI = 100 \times \left[ \frac{\left( \frac{SiO_2}{TiO_2} \right)}{\left( \left( \frac{SiO_2}{TiO_2} \right) + \left( \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \right) + \left( \frac{Al_2O_3}{TiO_2} \right) \right)} \right]$

PI = product index, R = Ruxton ratio, STI = silica-titania index

Tabela 2.3 – Índices normalizados ( $I_{\text{weathered}}/I_{\text{sound}}$ )

Autor	Índice químico
Harrossowitz, 1926	$B = \frac{ba_{\text{weathered}}}{ba_{\text{sound}}}$
Jenny, 1941	$LchFactor = \frac{I_{\text{weathered}}}{I_{\text{fresh}}} \rightarrow I = \frac{K_2O + Na_2O}{SiO_2}$
Short, 1961	$WI = 100 \frac{WPI_{\text{weathered}}}{WPI_{\text{fresh}}}$
Rocha Filho et al., 1985	$K = \frac{I_{\text{weathered}}}{X_{\text{sound}}}$ $I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad X = \frac{K_2O + Na_2O + CaO}{Al_2O_3}$
Irfan, 1996	$Imob = \frac{I_{\text{fresh}} - I_{\text{weathered}}}{I_{\text{fresh}}}$ $I = K_2O + Na_2O + CaO$

LchFactor = leaching factor, WI = weathering index, Imob = mobiles index

Tabela 2.4 – Índices baseados na alteração dos feldspatos

Autor	Índice químico
Vogt, 1972	$V = \frac{(Al_2O_3 + K_2O)}{(MgO + CaO + Na_2O)}$
Nesbitt and Young, 1982	$CIA = 100 \times \left[ \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)} \right]$
Harnois, 1988	$CIW = 100 \times \left[ \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)} \right]$
Harnois and Moore, 1988	$ALKRatio = \frac{K_2O}{K_2O + Na_2O} \times 100$
Fedo et al., 1995	$PIA = 100 \times \left[ \frac{(Al_2O_3 - K_2O)}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)} \right]$

V = Vogt's residual index, CIA = chemical index of alteration, CIW = chemical index of weathering, PIA = plagioclase index of alteration.

Tabela 2.5 – Índices baseados nas mobilidades dos elementos

Autor	Índice químico
Parker, 1970	$WIP = 100 \times \left[ \left( \frac{2Na_2O}{0,35} \right) + \left( \frac{MgO}{0,90} \right) + \left( \frac{2K_2O}{0,25} \right) + \left( \frac{CaO}{0,70} \right) \right]$
Miura, 1973	$MI = \frac{MnO + FeO + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{Fe_2O_3 + Al_2O_3 + 3H_2O}$

WIP = weathering index of Parker, MI = Miura index

Tabela 2.6 – Outros índices

Autor	Índice químico proposto
Reiche, 1943	$WPI = 100 \times \frac{(K_2O + Na_2O + CaO - H_2O^+)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)}$
Sueoka, 1988	$CWI = \frac{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + LOI}{allchemicalcomponents} \times 100$

WPI= weathering potential index, CWI= chemical weathering index, LOI= índice de perda ao fogo.

Além destes índices também podem ser calculadas as relações moleculares  $k_i$  e  $k_r$ , que são comumente usadas para avaliar o grau de alteração do solo. As relações moleculares  $k_i$  e  $k_r$  podem ser computadas a partir dos dados obtidos em ensaios químicos de *Ataque Sulfúrico*:

$$k_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

$$kr = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (\text{Equação 2.2})$$

O índice  $kr$  é mais apropriado para uso em solos maduros com alto teor de argila.

Outra relação interessante é a que propõem Kromberg & Nesbitt (1981). Eles discutem o intemperismo químico através de um gráfico com ordenada igual à relação  $(CaO+Na_2O+K_2O)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)$  e abscissa igual à relação  $(SiO_2+CaO+Na_2O+K_2O)/(Al_2O_3+SiO_2+CaO+Na_2O+K_2O)$ . A primeira relação indica o grau de alteração dos feldspatos e, a segunda, o enriquecimento de sesquióxidos de Al e Si com o intemperismo.

Voicu et al. (1996) calcula o MIA (Mineralogical Index of Alteration) a partir do CIA, usando a seguinte equação:

$$MIA = 2 \times (CIA-50), \quad (\text{Equação 2.3})$$

O índice de alteração mineralógica avalia o grau de intemperismo mineralógico, ou seja, a relação de alteração dos minerais primários. Valores de MIA de (0-20%) indicam intemperismo incipiente, weak (20-40%), moderado (40-60%) e intenso (60-100%).

Outro índice que pode ser calculado é a Perda ao Fogo (L.O.I – Loss of Ignition). A perda ao fogo é uma determinação gravimétrica, usualmente, através da obtenção do peso da amostra, antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora. A temperatura de 950°C é a geralmente utilizada, mas existem limitações para a aplicação deste procedimento padrão em rochas ricas em micas, já que as micas perdem água de constituição na faixa de 800 -1000 °C. No item 2.5.2 da presente tese será apresentado um procedimento alternativo para a obtenção do índice de perda ao fogo.

Outros ensaios que permitem avaliar o intemperismo são os ensaios de Difração de Raios-X, Termodiferencial, Determinação do pH e Capacidade de Troca Catiônica, estes ensaios serão descritos brevemente no item 2.5.2.

### 2.3.2. Índices mineralógicos e micro-morfológicos

A análise mineralógica permite o estudo da gênese e evolução do solo através das mudanças nos teores dos diversos minerais com a profundidade, uma vez que os constituintes minerais das rochas não se decompõem com a mesma intensidade por apresentarem diferentes graus de estabilidade. Por isto,

é possível a obtenção de índices de intemperismo dos solos com base na relação entre os minerais primários remanescentes e de neoformação presentes nas diversas frações granulométricas dos solos. Para a aplicação de índices mineralógicos é necessária a quantificação dos minerais separadamente. Esta quantificação, em geral, é um processo demorado (geralmente feito através da contagem em lupa binocular, microscópio petrográfico e acessórios específicos) e a escolha dos minerais considerados como referência dependerá do tipo de rocha e clima da região.

Magaldi and Tallini (2000) propõem um índice micro-morfológico o MISODI que é obtido a partir da análise descritiva e qualitativa de lâminas delgadas. Este índice, embora interessante, apresenta a mesma dificuldade de determinação dos índices mineralógicos.

## **2.4.**

### **Estrutura**

A estrutura dos solos residuais também apresenta características particulares. Nos solos jovens, a agregação é pequena, a estrutura está ainda muito influenciada pela estrutura da rocha e a distribuição dos poros é relativamente homogênea.

Na medida em que o intemperismo avança, a estrutura original da rocha deixa de ser tão marcante. Nos solos maduros está praticamente destruída, e a distribuição de poros tende a ser mais heterogênea.

Nestes solos residuais, quando submetidos a processos como a laterização, existe a presença de ligações (cimentações) por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Por ser a estrutura dos solos residuais jovens tão dependente da estrutura da rocha é difícil obter uma correlação entre a estrutura e o grau de intemperismo do solo. Entretanto, de uma forma geral, observa-se que o intemperismo conduz a uma estrutura porosa devido à lixiviação de elementos, o que gera novos vazios. Em outras palavras, quanto maior é o grau de intemperismo maior é a lixiviação dos elementos, logo dever-se-ia observar uma estrutura mais porosa. Isto pode ser avaliado por um incremento do índice de vazios ou pela diminuição da densidade total do solo. A alteração dos minerais pelo intemperismo origina grãos menores o que deveria ser observado pelo aumento do conteúdo de finos com o grau de intemperismo. Como o processo

de alteração é um fenômeno complexo, que inclui tanto lixiviação quando agregação, a observação dessas mudanças na estrutura e na granulometria nem sempre são evidentes.

A mudança da estrutura nos materiais alterados pode ser avaliada pela descrição da estrutura a partir da análise de lâminas delgadas dos solos e das rochas. Outra maneira de avaliar a mudança na estrutura é determinar a distribuição de poros, pela quantificação a partir de lâminas petrográficas e/ou a partir de resultados de porosimetria por injeção de líquidos ou gases ou ainda a partir da curva de retenção de umidade.

## **2.5.**

### **Casos de Estudo**

Para avaliar a aplicabilidade dos diferentes índices recomendados na literatura e a utilização de outros parâmetros de caracterização na avaliação do intemperismo, foram analisados dos casos diferentes. O primeiro visou avaliar a aplicabilidade dos índices químicos de intemperismo em perfis residuais produtos de alteração de diferentes litotipos de gnaiss. O segundo caso concentrou-se num perfil residual de gnaiss facoidal onde foi efetuada e analisada uma caracterização completa dos pontos de vista geotécnico, químico, mineralógico e micro-morfológico. Ambos os perfis são provenientes do Estado do Rio de Janeiro.

#### **2.5.1.**

### **Caso I: Índices Químicos de Intemperismo Aplicados a Perfis de Alteração de Gnaiss**

Foram analisados perfis característicos dos diferentes litotipos de gnaiss que se encontram no município do Rio de Janeiro, a partir de dados disponíveis na literatura. Define-se como gnaiss as rochas quartzo-feldspáticas com uma porcentagem de feldspatos maior que 20%, podendo ou não apresentar foliação marcante. De modo geral, os gnaisses do Rio de Janeiro apresentam idades em torno de 600 Ma.

Dentre os litotipos característicos do Rio de Janeiro, encontram-se o Biotita-Gnaiss (BG), Plagioclásio-quartzo-gnaiss antigamente denominado de Leptinito (L), Biotita-granada-gnaiss também conhecido como Kinzigito (K), e o Gnaiss Facoidal (GF). A distribuição destes está apresentada na Figura 2.2. Na

Tabela 2.7 apresenta-se as composições mineralógicas típicas dos diferentes litotipos analisados.

Tabela 2.7 – Composição mineralógica dos diferentes litotipos de gnaiss

	Gnaiss Facoidal	Leptinito	Biotita Gnaiss
Quartzo	28,55	45,03	20
Microclina	38,4	-	-
Feldespato Alcalino	-	33,90	-
Ortoclásio	-	-	25
Plagioclásio	18,5	11,80	30
Biotita	11,3	4,33	10
Granada	2,35	0,93	10
Muscovita	Traço	0,50	-
Carbonato	-	0,03	-
Referência	de Brito (1981)	Sobreira (1993)	da Rocha (1993)

Inicialmente foram analisados 9 perfis em diferentes locais. A locação dos perfis analisados está apresentada na Figura 2.3 e as características gerais deles estão resumidas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Resumo das características dos perfis de alteração.

Litotipo	Local de ocorrência	Ensaio executados									Autor
		AT	LOI	AS	pH	TG/TD	Gran.	Gs	e	$\gamma_d$	
Kinzigito	Gávea	x	-	-	-	-	X	x	-	-	Sertã (1986)
Gnaiss Facoidal	Gávea	x	x	x	x	x	X	x	x	x	de Brito (1981)
	Costa Brava	x	-	-	-	-	X	x	x	x	Maciel (1991)
Leptinito	Mirante Dona Marta	x	-	-	-	-	X	x	x	x	Sobreira (1993)
	Laranjeiras	x	x	-	-	-	-	-	-	-	de Caúla e Silva (1997)
Biotita Gnaiss	Jacarepaguá	x	-	-	-	x (TD)	X	-	-	-	
	Vista Chinesa	x	-	-	-	x (TD)	-	-	-	-	Lima (1994)
	Niemeyer	x	-	-	-	x (TD)	X	-	-	-	
	Estrada de Furnas	x	-	x	x	x	X	x	x	x	Polivanov (1998)

AT: Análise química total, LOI: perda ao fogo, AS, Ataque Sulfúrico, TG: Análise Termogravimétrica, TD: Análise Termodiferencial.

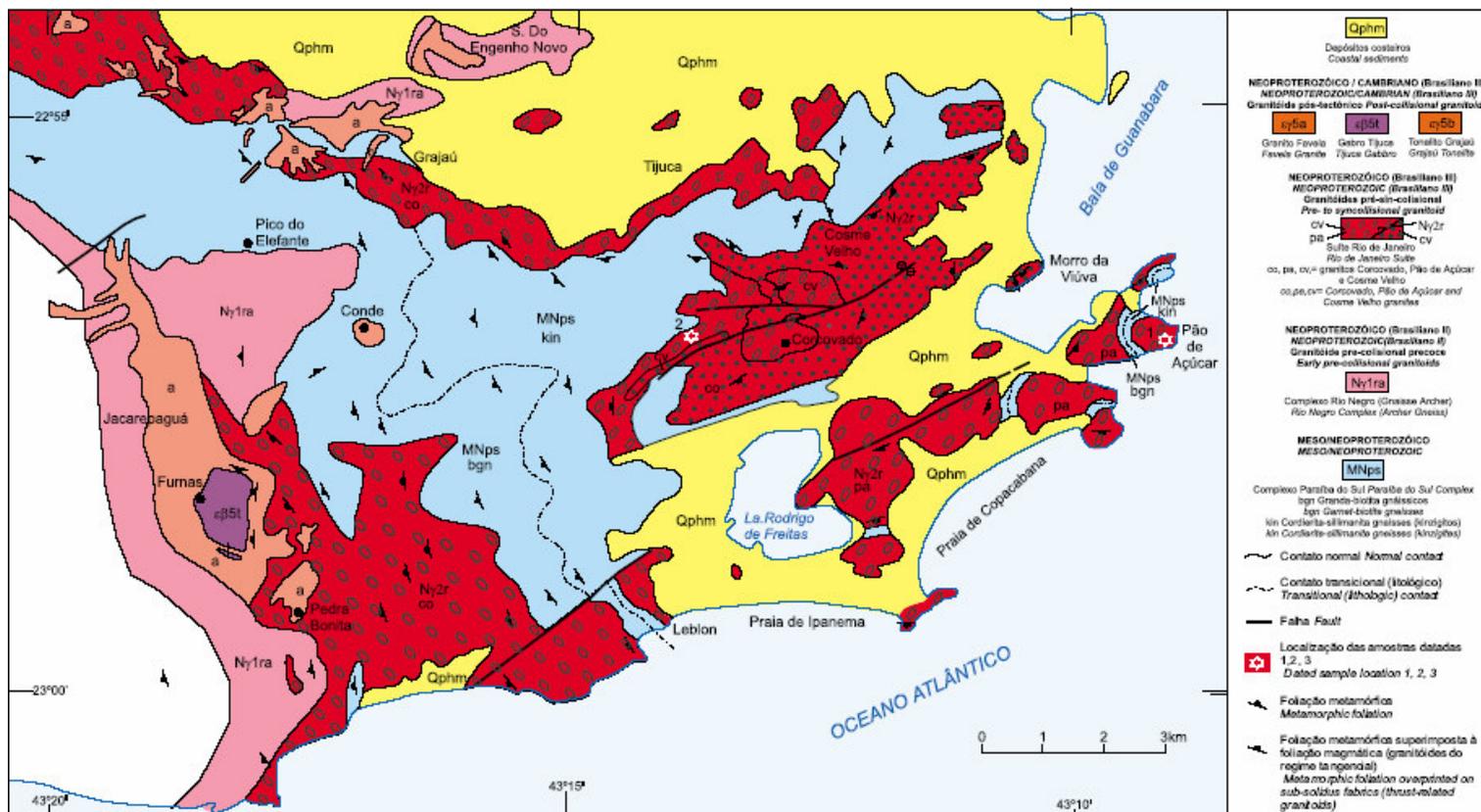


Figura 2.2 - Mapa Geológico Simplificado da Região Sul do Município do Rio de Janeiro. Litoestratigrafia, evolução tectono-metamórfica e magmatismo precambriano do setor sudeste do município do Rio de Janeiro, Atas III Simpósio de Geologia do Sudeste, Rio de Janeiro, SBG: pp. 174-179.

