



**Taíse Monique de Oliveira Carvalho**

**Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento  
de um solo residual de sienito e um coluvionar  
indeformados**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos  
Co-orientador: Franklin dos Santos Antunes

Rio de Janeiro  
Julho de 2006



**Táise Monique de Oliveira Carvalho**

**Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento  
de um solo residual de sienito e um coluvionar  
indeformados**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Tácio Mauro Pereira de Campos**

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Franklin do Santos Antunes**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**José Tavares Araruna Júnior**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Geraldo Paes Júnior**

ALCOA Alumínio S/A

**Leandro de Moura Costa Filho**

LPS Consultoria e Engenharia LTDA

**Sérgio Tibana**

UENF

**José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de julho de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

## Taíse Monique de Oliveira Carvalho

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas – UFAL em 2003. Foi bolsista do Programa Especial de Treinamento – PET no período de 2000 a 2004. Realizou projetos de pesquisa nas áreas de Estruturas, Recursos Hídricos e Engenharia Sanitária. Ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia em 2004. Principais áreas de interesse e linhas de pesquisa: Mecânica dos Solos, Geotecnia Experimental e Geotecnia Ambiental.

### Ficha Catalográfica

Carvalho, Taíse Monique de Oliveira

Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento de um solo residual de sienito e um coluvionar indeformados / Taíse Monique de Oliveira Carvalho; orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos, Franklin dos Santos Antunes. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

167 f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Resistência ao cisalhamento. 3. Licor cáustico. 4. Solo residual. 5. Solo coluvionar. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Antunes, Franklin dos Santos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico esta dissertação aos meus pais, Cleuriel e Sissi,  
à Júlia e ao Rodrigo.

## Agradecimentos

Aos Professores Tácio Mauro Pereira de Campos e Franklin dos Santos Antunes, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos, atenção, estímulo e paciência.

Ao Engenheiro William, por ajudar na execução dos ensaios de resistência, e aos demais funcionários do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio: “Seu” José, Amaury e Josué, por estarem disponíveis sempre que precisei.

Ao Ronaldo Silva do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, por estar sempre disponível a fazer os ensaios de difração por raios-X.

A todos os amigos que fiz durante o mestrado, pelos momentos de descontração. Em especial a: Viviana, Tânia, Saré e Vinicius.

Às minhas amigas Mônica, Bernadete e Carol que estiveram do meu lado não só nos momentos bons, mas durante toda a execução deste trabalho, pelo incentivo amizade e ajuda.

Às “irmãs tortas”, Lu e Lica, que Deus colocou em meu caminho e que meu coração adotou, pela convivência, amizade, companheirismo e por me agüentarem durante o tempo em que moramos juntas.

Ao Rodrigo, pelo carinho, cumplicidade e por acreditar na minha capacidade, muitas vezes, mais do que eu.

À todos os meus familiares, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A ALCOA Alumínio por possibilitar a execução deste trabalho.

Aos componentes da banca, pelas sugestões e críticas construtivas feitas a este trabalho.

## Resumo

Carvalho, Taíse Monique de Oliveira; Campos, Tácio Mauro Pereira de; Antunes, Franklin dos Santos. **Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento de um solo residual de sienito em um coluvionar indeformados.** Rio de Janeiro, 2006. 167p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho se estuda a influência de um fluido alcalino na resistência ao cisalhamento de dois solos provenientes de Poços de Caldas-MG, sendo um deles um solo residual jovem de sienito e o outro um colúvio. Para tanto, elaborou-se um programa experimental que consistiu na execução de ensaios triaxiais CIU (solo residual jovem) e de cisalhamento direto (solo coluvionar), tanto com os solos no estado natural como contaminados. A contaminação dos solos se deu pela substituição total ou parcial do fluido intersticial por um licor cáustico, resíduo proveniente do processo do beneficiamento da bauxita. Ensaio de caracterização física, química e mineralógica, com os solos em ambos os estados, foram realizados com o intuito de auxiliar na análise dos resultados dos ensaios de resistência. Os resultados obtidos mostraram que os solos são suscetíveis à ação do licor, notando-se um decréscimo dos parâmetros de resistência.

