

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

PAULO VINICIUS DA SILVA

ANÁLISE DOS EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE A ERODIBILIDADE DE UM
SOLO RESIDUAL SAPROLÍTICO DE GNAISSE USANDO O CRITÉRIO MCT

Joinville

2019

PAULO VINICIUS DA SILVA

ANÁLISE DOS EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE A ERODIBILIDADE DE UM
SOLO RESIDUAL SAPROLÍTICO DE GNAISSE USANDO O CRITÉRIO MCT

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2019

PAULO VINICIUS DA SILVA

ANÁLISE DOS EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE A ERODIBILIDADE DE UM
SOLO RESIDUAL SAPROLÍTICO DE GNAISSE USANDO O CRITÉRIO MCT

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Dr. Marcelo Heidemann
Orientador
Presidente

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Fernanda Alquini
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, Seu Antônio Ribeiro da Silva e Dona Sirlei Volff
da Silva.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao universo, pelas dádivas da vida e da consciência. Neste pequeno ponto singular em que se fazemos materiais, experiências extraordinárias nos são possibilitadas. Dentre estas, pode se citar o amor da família e dos amigos. Nada se mostra mais grandioso que o apoio de um ente querido nos momentos em que a vida está nos ensinando. Assim, agradeço imensamente aos meus pais, Seu Antônio e a Dona Sirlei, pelo apoio incondicional e exemplo que dão a todos que os cercam. Agradeço a todos os meus irmãos, de sangue e de coração por serem o que são. Com certeza a existência de cada, exerceu influência no que hoje sou.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina por ter me proporcionado recursos financeiros que possibilitaram minha estadia em Joinville até o momento presente. Agradeço também aos professores Marcello Heidemann, Sergio Iderara, Vitor Takashi, Yader Gerreiro, Luiz Fernando Calil e ao professor Fabiano Wolff, por serem quem são. Posso afirmar que o exemplo e inspiração passada por estes, cada um à sua maneira, me motivaram a chegar até aqui.

Quem não vive segundo o que acredita não acredita.

(THOMAS FULLER).

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo acerca do potencial erosivo de solos residuais saprolíticos de gnaiss que ocorrem no estado de Santa Catarina, sul do Brasil. A avaliação da erodibilidade foi feita a partir da metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979), que se baseia em ensaios de infiltrabilidade e de erodibilidade específica. O solo estudado é siltoso, tem plasticidade média e apresenta elevado potencial erosivo em condição natural. Quando obras de terra expõe estes materiais à ação da água, feições erosivas severas acabam por se desenvolver, o que é visível em campo. Neste trabalho busca-se verificar os efeitos da desestruturação do solo natural sobre seu potencial erosivo e a capacidade de, por meio da compactação, restituir-se parte da resistência à erosão. Em laboratório foram realizados ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica em corpos de prova indeformados e compactados sob energias normal, intermediária e modificada. Os corpos de prova foram ensaiados em umidade natural e secos após 24, 48 e 96 horas. Ensaios de caracterização física básica foram também executados. A eliminação da macroestrutura natural torna os solos mais suscetíveis à erosão, e mesmo a compactação sob energia modificada não é capaz de conduzir a níveis de potencial erosivo similares aos medidos no solo indeformado. A secagem dos corpos de prova compactados reduz o potencial erosivo destes solos, enquanto no solo indeformado, os efeitos da secagem sobre o potencial erosivo são menos claros.

Palavras-chave: Solo residual. Erodibilidade. Indeformado. Compactado.

ABSTRACT

This paper presents the study on the erosive potential of gneiss saprolitic residual soils that occur in Santa Catarina state, southern Brazil. An erodibility assessment was made using the MCT methodology (NOGAMI and VILLIBOR, 1979), which is the basis of specific infiltrability and erodibility assays. The soil studied, has medium plasticity and presents high erosive potential under natural conditions. When earthworks expel these materials from the action of water, severe erosions eventually develop, or what is visible in the field. In this paper, we investigate whether the effects of natural soil disruption on its erosive potential and its capacity through compaction re-establish part of erosion resistance. In the laboratory, infiltration and erodibility tests were performed on undisturbed and compacted specimens under normal, intermediate and modified energy. The specimens were tested in natural samples and after 24, 48 and 96 hours. Basic physical characterization tests were also performed. Substitution of the natural macrostructure makes the soil susceptible to erosion, and even compaction under modified energy cannot lead to levels of erosive potential similar to those measured in undisturbed soil. Drying of compacted specimens has reduced the erosive potential of these soils, while undisturbed soil from the effects of drying on the erosive potential is less clear.

Keywords: Residual soil. Erodibility. Undisturbed. Compressed.

LISTA DE SIGLAS

24h	Amostras ensaiadas após secagem ao ar por 24 horas;
48h	Amostras ensaiadas após secagem ao ar por 48 horas;
96h	Amostras ensaiadas após secagem ao ar por 96 horas;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
EI	Amostras compactadas na energia intermediária;
EM	Amostras compactadas na energia modificada;
EN	Amostras compactadas na energia normal;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IND	Amostras indeformadas;
IP	Índice de Plasticidade;
IM	Inderbitzen modificado;
LL	Limite de Liquidez;
LP	Limite de Plasticidade;
MCT	Miniatura de Compactação Tropical;
NBR	Norma Brasileira;
RD	Razão de dispersão;
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos;
UM	Amostras ensaiadas na umidade de moldagem;
USDA	U.S. Department Agricultural.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal da amostra [cm ²];
cd	Com defloculante e agitação mecânica;
Δc	Porcentagem de perda de coesão;
E	Parâmetro de erodibilidade do critério MCT [%/cm ³ /√min];
EC	Energia de compactação [kJ/m ³]
K	Taxa de erodibilidade [g/cm ² /min/Pa];
kd	Índice de erodibilidade [cm ³ /N.s];
L	Comprimento [m];
La	Leitura inicial no tubo capilar [cm];
Lb	Leitura final no tubo capilar [cm];
Pi	Porcentagem de massa seca perdida [%];
Q	Vazão [m ³ /s];
s	Coefficiente de sorção [cm/√min];
S	Área da seção do tubo capilar [cm];
sd	Sem defloculante e agitação mecânica;
SR	Grau de saturação [%];
ta	Tempo inicial das leituras [min];
tb	Tempo final das leituras [min];
v	Velocidade [m/s];
WCot	Teor de umidade ótimo [%];
γd	Peso específico aparente seco [kN/m ³]
γ	Peso específico da água [N/m ³];
γs	Peso específico real dos grãos [kN/m ³]
τh	Tensão hidráulica [Pa];
τc	Tensão hidráulica crítica [Pa].

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 EROSÃO DO SOLO	15
2.2 ERODIBILIDADE DOS SOLOS	18
2.2.1 Determinação da erodibilidade	21
2.2.1.1 Proposta de abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade segundo Bastos (1999)	22
2.2.1.2 Dados preliminares.....	22
2.2.1.3 Observações in situ do comportamento do solo frente à erosão	23
2.2.1.4 Avaliação experimental da erodibilidade	24
2.2.1.4.1 Ensaio de Inderbitzen.....	24
2.2.1.4.2 Avaliação da erodibilidade a partir dos dados de caracterização geotécnica dos solos	27
2.2.1.4.3 Avaliação da erodibilidade a partir do critério MCT	28
2.2.1.4.4 Avaliação da erodibilidade a partir da coesão dos solos.....	31
2.2.2 Estudos anteriores	32
2.2.2.1 Rego (1978).....	32
2.2.2.2 Higashi (2006).....	39
2.2.2.3 Ide (2009)	41
2.3 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO SOBRE A ERODIBILIDADE.....	43
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.1 CONDIÇÕES GERAIS.....	48
3.2 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS.....	49

3.3	CONDIÇÕES PEDOLÓGICAS	52
3.4	DESCRIÇÃO DO LOCAL E INFORMAÇÕES GEOTÉCNICAS DISPONÍVEIS.....	52
4	METODOLOGIA	56
4.1	COLETA DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	56
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	57
4.2.1	Índices físicos.....	57
4.2.2	Granulometria	58
4.2.3	Limites de Atterberg	58
4.3	CURVA DE COMPACTAÇÃO	59
4.4	ENSAIOS DO CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE MCT.....	60
4.4.1	Preparação dos corpos de prova.....	60
4.4.1.1	Condição natural.....	60
4.4.1.2	Solo compactado	61
4.4.2	Execução do ensaio de infiltrabilidade	63
4.4.3	Execução do ensaio erodibilidade específica.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	66
5.2	CURVAS DE COMPACTAÇÃO	68
5.3	CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE ERODIBILIDADE	71
5.4	ENSAIOS DE INFILTRABILIDADE.....	74
5.5	ENSAIOS DE ERODIBILIDADE ESPECÍFICA	83
5.6	PARÂMETRO DE ERODIBILIDADE DO CRITÉRIO MCT	89
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural, responsável pelo desgaste da superfície terrestre e pelo transporte das partículas desgastadas, este processo pode ser induzido pela ação da água, do vento e das geleiras. Sendo assim, este processo ocorre no tempo geológico e em conjunto com outros fenômenos de movimento de massa, são responsáveis pela formação do relevo. No entanto, a ação humana de ocupação do solo feita de maneira desordenada, tem encadeado uma aceleração da erosão em muitas regiões, causando grandes impactos econômicos e ambientais. A este processo erosivo acelerado foi dado o nome de erosão antrópica (BASTOS, 1999).

O tipo de erosão mais frequentemente estudado é a erosão hídrica pluvial, por ser a que mais afeta a vida e as atividades humanas. Nesse processo erosivo existem quatro agentes envolvidos, a água, o relevo, a vegetação e o solo, destes agentes, o que é estudado pela geotecnia é o solo, por meio da avaliação de sua suscetibilidade à erosão, ou seja, sua erodibilidade (REGO 1978). De um modo geral, pode-se dizer que em um perfil de solo residual, as camadas mais próximas à superfície são mais resistentes à erosão, ao passo que as camadas mais profundas (solo saprolítico) são menos resistentes (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Deste modo, as encostas que ainda apresentam o perfil natural estão naturalmente protegidas da erosão. No entanto, quando estas, são escavadas para acomodar a expansão urbana ou servir de jazidas para obra de terra, as camadas mais suscetíveis podem ser expostas e sofrerem grande erosão, fato este ocorrido em Porto Alegre -RS como relatado por Bastos (1999) e em Bauru- SP, relatado por Ide (2009).

Segundo Nogami e Villibor (1995) e Bastos (2003), comumente solos bastante susceptíveis a erosão são utilizados na construção de aterros compactados. Isto pode ocorrer por falta de conhecimento do projetista, pela indisponibilidade de material de maior qualidade ou pelo fato deste material apresentar outras características que o qualificam como um bom material. Na região de Joinville-SC é comum a utilização de solos saprolíticos para construção de aterros e também há vários pontos na cidade, onde estes solos foram expostos devido à expansão urbana (HEIDEMANN, et al, 2018). No entanto, são poucos os estudos publicados sobre a erodibilidade destes solos na condição natural e menos ainda sobre a avaliação destes solos quando compactados.

Diante do que foi anteriormente exposto, este trabalho busca avaliar a erodibilidade de um solo residual saprolítico de gnaiss, que foi utilizado na construção dos aterros compactados

da obra da Universidade Federal de Santa Catarina, localizada no extremo sul de Joinville. Onde os processos erosivos já se encontram em estágio avançado, devido ao grande período que este material se encontra exposto. Fernandes (2015) mostrou que estes aterros não atendiam os parâmetros de compactação exigido, o que também pode ter colaborado para o aumento da erosão no local. Assim, busca-se neste trabalho avaliar a erodibilidade deste solo na condição indeformada e na condição compactada, variando a energia de compactação segundo os três níveis prescritos pela norma NBR 7182 (ABNT,2016). A fim de verificar se um maior controle da compactação teria minimizado os danos causados pela erosão. Para isto, os ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foram utilizados, comparando-se os resultados com o critério de classificação da erodibilidade proposto por Nogami e Villibor (1979).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos causados pela estrutura natural e pela compactação em diferentes energias, sobre a erodibilidade do solo em estudo.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar a caracterização geotécnica do solo;
- Obter as curvas de compactação do solo nas energias de compactação normal, intermediária e modificada, segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016);
- Determinar o parâmetro de erodibilidade E deste solo na condição indeformado e compactado;
- Comparar os parâmetros obtidos em cada condição de ensaio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação necessária para o desenvolvimento deste trabalho. A primeira parte traz a definição de erosão e suas variações, posteriormente discute-se sobre a erodibilidade dos solos e por fim são apresentados em ordem cronológica algumas pesquisas que contribuíram significativamente para o entendimento dos processos erosivos no meio geotécnico brasileiro.

2.1 EROSÃO DO SOLO

O termo erosão tem sua origem etimológica na palavra em latim ‘erodere’ que significa desgastar, corroer (BASTOS, 1999). De um modo mais abrangente a erosão pode ser definida como o conjunto de processos pelo qual os solos e rochas são desgastados e transportados de um ponto a outro. Sendo esta, diferenciada de acordo com o agente erosivo (água, erosão hídrica, vento, erosão eólica e gelo, erosão glacial), com o tipo (erosão laminar, erosão linear, erosão em sulcos, ravinas ou voçorocas) e a sua natureza (geológica ou antrópica) (IDE, 2009).

Segundo Bastos (1999) a erosão é um processo natural, considerado um agente geológico responsável pelas modificações do relevo terrestre. Este processo ocorre lentamente, sendo medido no tempo geológico. No entanto, a ação humana de ocupação do solo pode modificar este processo, aumentando seus efeitos e acelerando suas ações. Quando a interferência antrópica causa aceleração e aumento dos efeitos da erosão hídrica, tem-se então a erosão hídrica acelerada.

A erosão hídrica tratada neste trabalho, tem a chuva como agente erosivo, a qual manifesta sua ação por dois mecanismos: o impacto da gota e o escoamento superficial (BASTOS, 1999). A erosão provocada pelo impacto da gota, também chamada de efeito *splash* ou salpicamento, é caracterizada pelo desprendimento das partículas de solo devido ao choque da gota com a superfície. As partículas destacadas serão então carreadas pelo fluxo superficial, que se iniciará quando a intensidade da chuva superar a capacidade de infiltração do solo, dando assim início à erosão superficial ou laminar, a qual irá remover progressivamente as camadas superficiais (MIRANDA, 2005).

Naturalmente o fluxo laminar da água tende a encontrar caminhos preferenciais nas encostas. Esta concentração de fluxo passa, então, a desgastar o solo devido à abrasão, formando sulcos. Como pode ser observado na Figura 2.1, a partir da formação dos sulcos dois

processos erosivos distintos acontecem na encosta. Estes processos são designados por Bastos (1999), e Couto (2015) como erosão entre sulcos, onde os efeitos ocasionados pelo impacto das gotas e pelo fluxo laminar dominam o processo e, erosão em sulcos, onde o fluxo concentrado atua transportando as partículas destacadas pelas gotas e desgastando o leito do sulco, aumentando sua profundidade.

Figura 2.1: Feição erosiva em sulcos e entre sulcos



Fonte: Couto (2015)

O aumento do processo de sulcamento pela intensificação do fluxo encosta abaixo leva à formação de ravinas, que são feições erosivas mais profundas que os sulcos e podem se interligarem entre elas. Segundo Bastos (1999) neste estágio o processo erosivo apresenta significativa gravidade, pois compromete a regularidade da superfície e causa grande perda de solo, podendo as ravinas evoluir para as voçorocas, que são as feições mais devastadoras da erosão.

As voçorocas podem ser definidas como feições erosivas de grandes dimensões, algumas vezes com dezenas de metros de profundidade e quilômetros de extensão, provocadas pelo intenso fluxo superficial, muitas vezes concomitante com o fluxo subterrâneo (BASTOS,1999). Na fase de voçoroca o processo erosivo caracteriza-se pela combinação de vários fatores como, erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desmoronamentos e escorregamentos, conferindo a este tipo de erosão, rápida evolução e elevado poder destrutivo, como pode ser observado nas Figuras 2.2 e 2.3 a seguir.

Figura 2.2: Vista da extensão linear de uma voçoroca numa área de cultivo em São Paulo



Fonte: Miranda (2005)

Figura 2.3: Voçorocas na região Estação Holanda Minas Gerais



Fonte: Futai et al (2005)

Para Bastos (1999) a aparente simplicidade na concepção esconde a alta complexidade dos mecanismos envolvidos no processo erosivo. A multidisciplinaridade e a interrelação dos

fatores intervenientes no processo é a principal causa de dificuldades no seu estudo. Segundo Rego (1978) e Bastos (1999), os principais fatores que influenciam o processo erosivo são:

- **O clima** – dentre os fatores climáticos a chuva é o mais atuante, pois é a causa direta da erosão pelo impacto das gotas sobre o terreno e determina o fluxo concentrado das águas que escoam pelas encostas. Seu efeito erosivo é chamado de erosividade que é uma propriedade dependente da distribuição pluviométrica (intensidade e distribuição acumulada da chuva);
- **O relevo** – a declividade, a forma (côncava ou convexa) e comprimento de rampa das encostas, influem diretamente na concentração e velocidade dos escoamentos superficiais, conseqüentemente governando sua capacidade erosiva;
- **A vegetação** – a cobertura do solo interfere diretamente na quantidade de gotas que se chocam com a superfície e velocidade dos escoamentos. Uma vegetação mais densa significa menor quantidade de gotas que chegam ao solo e maior evaporação da chuva, o emaranhado de raízes também contribui na estabilização do solo e aumento de sua capacidade de infiltração, sendo assim um grande protetor contra a erosão;
- **O solo** – a natureza pedogenética do solo, sua composição mineralógica e granulometria, por exemplo, são alguns dos fatores influentes na sua maior ou menor suscetibilidade aos processos erosivos. Esta propriedade é chamada de erodibilidade e será alvo de um estudo mais aprofundado a seguir.

2.2 ERODIBILIDADE DOS SOLOS

Como dito na seção anterior há uma série de fatores que se correlacionam no processo erosivo. No que tange à geotecnia o fator de maior interesse é o solo, ou seja, as propriedades deste que influenciam na sua resistência á erosão. Segundo Araújo (1994) e Nogami e Villibor (1995) a propriedade do solo que caracteriza seu comportamento frente à erosão é chamada de erodibilidade. Assim, esta propriedade qualifica o quão suscetível determinado solo é aos processos erosivos.