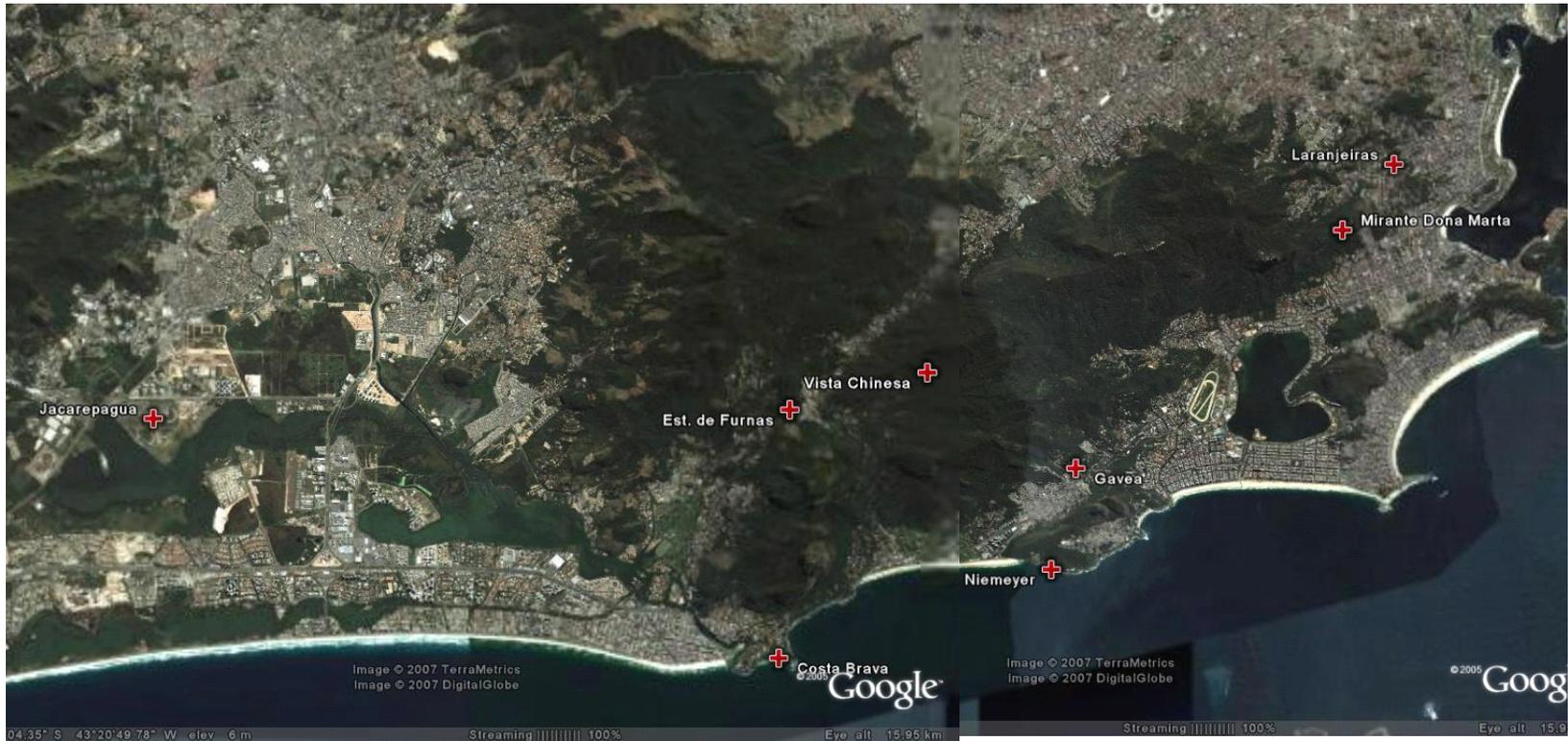


Figura 2.3 – Localização dos perfis estudados (Google Earth, 2007).

Uma das primeiras relações analisadas foi a relação molecular entre os conteúdos totais de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  nos diferentes perfis. Os resultados destas relações estão mostrados na Tabela 2.9 e na Figura 2.4. Para a elaboração destas foram utilizados os resultados de todos os perfis correspondentes a cada litotipo específico.

Tabela 2.9 – Relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$

Litotipo	Ajuste Linear	
	i	R <sup>2</sup>
Gnaiss Facoidal (GF)	-0,30	0,90
Leptinito (Lep.)	-0,60	0,86
Kinzigito	-0,34	0,68
Biotita Gnaiss (BG)	-0,25	0,92

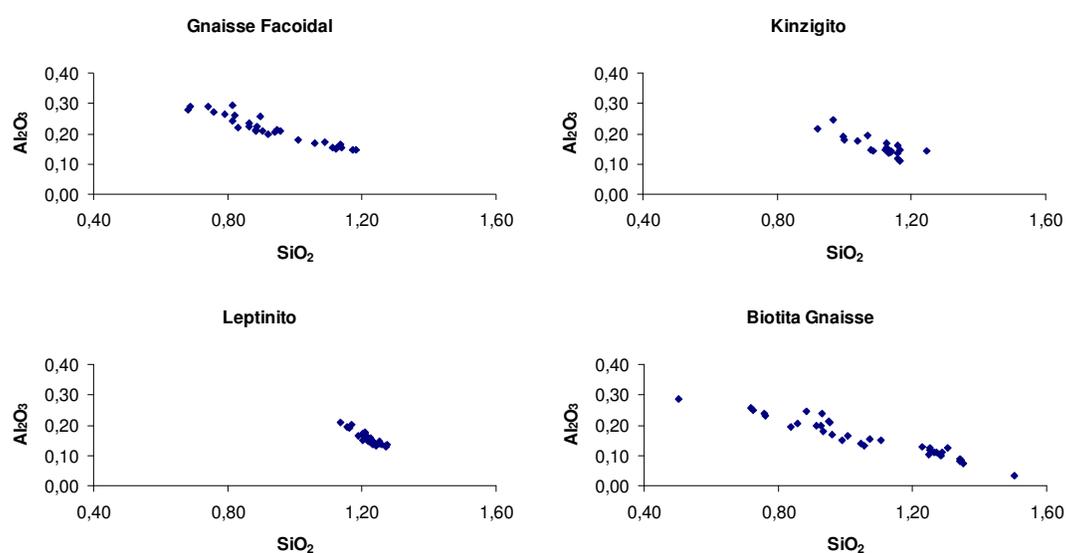
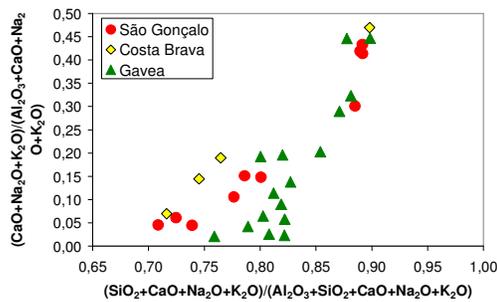


Figura 2.4 – Relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$

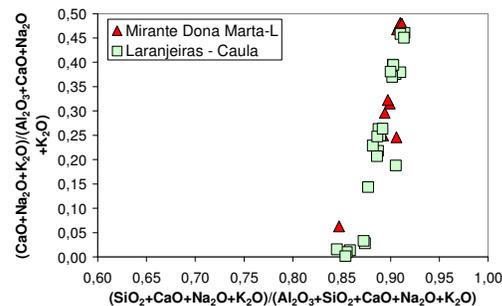
A segunda relação analisada foi a proposta por Kromberg & Nesbitt (1981), ou seja, a relação entre o conteúdo de álcalis e sesquióxidos, nos diferentes perfis. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 2.10 e na Figura 2.5.

Tabela 2.10 – Relação Álcalis x Sesquióxidos

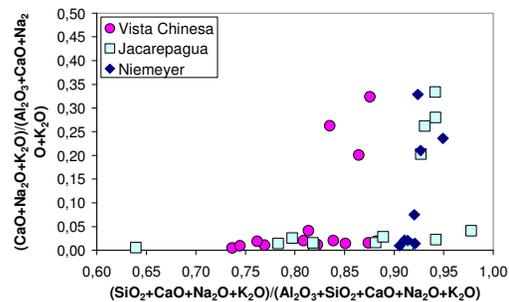
Litotipo	Local de ocorrência	Ajuste Linear	
		C. Linear	R <sup>2</sup>
Gnaiss Facoidal (GF)	São Gonçalo	2,11	0,93
	Costa Brava	2,17	1,00
	Gávea	3,31	0,76
Leptinito (Lp.)	Dona Marta	7,72	0,93
	Laranjeiras	6,28	0,74
Kinzigito (K)	Gávea	2,99	0,53
Biotita Gnaiss (BG)	Jacarepaguá	0,96	0,48
	Vista Chinesa	0,96	0,20
	Niemeyer	10,55	0,942



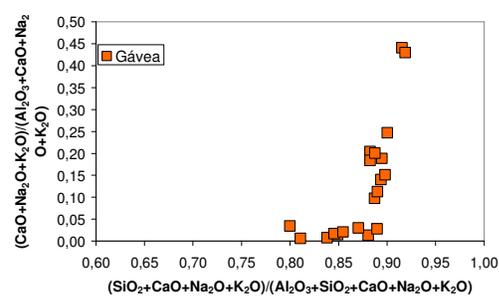
a) Facoidal



b) Leptinito



c) Biotita Gnaiss



d) Kinzigito

Figura 2.5 - Relação Álcalis x Sesquióxidos

A partir da análise destes gráficos, dos dados de Análise Química Total disponíveis e privilegiando aqueles que apresentaram determinação do índice de perda ao fogo (LOI), foi escolhido um perfil representativo para cada litotipo, para calcular os índices mencionados no item 2.3.1. As características mais importantes dos perfis escolhidos encontram-se resumidas na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Características dos perfis de alteração

Perfil	Localização	Referência	Espessura do Perfil
Gnaiss Facoidal	Gávea	de Brito (1981)	25 m
Leptinito	Laranjeiras	Caúla e Silva (1997)	40 m
Biotita Gnaiss	Jacarepaguá	Lima (1994)	110 m
Kinzigito	Gávea	Sertã (1986)	36 m

Em geral, os índices químicos são apresentados em gráficos em função da profundidade. Entretanto, como já foi mencionado, essa pode ser uma representação adequada para rochas homogêneas, mas não para rochas heterogêneas, como as rochas metamórficas, onde a evolução do intemperismo não é necessariamente função da profundidade. Assim sendo, foram testadas várias representações: variação com a profundidade, com o índice de vazios, com o conteúdo de finos e, finalmente com a LOI.

Nas representações dos índices de intemperismo com a profundidade, considerando um ajuste linear, o coeficiente de correlação foi sempre menor que 0,8 para os perfis de alteração de Biotita Gnaiss, Gnaiss Facoidal e Kinzigito. Entretanto, o perfil derivado do Leptinito apresentou coeficientes de correlação maiores que 0,8; para a maioria dos índices, quando correlacionados com a profundidade.

Tanto o conteúdo de finos quanto o índice de vazios não apresentaram boas correlações para a maioria dos litotipos. No caso do Leptinito o índice de vazios apresenta uma boa correlação com os índices químicos. Neste perfil não existem dados de granulometria disponíveis pelo que não foi possível avaliar a correlação dos índices químicos com esta característica.

Na Tabela 2.12 estão apresentados os parâmetros de ajuste dos índices químicos para o Leptinito, considerando a LOI.

Tabela 2.12 – Índices Químicos vs LOI – Perfil de alteração de Leptinito

LOI	Coef. angular	Coef. linear.	R <sup>2</sup>
ba	-0,10	0,76	0,88
ba <sub>1</sub>	-0,09	0,68	0,90
ba <sub>3</sub>	-0,09	0,71	0,90
β	-0,12	0,96	0,90
Leaching F	-0,13	1,03	0,92
WPI	-0,87	6,94	0,92
WI	-13,60	108,48	0,92
CIA	5,29	55,62	0,88
Bases	-0,10	0,79	0,89
Bases/R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,10	0,75	0,90
Imob	0,12	0,03	0,92
Parker Index	-8,63	69,76	0,93

No caso do Gnaisse Facoidal, como já foi mencionado, as correlações com a profundidade são pobres sendo menores que 0,80 para a maioria dos índices analisados. O índice de vazios e o conteúdo de finos (silte + argila) apresentam o mesmo comportamento. Neste perfil também foram avaliadas as correlações entre os índices  $k_i$  e  $k_r$  e os índices químicos. Os coeficientes de correlação com  $k_r$  são menores que 0,80 para todos os índices químicos. No caso do  $k_i$ , na Tabela 2.13 estão apresentadas as relações com coeficientes de correlação maiores que 0,80.

Tabela 2.13 – Índices Químicos vs  $k_i$  -Perfil de alteração de Gnaisse Facoidal

$k_i$	Coef. Angular	Coef. Linear.	R <sup>2</sup>
ba	0,22	-0,28	0,81
B	0,27	-0,35	0,81
b	1,50	0,54	0,87
CIW	-8,86	112,25	0,82
Imob	-0,25	1,29	0,81
PIA	-11,48	116,70	0,83

Na Tabela 2.14 estão apresentados os parâmetros de ajuste linear dos índices químicos, para o Gnaisse Facoidal (Gávea), considerando a relação com a LOI.