## Palavras-chave

Resistência ao cisalhamento, licor cáustico, solo residual, solo coluvionar

## Abstract

Carvalho, Taíse Monique de Oliveira; de Campos, Tácio Mauro Pereira (advisor); Antunes, Franklin dos Santos (advisor). **Effects of a caustic liqueur on the shear strength of a sienitic residual soil and a colluvium, undeformed.** Rio de Janeiro, 2006. 167p. MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a study concerning the influence of an alkaline fluid in the shear strength of two soils originating from Poços de Caldas-MG, which one of them is a sienitic residual and the other a colluvium. For that, it was elaborated an experimental program consisting of the execution of CIU triaxial (residual soil) and direct shear (colluvium) tests. The tests were performed with the soils in the natural and contaminated states. The soils were contaminated through total or partial substitution of the pore fluids for a caustic liqueur, a residue originating from alumina production process. In order to provide better support for the analysis of strength tests results, it were performed physical, chemistry and mineralogical characterization tests, with the soils in both states. The experimental program results have shown that the liqueur causes loss of strength in both soils.

## Keywords

Shear strength, caustic liqueur, residual soil, colluvium

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>22</b>
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>24</b>
2.1. Solos tropicais	24
2.1.1. Considerações gerais	24
2.1.2. Resistência ao cisalhamento	28
2.2. Influência do fluido intersticial na resistência ao cisalhamento	32
2.2.1. Considerações gerais	33
2.2.2. Resistência ao cisalhamento	35
2.3. Dados de trabalhos anteriores	40
<b>3 Características do local e amostragem</b>	<b>43</b>
3.1. Localização da Área de Estudo	43
3.2. Aspectos Fisiográficos	44
3.2.1. Clima e Vegetação	45
3.2.2. Hidrografia	45
3.2.3. Solos	45
3.2.4. Relevo	46
3.3. Geologia	46
3.4. Amostragem	48
<b>4 Equipamentos e Metodologias de Ensaio</b>	<b>50</b>
4.1. Caracterização física	52
4.1.1. Granulometria	52
4.1.2. Limites de Atterberg	52
4.1.3. Densidade dos grãos ( $G_s$ )	53
4.2. Caracterização química	53
4.3. Caracterização mineralógica	53
4.3.1. Difração por raios-X (DRX)	54
4.3.2. Análise térmica diferencial	54
4.4. Ensaio triaxiais	54
4.4.1. Equipamentos utilizados	54

4.4.1.1. Prensa triaxial	54
4.4.1.2. Sistema de aplicação de pressão	55
4.4.1.3. Transdutores de força, de deslocamento e de pressão	55
4.4.1.4. Medidores de volume	56
4.4.1.5. Sistema de aquisição de dados	57
4.4.1.6. Acessórios: membrana de látex, papel filtro e pedras porosas	57
4.4.2. Procedimentos adotados nos ensaios	58
4.4.2.1. Confecção dos corpos de prova	58
4.4.2.2. Saturação das linhas	58
4.4.2.3. Montagem do ensaio	59
4.4.2.4. Saturação dos corpos de prova	59
4.4.2.5. Substituição do fluido intersticial água por licor cáustico	60
4.4.2.6. Adensamento	61
4.4.2.7. Fase de cisalhamento	62
4.5. Cisalhamento direto	63
4.5.1. Equipamentos	63
4.5.1.1. Prensas de cisalhamento direto	63
4.5.1.2. Transdutores de deslocamento	63
4.5.1.3. Sistema de aquisição de dados	64
4.5.1.4. Acessórios: papel filtro e pedras porosas	64
4.5.2. Procedimentos adotados nos ensaios	64
4.5.2.1. Confecção dos corpos de prova	64
4.5.2.2. Saturação dos corpos de prova	65
4.5.2.3. Adensamento	69
4.5.2.4. Cisalhamento	70
4.6. Caracterização do licor	70
<b>5 Caracterização física, química e mineralógica</b>	<b>71</b>
5.1. Introdução	71
5.2. Apresentação e análise dos resultados	73
5.2.1. Caracterização física	73
5.2.1.1. Índices físicos	73
5.2.1.2. Granulometria	73
5.2.1.3. Limites de Atterberg	77
5.2.1.4. Índice de atividade e classificação dos solos	78
5.2.2. Caracterização mineralógica	79