Shwab et al. (1967) apud Rego (1978), trataram inicialmente a erodibilidade sob conceitos distintos. Os autores afirmaram que a influência dos solos nos processos erosivos

estaria ligada à desagregabilidade e à transportabilidade destes. Estas características são em geral associadas à granulometria dos solos, assim, solos com maior concentração de argilas seriam menos desagregáveis e solos com partículas maiores seriam menos transportáveis (REGO, 1978). Nascimento (1952) apud Rego (1978) associou a desagregabilidade dos solos à sua coesão e transportabilidade à granulometria.

Nogami e Villibor (1995), salientam que a erodibilidade dos solos está relacionada com as suas seguintes características:

- **Granulometria e constituição mineralógica e química**- a granulometria influi de maneira indireta na erodibilidade, materiais com grãos acima de 5 mm são resistente à erosão em qualquer condição. As areias limpas são estáveis nos taludes, porém perdem esta estabilidade sob à ação de lâminas d'água. Já os siltes são erodíveis em qualquer situação. Quanto às argilas texturais (partículas $\leq 2\mu\text{m}$) seu comportamento depende da constituição mineralógicas e/ou química dos grãos e do local onde se encontram. Assim, uma argila textural pode ser bastante resistente à erosão, em talude natural, se tiver desenvolvido uma agregação forte e perderá sua resistência, caso essa agregação venha a ser rompida por chuvas de elevada energia cinética. O fator mineralógico influi na formação das agregações e seu comportamento após a sua destruição e compactação. A laterização é um processo pedológico que atua concomitantemente na agregação e nas suas características mineralógicas;
- **Estrutura e macrofábrica**- o conceito de fábrica dos solos é usado para designar as características de disposição espacial de seus constituintes sólidos, dos seus vazios e das suas superfícies de descontinuidades. Já o conceito de estrutura engloba estas características juntamente com os aspectos do tipo de ligação entre os constituintes e natureza dos mesmos. O termo macrofábrica refere-se à fábrica dos solos que podem ser identificadas a olho nu. Sendo que do ponto de vista da erodibilidade dois tipos de macrofábrica dos solos merecem maior importância. A macrofábrica **agregada com torrões**, caracterizada pela aglomeração das frações argila e silte, formando grumos ou torrões visíveis. Estas agregações juntamente com descontinuidades têm grande influência no comportamento mecânico e hidráulico dos solos em estado natural, no entanto, estas características são parcialmente destruídas no processo de compactação. Este tipo de macrofábrica ocorre geralmente na parte mais superficial do perfil do subsolo, naturalmente mais resistentes à erosão. E a macrofábrica **herdada**,

esta é caracterizada pela conservação das feições da rocha mãe na formação dos solos, sendo estes designados solos saprolíticos. Este tipo de macrofábrica é um tipo genético associado a forças coesivas muito diferentes e quando apresenta feições lineares, estas podem controlar o processo de formação de sulcos e ravinas. Sendo geralmente os solos desta origem genética, muito erodíveis;

- **Permeabilidade e infiltrabilidade** – a permeabilidade de um solo pode ser entendida como a resistência que este oferece ao fluxo da água quando saturado, já a infiltrabilidade relaciona-se com capacidade de infiltração da água no solo quando este não está saturado, condição esta onde encontram-se tensões capilares e de sucção, apreciáveis. Estas propriedades geralmente estão associadas à granulometria, composição mineralógica e estrutura dos solos, no entanto, de modo muito complexo, sendo que não se pode inferir nenhuma associação destas propriedades sem que sejam feitos ensaios específicos. A infiltrabilidade do solo se correlaciona com a erodibilidade pelo fato que governa a formação do fluxo superficial, causador da erosão. Se a infiltrabilidade for maior que a precipitação os efeitos erosivos serão mínimos;
- **Coesão** - esta propriedade governa a resistência dos solos na camada mais superficial onde a tensão normal efetiva é muito baixa. Solos com elevada coesão independentemente da umidade, serão sempre mais resistentes à erosão. Ao passo que solos sem coesão são geralmente erodíveis, pois não resistem às tensões cisalhantes impostas pelo fluxo de água e ao impacto das gotas de chuva.

Na tentativa de relacionar a erodibilidade aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, muitos autores têm estudado a influência da sucção matricial nesta propriedade. Fácio (1991) apud Bastos (1999), identificou uma tendência das amostras de um mesmo solo perderem mais massa ao passo que fossem ensaiadas em umidades menores, ou seja, sob tensões de sucção matricial elevadas. A explicação dada pelo autor é que para elevadas tensões de sucção (umidades baixas), a água infiltra muito rapidamente no solo e não há tempo para a expulsão do ar presente nos vazios, o que gera poropressões que podem romper o solo se este apresentar baixa coesão verdadeira. Os resultados apresentados por Almeida (2014) e Sousa et al. (2016) corroboram com esta explicação. Estes autores estudaram alguns solos tropicais do estado de Goiás e constataram que há uma relação inversamente proporcional entre a umidade da amostra no início do ensaio e a erosão medida no ensaio de Inderbitzen.

Araújo (1994) constatou que solos com alta suscetibilidade à erosão apresentam curvas de retenção de água com elevada inclinação na faixa de sucção matricial de 0 a 10 kPa. Já Bastos (1999) conclui que os solos mais erodíveis apresentam elevada perda de coesão, quando submetidos ao ensaio de cisalhamento direto na condição de umidade natural e saturada, respectivamente.

2.2.1 Determinação da erodibilidade

Segundo Araújo (1994), as primeiras tentativas de quantificação da erosão foram feitas em 1915 pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos da América. No entanto, o primeiro autor a correlacionar propriedades do solo com sua erodibilidade foi Bennett (1926) apud Middleton (1930), em seu trabalho pioneiro, o autor associou a relação sílica-sesquióxidos com a resistência à erosão de solos de Cuba. Posteriormente Middleton (1930) apresentou o parâmetro RD (Razão de Dispersão), definido pela equação 2.1, como sendo um parâmetro de avaliação da erodibilidade do solo. Segundo este critério solos com $RD > 15\%$, são erodíveis enquanto solos com $RD < 15\%$ são resistentes a erosão.

$$RD = \frac{(\%silte + \%argila)sd}{(\%silte + \%argila)cd} \quad \text{equação 2.1}$$

Onde: *sd* refere-se às porcentagens de silte e argila obtidas do ensaio de granulometria, sem o uso do aparelho dispersor e defloculante e *cd* refere-se às respectivas porcentagens obtidas no mesmo ensaio, com uso do aparelho dispersor e defloculante, para este caso siltes são definidos como partículas maiores que 0,002 mm e menores que 0,05 mm.

Bastos (1999) estudando solos tropicais de Porto Alegre conclui que o parâmetro RD é satisfatório para uma avaliação qualitativa da erodibilidade, porém com um limite maior, sendo o valor de $RD > 50\%$, um limite adequado para separar os solos potencialmente erodíveis. Entretanto, Bastos (2003) ressalta que sendo considerados erodíveis os solos pelo critério $RD > 50\%$ não implica serem considerados dispersivos. Pois a dispersibilidade está associada às argilas, enquanto o parâmetro RD considera a soma das parcelas de silte e argila, podendo um solo siltoso apresentar elevado valor de RD e sua porção de argila não ser dispersiva. Segundo Middleton (1930), os valores de $RD < 15\%$, estão associados a solos argilosos, sendo que, na condição natural as partículas de argila destes solos, encontram-se na forma de grumos, que não são destruídos pelo simples contato com água, conferindo-lhes assim, elevada resistência à erosão.

Em seu trabalho, Bastos (1999) apresenta diversos métodos para avaliação da erodibilidade dos solos e os avalia correlacionando-os com o comportamento observado em campo de quatro solos diferentes. Por fim, o autor apresenta uma proposta de abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade, segundo os ensaios e critérios que representaram melhor as condições de campo e tiveram melhor validade estatística. Esta proposta e alguns destes ensaios serão apresentados a seguir.

2.2.1.1 Proposta de abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade segundo Bastos (1999)

Segundo o referido autor em obras geotécnicas, em que um dado perfil de solo residual será exposto, há a necessidade de se avaliar a erodibilidade dos solos deste perfil. Nesta condição, diferentes horizontes podem estar sujeitos à ação de águas pluviais, o que pode desencadear um processo de erosão hídrica acelerada. Para tanto, a seguinte metodologia deve ser seguida:

- Reunião de dados preliminares sobre o problema e o perfil de solo envolvido;
- Observações do comportamento dos solos em campo frente à erosão;
- Avaliação da erodibilidade dos solos em laboratório.

2.2.1.2 Dados preliminares

Nesta etapa deve ser levantadas informações sobre as características do problema, sobre os condicionantes externos e sobre os perfis de solos envolvidos. Estas informações podem ser agrupadas segundo o Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Informações preliminares para o estudo da erodibilidade dos solos em obras geotécnicas

Características geométricas do problema	A partir do projeto de engenharia tomar ciência da profundidade dos cortes, da extensão das terraplanagens e de outras especificações que vão indicar quais os horizontes do perfil envolvido e a forma na qual serão expostos;
Caracterização geológica e pedológica dos perfis de solos envolvidos	Caracterizar o perfil de solo típico da área a partir de levantamentos geológicos e pedológicos pré-existentes e informações obtidas <i>in situ</i> ;
Posição do perfil na geomorfologia local	Identificar a posição do perfil exposto no contexto da encosta, considerando principalmente os aspectos referentes à drenagem da mesma;
Descrição <i>in situ</i> do perfil do solo local	Obter <i>in situ</i> dados morfológicos de interesse como distribuição e espessura dos horizontes, macroestrutura de origem pedológica e geológica e condições de drenagem.

Fonte: adaptado de Bastos (1999)

Estas informações preliminares são úteis na interpretação do comportamento observado em campo e auxiliam a tomada de decisão sobre os procedimentos a serem seguidos para a avaliação da erodibilidade dos solos envolvidos.

2.2.1.3 Observações *in situ* do comportamento do solo frente à erosão

Tendo levantados e identificados os diferentes horizontes de solo que estarão envolvidos nas obras de terra, avalia-se o comportamento dos solos frente à erosão nas áreas de influência destas. Devem ser levantados e investigados quaisquer ocorrências de processos erosivos nestes locais, sejam eles no perfil natural ou em partes já alteradas pela ação humana. Na interpretação destes processos, deve-se levar em conta a posição topográfica e a inserção dos taludes no contexto da encosta, a drenagem dos taludes e da encosta, a vegetação local e os demais fatores que podem influenciar as condições de fluxo superficial na área.

A suscetibilidade à erosão pela ação do fluxo superficial dos principais horizontes envolvidos deve ser investigada. A hierarquização da suscetibilidade em alta, média e baixa erodibilidade dos diferentes horizontes, embora subjetiva deve ser associada a estes, conforme as observações de campo. Estas anotações ajudarão na interpretação dos dados experimentais obtidos.

2.2.1.4 Avaliação experimental da erodibilidade

Segundo a metodologia que está sendo apresentada a avaliação da erodibilidade dos solos em laboratório pode ser feita de forma direta e indireta. A avaliação direta consiste na medição da quantidade de massa que é erodida de um dado solo no ensaio de Inderbitzen. A avaliação indireta consiste na correlação de algumas propriedades e parâmetros que melhor se relacionam com o comportamento dos solos frente à erosão. Estes parâmetros são medidos ou qualificados, segundo ensaios específicos. A avaliação indireta da erodibilidade segue três níveis hierárquicos representados por cada grupo de parâmetros dos solos, sendo estes:

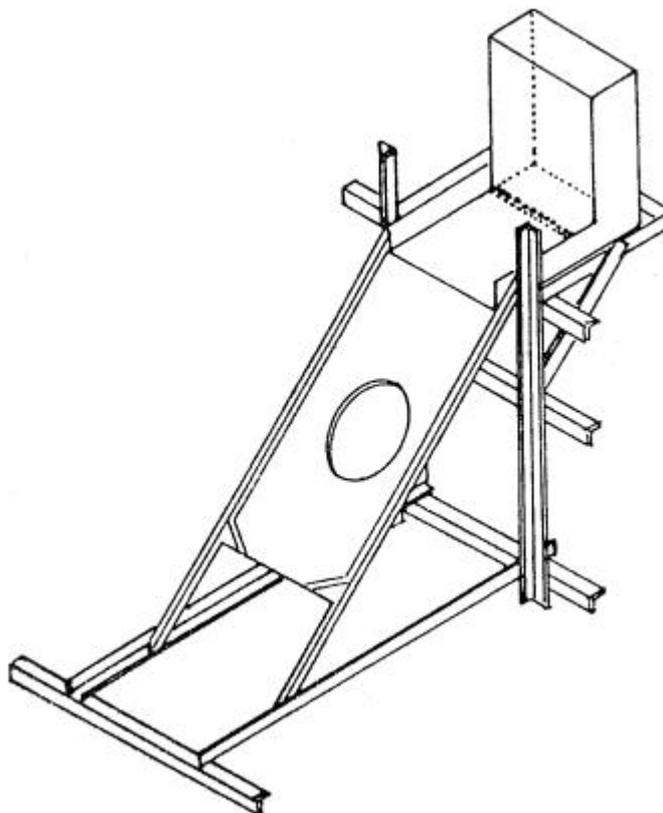
- Nível 1 – caracterização geotécnica dos solos;
- Nível 2 – ensaios da metodologia MCT;
- Nível 3 – ensaios de resistência ao cisalhamento.

Segundo o autor, as informações obtidas na avaliação indireta complementam-se ao passo que o somatório da aplicação dos critérios melhor representa a erodibilidade dos solos e viabiliza a tomada de decisão em projetos. O peso relativo de cada critério é crescente com o nível e possíveis conflitos na aplicação dos critérios devem ser julgados pelo engenheiro, com base neste peso relativo. O autor salienta que a utilização da avaliação indireta deve ser aplicada na impossibilidade da avaliação direta ou como informação complementar no estudo da erodibilidade. A seguir apresentam-se os ensaios e critérios, segundo as avaliações direta e indireta da erodibilidade.

2.2.1.4.1 Ensaio de Inderbitzen

Segundo Bastos (1999), Inderbitzen apresentou pela primeira vez seu aparelho para quantificação da erosão em 1961. Com a difusão do método de ensaio no meio geotécnico este passou a ser chamado pelo nome do respectivo criador. O aparelho de Inderbitzen consiste basicamente num plano inclinado com um orifício central para acomodação da amostra, de modo que a superfície desta, coincida com o plano do aparelho, como pode ser visto na Figura 2.4.

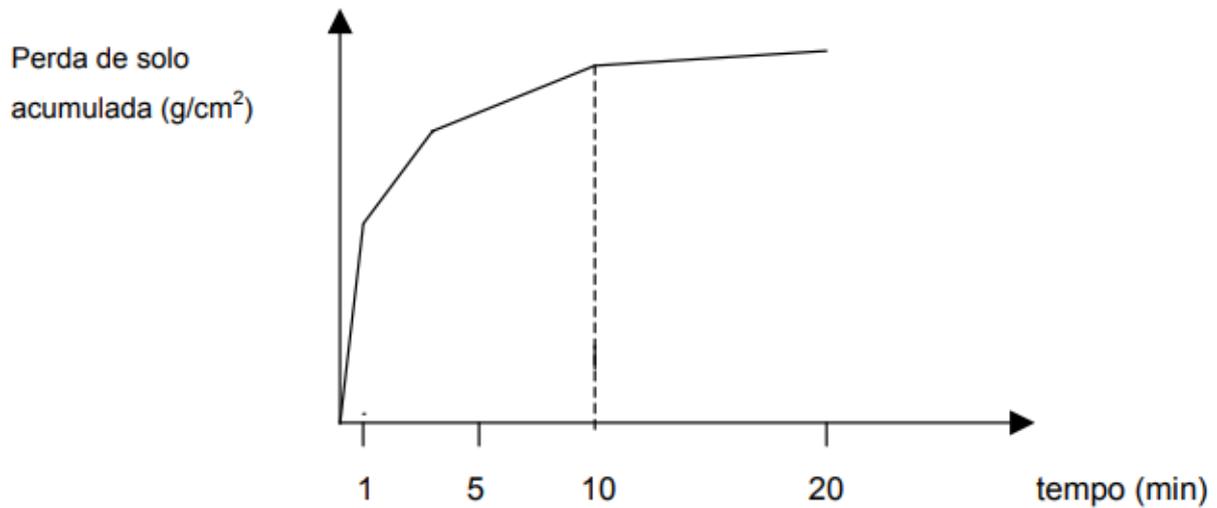
Figura 2.4: Aparelho de Indebitzen utilizado na pesquisa de Estabilidade de Taludes DNER 1975-1979



Fonte: Bastos (1999)

O ensaio de Indebitzen consiste em submeter as amostras de solo à ação de um fluxo superficial à uma vazão constante. A massa de solo erodida e a água escoada são coletadas em tanques, nos tempos de ensaio de 1, 5, 10 e 20 minutos. Em seguida, realiza-se o peneiramento úmido do solo erodido nas peneiras de malha 4,8 mm, 2,00 mm, 0,42 mm e 0,074 mm. O material retido em cada peneira é seco em estufa para determinação do seu peso e, a fração passante na peneira 0,074 mm, é estimada a partir da determinação da quantidade de material contido em uma amostra representativa da água homogeneizada, assim pode avaliar o tamanho das partículas que estão sendo destacadas. O ensaio é encerrado aos 20 minutos e os resultados são plotados em um gráfico em massa acumulada/unidade de área x tempo. Uma curva típica do ensaio é mostrada na Figura 2.5. Segundo o idealizador do ensaio, o equipamento simula de maneira aproximada o comportamento do solo sob a ação de fluxo laminar em condições de campo e, tem como vantagem, a possibilidade de ensaiar amostras indeformadas e compactadas em diferentes condições de umidade sob diferentes condições de vazão e inclinação.