Tabela 2.14 – Índices Químicos vs LOI - Perfil de alteração de Gnaiss Facoidal

LOI	Coef. Angular	Coef. Linear	R <sup>2</sup>
ba	-0,09	0,76	0,94
ba <sub>1</sub>	-0,07	0,60	0,94
ba <sub>2</sub>	-0,03	0,28	0,93
ba <sub>3</sub>	-0,07	0,72	0,93
B	-0,11	0,95	0,94
Silica:R	-0,40	6,24	0,81
LchF	-0,09	0,93	0,87
WPI	-0,90	8,69	0,93
WI	-9,37	90,76	0,93
Pind	-5,42	52,29	0,93
CIA	4,72	54,31	0,96
Bases/alumina	-0,09	0,88	0,95
Bases/R	-0,09	0,88	0,95
ACN=CIW	3,30	70,42	0,87
CWI	0,02	0,12	0,84
Imob	0,10	0,10	0,94
PIA	4,26	62,63	0,87

Ainda para o perfil de Gnaiss Facoidal foi avaliada a correlação entre o LOI e os índices ki e kr. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 – LOI vs ki, kr – Gnaiss Facoidal

LOI	Coef. Angular	Coef. Linear	R <sup>2</sup>
ki	-0,30	4,30	0,71
kr	-0,05	1,82	0,60

Os perfis de alteração de Kinzigito e de Biotita Gnaiss não apresentaram boas correlações (R<sup>2</sup><0,80).

Para todos os perfis também foram analisados os conteúdos dos minerais plotados em gráficos ternários, com o objetivo de observar se existia algum comportamento diferenciado. O único gráfico que mostra alguma diferença nos conteúdos é o que compara os conteúdos de álcalis. Como pode observar-se na Figura 2.6, existe uma maior quantidade de MgO no Kinzigito e no Biotita Gnaiss. O Gnaiss Facoidal apresenta conteúdos similares de todos os álcalis e o Leptinito apresenta conteúdos maiores de CaO e Na<sub>2</sub>O.

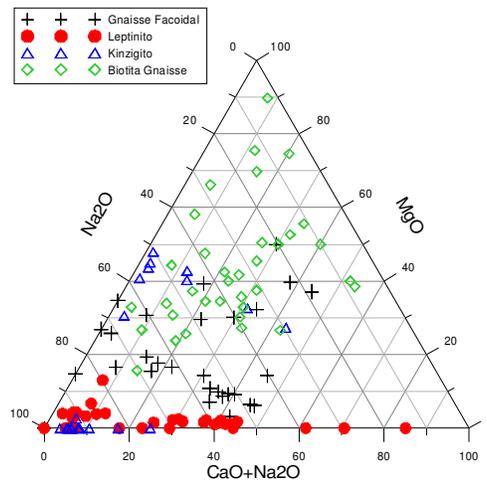
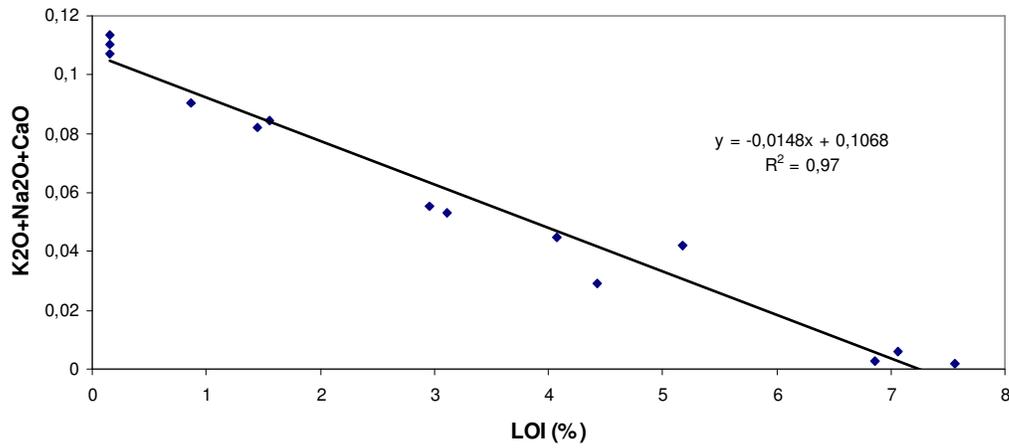


Figura 2.6 – Conteúdo de Álcalis dos diferentes litotipos de Gnaiss estudados.

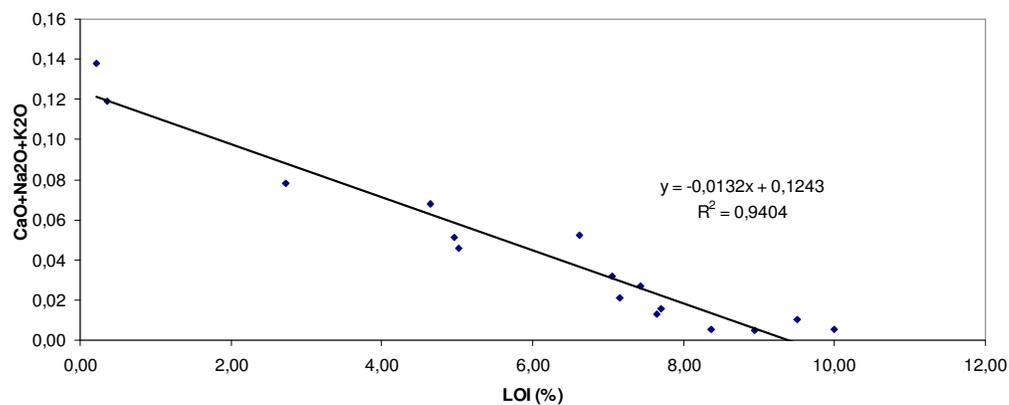
Em resumo, da análise dos dados apresentados pode observar-se que os índices químicos que apresentam boas correlações para os perfis de alteração de Gnaiss Facoidal e Leptinito são  $ba$ ,  $ba_1$ ,  $ba_3$ ,  $\beta$ ,  $LchF$ ,  $WPI$ ,  $WI$ ,  $CIA$ ,  $Bases/Al$ ,  $Bases/R_2O_3$ ,  $Imob$  e  $Parker\ Index$ . Estes índices são diferentes relações entre os conteúdos de  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  e  $Na_2O$ , elementos que aparecem, com exceção do  $Na_2O$ , em quantidades significativas nos perfis de Gnaiss, logo sua variação pode ser bem identificada nos ensaios de análise química total. Índices que utilizam as quantidades de  $CaO$ ,  $MgO$  não são representativos para perfis deste tipo de rocha já que o conteúdo destes elementos é mínima, dificultando sua determinação nos ensaios.

A correlação apresentada pelo índice de Perda ao Fogo com os índices químicos mostra que este índice é adequado como indicador do intemperismo, sendo um índice de determinação simples e rápida. A correlação com os índices  $ki$  e  $kr$  é baixa, logo pode-se afirmar que a aplicação destes índices é mais adequada para solos maduros ou com processos de laterização intensos, não sendo indicadores adequados de intemperismo para solos residuais jovens, pelo menos de origem gnáissica.

Existe uma boa correlação entre o valor de Perda ao Fogo e o conteúdo de álcalis das amostras. Isto pode ser observado na Figura 2.7, confirmando a legitimidade do índice de perda ao fogo como um indicador do processo de intemperismo.



a) Perfil de alteração de Leptinito



b) Perfil de alteração de Gnaisse Facoidal

Figura 2.7 – Correlação entre a Perda ao Fogo (LOI) e o Conteúdo de Álcalis ( $K_2O+Na_2O+CaO$ ).

Outro aspecto importante que foi observado é que, não necessariamente existe correlação entre as propriedades físicas dos materiais e o grau de intemperismo deles, como está evidenciado nos valores de correlação entre os índices químicos e da LOI com respeito ao conteúdo de finos e índice de vazios (Figura 2.8).

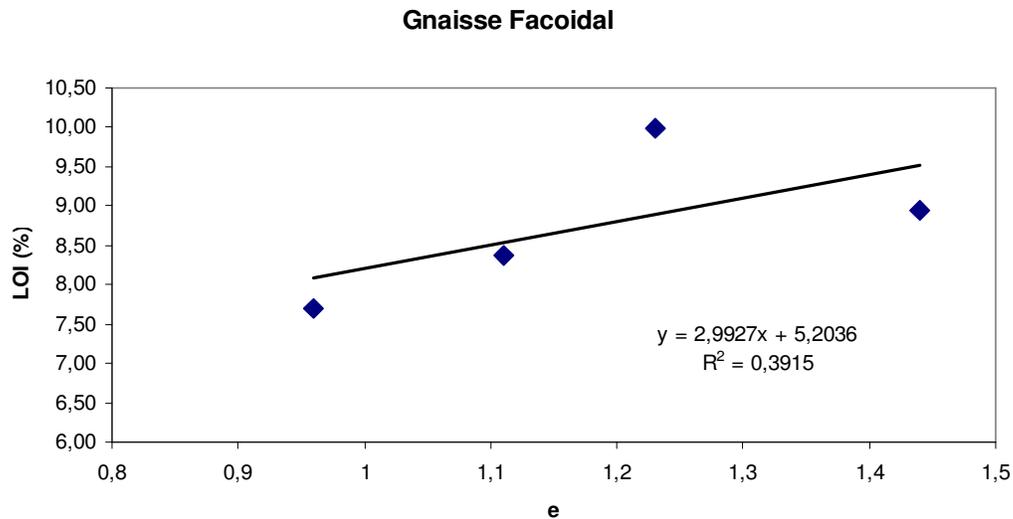


Figura 2.8 – Relação LOI vs e – Gnaisse Facoidal

Isto pode estar justificado pela metodologia utilizada na determinação destas propriedades físicas. Por exemplo, no caso da granulometria, o solo é submetido a procedimentos de dispersão (mecânica e química) que podem afetar o tamanho de suas partículas. A determinação do índice de vazios ou da porosidade é em geral realizada através de cálculos em função da massa e do volume de um determinado corpo de prova e da massa específica dos grãos. Com uma determinação mais acurada, por exemplo, a partir de ensaios de porosimetria, é possível que estes parâmetros mostrem um melhor ajuste.

Uma última observação que pode ser feita é com respeito à representação dos índices com relação à profundidade. Como foi mostrado a partir dos coeficientes de correlação dos litotipos de gnaisse estudados, só um deles apresenta uma correlação com a profundidade, que é o caso do Leptinito. Logo se confirma que, no caso da alteração de um maciço metamórfico, a variação do intemperismo não está limitada à profundidade. Tal é função principalmente das características geomorfológicas próprias do maciço.

Com respeito à utilização dos índices químicos de intemperismo na avaliação do intemperismo em perfis de alteração de gnaisse, eles se mostram adequados, principalmente os que consideram em sua formulação a alteração dos feldspatos. Tais índices devem, entretanto, ser utilizados com cautela, já que muitos são produtos de pesquisas específicas para determinados perfis e não são necessariamente de aplicação geral a todos os perfis de alteração.

## 2.5.2.

### Caso II : Perfil de Alteração de Gnaiss Facoidal

O perfil de solo residual estudado encontra-se no município de São Gonçalo, Rio de Janeiro. Trata-se de um perfil de aproximadamente 9 metros de altura de solo com rocha subjacente a uma profundidade de 7 metros desde a superfície do terreno.

Geologicamente, o Município de São Gonçalo é constituído por várias formações, abrangendo desde rochas pré-cambrianas até sedimentos quaternários conforme consta do Mapa Geológico do Município, editado pelo DRM/Rio de Janeiro em fevereiro de 2006 (Figura 2.9).

No local de ocorrência do perfil afloram rochas granito-gnaissicas pertencente à Unidade Cassorotibra (DRM, 1982). São rochas de textura grosseira exibindo grandes cristais de feldspatos, além de biotita e quartzo (Figura 2.10).

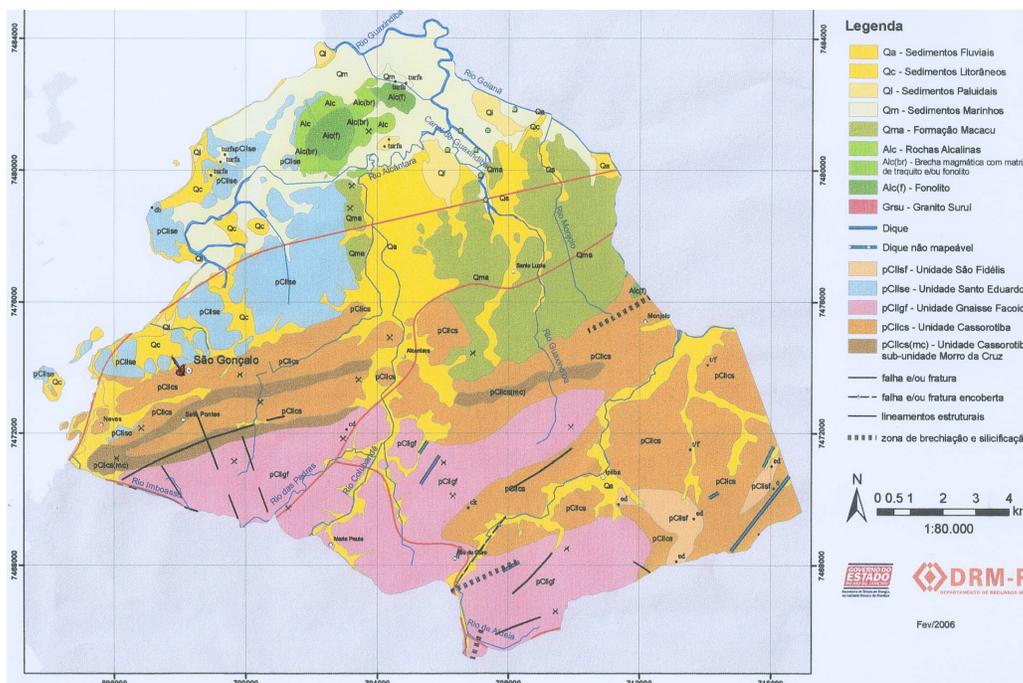


Figura 2.9 – Mapa geológico do município (DRM/Rio de Janeiro, em fevereiro de 2006).

Foi observado, também, que estas rochas apresentam feições texturais mais finas enriquecidas em biotita, que ocorrem no local do perfil e em áreas próximas. À montante do perfil, o relevo é bem acidentado, onde afloram as

rochas, além de blocos soltos, resultantes da ação do intemperismo diferencial destas rochas (Figuras 2.10 e 2.11).