5.2.2.1. Difração por raios-X (DRX)	79
5.2.2.2. Análise térmica diferencial (ATD)	87
5.2.3. Lupa binocular	88
5.2.4. Caracterização química	91
5.2.4.1. pH e condutividade elétrica	91
5.2.4.2. Capacidade de troca catiônica (CTC)	93
5.2.4.3. Análise química total	94
5.2.4.4. Ataque sulfúrico	95
5.2.4.5. Amorfos	97
5.3. Comentários finais	98
<b>6 Comportamento mecânico</b>	<b>100</b>
6.1. Adensamento edométrico – solo residual jovem natural	100
6.1.1. Introdução	100
6.1.2. Apresentação e análise dos resultados	100
6.2. Ensaio triaxiais	103
6.2.1. Introdução	103
6.2.2. Apresentação dos resultados	104
6.2.2.1. Índices físicos dos corpos de prova	104
6.2.2.2. Curvas tensão desviadora x deformação axial	105
6.2.2.3. Trajetórias de tensões efetivas e envoltórias de resistência	108
6.2.2.4. Dados na ruptura	110
6.2.2.5. Módulos de deformação	111
6.2.3. Análise e discussão dos resultados	111
6.2.3.1. Ensaio com solo natural – CIU	111
6.2.3.2. Ensaio com solo contaminado – CIU	115
6.2.3.3. Comparação dos resultados	118
6.3. Ensaio de cisalhamento direto – solo coluvionar	135
6.3.1. Introdução	135
6.3.2. Apresentação dos resultados	136
6.3.2.1. Índices físicos dos corpos de prova	136
6.3.2.2. Fase de cisalhamento	136
6.3.3. Análise e discussão dos resultados	140
6.3.3.1. Compressibilidade	140
6.3.3.2. Comparação dos resultados dos ensaios realizados com solo no estado natural e contaminado	141

6.4. Comentários finais	143
<b>7 Conclusões e sugestões</b>	<b>145</b>
7.1. Conclusões	145
7.1.1. Caracterização física, química e mineralógica	145
7.1.2. Compressibilidade	145
7.1.3. Resistência	146
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	147
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>148</b>
<b>Apêndice I - Características do licor cáustico</b>	<b>158</b>
<b>Apêndice II - Coeficientes de adensamento e permeabilidade do solo residual</b>	<b>159</b>
<b>Anexo I - Cálculo do teor dos minerais: ilita, caulinita e gibbsita</b>	<b>162</b>
<b>Anexo II - Correção da tensão desviadora após a ruptura (triaxiais)</b>	<b>164</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Proposições de perfis de intemperismo típicos do Brasil (Pastore, 1992)	28
Figura 2.2 – Resultado de ensaios triaxiais (CIU) a) solo residual silto arenoso (indeformado e remoldado) b) solo residual argilo siltooso (indeformado e compactado) (Wesley, 1990)	31
Figura 2.32 - Trajetória de tensões efetivas a) solo silte arenoso b) solo argilo siltooso (Wesley, 1990)	32
Figura 2.4 – Variação do limite de liquidez com o pH (Kumapley e Ishola, 1985)	36
Figura 2.5 – Variação da resistência não drenada com o pH (Kumapley e Ishola, 1985)	36
Figura 2.6 – Comportamento não drenado de amostras normalmente adensadas lixiviadas e não lixiviadas a) heptano b) ácido acético	38
Figura 3.1 - Localização da região onde se encontra a área de estudo (adaptada de Enviro-Tec, 2001)	3
Figura 3.2: Localização da área de coleta das amostras dentro do Planalto de Poços de Caldas (modificado de Franklin, 2005)	4
Figura 3.3 – Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas (adaptado de Enviro-Tec, 2001 por de Campos <i>et al</i> , 2004)	7
Figura 3.5 – Concreção bauxítica presente na amostra indeformada do solo residual jovem	9
Figura 3.6 – Foto da amostra do solo coluvionar indicando os elementos que o compõe	9
Figura 3.1 - Localização da região onde se encontra a área de estudo (adaptada de Enviro-Tec, 2001)	43
Figura 3.2: Localização da área de coleta das amostras dentro do Planalto de Poços de Caldas (modificado de Franklin, 2005)	44
Figura 3.3 – Mapa geológico do Planalto de Poços de Caldas (adaptado de Enviro-Tec, 2001 por de Campos <i>et al</i> , 2004)	47
Figura 3.5 – Concreção bauxítica presente na amostra indeformada do solo residual jovem	49