Figura 2.5: Curva típica para o ensaio de Indebitzen



Fonte: Bastos (1999)

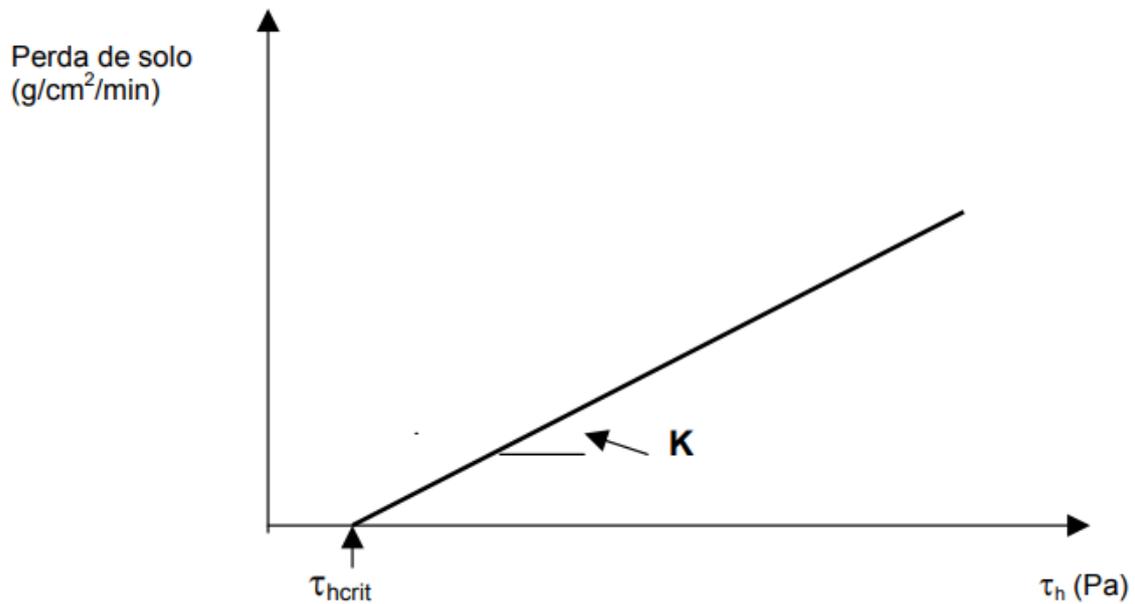
O ensaio deve ser realizado em diferentes condições de vazão e inclinação da rampa para que se tenha a variação da tensão hidráulica atuante. Como o ensaio não é normatizado a determinação destas variáveis deve ser feita pelo engenheiro, baseando-se em trabalhos anteriores e nas inclinações dos taludes da obra para a qual se está avaliando a erodibilidade.

Para determinação da taxa de erodibilidade K os diferentes valores de tensão hidráulica atuante, determinados pela equação 2.2, são plotados num gráfico (Figura 2.6) em função das respectivas perdas de massa acumulada. Uma reta é ajustada para tal distribuição, sendo que K é a inclinação desta reta e o ponto que intercepta o eixo horizontal é a tensão hidráulica crítica (τ_{hc}), definida como a máxima tensão hidráulica para a erosão nula.

$$\tau_h = \frac{\gamma Q d}{v L} \text{ [Pa]} \quad \text{equação 2.2}$$

onde: γ é o peso específico da água [N/m³], Q é a vazão [m³/s], d é a declividade da rampa, v é a velocidade do escoamento [m/s] e L é a largura da calha [m].

Figura 2.6: Determinação dos parâmetros K e τ_{hc} a partir do ensaio de Indebitzen



Fonte: Bastos (1999)

Para a qualificação do solo frente ao processo erosivo por meio do parâmetro K obtido no ensaio em amostra na umidade natural o seguinte critério é proposto por Bastos (1999):

- $K < 0,001$ g/cm²/min/Pa – solos com baixa erodibilidade;
- $0,001 \leq K \leq 0,1$ g/cm²/min/Pa – solos com mediana erodibilidade;
- $K > 0,1$ g/cm²/min/Pa – solos com alta erodibilidade.

2.2.1.4.2 Avaliação da erodibilidade a partir dos dados de caracterização geotécnica dos solos

Para todo estudo em engenharia geotécnica estabelece-se como premissa básica, a caracterização dos solos pelos ensaios de granulometria e ensaios de limites de consistência. Bastos (1999) propõe como uma estimativa prévia para a avaliação da erodibilidade dos solos, critérios estabelecidos em parâmetros obtidos nestes ensaios, sendo estes critérios os seguintes:

- Se, % passante na peneira # 200 < 55 % e/ou índice de plasticidade < 10 %, solos potencialmente erodíveis;
- RD > 50 %, solos potencialmente erodíveis, este parâmetro foi apresentado no item 2.2.1.

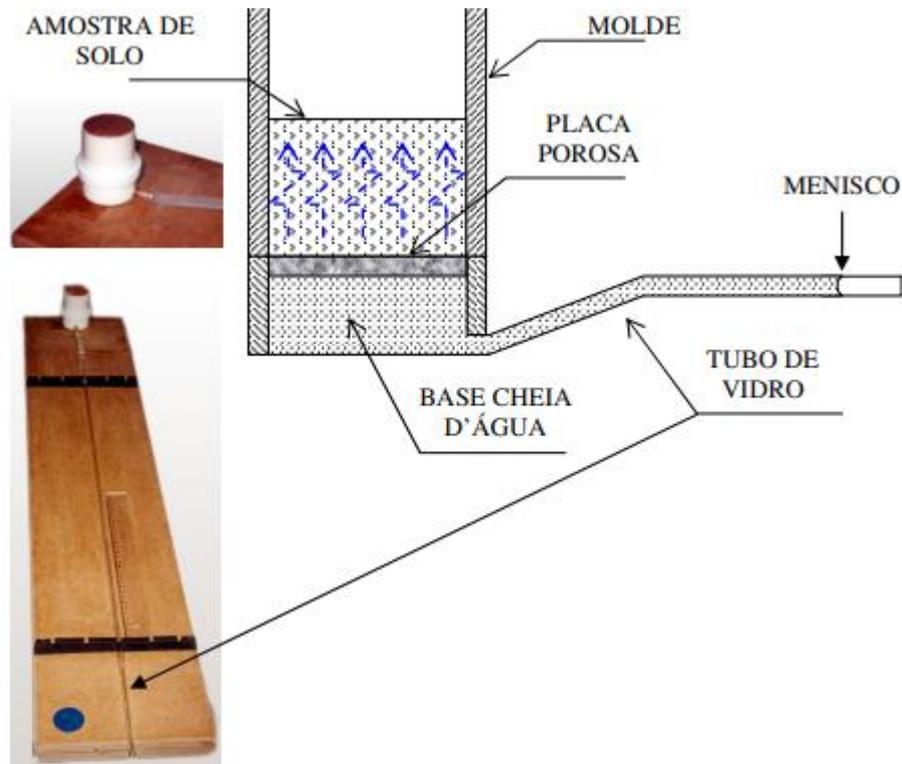
2.2.1.4.3 Avaliação da erodibilidade a partir do critério MCT

A avaliação da erodibilidade pelo critério MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), foi inicialmente proposta por Nogami e Villibor (1979). Segundo os autores, fez-se necessário a criação de um critério para avaliação da erodibilidade dos solos tropicais do estado de São Paulo devido as várias falhas que ocorram em taludes das estradas deste estado, onde foram adotados os critérios propostos por pesquisadores do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal). O critério de erodibilidade MCT é puramente empírico e foi estabelecido com base no comportamento em campo dos solos de mais de 80 taludes de corte, sendo que este foi capaz de identificar corretamente o comportamento frente à erosão de mais de 90 % das amostras (NOGAMI E VILLIBOR, 1979).

Para propor uma nova metodologia da avaliação da erodibilidade os referidos autores criaram dois ensaios, que, segundo eles, são capazes de estabelecer parâmetros dos solos, que se relacionam conceitualmente com seu comportamento frente à erosão. São estes, o ensaio de infiltrabilidade por ascensão capilar e o ensaio de erodibilidade específica (ou perda de massa por imersão modificado).

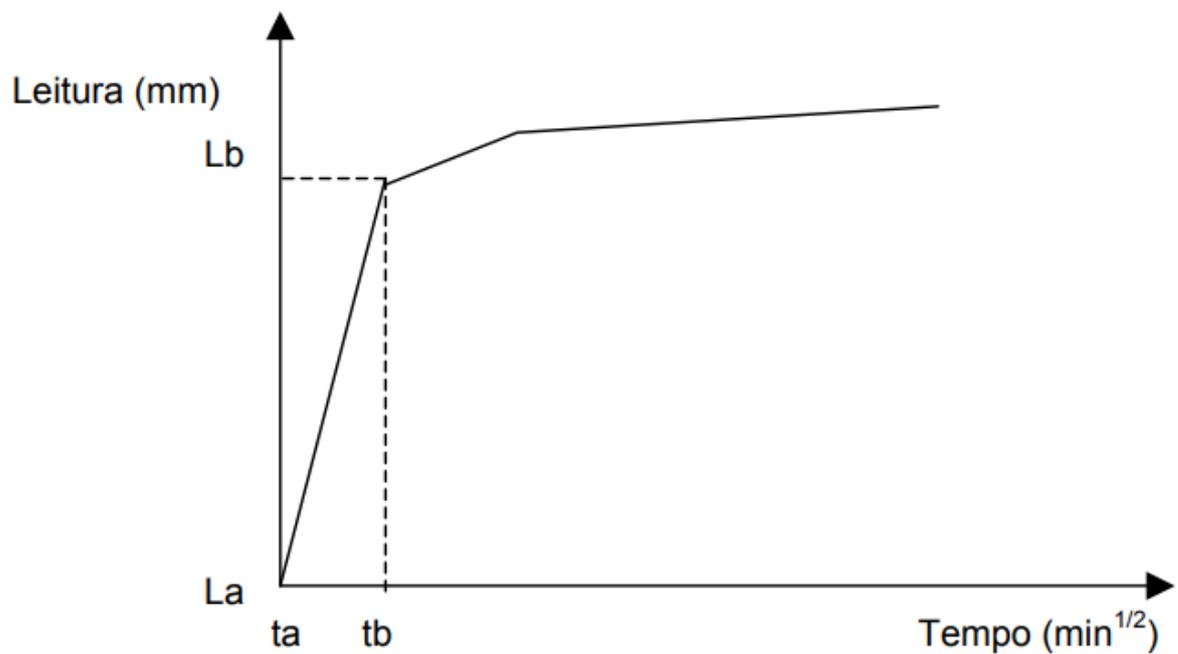
Ensaio de infiltrabilidade, consiste em submeter uma amostra de solo à ascensão capilar da água por sua base. Para isto uma amostra de solo disposta dentro de um tubo de PVC com diâmetro e altura de 50 mm é assentada sobre uma pedra porosa com papel filtro em sua face superior, ligada a um tubo graduado com diâmetro de 6 mm, como pode ser visto na Figura 2.7. O tubo deve estar disposto horizontalmente, de modo que, fique no mesmo nível da base da amostra. Enche-se o tubo com água destilada, deixando uma fina camada sobre a pedra. Mede-se nos tempos de 0,5, 1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, e 100 minutos o volume de água infiltrada na amostra a partir do deslocamento sofrido pelo menisco capilar no tubo. Os resultados são plotados em gráfico v_t x deslocamento do menisco no tubo. Um resultado típico para este ensaio é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.7: Esquema representativo do ensaio de infiltrabilidade



Fonte: Higashi (2006)

Figura 2.8: Curva típica e elementos para a determinação do coeficiente de sorção (s) do ensaio de infiltrabilidade



Fonte: Bastos (1999)

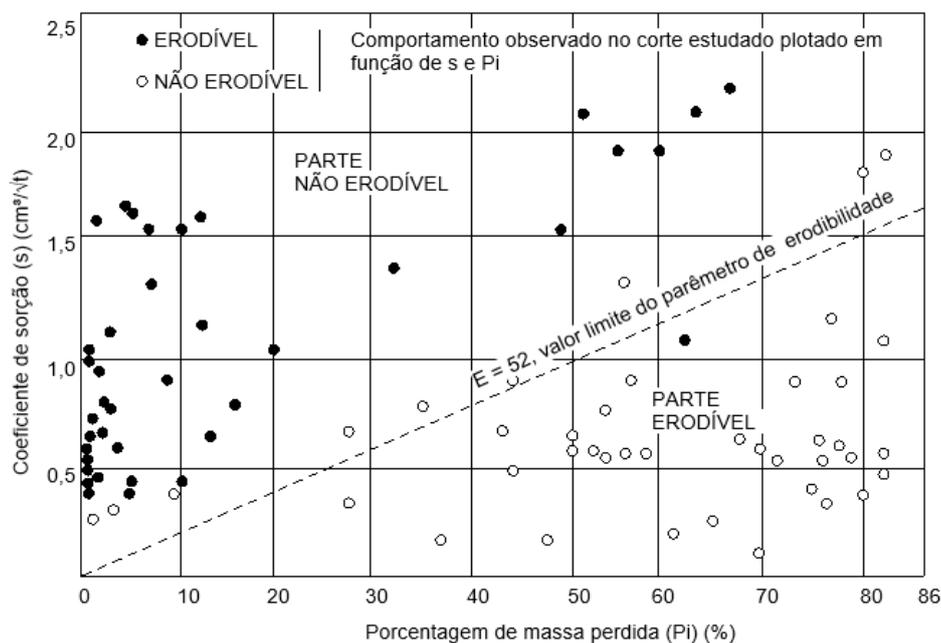
A partir do gráfico plotado com os resultados do ensaio de infiltrabilidade determina-se o coeficiente de sorção, definido pela equação 2.3 e ilustrado na Figura 2.8. Este será então, correlacionado com a porcentagem de massa perdida no ensaio de erodibilidade específica, fornecendo assim, o parâmetro de erodibilidade E do solo.

$$s = \frac{(La-Lb)S}{10(tb-ta)A} \left[\frac{cm}{\sqrt{min}} \right] \quad \text{equação 2.3}$$

Onde: $\frac{(La-Lb)}{(tb-ta)}$ é a inclinação da parte retilínea inicial da curva de infiltração, S é a seção interna do tubo [cm²] e A é a seção transversal do corpo de prova [cm²].

Erodibilidade específica, este ensaio avalia o potencial de desagregação do solo quando imerso em água. Para tanto, condiciona-se uma amostra com 2,5 cm de altura em um tubo com as mesmas dimensões do utilizado para o ensaio de infiltrabilidade, de modo que, uma de suas faces coincida com uma face do tubo e a outra face é preenchida com uma pedra porosa. O corpo de prova é disposto horizontalmente sobre um suporte dentro de um tanque e, posteriormente, inicia-se o enchimento do tanque de modo lento, para não causar perturbação na água. Após 20 horas de imersão o corpo de prova é retirado e determina-se a massa de solo seca desprendida. A porcentagem de massa seca desprendida em relação a massa seca total da amostra, fornece o parâmetro Pi . Então, a erodibilidade dos solos é qualificada pelo parâmetro E definido como sendo a relação da porcentagem de massa perdida (Pi) sobre o coeficiente de sorção (s), sendo que solos erodíveis apresentam $E > 52$, enquanto solos de média a baixa erodibilidade $E < 52$, como ilustrado na Figura 2.9. Onde encontram-se plotados os valores de s e Pi dos solos estudados por Nogami e Villibor (1979).

Figura 2.9: Classificação da erodibilidade dos solos do estado de São Paulo



Fonte: adaptado de Nogami e Villibor (1995)

Desde quando foram apresentados, os ensaios do critério MCT têm sido usados por diversos autores, a exemplo de: Bastos (1999), Basto et al. (2003), Ide (2009), Grandó (2011) e Heidemann et al. (2018). Embora empírico, a experiência mostra que os ensaios do critério MCT são capazes de avaliar adequadamente a erodibilidade dos solos de taludes de corte. Nogami e Villibor (1995), sugerem que o critério também pode ser usado para avaliação da erodibilidade de solos compactados usados em aterros, com a ressalva que talvez os ensaios não sejam capazes de avaliar o possível ganho de coesão gerado pela compactação.

2.2.1.4.4 Avaliação da erodibilidade a partir da coesão dos solos

Segundo Bastos (1999) o parâmetro do solo que melhor explica física e mecanicamente a resistência à erosão, por ação de um fluxo laminar no solo, é sua resistência ao cisalhamento, particularmente a parcela dada pela coesão, que, em função da baixa tensão normal efetiva atuante próximo a superfície, representa a maior parcela da resistência ao cisalhamento nessa região. No entanto, a coesão como um parâmetro direto de resistência não se relaciona com a erodibilidade dos solos. Bastos (1999) mostrou que a sua variação com a umidade, é o parâmetro que melhor a representa. Assim, o referido autor definiu o índice Δc (equação 2.4), que representa a porcentagem da coesão que o solo perde quando é submetido ao ensaio de cisalhamento direto nas condições de umidade natural e saturada, solos com $\Delta c > 85\%$ são considerados potencialmente erodíveis. O autor salienta que este parâmetro apresentou a

melhor relação estatística com os resultados dos ensaios de Inderbitzen dos solos por ele estudados, sendo assim, o melhor parâmetro indireto para a avaliação da erodibilidade.

$$\Delta c = \frac{c_{nat} - c_{inu}}{c_{inu}} \quad \text{equação 2.4}$$

Onde: c_{nat} – coesão na umidade natural;

c_{inu} – Coesão determinada através da inundação dos corpos de prova.

2.2.2 Estudos anteriores

Como descrito na seção 2.2.1, a erosão dos solos é objeto de pesquisa nos Estados Unidos desde a década de 1910, posteriormente no Brasil os primeiros estudos foram feitos em 1942, com a implantação do centro experimental de conservação das águas e do solo em Viçosa no estado de Minas Gerais (ARAÚJO, 1994). Entretanto, inicialmente a maioria destas pesquisas eram voltadas para a área da agronomia, tendo em vista os grandes impactos causados pela erosão em áreas de cultivo. Segundo Rego (1978), as primeiras avaliações geotécnicas da erodibilidade dos solos, realizadas no Brasil, ocorreram na década de 1970, motivadas pela necessidade de se compreender e prevenir os processos erosivos nas obras de expansão da malha viária em várias regiões do país. Sendo que, um dos primeiros trabalhos publicados foi o do próprio Jalves José Verçosa do Rego em 1978. Sua dissertação de mestrado fez parte do programa do governo federal voltado para o desenvolvimento tecnológico, comandado pelo Instituto de Pesquisa Rodoviárias do DNER, entre os anos de 1975 e 1979. Desde a década de 1970 muitos trabalhos sobre a erodibilidade dos solos têm sido publicados, no entanto, somente alguns serão descritos resumidamente aqui sendo estes: Rego (1978), Higashi (2006) e Ide (2009).