O ambiente climático da área se caracteriza por clima tropical, com índices pluviométricos variando de 1.100mm e 2.100mm e características térmicas com médias anuais em 18°C e 23°C. As temperaturas máximas ocorrem nos meses de janeiro e fevereiro e as mínimas em junho-julho. As maiores precipitações se concentram nos meses de janeiro e fevereiro, com início em novembro.



Figura 2.10 - Características texturais da rocha que ocorre no Local do Perfil



Figura 2.11 – Afloramento de Rocha a montante do Perfil

Para a coleta das amostras foi feito um corte em um talude natural situado na parte inferior do maciço exibindo um perfil de solo de aproximadamente 9m de espessura, constituído superficialmente por uma camada delgada de solo

coluvial. Abaixo deste colúvio ocorrem duas camadas diferenciadas o solo maduro, e o solo saprolítico ou residual jovem. O solo saprolítico foi subdividido em subcamadas diferenciadas pelo intemperismo, apresentando características tátil – visuais baseadas no brilho, cor dos minerais e resistência à desagregação, como atributos principais. O perfil foi escavado em pequenos degraus para facilitar a coleta das amostras indeformadas e amolgadas, como mostra a Figura 2.12. Para os ensaios geotécnicos foram coletados blocos de solo com 30x30x30cm ao longo do perfil, recebendo as denominações B0, B1, B2, B3 como consta na Figura 2.12. Nos mesmos locais de onde foram retirados os blocos foram também coletadas amostras amolgadas de solos, para ensaios químicos, mineralógicos e físicos. Face à configuração do local do perfil, foi necessário escavar um poço até o contato solo – rocha alterada, de onde foram extraídas mais duas amostras com auxílio de um trado, recebendo as designações de T1, e T2, de acordo com a profundidade. Foram, portanto, coletadas seis amostras amolgadas de solo.

Durante os trabalhos de campo, após observações detalhadas, foram coletadas amostras de rocha com características texturais e graus de alteração diferenciados para compor o perfil de intemperismo, já que a extração de amostras de rocha através de sondagens rotativas se mostrou operacionalmente inviável.

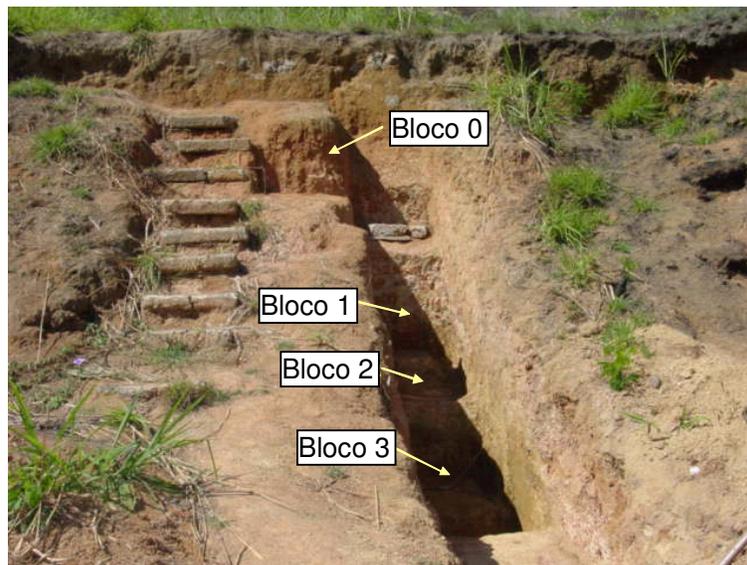


Figura 2.12 – Locais de coleta das amostras.

As amostras coletadas foram submetidas a ensaios de caracterização (granulometria, peso específico dos grãos, densidade e limites de consistência) todos eles seguindo, essencialmente, as Normas da ABNT. As composições

mineralógicas das diferentes camadas do perfil foram determinadas usando Difração por Raios X em amostras secas ao ar e análise térmica diferencial (ATD). A caracterização química das amostras foi feita a partir dos resultados dos ensaios de Análise Química Total, Complexo Sortivo e Análise por Ataque Sulfúrico. Foram também determinados o pH e a condutividade elétrica das diferentes amostras de solo.

Para a determinação da quantidade e forma dos vazios presentes nos diferentes materiais, assim como para identificar o grau de alteração dos minerais, foram confeccionadas lâminas delgadas de solo e rocha. As lâminas foram descritas visando-se caracterizar os seguintes aspectos: matriz, arcobouço (ou esqueleto), cimentação e porosidade. Isto foi feito a partir da descrição em microscópio petrográfico e por microscopia ótica (análises de imagens).

A distribuição de poros nas diferentes profundidades foi determinada por porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).

#### *Resultados:*

Para começar a avaliar a alteração do perfil foram executados os ensaios de caracterização, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Resumo dos ensaios de caracterização

Amostra	Granulometria (%)				Consistência (%)		Gs	e	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	w <sub>L</sub>	w <sub>P</sub>			
B0	1,6	18,0	14,9	65,4	58,6	41,7	2,721	0,701	1,595
B1	1,5	27,2	27,1	44,3	62,0	44,0	2,691	0,726	1,557
B2	7,9	59,5	18,7	13,8	-	-	2,751	0,826	1,479
B3	8,8	59,6	22,4	9,1	-	-	2,726	0,841	1,482
Trado <sup>(*)</sup>	3,5	53,1	30,0	13,3	-	-	2,744	-	-

(\*) Amostra amolgada

Nos ensaios básicos de caracterização observa-se um aumento da fração argila com a profundidade, assim como do índice de vazios. Os valores de Gs são resultado do elevado conteúdo de biotita das amostras.

As amostras de rocha e solo foram submetidas à análise química total (Tabela 2.17) com o objetivo de avaliar o comportamento dos principais elementos durante os processos de alteração envolvidos na transformação da rocha.

Tabela 2.17 – Análise Química Total

	L.O.I.	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Elementos traços
Rocha	1,353	0,693	15,597	68,532	5,600	1,097	0,514	3,972	0,045	2,350	0,247	Cr, Mn, Rb, Sr, Y
	1,670	0,795	15,669	67,641	4,961	1,120	0,625	4,340	0,046	2,359	0,274	S, Mn, Rb, Sr, Y, Ba
	1,796	0,878	15,211	67,508	4,839	1,034	0,647	5,427	0,046	2,193	0,291	S, Mn, Rb, Sr, Y, Ba
	2,884	0,999	15,636	66,885	4,335	1,124	0,730	4,624	0,05	-	0,283	Rb, Sr, Y, Ba
Trado	8,622	0,745	26,128	53,835	4,295	Traço	0,939	5,881	0,054	Traço	-	Na, P, S, Rb, Sr, Y, Nb, Ba, La, Ce, Pr
	10,660	1,245	22,891	51,839	3,447	0,137	1,173	8,241	0,067	Traço	-	Na, P, S, Ca, Mn, Rb, Sr, Y, Nb, Ba
B3	12,777	0,994	24,793	49,014	2,714	Traço	1,150	7,960	0,097	Traço	-	Na, P, S, Ca, Cr, Mn, Rb, Y, Nd, Ce
B2	14,673	-	29,509	44,638	1,771	Traço	0,873	8,028	0,076	Traço	-	Na, Mg, S, Ca, Cr, Mn, Rb, Y, Ba, Nd, Ce
B1	15,762	-	29,395	41,288	1,295	Traço	1,102	10,621	0,036	-	-	Mg, P, S, Ca, Mn, Rb, Nd, Nd
B0	14,822	0,636	27,755	45,547	1,200	Traço	1,106	8,593	0,040	-	-	P, S, Ca, Cr, Mn, Rb, Y, Nb, Ce, W

L.O.I – Perda ao fogo à 950°C.

Existe um visível aumento do valor de Perda ao Fogo (LOI) desde a rocha até o material mais superficial (B0), além de um aumento no conteúdo de alumínio, ferro e diminuição do conteúdo de sílica e de álcalis.

Um procedimento alternativo foi utilizado para obter outro valor de Perda ao Fogo, levando a amostra de solo a 600°C por 4 horas e calculando a perda de peso da amostra. A utilização deste procedimento visou obter valores mais realistas de perda de peso, já que o aquecimento a grandes temperaturas implica na alteração das micas. As micas perdem água de constituição na faixa de 800-1000°C e o perfil analisado apresenta uma quantidade elevada de mica alterada. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.18. Eles apresentam a mesma tendência que a determinação à 950°C, só que com valores menores o que mostra que existiu queima de mica na determinação convencional.

Tabela 2.18 – Perda ao Fogo à 600°C

Amostra	L.O.I. (600°C)
Trado	5,88
B3	4,85
B2	7,89
B1	8,94
B0	9,76

A caracterização mineralógica foi executada a partir dos resultados de ensaios de Difração de Raios X, Ataque Sulfúrico e Complexo Sortivo a análise termodiferencial, bem como de análises em microscópio de lâminas delgadas de rocha e solo.

Nas análises de Ataque Sulfúrico e Complexo Sortivo apenas os minerais secundários como argilominerais, óxidos cristalinos de ferro e de alumínio e amorfos são decompostos. Pelo Ataque Sulfúrico determinam-se os teores de óxidos de sílica, alumínio, ferro e titânio; enquanto que o complexo sortivo se refere à presença de cátions trocáveis. O pH dos solos foi medido tanto em água quanto em solução de KCl, sempre na proporção de 1 para 2,5. A diferença entre os valores obtidos pelos dois procedimentos é um indicativo (diretamente proporcional) da atividade do solo (Barreto, 1986).

Os resultados obtidos nestas análises estão apresentados nas Tabelas 2.19 e 2.20.

Tabela 2.19- Ataque Sulfúrico

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	ki	kr	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	ΔpH
B0	24,4	23,0	9,2	1,16	0,87	1,80	1,44	4,9	3,7	1,2
	29,8	24,1	10,1	1,27	-	2,10	1,66			
B1	30,2	24,0	10,8	1,03	0,86	2,14	1,66	4,5	3,6	0,9
	18,3	17,2	5,2	0,64	-	1,81	1,52			
B2	27,4	23,1	8,0	0,73	0,80	2,02	1,65	4,6	3,1	1,5
	27,8	25,7	9,2	0,89	-	1,84	1,50			
B3	26,0	21,8	7,3	0,72	0,77	2,03	1,67	4,6	3,0	1,6
	19,5	15,8	8,9	1,32	-	2,10	1,54			
Trado	25,2	21,5	7,0	0,70	0,79	1,99	1,65	-	-	-
Rocha	9,6	7,4	7,3	0,96	-	-	-	-	-	-

Tabela 2.20 - Complexo Sortivo (cmol<sub>c</sub>/kg)

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T	Valor V
B0	0,7	2,0	0,05	0,19	2,9	4,4	3,4	10,7	27
	0,7	2,3	0,11	0,35	3,5	5,0	3,3	11,8	30
B1	0,3	2,3	0,07	0,18	2,9	4,5	3,6	11,0	26
B2	0,3	2,5	0,07	0,17	3,0	9,3	4,1	16,4	18
	0,4	2,2	0,13	0,32	3,0	9,5	4,0	16,5	18
B3	0,4	2,3	0,12	0,23	3,1	6,6	4,8	14,5	21
	0,9	2,9	0,10	0,16	4,1	11,5	9,0	24,6	17
Rocha	0,4	1,60	0,29	2,3	0,5	2,1	4,9	47	

Os resultados destas análises mostram que o material do perfil possui uma atividade baixa, existe um aumento no valor de CTC (Valor T) nas amostras B2 e B3 que pode indicar a presença de um argilomineral mais ativo. Estes resultados devem ser tomados com precaução já que os valores de Mg<sup>2+</sup> da Tabela 2.20 não se correlacionam com os dados da análise química total (Tabela 2.17), o que pode sugerir algum erro de execução do ensaio.

A análise mineralógica por Difração de Raios-X foi executada nas frações mais finas das amostras de solos e rocha. No caso de solo, nas frações passantes nas peneiras #200 e #400. As amostras de rocha foram reduzidas a pó passante na peneira #200. Numa primeira etapa foram executadas análises no material natural. Testes suplementares de aquecimento e tratamento com etilenoglicol foram necessários para a identificação dos diferentes tipos de argilo-minerais. Os resultados indicaram a presença de vermiculita na rocha e

nas amostras mais profundas (Trado, B3, e B2). Em todas as amostras de solo há presença de caolinita mal cristalizada e de mica. A presença de vermiculita pode estar relacionada com o aumento do valor de CTC nas amostras B2 e B3. Ainda para identificar o tipo de feldspato presente nas amostras, foi feita a análise com material moído de feldspatos da amostra B2. O difratograma resultante mostra que o mesmo corresponde à Microclina ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ ). Os difratogramas das diferentes amostras estão apresentados nas Figuras 2.13 a 2.19. Adicionalmente foram também executados ensaios nas frações areia fina-silte-argila, material passante na peneira #40. Os resultados destes ensaios não serão apresentados já que não apresentaram diferenças em relação aos aqui incluídos.

