

## **2**

### **Revisão bibliográfica**

#### **2.1.**

##### **Solos tropicais**

##### **2.1.1.**

###### **Considerações gerais**

Uma vasta área do território brasileiro é recoberta por solos tropicais devido às condições favoráveis de formação e desenvolvimento (clima quente, alta pluviosidade e boas condições de drenagem). Estes solos dificilmente são encontrados na Europa e na América do Norte, o que torna o estudo dos mesmos responsável dos países de clima tropical, como mencionado por Terzaghi<sup>1</sup>. Os solos tropicais podem ser tanto residuais quanto transportados.

Os solos residuais são aqueles formados a partir da decomposição ou degradação das rochas pelo intemperismo (tipicamente físico ou químico), que permanecem no local onde foram formados, sem sofrer qualquer tipo de transporte. Influenciam nas características destes solos a rocha de origem, clima, topografia e condições de drenagem. Eles são normalmente considerados não uniformes e apresentam espessura variável.

O solo residual apresenta comportamento bastante diferenciado em relação aos solos sedimentares. A heterogeneidade, a anisotropia e outras peculiaridades de ordem geológica dificultam a elaboração de um modelo conceitual que generalize o seu comportamento. O comportamento deste tipo de solo está fortemente ligado à sua estrutura e características herdadas da rocha matriz. Suas propriedades dependem do grau de intemperismo a que o solo foi submetido, como mencionado por Futai (2002). Assim, existem solos com comportamentos que variam de baixa compressibilidade e elevada resistência, como os solos saprolíticos (solos residuais jovens), incluindo nesse extremo as rochas alteradas, até os solos extremamente instáveis (mais superficiais) denominados de solos colapsíveis.

---

<sup>1</sup> Discurso de abertura da Segunda Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações realizada em 1948.

A influência das características da rocha mãe é mais pronunciada nos estágios iniciais de intemperismo (sendo de extrema relevância no estudo de solos residuais jovens), mas, durante os estágios posteriores, outros fatores pedológicos são mais relevantes, como a laterização.

Segundo Mitchell (1993), o processo de laterização ocorre em ambientes que apresentem altas temperaturas, chuvas abundantes e boas condições de drenagem (condições encontradas em várias regiões do Brasil). Neste processo, bases ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ) são lixiviadas, há uma rápida quebra de feldspatos e ferromagnesianos e acumulação de óxidos de alumínio e ferro. Para Bawa (1957) um solo é laterítico quando a razão entre  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  está entre 1,33 e 2,00. Este processo atinge tanto solos residuais quanto sedimentares.

A maioria dos estudos relacionados a solos residuais no Brasil foca, principalmente, solos provenientes de rochas metamórficas (gnaiesses e xistos), como constatado nos trabalhos de Maccarini (1980), Brito (1981), Sandroni (1991), Souza Neto (1998), Oliveira (2000), Silva (2000), Futai (2002), Martins (2005), Fonseca (2006), entre outros. Dentre as rochas ígneas é dada maior atenção a solos residuais de basaltos e granitos, como os estudos efetuados por Tanaka (1976), Melfi (1988), Rigo (2000) e Brant (2005). No entanto, poucas pesquisas referentes a solos originados a partir de rochas intermediárias foram realizadas. Isto provavelmente se deve ao fato destas rochas serem encontradas apenas em uma pequena área do território brasileiro.

O sienito, tipo de rocha que deu origem ao solo residual estudado no presente trabalho, é uma rocha ígnea plutônica intermediária, também denominada de rocha alcalina devido ao alto conteúdo de álcalis (K e Na) na composição dos minerais essenciais; outra característica é a presença de pouco quartzo ou nenhum (Frasca e Sartori, 1998). Se a rocha for rica em alumínio, o produto da laterização recebe o nome de bauxita, nome dado a um grupo complexo de minerais ora amorfos, ora cristalinos, cuja composição é hidróxido de alumínio. De acordo com Leinz e Amaral (1966), para que se processe a formação deste minério, além da existência de uma rocha aluminosa em um ambiente de clima tropical, são necessárias outras condições. A topografia deve ser suave, reduzindo ao mínimo o efeito erosivo. Deve-se alternar com a estação chuvosa uma estação seca. Durante este tempo a água ficará agindo nos poros da rocha em vias de decomposição. Finalmente, a condição mais importante é a do pH da água, que deve ser favorável. A sílica é tanto mais solúvel quanto mais alto for o pH. Já a alumina apresenta dois valores, um ácido e outro alcalino. O

pH ideal para a laterização é entre 8 e 9, onde é relativamente alta a solubilidade da sílica e baixa a de alumina (Leinz e Amaral, 1966).

Os fonólitos, rochas com características bastante semelhantes aos sienitos, são rochas destituídas de quartzo. A Tabela 2.1 mostra a composição química de dois fonólitos e dos seus produtos de alteração. Estes materiais são de Poços de Caldas, mesma região onde se encontra o solo residual estudado. No processo de intemperismo desta rocha, grande parte da sílica é lixiviada e as quantidades de alumina e sesquióxidos de ferro são consideravelmente aumentadas. A perda de sódio é maior que a de potássio. Este fato é consequência da fácil adsorção dos íons de potássio às partículas de dimensões coloidais do solo.