2.2.2.1 Rego (1978)

Rego (1978) estudou a erodibilidade de dois taludes de corte em solo residual de gnaiss situados no km 25 e no km 29,5 da rodovia Presidente Dutra (BR 116) no estado do Rio de Janeiro (RJ). A metodologia proposta pelo autor seguiu duas etapas, sendo uma constituída de

observações e medidas diretas da erodibilidade nos dois taludes experimentais, equipados cada um com dois pluviógrafos e tanques de sedimentação para medição do solo erodido. A outra etapa consistiu na realização de ensaios de erodibilidade pelo método de Inderbitzen em amostras indeformadas, coletadas nos vários horizontes de cada talude. O talude do km 25, denominado AT1 era formado por quatro camadas distintas de solo sendo o horizonte superficial coluvionar, o horizonte IA, um solo residual maduro, o horizonte IB, uma camada de transição e o horizonte IC, um solo saprolítico. Já o talude do km 29 denominado AT2, era composto pelos horizontes IA e IC. Também foram coletadas amostras deformadas para os ensaios de caracterização física e limites de consistência, e amostras indeformadas para realização de ensaios triaxiais do tipo CU e UU, ensaios de cisalhamento direto lento e ensaios de adensamento. No entanto, como o autor apenas apresenta os resultados destes ensaios e não faz nenhuma correlação com a erodibilidade, estes não serão apresentados aqui.

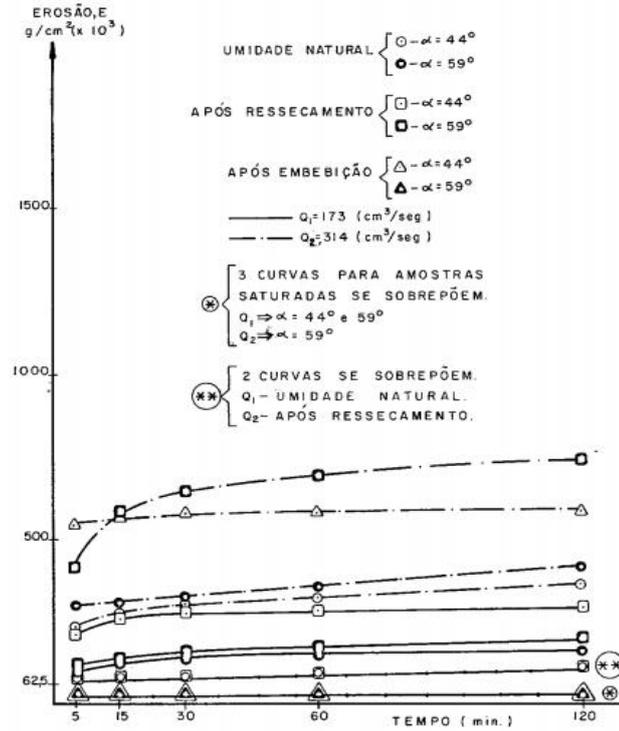
A fim de identificar possíveis tendências quanto ao grau de erodibilidade dos solos estudados o autor adotou as seguintes variações na realização dos ensaios de Inderbitzen: as amostras foram ensaiadas em três condições de umidade, sendo em, umidade natural, secas ao ar e embebidas em água e todas elas em condições diferentes de vazão e inclinação de rampa, sendo respectivamente $V1 = 173 \text{ cm}^3/\text{s}$, $V2 = 314 \text{ cm}^3/\text{s}$, $i1 = 44^\circ$ e $i2 = 59^\circ$. Ao todo, segundo o autor, a combinação das variações levou a execução de mais de 50 ensaios, dos quais alguns resultados e discussões são apresentados a seguir.

Segundo o referido autor as seguintes generalidades foram verificadas nos ensaios. As amostras dos solos coluvionares, e dos horizontes IA e IB, como pode se verificar na maioria dos casos representados nas Figuras 2.9, 2.10 e 2.11, apresentaram três estágios diferentes de erosão. Sendo estes:

- 1º Estágio: nos primeiros cinco minutos de ensaio ocorre mais de 50% de toda a erosão medida;
- 2º Estágio: no período entre cinco e sessenta minutos a erosão acumulada neste tempo é em média 90% da erosão total;
- 3º Estágio: na última hora de ensaio verificou-se que maioria dos casos a erosão ocorrida corresponde aos 10 % restantes do total.

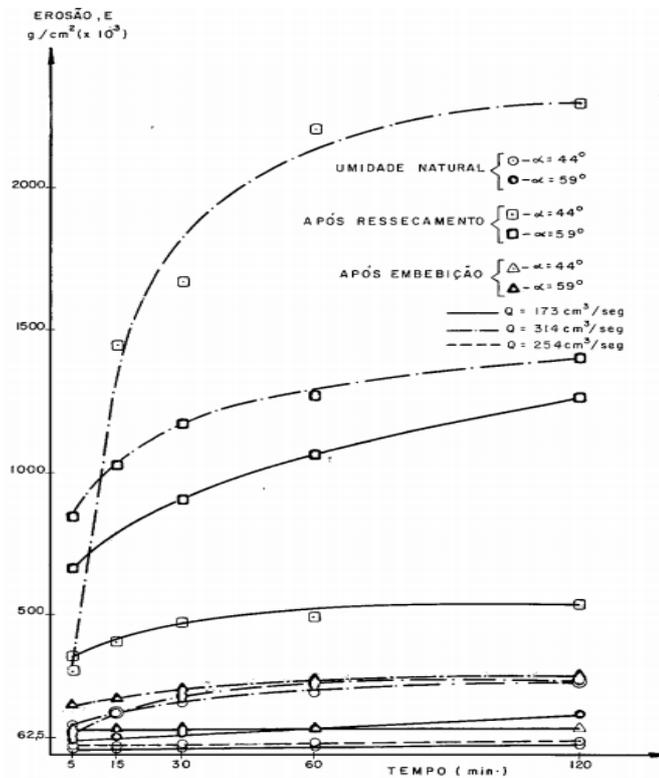
Para o caso dos solos saprolíticos (horizontes IC), o comportamento foi totalmente diferente. Neste caso todas as amostras ensaiadas nas mesmas condições das amostras dos outros horizontes, erodiram totalmente nos primeiros cinco minutos de ensaio.

Figura 2.9: Erosão x Tempo com variação da umidade, inclinação e vazão para amostras do colúvio.



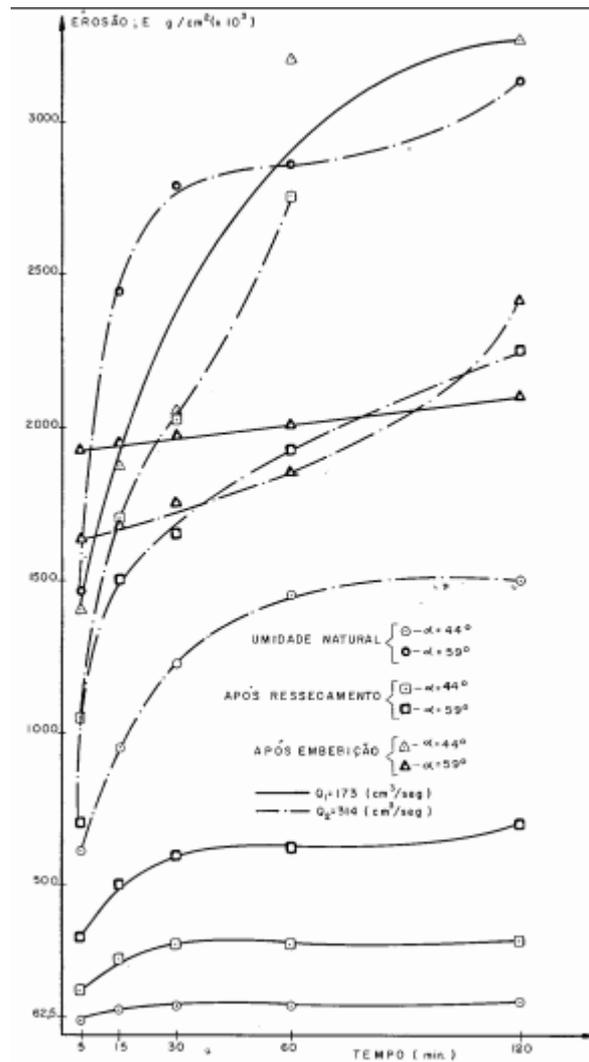
Fonte: Rego (1978)

Figura 2.10: Erosão x Tempo com variação da umidade, inclinação e vazão para amostras do horizonte IA



Fonte: Rego (1978)

Figura 2.11 : Erosão x Tempo com variação da umidade, inclinação e vazão para amostras do horizonte IB.



Fonte: Rego (1978)

Em relação às variações das condições de ensaio (umidade, vazão e inclinação) e suas influências na erodibilidade dos solos o autor relatou as seguintes observações:

- Na condição de umidade natural os solos do colúvio apresentaram menor erosão quando comparados com os dos horizontes IA e IB nas mesmas condições de vazão e inclinação da rampa;
- Todos os solos se mostraram mais suscetíveis à erosão com o aumento da vazão. Sendo que para o colúvio o máximo acréscimo foi de 8 vezes, para IA 4 vezes e para IB entorno de 13 vezes;
- Quando na condição de embebição o solo IA apresentou menor erosão quando comparado aos demais e não apresentou significativa variação da erosão com a variação da inclinação na vazão 1 e com a variação da vazão na inclinação 2.

Porém, a variação da vazão na inclinação 1 levou a um aumento de mais de 10 vezes na erosão. O autor considerou este resultado como atípico e não representativo do comportamento desse solo. Ainda, se referindo aos solos IA estes sofreram menor erosão na condição da embebição quando comparados com as condições de umidade natural e secagem prévia das amostras, sendo a erodibilidade crescente na seguinte ordem, embebição, umidade natural e secagem prévia. Os solos coluvionares não apresentaram grandes variações de erosão com embebição quando comparados às mesmas condições de ensaio na umidade natural. Já os solos IB como pode ser visto na Figura 2.11 e foi relatado pelo autor, não apresentam nenhuma tendência de comportamento frente a variação de umidade. Este fato é explicado pelo autor como sendo consequência de heterogeneidade desta camada, pois ela é uma camada de transição entre um solo residual maduro e um solo residual jovem.

- Na situação em que as amostras foram secas previamente o solo que apresentou maior variação na erodibilidade foi o horizonte coluvionar, com um aumento de 5 a 16 vezes quando comparado com as amostras na umidade natural e 5 a 13 vezes maiores que os valores registrados na condição de embebição.

Na tentativa de identificar quais propriedades dos solos indicam sua maior susceptibilidade à erosão Rego (1978), analisou e tentou correlacionar cada uma delas com os resultados dos ensaios de Inderbitzen e as observações feitas em campo.

Dos ensaios de mineralogia constatou-se que o solo do colúvio, e dos horizontes IA e IB eram compostos basicamente pelos mesmos minerais, caulinita, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e quartzo. Sendo que o colúvio também apresentou 7,4% de gibsita e o horizonte IB continha em sua composição 16% de aluminossilicatos. Devido a semelhanças mineralógicas dos solos ensaiados o autor afirma que nenhuma correlação pode ser feita entre a erodibilidade dos solos e sua composição mineral.

Para tentar correlacionar a granulometria dos solos com a erodibilidade o autor apresenta uma revisão da metodologia proposta por Santos e Castro (1967) apud Rego (1978). Em seu trabalho, os autores portugueses estudaram 34 amostras de diferentes solos. Destes, 10 apresentaram bom comportamento frente à erosão, 3 apresentaram comportamento regular e 21 mostraram se bastante erodíveis. Segundo Castro e Santos (1967) apud Rego (1978) o critério granulométrico apresentado a seguir foi capaz de classificar o comportamento frente à erosão de todos os solos:

$$49\% \leq \% \text{ dos grãos passantes na } \# 40 \leq 96\% \text{ e}$$

$$0,52 \leq a \leq 0,92$$

Sendo

$a = \sum \frac{Y_i}{600}$, onde Y_i é a porcentagem dos grãos passantes nas peneiras de nº 7,14,25,52,100 e 200 da curva granulométrica.

Na Tabela 2.1 encontram-se os valores dos parâmetros acima citados, obtidos para cada solo estudado por Rego (1978), assim como os valores e limites de outros parâmetros definidos por Santos e Castro (1967), como indicativos do bom ou regular comportamento dos solos em relação a erosão. Na coluna do lado direito os solos estudados são classificados segundo os resultados dos ensaios de Inderbitzen e as observações de campo, possibilitando assim a comparação dos resultados encontrados por Rego (1978) com a classificação proposta por Santos e Castro (1967).

Tabela 2.1: parâmetros de identificação dos solos frente a erosão

Tipo de solo	Valores limites das propriedades dos solos com comportamento bom ou regular, segundo Santos e Castro (74)					
	Expansibilidade LNEC (E) $E \leq 11\%$	Parâmetro granulométrico $0,52 \leq a \leq 0,92$	$49\% \leq$ % pass #40 \leq 96%	Limite de plasticidade $LP \leq 32$	Índice de plasticidade $IP \leq 17$	Comportamento dos solos estudados
Colúvio	6,0	0,80	79	32	29	Bom
Horizonte I-A	12,1	0,74	71	37	26	Regular – Bom
Horizonte I-B	15,0	0,90	97	44	19	Regular- Mal
Horizonte I-C	9,7	0,59	54	NP	NP	Mau

Fonte: adaptado de Rego (1978)

Em relação a análise separada de cada parâmetro dos solos Rego (1978) faz as seguintes considerações:

- O critério granulométrico foi capaz de identificar de maneira correta os solos, colúvio, IA e IB, porém se mostrou falho em relação ao solo IC;
- O critério de expansibilidade foi capaz de identificar o bom comportamento do solo do colúvio e o mal comportamento do solo IB, no então falhou na identificação dos solos IA e IC;
- O mesmo aconteceu com o critério do limite de plasticidade;
- O critério de índice de plasticidade falhou na identificação dos solos IA e IC e o solo do colúvio;

- Analisando todos os critérios em conjunto o autor verificou que único solo que teve ser comportamento corretamente avaliado foi o solo IB, o que o levou a concluir que os parâmetros limites propostos por Santos e Castro (1967) não são adequados para a classificação dos solos por ele estudados.

Rego (1978), também analisou a influência do teor de argila e de matéria orgânica dos solos estudados. Em relação a estes componentes o autor fez as seguintes considerações: “nota-se que há uma tendência de que quanto maior esta percentagem de argila e matéria orgânica, menor é a erosão sofrida pelo solo para as mesmas condições de ensaio”.

Continuando as tentativas de se relacionar os dados de erosão dos solos com outros ensaios, Rego (1978), realizou ensaios de desagregação nos solos dos quatro horizontes estudados. Os resultados foram os seguintes: os solos do colúvio e do horizonte IA, não se desagregaram mesmo após as 24 horas do ensaio e as amostras do horizonte IC, se desagregaram completamente após 40 minutos e amostras do horizonte IB após 12 horas. Segundo o autor o ensaio apresentou um resultado qualitativo bastante satisfatório, porém devem ser tomados com certa ressalva devido ao limitado número de amostras.

Em relação observações de vários taludes da rodovia Presidente Dutra o autor apresentou à seguinte conclusão: a suscetibilidade à erosão dos solos segue geralmente a seguinte ordem, do menos suscetível ao mais suscetível, colúvio, horizonte IA, horizonte IB e horizonte IC. No entanto, em taludes onde o horizonte IC apresentava-se coberto por uma camada de limo, este não apresentava sinais de erosão. Em relação às medições feitas nas áreas de testes no período de março a novembro de 1977, um dos resultados mais relevantes apresentados refere-se a porcentagem da erosão medida nos primeiros dias. Segundo o autor aproximadamente 25 % da erosão ocorrida em cada área se deu nos primeiros dias, sendo que em AT₁ essa erosão ocorreu em 13, dias e em AT₂, em 6 dias. As chuvas registradas nestes períodos foram de 25% da total registrado entre março e novembro, para AT₁ e 16 % para AT₂.

Estes resultados evidenciam a rápida velocidade em que os processos erosivos podem se desenvolver e maior suscetibilidade dos horizontes saprolíticos, o que faz aumentar a importância de estudos prévios sobre a erodibilidade dos solos em obras de terra. A elevada rapidez em que a erosão pode ocorrer, aliada a desinformação sobre o solo podem gerar prejuízos e retrabalho nas obras.

2.2.2.2 Higashi (2006)

Em seu trabalho de mapeamento geotécnico do município de Tubarão- SC, Higashi (2006) avaliou a erodibilidade de 9 solos residuais de granito, do horizonte C, com o objetivo de elaborar um mapa de suscetibilidade à erosão deste município. O autor estudou a erodibilidade dos solos segundo a metodologia de avaliação indireta proposta por Bastos (1999) (critério de erodibilidade MCT e Δc) e por meio do ensaio de Inderbitzen modificado (IM), proposto por Freire (2001) apud Higashi (2006), mostrado na Figura 2.12. Neste ensaio diferentemente do original proposto por Inderbitzen (1961) o solo é submetido a ação da gota de água por meio de um chuveiro e o resultado é dado em porcentagem de massa erodida após duas horas de ensaio.

Figura 2.12: Ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Freire (2001) apud Grando (2011)

Os resultados obtidos pelo referido autor para os ensaios de erodibilidade do critério MCT são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados dos ensaios de erodibilidade MCT

Ponto de estudo	INFILTRABILIDADE (s)				PERDA DE MASSA (Pi)				E= Pi/s			
	Nat	24h	48h	96h	Nat	24h	48h	96h	Nat	24h	48h	96h
1	0,24	0,31	0,28	0,39	36,24	65,6	65,27	67,6	151	211,5	233,1	173,3
3	2,28	2,43	2,5	2,27	0,25	0,45	4,52	15,61	0,11	0,19	1,81	6,88
4	0,52	0,24	0,64	1,9	0,73	3,2	25,53	26,53	1,46	13,33	39,89	13,47
5	0,18	0,61	0,63	0,64	8,87	44,3	53,8	60,59	49,28	72,66	85,4	94,67
6	0,07	0,09	0,28	0,34	2,07	43,1	30,51	27,2	29,57	478,6	109	80
7	0,7	1,11	1,71	1,83	24,96	8,33	50,37	64,15	35,66	43,54	29,46	35,05
8	0,34	0,23	0,15	0,42	0,2	9,32	33,36	48,83	0,59	41,83	22,4	116,3
9	0,27	0,24	0,31	0,54	0,22	1,37	9,48	9,53	0,81	5,71	30,58	17,65
11	0,44	0,4	0,53	0,67	13,4	51,8	60,13	70,22	30,45	129,5	113,5	104,8

Fonte: adaptado de Higashi (2006)

Com base nos dados apresentados na Tabela 2.2 o autor faz as seguintes considerações: o processo de secagem faz com que haja uma tendência do aumento da velocidade de infiltração e da perda de massa dos solos, sendo que apenas os solos 06 e 08 tiveram um comportamento um pouco adverso.