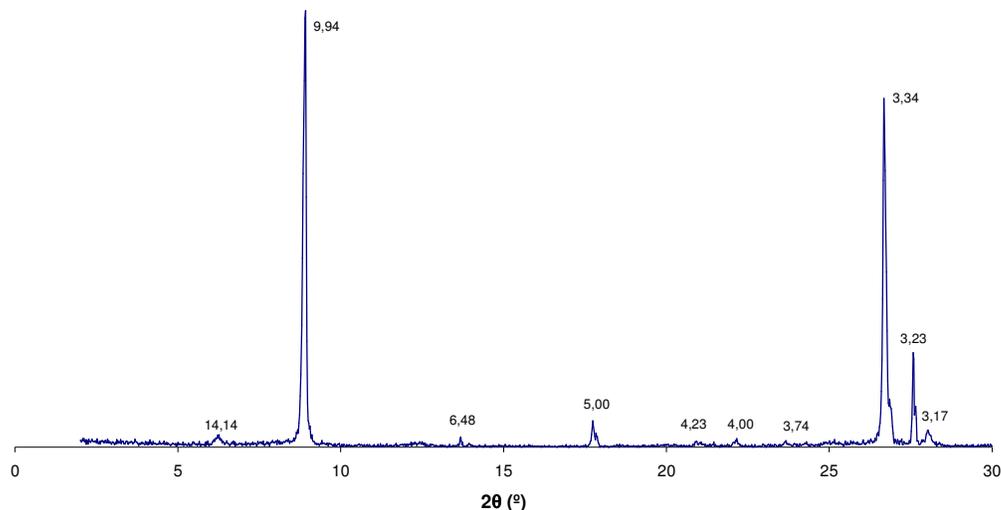


Figura 2.13 – Difratograma da amostra de Rocha

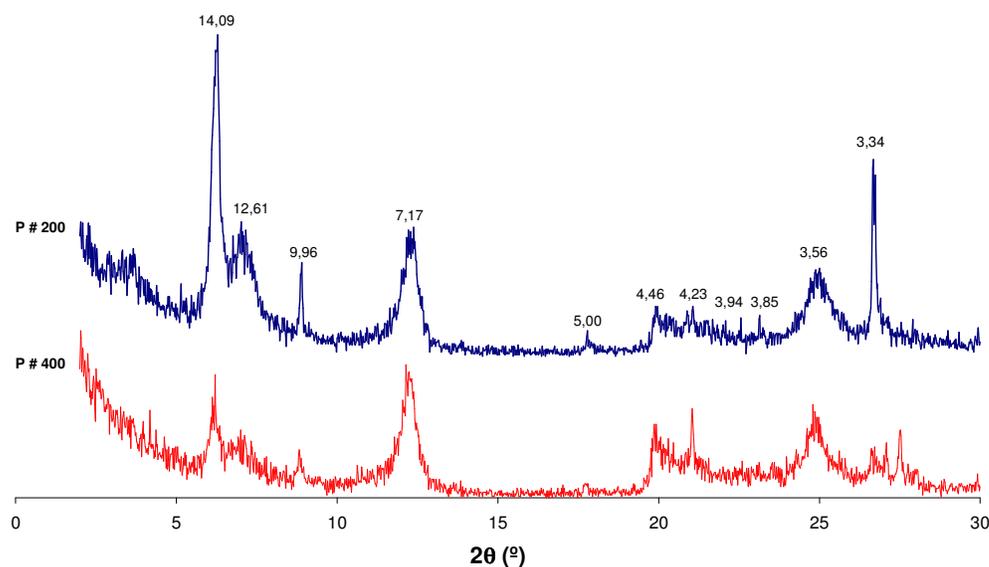


Figura 2.14 - Difratograma da amostra Trado

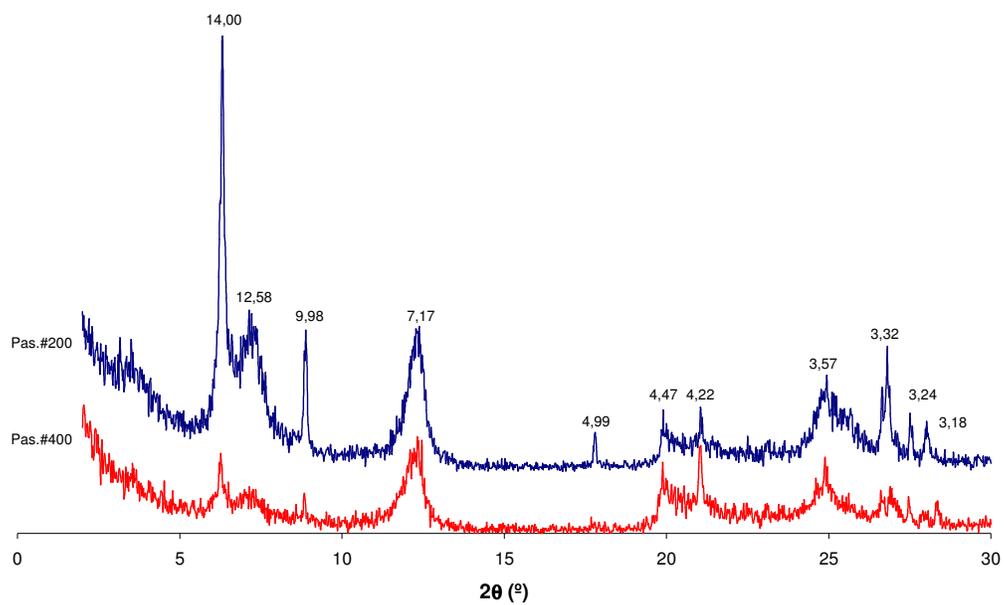


Figura 2.15 – Difratoograma da amostra B3

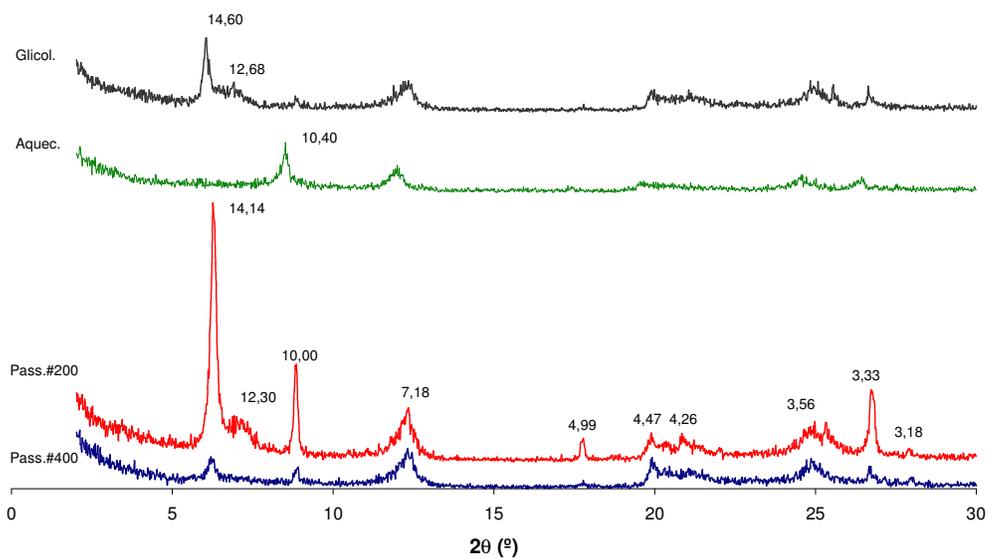


Figura 2.16 - Difratoograma da amostra B2

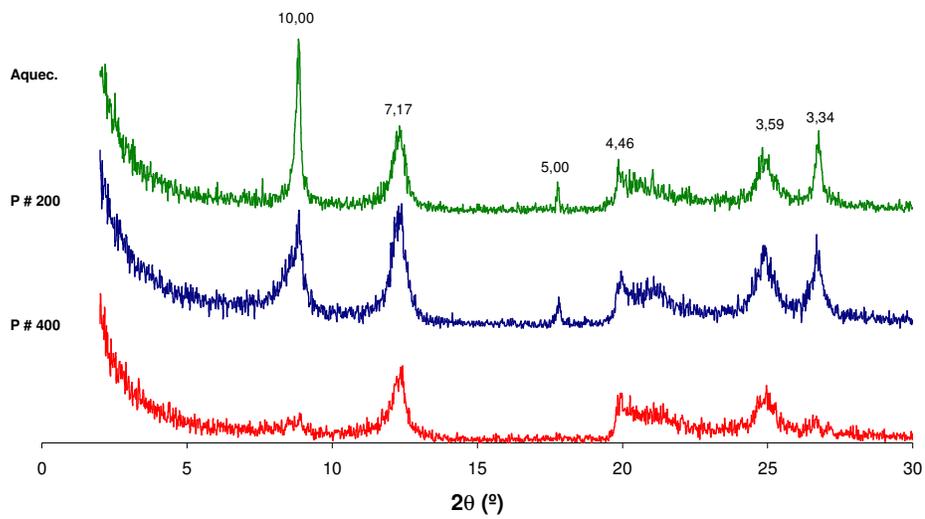


Figura 2.17 – Difratoograma da amostra B1

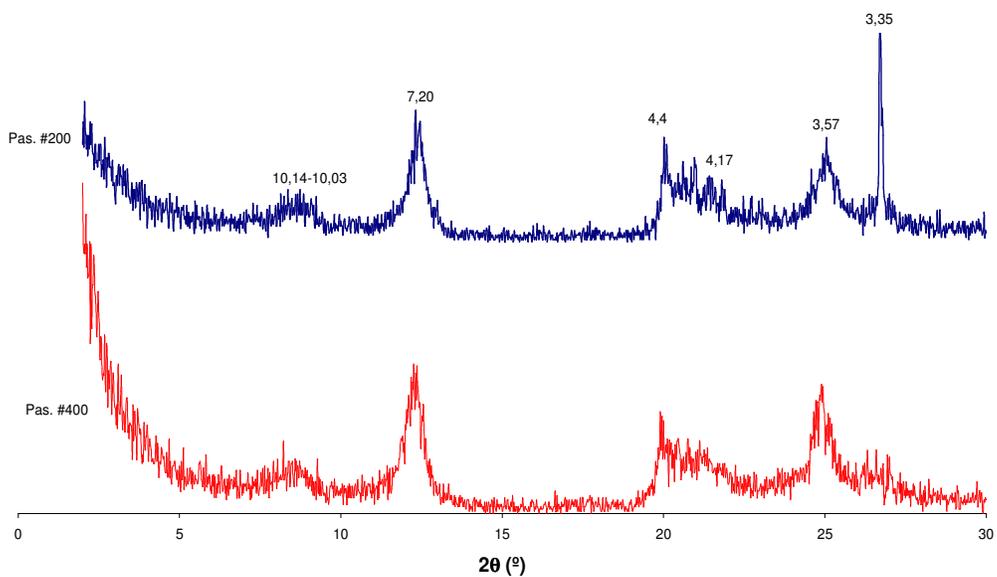


Figura 2.18 – Difratoograma da amostra B0

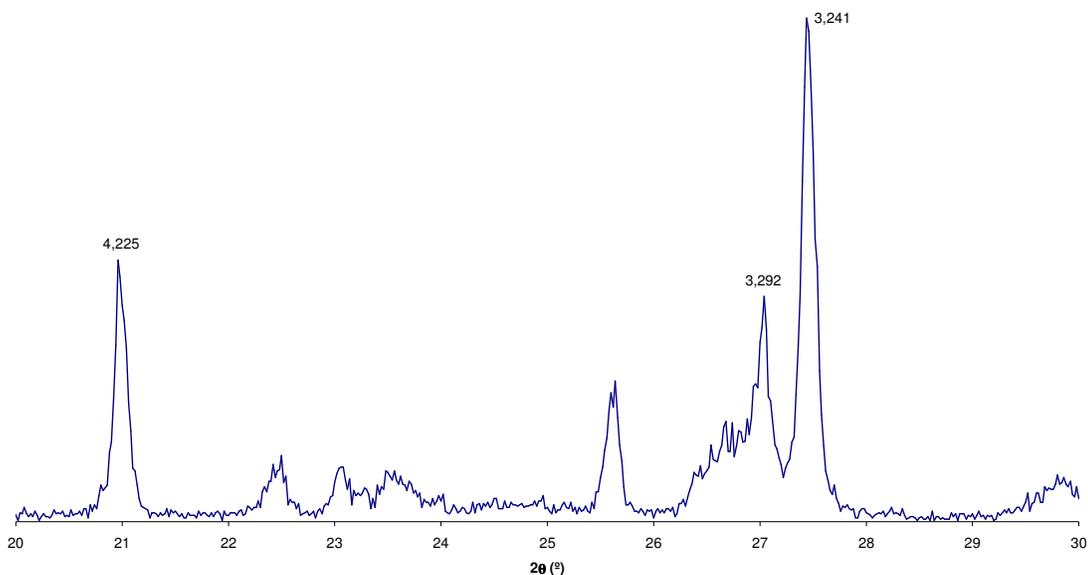


Figura 2.19 - Difratograma do pó de feldspato da amostra B2

A observação em microscópio petrográfico das lâminas de rocha e de solo permitiu identificar e quantificar os minerais presentes. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.21. Nestas análises não foi observada a presença de cimentação em nenhuma das amostras.

Tabela 2.21 – Identificação e quantificação dos minerais presentes

	Mineral (%)						
	Quartzo	Biotita	Microclina	Plagioclásio	Muscovita	Clorita	Granada
Rocha	20	15	25	20	10	2	8
	30	25	31	-	2,5	-	0,5
B3	17	25	30	-	6	-	-
	14	28	29	-	5	-	-
	30	20	40	-	2	-	1
B2	25	32	34	-	4	-	-
	30	28	32	-	3	-	-
B1	30	16	36	-	5	-	-
	25	15	32	-	17	-	-
B0	32	20	28	-	-	-	1
	27	21	30	-	-	-	1

A Análise Termodiferencial permite medir a perda de água dos minerais de argila a várias temperaturas. Esta água pode estar adsorvida ou fazer parte da estrutura do cristal. Neste método de análise (ATD), a perda de água é indicada

por reações endotérmicas medidas na forma de mudanças de temperatura em relação a uma substância inerte, quando a temperatura é aumentada a uma razão fixa conhecida. Existem temperaturas características para as reações endotérmicas da maioria dos minerais de argila. A reação exotérmica ocorre quando se processa a recristalização de um mineral a altas temperaturas.

No perfil estudado, os resultados das análises indicaram a presença de caolinita (pico endotérmico em 550°C) em todas as amostras de solo e de goethita (pico exotérmico em 320°C) na amostra correspondente ao B0, o que é confirmado pelo pico em 4,18 presente na difração de raios-X da mesma amostra (ver Figura 2.18). Os resultados dos ensaios estão apresentados nas Figuras 2.20 e 2.25.