Tabela 2.1 - Análise química de dois fonólitos e dos seus produtos de decomposição de Poços de Caldas, Estação Bauxita (Leinz e Amaral, 1966)

	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)
SiO <sub>2</sub>	53,9	6,67	53,82	4,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,42	51,04	19,18	48,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,13	10,63	3,20	7,98
FeO	1,04	0,44	0,95	0,34
MgO	-	-	0,13	-
CaO	1,91	0,34	1,76	-
Na <sub>2</sub> O	7,24	0,78	6,15	0,55
K <sub>2</sub> O	8,54	1,24	7,9	0,63
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3,43	26,82	5,26	27,69
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,15	0,25	0,22	8,18
TiO <sub>2</sub>	0,29	0,50	0,29	0,61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,29	0,10	0,08
MnO	0,16	0,08	0,28	0,12
Total (%)	99,31	99,08	99,24	98,76

I e III – Rocha sã; II e IV – Seus respectivos produtos de alteração

Diferentemente dos solos residuais, os solos sedimentares são resultantes dos processos de erosão e transporte, seguidos de deposição e adensamento sob a ação do peso próprio. O solo originado de misturas de fragmentos minerais da rocha subjacente, enriquecidos por detritos vegetais, blocos de rocha com grãos de qualquer dimensão transportados principalmente por gravidade das partes mais elevadas, constitui um tipo particular de solo transportado denominado solo coluvionar, colúvio ou solo alóctone. As argilas moles e os aluviões também se classificam como solos sedimentares. Solos coluvionares e aluvionares podem sofrer processo de laterização (Pastore, 1995 e Cruz, 1996).

As principais diferenças entre o comportamento de solos residuais e sedimentares podem ser vistas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Fatores que distinguem solos residuais e transportados (Brenner *et al* 1997)

Características	Efeito nos Solos Residuais	Efeito nos Solos Sedimentares
História de tensões	Geralmente não é muito importante.	-Muito importante, -Causa o efeito de pré-adensamento.
Resistência de partículas/grãos	-Muito variável, -Varia com a mineralogia e existência de partículas alteradas.	-Bastante uniforme, -Presença de poucos grãos alterados que são eliminados no transporte.
Cimentação	-Importante para a resistência.	-Ocorre devido ao envelhecimento geológico.
Estrutura reliquiar e descontinuidades	Desenvolvido a partir de estruturas pré-existentes ou características estruturais da rocha mãe, inclui-se a estratificação, juntas, bandamento, etc.	Desenvolvido devido a ciclos de deposição e da história de tensões, gerando possíveis superfícies de falhas.
Anisotropia	Ocorre geralmente devido à estrutura reliquiar da rocha.	Devido à deposição e história de tensões.
Índice de vazios	Depende do grau de alteração do material.	Depende diretamente da história de tensões.

A seqüência de camadas com diferentes propriedades físicas, formadas *in situ* por processos de alteração física e química, e que permanecem recobrando o maciço rochoso é denominada, segundo Deere e Patton (1971), como perfil de intemperismo. Pastore (1992) compara perfis de intemperismo típicos do Brasil Figura 2.1 onde, na última coluna, o autor inclui no horizonte laterítico os solos transportados que sofreram laterização. Os perfis desta figura só representam locais onde os processos intempéricos ocorreram na direção vertical.

	DEERE e PATTON (1971)	DE MELLO (1971)	VARGAS (1974)	WOLLE (1985)	PASTORE (1992)
I - SOLO RESIDUAL	I - A HORIZONTE "A"	SOLO	A SOLO	S. Superf.	Hor. Organ. (1)
	I - B HORIZONTE "B"	MADURO	B RESIDUAL MADURO	SOLO MADURO	HORIZONTE DE SOLO LATERÍTICO (2)
	I - C HORIZONTE "C" (SAPROLITO)	SOLO RESIDUAL	C HORIZ. II INTER-MEDIÁRIO	SOLO SAPROLÍTICO	HORIZONTE DE SOLO SAPROLÍTICO (3)
II - ROCHA ALTERADA	II - A TRANSIÇÃO (de solo saprolítico para rocha alterada)	RESIDUAL OU SAPRÓLITO	SAPRÓLITO HORIZONTE III SAPRÓLITO	SAPRÓLITO	HORIZONTE DE SAPRÓLITO (4)
	II - B Rocha Parcialmente Alterada	ROCHA ALTERADA	HORIZONTE IV ROCHA ALTERADA	ROCHA ALTERADA	HORIZONTE DE ROCHA MUITO ALTERADA (5) HORIZONTE DE ROCHA ALTERADA (6)
III	ROCHA SÃ	ROCHA SÃ	HORIZONTE V ROCHA SÃ	ROCHA SÃ	HORIZONTE DE ROCHA SÃ (7)

Figura 2.1 – Proposições de perfis de intemperismo típicos do Brasil (Pastore, 1992)

**2.1.2. Resistência ao cisalhamento**

Como já mencionado, os solos residuais são formados *in situ* a partir do intemperismo físico e químico, enquanto solos sedimentares são formados por um processo de erosão e transporte, seguidos por deposição e adensamento. Os solos sedimentares podem passar por alterações após a deposição devido a processos como adensamento secundário, lixiviação, efeitos tixotrópicos e desenvolvimento de ligações interpartículas (Bjerrum, 1967). Desta forma, para solos sedimentares, a tendência normal é de que a resistência aumente com o tempo, conforme o desenvolvimento das ligações e do seu endurecimento. Com os solos residuais é de se esperar que acontecerá o contrário, as ligações e cimentações sendo quebradas ou enfraquecidas pelos processos intempéricos. Outra diferença importante entre estes grupos de solo é a característica

homogênea dos depósitos sedimentares e o fato de que a história de tensões é geralmente um fator determinante no comportamento destes (permite a clássica divisão em solos normalmente adensados e pré-adensados).

Como o comportamento de solos sedimentares é algo bem fundamentado e conhecido, neste item será dada maior atenção à resistência ao cisalhamento de solos residuais, apesar de um dos materiais estudados nesta dissertação tratar-se de um colúvio.

O comportamento de solos residuais não é devidamente representado pelos modelos da Mecânica dos Solos Clássica, devido às peculiaridades que estes apresentam em relação ao processo de formação e as suas características (principalmente estrutura e heterogeneidade).

Mitchell (1993) define estrutura como sendo o termo utilizado para designar os efeitos combinados de fábrica, composição e forças interpartículas. Deve-se ficar claro que qualquer solo em seu estado indeformado tem uma estrutura seja ele residual ou sedimentar, entretanto dar-se-á maior atenção às estruturas dos solos residuais por motivos que serão discutidos adiante.