Os solos 03, 07 e 09 apresentaram relação $E < 52$ em todas as condições de umidade sendo então classificados como não erodíveis.

Os solos 05, 06, 08 e 11 se mostraram resistentes à erosão na condição de umidade natural, porém, foram bastante afetados pelo processo de secagem apresentado relação pi/s elevada para as demais condições de umidade.

O autor ressalva que embora o solo 03 tenha se apresentado bastante resistente à erosão pelo seu elevado coeficiente de sorção, em campo este solo apresente feições erosivas e estratificações facilmente identificáveis, que sugerem que este seja heterogêneo e anisotrópico.

Como dito o autor realizou, também, ensaios de cisalhamento direto para quantificar a perda de coesão dos solos, causadas pela inundação e ensaios IM. O resumo dos resultados é mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Resumos das diferentes avaliações da erodibilidade

Ponto de Estudo	pi/s (Nogami e Villibor, 1979)				Freire (2001)		Δc (%) Critério de erodibilidade (Bastos, 1999)	Potencial Erosivo
	Nat	24h	48h	72h	Nat	72h		
01	151,00	211,48	233,11	173,33	44,97	62,06	28,10	Médio
03	0,11	0,19	1,81	6,88	36,91	28,35	89,29	Médio
04	1,46	13,33	39,89	13,47	16,96	24,12	87,13	Médio
05	49,28	72,66	85,40	94,67	25,85	34,04	64,07	Médio
06	29,57	478,56	108,96	80,00	6,28	17,22	100,00	Alto
07	35,66	43,54	29,46	35,05	67,33	68,45	84,22	Médio
08	0,59	41,83	222,40	116,26	20,4	20,7	68,26	Médio
09	0,81	5,71	30,58	17,65	38,48	39,98	36,48	Baixo
11	30,45	129,48	113,45	104,81	19,97	22,65	81,70	Alto

Fonte: Higashi (2006)

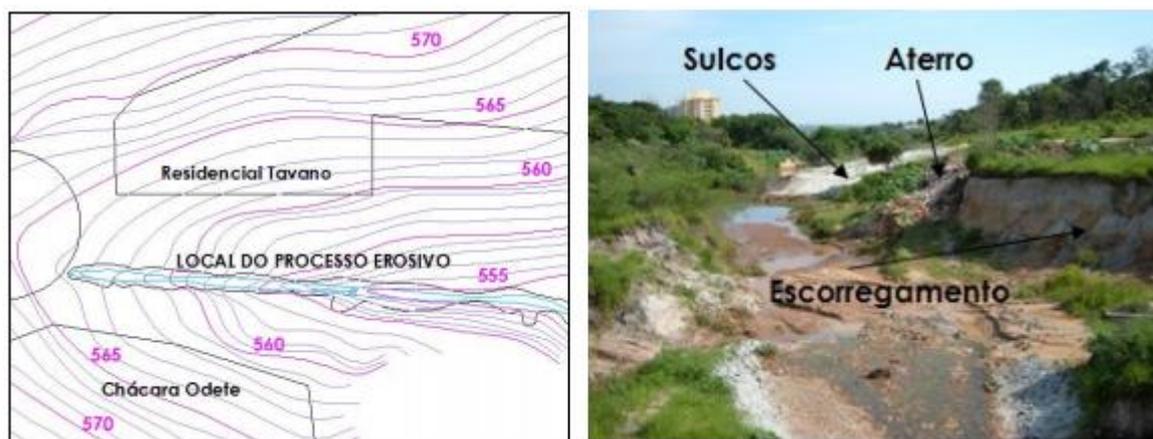
Para avaliação da erodibilidade por meio do ensaio IM, designado na Tabela 2.3 por Freire (2001), usa-se como critério a porcentagem de perda de massa menor que 5% para separar solos pouco erodíveis. Como mostrado na Tabela 2.3 e descrito por Higashi (2006) todos os solos foram considerados altamente erodíveis por este critério. No entanto, o autor usou a combinação dos três critérios para classificar os solos quanto ao seu grau de erodibilidade, sendo que os solos que foram considerados de baixo potencial erosivo por dois critérios assim foram classificados na avaliação conjunta, solos que foram classificados por dois

critérios como erodíveis foram considerado de médio potencial erosivo e solos que foram classificados como erodíveis pelos três critérios tiveram um alto grau de erodibilidade atribuído na avaliação conjunta.

2.2.2.3 Ide (2009)

Segundo Ide (2009), o município de Bauru -SP sofreu grandes danos ambientais causado pela erosão hídrica acelerada. O descaso e erros ocorridos nos projetos de drenagens de alguns condomínios, aliados a alta suscetibilidade dos solos à erosão (devido a sua origem geológica, na maioria residuais de arenito), levaram ao surgimento de grandes voçorocas na cidade. Com o objetivo de compreender o fenômeno erosivo do ponto de vista da geotecnia e monitorar a evolução da erosão, Ide (2009) estudou uma destas voçorocas. Para isso, além do levantamento topográfico mostrado na figura 2.13, ela fez ensaios SPT, ensaios de caracterização, ensaios de cisalhamento direto, ensaios de adensamento, ensaios de erodibilidade MCT, ensaios de Inderbitzen original e modificado, ensaios de penetração de cone, análise mineralógica e determinou as curvas de retenção de água dos solos de três pontos da voçoroca.

Figura 2.13: Levantamento topográfico e foto da voçoroca estudada por Ide (2009)



Fonte: Ide (2009)

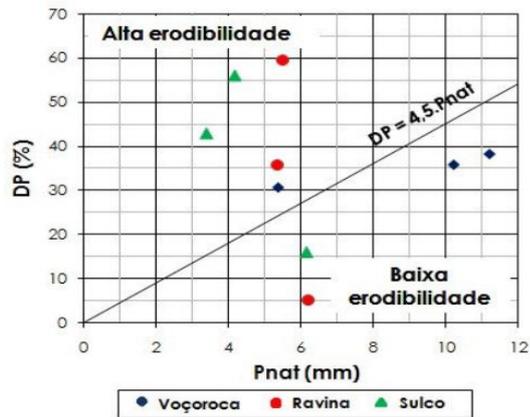
Em relação aos ensaios para avaliação da erodibilidade a autora apresenta alguns resultados e faz as seguintes considerações:

- nos ensaios de Inderbitzen modificado e original os solos não mostraram um comportamento padrão, no entanto, o critério para o fator de erodibilidade K

obtido nestes ensaios foi capaz de classificar todas as amostras como de alta e média suscetíveis à erosão, o que de fato ocorre em campo;

- O ensaio de penetração de cone não se mostrou adequado para avaliação da erodibilidade dos solos estudados, pois, como se vê na figura 2.14 apresentou dispersão nos resultados.

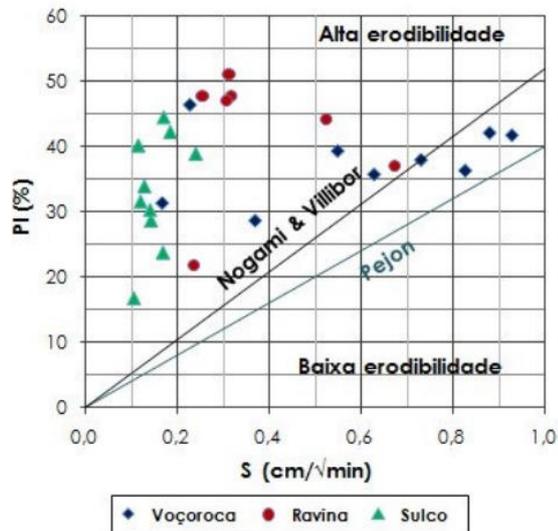
Figura 2.14: Resultados do ensaio de penetração de cone



Fonte: Ide (2009)

- O critério de erodibilidade MCT, como pode ser visto na figura 2.15, foi capaz de representar de modo muito satisfatório o comportamento observado em campo, sendo dentre os três, o critério mais adequado para descrever o comportamento frente a erosão dos solos estudados.

Figura 2.15: Relação Pi/s critério MCT



Fonte: Ide (2009)

2.3 INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO SOBRE A ERODIBILIDADE

Nogami e Villibor (1995) afirmam que a erosão em saias de aterros de obras viárias muitas vezes é mais frequente e danosa que nos cortes em alguns trechos. Entretanto, este fato na maioria das vezes é desconsiderado, pois com frequência os projetistas consideram apenas a estabilidade dos taludes, deixando os fenômenos erosivos de lado. Segundo mesmos autores, até sua época desconhecia-se uma metodologia para avaliação da erodibilidade em taludes de aterros compactados. Os mesmos autores sugeriam que a avaliação baseada nos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, poderiam ser utilizados para uma aproximação prévia, porém ensaios que fossem capazes de avaliar os feitos do possível ganho de coesão gerado pela compactação e das menores inclinações dos taludes deveriam ser desenvolvidos.

Desde Nogami e Villibor (1995) não há publicações nacionais que tratem dos efeitos da compactação sobre a erodibilidade dos solos. Os únicos trabalhos encontrados por este autor, que mencionam a compactação e erodibilidade juntamente são, Bastos (2003) e Silva (2009). Sendo que, Bastos (2003) apenas apresenta os valores da relação Pi/s do critério MCT de alguns solos da planície costeira do sul do Rio Grande do Sul. Silva (2009), em um trabalho experimental de campo avalia a utilização de uma camada de solo compactado, proveniente de um solo resistente à erosão, como um meio de proteção contra a erosão de um solo menos resistente. Silva (2009), verificou que a técnica de envelopamento (utilização uma camada de solo compactado mais resistente à erosão) diminui em torno de 70% e erosão sofrida por uma parte do talude quando comparado com outra parte desprotegida do mesmo talude. O referido autor também comparou a erosão sofrida pela parte envelopada com outro talude de onde o material foi retirado. Os resultados mostraram que o solo compactado erodiu 2,4 vezes mais que o talude na condição natural. O autor sugere que este fenômeno ocorreu devido a desestruturação sofrida pelo solo compactado e pela formação de trincas de retração nesta camada aumentado sua erodibilidade. Cabe expor aqui que a compactação realizada por Silva (2009) foi feita manualmente sem controle algum, segundo o autor isto se justifica porque ele estava estudando técnicas baratas de proteção contra a erosão.

No cenário internacional, a exemplo dos EUA e Portugal, onde as pesquisas sobre processos erosivos em barragem de terra encontram-se mais avançadas, pode-se citar os trabalhos de Hanson e Hunt (2007), Hanson et al (2010) e Santos et al (2012) sobre os efeitos da compactação na erodibilidade dos solos. Como o processo erosivo que ocorre nas barragens difere em partes do processo ocorrido em taludes os meios para determinação da erodibilidade são diferentes dos apresentados anteriormente neste trabalho.

Hanson e Hunt (2007) estudaram por meio de modelos de larga escala e por ensaios de jato submerso, a erodibilidade de dois solos, com as propriedades apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Caracterização dos solos

Solo	Composição granulométrica			Índice de plasticidade IP	% dispersão	Energia normal		Classificação do solo
	% areia > 75 μm	% silte > 2 μm	% argila < 2 μm			γ_{dmax} (Mg/m ³)	WCot (%)	
2	63	31	6	NP	0	1,871	11,0	SM-silte arenoso
3	25	49	26	17	20	1,779	13,9	CL-argila de média plasticidade

Fonte: adaptado de Hanson e Hunt (2007)

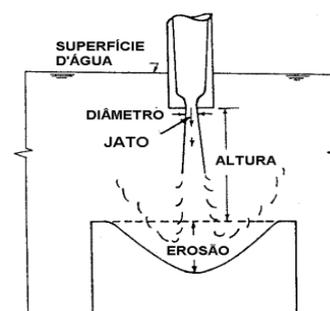
Os testes em grande escala consistem em barragens com tamanho reduzido como a apresentada na Figura 2.16a, onde um processo de ruptura é forçado através de um canal com 0,3 metros de largura e monitora-se o desenvolvimento da erosão. O ensaio de jato submerso consiste em submeter uma amostra submersa de solo compactado a ação de um fluxo concentrado em alta pressão como mostrado na Figura 2.16b. A profundidade da erosão causada na amostra é medida em diferentes tempos e a partir destes dados obtêm-se o índice de erodibilidade kd [cm³/N.s]. Os detalhes do equipamento e equacionamento para determinação de kd podem ser encontrados em Hanson e Cook (2004).

Figura 2.16: a) teste de erosão em grande escala, b) esquema do ensaio de jato submerso



a

Fonte: Hanson e Hunt (2007)



b

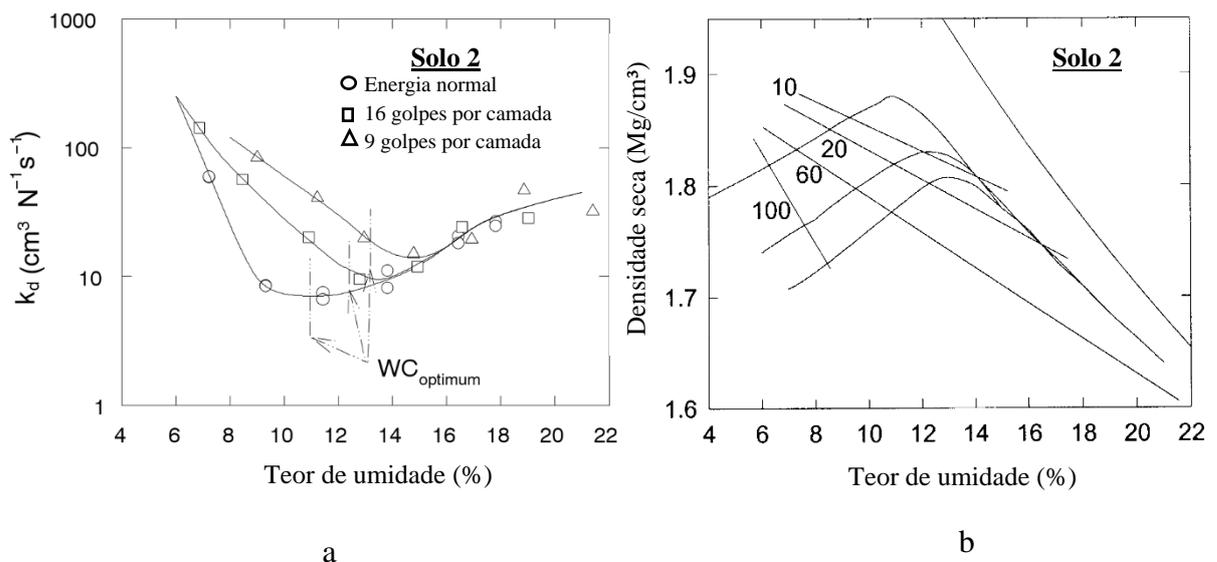
Fonte: Bastos (1999)

Para os testes de grande escala os autores avaliaram a influência da uma faixa de umidade entorno da umidade ótima de compactação. Sendo que, para o solo 2 foram construídos dois modelos, um compactado no ramo seco da curva 0,3% abaixo da umidade ótima, onde se atingiu um grau de compactação (GC) de 95,9%. O segundo modelo foi compactado no ramo úmido 1,3% acima da umidade ótima onde se atingiu GC de 96,3%. Para o modelo do solo 3 a

umidade de compactação foi de 2,3% acima da ótima e o GC atingido foi de 98,2% do proctor normal. Os resultados obtidos pelos referidos autores, mostraram uma grande variação na taxa erosão medida para as diferentes condições de compactação do solo 2, sendo esta, igual a 0,88 m/h para o modelo compactado no ramo seco e 0,27 m/h para o modelo compactado no ramo úmido. Para modelo do solo 3 a taxa medida foi de 0,022 m/h, se mostrando um solo de erodibilidade muitas vezes menor que o solo 2, tal resultado é explicado pelos autores como consequência do elevado teor de finos que este solo contém.

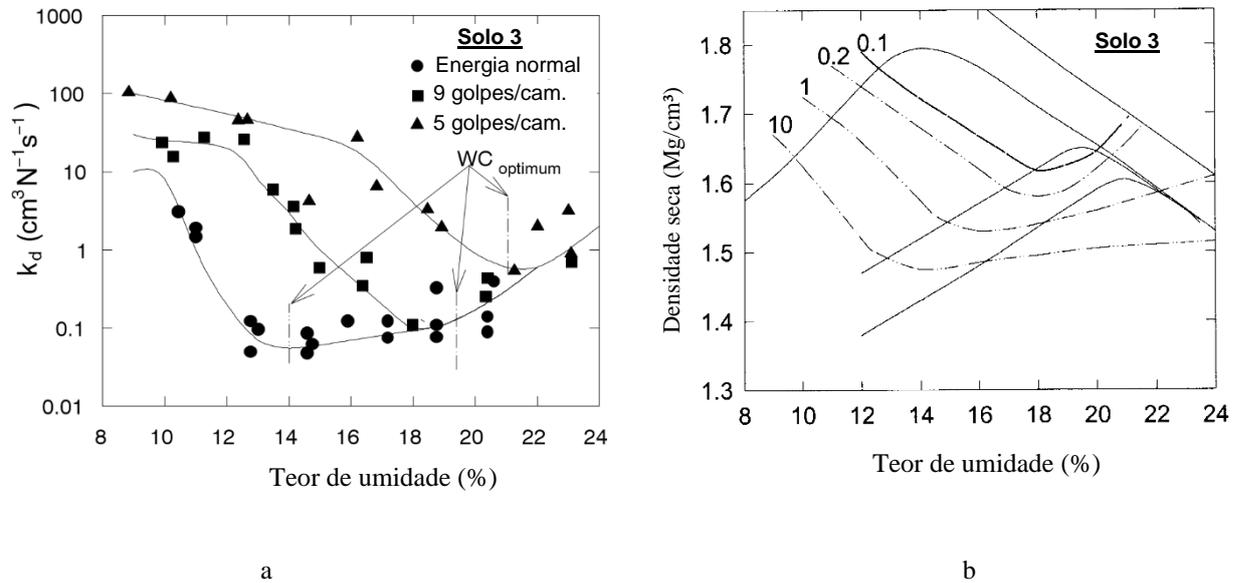
Para os ensaios de jato submerso foram compactadas amostras sob três condições distintas de energia de compactação e todas elas foram ensaiadas em todos os teores de umidade, assim foi possível verificar a influência da umidade e energia de compactação na erodibilidade dos dois solos. Como pode ser constatado nas Figuras 2.17 e 2.18, e como apontam as conclusões dos autores, a umidade de compactação no ramo seco das curvas exerce grande influência sobre a erodibilidade, com variações entorno de 10 vezes. Já no ramo úmido das curvas de compactação a umidade exerce menor influência. Observa-se também o índice k_d é influenciado pela energia de compactação e seu valor mínimo é obtido em teores de umidade próximos da umidade ótima, mostrando-se assim, inversamente proporcional à energia de compactação.