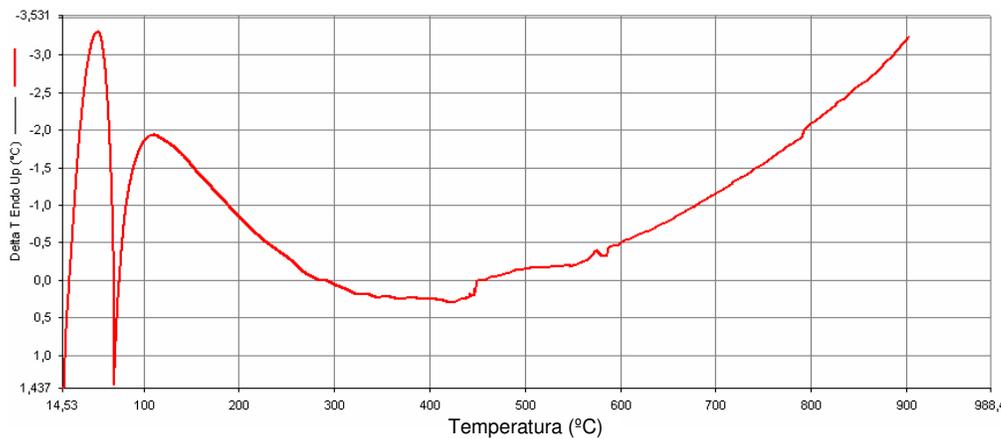


Figura 2.20 – Ensaio ATD para Rocha

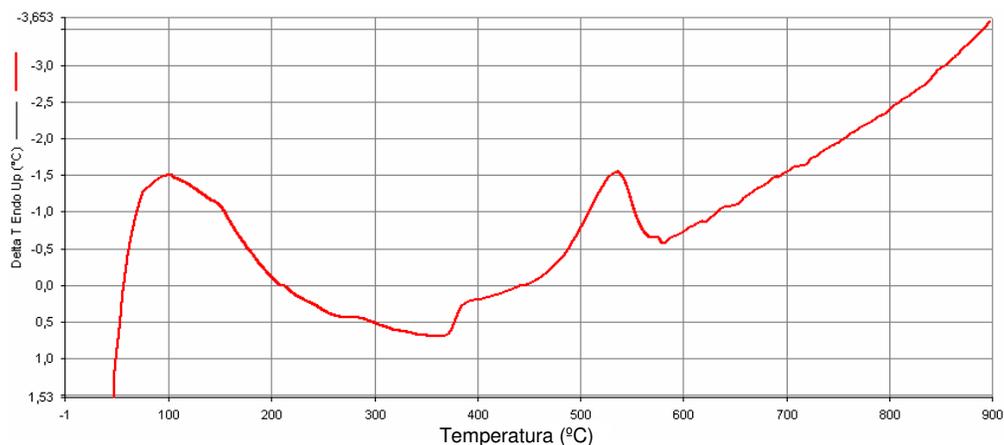


Figura 2.21 - Ensaio ATD para a amostra Trado

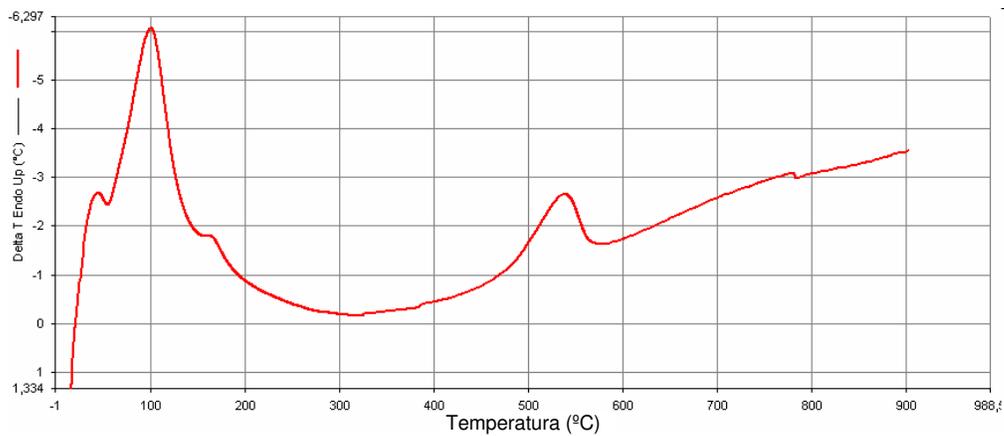


Figura 2.22 - Ensaio ATD para a amostra B3

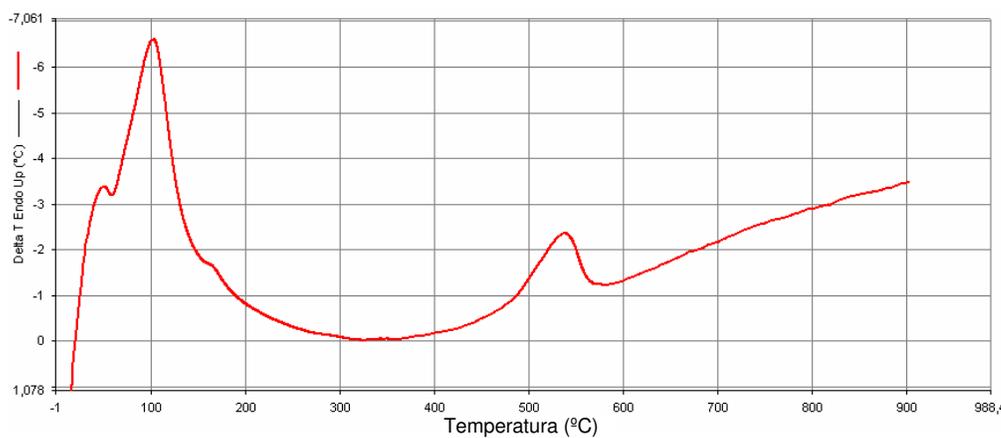


Figura 2.23 – Ensaio ATD para a amostra B2

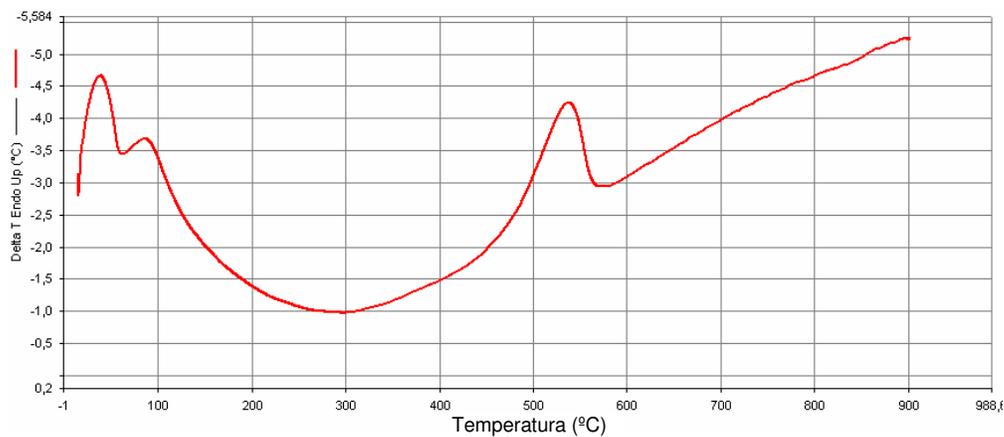


Figura 2.24 – Ensaio ATD para a amostra B1

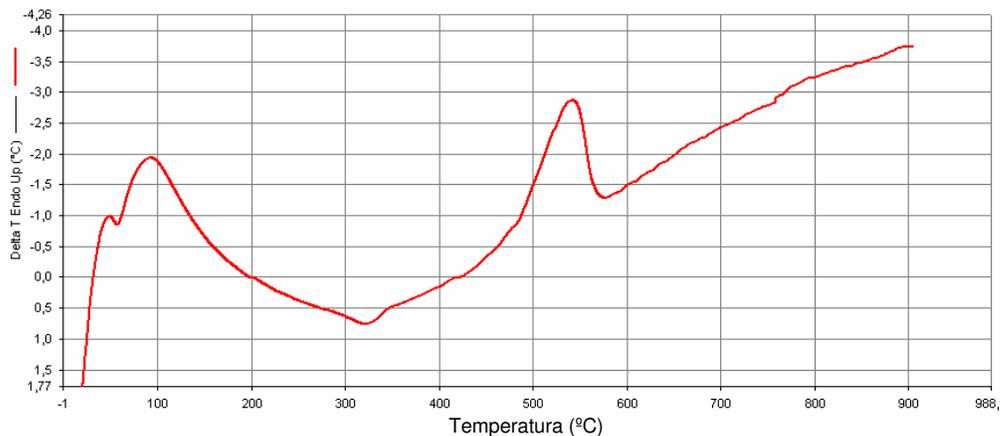


Figura 2.25 – Ensaio ATD para a amostra B0

Na determinação da porosidade e da distribuição dos tamanhos de poros foram utilizadas as técnicas de análise das lâminas delgadas por microscopia ótica e de porosimetria por injeção de mercúrio.

O ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio (MIP) fornece o tamanho e a distribuição dos poros. O volume de mercúrio que penetra nos poros é definido diretamente como uma função da pressão aplicada, com auxílio da equação de Washburn que supõe os poros de forma cilíndrica. As curvas de extrusão diferem das curvas de intrusão devido ao mercúrio que fica preso nos poros em virtude do conhecido efeito de *ink-bottle*, e pelas diferenças entre os ângulos de contato de entrada e saída do mercúrio. A diferença de volume entre os ciclos é chamada de volume de poros livre (*free pore volume*). Os resultados dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio estão apresentados na Figura 2.26 e na Tabela 2.22.

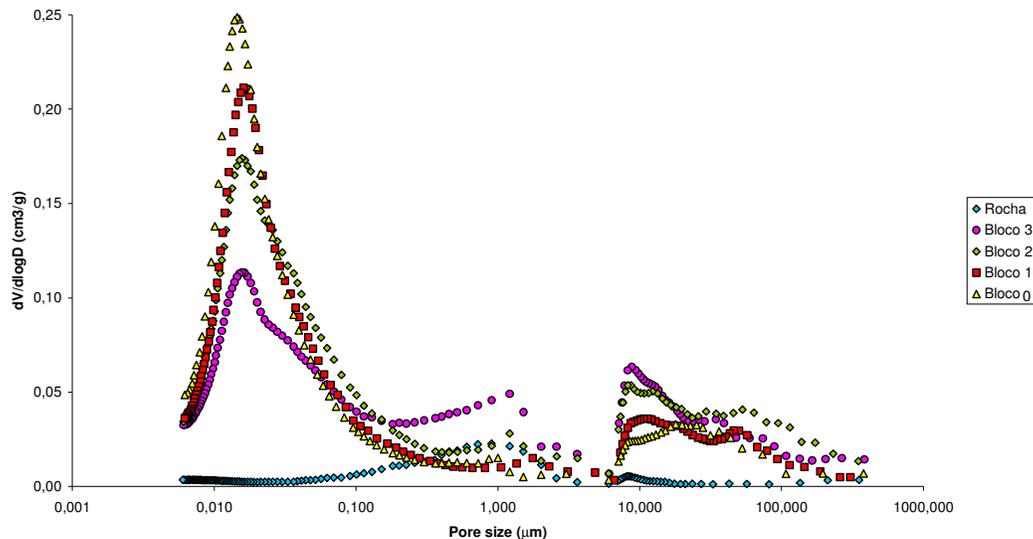


Figura 2.26 – Resultados do ensaio de porosimetria.

Tabela 2.22 – Resultados dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio

Amostra	Porosidade (%)	F.P.V (cm <sup>3</sup> /g)
Rch	7,34	0,0033
B3	32,27	0,051
B2	35,74	0,085
B1	31,85	0,081
B0	32,84	0,090

Os picos de distribuição das amostras são similares, identificando três picos principais de diâmetro de poros correspondentes a 0,016; 1 e 9-10μm respectivamente. Os ensaios de porosimetria mostram um evidente aumento da micro-porosidade desde a amostra de rocha até a amostra de solo B4. Na tabela a seguir estão apresentados os volumes de poros menores que 0,100μm para os diferentes materiais do perfil.

Tabela 2.23 – Poros menores que 0,100μm

Amostra	$\phi < 0,100\mu\text{m}$
	cm <sup>3</sup> /g
Rch	0,0030
B3	0,0088
B2	0,0114
B1	0,0115
B0	0,0132

Nas análises das lâminas por microscopia digital foram utilizadas duas lâminas para cada material identificado no perfil. A microscopia digital permite capturar e analisar a lâmina completa. As imagens foram capturadas utilizando um Microscópio Óptico Zeiss AxioPlan 2ie motorizado e controlado por software, Câmera Digital AxioCam HR-3900x3090 pixels e, Software KS400 da Zeiss para processamento e análise de imagens (Figura 2.27), todos estes pertencentes ao Laboratório de Microscopia Digital do DCMM da PUC-Rio.

As imagens foram capturadas com uma lente de 5X, que corresponde a um aumento de 50X. Basicamente o processamento das imagens consiste em identificar os vazios do material pelo contraste de cores que a imagem apresenta. O contraste depende da resina utilizada na impregnação das lâminas. Identificada a cor que corresponde aos vazios (no caso, cor azul), o software identifica e quantifica as áreas com esta cor na lâmina e fornece o valor da porosidade. Quanto melhor for a qualidade da impregnação da lâmina melhor também será o contraste entre as cores, e conseqüentemente a identificação dos vazios. Os resultados obtidos para o perfil estão apresentados na Tabela 2.24.



Figura 2.27 – Equipamento utilizado na captura das imagens da Microscopia Digital

Tabela 2.24 – Resultados de porosidade (%) obtidos na Microscopia Digital (MD)

Amostra	Porosidade MD(%)
Rch	5,85
	2,62
B3	43,18
	34,17
B2	2,11
	7,31
B1	2,50
	2,93
B0	7,36
	10,63

Os resultados obtidos na microscopia digital mostram que esta técnica é útil na determinação da macro-porosidade, ou seja, na determinação dos poros maiores onde o corante utilizado na impregnação das lâminas consegue uma boa penetração. Observando o resultado obtido no material B2 e a distribuição de poros correspondente obtida na porosimetria, vê-se que o material B2 apresenta uma quantidade maior de poros entre 10 e 100 $\mu$ m (Figura 2.26) comparado com as outras amostras de solo e rocha. Deve-se ressaltar aqui que os valores obtidos para o material B0 devem ser observados com ressalvas. Observando as lâminas em microscópio pode concluir-se que houve um processo de trincamento associado à secagem deste material. Isto pode ser observado na Figura 2.28. Em conseqüência tal determinação foi comprometida. Neste tipo de material, com grande quantidade de partículas finas, deve ser reavaliada a metodologia utilizada na preparação das lâminas delgadas. Ainda na Tabela 2.24 pode observar-se dispersão dos resultados para um mesmo material. Isto pode ser explicado pela variação natural do material no perfil.

A seguir são apresentadas algumas das figuras correspondentes às lâminas analisadas, onde estão identificados os principais minerais presentes e podem identificar-se as mudanças estruturais que aconteceram ao longo do perfil. Na rocha e nos solos B2 e B3, que apresentam os valores menores de perda ao fogo, se observa a orientação dos minerais e o crescimento do grau de fraturamento dos minerais. Já nos solos mais alterados do perfil, B1 e B0, a matriz fina cresce e não se distingue uma orientação dos minerais, assim como é possível observar a redução no tamanho dos minerais mais resistentes como o quartzo e a presença de concentração de ferro e manganês. Observa-se

também nas imagens a redução do tamanho das lâminas de mica e a mudança de cor delas, ficando mais douradas, na medida em que o grau de alteração cresce. As imagens individuais obtidas estão apresentadas no Anexo 1 da presente.