A estrutura dos solos residuais é marcada pelo arranjo e ligações entre os grãos, num certo índice de vazios. Em decorrência destas ligações, denominadas 'cimentos fracas', costuma-se dizer que os solos residuais constituem solos estruturados. Apesar disto entrar em desacordo com o acima escrito, este termo será usado no presente trabalho, particularmente por ser amplamente difundido na literatura internacional.

Segundo Leroueil e Vaughan (1990), a destruição progressiva dessas ligações entre as partículas dos solos estruturados ocorre principalmente por compressão, expansão, ação do intemperismo, fluência, fadiga ou cisalhamento, sendo as principais conseqüências da desestruturação a diminuição da rigidez do solo, a perda de resistência de pico e o decréscimo da tensão de escoamento na compressão.

De acordo com Mitchell (1993), as ligações interpartículas de natureza química (agentes cimentantes como carbonatos, sílica, óxido de ferro, alumínio, compostos orgânicos) e de natureza eletrostática e eletromagnética (forças de Van Der Waals) são fontes de coesão verdadeira, enquanto a coesão aparente decorre da sucção (aspecto importante, mas que não será discutido).

A maneira mais comum para se determinar a resistência ao cisalhamento de solos residuais é através de ensaios de laboratório, seja por cisalhamento direto ou compressão triaxial.

Ao serem submetidos a carregamentos verticais com confinamento lateral, os solos residuais se comportam de maneira semelhante às argilas sedimentares, diferindo, entretanto, em relação à tensão correspondente a uma mudança acentuada no gradiente da curva tensão x deformação. Esta tensão, denominada por Vargas (1953), Leroueil e Vaughan (1990) como “tensão de escoamento”, não está relacionada com a tensão vertical das camadas de terra subjacentes, e sim com a resistência de ligações interpartículas. A tensão de escoamento para solos residuais é consequência da história de intemperismo e resulta, principalmente, de dois fatores: índice de vazios e ligações interpartículas.

De acordo com Vaughan (1985), as principais características do comportamento de engenharia destes solos são: a) a presença de um intercepto de coesão e de uma tensão de escoamento, os quais não se relacionam com a história de tensões, mas sim com o processo de intemperismo, como já mencionado no parágrafo anterior; b) um comportamento rígido para baixas tensões (inferiores a tensão de escoamento) e um comportamento mais plástico para tensões mais elevadas.

Leroueil e Vaughan (1990) analisam o comportamento de solos residuais, em ensaios triaxiais, da seguinte maneira:

- Quando o solo está submetido a uma tensão efetiva inferior à tensão de escoamento (obtida na compressão isotrópica) e para baixos níveis de tensão, o solo exibe uma resistência de pico bem definida, em seguida perde a resistência e tende para o estado crítico. Os pontos de escoamento e de resistência máxima são praticamente coincidentes;
- Quando o solo está submetido a uma tensão efetiva inferior à tensão de escoamento e para níveis mais elevados de tensão, o solo exibe comportamento inicial rígido até atingir o escoamento, em seguida ocorre a diminuição de rigidez e o solo passa a ter um comportamento mais plástico;
- Quando o solo é submetido a uma tensão efetiva superior à tensão de escoamento, as cimentações são quebradas e o solo se comporta de maneira semelhante a solos normalmente adensados.

Sandroni (1974), ao estudar o comportamento de solos residuais, considerou a envoltória de resistência curva até próxima da tensão de escoamento e acima desta admitiu o comportamento semelhante ao de solos sedimentares normalmente adensados. A curvatura da envoltória é devido, principalmente, à presença de cimentações. No entanto, muitos solos residuais

permitem que sejam traçadas envoltórias totalmente retas, representando de maneira satisfatória o comportamento do solo.

Wesley (1990) avaliou a resistência ao cisalhamento de dois solos, um silte arenoso derivado de uma formação silito e granito, e um argilo siltoso marrom amarelado, originado a partir do processo de intemperismo em depósitos de cinzas vulcânicas. Foram realizados ensaios triaxiais não drenados (CIU) com amostras indeformadas e deformadas. No caso do silte arenoso, as amostras deformadas eram preparadas com a umidade próxima da natural e os corpos de prova moldados usando apenas a pressão dos dedos. Já o solo argilo siltoso foi substituído por um material com composição bastante semelhante ao solo natural e então compactado na umidade natural. A curva tensão desviadora x deformação e poropressão x deformação estão mostradas nas Figuras 2.2 e 2.3. O comportamento dos dois solos demonstra que, nestes casos, a composição influencia mais na resistência do que a estrutura.

