



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E AMBIENTAL DE SOLO
CONTAMINADO POR SODA CÁUSTICA EM UNIDADE INDUSTRIAL
DO NORTE DE MINAS GERAIS**

GUILHERME TONIOLO

ORIENTADOR-Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Volume I

Porto Alegre-2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E AMBIENTAL DE SOLO
CONTAMINADO POR SODA CÁUSTICA EM UNIDADE INDUSTRIAL
DO NORTE DE MINAS GERAIS**

GUILHERME TONIOLO

ORIENTADOR- Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

COORIENTADOR- Prof. Clovis Gonzatti

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Andrea Nummer

Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do
Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre- 2016

Resumo

A presente dissertação avalia o impacto ambiental no meio físico causado por indústria no norte de Minas Gerais e a influência de contaminantes, particularmente a soda cáustica, no comportamento mecânico dos solos residuais de natureza areno-argilosa. No local, há registro de erosão hídrica subterrânea que gerou a ocorrência de patologias em algumas estruturas construtivas da unidade industrial. Foram executadas análises mineralógicas e granulométricas, Ensaio de Compactação (Proctor), Índice de Suporte Califórnia, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Ensaio de Compressão Simples, bem como a determinação dos índices físicos, em amostras de solo com e sem contaminação com soda cáustica. Também foram realizadas análises químicas em amostras de solo e água subterrânea. Os resultados registraram contaminação do solo somente com soda cáustica, em níveis variados e em área circunscrita aos limites da planta industrial. Os ensaios geotécnicos, por outro lado, apontaram a redução da resistência à compressão simples, dos limites de liquidez e de plasticidade, do Índice de Suporte Califórnia e do grau de saturação na amostra contaminada com soda cáustica.

PALAVRAS-CHAVE: CONTAMINAÇÃO DE SOLO, SODA CÁUSTICA, RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO, EROSÃO HÍDRICA.

ABSTRACT

This study analyzes the environmental impact on the soil and groundwater caused by industry in the north of Minas Gerais and the influence of contamination by caustic soda in the mechanical behavior of sandy-loam residual soils. On the study site there is underground hydric erosion that generated diseases in some constructive structures of the industrial unit. Mineralogical and textural analyzes, compacting tests (Proctor), California Support Index, Liquidity Limit, Plasticity limit and Simple compression test were performed in soil samples. It was also made the determination of the physical indices in samples with and without contamination with caustic soda. Chemical analysis on soil and groundwater samples were also carried out. The results reported soil contamination only with caustic soda, at varying degrees and in an area restricted to the limits of the industrial plant. On the other hand,

geotechnical testing showed a reduction of resistance to simple compression, the limits of liquidity and plasticity, California Support Index and the degree of saturation in the contaminated sample with caustic soda.

KEY WORDS : SOIL CONTAMINATION , CAUSTIC SODA , RESISTANCE TO COMPRESSION , WATER EROSION .

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Toniolo, Guilherme

Caracterização geotécnica e ambiental de solo contaminado por soda cáustica em unidade industrial do norte de Minas Gerais . / Guilherme Toniolo. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. [69 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Antonio Pedro Viero

Coorientador(es):Clovis Gonzatti

1. Contaminação de solo 2. Soda cáustica 3. Resistência a compressão 4. Erosão hídrica I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. Tengaten Binotto

CRB 10/1743

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

Dedico esta tese aos meus pais, que me deram todo suporte para estar aqui hoje;

A minha esposa que sempre me apoiou;

A minha adorável filha que amo mais que tudo nesse mundo.

AGRADECIMENTOS

À Geoprospec Geologia e Projetos Ambientais Ltda., representado pelo Geólogo Eduardo Centeno Broll Carvalho por ter possibilitado e auxiliado na elaboração deste trabalho.

Ao Professor Doutor Antonio Pedro Viero, por todos os momentos que dedicamos ao crescimento intelectual, pela amizade, disposição, companhia, dedicação, conhecimentos diversos compartilhados.

As minhas irmãs, Arquitetas Priscila e Tatiana Toniolo que atenderam minhas demandas para que eu tivesse tempo para realizar este trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	LOCALIZAÇÃO	2
1.2	PROBLEMAS GEOTÉCNICOS E HISTÓRICO DE USO DA ÁREA.....	4
1.3	OBJETIVOS.....	6
1.4	METODOLOGIA.....	7
1.4.1	<i>Sondagens SPT.....</i>	<i>7</i>
1.4.2	<i>Ensaios de Infiltração em Solo.....</i>	<i>9</i>
1.4.3	<i>Sondagens a Trado</i>	<i>11</i>
1.4.4	<i>Amostragem.....</i>	<i>12</i>
1.4.5	<i>Análises Laboratoriais.....</i>	<i>17</i>
1.4.6	<i>Análise de Carga das Estruturas Existentes</i>	<i>23</i>
2	ESTADO DA ARTE.....	23
2.1.1	<i>Caracterização Geológica e Geomorfológica da Área.....</i>	<i>23</i>
2.2	ESTUDOS DE RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO E DAS CARATERÍSTICAS FÍSICAS	26
3	REFERÊNCIAS.....	28
4	ARTIGO SUBMETIDO AO PERIODICO.....	1
5	ANEXO I - COMPROVANTE DO ARTIGO SUBMETIDO	31

1 *INTRODUÇÃO*

1.1 **Localização**

A área de estudos localiza-se no estado de Minas Gerais, às margens do Rio São Francisco (Figura 1 e Figura 2).

O acesso ao local, partindo-se da capital Belo Horizonte (MG), é realizado utilizando-se a MG-231, até o entroncamento com a MG-420, quando se toma a direita em direção a Curvelo através da BR-135. Passando por Curvelo, dirige-se até Corinto quando, a partir desta, começa-se a trafegar pela BR-496 até o entroncamento com a MG-161. A partir este entroncamento, segue-se no sentido NE desta pela MG-161 até a cidade de Pirapora.

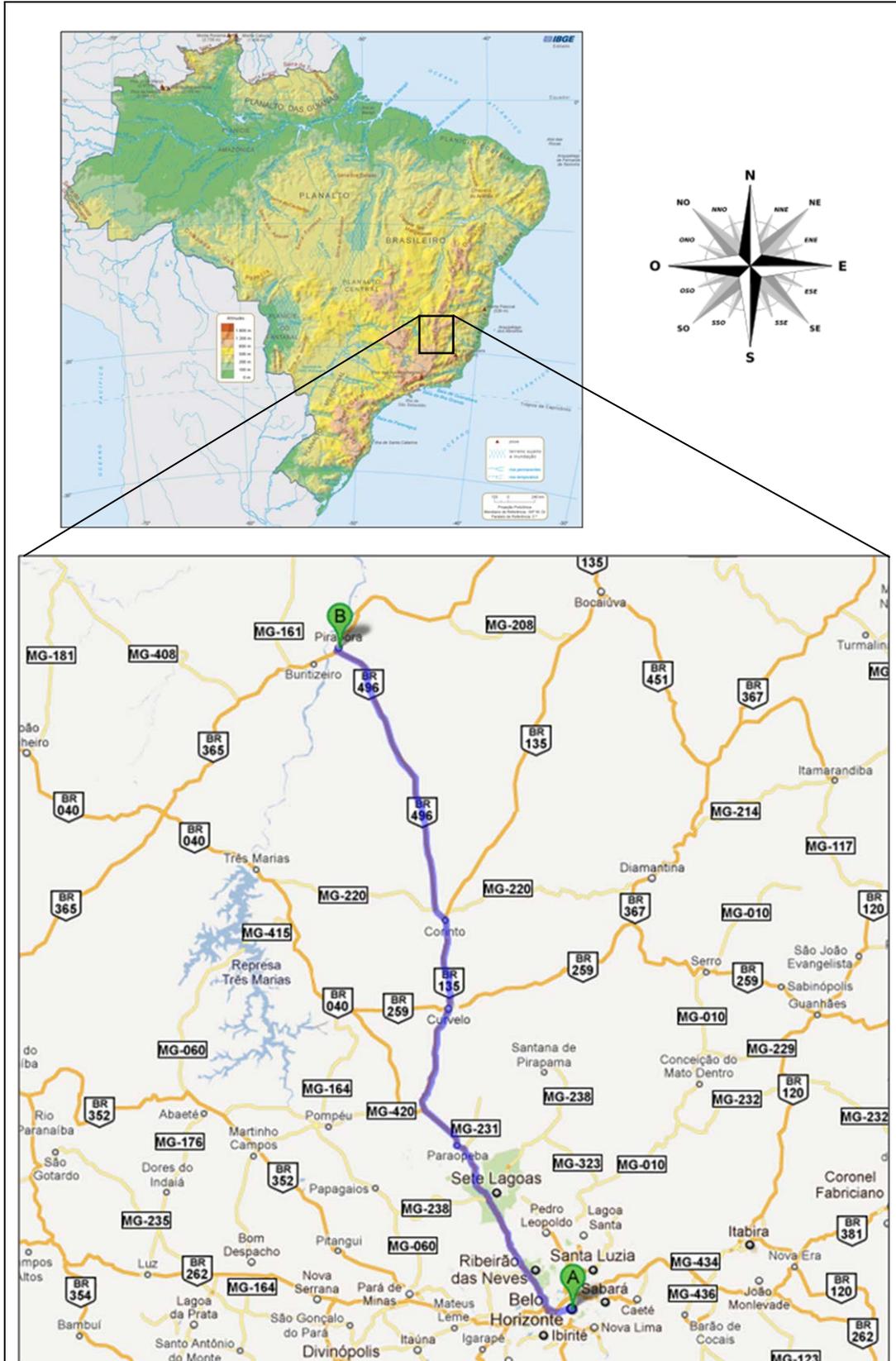


Figura 1. Localização da área de estudo no Brasil e vias de acesso a partir de Belo Horizonte – MG. Fonte: Google Maps.



Figura 2. Detalhe da área de estudo, com destaque para a zona urbana da cidade de Pirapora, do Rio São Francisco.

1.2 Problemas Geotécnicos e Histórico de Uso da Área

A área de estudos trata-se de uma indústria que opera no local a mais de 50 anos. As atividades desenvolvidas geram efluentes líquidos que contêm, dentre outros contaminantes, a soda cáustica (NaOH) que é empregada na limpeza dos sistemas de drenagem dos efluentes gerados nos processos. Ao longo dos últimos anos, há registro de infiltração de soluções aquosas contaminadas com soda cáustica a partir de algumas trincheiras (canais abertos) de drenagem, em cujas adjacências vem ocorrendo subsidência do solo e recalque da estrutura que suporta os equipamentos e as edificações industriais.

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma concepção de trabalho multidisciplinar elaborada com base nas constatações e evidências locais acerca do problema geotécnico e ambiental identificado por uma série de informações, relatos, levantamentos pretéritos e resultados executivos de ações desenvolvidas pela empresa usuária e seus parceiros, prestadores de serviço, no local.

Segundo relatos da empresa, a área estudada já apresentou no passado problemas geotécnicos semelhantes, tais como recalque de estruturas e fissuras nas paredes. Estes fenômenos ocorrem tanto em locais de operação de equipamentos quanto nas proximidades de antiga área de reservatórios de soda e lavanderia. Foram executadas ações de remediação dos problemas geotécnicos e anos depois verificou-se a ocorrência de evento semelhante (abatimento do piso com recalque de fundação direta) junto ao local de operação de equipamentos. Segundo os relatos, neste momento foi realizada a injeção de calda de cimento ao longo e nas imediações do equipamento, de forma a preencher os espaços vazios gerados entre o solo e o piso do Pavilhão e entre o solo e a fundação direta sob o equipamento.

No início do ano de 2011, houve um novo evento, com abatimento do piso e recalques das fundações diretas, agora sob o equipamento ao lado. Nesta situação ocorreram trincas no piso nas imediações da máquina, recalque/desnívelamento da fundação direta e consequente desalinhamento do equipamento e parada de operação.

Emergencialmente, como realizado anteriormente, a empresa providenciou a injeção de calda de cimento sob o piso e fundações diretas, assim como em diversos pontos em todo o pavilhão. Nestas aplicações foram injetadas quantidades diferentes em cada ponto onde era verificada a existência de espaços vazios entre o piso do pavilhão e o solo. De acordo com relatos da empresa, após as injeções de cimento as fundações ficaram estáveis.

Para buscar melhores subsídios técnicos para execução das ações de remediação dos problemas geotécnicos enfrentados, foi realizado em 2011 um Levantamento Geofísico por Eletrorresistividade por empresa especializada em Sondagens Geofísicas. Este levantamento identificou diversas anomalias geofísicas (baixos resistivos) no substrato do Pavilhão que foram interpretadas como decorrentes de infiltrações do efluente industrial.

Outro aspecto importante, é que parte das estruturas de alvenaria do Pavilhão, nas proximidades dos antigos reservatórios de soda, apresentaram rupturas e inclinações. Conforme relatado por funcionários da empresa e técnicos da empreiteira responsável pelas obras na unidade (terceirizada), as fundações profundas das estruturas do pavilhão de tingimento estão posicionadas em profundidades por volta de 13 metros.

Em vistorias realizadas na área foram verificados diversos indícios da ocorrência de infiltrações de efluentes industriais do Pavilhão no solo. Verificou-se em alguns locais espaços vazios abaixo do concreto do piso, trincas e juntas nas canaletas de drenagem,

marcas no concreto indicativas do nível que alcança o efluente nas canaletas e presença de líquidos nas canaletas de drenagem (Figura 3).



Figura 3. Vista da canaleta de drenagem.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é realizar um diagnóstico ambiental, identificação e avaliação das causas dos problemas geotécnicos registrados na área de estudo, visando a investigação, avaliação ambiental preliminar e mitigação da área de estudo.