Figura 3.6 – Foto da amostra do solo coluvionar indicando os elementos que o compõe	49
Figura 4.1 – Equipamentos utilizados nos ensaios triaxiais (a) foto ilustrativa (b) desenho esquemático	56
Figura 4.2 – Medidor de variação de volume utilizado nos ensaios triaxiais	57
Figura 4.3 – Frasco de coleta de efluente (FCE) utilizado na substituição do fluido intersticial do corpo de prova por licor	61
Figura 4.4 – Exemplo de gráfico utilizado no cálculo de $t_{100}$ (ensaio triaxial CIU com $\sigma'_c$ igual a 100kPa)	62
Figura 4.5 – Corpo de prova descartado devido à “quebra” deste na interface concreção-matriz	65
Figura 4.6 – Corpo de prova do solo coluvionar após ser seco à vácuo	65
Figura 4.7 – Procedimento de saturação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto (a) posicionamento da pedra porosa (b) adição do papel filtro saturado (c) posicionamento do corpo de prova (d) papel filtro seco colocado sobre o corpo de prova (e) medidor de pH para auxiliar na verificação da saturação (f) corpo de prova sendo submetido a sucção	67
Figura 4.8 – Curvas representando o comportamento de corpos de prova saturados com água e licor, e submersos em água e licor	69
Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos ensaios realizados com solo residual natural e contaminado com diferentes defloculantes	74
Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos ensaios realizados com o solo coluvionar natural e contaminado com diferentes defloculantes	75
Figura 5.3 – Fases de sedimentação do solo residual jovem com os defloculantes a) hexametáfosfato de sódio, b) licor cáustico e c) água	76
Figura 5.5 – Difrátogramas do solo residual jovem passante na peneira # 200 a) natural b) contaminado com licor cáustico	81
Figura 5.6 – Difrátogramas do solo residual jovem passante na peneira # 400 a) natural b) contaminado com licor cáustico	82
Figura 5.7 – Difrátogramas do solo coluvionar passante na peneira # 200 a) natural b) contaminado com licor cáustico	83
Figura 5.8 - Difrátogramas do solo coluvionar passante na peneira # 400 a) natural b) contaminado com licor cáustico	84
Figura 5.9 – Difrátograma do material passante na peneira # 40, solo coluvionar	

natural	85
Figura 5.10 – Difratoograma do material retido na peneira # 40, solo residual jovem natural	85
Figura 5.11 – Difratoograma do material passante na peneira # 40, solo residual jovem natural	85
Figura 5.12 – Difratoograma do material presente nas concreções brancas, solo residual jovem natural	86
Figura 5.13 – Termogramas do solo residual natural e contaminado	87
Figura 5.14 – Termogramas do solo coluvionar natural e contaminado	88
Figura 5.15 – Foto do solo residual indeformado a) ampliada 10 vezes b) ampliada 60 vezes	90
Figura 5.16 – Foto do solo residual adensado a) ampliada 10 vezes b) ampliada 60 vezes	91
Figura 6.1 – Curvas recalque x raiz do tempo, solo residual natural	101
Figura 6.2 – Formas de representação dos resultados de adensamento edométrico a) e x $\log \sigma'_v$ , b) $\log e$ e x $\log \sigma'_v$ e c) e x $\sigma'_v$	102
Figura 6.3 – Corpos de prova após a ruptura (formação de plano)	106
Figura 6.4 – Curvas do solo natural (ensaios CIU) a) tensão desviadora x deformação axial; b) excesso de poropressão x deformação axial	106
Figura 6.5 - Curvas do solo contaminado (ensaios CIU) a) tensão desviadora x deformação axial; b) excesso de poropressão x deformação axial	107
Figura 6.6 – Curvas do solo residual natural e contaminado (ensaios CID) a) tensão desviadora x deformação axial; b) deformação volumétrica x deformação axial	108
Figura 6.7 – Trajetórias de tensões efetivas (CIU) e envoltória de resistência (estado crítico) – água	109
Figura 6.8 – Trajetórias de tensões efetivas (CIU) e envoltória de resistência (estado crítico) – licor cáustico	110
Figura 6.9 – Relação entre: a) tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento (Ensaio com água - CIU)	112
Figura 6.10 – Relação entre: a) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora na ruptura; b) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % (ensaio com água - CIU)	114

