

## 2 Perfis de intemperismo

As rochas, quando expostas na superfície da Terra estão sujeitas à ação de processos naturais de aquecimento e resfriamento, decorrentes da alternância de dias e noites e da ação das águas, que se infiltram a partir das chuvas e percolam, tipicamente, através de fissuras ou fraturas nos materiais existentes. A estes processos, de ordem química, física ou biológica, que desintegram e/ou decompõem a rocha, dá-se o nome de intemperismo.

A ação do intemperismo sobre as rochas é gradual. Assim, as rochas não se decompõem ou se desintegram instantaneamente, em geral requerem um período de tempo relativamente longo para sofrerem alteração, variável em função do tipo de rocha e das condições climáticas locais. Dessa forma, as rochas podem se apresentar em diferentes estágios de alteração, também chamados de graus ou classes de alteração.

A formação do solo ocorre quando o intemperismo, além de provocar alterações químicas na rocha, começa a modificar sua microestrutura, de forma gradual, promovendo uma importante reorganização dos minerais neoformados. O intemperismo leva à formação de um perfil de solo.

Entende-se por perfil de solo a seção de um terreno constituída por uma seqüência de camadas distintas por suas características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, biológicas e microestruturais. Para a Geotecnia, a camada superficial recebe o nome de solo maduro e a camada subsuperficial é denominada solo residual jovem ou solo saprolítico. Na seqüência encontra-se a camada de rocha alterada ou saprolito e, abaixo, a rocha sã.

Solos residuais jovens são materiais complexos e heterogêneos especialmente quando desenvolvidos de rochas metamórficas. Suas propriedades de engenharia são influenciadas à medida que o intemperismo evolui até a formação de uma nova microestrutura, dando origem ao solo residual maduro. Os solos residuais jovens vão desde aqueles que guardam características reliquias da rocha matriz e a maioria dos minerais primários ou parte significativa deles passando por aqueles em que o material já não guarda mais a estrutura da rocha mãe, no entanto mantém parte dos minerais primários intemperizados, contém quantidade significativa de argilominerais 2:1 e já

contém argilominerais 1:1. Já os solos residuais maduros praticamente não possuem minerais primários, a exceção de minerais muito resistentes ao intemperismo, como é o caso do quartzo; os minerais 2:1 já foram em sua totalidade transformados e parte significativa dos argilominerais 1:1 já se transformaram em óxidos e hidróxidos Segundo Camapum de Carvalho (2004), entre outros, estes solos são de difícil distinção dos solos transportados neste mesmo estágio de intemperização.

No campo da engenharia geotécnica existe uma grande diversidade de terminologias usadas para descrever e classificar os vários componentes de um perfil de intemperismo, sendo que os termos solo residual e solo saprolítico são algumas vezes mal empregados. Muitos autores propuseram sua própria terminologia para designar as diferentes camadas de um perfil de alteração. Irfan (1988) emprega o termo solo residual restritamente à camada superior do perfil de intemperismo, a qual não apresenta mais a estrutura da rocha matriz. Para o autor, o termo saprolito é usado como um termo geral para descrever a porção do perfil de intemperismo que conserva a estrutura da rocha original, mas que pode ser considerada um solo em termos de resistência e consistência. Deere e Patton (1971) propõem uma terminologia para perfis de alteração que tem sido muito utilizada (Figura 2.1).