Os objetivos específicos são:

- Caracterização geotécnica da área;
- Caracterização da contaminação do solo;
- Caracterização da contaminação das águas subterrâneas;
- Avaliação do impacto ambiental no solo e água subterrânea do local;
- Determinação da influência da contaminação do solo e da água subterrânea na erosão hídrica subterrânea local e no solapamento das estruturas de concreto;
- Determinação da influência da contaminação com soda na resistência mecânica do solo;

1.4 Metodologia

A metodologia empregada envolveu trabalhos de investigação geológico-geotécnica e ambiental do solo e da água subterrânea utilizando sondagens à percussão (SPT) e a trado, ensaios de infiltração, análises mineralógicas, granulométricas, ensaios geotécnicos e análises físico químicas de solo e águas subterrânea. Os pontos de investigação foram distribuídos na área sob influência das atividades potencialmente poluidoras.

Ao todo foram realizadas 7 (sete) sondagens SPT e 10 (dez) sondagens a trado manual para caracterização do subsolo e coleta de amostras de solo para análises granulométrica, mineralógica, geotécnica e físico-químicas. A qualidade química da água subterrânea foi avaliada através da coleta de uma amostra no poço tubular utilizado pela unidade industrial.

As atividades de campo foram executadas de acordo com Normas Técnicas NBR da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como normativas estabelecidas no “Manual de Sondagem” – ABGE, 1999.

1.4.1 Sondagens SPT

A sondagem a percussão ou sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) consiste no método em que a perfuração é realizada através de golpeamento de uma aste com o intuito de determinar a resistência do solo à penetração de um amostrador padrão, tipo e espessura das camadas litológicas e profundidade da zona saturada. A resistência à penetração é determinada a partir do número de golpes (NSPT) necessários para a penetração do amostrador padrão, com 45 cm de comprimento, sendo contados os golpes aplicados para a cravação do mesmo a cada série de 15 cm.

As sete sondagens SPT (Figura 4) totalizaram cerca de 129 metros perfurados e sua execução atendeu aos critérios estabelecidos pela Norma Técnica NBR-6484 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como normativas estabelecidas no “Manual de Sondagem” da ABGE, 1999.



Figura 4. Sondagem SP 07.

Na Tabela 1 são apresentadas as coordenadas UTM e a profundidade de cada sondagem SPT, sendo que a classificação do material de acordo com a resistência à penetração foi feita com base nos valores e parâmetros estabelecidos na norma técnica NBR-6484 da ABNT (Tabela 2).

Tabela 1- Informações sobre os pontos SPT sondados.

Sondagem SPT			
Furo	Coordenadas		Profundidade (m)
	X	Y	
SP01	508935	8086127	22,30
SP02	508954	8086077	13,45
SP03	508973	8086120	23,45
SP04	508969	8086132	12,45
SP05	509084	8086178	20,45
SP06	508970	8086150	20,45
SP07	509029	8086003	16,45

Tabela 2- Valores e parâmetros estabelecidos na norma técnica ABNT NBR 6484 para Argilas e Siltes Arenosos.

Composição do Solo	Índice de resistência à penetração (nº de golpes)	Designação
Areia e silte arenoso	≤ 4	Fofo
	5 a 8	Pouco compacta
	9 a 18	Medianamente compacta
	19 a 40	Compacta
	> 40	Muito compacta
Argila e silte argiloso	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	> 19	dura

1.4.2 Ensaios de Infiltração em Solo

Os índices de permeabilidade do solo da área em estudo foram determinados através de ensaios de rebaixamento, conforme estabelecido pelo manual da ABGE (1996) Ensaios de Permeabilidade em Solos. Resumidamente, estes ensaios consistem nos seguintes procedimentos: realização do ensaio SPT com a escavação com trado ou cavadeira do primeiro metro de solo e posteriormente perfuração de 45 cm de solo em cada metro, sendo os 55 cm restantes lavados com percolação constante de água e com o trépano. O ensaio é realizado nos 45 cm perfurados com hastes de 2”1/2 polegadas (6,35 cm). Para que o ensaio ocorra na profundidade desejada, coloca-se revestimento de 3,5 polegadas (8,89 centímetros) para selar as paredes do furo (quando possível), deixando apenas os 45 cm finais onde foi executada a medida da penetração sem o revestimento. Finalizando o ensaio SPT inicia-se o ensaio de infiltração enchendo o revestimento com água até a superfície do terreno, momento em que se assume como tempo 0 (zero). Então, mede-se o tempo necessário para rebaixar de 45 cm a 1,0m de coluna d’água ou determinar o rebaixamento em centímetros, medidos de minuto a minuto em 10 minutos de ensaio (quando a infiltração for lenta).

Os ensaios de infiltração foram realizados nos sete furos SPT, totalizando 55 ensaios. A Tabela 3 apresenta a relação de metros ensaiados por sondagem realizada.

Tabela 3- Relação sondagem SPT e número de metros.

Sondagem SPT			
Furo	Coordenadas		Nº de metros ensaiados (m)
	X	Y	
SP01	508935	8086127	22,00
SP02	508954	8086077	2,00
SP03	508973	8086120	6,00
SP04	508969	8086132	2,00
SP05	509084	8086178	2,00
SP06	508970	8086150	18,00
SP07	509029	8086003	3,00

O coeficiente de permeabilidade do solo saturado é determinado a partir dos dados dos ensaios de infiltração de acordo com a equação de Gilg & Gavard (1957):

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times \frac{d_1^2}{4hm \times \left(\frac{2L}{6,2} + d \right)}$$

onde:

K – coeficiente de permeabilidade;

d – diâmetro do furo de sondagem;

d₁ – diâmetro do revestimento;

Δh – rebaixamento da coluna d'água durante o ensaio;

Δt – variação de tempo durante o ensaio;

hm – espessura medida do nível d'água até a metade do Δh;

L – espessura da camada do ensaio.

Nas camadas onde o nível d'água ainda não estava presente, seguindo os critérios do manual da ABGE (1996), utilizou-se a fórmula abaixo:

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times \frac{d_1^2}{8h_o \times \sqrt{d \times L}}$$

Onde:

K – coeficiente de permeabilidade;

d – diâmetro do furo de sondagem;

d₁ – diâmetro do revestimento;

Δh – rebaixamento da coluna d'água durante o ensaio;

Δt – variação de tempo durante o ensaio;

h_o – espessura medida desde a boca do revestimento até a metade de L (espessura da camada ensaiada);

L – espessura da camada do ensaio.

1.4.3 Sondagens a Trado

As sondagens realizadas com trado manual tiveram por objetivo a caracterização do perfil do solo, através da identificação dos horizontes do terreno, além de coleta de amostras deformadas para posterior análise em laboratório. Foram executadas com o auxílio de um trado com amostrador tipo concha e/ou helicoidal, sendo o primeiro metro aberto com o auxílio de pá de corte.

Ao todo foram realizadas 10 (dez) sondagens a trado, sendo 07 (sete) coincidentes com as sondagens SPT (SP01 a SP07) e 03 (três) adicionais (AS08 a AS10). As sondagens a trado AS01 a AS10, assim denominadas para designar a amostragem de solo, tiveram por finalidade, também, a coleta de amostras para posterior encaminhamento aos laboratórios CORPLAB, IPT e Laboratório de Geoquímica da UFRGS, para realização de análises físico-químicas, geotécnicas e mineralógicas, respectivamente.

A Tabela 4 Tabela 4- Relação de furos de sondagem a trado executados e profundidade sondada.apresenta as coordenadas UTM e a profundidade dos furos de sondagem a trado.

Tabela 4- Relação de furos de sondagem a trado executados e profundidade sondada.

Sondagem a Trado			
Furo	Coordenadas		Profundidade (m)
	X	Y	
AS01	508935	8086127	7,5
AS02	508954	8086077	7,5
AS03	508973	8086120	7,5
AS04	508969	8086132	5,0
AS05	509084	8086178	9,0
AS06	508970	8086150	7,5
AS07	509029	8086003	7,5
AS08	508950	8086100	7,5
AS09	508961	8086120	5,0
AS10	508972	8086058	7,5

1.4.4 Amostragem

1.4.4.1 Amostragem de Solo para Caracterização Geotécnica e Mineralógica

A coleta de amostras para fins geotécnicos e mineralógicos foi realizada com base nos resultados do levantamento geofísico existente e nas sondagens SPT realizadas na área, tendo-se como referência as camadas que apresentaram menor resistência à penetração e resistividade mais fraca (Figura 5).



Figura 5. Material obtido na sondagem SPT com baixa resistência a penetração composto basicamente por fração arenosa.

A caracterização geotécnica foi realizada em amostras coletadas em 4 (quatro) pontos representativos da sondagem a trado, selecionados a partir do levantamento geofísico e das sondagens SPT. Nesses pontos procurou-se coletar amostras nas profundidades que registraram anomalias durante o levantamento geofísico realizado (Tabela 5). Foram coletadas amostras compostas e deformadas com aproximadamente 35 kg cada, para a realização de ensaios geotécnicos e mineralógicos.

Tabela 5- Intervalo de solo amostrado.

Nº Amostra	Prof. Amostrada (m)
AS-01	6,00 - 7,00
AS-03	0,00 - 1,00
AS-04	0,00 - 1,50
AS-04	1,50 - 6,80
AS-05	0,00 - 1,00
AS-05	6,00 - 7,00

As amostras coletadas para caracterização geotécnica foram acondicionadas em sacos resistentes e posteriormente colocadas em caixas apropriadas para transporte e encaminhadas para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, em São Paulo. Já as amostras

coletadas para análise mineralógica foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas para o Laboratório de Difração de Raios X da UFRGS.

A fim de avaliar a influência da contaminação com soda (NaOH) na resistência mecânica do solo, foi realizada, posteriormente, a coleta de uma amostra de solo residual de alteração de rocha granítica, coletada em ponto localizado nas margens da BR-116, no trecho entre Guaíba e Tapes/RS, (Figura 6 a Figura 9).



Figura 6. Local de coleta do solo na BR/116, Tapes, RS



Figura 7. Perfil do talude onde o solo foi coletado.



Figura 8. Local do talude onde o solo foi coletado



Figura 9. Solo coletado para análises.

A amostra coletada foi separada em duas alíquotas, com 60 kg cada, sendo uma submetida a contaminação com soda numa solução com pH igual a 12,0 (Amostra DEMINE/2) e a outra armazenada na sua condição natural, sem contaminação (Amostra

DEMINE/1). Após a contaminação da amostra DEMINE/2 foi realizada sua homogeneização e secagem ao ar livre e, posteriormente, em estufa a 45 °C (Figura 10 a Figura 15). As duas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao Laboratório de Solos da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, em Porto Alegre, para a realização de ensaios geotécnicos.



Figura 10. Introdução de H₂O + NaOH.



Figura 11. Homogeneizando a amostra de Solo + H₂O + NaOH.



Figura 12. Amostra Solo + H₂O + NaOH.



Figura 13. Espalhamento e regularização da camada.



Figura 14. Gradiamento da camada.



Figura 15. Remoção e quebra do material para melhor secagem em estufa.

1.4.4.2 Amostragem de Solo para Análise Ambiental

A amostragem foi realizada com trado manual de concha helicoidal, coletando-se duas amostras em cada furo, sendo uma a 0,8 metros e a outra na profundidade final (Tabela 5). As amostras foram coletadas nas profundidades onde o levantamento geofísico registrou anomalias marcadas por baixos resistivos, o que possibilitou caracterizar o solo onde havia maior potencial de contaminação. Após a coleta, os furos foram preenchidos e selados com o material de perfuração para evitar a contaminação do subsolo.

As amostras foram acondicionadas em vidros, armazenadas individualmente em sacos plásticos fechados e resfriadas em caixas de isopor para remessa ao laboratório CORPLAB em São Paulo.

1.4.4.3 Amostragem de Água subterrânea para Análises Ambientais

Foi feita uma amostragem de água subterrânea num poço de tubular de abastecimento da empresa, o qual estava em funcionamento. A coleta foi realizada após 5 minutos de funcionamento da bomba, a fim de evitar a coleta de água acumulada na tubulação, que poderia comprometer a análise devido à descaracterização química da água.

A amostras foi acondicionada em vidros e os vidros foram armazenados individualmente em sacos plásticos fechados e resfriados em caixas de isopor para remessa ao laboratório.

1.4.5 Análises Laboratoriais

1.4.5.1 Análises Granulométricas e Geotécnicas de Solo

Foram coletadas 6 (seis) amostras de solo para caracterização geotécnica com o objetivo de se obter os seguintes parâmetros: granulometria, ensaio de compactação, Limites de Liquidez e Plasticidade e Índice de Plasticidade, seguindo as normas da ABNT NBR 7181/1988, NBR 9895/1987, NBR 6459/1984 e NBR 7180/1988, respectivamente. Estes ensaios foram realizados nos Laboratórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. O preparo das amostras seguiu a norma da ABNT NBR 6457, a qual descreve a metodologia de preparação de amostras de solo para os ensaios de compactação e de caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos, massa específica aparente e absorção de água dos grãos).

Também foram realizados ensaios granulométricos, sem uso de defloculantes, e de resistência a compressão uniaxial de duas amostras de solo do Rio Grande do Sul, com características mineralógicas e texturais semelhantes aos solos da área estudada, sendo uma natural e outra contaminada com solução de soda cáustica com pH igual a 12,0. Os ensaios, realizados nos laboratórios da CIENTEC em Porto Alegre (ABNT NBR 12770/1992), permitiram, por analogia, avaliar a influência da infiltração de água contaminada com soda cáustica na resistência mecânica e na susceptibilidade à erosão hídrica subterrânea dos solos da área de estudos.