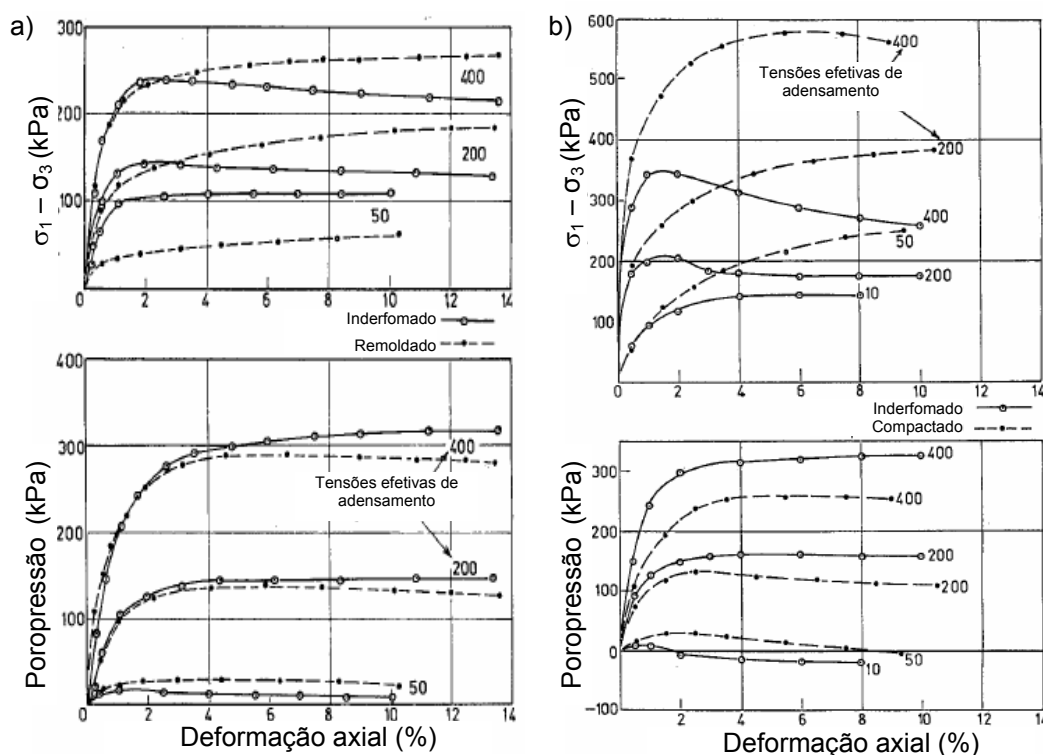


Figura 2.2 – Resultado de ensaios triaxiais (CIU) a) solo residual silto arenoso (indeformado e remoldado) b) solo residual argilo siltoso (indeformado e compactado) (Wesley, 1990)



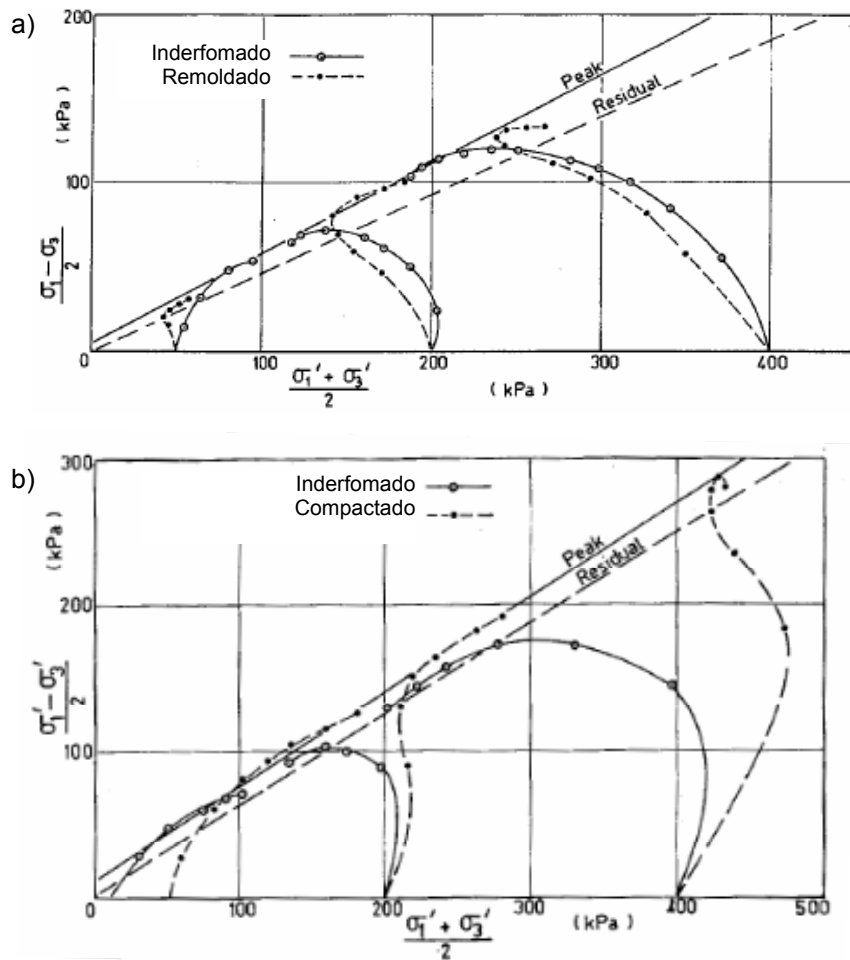


Figura 2.32 - Trajetória de tensões efetivas a) solo silte arenoso b) solo argilo siltoso (Wesley, 1990)

## 2.2. Influência do fluido intersticial na resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dependem de fatores relacionados ao solo, ao estado de tensões e ao fluido dos poros. As alterações provocadas no solo por fatores como cátions trocáveis e características do fluido dos poros dependem da atividade da fração argila (Mitchell, 1976).

Para melhor entendimento do comportamento do solo perante diferentes fluidos intersticiais, algumas definições básicas, principalmente referentes a interações físico-químicas, serão apresentadas no subitem a seguir e, só então, serão relacionados alguns trabalhos que tratam de resistência ao cisalhamento.

### 2.2.1. Considerações gerais

Na descrição e compreensão de um solo com teor considerável de argila, os métodos da mecânica pura não são, em geral, suficientes. Duas argilas com a mesma curva granulométrica, por exemplo, podem ter propriedades coloidais muito diferentes dependendo da sua natureza mineralógica, que conduzem a comportamentos também diferentes do ponto de vista de engenharia. Para prever o comportamento destes solos é importante estudar suas propriedades físico-químicas, uma vez que estas influenciam características como plasticidade, expansão e contração, estrutura, permeabilidade, resistência ao cisalhamento, colapso, compactação, etc.

A fração fina do solo é composta pelo que se denomina de argilominerais. De acordo com Santos (1975), argilominerais são partículas cristalinas extremamente pequenas compostas por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter certo teor de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Dentre as principais propriedades dos argilominerais tem-se a superfície específica, a natureza e a porcentagem de íons trocáveis, as capacidades de troca catiônica e aniônica, a espessura da camada de água adsorvida, a espessura da dupla camada elétrica, as características do fluido intersticial (constante dielétrica, condutividade elétrica, pH, concentração e natureza de íons dissolvidos, temperatura, viscosidade, peso específico), etc.