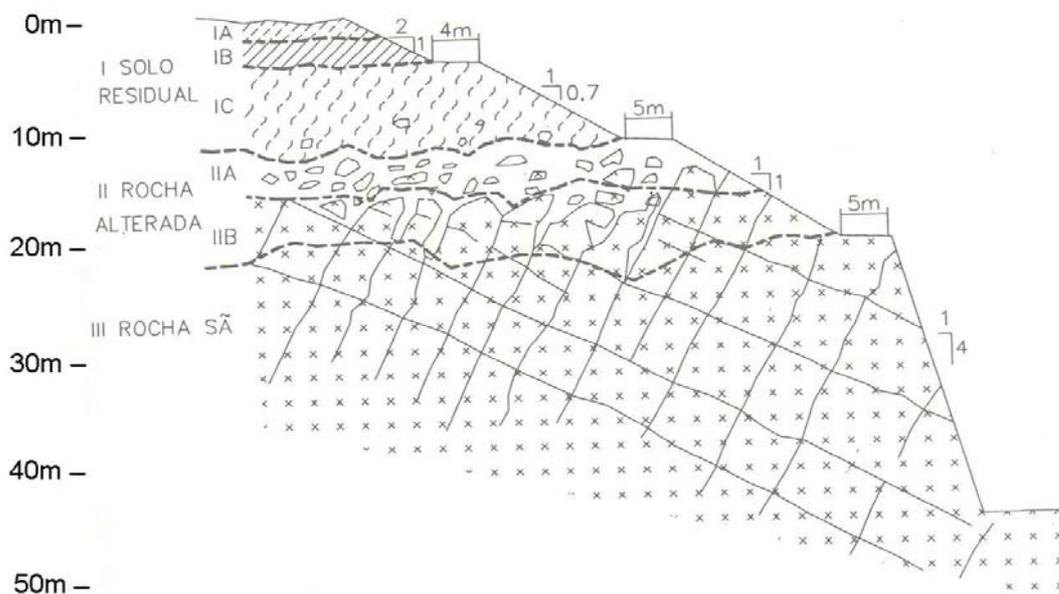


Figura 2.1 – Perfil de alteração proposto por Deere e Patton (1971)

Pastore (1995) propôs uma padronização da terminologia para descrição de perfis de alteração baseada, sobretudo, na análise das várias proposições existentes sobre o assunto e nos conceitos adotados em 1985 pelo Comitê de Solos Tropicais da ISSMGE. Esta proposição caracteriza sete horizontes num

perfil de alteração completo. A Figura 2.2 apresenta o perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave proposto por Pastore (1995). O perfil de solo estudado no presente trabalho assemelha-se a este perfil e, portanto, se enquadra neste grupo.

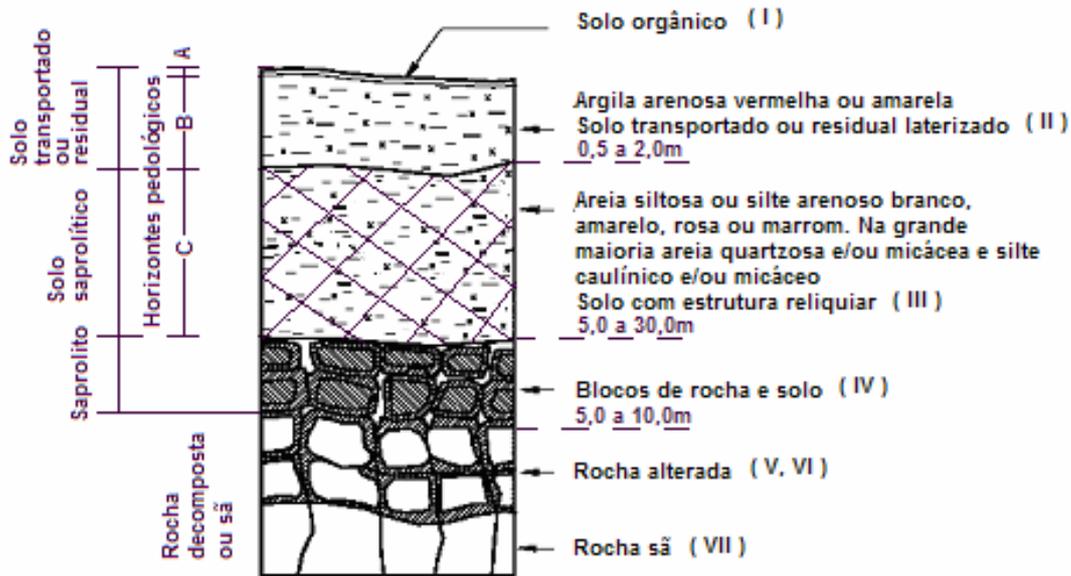


Figura 2.2 - Perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave (Pastore, 1995)

O perfil estudado nesta dissertação foi dividido em cinco níveis distintos de alteração a partir de suas características morfológicas. Propõe-se neste trabalho o perfil da Figura 2.3. Foram estudadas apenas as camadas de solo residual jovem e rocha alterada deste perfil.