1.4.5.1.1 Ensaio de Compactação – Índice de Suporte Califórnia

Para a determinação do valor do Índice de Suporte Califórnia e da expansão de solos em laboratório, seguiram-se os procedimentos propostos na norma ABNT NBR 9895/1987. Para a execução deste ensaio utilizaram-se amostras deformadas, não reusadas, de material que passou na peneira de 19 mm, com 5 corpos de prova.

1.4.5.1.2 Limite de Liquidez

O Limite de Liquidez (LL) é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico, corresponde à transição de consistência entre os estados plástico, em que o volume varia com a umidade, e o estado líquido. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande. Para a determinação do Limite de Liquidez dos solos seguiu-se os procedimentos propostos na norma ABNT NBR 6459. O ensaio consta inicialmente do destorroamento da amostra de solo, adicionando-se água destilada até obter-se uma pasta homogênea e determinando-se, então, a sua umidade (w). Em seguida, a amostra é colocada no recipiente do aparelho de Casagrande, fazendo-se um sulco longitudinal com o auxílio do cinzel de maneira a abrir uma ranhura em sua parte central (Figura 16).

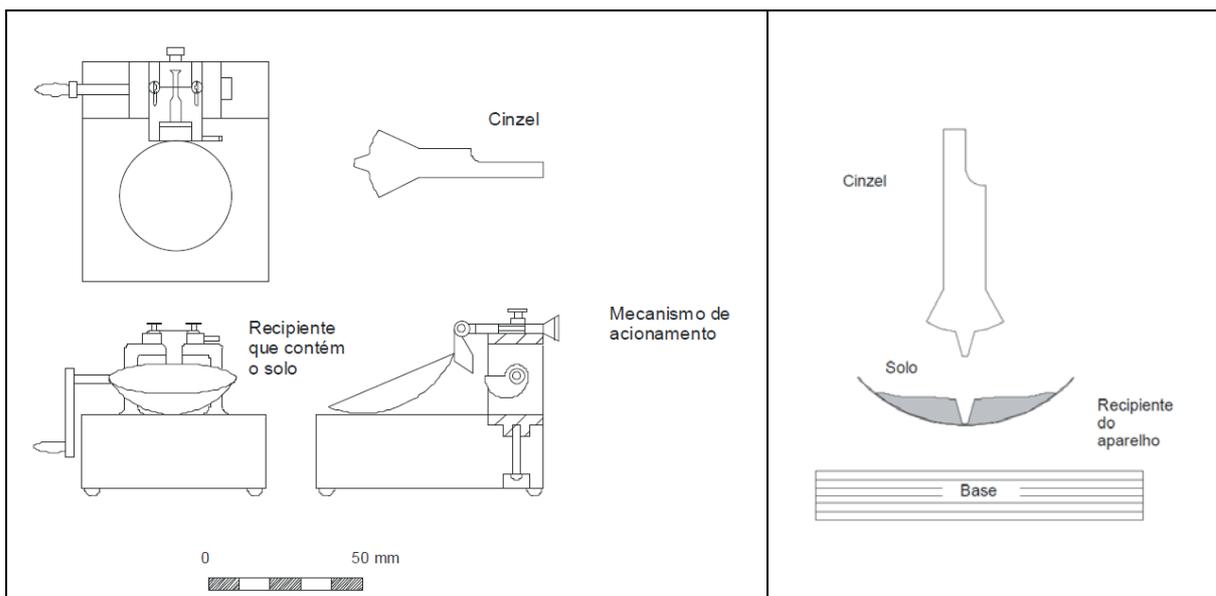


Figura 16. Aparelho de Casagrande para a determinação do Limite de Liquidez (A) e ilustração do sulco realizado na amostra com o auxílio do cinzel (B).

O recipiente contendo a amostra é deixado cair de uma altura padrão, batendo sobre a base do aparelho, e o número de golpes necessário para provocar o fechamento desse sulco é registrado. Adicionando água à amostra, vai-se repetindo tal procedimento, com várias umidades. Com os resultados obtidos, constrói-se um gráfico no qual as ordenadas (em escala logarítmica) são os números de golpes e as abcissas (em escala aritmética) são os teores de umidade (%) correspondentes. O ajuste da reta pelos pontos assim obtidos permite a determinação do Limite de Liquidez do solo, que corresponde ao teor de umidade a 25 golpes.

1.4.5.1.3 Limite de Plasticidade

A plasticidade é a propriedade dos solos que consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade e sem variação de volume. O Limite de Plasticidade (LP) é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço. Corresponde à transição de consistência entre os estados semissólido e plástico. Em laboratório, o LP é obtido pela determinação do teor de umidade no qual um cilindro de um solo com 3mm de diâmetro apresenta-se fissuras.

Para a determinação do LP e para o cálculo do Índice de Plasticidade (IP) dos solos seguiu-se os procedimentos propostos na norma ABNT NBR 7180. Para a execução deste ensaio coloca-se a amostra numa cápsula de porcelana e adiciona-se água destilada até obter uma pasta homogênea de consistência plástica. Depois, toma-se cerca de 10 g de amostra assim preparada e forma-se uma pequena bola, que deve ser rolada sobre uma placa de vidro, com a palma da mão em um movimento de vai e vem, até formar um cilindro com 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. Esse movimento causa a perda de umidade e deve ser mantido até o cilindro se fragmentar, quando se determina o limite de plasticidade.

O Índice de Plasticidade informa quanto à amplitude da faixa de plasticidade dos solos: quanto maior o IP, mais plástico será o solo em determinadas condições de umidade. Este índice é obtido pela equação:

$$\mathbf{IP = LL - LP}$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade (%);

LL = Limite de Liquidez, já mencionado no ensaio;

LP = Limite de Plasticidade (%).

Este valor de IP pode ser empregado para classificação dos solos, conforme as classes apresentadas Tabela 6, proposto por IAEG (1979).

Tabela 6 - Classes de solos pelo índice de plasticidade (IAEG, 1979).

Classe	Índice de Plasticidade (%)	Termo
1	Menor que 1	Não plástico
2	1 – 7	Levemente Plástico
3	7 – 17	Moderadamente Plástico
4	17 – 35	Altamente Plástico
5	Maior que 35	Extremamente Plástico

1.4.5.1.4 Resistência à Compressão não Confinada

O ensaio de compressão simples, realizado na CIENTEC, visa à determinação da resistência à compressão não confinada de corpos de prova constituídos por solos coesivos, mediante aplicação de carga axial com controle de deformação. Tais corpos de prova podem ser indeformados ou obtidos por compactação ou mesmo por remoldagem. A realização do ensaio sobre uma mesma amostra, nos estados indeformado e remoldado (aquele constituído por solo que tenha tido sua estrutura natural modificada por manipulação), permite a determinação da sensibilidade do material, desde que o corpo de prova remoldado mantenha uma forma estável.

Os valores resultantes da aplicação deste ensaio correspondem à resistência de solos coesivos em termos de tensões totais. Este tipo de ensaio se aplica a solos coesivos que não expulsam água durante a fase de carregamento do ensaio e que retém uma resistência após o alívio das pressões confinantes de campo, tais como argilas ou solos cimentados saturados.

Para a determinação da resistência à compressão não confinada (q_u) seguiram-se os procedimentos estabelecidos na norma da ABNT NBR 12770/1992. Este ensaio também é chamado de ensaio de compressão simples ou compressão uniaxial. O ensaio consiste na moldagem de um corpo-de-prova cilíndrico e no seu carregamento pela ação de uma carga axial. A carga é aplicada em uma única direção, dando liberdade ao corpo de prova para deformar-se nas outras direções sem qualquer restrição.

O resultado do ensaio de compressão simples indica a resistência ao cisalhamento do solo para baixas tensões totais, considerada simplificada como a metade da tensão desviadora máxima. A **resistência à compressão não confinada (q_u)** é a

tensão de compressão pela qual o corpo-de-prova cilíndrico, ensaiado nas condições prescritas na Norma, rompe-se e a **resistência ao cisalhamento (su)** é o valor correspondente à metade da tensão de compressão na ruptura.

Para calcular a deformação axial específica (ϵ) para uma dada carga aplicada, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\epsilon = (\Delta H/H) \times 100$$

Onde:

ϵ = deformação axial específica, em %;

ΔH = variação da altura do corpo-de-prova, obtida pelo indicador de deslocamento, em mm;

H = altura inicial do corpo-de-prova, em mm.

1.4.5.2 Análises Mineralógicas

Quatro amostras de solo foram coletadas nas sondagens a trado para análise mineralógica da fração argilosa, as quais foram realizadas por Difração de Raios X no Instituto de Geociências da UFRGS, utilizando o método do pó. As análises foram realizadas em equipamento de difração de raios-X, SIEMENS D5000, com radiação $\text{CuK}\alpha$, 40 kV e 30 mA no Laboratório de Difractometria de raios-X do CPGq – UFRGS. Este aparelho contém goniômetro com sistema θ - θ , controlado por computador. Os padrões de DRX são obtidos numericamente e tratados através do programa DIFRAC-AT[®] da SOCABIM.

1.4.5.3 Análises Ambientais

1.4.5.3.1 Solo

Durante as sondagens a trado foram coletadas duas amostras de solo em pontos com anomalias geofísicas caracterizadas por baixos resistivos. As amostras foram enviadas para o Laboratório CORPLAB em São Paulo/SP para a realização de análises físico-químicas dos parâmetros listados na Tabela 7 e avaliação da ocorrência de contaminação pelos efluente industriais.

Tabela 7 - Parâmetros de análises para amostras de solo e água subterrânea.

Metais (Na, Sb, Al, As, Ba, B, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Se, V, Zn)	Surfactantes
PAH	NO ₃ -
TPH	NH ₄ -
VOC	SO ₄ -
SVOC	NT

1.4.5.3.2 Água

A amostragem de água subterrânea foi realizada a partir de um poço de captação profundo, de abastecimento da empresa, atualmente em funcionamento. Foi coletada uma amostra e enviada ao Laboratório, para a realização de análises físico-químicas da água dos parâmetros listados na Tabela 7 com o objetivo de caracterizar quimicamente a água subterrânea e identificar alguma possível contaminação.

1.4.5.4 Avaliação da contaminação ambiental

A avaliação da contaminação de solo e água subterrânea foi realizada através da comparação dos resultados analíticos das amostras analisadas com os valores de referência estabelecidos na legislação pertinente em vigor e em normas técnicas específicas. Os resultados analíticos das amostras de solo e água subterrânea foram comparados aos padrões de qualidade ambientais descritos a seguir:

- **Resolução CONAMA 420 de 2009**: Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas
- **Resolução CONAMA 396 de 2008**: Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências

1.4.6 Análise de Carga das Estruturas Existentes

O estudo foi realizado seguindo-se as seguintes etapas: Identificação e classificação dos tipos de estruturas das instalações; Metodologia de Cálculo.

1.4.6.1 Identificação e Classificação dos Tipos de Estruturas das Instalações

No que se refere à estabilidade e sustentação do Pavilhão e equipamentos analisados, verificou-se dois tipos de fundação: **Fundação direta em Radier** (local dos equipamentos) e **Fundação Profunda tipo estaca** (Pavilhão).

A **Fundação direta em Radier** é constituída por um único elemento de fundação que distribui toda a carga da edificação para o terreno, constituindo-se em uma distribuição de carga tipicamente superficial. O Radier é uma laje de concreto armado, que distribui a carga total uniformemente pela área de contato. É usado quando as cargas são pequenas e a resistência do terreno é baixa, sendo uma boa opção para que não seja usada a solução de fundação profunda. Este tipo de fundação classifica-se como indeformável, ou seja, ela impõe ao solo um recalque por igual, com pressões e deformações uniformes.

As **Fundações profundas tipo estaca** são elementos alongados, cilíndricos ou prismáticos que se cravam, com um equipamento, chamado bate-estaca, ou se confeccionam no solo de modo a transmitir às cargas da edificação a camadas profundas do terreno. Estas cargas são transmitidas ao terreno através do atrito das paredes laterais da estaca contra o terreno e pela ponta.

Cabe destacar que as fundações supracitadas encontram-se em locais com solo contaminado por soda cáustica.

2 *ESTADO DA ARTE*

2.1.1 Caracterização Geológica e Geomorfológica da Área

A geomorfologia do estado de Minas Gerais compreende genericamente a um relevo de planaltos, os quais são subdivididos em seis principais unidades morfoestruturais: I) Serra do Espinhaço; II) Quadrilátero Ferrífero; III) Chapadas do Jequitinhonha; IV) Chapadas

do São Francisco; V) Planaltos do Leste e Sul de Minas; e VI) Planaltos da Bacia do Paraná (Figura 17).