A água contida nos solos pode apresentar-se de três formas: adsorvida na superfície dos argilominerais, fazendo parte da estrutura molecular das partículas sólidas ou preenchendo os vazios. Grim (1965) demonstrou que a água adsorvida (não líquida ou rígida) tem propriedades diferentes da água líquida. Essa água tem moléculas organizadas em uma espécie de estrutura rígida a partir da superfície dos argilominerais, cujas características dependem da natureza do argilomineral e da natureza dos ânions e cátions adsorvidos na superfície deste. A natureza da água adsorvida e os fatores que influem na formação da camada de água adsorvida à superfície dos argilominerais são pontos fundamentais que determinam certas propriedades dos sistemas argila+água, tais como a plasticidade, a viscosidade, a tixotropia, o poder ligante e a resistência mecânica no estado úmido (Santos, 1975). As camadas de água adsorvidas contribuem para o aumento das ligações entre as partículas, sendo fonte de coesão verdadeira (Vargas, 1981).

Os argilominerais têm capacidade de trocar íons, isto é, têm íons fixados na superfície, entre as camadas e dentro dos canais do retículo cristalino que podem ser trocados através de reações químicas, por outros íons, em solução aquosa, sem que isso venha a trazer modificação na estrutura cristalina. As propriedades plásticas e outras propriedades de uma argila também podem ser modificadas pela permuta de íon adsorvido (Santos, 1975).

Os minerais de carga superficial variável predominam nos solos tropicais, enquanto que nos solos não tropicais predominam os minerais de carga superficial constante. Um mineral tem carga superficial constante quando esta é originada de substituições isomórficas, sendo geralmente negativa, fixa, não manipulável e independente da composição do fluido dos poros. A carga superficial é variável quando sua magnitude se altera de acordo com o pH do fluido do poro (Casanova, 1989).

Lambe e Whitman (1979) adotam o termo floculado quando o efeito resultante das forças entre as partículas de argilominerais for de atração, com tendência de aproximação destas, e o termo disperso quando predominam as forças repulsivas, com tendência de afastamento das partículas. As forças interpartículas mais importantes são a força mecânica (ou força repulsiva de Born), forças de atração de Van Der Waals e a força repulsiva da dupla camada (Anandarajah e Zhao, 2000). É de maior importância, devido à sua magnitude, a força repulsiva da dupla camada.

Um solo com estrutura floculada apresenta maior resistência, menor compressibilidade e maior permeabilidade que o mesmo solo, no mesmo índice de vazios e com estrutura dispersa. A predominância de forças atrativas de Van Der Waals na condição floculada resulta em aproximação das partículas e aumento dos contatos mecânicos, com conseqüente aumento de coesão verdadeira e do ângulo de atrito.

Adicionando-se certos sais alcalinos, como polifosfatos de sódio, observa-se uma dispersão das partículas menores. Estes sais fornecem cátions de sódio à dupla camada da face maior dos argilominerais. No entanto, o ânion polifosfato é adsorvido na face menor (aresta). Esta adsorção faz com que a face menor de carga positiva, quando “coberta” com uma camada de monocamada de polifosfato, de carga negativa, tenha a carga de mesma natureza da face maior. Assim, as interações face maior-aresta e aresta-aresta são destruídas resultando em uma estrutura mais dispersa (Santos, 1975).

### 2.2.2. Resistência ao cisalhamento

A influência do pH do fluido intersticial e do tipo de cátion trocável, na resistência, é percebida quando se trata solos com diferentes tipos de fluidos e cátions. Abaixo, são citados alguns trabalhos que avaliam principalmente a resistência ao cisalhamento de diferentes solos na presença de diferentes fluidos intersticiais.

Taqieddin *et al* (1995) discutiram os aspectos físico-químicos da resistência ao cisalhamento de uma argila ilílica siltosa, altamente compressível. Esta argila foi tratada com três tipos de cátions: sódio, cálcio e potássio, em três diferentes valores de pH (2, 7, 12). Os corpos de prova eram compactados com diferentes umidades (abaixo, acima e na umidade ótima) e submetidos a ensaio de compressão triaxial não drenado (CIU). Os resultados obtidos indicaram que a resistência do solo não contaminado foi maior do que a dos solos tratados. Entre os solos tratados com cátions, o solo tratado com potássio mostrou a maior resistência, seguido do solo tratado com cálcio, para todas as condições na curva de compactação, exceto no ramo úmido, onde o solo tratado com cálcio apresentou a maior resistência. Solos tratados com Na sempre mostraram a resistência mais baixa devido a seu alto poder dispersor, ao contrário do cálcio e potássio que apresentaram tendência flocculante. A maior resistência foi obtida para pH igual a 7, sendo observado também que a resistência na condição ácida foi maior do que na condição básica.

Kumapley e Ishola (1985) estudaram a influência da contaminação química por soda cáustica, no limite de liquidez e na resistência não drenada de três solos caulíníficos. Os resultados obtidos por eles mostraram que o aumento da concentração de soda cáustica causa um decréscimo no limite de liquidez e na resistência não drenada devido à ação dispersante da soda cáustica (Figuras 2.4 e 2.5).

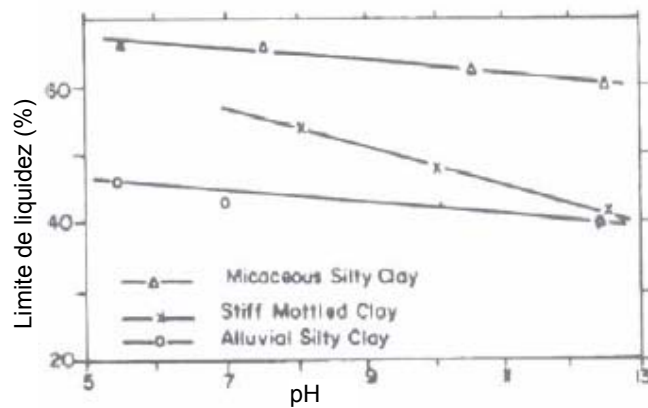


Figura 2.4 – Variação do limite de liquidez com o pH (Kumapley e Ishola, 1985)