Figura 2.17: a) índice de erodibilidade versus teor de umidade, b) densidade seca versus teor de umidade solo 2



Fonte: Hanson e Hunt (2007)

Figura 2.18: a) índice de erodibilidade versus teor de umidade, b) densidade seca versus teor de umidade solo 3



Fonte: adaptado de Hanson e Hunt (2007)

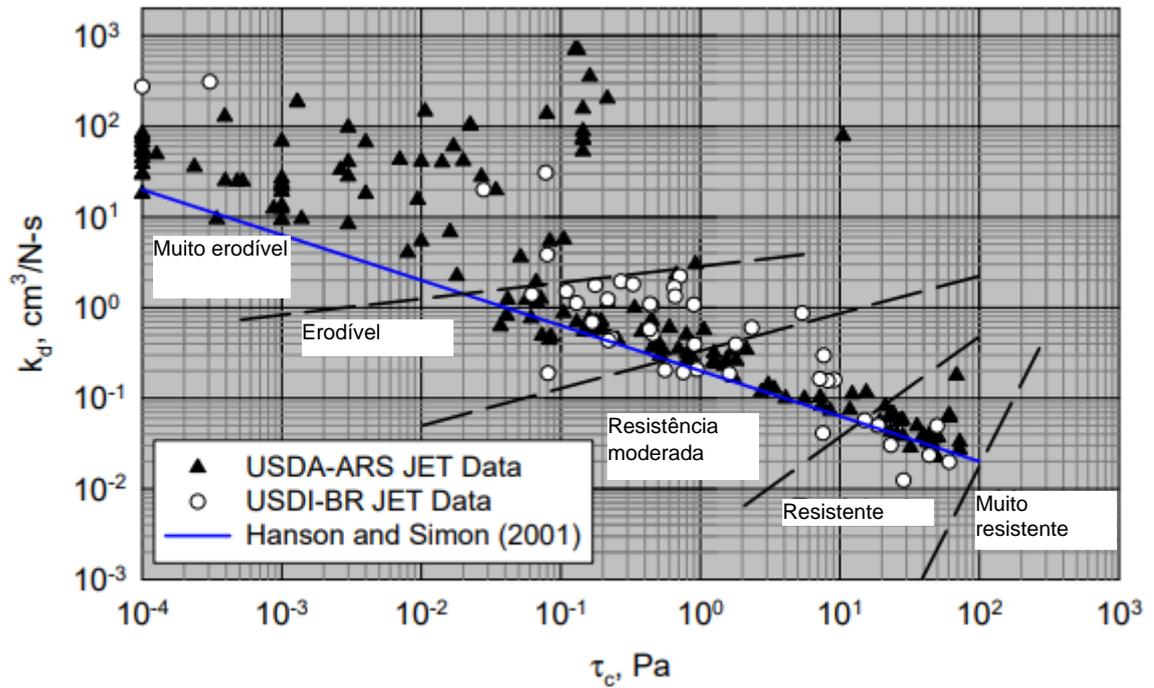
Hanson et al (2010) apresentam um compilado dos estudos realizados por diferentes laboratórios nos EUA e propõem a Tabela 2.5 para a determinação aproximada do índice kd e da tensão hidráulica crítica (τ_c) dos solos em função do teor de argila e da energia de compactação. Por fim, os referidos autores apresentam um ábaco para a determinação do grau de erodibilidade dos solos em função dos parâmetros kd e τ_c , figura 2.21.

Tabela 2.5: Valores de kd e τ_c dos solos em função da energia de compactação e % de argila

% de argila	Energia modificada (27,5 kg.cm/cm ³)		Energia normal (6,0 kg.cm/cm ³)		Energia leve (1,2 kg.cm/cm ³)	
	≥ umidade ótima	< umidade ótima	≥ umidade ótima	< umidade ótima	≥ umidade ótima	< umidade ótima
	Erodibilidade, kd (cm ³ /N.s)					
>25	0,05	0,5	0,1	1	0,2	2
14-25	0,5	5	1	10	2	20
8-13	5	50	10	100	20	200
0-7	50	200	100	400	200	800
	Tensão de cisalhamento crítica, τ_c (Pa)					
>25	16	0,16	4	0	1	0
14-25	0,16	0	0	0	0	0
8-13	0	0	0	0	0	0
0-7	0	0	0	0	0	0

Fonte: modificado de Hanson et al (2010)

Figura 2.21: Ábaco para determinação do grau de erodibilidade de solos compactados em função de k_d e τ_c



Hanson et al (2010)

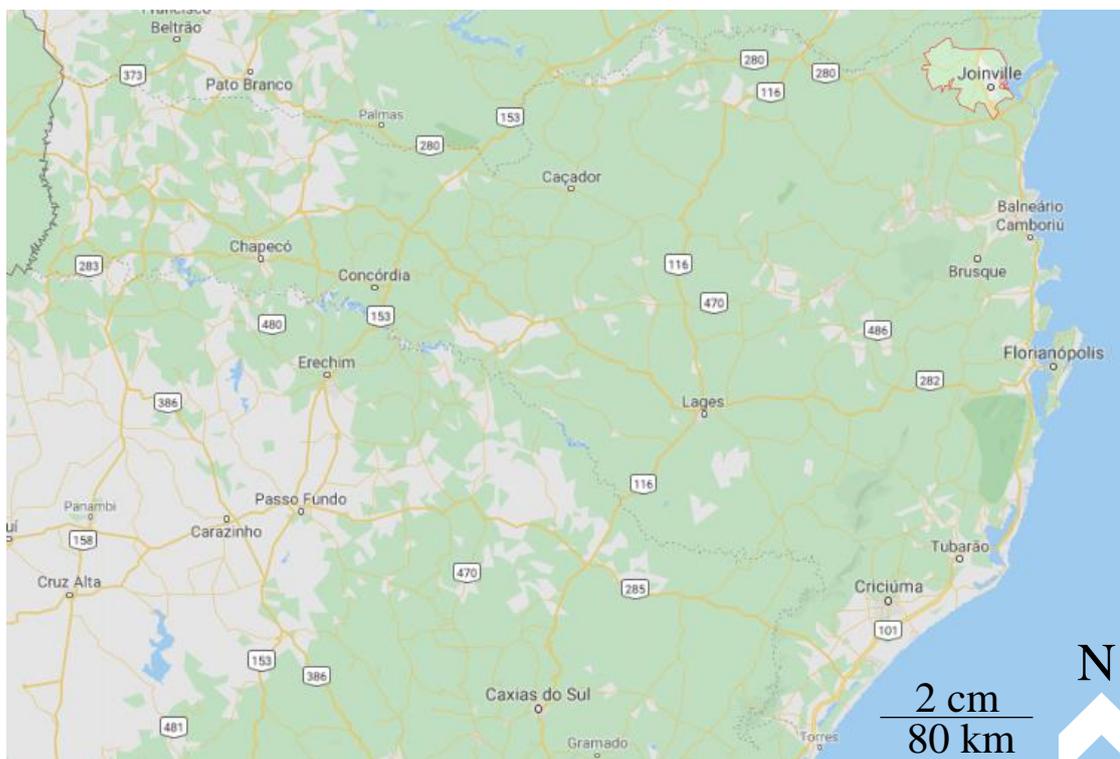
Os resultados apresentados por Santos et al (2012), apresentam a mesma tendência de comportamento com variação do teor de umidade e energia de compactação. No entanto, não podem ser comparados com os resultados apresentados Hanson e Hant (2007), pois foram obtidos através de ensaios diferentes, que medem índices diferentes.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CONDIÇÕES GERAIS

A área escolhida para a coleta do solo, objeto de estudos do presente trabalho está localizada no extremo sul do município de Joinville. Município este localizado no litoral norte do estado de Santa Catarina, com mostrado na Figura 3.1. Joinville possui área total de 1.127,946 km² e população estimada de 595 mil habitantes, sendo a maior e mais rica cidade do estado (IBGE, 2019).

Figura 3.1: Localização de Joinville em relação ao estado de Santa Catarina



Fonte: <https://www.google.com/maps/place/Joinville+-+SC/@-26.3998315,-48.8443369,134m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x94dea3f39db1ab37:0xbc4b989df161e9fa!8m2!3d-26.2834213!4d-48.8452269> acesso 29/10/2019

O ponto de coleta das amostras está localizado aproximadamente nas coordenadas geográficas 26°23'60.00"S, 48°50'38.00"O, e situa-se dentro do terreno da UFSC-Joinville, na parte onde foi obtido material de empréstimo para execução dos aterros do entorno. Tendo em

vista a necessidade de monitoramento ambiental desta área, o presente trabalho visa contribuir no entendimento dos processos erosivos que estão ali ocorrendo.

O clima na região de Joinville é, segundo a classificação Köppen, do tipo mesotérmico, úmido, sem estação seca. A umidade relativa do ar média durante o ano é de 76,04 % (JOINVILLE, 2019). Na tabela 3.1 apresenta-se as médias das séries histórica registradas de temperatura e índice pluviométrico. Os dados desta tabela mostram que a temperatura média varia de 17,1 °C em julho a 25,1 °C em janeiro, o volume de precipitação mínimo acontece em julho e máximo em fevereiro, sendo que, a média histórica para estes meses é de 77 mm e 246 mm, respectivamente.

Tabela 3.1: Média mensal histórica das temperaturas e chuvas em Joinville

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	25,1	25,1	24,1	21,8	19,5	18	17,1	17,6	18,8	20,6	22,4	23,6
Temperatura mínima (°C)	21	21,1	20,1	17,6	15,3	14	12,9	13,6	15,1	17	18,5	19,6
Temperatura máxima (°C)	29,3	29,1	28,2	26	23,8	22,1	21,3	21,7	22,6	24,2	26,3	27,7
Chuva (mm)	212	246	204	134	110	91	77	93	121	149	126	143

Fonte: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/santa-catarina/joinville-4496/>, acesso

29/10/2019

3.2 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS

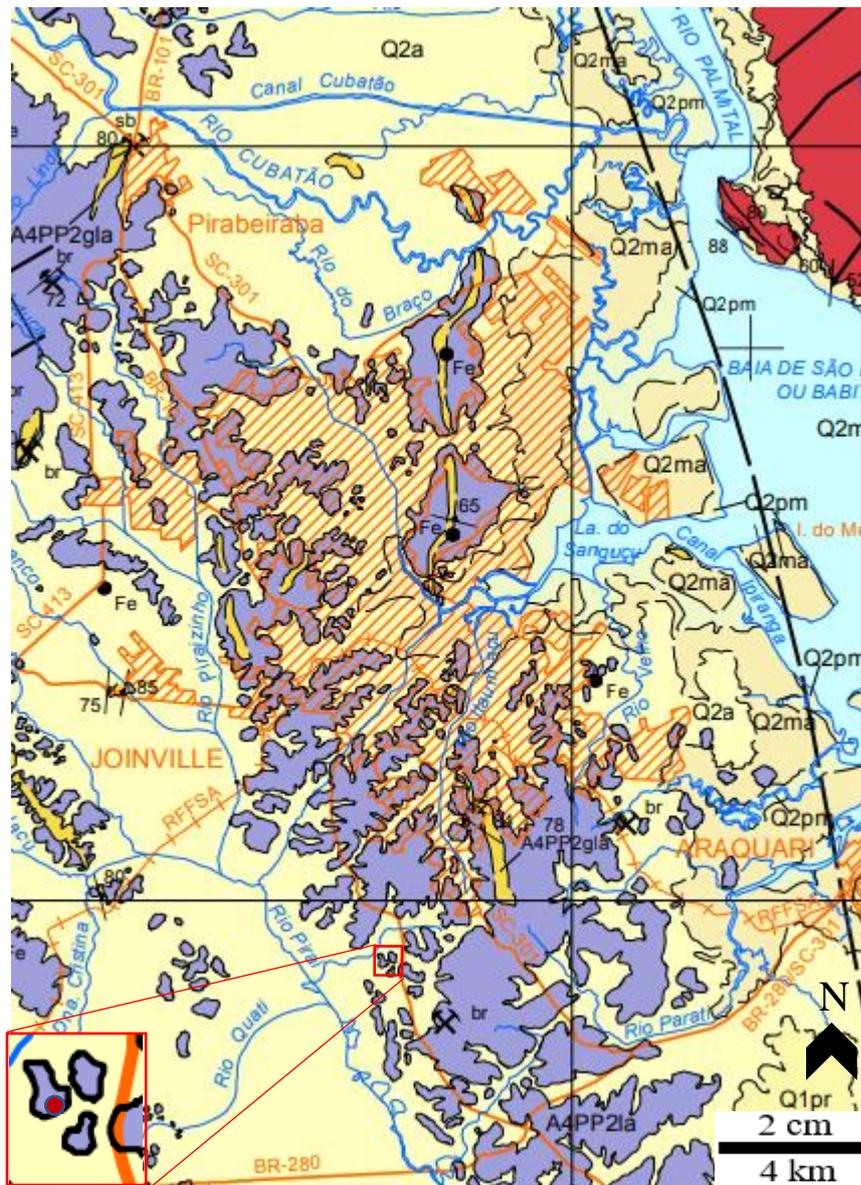
Como observado na Figura 3.2 o perímetro urbano de Joinville e as áreas periféricas localizam-se sobre dois domínios geológicos principais: 1) o domínio do embasamento cristalino e 2) o domínio dos sedimentos quaternários. O domínio 1 é constituído por rochas metamórficas arqueanas, pertencentes ao Complexo Granulítico de Santa Catarina, sendo que estas são do tipo gnaiss e quartzitos. Os gnaisses mostram grau variado de recristalização, podendo apresentar desde texturas ígneas reliquiares até textura granoblástica poligonal granulítica. Os pequenos afloramentos de quartzito ocorrem de maneira aparentemente descontínua encaixados nos gnaisses e são responsáveis pela formação dos morros mais elevados de Joinville (IGLESIAS, 2011).

O domínio dos sedimentos quaternários se estende por toda a planície de Joinville está dividido em três unidades, designadas como: Q2a (depósitos aluvionares), Q2ma (depósitos de planícies de maré arenosos) e Q2pm (depósitos de pântanos e mangues). Os depósitos aluvionares ocorrem em calhas de rios e planície de inundação e são compostos por areia de

granulometria variando de grossa a fina, cascalho e sedimentos silto argilosos. Os depósitos de planícies de maré arenosos, como pode-se observar na figura 3.2 ocorrem na região central e leste da cidade, são constituídos de areias quartzosas e silto argilosas mal selecionadas, cores cinza a creme, ricas em matéria orgânica, retrabalhadas pela ação das marés acima do nível dos mangues atuais. Os depósitos de pântanos e mangues ocorrem na região litorânea de Joinville onde há influência da maré e são compostos por sedimentos argilo arenosos, mal selecionados, ricos em matéria orgânica (IGLESIAS, 2011).

Como mostrado na Figura 3.2 a área de estudos do presente trabalho situa-se sobre o domínio do embasamento cristalino.

Figura 3.2: Unidades geológicas do perímetro urbano de Joinville



Perímetro urbano



Ponto de coleta do solo estudado

A4PP2gla

Paragneisses Luis Alves: lentes de quartzitos com fuchcita e gnaisses kinzigítico e calciossilicatados subordinados que ocorrem por todo o Complexo Granulítico.

A4PP2la

Gnaisses Granulíticos Luis Alves: gnaisses enderbítico, charnoenderbítico e trondhjemitico com enclaves máficos de gabronorito, piroxenito e hornblendito.

Q2pm

Depósitos de Pântanos e Mangues: sedimentos argilo-arenosos, mal selecionados, ricos em matéria orgânica, depositados em ambientes sob influência de marés com pouca energia.

Q2ma

Depósitos de Planície de Maré arenosos: areias quartzosas e silico-argilosas mal selecionadas, cores cinza a creme, ricas em matéria orgânica, retrabalhadas pela ação das marés acima do nível dos mangues atuais.

Q2a

Depósitos Aluvionares: areia grossa a fina, cascalho e sedimento silico-argiloso, em calhas de rios e planícies de inundação.

Fonte: adaptado de Iglesias (2011)

3.3 CONDIÇÕES PEDOLÓGICAS

A distribuição dos solos na região de Joinville é condicionada pela compartimentação do relevo, este que por sua vez é dependente da formação geológica da região. Assim sendo, a análise das condições geológicas apresentada na seção anterior se mostra de grande importância para o entendimento quanto as origens autóctone ou alóctone dos solos. Os solos de origem autóctone possuem estreita relação com a rocha matriz. Já os solos de origem alóctone são formados por diferentes fontes em processo de sedimentação recentes de origem argilosa, arenosa e orgânicas do período quaternário (JOINVILLE, 2018).

Nas terras altas de Joinville caracterizadas pela serra Dona Francisca e pelos morros do Iriirú e do Boa Vista os solos são de origem autóctone, originados dos embasamentos cristalinos. Nestas regiões há predominância dos tipos, argissolos amarelos, neossolos litólicos e cambissolos háplicos. Já nas terras baixa caracterizadas pelas planícies, formadas por sedimentos quaternários, ocorrem, gleissolos melânico e háplico onde os depósitos são argilosos e siltosos e mal drenados, e cambissolos háplicos onde existe boa drenagem. Ainda nas terras baixas, especificamente na bacia hidrográfica do rio Piraí onde há depósitos recentes de origem orgânica tem-se a formação de organossolos (JOINVILLE, 2018).

Como mostrado na figura 3.2 o solo estudado neste trabalho é de origem gnáissica, a região de origem deste, é definida por Joinville (2012) como sendo uma região de ocorrência de argilossolo amarelo. O mapa pedológico de Joinville não é mostrado aqui pela impossibilidade de manter uma boa qualidade na imagem, sendo que este pode ser encontrado em Joinville (2012).