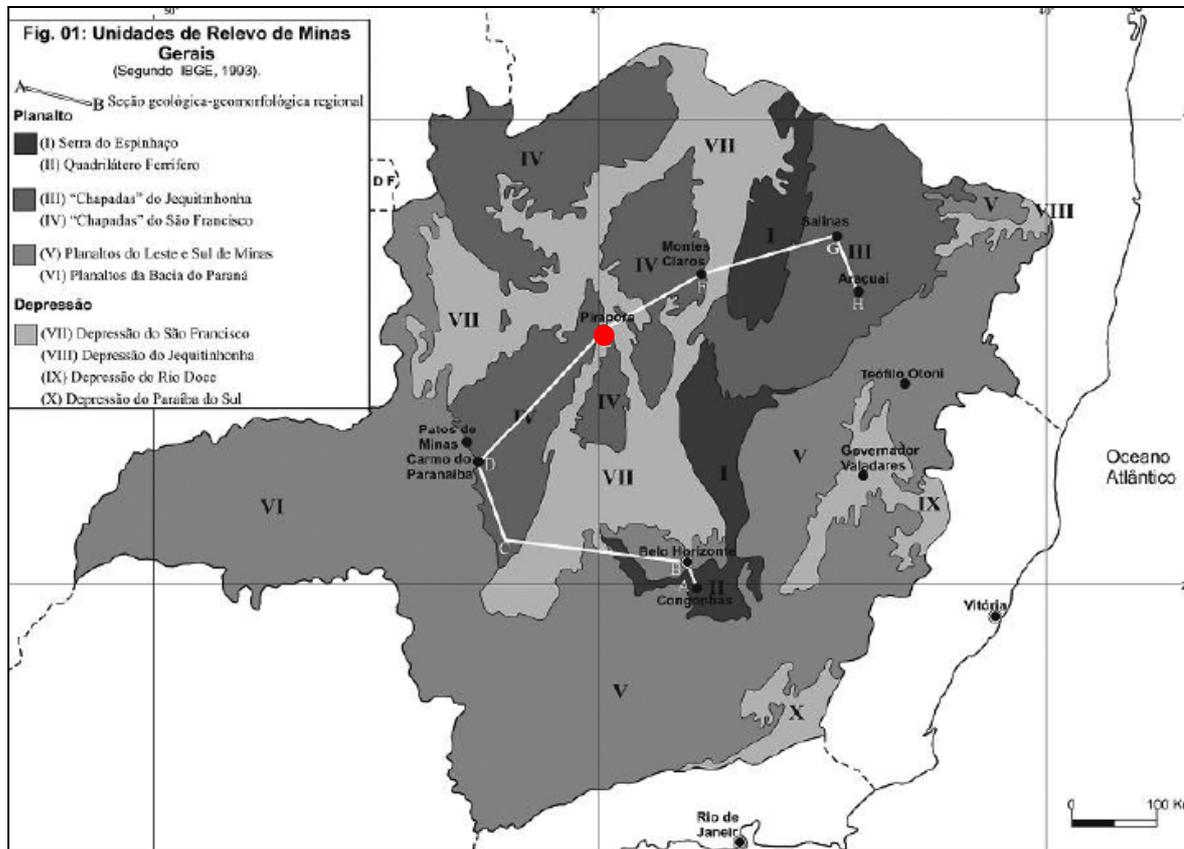


Figura 17. Unidades Morfoestruturais de Minas Gerais, com destaque para o local da área de estudo Pirapora (em vermelho) (IBGE, 1993).

A área de estudo encontra-se nas margens direita do Rio São Francisco, em terreno do Cráton de São Francisco, ocupando a porção meridional da Bacia Sanfranciscana. As litologias que compõem o substrato da área correspondem a coberturas detríticas colúvio-eluviais, por vezes lateríticas cenozoicas, características de terraços e sedimentos aluviais recentes e inconsolidados, originadas pela influência do rio São Francisco. Este material sedimentar encontra-se depositado sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí, Formação Três Marias, datados do Neoproterozóico, constituído por arcóseos e pelitos.

A mineralogia principal destes depósitos é constituída, basicamente, por quartzo, argilas e óxidos de ferro e manganês.

Os solos da região são avermelhados, bem desenvolvidos, homogêneos e estruturados (Figura 18). Embora os solos sejam bem drenados, comumente observa-se o desenvolvimento de gretas de contração evidenciando a presença de uma fração argilosa na

sua estrutura primária. Junto à superfície também é comum observar a acumulação de óxidos cuja presença desenvolve o crescimento de crostas lateríticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



Figura 18. Detalhe em corte de solo, junto a unidade industrial, evidenciando pacote espesso de solo, homogêneo, bem desenvolvido e maciço.



Figura 19. Foto de detalhe de amostra de solo com crosta laterítica.

2.2 Estudos de resistência ao cisalhamento e das características físicas

Apesar da existência de alguns estudos que abordam a resistência ao cisalhamento, são poucos os artigos que englobam a influência da Soda Cáustica nas propriedades mecânicas dos solos. A literatura que trata da mecânica do solo, de modo geral, está focada nas relações entre as propriedades mecânicas e aspectos intrínsecos do solo, tais como mineralogia, textura (granulometria), porosidade e teor de umidade. Segundo Reichardt & Timm (2004) a porosidade do solo é diretamente relacionada à densidade, que também é afetada pelo nível de compactação.

Sob o ponto de vista mineralógico, as argilas são as fases minerais responsáveis pela propriedade de coesão, a qual é característica de solos argilosos. A coesão resulta das forças de atração eletro-química entre as partículas de argila do solo e pode ser afetada negativamente por substâncias dispersantes de natureza alcalina, como soda cáustica e outras. Dentre os argilo-minerais, a caulinita é o mais sensível à dispersão na presença de tais substâncias devido à sua estrutura cristalina que combina a oxidrila da superfície com a oxidrila do fluido gerando uma carga superficial negativa que adsorve cátions com forte potencial de solvatação, dentre os quais o sódio (Frenkel & Levy, 1992). A adsorção de sódio hidratado promove o distanciamento dos criptocristais com conseqüente diminuição das forças de atração eletrostáticas entre eles e perda de coesão do solo. De acordo com o referido autor, as Esmectitas sofrem influência menor dos dispersantes enquanto a ilita tem comportamento intermediário.

Estudos experimentais mostram que a deflocação, ou dispersão, da caulinita é fortemente intensificada em ambientes com pH acima de 10 (Figura 20), o que dá indícios de que a contaminação com solução alcalina pode provocar a redução na resistência à erosão superficial e subterrânea, bem como na resistência mecânica do solo.

A dispersão e deflocação de solos argilosos é causada por soluções alcalinas de cátions monovalentes, principalmente o sódio. Ao contrário dos cátions monovalentes, os divalentes e trivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) atuam como floculantes quando em solução (Jocimar *et al.*, 2011; Kirkham & Powers, 1972; Baver *et al.*, 1972). Com isso, sua presença como cátions trocáveis pode inibir os efeitos do sódio na dispersão e nas propriedades mecânicas do solo, mesmo sob condições alcalinas.

A dispersão química tem como agentes dispersantes mais utilizados os compostos de Na, cuja escolha deve-se, principalmente, à sua forte capacidade de hidratação. A eficácia do dispersante, contudo, depende dos cátions presentes no complexo de troca e da

relação entre cargas permanentes e cargas dependentes do pH nos minerais da fração argila. Em solos com elevados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e/ou predominância de cargas permanentes que apresentam dificuldade na estabilização da suspensão, o hexametáfosfato de sódio é o dispersante mais indicado (Baver et al., 1972). Em solos com estas características, o hidróxido de sódio (NaOH) tem eficiência atenuada na dispersão e lixiviação.

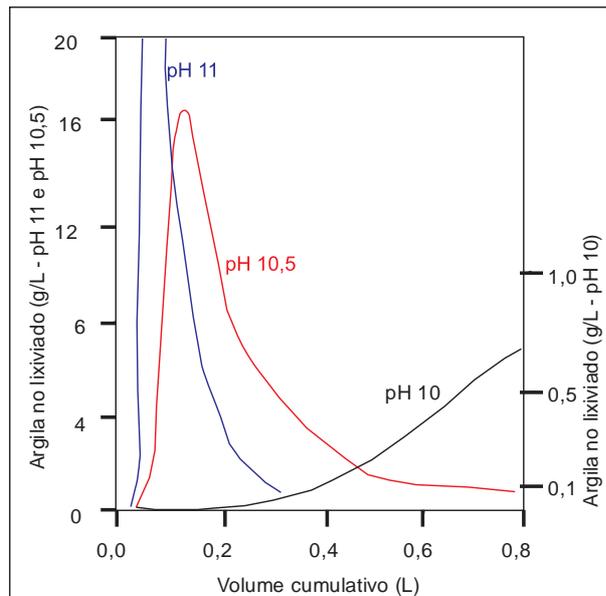


Figura 20. O efeito do pH sobre a dispersão e lixiviação de caolinita por soluções alcalinas de NaOH+NaCl. A concentração total de Na na solução é igual $1,0 \text{ mol.m}^{-3}$ (modificado de Frenkel & Levy, 1992)

Nos solos com alta capacidade de troca catiônica, ricos em esmectitas, a elevação do pH da solução se constitui no fator mais importante do aumento da dispersão, tendo o teor de sódio interferência secundária (Baver et al., 1972).

Monique *et al.* (2006) estudaram os efeitos de licor cáustico (hidróxido de sódio, ferro e alumínio) na resistência ao cisalhamento e nas características físico-mineralógicas de solo saprolítico. Os resultados apontaram que o referido licor resulta no aumento da dispersão e na redução da resistência ao cisalhamento do solo contaminado.

Efeitos do hidróxido de sódio na erodibilidade de solo também foram observados por Ferreira *et al.* (2002). Neste estudo, o autor constatou que a soda cáustica promoveu um aumento da dispersão e, conseqüentemente, na erodibilidade. Processos de erosão hídrica subterrânea foram claramente identificados na área estudada.

Estudos de Narasimha & Chittaranjan (2012) mostram que outros contaminantes, como efluentes de curtume e baterias, também afetam as propriedades

mecânicas de solos coesivos com efeito contrário ao da soda cáustica, aumentando significativamente o Índice de Suporte Califórnia. Deve-se destacar que estes contaminantes são ricos em metais pesados, divalentes e trivalentes.

3 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR-6484. 2001. *Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 17p.
- ABNT NBR 6459. 1984 - *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 6p.
- ABNT NBR 7180. 1988 - *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 1p.
- ABNT NBR 7181. 1988 - *Análise granulométrica de solos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 13p.
- ABNT NBR 9895. 1987 - *Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 14p.
- ABNT NBR 12770. 1992 - *Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, Sp. 4p.
- ABGE. *Manual de Sondagem*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental. São Paulo, Sp. 1999, 73p.
- Baver, L.D., Gardner, W.H. & Gardner, W.R. *Soil physics*. 4.ed. New York, John Wiley, 1972. 498p.
- Ferreira, L; Curi, N; Ferreira, M.M.; Lima, J. M.; Silva, M. L. N.; Vitorino, A.C.T., v.26, n.2, p.342-353, 2002
- Frenkel, H., Fey, M. V., and Levy, G. J. *Critical flocculation concentration of reference and soil clays in the absence or presence of organic and inorganic anions: Soil Sci. Soc. Amer. J.* 56, 1992.
- Kirkham, D., and W. L. Powers. 1972. *Advanced soil physics*. Wiley-interscience, New York.
- Narasimha Rao, A.V.; Chittaranjan, M. *Influence of soil-industrial effluents interaction on subgrade strength*, Vol. 5, Issue 1, pp. 326-335, 2012.
- CONAMA 396. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente. São Paulo, Sp. Publicação DOU nº 66, 2008, páginas 66-68

CONAMA 420. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Conselho Nacional do Meio Ambiente. São Paulo, Sp. Publicação DOU nº 249, 2009, páginas 81-84

Reichardt, K.; Timm, L.C. Solo, *Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

4 *ARTIGO SUBMETIDO AO PERIODICO***Caracterização geotécnica e ambiental de solo contaminado por soda cáustica em unidade industrial do norte de Minas Gerais****Geotechnical and environmental characterization of soil contaminated by caustic soda in industrial factory from the north of Minas Gerais State, Brazil**

Guilherme TONIOLO¹, Antonio Pedro VIERO¹ & Clóvis GONZATTI²

- (¹) Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: guitoniolo82@gmail.com.
- (²) Departamento de mineralogia e Petrologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil.

Resumo. O presente artigo analisa o impacto ambiental no meio físico causado por indústria no norte de Minas Gerais e a influência de contaminantes, particularmente a soda cáustica, no comportamento mecânico dos solos residuais de natureza areno-argilosa. No local, há registro de erosão hídrica subterrânea que gerou a ocorrência de patologias em algumas estruturas construtivas da unidade industrial. Para tanto, foram executadas análises mineralógicas e granulométricas, Ensaio de Compactação (Proctor), Índice de Suporte Califórnia, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Ensaio de Compressão Simples, bem como a determinação dos índices físicos, em amostras com e sem contaminação com soda cáustica. Também foram realizadas análises químicas em amostras de solo e água subterrânea. Os resultados registraram contaminação do solo somente com soda cáustica, em níveis variados e em área circunscrita aos limites da planta industrial. Os ensaios geotécnicos, por outro lado, apontaram a redução da resistência à compressão simples, dos limites de liquidez e de plasticidade, do Índice de Suporte Califórnia e do grau de saturação na amostra contaminada com soda cáustica.

Palavras-chave. contaminação de solo, resistência a compressão, erosão hídrica, dispersão do solo, coesão do solo.

Abstract. This study analyzes the environmental impact on the soil and groundwater caused by industry in the north of Minas Gerais and the influence of contamination by caustic soda in the mechanical behavior of sandy-loam residual soils. On the study site there is underground hydric erosion that generated diseases in some constructive structures of the industrial unit. Mineralogical and textural analyzes, compacting tests (Proctor), California

Support Index, Liquidity Limit, Plasticity limit and Simple compression test were performed in soil samples. It was also made the determination of the physical indices in samples with and without contamination with caustic soda. Chemical analysis on soil and groundwater samples were also carried out. The results reported soil contamination only with caustic soda, at varying degrees and in an area restricted to the limits of the industrial plant. On the other hand, geotechnical testing showed a reduction of resistance to simple compression, the limits of liquidity and plasticity, California Support Index and the degree of saturation in the contaminated sample with caustic soda.

Keywords. soil contamination, resistance to compression, water erosion, soil dispersion, soil cohesion.

1 Introdução

Este estudo investiga a influência da soda cáustica na resistência mecânica de solos contaminados com esta substância. O comportamento mecânico dos solos é função das suas características mineralógicas e texturais e da quantidade e propriedades físico-químicas do fluido intersticial. As propriedades geotécnicas dos solos e sua resposta à solicitação de esforços são objeto de ampla investigação acadêmica e aplicada, tendo como principal referência teórica os estudos clássicos de Mecânica dos Solos de Terzaghi *et al.* (1954). As publicações técnicas e científicas sobre o assunto são abundantes, porém, é importante destacar que na ampla maioria dos trabalhos os métodos investigativos utilizados não abordam as relações entre contaminação ambiental e resistência mecânica dos solos, estando focados essencialmente nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas (Kulhawy & Mayne, 1990; Schmertmann, 1991; Maher & Ho, 1992; Atkinson, 1993). Cabe ressaltar que a contaminação ambiental pode modificar substancialmente a composição química do fluido intersticial, bem como alterar algumas propriedades físicas e químicas do solo.