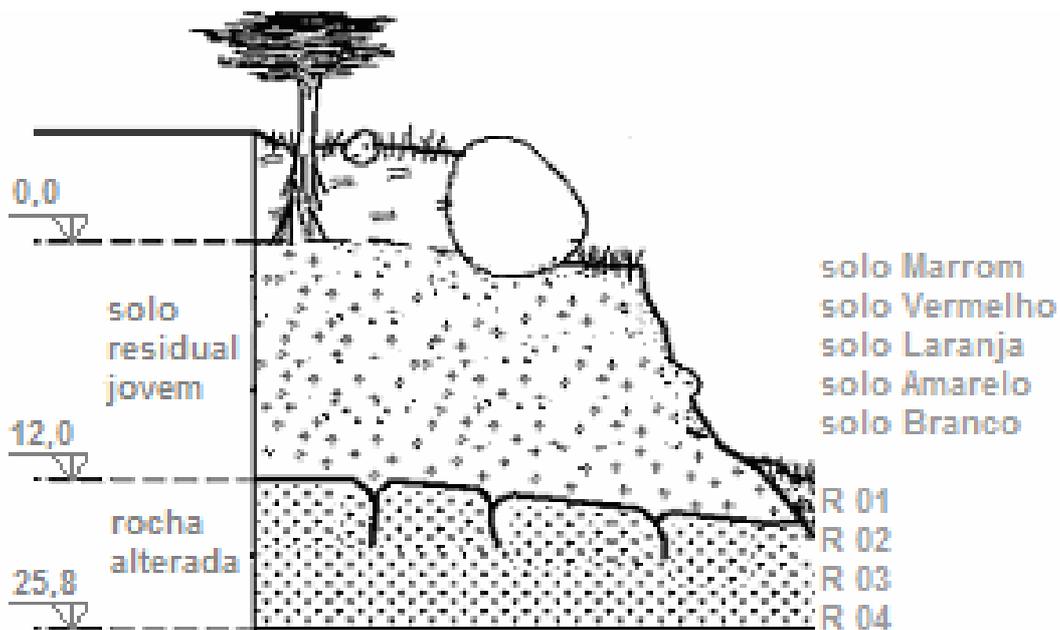


Figura 2.3 – Perfil de solo proposto na presente dissertação

Solos residuais formados a partir do intemperismo de rochas em ambientes tipicamente tropicais e subtropicais apresentam problemas na engenharia geotécnica devido a sua complexidade e heterogeneidade. Caracterizar e ensaiar estes solos é, conseqüentemente, difícil. Muitos dos métodos convencionais da Mecânica dos Solos e das correlações desenvolvidas para solos transportados em climas temperados não se aplicam a estes solos (e.g. Vaughan *et al.*, 1988). O comportamento de solos residuais jovens parece ser dominado pela microestrutura do solo, a qual está relacionada com a estrutura original da rocha e com a história do intemperismo.

Os solos transportados são comumente classificados por sua plasticidade e graduação o que resulta em boas correlações com suas propriedades geotécnicas. Isto não se aplica aos solos saprolíticos ou residuais jovens pela dificuldade que se tem em determinar o exato tamanho dos grãos nestes solos de estrutura reticulada e fracas ligações, ambas as características herdadas de sua rocha matriz ou geradas durante os processos de intemperismo. (e.g. Sueoka, 1989)

Alguns estudos de perfis de intemperismo desenvolvidos a partir de rochas gnáissicas já foram realizados no Rio de Janeiro tanto no Departamento de Geologia da UFRJ quanto no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Na década de 80, muitos estudos de caracterização geotécnica de perfis de intemperismo provenientes de gnaisses, inclusive envolvendo análises químicas e mineralógicas, foram desenvolvidos. Dentre eles cabe citar Brito (1981), Falcão (1984), Sertã (1986) e, já na década de 90, Munechica (1992), Menezes Filho (1993), Barroso (1993) e Polivanov (1998).