3.4 DESCRIÇÃO DO LOCAL E INFORMAÇÕES GEOTÉCNICAS DISPONÍVEIS

Como já mencionado anteriormente nesse capítulo, os pontos de coleta das mostras do solo aqui estudado, estão situados no terreno da UFSC- Campus Joinville, aproximadamente localizados nas coordenadas -26.939501,-48.843640. O maciço onde foram coletadas as amostras já foi alvo de outros estudos geotécnicos, UFSC (2010) realizou uma campanha de sondagens de simples reconhecimento (SPT) em vários pontos do terreno sendo que destes, um localiza-se no mesmo maciço aqui estudado. Fernandes (2015) estudou o material dos aterros adjacentes que foram executado com solo extraído deste maciço e mais recentemente Dirksen

(2017) fez estudos de caracterização deste material em amostra coletadas nos dois pontos representados na figura 3.3.

Figura 3.3: Localização aproximada do ponto de estudos no maciço e localização dos pontos de estudos anteriores



Fonte: adaptado do Google Maps (2019)

Como foi mostrado na figura 3.2 a rocha que dá origem ao solo estudado neste trabalho, ocorre em grande parte do perímetro urbano de Joinville. Assim, solos com características semelhantes às deste, são comumente expostos e usados na construção de aterros. Como acontece aqui, geralmente estes locais acabam ficando desprotegidos e assim muito passíveis a ação dos agentes erosivos. Justificando-se assim, o interesse pelo estudo da erodibilidade deste material.

Embora UFSC (2010) tenha relatado a alta suscetibilidade à erosão do solo que seria usado nos aterros e já tinha apontado a necessidade de medidas de proteção contra os processos erosivos, a obra de terraplanagem foi deixada totalmente exposta e não foi executada de modo que atendesse as especificações técnicas (FERNANDES, 2015). Como mostrado na Figura 3.4a e b os processos erosivos já se encontram em estágio bastante avançado em vários pontos do terreno, tanto na região de empréstimo quanto nos aterros.

Figura 3.4: a) Sulcos formados no horizonte B do maciço, b) ravinas no horizonte C (saprolítico) objeto do presente estudo

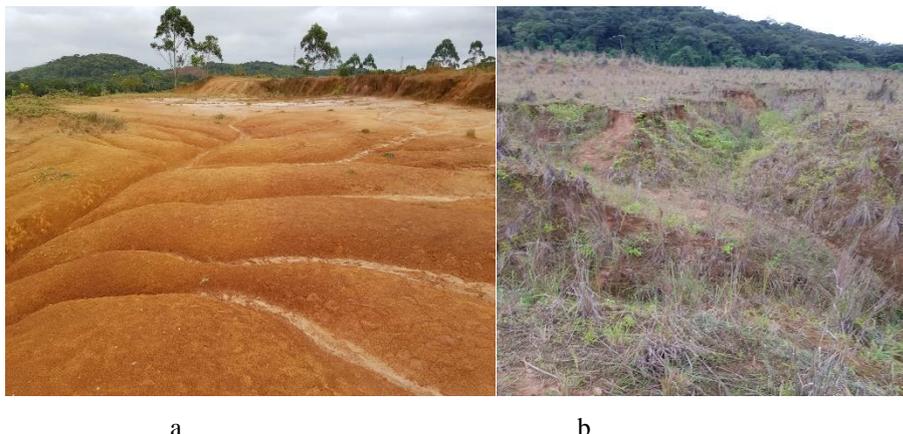


Foto: M. Heidemann

A campanha de sondagem SPT conduzida por UFSC (2010) quando o maciço ainda estava na condição natural, mostrou que o perfil de solo tinha 32 metros de espessura, sendo que destes apenas os dois primeiros eram formados por argila de consistência média e restante era formado por silte variegado (vermelho e amarelo) de consistência compacta até 15 metros de profundidade e muito compacta dos 15 aos 32 metros de profundidade. A camada de argila superficial apresentou N_{spt} médio igual a 8, para o silte este valor foi de 17,3 até 15 metros de profundidade, 24,3 entre, 15 e 27 metros e aumentou rapidamente chegando ao impenetrável por este ensaio em 32 metros de profundidade. O resultado completo de toda a campanha, bem como, todas considerações feitas sobre os solos do terreno encontram-se em UFSC (2010).

Os parâmetros de caracterização geotécnica determinados por Dirksen (2017) são apresentados na tabela 3.2. Nota-se que os solos do ponto 1 apresentam grande quantidade de siltes o que é um indicativo preliminar da maior susceptibilidade destes aos processos erosivos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Tabela 3.2: Resumo dos ensaios de caracterização

AMOSTRA		P 01 - Prof 1	P 01 - Prof 2	P 02
Profundidade (m)		Superficial	2,00	Superficial
LL		55	49	55
LP		42	38	36
IP		13	11	19
Densidade real dos solos DNER ME 093/94 *		2,746	2,817	2,720
GRANULOMETRIA	Pedregulho grosso (%)	0,00	0,00	0,00
	Pedregulho médio (%)	0,07	0,00	0,00
	Pedregulho fino (%)	0,03	0,54	0,06
	Areia Grossa (%)	2,27	1,66	2,01
	Areia Média (%)	5,44	3,30	8,43
	Areia Fina (%)	15,40	11,00	12,00
	Silte (%)	55,41	68,35	26,10
	Argila (%) (< 0,002 mm)	21,39	15,15	51,40
Classificação Unificada		MH	ML	MH
Classificação Rodoviária (AASHTO)		A7-5	A7-5	A7-5

Fonte: Dirksen (2017)

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais utilizados para a execução deste trabalho que consistiu na coleta de amostras para realização dos ensaios de laboratório sendo estes, ensaios de caracterização, compactação Proctor, ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão.

4.1 COLETA DE AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE LABORATÓRIO

As amostras foram coletadas no mês de agosto de 2019 no local descrito no capítulo 3. Foram coletadas amostras indeformadas para realização dos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão. Os procedimentos da norma NBR9604 (ABNT, 2016) foram seguidos na coleta de tais amostras: inicialmente retirou-se a camada mais superficial do solo, de modo que não sobrassem raízes ou qualquer outro agente contaminante. Em seguida, foi feita uma banqueta e então foi posicionado sobre esta, um anel de PVC com diâmetro e altura de 50 mm como visto na Figura 4.1. Com auxílio de uma espátula e de facas, o solo em volta do anel foi sendo retirado de modo que a massa assumisse a forma cilíndrica com diâmetro igual ao deste, então uma leve pressão foi sendo aplicada no anel fazendo com que este envolvesse a massa de solo. Foi deixado um excesso de aproximadamente 2 cm em ambos lados do tubo, as amostras foram identificadas e então envoltas com filme de PVC e acomodadas em recipientes para o transporte.

Figura 4.1: coleta de amostras indeformadas para os ensaios de infiltrabilidade de perda de massa por imersão



Foto: B. Sell

As amostras deformadas usadas nos ensaios de caracterização e compactação Proctor foram extraídas com auxílio de um picareta e uma pá. Primeiramente a camada superficial foi retirada para evitar contaminação. O material foi retirado de uma escavação e acondicionado em sacos para o transporte, nesta etapa foram coletados aproximadamente 100 kg de solo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização geotécnica do solo constituiu na determinação dos índices físicos, da composição granulométrica e dos limites de Atterberg. Estas propriedades fundamentais na análise de qualquer solo, uma vez que a partir destes alguns aspectos do comportamento destes materiais podem ser inferidos, como por exemplo a condutividade hidráulica e o grau de alteração (HEIDEMANN, 2011).

Estes dados também são utilizados na classificação dos solos, por meio dos vários sistemas de classificação disponíveis. Assim, os solos são agrupados em função dos parâmetros de caracterização. Segundo Braja (2011) o relacionamento dos índices físicos com o comportamento dos materiais é uma prática corriqueira. Bastos (1999) e Hanson et al (2010), apresentam critérios em função da granulometria do solo, que servem como indicativo qualitativo preliminar da erodibilidade dos solos. No entanto, embora as correlações empíricas tenham sido desenvolvidas em vasto tempo e sob larga experiência, Nogami e Villibor (2009) e Heidemann (2011) alertam para o fato destas correlações apresentarem muitas variações principalmente para solos tropicais.

4.2.1 Índices físicos

Os índices físicos de um solo são relações entre peso e volume de suas fases (sólida, líquida e gasosa). Índices como, grau de saturação, porosidade, índice de vazios e densidade seca aparente, podem ser determinados a partir do peso de uma amostra com volume, teor de umidade e peso específico real dos grãos (γ_s) conhecidos.

Para a determinação da umidade natural utilizou-se o material que estava em excesso nos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão. A determinação da massa de água contida nas amostras foi feita segundo os procedimentos da norma NBR 6457 (ABNT, 2016), com o material seco na estufa a temperatura de 105° C por um período de 24 horas.

O peso específico real dos grãos (γ_s) foi determinado segundo os procedimentos descritos na norma NBR 6458 (ABNT, 2016), com amostra preparada segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016), retiradas do material deformado extraído para os ensaios de compactação.

4.2.2 Granulometria

O conhecimento da granulometria dos solos permite inferir alguns aspectos sobre seu comportamento, referentes a condutividade hidráulica, solicitações mecânicas e erodibilidade (BASTOS, 1999) e (HEIDEMANN, 2011). Assim, esta informação é fundamental no estudo do comportamento geotécnico dos solos.

No que tange a erodibilidade dos solos, o primeiro autor que correlacionou os resultados do ensaio de granulometria com o potencial erosivo dos solos foi Mindleton (1930). Segundo este autor, os solos que quando ensaiados sem e com uso de defloculante e agitação mecânica, apresentarem a relação $RD > 15\%$ (vide seção 2.2.1), são considerados potencialmente erodíveis, enquanto Bastos (1999) sugere que para solos residuais o valor limite seria de 50 %.

Nogami e Villibor (1995) afirmam que os solos finos tropicais têm seu comportamento em grande parte governado pela estruturação e pelos grumos formados pelas partículas finas. Sendo possível a identificação e quantificação da agregação das partículas por meio de ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante e agitação mecânica.

Pensando nas duas situações acima expostas a granulometria do solo estudado foi determinada segundo os procedimentos da norma NBR7181 (ABNT, 2016), que prescreve o uso de defloculante e agitação no aparelho dispersor e segundo os procedimentos da norma NBR 13602 (ABNT, 1996), segundo a qual não se usa defloculante e agitação para análise granulométrica dos solos.

4.2.3 Limites de Atterberg

Os limites de consistência representam o teor de umidade no qual há mudança no estado físico do solo. Portanto, os limites de plasticidade (LP) e líquidos (LL), também chamado de limites de Atterberg, definem respectivamente os teores de umidade para início de comportamento plástico e líquido dos solos, e a diferença entre estes limites dá o índice de plasticidade $IP = (LL-LP)$ que representa o quão plástico o solo é.

Comumente na engenharia geotécnica os limites de consistência são correlacionados com outros parâmetros de comportamento dos solos. Braja (2011) apresenta algumas correlações entre os limites de Artterberg, energia de compactação e fração pedregulho dos solos, para a determinação aproximada da densidade seca máxima e teor de umidade ótimo.

Santo e Castro (1967) apud Rego (1978) estabelecem um critério para a avaliação da erodibilidade dos solos baseado no limite de plasticidade e no índice de plasticidade. Porém, o estudo feito por Rego (1978) apontou que o critério em função dos limites de consistência não representa o comportamento frente à erosão dos solos residuais de gnaiss por ele estudados. Nogami e Villibor (2009) mostram estudos sobre dificuldade de repetibilidade, e a grande variação de valores nos limites de consistência obtidos em amostras de mesmo solo, por laboratórios diferentes. Assim, os referidos autores ressaltam que para os solos tropicais a utilização de critérios de classificação geotécnica baseados nos limites de consistência muitas vezes conduzem a resultados errôneos.

Neste trabalho os limites de consistência do solo estudado foram determinados segundo os procedimentos descritos nas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), com amostras preparadas segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016)

4.3 CURVA DE COMPACTAÇÃO

A determinação da curva de compactação de um solo se fez necessária quando se pretende utilizá-lo na construção de aterros compactados, em obras de engenharia geotécnica. De um modo geral, a compactação consiste na remoção do ar contido no solo por meio da aplicação de energia mecânica, acarretando assim sua densificação. Sabe-se que, a densidade aparente seca dos solos (γ_d), varia com energia de compactação aplica e com seu teor de umidade. Sendo que, o comportamento esperado para grande parte dos solos é um aumento inicial do γ_d , com aumento do teor de umidade até o ponto de γ_d máximo e umidade ótima, após este ponto, γ_d decresce com o aumento do teor de umidade, formando uma curva com aparência de um sino.

A densidade aparente seca dos solos e o teor de umidade interferem diretamente em seu comportamento mecânico de hidráulico. Braja (2011) mostra que a condutividade hidráulica e compressibilidade dos solos são fortemente alteradas em função da umidade de compactação. Hanson e Hunt (2007) mostram que a erodibilidade também é bastante influenciada pela energia e umidade de compactação.

Neste trabalho as curvas de compactação do solo estudado foram determinadas para as três condições de energias descritas na norma NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando amostras secas previamente ao ar e preparada conforme manda a norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

4.4 ENSAIOS DO CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE MCT

A erodibilidade dos solos de taludes de cortes pode ser relacionada com a sua capacidade de infiltração e com grau de desagregação que estes sobre quando submersos. Segundo Nogami e Villibor (1995) quando um solo é capaz de absorver o volume de chuva precipitado, este sofrerá erosão praticamente nula, pois não se formará fluxo laminar. Por outro lado, se um solo se mantém agregado quando submerso em água, perdendo nada ou uma quantidade pequena de massa, este se mostra resistente a ação erosiva das águas pluviais.

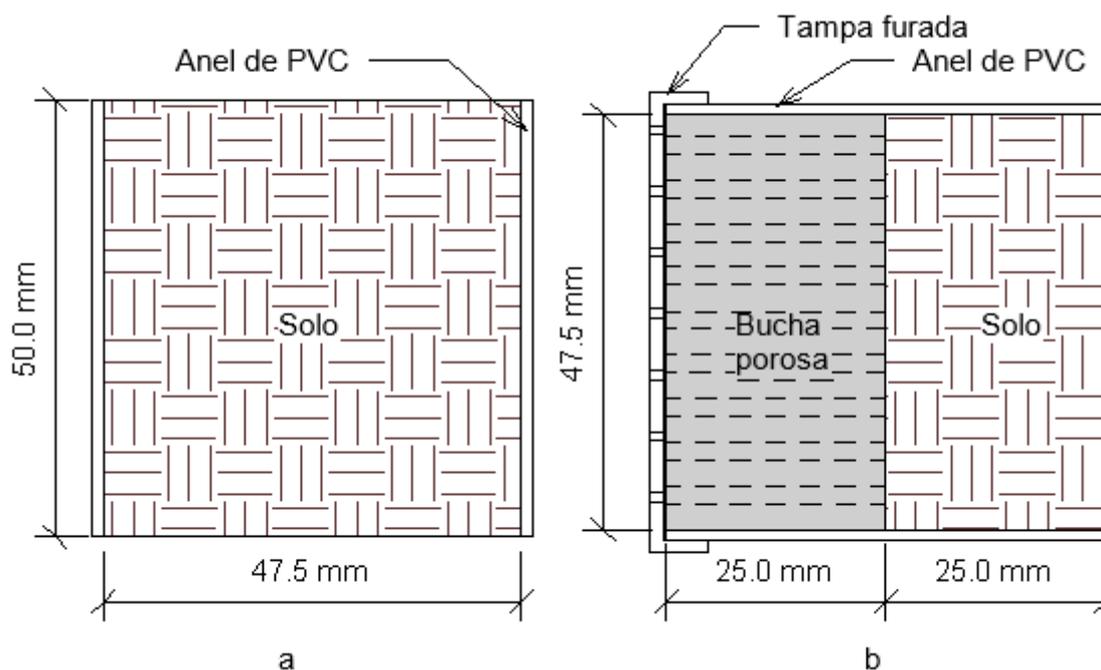
Até o momento da realização deste trabalho sabia-se que, apenas Bastos (2003) já havia utilizado ao critério de erodibilidade MCT para qualificar a erodibilidade de solos compactado. No entanto, o autor apresenta o apenas o valor do parâmetro E dos solos compactado na energia normal e não diz nada a respeito da variação da energia de compactação ou da erodibilidade destes solos na condição natural. Buscando avaliar a susceptibilidade à erosão do solo aqui estudado, na condição natural e os efeitos causados nesta pela compactação o estudo da erodibilidade foi conduzido do modo descrito a seguir.

4.4.1 Preparação dos corpos de prova

4.4.1.1 Condição natural

Primeiramente as amostras de solo em estado natural que tinham sido extraídas e acondicionadas segundo a descrição do item 4.1.1, foram desembaladas. Em seguida o excesso de material deixado no momento da extração, foi retirado em uma cápsula, pesado e lavado a estufa na temperatura de 105 °C onde foi mantido por um período de 24 horas para a determinação do teor de umidade inicial. Os corpos de prova indeformados para os ensaios de infiltrabilidade assumiram as mesmas dimensões do anel de coleta (em PVC), sendo estas, 47,5 mm de diâmetro interno e 50 mm altura, como ilustrado na Figura 4.2a. As amostras preparadas para o ensaio de erodibilidade específica após a etapa descrita anteriormente assumiram a forma ilustrada na Figura 4.2b.

Figura 4.2: Corte ilustrativo dos corpos de prova dos ensaios, a) infiltrabilidade, b) erodibilidade específica



Fonte: O autor

4.4.1.2 Solo compactado

Determinadas as curvas de compactação do solo estudado, para as condições de energia normal, intermediária e modificada, definidas pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016) procedeu-se com a preparação dos corpos de prova usadas nos ensaios de erodibilidade do critério MCT.

Foram separadas e acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados três porções de 3500 g de solo seco ao ar, que tiveram suas umidades determinadas, segundo o procedimento descrito na norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Tendo determinado o teor de umidade das porções de solo, água destilada foi acrescentada a estas, de modo que, atingissem as umidades ótimas da curva de compactação, que foram respectivamente, 24,5 %, 19,6 % e 17,5 % para as energias normal, intermediária e modificada. Misturadas com suas respectivas quantidades de água, cada porção foi novamente acondicionada em sacos plásticos hermeticamente fechado e identificados, que foram deixados em repouso por 48 horas para homogeneização completa.