O fluido intersticial é um fator determinante da resistência mecânica dos solos. A forma e a intensidade com que o fluido interfere no comportamento do solo depende das suas propriedades químicas e também de características do solo, como mineralogia, estado de tensões, índice de vazios e temperatura (Brancucci *et al.*, 2006; Narasimha & Chittaranjan, 2012). Alguns estudos registraram mudanças no comportamento mecânico de solos sob influência de substâncias intersticiais alcalinas (Kumapley & Ishola, 1985; Ignatius & Pinto, 1991; Shidharan *et al.*, 1992; Agnelli & Albiero, 1994; Shidharan *et al.*, 1988; Anandarajah & Zhao, 2000; Moncada, 2004). No entanto, são restritas as avaliações da resistência mecânica de solos sob influência de contaminação por soda cáustica. Este produto é amplamente

utilizado no setor industrial como insumo e/ou produto de limpeza, de modo que pode se ser tratado como uma substância de grande potencial de contaminação do solo e dos recursos hídricos. Deve-se ressaltar que a indústria têxtil gera efluentes líquidos que contêm a soda cáustica (NaOH) por ser utilizada na limpeza dos sistemas de drenagem das unidades produtivas.

O presente estudo tem por objetivo geral a realização de um diagnóstico ambiental e a identificação e avaliação das causas dos problemas geotécnicos registrados no local. Os objetivos específicos são a caracterização geotécnica da área, a caracterização da contaminação do solo e das águas subterrâneas, a avaliação do impacto ambiental no solo e água subterrânea, a determinação da influência da água contaminada na erosão hídrica subterrânea e no solapamento das estruturas de concreto, a determinação da influência da contaminação de soda na resistência mecânica do solo e proposição de modelo de variações das propriedades geotécnicas de solos contaminados.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Localização da área

A área de estudos comporta uma indústria têxtil localizada no norte do estado de Minas Gerais, próximo às margens do Rio São Francisco (Fig. 1). Ao longo dos últimos anos foram registradas infiltrações de soluções aquosas contaminadas com soda cáustica e outros produtos em alguns canais de drenagem, o que resultou na subsidência do solo e recalque da estrutura que suporta os equipamentos e as edificações industriais. As atividades industriais do setor têxtil podem gerar efluentes líquidos que contêm alguns contaminantes, como a soda cáustica (NaOH) utilizada na limpeza dos sistemas de drenagem das unidades produtivas.



Figura 1. Mapa de localização da área de estudos. Cidade de Pirapora, Minas Gerais.

Figure 1. Location map of study area. Pirapora City, Minas Gerais State, Brazil.

O local já apresentou no passado problemas geotécnicos semelhantes, como recalque de estruturas e fissuras nas paredes. Estes fenômenos ocorreram tanto nos locais de operação de equipamentos quanto nas proximidades de um reservatório de soda e lavanderia desativados. Alguns anos após o tratamento e solução dos problemas geotécnicos mais antigos, verificou-se a ocorrência de evento semelhante, com abatimento do piso e recalque de fundação direta que sustenta equipamentos de grande porte. O problema foi mitigado com a injeção de calda de cimento que preencheu os vazios existentes entre o solo e o piso do pavilhão e entre o solo e a fundação direta sob o equipamento.

No início do ano de 2011 ocorreu novo abatimento do piso e recalque das fundações diretas sob outro equipamento localizado ao lado daquele afetado anteriormente. Nesta situação ocorreram trincas no piso nas imediações da máquina, recalque com desnivelamento da fundação direta e consequente desalinhamento do equipamento e parada de operação. Novamente, o problema foi mitigado com a injeção de calda de cimento sob o piso e fundações diretas em diversos pontos no pavilhão até o preenchimento dos espaços vazios.

Investigações geológico-geotécnicas por Levantamento Geofísico de Eletroresistividade, realizados na área em junho (TEC GEO, 2011), apontaram diversas anomalias geofísicas marcadas por baixos resistivos no substrato do pavilhão de tingimento. Essas anomalias foram interpretadas como decorrentes de plumas de contaminação por infiltrações de efluente industrial. Parte das estruturas de alvenaria do referido pavilhão próximas aos antigos reservatórios de soda apresentaram rupturas e inclinações. As fundações profundas das estruturas do pavilhão de tingimento estão posicionadas em profundidades por volta de 13 metros.

Vistorias realizadas na área detectaram indícios de infiltração no solo de efluentes industriais no Pavilhão de Tingimentos (Fig. 2), bem como a ocorrência de espaços vazios abaixo do concreto do piso causada por erosão hídrica (Fig. 3), trincas e juntas e presença de líquidos nas canaletas de drenagem (Fig. 4).

Para a quantificação da influência de contaminantes nas propriedades mecânicas dos solos, foram investigadas duas amostras idênticas de solo residual do Rio Grande do Sul, com características texturais e mineralógicas similares aos solos da área estudada, sendo uma em condição natural e outra contaminada com soda cáustica, por meio de ensaios de compressão simples e determinação de índices físicos.



Figura 2. Infiltrações visíveis abaixo do equipamento.

Figure 2. Visible leaks below the equipment.



Figura 3. Espaços vazios sob o piso de concreto e sondagem a trado.

Figure 3. Empty spaces below the concrete floor and probing the auger.



Figura 4. Vista da canaleta de drenagem.

Figure 4. Drainage channel view.

2.1 Geologia

A geomorfologia do estado de Minas Gerais compreende genericamente a um relevo de planaltos, os quais são subdivididos em seis principais unidades morfoestruturais: I) Serra do Espinhaço; II) Quadrilátero Ferrífero; III) Chapadas do Jequitinhonha; IV) Chapadas do São Francisco; V) Planaltos do Leste e Sul de Minas; e VI) Planaltos da Bacia do Paraná.

A área de estudos está inserida no Cráton do São Francisco, na unidade morfoestrutural da Depressão do São Francisco ocupando a porção meridional da Bacia Sanfranciscana, sobre rochas Neoproterozóica do Grupo Bambuí.

As litologias que compõem o substrato da área correspondem a coberturas detríticas colúvio-eluviais, por vezes lateríticas cenozoicas, características de terraços e sedimentos aluviais recentes e inconsolidados (100 mil anos), originadas pela influência do rio São Francisco (Fig. 5). Este material sedimentar encontra-se depositado sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí, Formação Três Marias, de idade Neoproterozoicas, que é constituída por arcóseos e pelitos. A mineralogia principal destes depósitos é constituída, basicamente, por quartzo, argilas e óxidos de ferro e manganês (Trindade *et al.*, 2006).

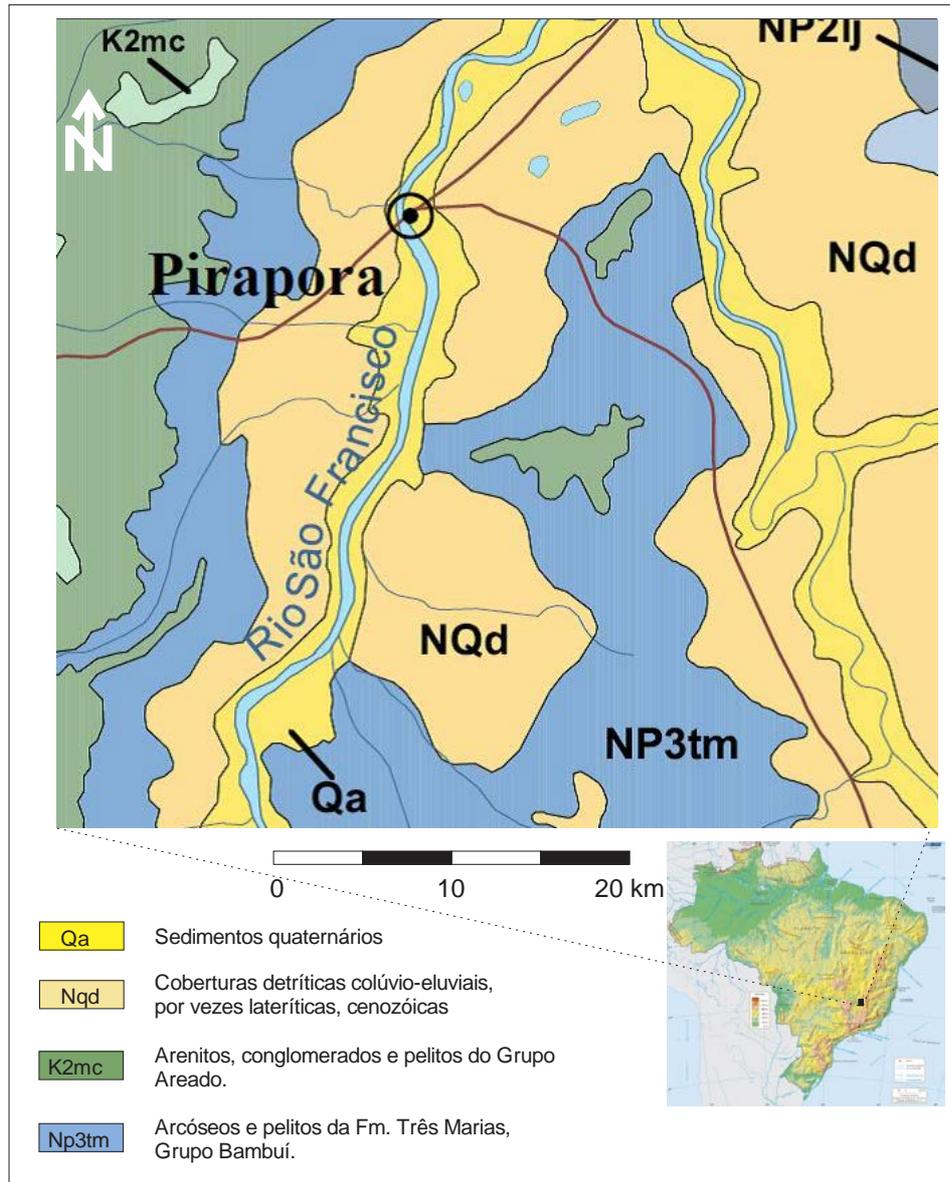


Figura 5. Mapa geológico da área estudada. Adaptado de CODEMIG (1994).

Figure 5. Geological map of the study area. Adapted from CODEMIG (1994).

Os solos da região são avermelhados, bem desenvolvidos, homogêneos, estruturados e bem drenados (Fig. 6). Embora os solos sejam bem drenados, comumente observa-se o desenvolvimento de gretas de contração evidenciando a presença de uma fração argilosa na sua estrutura primária. Junto à superfície também é comum observar a acumulação de óxidos de ferro cuja presença desenvolve o crescimento de crostas lateríticas (Fig. 7).



Figura 6. Foto de detalhe ilustrando a presença de solo arenoso a areno-argiloso, avermelhado, com estrutura maciça, homogêneo, friável, escarificável, fofo a medianamente compacto. *Figure 6. Photo detail illustrating the presence of sandy or sandy-loamy, reddish soil, with massive, homogeneous, friable, escarificável, fluffy the averagely compact structure.*



Figura 7. Solo com crosta laterítica. *Figure 7. Soil with lateritic crust.*

Na região estudada, o aquífero é livre e encontra-se em profundidades da ordem de 15 metros, com fluxo subterrâneo no sentido do Rio São Francisco. Dado que o aquífero tem origem predominantemente arenosa, as características hidrogeológicas indicam boa porosidade e permeabilidade.

2.2 Materiais

Os estudos desenvolvidos compreenderam a investigação geológica-geotécnica e ambiental do solo e da água subterrânea na área de estudos através de sondagens à percussão (SPT) e a trado, ensaios de infiltração, análises mineralógicas e granulométricas, análises geotécnicas e análises químicas. Também foi realizada a avaliação geotécnica em amostras de solo do Rio Grande do Sul, através de ensaios de compressão simples e determinação de índices físicos, para determinar a influência da contaminação com soda cáustica nas propriedades mecânicas de solos areno argilosos, como aqueles presentes na área de estudos.

2.3 Métodos

2.3.1 Sondagem e coleta de amostras de solo na área de estudos

As sondagens foram distribuídas na área da unidade fabril e seu entorno tendo como base os resultados dos estudos geofísicos existentes e a vistoria realizada no local (Fig. 8), sendo que os pontos foram locados onde se registraram baixos resistivos. Os baixos resistivos indicam a presença de água, que pode ou não estar contaminada, em maior proporção que nas adjacências. Ao todo foram realizados 7 (sete) sondagens SPT e 10 (dez) sondagens a trado manual a fim de caracterizar o perfil geológico e coletar amostras do solo para caracterização granulométrica, mineralógica, geotécnica e geoquímica. Nas sondagens a trado manual foram coletadas 6 amostras de solo nas camadas que apresentaram menor resistência à penetração e menor resistividade elétrica, de modo que a amostragem contemplasse os solos com maior probabilidade de contaminação (Tab. 1).

Tabela 1. Amostras de solo para análises mineralógicas e geotécnicas.

Table 1. Soil samples for mineralogical and geotechnical analysis.