Figura 6.11 - Relação entre: a) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora na ruptura; b) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % (ensaios com licor - CIU)	117
Figura 6.12 – Relação entre: a) tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento (Ensaaios com licor - CIU)	117
Figura 6.13 – Comparação das curvas índice de vazios normalizado x tensão vertical efetiva	119
Figura 6.14 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 25$ kPa (CIU)	120
Figura 6.15 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 50$ kPa (CIU)	121
Figura 6.16 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 100$ kPa (CIU)	122
Figura 6.17 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 200$ kPa (CIU)	124
Figura 6.18 – Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 25$ kPa (CIU)	125
Figura 6.19 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 50$ kPa (CIU)	126
Figura 6.20 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 100$ kPa (CIU)	127
Figura 6.21 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaaios realizados com água e licor para $\sigma'_c = 200$ kPa (CIU)	128
Figura 6.22 – Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor: a) índice de vazios inicial x tensão desviadora na ruptura b) índice de vazios inicial x tensão desviadora para uma deformação axial de 8 %. Ensaaios CIU	129
Figura 6.23 - Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor: a) índice de vazios após o adensamento x tensão desviadora na ruptura b) índice de vazios após o adensamento x tensão desviadora para uma deformação axial de 8 %. Ensaaios CIU	130
Figura 6.24 – Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor:	

tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento.	
Ensaio CIU	131
Figura 6.25 – Variações dos módulos de deformação conforme a tensão confinante e o fluido intersticial: a) módulo tangencial inicial e b) módulo secante correspondente a 50 % da tensão desviadora	132
Figura 6.26 – Relação entre a) módulo tangencial inicial e índice de vazios inicial b) módulo secante correspondente a 50 % da tensão desviadora e índice de vazios inicial	133
Figura 6.27 – Comparação das envoltórias de resistência do solo natural com o solo contaminado (estado crítico)	134
Figura 6.28 – Envoltórias sugeridas (resistência de pico)	135
Figura 6.29 – Ensaio de cisalhamento direto realizados com água a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal b) curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal	137
Figura 6.30 - Ensaio de cisalhamento direto realizados com licor a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal b) curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal	138
Figura 6.31 – Definição da tensão cisalhante na ruptura (de Campos e Delgado, 1995)	139
Figura 6.32 - Envoltórias de resistência do solo coluvionar natural e do contaminado	140
Figura 6.33 – Relação entre a variação do índice de vazios e a tensão normal de adensamento	140
Figura 6.34 Comparação entre as curvas a) tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) deslocamento vertical x deslocamento horizontal. Ensaio de cisalhamento direto realizados com água e licor, solo coluvionar	142
Figura 6.35 – Relação entre a umidade final e a tensão cisalhante na ruptura	143

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Análise química de dois fonólitos e dos seus produtos de decomposição de Poços de Caldas, Estação Bauxita (Leinz e Amaral, 1966)	26
Tabela 2.2 - Fatores que distinguem solos residuais e transportados (Brenner <i>et al</i> 1997)	27
Tabela 2.3 – Resistência ao cisalhamento de pico (não drenada), corpos de prova lixiviados e não lixiviados (Anandarajah e Zhao, 2000)	38
Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios realizados	51
Tabela 5.1 – Ensaio de caracterização física-química-mineralógica realizados	71
Tabela 5.2 – Índices físicos dos solos residual e coluvionar	72
Tabela 5.3 – Tipos de sedimentações realizadas com os solos estudados	73
Tabela 5.4 – Resumo da granulometria do solo residual jovem natural e contaminado com a utilização de diferentes defloculantes na sedimentação	74
Tabela 5.5 – Resumo da granulometria do solo coluvionar natural e contaminado com a utilização de diferentes defloculantes na sedimentação	74
Tabela 5.6 – Materiais utilizados nos ensaios de Limites de Atterberg	76
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de limites de Atterberg dos solos residual e coluvionar	76
Tabela 5.8 – Valores de pH e condutividade elétrica para os solos naturais e contaminados	91
Tabela 5.9 – Resultados da análise do complexo sortivo	92
Tabela 5.10 – Composição química dos solos estudados e de uma rocha típica da região de Poços de Caldas	94
Tabela 5.11 – Resultados da análise química por ataque sulfúrico	95
Tabela 5.13 – Resultados da determinação de amorfos	97
Tabela 6.1 – Características iniciais do corpo de prova do ensaio de adensamento edométrico (solo residual natural)	100
Tabela 6.2 – Dados obtidos a partir dos estágios de adensamento edométrico (solo residual natural)	101
Tabela 6.3 – Parâmetros do ensaio de adensamento edométrico	103
Tabela 6.4 – Campanha de ensaios triaxiais com os corpos de prova saturados	