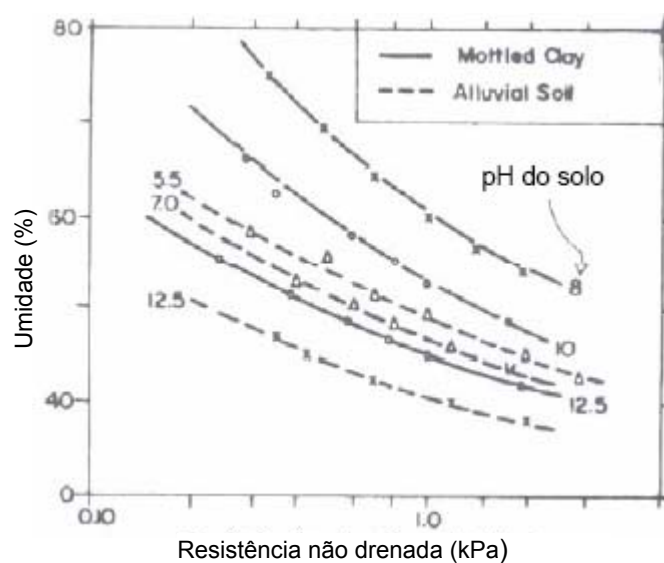


Figura 2.5 – Variação da resistência não drenada com o pH (Kumapley e Ishola, 1985)

Costa Júnior (2001) avaliou a resistência ao cisalhamento de um solo laterítico do Maranhão quando saturado com soluções de hidróxido de sódio (NaOH) com concentrações e pH variados. O comportamento mecânico foi analisado através de ensaios triaxiais drenados (CID). O autor detectou que os parâmetros de resistência ao cisalhamento, assim como as curvas granulométricas, foram pouco afetadas pelos licores cáusticos. Isto ocorre, principalmente, devido ao fato do solo conter uma fração argila muito pequena (8%).

Brancucci *et al* (2003) realizaram ensaios de cisalhamento direto em solos argilosos contendo quantidades variáveis de esmectita. Eles concluíram que o aumento da constante dielétrica ( $\epsilon$ ) implica no aumento da camada dupla, desenvolvimento de estrutura mais dispersa, diminuição do atrito entre partículas e menor resistência ao cisalhamento. Ao utilizar como fluido intersticial água

destilada ( $\varepsilon = 80$ ), por exemplo, o ângulo de atrito obtido foi de  $5^\circ$ . Já para uma solução de 1M NaCl ( $\varepsilon = 70$ ) o ângulo de atrito encontrado foi de  $15^\circ$ .

Anadarajah e Zhao (2000) investigaram a influência do fluido dos poros na resistência ao cisalhamento e no comportamento tensão-deformação de um solo caulínico da Geórgia. Além da água, foram utilizados os seguintes fluidos orgânicos: formamida, etanol, ácido acético, trietilamina e eptano, com constantes dielétricas iguais a 111; 24,3; 6,16; 2,42; 1,91; respectivamente. As amostras eram preparadas com teor de umidade de 135 % (2,5 vezes o limite de liquidez), adensadas edometricamente e guardadas em uma câmara úmida. Em seguida, corpos de prova com 7,1 cm de diâmetro e 7,6 cm de altura eram moldados a partir das amostras adensadas e então submetidos aos ensaios CIU convencionais. Foram realizados ensaios com amostras saturadas com água, não lixiviadas, para servir como referência. Nos demais ensaios os fluidos orgânicos eram percolados pelos corpos de prova após o adensamento. A Figura 2.6 ilustra os resultados obtidos nos ensaios CIU com amostras lixivadas com heptano e ácido acético.

Os autores detectaram que há mudanças significativas no comportamento tensão-deformação e nas trajetórias de tensões efetivas em relação ao solo não lixiviado. Em todos os casos, observou-se que os fluidos orgânicos causaram um “pré-adensamento aparente”, apresentando resistências de pico mais elevadas e gerando excessos de poropressão menores durante o cisalhamento não drenado, em comparação ao solo não lixiviado (ver Tabela 2.3). A tensão desviadora máxima não é atingida nos ensaios realizados com formamida, trietilamina e heptano devido à limitação da deformação específica axial de 10% (ver letra “a” da Figura 2.6).