Amostra	Profundidade amostrada (m)
AS-01	6,0 a 7,0
AS-03	0,0 a 1,0
AS-04	0,0 a 1,5
AS-04	1,5 a 6,8
AS-05	0,0 a 1,0
AS-05	6,0 a 7,0

2.3.2 *Difratometria de raios-X*

Análises mineralógicas foram realizadas em quatro amostras de solo coletadas na área de estudos, denominadas AS-01, AS-03, AS-04-a e AS-05-a, sendo a fração grossa caracterizada com uso de lupa binocular e a fração fina por difração de Raios-X. A difratometria de raios-X foi executada no laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, utilizando o método do pó.

2.3.3 *Ensaio geotécnicos*

Os estudos geotécnicos foram realizados com 6 (seis) amostras de solo do local estudado, denominadas AS-01, AS-03, AS-04a, AS-04b, AS-05a e AS-05b, através dos seguintes ensaios: granulometria, ensaio de compactação, Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade e Índice de Plasticidade. Estes ensaios foram executados nos Laboratórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT.

Também foram realizados ensaios granulométricos e de resistência a compressão uniaxial em duas amostras de solo do Rio Grande do Sul, DEMINE1 E DEMINE2, com características mineralógicas e texturais semelhantes aos solos da área estudada, sendo uma natural e outra contaminada com soda cáustica. Este ensaio permitiu avaliar a influência da infiltração de água contaminada com soda cáustica na resistência mecânica e na susceptibilidade à erosão hídrica subterrânea dos solos da área de estudos.

2.3.4 Análise ambientais

Análises ambientais foram executadas em quatro amostras de solo da área de estudos, coletadas com trado manual em duas sondagens. As coletas se deram na profundidade de 0,8 metros e na profundidade final de cada furo, que alcançou o topo da zona saturada (Tab. 2). As amostras foram analisadas no Laboratório CORPLAB em São Paulo/SP. As profundidades de coleta foram definidas a partir do levantamento geofísico, sendo selecionados os níveis que apresentaram anomalias eletrorresistivas, uma vez que estas representam potenciais de contaminação.

Tabela 2. Amostras de solo para análises ambientais.

Table 2. Soil samples for environmental analyzes.

mostra	Profundidade amostrada (m)
S-01	7,5
S-02	7,5
S-03	7,5
S-04	5,0
S-05	9,0
S-06	7,5
S-07	7,5
S-08	7,5
S-09	5,0
S-10	7,5

2.3.5 Ensaio de infiltração no solo

Os índices de permeabilidade do solo foram determinados na área de estudos através de ensaios de infiltração realizados em 7 (sete) furos SPT, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Relação de sondagem SPT e número de metros ensaiados.

Table 3. Probing ratio HFA and number of tested meters.

Furo	Profundidade sondada (m)
SP01	22,3
SP02	13,5
SP03	23,5
SP04	12,5
SP05	20,5
SP06	20,5
SP07	16,5

2.3.6 Amostragem e análises químicas de água subterrânea

Foi realizada a coleta de uma amostra de água subterrânea no único poço tubular profundo existente no local de estudo, utilizado para abastecimento da unidade industrial, com o objetivo de identificar a possível contaminação do aquífero. A amostra foi enviada ao Laboratório CORPLAB, São Paulo/SP, para a realização de análises químicas e físico-químicas.

2.3.7 Amostragem e análises geotécnicas de solo comparativo

A fim de avaliar a influência da contaminação com soda cáustica (NaOH) na resistência mecânica dos solos, foi realizada, posteriormente, a coleta de uma amostra de solo residual de alteração de rocha granítica, com aproximadamente 50 kg, em ponto localizado às margens da BR-116, no trecho entre Guaíba e Tapes/RS (Fig. 9). A amostra coletada foi separada em duas alíquotas, sendo uma mantida na sua condição natural (Amostra DEMINE/1) e a outra contaminada com soda cáustica numa solução com pH igual a 12,0 (Amostra DEMINE/2).



Figura 9. Local de coleta de solo para análises geotécnicas na Rodovia BR-116, município Tapes-RS.

Figure 9. Local of soil sampling for geotechnical analysis on Highway BR-116, RS-Tapes municipality.

As duas amostras foram enviadas ao Laboratório de solos da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, em Porto Alegre para a execução dos seguintes ensaios e parâmetros: granulometria, ensaio de compactação, Limites de Liquidez, Limites de Plasticidade, Índice de Plasticidade e ensaios de Resistência à Compressão não Confinada. Também foram realizados ensaios granulométricos nas duas amostras (DEMINE/1 e DEMINE/2) sem o uso de floculantes para verificar a influência da soda cáustica na aglutinação das partículas finas, principalmente os argilo-minerais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Sedimentologia do Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CECO).

2.3.8 Avaliação ambiental

A avaliação ambiental do solo e da água subterrânea na área de estudos foi realizada através de análises comparativas entre os resultados analíticos das amostras coletadas e valores de referência estabelecidos na legislação pertinente em vigor, assim como em normas técnicas específicas. Os resultados analíticos das amostras de solo e água subterrânea foram

comparados aos seguintes padrões de qualidade ambientais da Resolução CONAMA n° 420 de 2009.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização mineralógica

As amostras de solo obtidas no substrato do Pavilhão com problemas geotécnicos, analisadas por Difractometria de raios-X, são constituídas, basicamente, por quartzo, caulinita e hematita, além de feldspato alcalino, piroxênio e anatásio subordinados, nas frações silte e argila (Fig. 10). Já a fração areia, que representa de 60 a 80% da massa do solo, é constituída por quartzo e um pouco de feldspato alcalino.

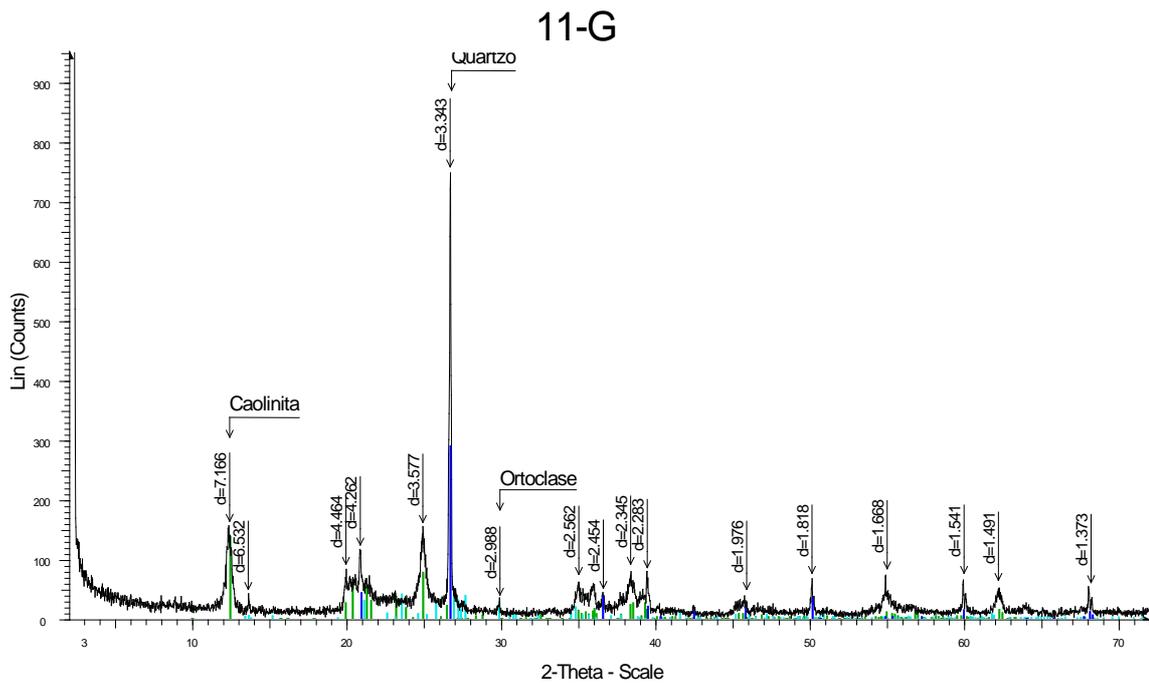


Figura 10. Difratomogramas de raios-X de amostra do solo do local.

Figure 10. X-ray diffractograms of the local soil sample.

3.2 Caracterização geotécnica

3.2.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios de SPT mostram a ocorrência de duas camadas com marcante diferença geotécnica no que se refere à resistência à penetração. Onde ocorre contaminação com soda cáustica, a camada mais rasa, com profundidade final variando de 7 a 8 metros, apresenta resistência inferior (Fig. 12). Fora da área sob influência de contaminantes, por outro lado, o solo tem comportamento diferente exibindo variações aleatórias na resistência à penetração, com valores elevados nos níveis mais superficiais. Os níveis superficiais têm natureza laterítica, o que lhes confere consistência mais rija e maior resistência à penetração, conforme observado na sondagem SPT-07 (Fig. 13).

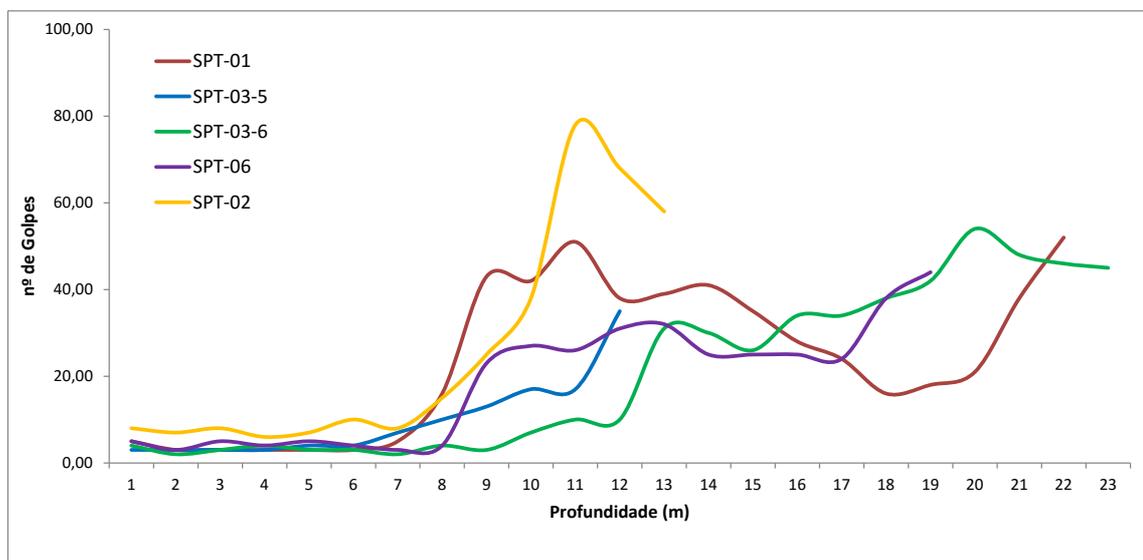


Figura 12. Resultados dos ensaios de SPT em locais sob influência de contaminação por soda cáustica.

Figure 12. Results of SPT tests in places under the influence of contamination by caustic soda.

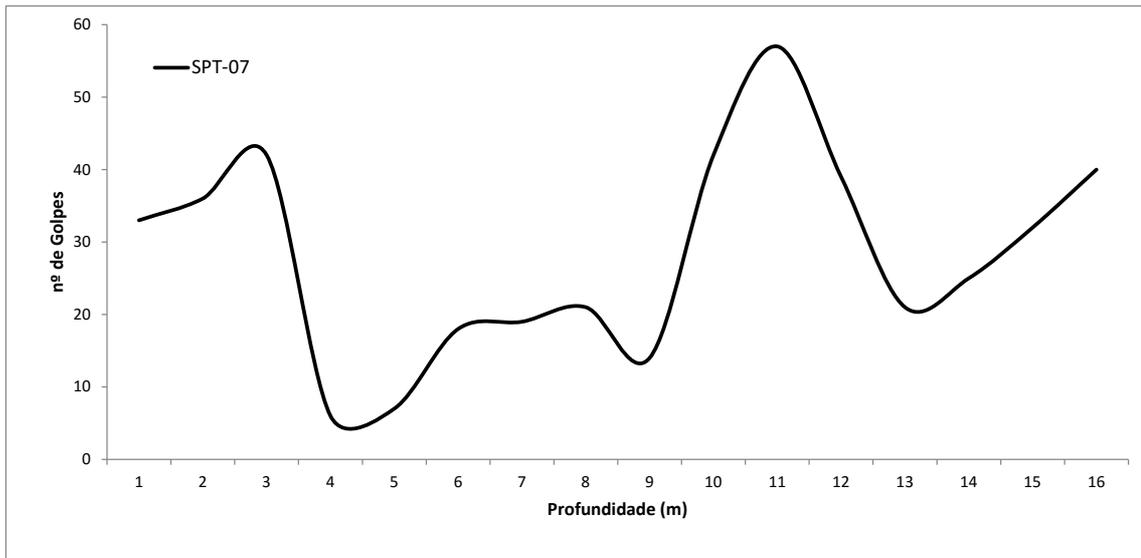


Figura 13. Resultados do ensaio SPT-07, em local sem influência de contaminação por soda cáustica.

Figure 13. Results SPT-07 test in place without influence of contamination by caustic soda.

3.2.3 Permeabilidade do solo

Os ensaios de infiltração realizados no local de estudos apontaram a ocorrência dominante de solos com baixa permeabilidade, cujos coeficientes variam de 10^{-3} a 10^{-7} cm/s (Tab. 4). De modo geral, a permeabilidade do solo diminui com a profundidade, o que é coerente com as variações granulométricas registradas, que se caracterizam pelo aumento da quantidade da fração argila e silte nos níveis mais profundos dos perfis contaminados, conforme mostrado na Figura 11. Cabe destacar que os ensaios realizados nos furos SPT-3 e SPT-4 não mostram esta tendência de redução da permeabilidade com a profundidade. As camadas do solo com maior percentual de finos apresentam menores índices de permeabilidade.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de infiltração realizados nas sondagens SPT na área de estudos.