Rahardjo *et al.* (2004) estudaram solos residuais originados das duas maiores formações geológicas de Singapura. Os resultados mostraram que a variação nas propriedades índice, propriedades de engenharia e nas características microestruturais de solos residuais ao longo da profundidade pode ser correlacionada com o grau de intemperismo. O grau de intemperismo foi definido a partir das características morfológicas do solo e classificado segundo a proposta de Little (1969) mostrada na Figura 2.4 Um aumento no grau de alteração correspondeu a um aumento na quantidade de poros e a uma maior variedade no tamanho dos poros. Ainda segundo eles, a variação no volume dos poros e a distribuição do tamanho dos poros ao longo de um perfil de rocha intemperizada podem ser usadas como uma medida indicativa da variação do grau de intemperismo com a profundidade.

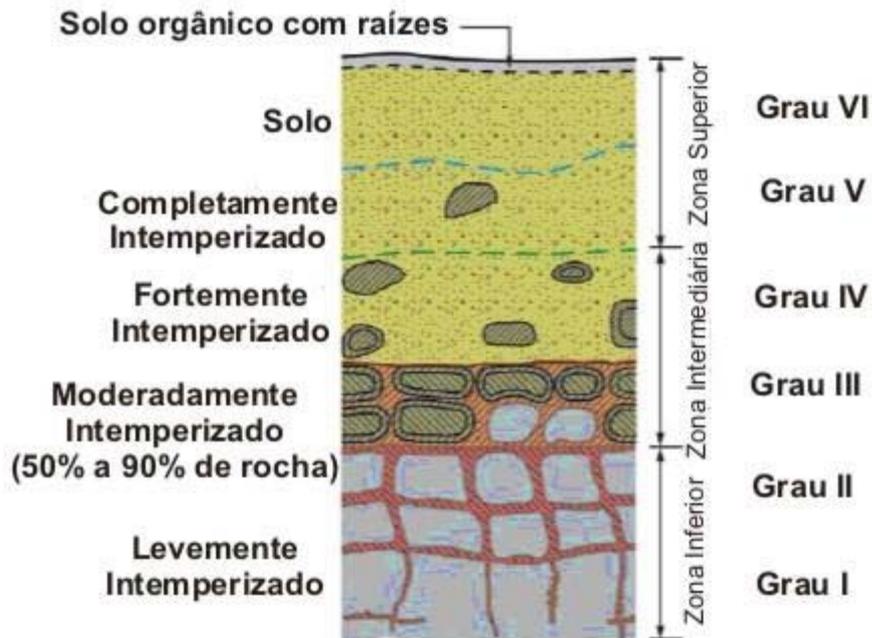


Figura 2.4 – Perfil de intemperismo típico de solo residual segundo Little (1969)

Rocha Filho *et al.* (1985) estudaram um perfil formado basicamente por quartzo e feldspato em diversos graus de alteração. A fração fina constituía-se basicamente de biotita e feldspato fortemente alterados. Observações de campo mostraram uma heterogeneidade do perfil, associada a descontinuidades litológicas e mineralógicas. Era esperado que estas descontinuidades, juntamente com o tipo e o grau de intemperismo diferencial, pudessem influenciar fortemente as propriedades mecânicas do solo. Assim, procuraram correlacionar o grau de intemperismo diretamente com as propriedades de engenharia. Para isto, fizeram uma revisão crítica e comparativa do uso de índices de intemperismo físico e químico na avaliação do grau de decomposição de solos residuais e tentaram correlacionar estes índices com as propriedades geotécnicas de um solo residual jovem de gnaiss. Correlações entre as propriedades mecânicas e fatores de lixiviação foram estabelecidas mostrando a influência qualitativa do grau de intemperismo nestes parâmetros.