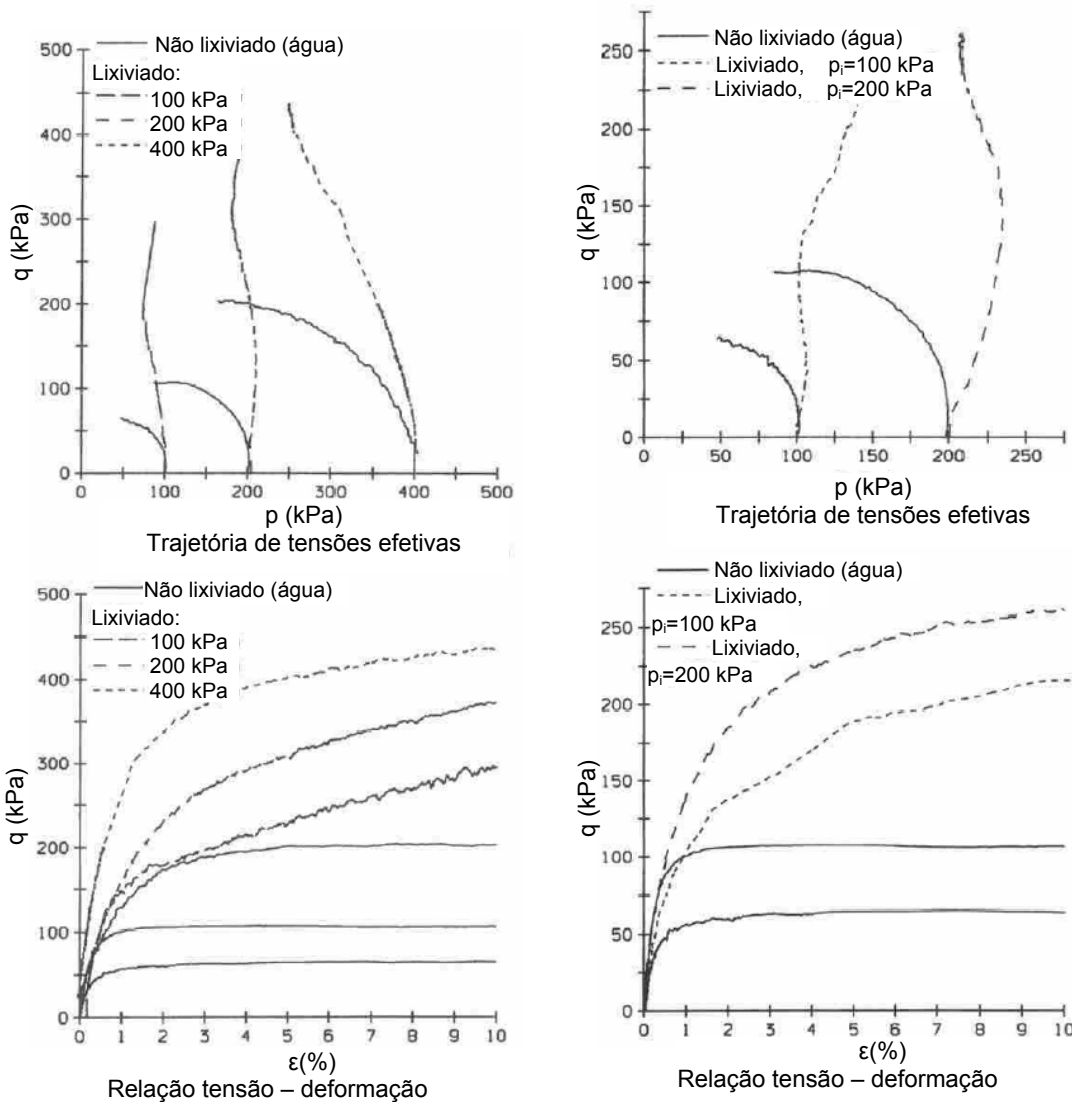


Figura 2.6 – Comportamento não drenado de amostras normalmente adensadas lixiviadas e não lixiviadas a) heptano b) ácido acético

Tabela 2.3 – Resistência ao cisalhamento de pico (não drenada), corpos de prova lixiviados e não lixiviados (Anandarajah e Zhao, 2000)

Fluido intersticial	Constante dielétrica	Tensão desviadora máxima - q (kPa)		
		100kPa	200kPa	400kPa
Formamida	111	126,8	225,4	-
Água	80	65,0	107,6	205,8
Etanol	24,2	98,8	141,8	227,8
Ácido acético	6,1	215,4	262,2	-
Trietilamina	2,4	160,6	256,6	-
Heptano	1,9	296,0	372,6	438,8

Ainda observa-se que valores maiores de resistência ao cisalhamento correspondem a constantes dielétricas menores, sendo os ensaios com ácido acético e formamida exceções. No caso do ácido acético, o comportamento anormal é atribuído à dissolução de argilominerais e sais do solo, tais como

CaCO<sub>3</sub>. Já o comportamento dos ensaios realizados com formamida se deve ao elevado valor da constante dielétrica e ao fato de que os sais do solo não se dissolveram na formamida, resultando num predomínio de forças de atração, apesar de sua constante dielétrica ser maior que a da água.

Os autores justificaram os resultados obtidos em termos de alterações de forças interpartículas da seguinte maneira:

- Aumento dos contatos mecânicos: quando o fluido provoca a diminuição das forças de repulsão, certamente ocorre a aproximação de partículas e então contatos mecânicos que antes não existiam tornam-se possíveis. O aumento destes contatos é que provoca o comportamento aparente de “pré-adensado”.
- Aumento da coesão global: quando o fluido provoca aumento das forças de atração (Van Der Waals), torna-se mais difícil afastar as partículas, aumentando assim a coesão.

Não foram realizadas análises referentes a parâmetros efetivos de resistência e envoltórias de ruptura.

Martins (2005) estudou a influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico e hidráulico de dois solos residuais de origem gnáissica, um laterítico (1 m de profundidade) e outro saprolítico (5 m de profundidade). Para tanto, ela desenvolveu um programa experimental envolvendo ensaios de caracterização, adensamento edométrico, permeabilidade e ensaios triaxiais CIU e CID. O efeito das interações foi investigado provocando-se a desestruturação dos solos e comparando-se os resultados obtidos nesta condição com os resultados correspondentes ao solo intacto. A desestruturação foi induzida através da remoldagem (nas vizinhanças do limite de liquidez) e através da substituição do fluido intersticial por soluções de hexametáfosfato de sódio e carbonato de sódio com concentrações e pH pré-definidos. De maneira geral, os resultados obtidos evidenciaram importantes mudanças na estrutura (principalmente dispersão devido à presença do cátion sódio nos fluidos) e no comportamento, em relação à condição intacta, em especial o de 1 m de profundidade, por ter maior teor de argila.

A autora observou que os limites de consistência diminuíram com o aumento da concentração das soluções (resultado de uma maior concentração de sódio), com exceção do solo de 5 m de profundidade quando ensaiado com soluções mais concentradas, as quais não influenciaram nos seus limites.