Table 4. Results of infiltration tests conducted in SPT surveys in the study area.

Profundidade (m)	k (cm/s)						
	SPT-1	SPT-2	SPT-3	SPT-4	SPT-5	SPT-6	SPT-7
0,00 - 0,45	$4,20 \cdot 10^{-4}$	ND	ND	ND	ND	$8,89 \cdot 10^{-4}$	ND
1,00 - 1,45	ND	ND	ND	$3,75 \cdot 10^{-7}$	ND	$1,05 \cdot 10^{-3}$	ND
2,00 - 2,45	ND	$3,48 \cdot 10^{-4}$	ND	ND	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$
3,00 - 3,45	ND	ND	$9,60 \cdot 10^{-4}$	ND	ND	$8,30 \cdot 10^{-4}$	ND
4,00 - 4,45	ND	ND	ND	ND	ND	$2,40 \cdot 10^{-2}$	ND
5,00 - 5,45	ND	ND	ND	ND	ND	$1,31 \cdot 10^{-4}$	ND
6,00 - 6,45	ND	ND	$1,01 \cdot 10^{-3}$	ND	ND	$3,66 \cdot 10^{-4}$	ND
7,00 - 7,45	ND	ND	ND	ND	ND	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$3,40 \cdot 10^{-5}$
8,00 - 8,45	$5,26 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	$3,73 \cdot 10^{-5}$	ND	$1,90 \cdot 10^{-4}$	ND
9,00 - 9,45	$8,34 \cdot 10^{-5}$	ND	$2,02 \cdot 10^{-3}$	ND	ND	$4,51 \cdot 10^{-5}$	ND
10,00 - 10,45	$2,99 \cdot 10^{-7}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11,00 - 11,45	$1,50 \cdot 10^{-5}$	ND	$7,54 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	$1,07 \cdot 10^{-4}$	ND
12,00 - 12,45	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	$5,88 \cdot 10^{-6}$	$9,17 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$
13,00 - 13,45	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	ND	$1,23 \cdot 10^{-5}$	ND
14,00 - 14,45	$9,53 \cdot 10^{-4}$	ND	$8,78 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	$1,59 \cdot 10^{-5}$	ND
15,00 - 15,45	$1,61 \cdot 10^{-3}$	ND	ND	ND	ND	$1,64 \cdot 10^{-5}$	ND
16,00 - 16,45	$7,77 \cdot 10^{-4}$	ND	ND	ND	ND	$1,66 \cdot 10^{-5}$	ND
17,00 - 17,45	$2,49 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18,00 - 18,45	ND	ND	ND	ND	ND	$2,50 \cdot 10^{-5}$	ND
19,00 - 19,45	$1,33 \cdot 10^{-6}$	ND	$5,31 \cdot 10^{-3}$	ND	ND	ND	ND
20,00 - 20,45	$3,10 \cdot 10^{-6}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21,00 - 21,45	$2,56 \cdot 10^{-5}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND
22,00 - 22,45	$2,88 \cdot 10^{-7}$	ND	ND	ND	ND	ND	ND

3.2.4 Índices físicos

Os ensaios físicos realizados no Laboratório do IPT-SP apontaram a predominância na área estudada de material arenoso, com frações mais finas (argila e silte) concentradas nas amostras obtidas em profundidades maiores (Tab. 5). Todos os índices físicos apresentam uma correlação positiva com o teor de argila do solo, conforme mostra a Figura 14.

Tabela 5. Resultados dos ensaios geotécnicos das amostras de solo da área estudada.

Table 5. Results of geotechnical tests of soil samples from the study area.

Amostra	Prof. (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)	Ps (Kg/m ³)	LL(%)	LP(%)	IP(%)	Wót (%)	Pd máx (kg/m ³)
AS-01	6,00-7,00	31	10	8	40	9	2	2627	31	14	17	11,5	1923
AS-03	0,00-1,00	13	8	18	52	7	2	2594	23	11	12	9,1	2021
AS-04	0,00-1,50	12	11	14	54	8	1	2608	22	10	12	9,9	2009
AS-04	1,50-6,80	26	13	11	42	8	0	2635	29	14	15	10,8	1920
AS-05	0,00-1,00	22	6	13	52	6	1	2627	23	10	13	10,1	2001
AS-05	6,00-7,00	28	7	9	48	8	0	2606	32	17	15	11,3	1946

Ps: *Peso Seco*; LL: *Limite de liquidez*; LP: *Limite de plasticidade*; IP: *Índice de plasticidade*; Wót: *Umidade ótima*; Pd máx: *Massa específica aparente seca*.

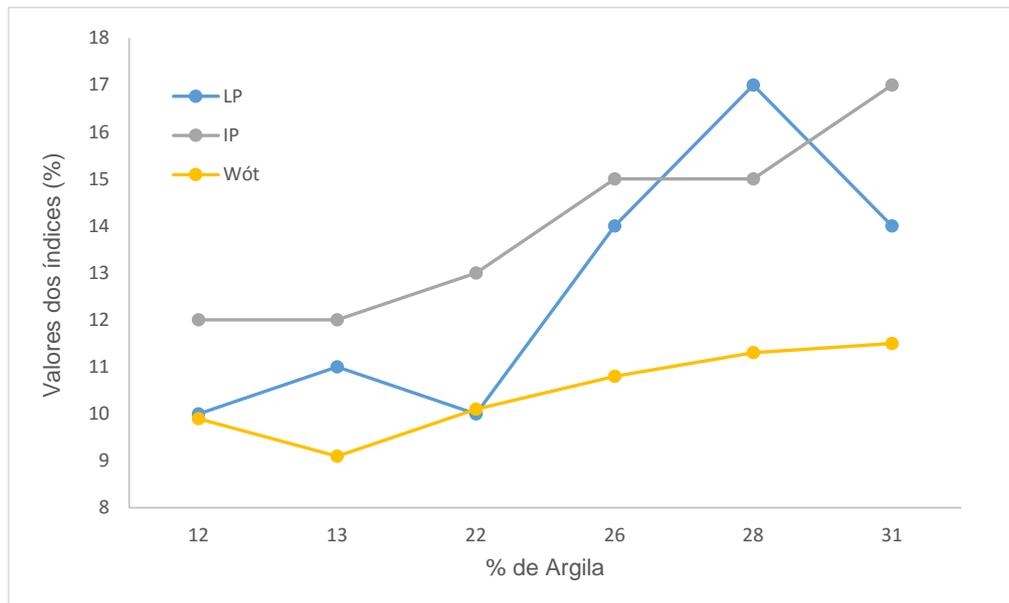


Figura 14. Gráfico mostrando a correlação positiva de índices físicos com o teor de argila do solo.

Figure 14. Graph showing the positive correlation of physical indexes with soil clay content.

3.2.5 Resistência à compressão simples

Ensaio de resistência à compressão simples foram executados para avaliar a influência da contaminação com soda na resistência à ruptura do solo. Para tanto foi coletada uma amostra de solo residual de um granito do Rio Grande do Sul, texturalmente similar àquela da área estudada, a qual foi dividida em duas alíquotas idênticas, sendo que em uma

delas (DEMINE1) foram mantidas as suas propriedades naturais e a outra foi contaminada com solução de soda cáustica de pH igual a 12 (DEMINE2). Ambas foram secas naturalmente e encaminhadas aos laboratórios da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC) para o determinado índice físico, ensaio de compactação proctor, energia normal e compressão não confinada, de resistência ao cisalhamento não drenada, de deformação específica axial na ruptura e de índices físicos.

Foram realizadas, também, análises granulométricas das duas alíquotas, determinando a fração de finos por decantação sem a utilização de defloculante nos ensaios. Os resultados destes ensaios permitem avaliar a influência da contaminação com soda cáustica na adesão das partículas do solo. O solo utilizado é siltico-argiloso, com proporções subordinadas de areia e pedregulho.

Para execução dos ensaios as amostras deformadas foram compactadas na umidade ótima.

Os resultados obtidos pelos ensaios granulométricos demonstram que a amostra contaminada com NaOH (DEMINE/2) apresenta teor de argila significativamente elevado em relação à amostra não contaminada (DEMINE/1). Isso decorre da propriedade defloculante da soda cáustica que gera a redução na intensidade das forças de adesão das partículas finas (Tab. 6) e interfere nas propriedades mecânicas do solo, conforme revelado nos ensaios de compressão simples apresentados a seguir.

Tabela 6. Granulometria das alíquotas de solo do Rio Grande do Sul utilizadas nos ensaios de compressão simples determinada segundo norma ABNT NBR6502/95. DEMINE/1: amostra natural; DEMINE/2: amostra contaminada com solução de NaOH com pH igual a 12.0

Table 6. Grain size of soil rates of Rio Grande do Sul used in simple compression tests determined according to ABNT NBR6502 / 95. Demine / 1: natural sample; Demine / 2: sample contaminated with NaOH with pH equal 12.0

Amostra	Argila	Silte	Areia			Pedregulho		
			Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
DEMINE/1	0%	52%	13%	8%	10%	16%	1%	0%
DEMINE/2	4%	43%	17%	7%	12%	15%	2%	0%

A redução na intensidade das forças de adesão das partículas finas, em particular as argilas, favorece a erosão hídrica subterrânea e consequente eluviação, retirando as argilas das camadas mais rasas e acumulando em camadas mais profundas dentro da zona saturada. Este fenômeno é observado na área estudada, no norte de Minas Gerais, onde foi constatada a existência de espaços vazios entre o piso e a superfície do solo, bem como o aumento da fração argila com a profundidade nas sondagens investigadas em diferentes níveis, nas áreas contaminadas.

Os índices físicos medidos também mostram variação considerável no grau de saturação, cujo valor diminui de 77,2 % na amostra natural para 71,3% na amostra contaminada. Os demais índices não apresentam diferenças significativas (Tab. 7).

Tabela 7. Índices físicos das amostras de solo natural (DEMINE/1) e contaminada com NaOH (DEMINE/2). Amostras coletadas na BR-116, RS.

Table 7. Physical indices of natural soil samples (MINI / 1) and contaminated with NaOH (Demine / 2). Samples collected in the BR-116, RS, Brazil.

	Corpo de prova (amostra)	DEMINE/1	DEMINE/2
Índices físicos	Teor de umidade – ω (%)	20,60	19,30
	Massa específica aparente seca – ρ_d (kg/m ³)	1581	1579
	Massa especificados grãos - ρ_s (kg/m ³)	2735	2757
	Índice de vazios (e)	0,73	0,75
	Grau de saturação - S_r (%)	77,20	71,30

Os ensaios de compressão simples apontaram a expressiva redução na resistência à compressão não confinada e na resistência ao cisalhamento não drenada, que são da ordem de 36%, e em menor intensidade na deformação específica axial na ruptura, cujo valor é próximo de 12% (Tab. 8). Estes resultados indicam a maior fragilidade mecânica da amostra contaminada por soda, de modo que sua capacidade de suporte a cargas é reduzida em comparação ao mesmo solo não contaminado.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. DEMINE/1: amostra natural; DEMINE/2: amostra contaminada com NaOH. Solo coletado na BR/116-RS.

Table 8. Results of strength tests to simple compression. OF MINE / 1: natural sample; Demine / 2: contaminated sample with NaOH. Soil collected in the BR / RS-116.

Corpo de prova (amostra)	Resistência à compressão não confinada (kPa)	Deformação específica axial na ruptura (%)
DEMINE/1	297,0	3,38
DEMINE/2	188,7	2,97
Variação da amostra natural para a contaminada	-36,5%	-12,1%

Deve ser destacado que a forte redução na resistência à ruptura por compressão simples na amostra contaminada com soda cáustica é acompanhada por leve redução no teor de umidade. Dado que a resistência à ruptura por cisalhamento possui relação direta com a intensidade das forças de coesão e inversa com o teor de umidade (Caputo, 1988), daqui se depreende que a soda interfere diretamente na coesão das partículas reduzindo a sua intensidade. Assim, um solo contaminado com NaOH terá, provavelmente, sua resistência mecânica prejudicada mesmo em condições de umidade tendendo a zero.

3.3 *Caracterização ambiental*

A avaliação dos impactos ambientais do empreendimento na área estudada foi realizada nos compartimentos solo e água subterrânea através da coleta de amostras e análises químicas dos parâmetros que se constituem em potenciais contaminantes por estarem presentes nos produtos utilizados nos processos industriais, bem como na limpeza do local. Os parâmetros analisados são o Na, Cl, surfactantes, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Ntotal, pH, TPH, 105 compostos orgânicos de petróleo voláteis (VOC) e semi-voláteis (SVOC) e 16 metais e semi-metais (Sb, As, Ba, B, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Ag, Se, V e Zn).

3.3.1 Solo

Foram realizadas análises químicas nas amostras de solo coletadas dentro do pavilhão e seu entorno (AS-01 a AS-10), nos locais que apresentaram anomalias geofísicas e em pontos próximos à canaleta de escoamento de efluentes com indícios de infiltração. O estudo geofísico por eletrorresistividade foi executado em 2011 e apontou diversos locais com fortes anomalias eletrorresistivas (baixa resistividade elétrica) que se estendem desde a superfície do terreno até profundidades da ordem de doze metros.

Os resultados analíticos obtidos apontam contaminação significativa de Na em sete amostras de solo, de sulfato em três, de nitrato em duas e de nitrogênio total em cinco (Tab. 9). Merece destaque o fato de que nenhum destes parâmetros é normatizado pela Resolução nº 420/2009 do CONAMA, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo. Os pontos contaminados com Na possuem boa correlação positiva com o pH, cujos valores são mais elevados que os demais (Fig. 15), o que só pode ser explicado pela origem de ambos a partir de uma fonte comum. Cabe destacar que o ambiente natural não registra compostos com Na e OH⁻, de modo que a ocorrência dos mesmos correlacionados pressupõe fonte antrópica, que na área estudada reside na soda cáustica utilizada nos processos de limpeza.