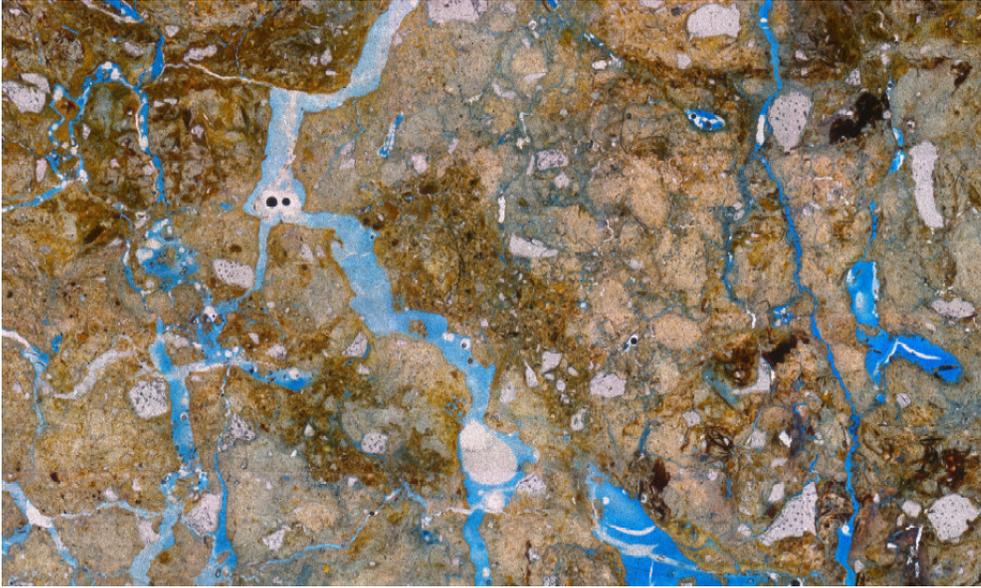


Figura 2.28 – Detalhe Lâmina do Solo B0.