No que se refere ao comportamento mecânico, os resultados obtidos por meio dos ensaios triaxiais drenados (CID) mostraram que houve uma redução da



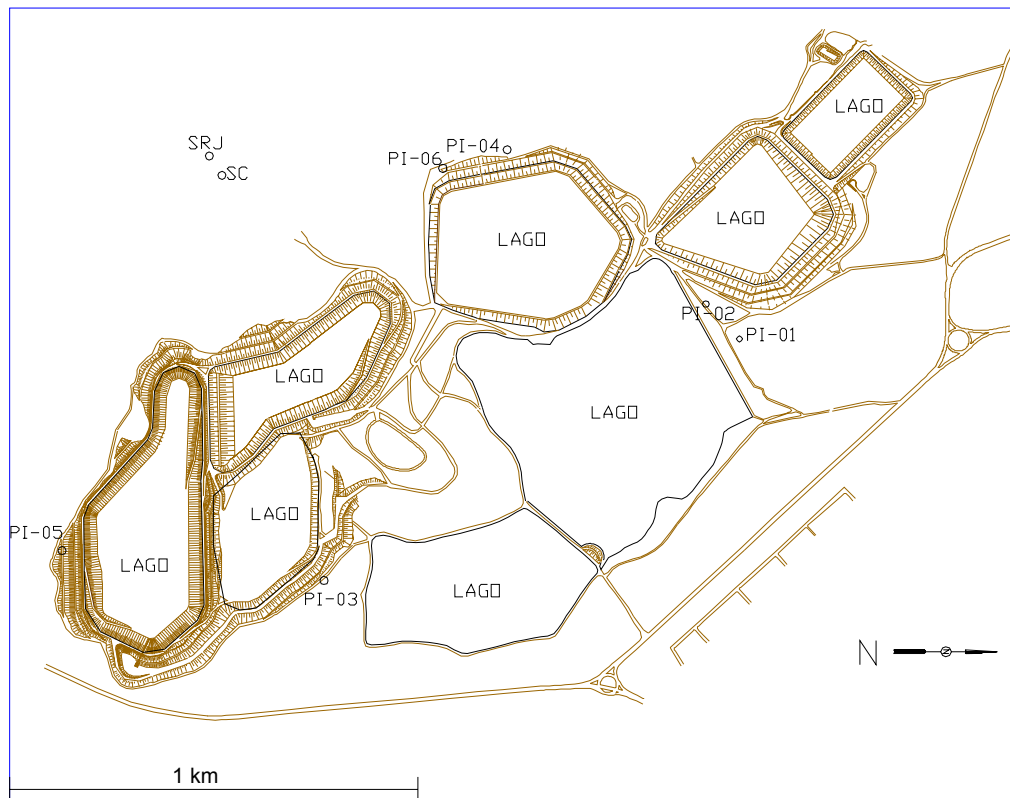
resistência de pico e a ruptura foi alcançada, na maioria dos ensaios, para menores deformações axiais. As envoltórias de pico dos ensaios com solo remoldado, solo com solução 0,001N e solo intacto foram praticamente coincidentes. A envoltória de pico do ensaio com solução 0,1 N posicionou-se mais abaixo que as demais. De forma geral, nos ensaios CIU, o solo intacto apresentou maior resistência e rigidez que o solo remoldado e com soluções. A influência das cimentações no comportamento do solo foi significativa no ensaio com tensão efetiva de adensamento igual a 25 kPa.

Existem outros trabalhos que analisam as interações entre o fluido intersticial e o solo. D'Appolonia (1980), Barreto *et al* (1982), Simons e Reuter (1985), Pavilonski (1985), Ignatius e Souza Pinto (1991), Agnelli e Albiero (1997), Taubald *et al* (2000), Claret *et al* (2002), Savage *et al* (2002), Josefaciuk *et al* (2002), Moncada (2004), são apenas alguns exemplos. A maioria deles foca a permeabilidade e a colapsividade, temas que não são tratados nesta dissertação.

### **2.3. Dados de trabalhos anteriores**

Ao longo dos anos, tem havido um monitoramento constante da área em estudo através de ensaios geotécnicos, de laboratório e de campo. Na Tabela 2.4 estão alguns resultados de ensaios de caracterização física e de resistência realizados anteriormente. Procurou-se mostrar apenas dados de solos com características semelhantes aos estudados.

Observa-se que há uma grande variabilidade nos parâmetros referentes tanto às características físicas quanto às de resistência para um mesmo tipo de solo. Uma das amostras analisadas, a PI-02, estava contaminada por licor e, provavelmente por isto, apresentou parâmetros de resistência bastante inferiores aos obtidos nos demais ensaios realizados com solos saprolíticos. Na Figura 2.7 encontra-se a localização dos pontos de coleta das amostras utilizadas nos ensaios citados na Tabela 2.4.



SRJ – ponto de coleta do solo residual jovem estudado  
SC – ponto de coleta do solo coluvionar

Figura 2.7– Localização dos pontos de coleta de amostras de trabalhos anteriores (citadas na Tabela 2.4)

Tabela 2.4– Ensaios realizados anteriormente a partir de solos da área de estudo

Fonte	Solo	Pontos de coleta	Prof. (m)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	G	w (%)	k (cm/s)	e	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	Ensaios de resistência realizados
LPS (1995)	Colúvio	PI-01	5	15,5	55	36,6	2,66	55,96	$1,4 \times 10^{-4}$	1,626	8,53	28,42	CIU e Cis.direto
	S.R.J. (silte argiloso)	PI-02	4,5	16,23	47,1	28,8	2,75	51,11	-	1,152	7,25	23,72	CIU e Cis. direto (solo contaminado com licor)
Ground (1996)	Colúvio	PI-03	1,5	15,10	-	-	-	-	-	-	24,43	30,1	Cisalhamento direto
	S.R.J. (silte argiloso)	PI-03	3	11,8	-	-	-	-	-	-	18,04	30,7	Cisalhamento Direto
Geotécnica (2001)	Colúvio ou S.R.M (argila siltosa)	PI-04	2	15,92	78	39	2,75	44,8	$7,5 \times 10^{-7}$	1,454	0	28	Cisalhamento direto
	Colúvio (silte argiloso)	PI-05	5	16,43	56	28	2,68	34,5	-	1,152	41,19	25	Cisalhamento Direto
	S.R.J. (silte argiloso)	PI5-101	5	16,51	98	43	2,7	44,1	-	1,312	28,73	29	Cisalhamento direto
	S.R.J. (silte argiloso)	PI-04	5	16,61	64	34	2,88	48,7	$8,5 \times 10^{-7}$	1,529	33,54	24	Cisalhamento direto