Os autores mostraram que os índices mineralógicos de intemperismo, largamente empregados com sucesso para quantificar o grau de alteração de solos residuais de rochas graníticas (perfis de solo homogêneos), não podem ser usados com o mesmo grau de confiança para solos residuais resultantes da decomposição de rochas gnáissicas (perfis de solo heterogêneos). Já os índices de intemperismo químico, baseados no grau de lixiviação dos minerais, podem ser usados para indicar a influência qualitativa do grau de intemperismo nas propriedades de engenharia de um solo residual jovem de gnaiss.

Brito (1981) realizou análises químicas e mineralógicas em amostras tomadas de diferentes profundidades ao longo de um perfil. O perfil estudado era formado pela decomposição de uma rocha metamórfica, classificada como gnaiss migmatítico, cujos minerais primários eram: quartzo, feldspato potássico, feldspato calco-sódico e biotita. Os minerais secundários que compunham o perfil eram: epidoto, zircão, muscovita, turmalina e garnierita.

## 2.1. Fatores que influenciam o intemperismo

Os processos intempéricos modificam as propriedades físicas das rochas, tais como estrutura, resistência e textura, por mecanismos de desagregação bem como suas propriedades químicas como composição e microestrutura por mecanismos de decomposição. Em função do tipo de mecanismo são normalmente classificados em intemperismo físico e intemperismo químico. Pode ocorrer também no processo de alteração das rochas a ação de organismos vivos ou da matéria orgânica proveniente de sua decomposição. Nestes casos o intemperismo é chamado biofísico ou bioquímico (Teixeira *et al.*, 2000).

O clima exerce uma influência profunda no intemperismo, especialmente a umidade relativa, a precipitação e a temperatura. A velocidade com que as reações químicas ocorrem praticamente se duplica com um aumento de apenas 10°C na temperatura.

Climas quentes e úmidos favorecem as reações químicas e, conseqüentemente, os processos de intemperismo químico. Por esta razão, em regiões de clima tropical os processos de formação dos solos são diferenciados evidenciados pela grande espessura de solos residuais, em condições favoráveis de relevo, em contraste com as regiões de climas temperados, onde esses solos são pouco espessos.

Não apenas o clima controla a ação do intemperismo, mas também fatores como o relevo, a fauna e a flora, características da rocha parental e o tempo de exposição da rocha aos agentes intempéricos. Dessa forma, embora o perfil estudado nesta dissertação encontre-se em região de clima subtropical, com temperatura média do mês quente inferior a 22 °C e pluviosidade maior que 1000 mm anuais, ele é um perfil espesso e bem desenvolvido.

A principal contribuição da rocha matriz é a definição da composição mineralógica do solo resultante. Como essa composição é determinante para a

granulometria, para a plasticidade e para o tipo de argilomineral presente no solo, a rocha de origem define grande parte do comportamento geomecânico dos solos residuais. Num mesmo clima úmido e numa mesma topografia a espessura dos solos, que residem sobre a rocha que lhes deu origem por decomposição, é variável com o tipo de rocha. A resistência à decomposição dos minerais é um fator determinante da espessura dos solos residuais.

Descontinuidades litológicas e mineralógicas na rocha mãe são transferidas para o solo residual durante o processo de intemperismo. Estas descontinuidades irão impor à rocha sã um intemperismo diferencial que será dependente da trajetória da descontinuidade. Portanto, o processo de intemperização não implica, necessariamente, que o grau de intemperismo varie somente com a profundidade, mas também será função das fraturas herdadas da rocha matriz, podendo ocorrer lateralmente. Desse modo, espera-se que as propriedades de engenharia de um solo residual jovem estejam fortemente relacionadas ao tipo e grau de intemperismo ao qual foi submetido o perfil de solo.

## **2.2. Índices de avaliação do grau de intemperismo**

Existem muitas tentativas de quantificar o grau de intemperismo através de métodos químicos, petrográficos, difração de raios-X e microscopia eletrônica, ou a partir de índices físicos. Muitos índices intempéricos têm sido propostos para quantificar o grau de intemperismo, mas pouca atenção se tem dado a correlacioná-los com as propriedades de engenharia.