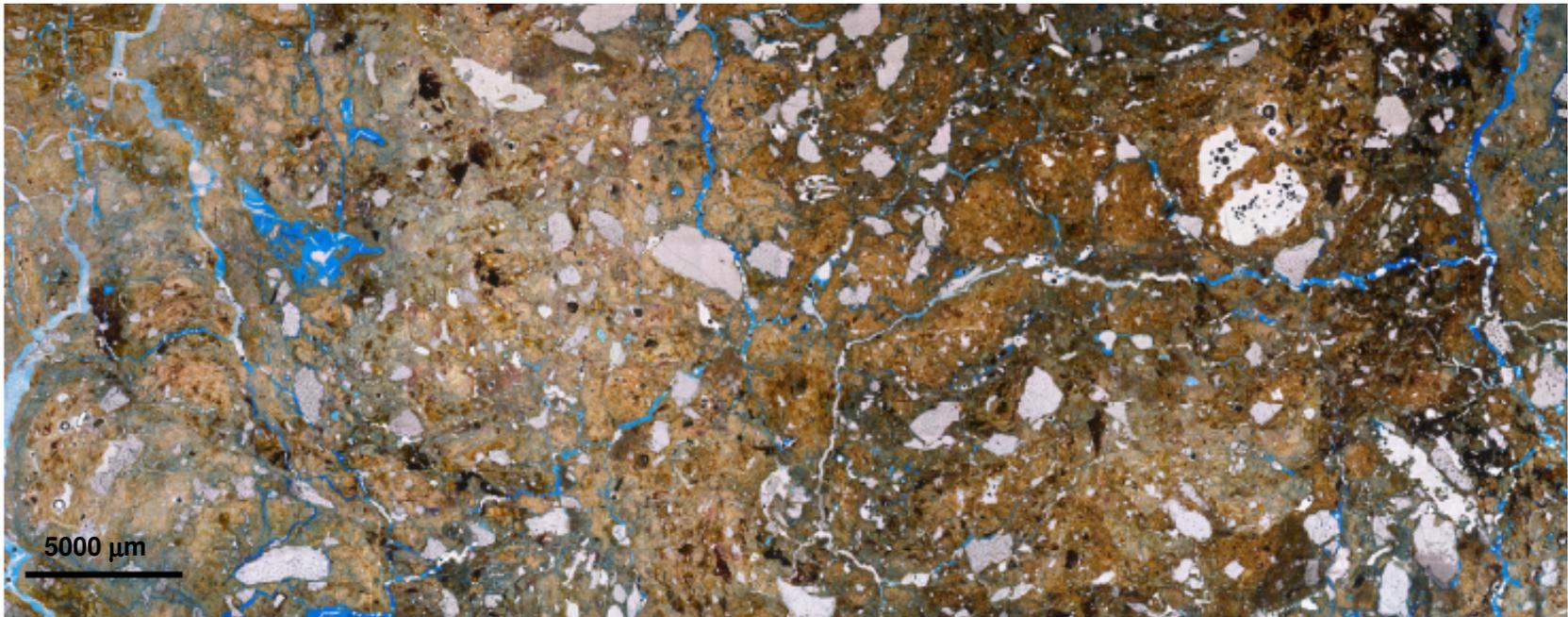


Figura 2.29 – Lâmina Solo B0

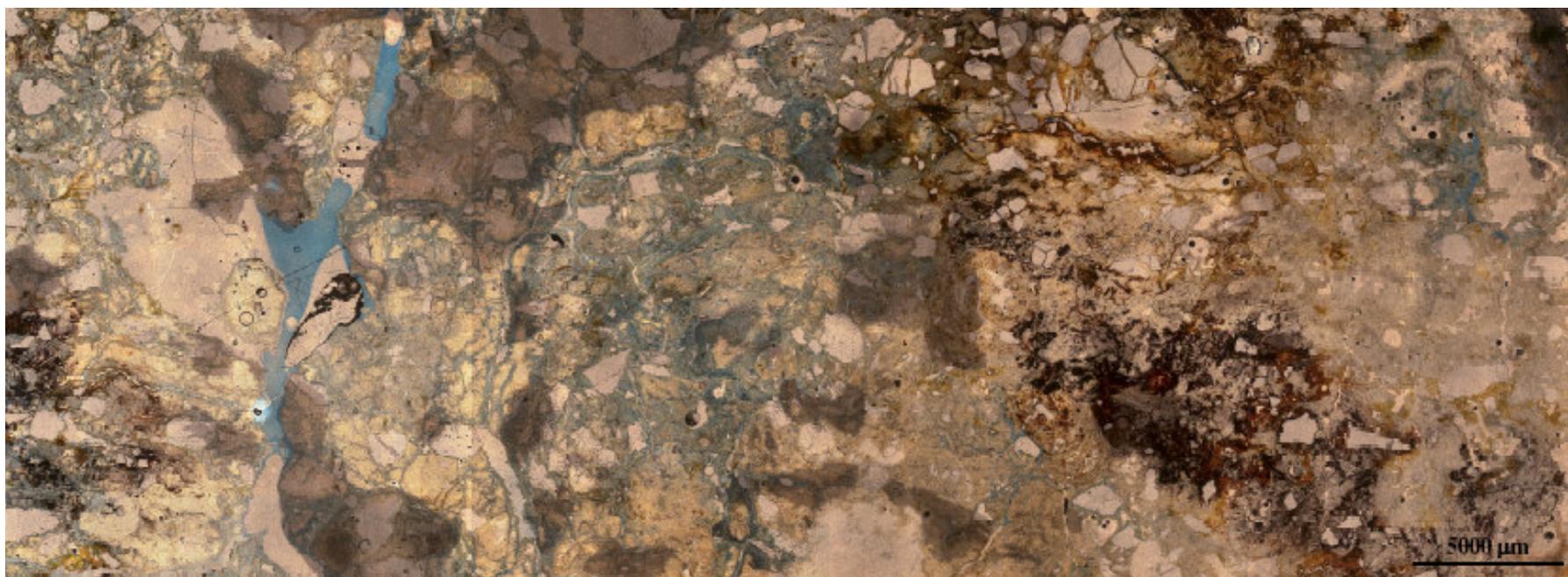


Figura 2.30 – Lâmina Solo B1

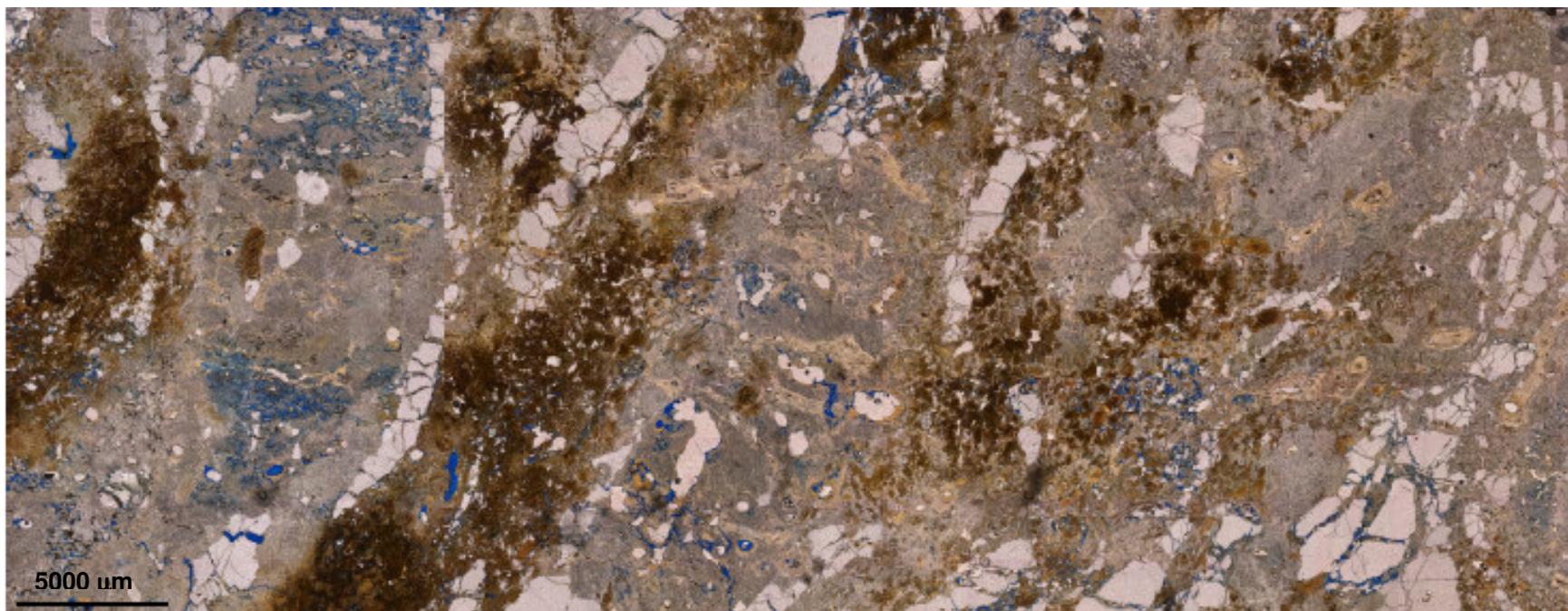


Figura 2.31 – Lâmina Solo B2

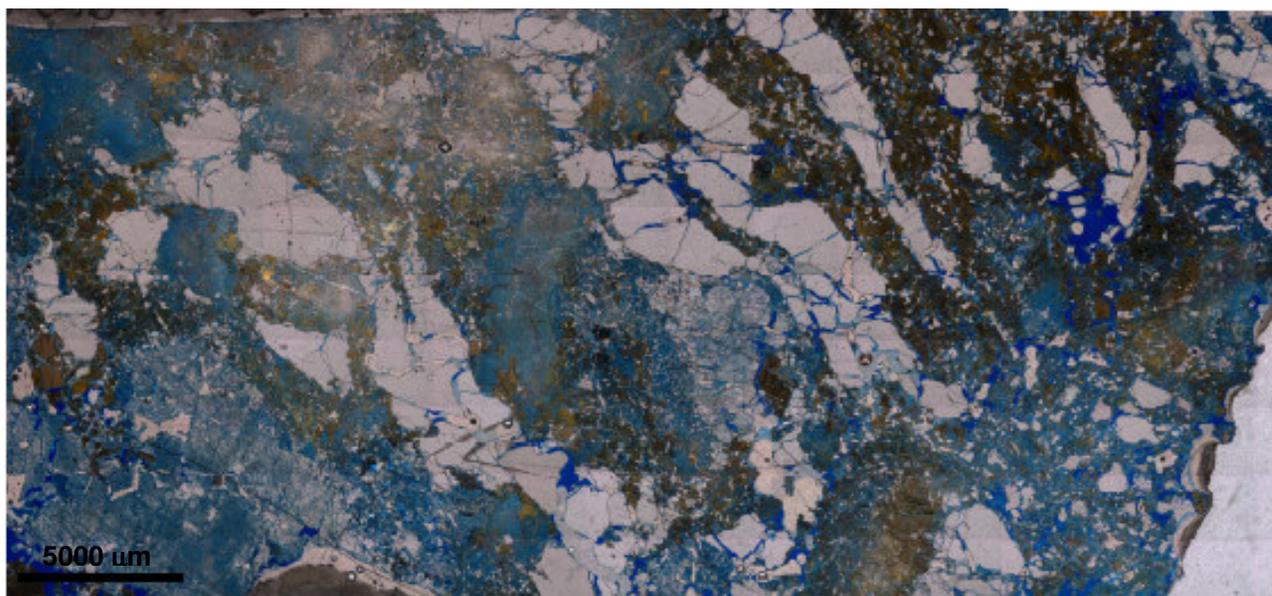


Figura 2.32 – Lâmina Solo B3

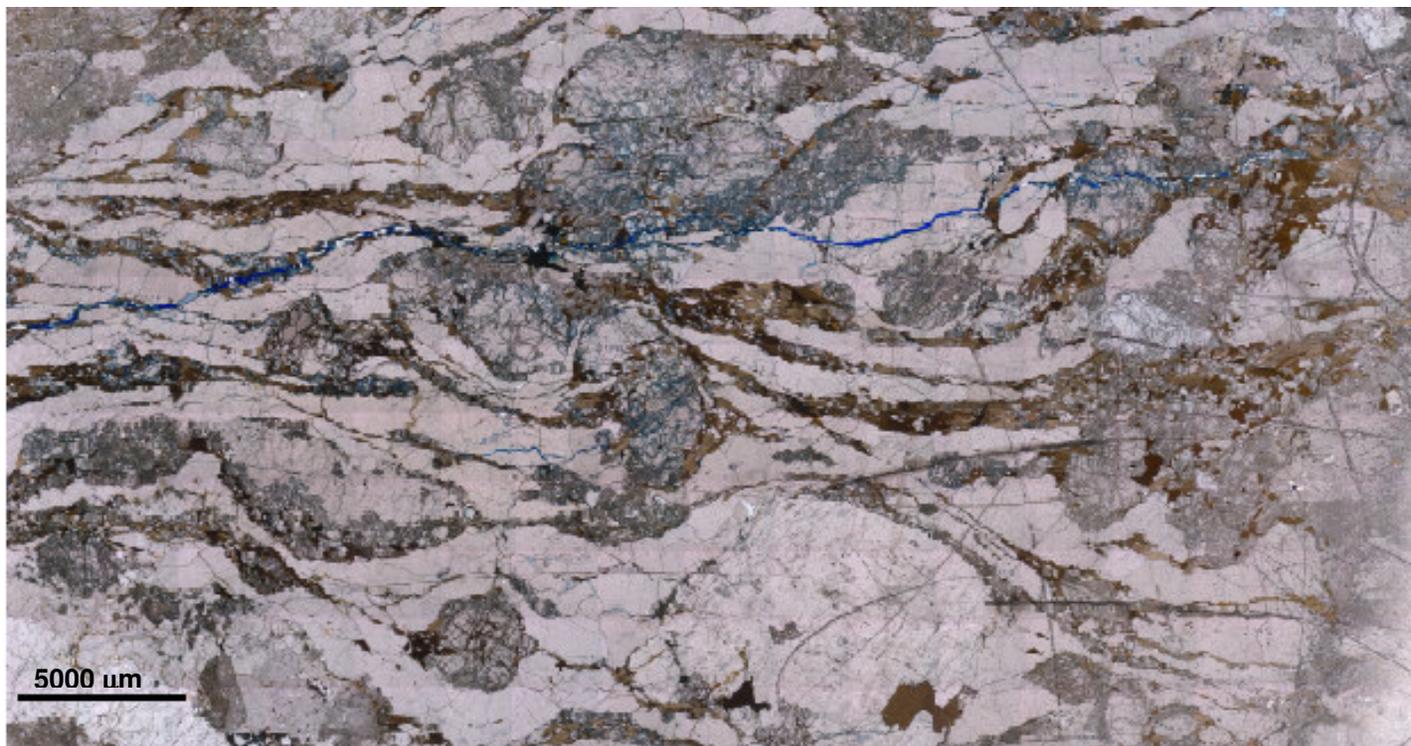


Figura 2.33 – Lâmina de Rocha

### Índices Químicos de Intemperismo

A partir de análises químicas totais foram calculados os diferentes índices químicos descritos no item 2.3.5. Na Tabela 2.24 e nas Figuras 2.34 e 2.35 estão apresentados alguns destes resultados. A primeira relação analisada foi a proposta por Kromberg & Nesbitt (1981), apresentando um coeficiente  $R^2$  de 0,96. A relação entre o conteúdo de álcalis e o valor de LOI (%) também apresentou uma excelente correlação ( $R^2=0,98$ ).

Na Tabela 2.25 estão apresentadas as melhores correlações encontradas entre os índices químicos e a Perda ao Fogo. Na Tabela apresenta-se a função que mostrou o melhor ajuste.

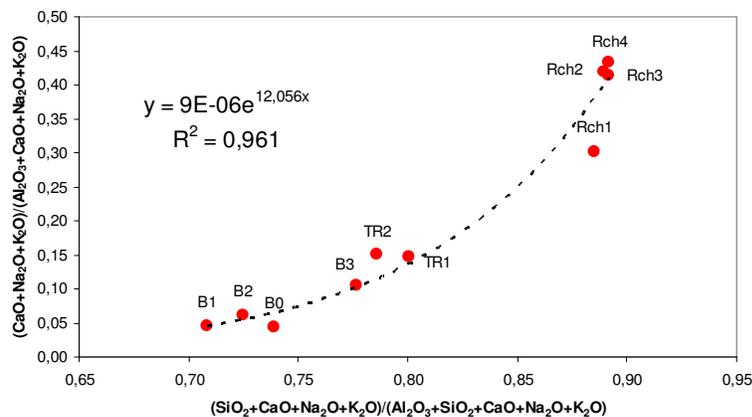


Figura 2.34 – Relação entre o conteúdo de álcalis e sesquióxidos – Perfil São Gonçalo.

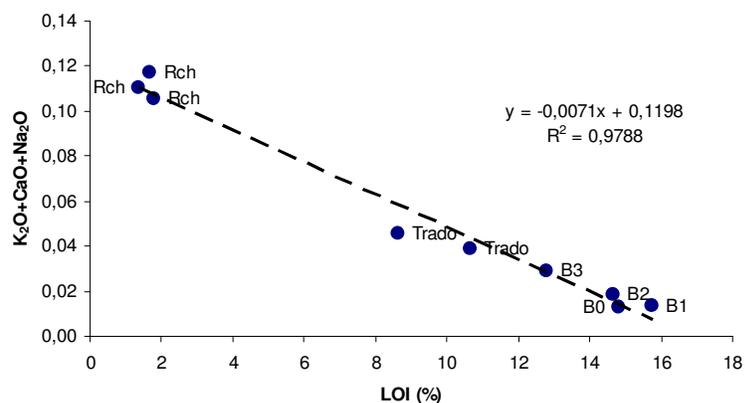


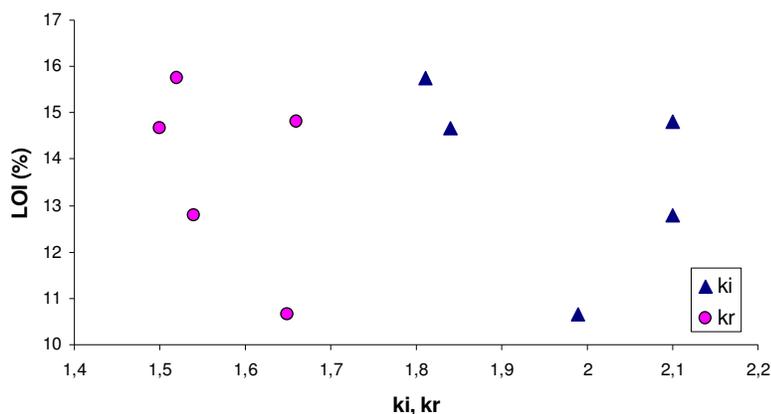
Figura 2.35 – Conteúdo de álcalis vs LOI – Perfil São Gonçalo

Tabela 2.25 – Índices Químicos x LOI

LOI	Função	R <sup>2</sup>
Ba	$y = 17,44e^{-3,36x}$	0,97
B	$y = 18,14e^{-2,64x}$	0,95
Silica:R	$y = 48,42e^{-0,55x}$	0,97
LchF	$y = 33,56e^{-3,14x}$	0,84
WPI	$y = 26,90e^{-0,37x}$	0,95
SF	$y = -0,45 x + 19,90$	0,93
Pindex	$y = -0,24 x + 17,82$	0,92
WI (Short, 1961)	$y = -0,17 x + 17,37$	0,92
STI	$y = -0,91 x + 78,25$	0,98

De maneira semelhante ao efetuado no estudo do Caso I, comparou-se a variação dos índices químicos com a variação dos índices físicos geotécnicos (conteúdo de finos e índice de vazios). Também aqui não foram observadas correlações entre a variação dos índices químicos e tais propriedades físicas. O mesmo aconteceu quando analisada a variação do índice de vazios com o valor de LOI (%). No caso das relações  $k_i$  e  $k_r$  com a variação dos índices químicos, nenhuma correlação entre os dados foi observada.

Comparando a variação de  $k_i$  e  $k_r$  com LOI, Figura 2.36, observou-se novamente a falta de correspondência entre os valores dos diferentes índices.

Figura 2.36– LOI vs  $k_i$ ,  $k_r$  – Perfil São Gonçalo

Finalmente foram comparados os valores de volume de poros menores que  $0,100\mu\text{m}$  (Tabela 2.23), obtidos na porosimetria por injeção de mercúrio com os valores de Perda ao Fogo (LOI), como está mostrado na Figura 2.37, observou-se que existe uma boa correlação entre os valores. O que mostra que com o avanço do grau de intemperismo (LOI) existe um aumento da microporosidade. Nesta Figura trabalhou-se, para os solos, com o valor de LOI determinado a  $600^{\circ}\text{C}$  (Tabela 2.18).

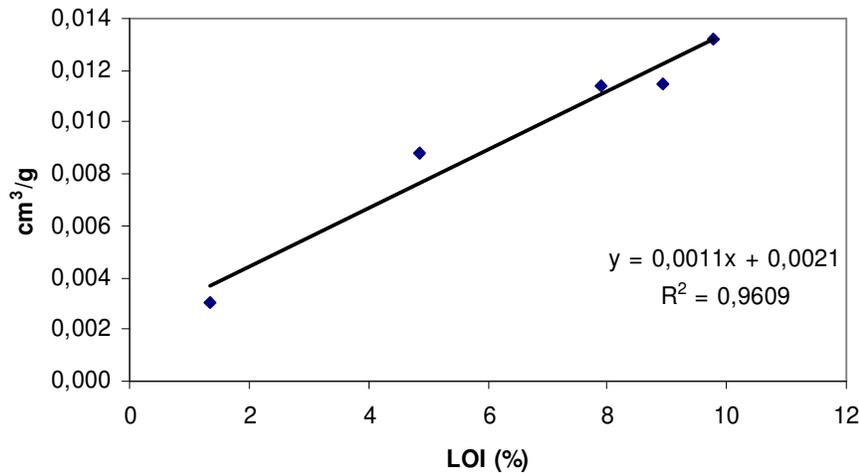


Figura 2.37 – LOI vs porosimetria MIP.

## 2.6.

### Comentários Finais

No presente capítulo foram apresentadas e discutidas várias características dos solos residuais tropicais. Observa-se que tentar estabelecer uma classificação rigorosa e única para estes solos não é trivial e possivelmente não é realística tendo em vista a natureza destes solos. É, possivelmente, mais razoável considerar a divisão em grupos com base na mineralogia e na estrutura que eles apresentam. Os grupos mineralógicos podem ser divididos em (a) com forte influência da mineralogia da rocha mãe, (b) com pouca influência da mineralogia da rocha mãe. Dentro deste segundo grupo ainda é possível ter-se subdivisões considerando o tipo de argilo-mineral presente. Os grupos considerando a estrutura também podem ser classificados em (a) solos com forte influência da estrutura e (b) solos com pouca influência da estrutura. Classificações genéricas, envolvendo horizontes bem definidos em perfis verticais apresentam uma aplicação limitada.

Também foram avaliados os diferentes índices disponíveis para quantificar/identificar o grau de intemperismo presente nos solos. Dentre estes os índices químicos aparecem como os mais simples de determinar e, talvez, os mais confiáveis, já que a utilização de índices mineralógicos ou micro-morfológicos depende muito da habilidade do operador na identificação dos minerais considerados padrões, além de exigir um procedimento trabalhoso e demorado. A utilização destes índices químicos de intemperismo em diferentes perfis de gnaiss permitiu confirmar a hipótese de que o intemperismo em maciços metamórficos não está necessariamente relacionado à profundidade. A escolha do índice químico a ser utilizado depende dos minerais presentes na rocha e no solo, e do grau de alteração do solo.

Os índices  $k_r$  e  $k_i$  não são adequados para a avaliação do intemperismo em solos residuais jovens. Sua aplicação deve ser limitada aos solos maduros, potencialmente já em processos de laterização.

O índice de Perda ao Fogo se apresenta como um índice simples, rápido e barato para a avaliação do grau de intemperismo. A temperatura utilizada na determinação da Perda ao Fogo deve estar relacionada com o tipo de argilo-mineral presente nas amostras analisadas. Se o mineral presente é a caulinita, não existe a necessidade de se atingir temperaturas superiores a 600 °C. Solos jovens produtos de alteração de gnaiss podem ser ricos em micas alteradas. Lembrando que as micas perdem água de constituição na faixa de 800 a 1000°C, a utilização de temperaturas menores que 800°C permitirá obter valores mais realistas de perda de massa. Só em solos com presença de argilo-minerais de alta atividade, como a esmectita, existe a necessidade de se atingir temperaturas superiores aos 800°C. Foi executada a validação numérica do Índice de Perda ao Fogo, pela comparação com outros índices de provada eficácia, os resultados obtidos mostraram que o índice de perda ao fogo é indicado para a determinação do grau de alteração dos materiais.

A utilização da microscopia ótica na avaliação da evolução da estrutura dentro do perfil de alteração apresenta-se como uma técnica atraente e interessante, já que permite analisar a lâmina petrográfica como um todo, e não ponto a ponto como no caso do microscópio petrográfico. A automatização na aquisição e no processamento das imagens implica em um tempo muito menor de análise quando comparado com as técnicas tradicionais. A combinação deste procedimento com as técnicas tradicionais de identificação de minerais permite uma avaliação muito mais precisa da evolução do perfil. A utilização desta técnica necessita de investigações futuras, que permitam avaliar a influência do

preparo das lâminas (espessura final, tipo de corante, metodologia de impregnação) nos resultados finais, com o intuito de aperfeiçoar o procedimento de ensaio.

Da análise executada é possível afirmar que existe uma quantidade mínima de ensaios necessários para identificar o grau ou nível de intemperismo de um perfil de alteração. Do ponto de vista geotécnico devem ser executados ensaios de caracterização completa, granulometria, densidade dos grãos, densidade seca e limites de consistência. Para a identificação dos minerais presentes são necessários ensaios de Análise Química Total, Difração de Raios X e Perda ao Fogo. É importante que a execução dos ensaios de Difração por Raios X seja feita a partir da fração areia fina (passante na peneira #40) já que em muitos casos os argilo-minerais podem estar agregados em partículas maiores, tamanho de areia. O mesmo vale para alguns minerais primários, parcialmente alterados. Por exemplo, no caso do perfil de alteração de Gnaisse Facoidal (Caso II), a mica se apresentou em maior quantidade na fração silte.

Para avaliar a estrutura são necessários ensaios de porosimetria e a confecção de lâminas delgadas. Como estes tipos de ensaios trabalham com amostras reduzidas é importante garantir a representatividade destas amostras em relação ao perfil ou local estudado. No Capítulo 6 da presente, é apresentada e discutida a determinação da distribuição de poros a partir da curva de retenção e são comparados os resultados obtidos com os da porosimetria por injeção de mercúrio.