Tabela 9. Resultados das análises químicas ambientais em amostras de solo da área de estudos. Amostras com contaminação destacadas em negrito.

Table 9. Results of environmental chemical analyzes on soil samples from the study area. Samples with contamination highlighted in bold.

Parâmetro	Na	Surfactantes	Cl	NO ₃	SO ₄	NH ₄	N _{Total}	pH	
Amostra	Profundidade	mg/Kg							
AS-01	0,8 m	513	<2,3	<45,7	552	1305,6	3,8	35	9,34
	7,5 m	348	<1,2	<46,0	7,1	272,4	4,3	25	6,12
AS-02	0,8 m	32	<1,1	<44,3	<6,5	<55,4	22,9	53	5,71
	7,5 m	40	<1,2	<46,6	<0,81	<58	8,4	45	6,2
AS-03	0,8 m	51	<1,1	55	8,7	<55,4	22,5	57	<5,85
	6,5 m	439	<1,2	<47,5	25	<118,8	10,1	248	7,74
AS-04	0,8 m	41	<1,1	<44,2	16	<55,5	29,1	104	5,35
	5,0 m	148	<1,1	<46	6,3	<57,5	9,4	28	5,99

AS-05	0,8 m	31	<1,1	<43,3	9	<54,2	25,9	58	5,78
	9,0 m	28	<1,1	<45,2	1,8	<56,6	10,3	44	6,6
AS-06	0,8 m	11	<1,1	<45,3	1,7	<56,6	4,4	52	6,05
	7,5 m	103	<1,1	<45,2	8,9	<56,5	5,4	46	6,09
AS-07	0,8 m	156	<1,1	<43	2,8	<53,8	16,1	36	6,51
	7,5 m	34	<1,2	<48,2	2,1	<60,2	5,5	44	6,84
AS-08	0,8 m	31	<1,1	<43,5	11	<54,4	25,5	53	5,96
	7,5 m	24	<1,2	<46,9	2	<58,6	6,1	35	6,39
AS-09	0,8 m	33	<1,1	<43,4	18	<54,3	22,4	131	5,68
	5,0 m	384	<1,1	<45,6	70	563,8	10	114	7,98
AS-10	0,8 m	22	<1,1	<44,2	4,8	<55,2	19,3	<20	6,05
	7,5 m	34	<1,1	<43,4	1,7	<54,3	9,2	156	6,5

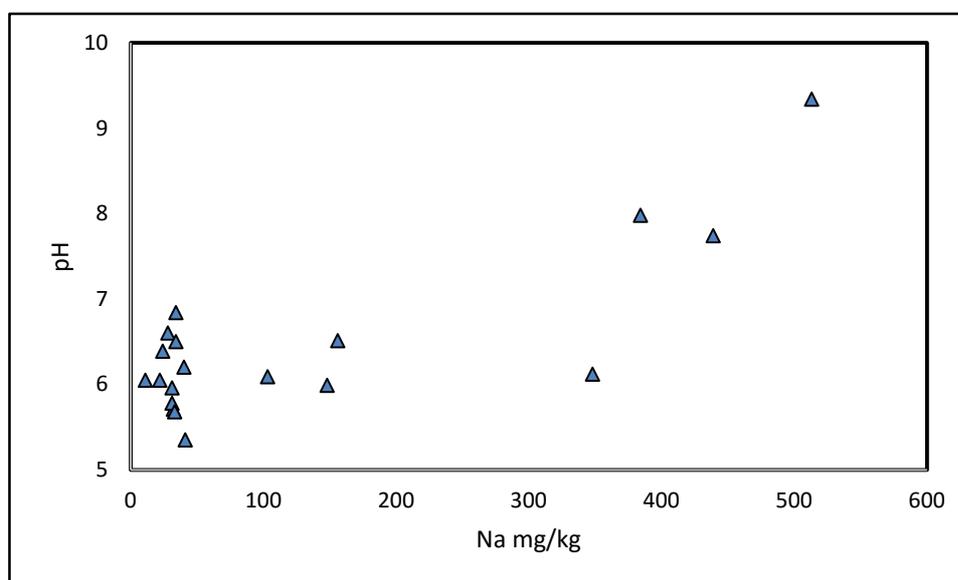


Figura 15. Diagrama de variação binário mostrando a correlação positiva entre o Na e o pH nas amostras contaminadas (triângulos). Note a falta de correlação nas amostras não contaminadas (círculos).

Figure 15. Binary variation diagram showing the positive correlation between Na and the pH of the contaminated samples (triangles). Note the lack of correlation of samples not contaminated (circles).

Os metais pesados e semi-metais analisados não apresentaram indícios de contaminação. Pb, Co, Cr, Ni, Ba, Zn e Cu registram concentrações baixas, condizentes com as características geoquímicas naturais do solo local, e os demais não foram detectados.

Todos os parâmetros orgânicos (TPH, VOC e SVOC) apresentaram concentrações menores que o limite de quantificação do método analítico utilizado.

3.3.2 *Água subterrânea*

A avaliação do impacto ambiental nas águas subterrâneas pelo empreendimento foi realizada através da análise química de uma amostra coletada no único poço tubular existente no local. O poço está localizado aproximadamente 50 metros a jusante da unidade industrial investigada. Os resultados obtidos apontam concentrações menores que os limites de quantificação dos métodos analíticos utilizados para todos os parâmetros, com exceção do B e Na que registram 294 mg/L e 39,35 mg/L, respectivamente, e pH de 6,91. Estas concentrações de B e Na são inferiores aos valores máximos permitidos para consumo humano estabelecido pela Resolução 396/2008 do CONAMA, que correspondem a 500 mg/L e 200 mg/L, respectivamente.

4 Conclusões

O estudo realizado na unidade industrial do Norte de Minas Gerais apontou a existência de patologias em edificações, tais como fissuras nas paredes, rachaduras e desníveis no piso de concreto e desalinhamento das fundações de equipamentos pesados. Pode-se observar também a ocorrência de infiltrações de efluentes, que contém soda cáustica em altas concentrações, gerados nos processos produtivos e de lavagem dos equipamentos e sistemas de drenagem. Estas infiltrações, localizadas nas canaletas de drenagem, resultam na contaminação do solo com Na e altos valores de pH. Nestes locais foram registrados espaços vazios entre o piso e a superfícies de base causados, provavelmente, por erosão hídrica subterrânea e conseqüente readensamento do solo.

As altas concentrações de Na e o pH alcalino do efluente que infiltra no solo são agravantes do comportamento geoquímico e mecânico da caolinita, principal argilomineral identificado no local, dadas as suas propriedades cristaloquímicas. Em ambiente alcalino e na presença de Na, a caolinita saturada em água combina-se com este metal, que tem forte potencial de hidratação, e perde a adesão dos cristais, sofrendo dispersão mecânica que potencializa a eluviação dos finos, causadora da erosão hídrica subterrânea observada. O efeito dispersivo do NaOH é bem conhecido nos estudos de solo na área agrônômica (Lima *et*

al., 1990; Cunha *et al.*, 2014, Borja *et al.*, 2015), onde esta substância é utilizada como defloculante nos ensaios granulométricos (Mauri *et al.*, 2011; Frenkel *et al.*, 1992).

O processo de eluviação promoveu o transporte vertical de partículas finas, principalmente de tamanho argila, dos níveis mais superficiais para os mais profundos, aumentando a porosidade das camadas superiores. Esta eluviação provocou a alteração da resistência mecânica dos solos, com deformação por adensamento e recalque, ocasionando abatimento da camada superficial e, conseqüentemente, das fundações. Os pontos onde houve abatimento estão nos locais de ocorrência das infiltrações e registram altas concentrações de Na e crescimento do teor de argila com a profundidade do solo.

A retração da resistência mecânica e a alteração de índices físicos de solo argiloso pela contaminação com NaOH ficou constatada pelos resultados dos ensaios de compressão simples. Estes ensaios registraram valores da ordem de 36% inferiores na resistência à compressão não confinada e ao cisalhamento não drenado, 12% menores na deformação específica axial na ruptura, assim como redução aproximada de 6% no grau de saturação e 1,3% no teor de umidade. A atuação deletéria da soda cáustica ocorreu tanto na adesão das partículas argilosas, promovendo sua dispersão e favorecendo a erosão hídrica subterrânea, quanto na coesão, reduzindo drasticamente a sua capacidade de carga. Os resultados aqui obtidos são concordantes com aqueles apresentados por Anandarajah & Zhao (2000) que registraram a redução da resistência à compressão triaxial de caolinita contaminada com fluidos intersticiais contendo NaOH e outros compostos.

A erosão hídrica e a perda de capacidade de suporte provocaram recalque do solo e conseqüentes danos nas edificações da indústria sob três aspectos: estruturais nas fundações do piso, arquitetônicos nas paredes da estrutura e funcionais ocasionado pelo desaprumo dos equipamentos de produção.

Os danos arquitetônicos e estruturais registrados ocorreram porque o dimensionamento das fundações foi feito com base nas características naturais do solo, sem a previsão da ocorrência de contaminação com soda.

Sob o ponto de vista ambiental, foi verificada na área de influência da indústria apenas a contaminação do solo com Na em sete amostras, SO₄ em três amostras e NO₃ em duas amostras, além de Na e B na amostra de água subterrânea. Os níveis de contaminação registrados não comprometem o uso das águas subterrâneas e do solo para qualquer fim, de acordo com CONAMA (2008 e 2009).

Referências bibliográficas

- Agnelli, N. & Albiero, J.H. 1994. Efeito da Colapsividade no resultado de provas de carga diretas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E FUNDAÇÕES*, 10., 1994, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, v. 1, p 167-174.
- Anandarajah, A. & Zhao, D. 2000. Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 126(2): 148-155.
- Borja, K., Mercado, J. & Combatt, E. 2015. Methods of mechanical dispersion for determining granulometric fractions in soils using four dispersant solutions. *Agronomia Colombiana*, 33(2): 253-260.
- Brancucci G & Paliaga G. 2006. The Hazard Assessment in a Terraced Landscape: Preliminary Result of the Liguria (Italy) Case Study in the Interreg III Alpter Project. 2006 ECI *Conference on Geohazards*, Lillehammer, Norway.
- Caputo, H. P. 1988. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 234p
- CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2008. Resolução nº 396. *Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências*. São Paulo, Sp. Publicação DOU nº 66, 2008, páginas 66-68
- CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009. Resolução nº 420. *Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas..* São Paulo, Sp. Publicação DOU nº 249, 2009, páginas 81-84
- Chittaranjan, M. & Rao, A.V. Narasimha, Effect of Soil Waste Interaction on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. Review 2012. *The IUP Journal of Soil and Water Sciences*, Vol. V, No. 1, February 2012, pp. 72-83.
- CODEMIG. Companhia Mineradora de Minas Gerais. 1994. *Geologic Map of Minas Gerais*. Minas Gerais, Governo do Estado de Minas Gerais, 2v. escala 1:500.000.
- Frenkel, H., Fey, M. V., and Levy, G. J. 1992. Critical flocculation concentration of reference and soil clays in the absence or presence of organic and inorganic anions. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6): 1762-1766.

- Cunha, G.O.M., Almeida, J.A., Barboza, B.B., Friederichs, A., Rech, C., Heberle, D.A. & Grohskop, M.A. 2014. Comparação de métodos de determinação de argila em diferentes solos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, 20(1/2): 126-136.
- Ignatius, S. G. & Pinto, C. S. 1991. Aspects on the behaviour of a soil in presence of a caustic chemical effluent. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL*, 2., 1991, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, p. 233-241.
- Kulhawy F.H. & Mayne P.W. 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Palo Alto, Electric Power Research Institute, 308p.
- Kumapley, N.X. and Ishola, A. 1985. The effect of chemical contamination on soil strength. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 11., 1985, San Francisco. Anais... San Francisco, p. 1199-1201.
- Lima, J.M., Curi, N., Resende, M. & Santana, D.P. 1990. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 14: 85-90.
- Maher, M. & Ho Y, 1992. Mechanical Properties of Kaolinite/Fiber Soil Composite. American Society of Civil Engineers.
- Mauri, J., Ruiz, H.A., Fernandes, R.B.A., Ker, J. C. & Rezende, L.R.M. 2011, Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1277-1284.
- Moncada, M.P.H. 2004. *Estudos em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo lateríticos*. Rio de Janeiro, 219p. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Sridharan, A., Rao, S.M. & Murthy, N.S. 1992. Physico chemical effects on compressibility of tropical soils. *Soil and Foundations*, 32: 156-163
- Sridharan, A., Rao, S.M. and Murthy, N.S. 1988. Liquid limit of kaolinitic soils, *Géotechnique*, 38(2): 191-198.
- Schmertmann, J. H. 1991. The Mechanical Aging of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 117(9):1288-1330.
- TEC GEO. Tec Geo Sondagens Geofísicas. 2011. *Relatório Geológico/Geofísico*. Florianópolis, TEC GEO, 34p.
- Terzaghi, K. & Peck, R.B. 1954. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York, John Willey & Sons. 566p.

5 ANEXO I - COMPROVANTE DO ARTIGO SUBMETIDO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 27 de abril de 2016.

Ao
Guilherme Toniolo

Venho comunicar o **recebimento** do manuscrito abaixo listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. O manuscrito será analisado quanto ao escopo, conteúdo e enquadramento nas normas de preparação da revista, para posterior início do processo de análise por pares.

Título: Caracterização geotécnica e ambiental de solo contaminado por soda cáustica em unidade industrial do norte de Minas Gerais.

Autores: Guilherme Toniolo, Antonio Pedro Viero & Clóvis Gonzatti.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Editor Chefe

Pesquisas em Geociências
Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, nº 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br