Os índices químicos são relativamente precisos para obtenção do grau de alteração química. Entretanto as propriedades geotécnicas dos solos saprolíticos são também dependentes da estrutura de sua rocha matriz.

Com base no princípio de que os elementos químicos provenientes da decomposição dos minerais são removidos de forma diferencial, algumas relações moleculares, conhecidas como índices de intemperismo químicos, são estabelecidas entre os diversos elementos presentes nos solos e rochas para quantificar o grau de intemperismo de cada um deles. Estas relações foram propostas considerando-se a diferença na solubilidade e na mobilidade dos diversos componentes químicos do solo no ambiente em que se encontram.

A seguir são apresentados alguns dos índices químicos encontrados na literatura.

Harrassowitz (1926) citado por Vieira (1975), Moníz (1972) e Falcão (1984) propôs os índices  $K_i$  e  $K_r$ , que consideram a quantidade de sílica total.

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (I)$$

$$K_r = \frac{SiO_2}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3)} \quad (II)$$

Também foi Harrassowitz (1926) quem propôs os índices  $ba$ ,  $ba_1$ ,  $ba_2$ , e  $K$ .

$$ba = \frac{(K_2O + Na_2O + CaO)}{Al_2O_3} \quad (III)$$

$$ba_1 = \frac{(K_2O + Na_2O)}{Al_2O_3} \quad (IV)$$

$$ba_2 = \frac{(CaO + MgO)}{Al_2O_3} \quad (V)$$

$$K = \frac{K_{i_{rocha\_alterada}}}{K_{i_{rocha\_sã}}} \quad (VI)$$

Jenny (1941) apud Brito (1984) propôs o índice de lixiviação  $\beta$ .

$$\beta = \frac{ba_{1_{rocha\_alterada}}}{ba_{1_{rocha\_sã}}} \quad (VII)$$

De acordo com Falcão (1984), os índices que consideram a quantidade de sílica total, se usados para avaliar o grau de intemperismo de rocha ácidas não fornecem bons resultados. Isso se deve ao fato de que com a evolução do intemperismo a sílica se concentra também sob a forma de quartzo, provocando um aumento nestes índices, quando na realidade eles são máximos no material de origem. Para a autora, o índice que melhor definiu a evolução e o intemperismo diferencial do perfil por ela estudado foi o fator de lixiviação  $\beta$ .

Para efeitos de correlações nesta dissertação, o índice de intemperismo utilizado foi o  $ba_1$  (Equação IV). Isto porque o perfil de solo em questão provém de rochas ácidas e, portanto, suas quantidades de potássio e sódio são mais representativas que os teores de cálcio e magnésio. Além disso, o fator de lixiviação  $\beta$  (Equação VII) não pôde ser usado tendo em vista que, como será mencionado no Capítulo 3 não foi possível coletar amostras de rocha sã.

Com a análise mineralógica é possível estudar a gênese e a 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 esta razão 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.

Ruhe (1956) apud Falcão (1984) propõe os índices  $W_{rh}$  e  $W_{rl}$  (Equações VIII e IX) baseados na estimativa das espécies minerais presentes na fração areia fina.

$$W_{rh} = \frac{(zircão + turmalina)}{(piroxênio + anfibólio)} \quad (VIII)$$

$$W_{rl} = \frac{quartzo}{feldspato} \quad (IX)$$

Este índice é passível de crítica, pois se baseia em minerais que podem ou não existir no perfil de solo.

Os índices mineralógicos têm limitações quando citam um mineral instável como elemento de referência. Além disso, devem ser escolhidos em função do tipo de rocha e clima da região e são utilizados para avaliar, dentro de uma mesma formação, o grau de alterabilidade do solo, não devendo ser aplicados como referências comparativas entre duas formações distintas (e.g. Falcão, 1984).

Não foram encontradas na literatura referências sobre índices biológicos ou microbiológicos capazes de avaliar o grau de intemperismo de qualquer tipo de solo.