com água e com licor cáustico	104
Tabela 6.5 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios CIU	105
Tabela 6.6 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios CID	105
Tabela 6.7 – Dados na ruptura e tensão desviadora para uma deformação axial de 8%. Ensaio CIU realizados com água e licor	110
Tabela 6.8 –Dados na ruptura e tensão desviadora para uma deformação axial de 10 %. Ensaio CID realizados com água e licor	111
Tabela 6.9 – Módulos de deformação	111
Tabela 6.10 – Campanha de ensaios de cisalhamento direto com os corpos de prova no estado natural e contaminado	136
Tabela 6.11 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto	136
Tabela 6.12 – Deslocamento horizontal, tensão cisalhante e tensão normal na ruptura	139

## Lista de símbolos e abreviações

Al = alumínio

$Al^{+3}$  = cátion de Alumínio

$A_r$  = coeficiente de poropressão na ruptura

$a_v$  = coeficiente de compressibilidade

ATD = análise termodiferencial

B = parâmetro de Skempton

$c'$  = intercepto de coesão efetivo

Ca = cálcio

$Ca^{+2}$  = cátion de cálcio

$C_c$  = índice de compressão

C.E. = condutividade elétrica

CID = ensaio triaxial adensado drenado

CIU = ensaio triaxial adensado não drenado

Cr = cromo

$C_r$  = índice de recompressão

$C_s$  = índice de expansão

CTC = capacidade de troca catiônica

$C_v$  = coeficiente de adensamento

$e$  = índice de vazios

$e_{\text{adensto}}$  = índice de vazios após o adensamento

$e_o$  = índice de vazios inicial

$E_{s50\%}$  = módulo de deformação secante para 50 % da tensão desviadora máxima

$E_{ti}$  = módulo de deformação tangencial inicial

Fe = ferro

$G_s$  = densidade relativa dos grãos

$I_a$  = índice de atividade

IP = índice de plasticidade

$k$  = permeabilidade

L = altura do corpo de prova

LL = limite de liquidez

LP = limite de plasticidade

Mg = magnésio

$Mg^{2+}$  = cátion de magnésio

Mn = manganês

$m_v$  = coeficiente de variação volumétrica

$p' = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2$

$p'_r$  =  $p'$  na ruptura

$q = (\sigma'_v - \sigma'_h)/2$

$q_r$  =  $q$  na ruptura

Rb = rubídio

S = grau de saturação

Si = silício

$S_o$  = grau de saturação inicial

$t_{100}$  = tempo correspondente a 100 % de compressão primária

$t_r$  = tempo mínimo de ruptura

$V_{máx}$  = velocidade máxima de cisalhamento

$w_f$  = umidade final

$w_{nat}$  = umidade natural

$w_o$  = umidade inicial

# = malha da peneira

$\delta_h$  = deslocamento horizontal

$\delta_{hr}$  = deslocamento horizontal na ruptura

$\delta_v$  = deslocamento vertical

$\delta_{vr}$  = deslocamento vertical na ruptura

$\Delta u$  = excesso de poropressão

$\Delta \sigma_c$  = acréscimo de tensão confinante

$\epsilon_a$  = deformação axial

$\epsilon_{er}$  = deformação axial estimada na ruptura

$\epsilon_v$  = deformação volumétrica

$\phi'$  = ângulo de atrito interno efetivo

$\gamma_d$  = peso específico seco

$\gamma_t$  = peso específico natural  $\sigma'_c$  = tensão efetiva de adensamento

$\sigma'_{es}$  = tensão de escoamento

$\sigma_n$  = tensão normal

$\sigma_{nr}$  = tensão normal na ruptura

$\tau$  = tensão cisalhante

$\tau_d$  = tensão desviadora

$\tau_{dr}$  = tensão desviadora na ruptura

$\tau_{d8\%}$  = tensão desviadora para deformação axial de 8 %

$\tau_{d10\%}$  = tensão desviadora para deformação axial de 10 %

$\tau_r$  = tensão cisalhante na ruptura