Passadas 48 horas iniciou-se a compactação das amostras. Primeiramente foram preparadas as amostras na condição de energia normal, para isto o cilindro e soquete pequeno de compactação foram utilizados. Após a compactação o solo excedente acima da borda do cilindro foi arrasado com auxílio de uma régua metálica, o cilindro foi limpo com um pincel e

posteriormente pesado para verificação do grau de compactação, na Figura 4.3a mostra-se o resultado deste procedimento. Posteriormente, a massa de solo foi extraída do cilindro com auxílio do extrator hidráulico, a Figura 4.3b mostra a massa de solo extraída. Tendo extraído a massa de solo do cilindro, foi iniciado o processo para obtenção dos corpos de prova utilizados nos ensaios de erodibilidade. Para tanto, o anel de PVC, já descrito antes, foi posicionado sobre a massa de solo, em seguida o solo envolta deste, foi sendo removido com auxílio de uma espátula até se formasse um cilindro com mesmo diâmetro interno do anel de PVC, como mostrado na Figura 4.3c. Então uma leve pressão foi aplicada sobre o tubo de modo que este fosse envolvendo a massa de solo, assim foram extraídos dois corpos de prova, semelhantes ao ilustrado na Figura 4.2a, de cada massa amostra compactada. Os corpos de prova foram identificados, pesados e envoltos com plástico filme de PVC. Os procedimentos anteriormente descritos foram refeitos quatro vezes para cada condição de energia de compactação, de modo que foram moldados 24 corpos de prova. Estes corpos de prova separados por energia de compactação foram acondicionados em uma câmara fechada, de onde foram retirados aleatoriamente a medida em que os ensaios eram executados.

Figura 4.3: a) amostra de solo arrasada após a compactação, b) massa de solo compactado extraída, c) obtenção do corpo de prova para os ensaios do critério MCT d) corpos de prova sendo secas ao ar



a



b



c



d

Foto: O autor

Cabe aqui expor que todas as amostras obtidas segundo os procedimentos anteriormente descritos apresentaram variação em seus pesos específicos aparente seco e natural, quando comparado com os valores obtidos quando o solo ainda se encontrava no cilindro de compactação. Araujo (1994) observou e registrou este mesmo fato quando este autor estava preparando amostras para ensaios da curva de retenção, obtidas de solos compactados extraídos dos cilindros. No entanto, o referido autor não propõem explicação para este ocorrido. Neste trabalho observou-se que esta variação pode ocorrer por dois motivos: 1) maior densidade das camadas inferiores por terem recebido maior energia de compactação, 2) expansão da massa de solo ao ser extraída do cilindro, no capítulo 5 dedica-se uma seção para mostrar estes fenômenos.

4.4.2 Execução do ensaio de infiltrabilidade

Os corpos de prova das quatro condições do solo: indeformado, compactado na energia normal, energia intermediária e energia modificada, foram ensaiados em quatro condições de umidade sendo: 1ª umidade de moldagem do corpo de prova, 2ª secos ao ar por 24 horas, 3ª secos ao ar por 48 horas e 4ª secos ao ar por 96 horas. Assim, segundo Nogami e Villibor (1979) pode-se avaliar os efeitos sobre a erodibilidade, que um período de estiagem pode causar.

O ensaio de infiltrabilidade consiste na medição do volume de água infiltrado por capilaridade em uma amostra de solo assente sobre uma pedra porosa de graduação aberta com

um papel filtro em sua face superior, disposta dentro de um recipiente de PVC ligado um tubo horizontal graduado. A Figura 4.4 mostra a execução deste ensaio. Primeiramente o tubo e o recipiente com a pedra porosa são preenchidos com água destilada, então a amostra previamente pesada é posta sobre a pedra com papel filtro, mede-se o deslocamento ocorrido no tubo nos tempos de 1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 e 100 minutos. Com as medidas plota-se um gráfico onde o volume absorvido fica no eixo das ordenadas enquanto no eixo das abscissas plota-se a raiz do tempo. Do gráfico gerado extrai-se o coeficiente de sorção que é definido como a inclinação da parte reta da curva dividida por 10x a área da seção transversal da amostra.

Figura 4.4: execução do ensaio de infiltrabilidade



Foto: L.K Pacheco

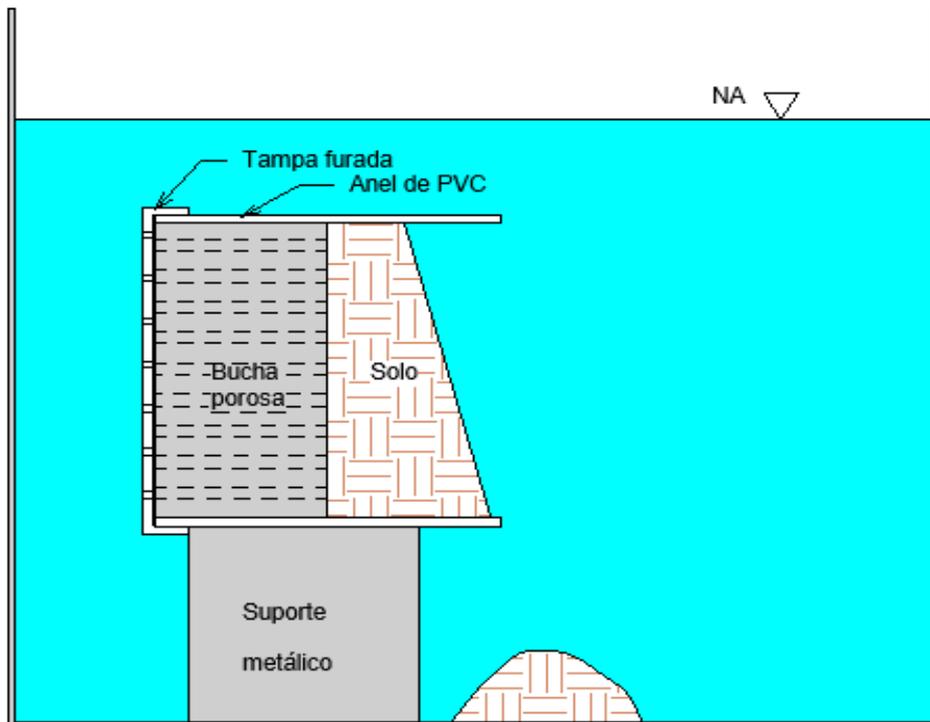
4.4.3 Execução do ensaio erodibilidade específica

Na realização deste ensaio as mesmas condições de secagem descritas na seção 4.4.2 foram usadas. O ensaio de erodibilidade específica consiste na imersão total em água de uma amostra de solo previamente pesada, que fica em repouso submerso por um período de 20 horas, na Figura 4.5 ilustra-se a execução do ensaio. Após este período a amostra é retirada da água, a massa que se manteve retida no anel de PVC é extraída em um recipiente de cerâmica que é levado à estufa a temperatura de 105 °C, onde permanece até a completa secagem. A partir da massa de solo seca que ficou retida, do teor de umidade antes da submersão, do peso total do conjunto anel mais solo e do peso do anel, determina-se a massa de solo seco desprendido. A porcentagem de massa seca desprendida em relação a massa seca total do corpo de prova dá o parâmetro P_i conforme a equação 4.1.

$$P_i = 100. \frac{\left[\left(\frac{P_{s+a} - P_a}{1 + w} \right) - P_{sr} \right]}{\left(\frac{P_{s+a} - P_a}{1 + w} \right)} \quad \text{equação 4.1}$$

Onde, P_{s+a} é o peso do solo mais o anel antes do ensaio, P_a é o peso do anel, w é o teor de umidade antes do ensaio e P_{sr} é o peso de solo que ficou retido

Figura 4.5: esquema de execução do ensaio de erodibilidade específica



Fonte: O autor

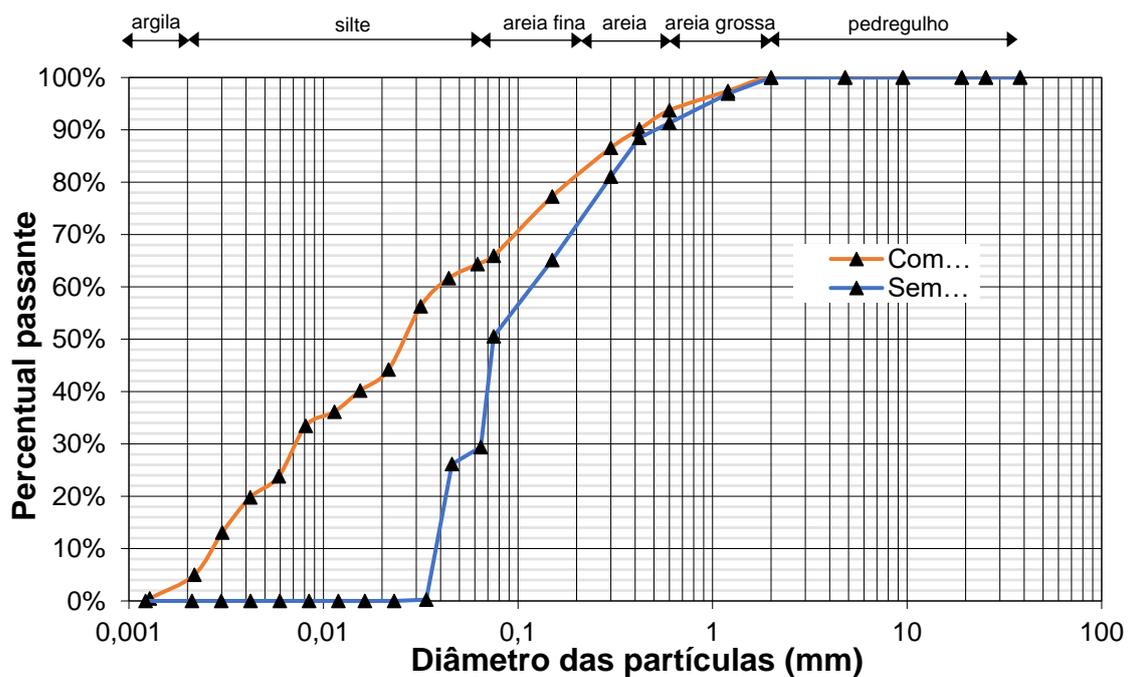
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos da campanha experimental. Objetiva-se aqui avaliar, além do potencial erosivo do solo estudado, relações entre as propriedades físicas do solo estudado e sua erodibilidade.

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

O solo estudado consiste em um silte arenoso inorgânico (ML) segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A granulometria foi determinada com e sem uso de dispersão e defloculante. Na figura 5.1 apresenta-se as curvas para estas duas condições e a Tabela 5.1 apresenta um resumo de cada fração que compõem estas curvas, segundo as definições da norma NBR 6502 (ABNT, 1995) e do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Figura 5.1: Curvas granulométricas do solo estudado



Fonte: O autor

Tabela 5.1: Composição granulométrica

	Com defloculante e dispersão (ABNT)	Sem defloculante e dispersão (ABNT)	Com defloculante e dispersão (USDA)	Sem defloculante e dispersão (USDA)
Pedregulho	0 %	0 %	0 %	0 %
Areia grossa	6,29 %	8,69 %	37,46 %	73,12 %
Areia média	13,35 %	20,88 %		
Areia fina	16,32 %	41,81 %		
Silte	59,91 %	28,63 %	58,40 %	26,88 %
Argila	4,13 %	0 %	4,13 %	0 %

Fonte: o autor

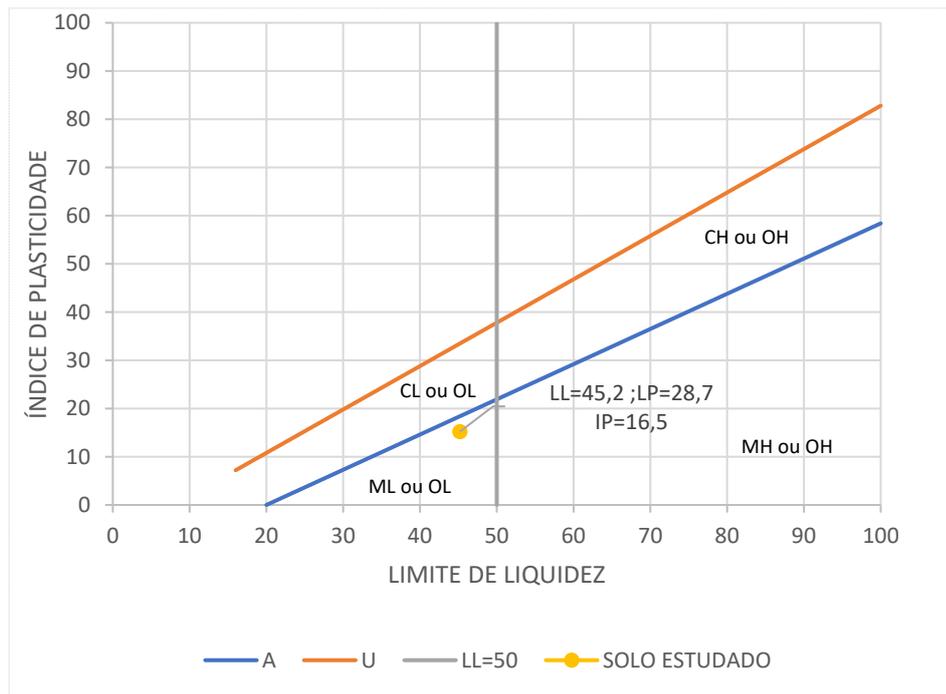
Como constata-se na tabela 5.1 a maior parte composição granulométrica do solo estudado é constituída por silte (grãos maiores que 0,002 mm e menores que 0,06 mm, NBR6502/95). Segundo Nogami e Villibor (1995) os solos siltosos são altamente suscetíveis a erosão tanto taludes de cortes quanto em aterros compactados.

Para calcular a razão de dispersão de Middleton (RD), foi realizada a análise granulométrica sem uso de agitação mecânica e defloculante. Como Middleton (1930) define silte como sendo os grãos maiores que 0,002 mm e menores que 0,05 mm, fez-se necessário calcular esta fração segundo a classificação do USDA. O valor de RD obtido para o solo estudado foi de 42,9 %, segundo o critério proposto por Bastos (1999) $RD > 50\%$, este não seria classificado como altamente erodível e segundo o critério de Middleton $RD > 15\%$, o solo é classificado como sendo de alta erodibilidade. As observações de campo como mostrado nas Figuras 3.4a e 3.4b no capítulo 3, revelam a alta suscetibilidade deste solo, o que leva a concluir que o critério de Middleton é mais adequado para classificá-lo.

Ainda com base na Figura 5.1 e na Tabela 5.1, constata-se que, na condição de utilização deste solo em obras de aterro, sendo esta, representada pela curva granulométrica sem defloculante, todas as partículas menores que 0,031 mm, encontram-se na forma de grumos, na grande maioria formando areia fina. Esta nova estrutura que o solo adquire na condição solta lhe confere comportamento mecânico e hidráulico bastante distinto da condição natural. Este assunto é mais bem detalhado na análise dos resultados de erodibilidade.

Os limites de consistência do solo estudado, como pode ser visto na Figura 5.2, o classificam como um silte de média plasticidade. Na Tabela 5.2 apresenta-se um resumo dos índices físicos, estes foram obtidos fazendo-se a média a partir das amostras usadas nos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica.

Figura 5.2: Gráfico de plasticidade



Fonte: elaborado pelo autor baseado em Braja (2011)

Tabela 5.2: Índices físicos do solo estudado na condição natural

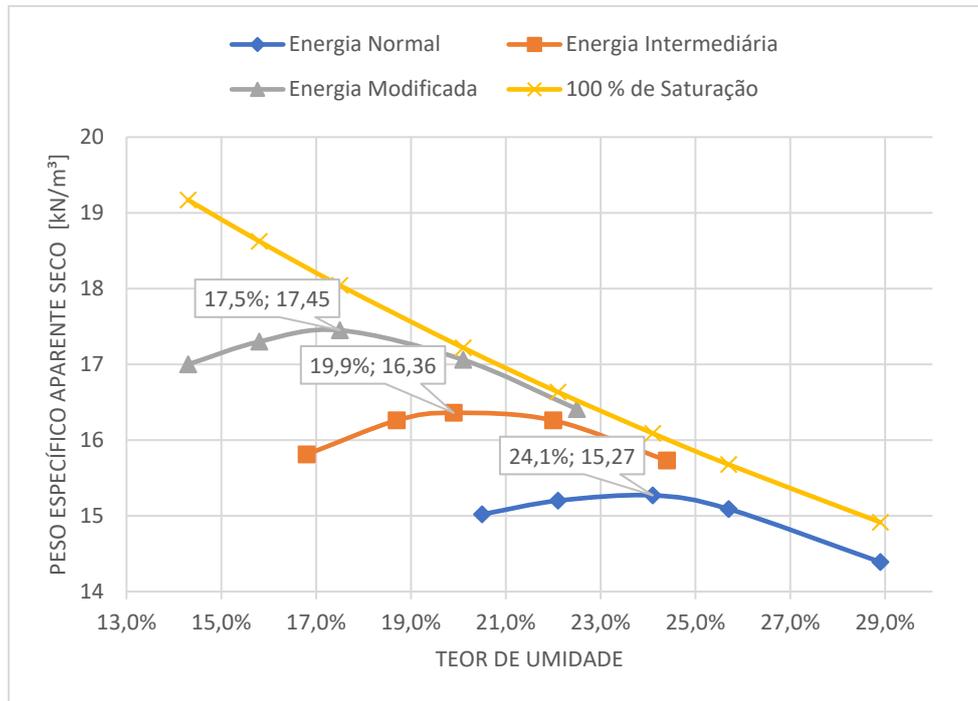
	Média	Desvio padrão
Teor de umidade natural [%]	25,0	1,9
Densidade real dos grãos [g/cm ³]	2,712	
Peso específico aparente natural [kN/m ³]	18,33	1,29
Peso específico aparente seco [kN/m ³]	14,66	1,17
Grau de saturação [%]	78,7	1,22
Índice de vazios	0,85	0,145
Porosidade [%]	46,00	4,3

Fonte: o autor

5.2 CURVAS DE COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação do solo estudado são mostradas na figura 5.3, nela observa-se que, com aumento da energia de compactação da normal para a intermediária o teor de umidade ótimo cai de 24,1 % para 19,9%, ao passo que há um incremento de 7,12 % no peso específico aparente seco máximo. Quando a compactação é aumentada para energia modificada a umidade ótima é reduzida para 17,5 % e o peso específico aparente seco aumenta 14,2 %, quando comparado à energia normal e 6,6 % em relação a energia intermediária. Este deslocamento das curvas para a direção noroeste do gráfico é o comportamento esperado para todos os tipos de solos (BRAJA, 2011).

Figura 5.3: Curvas de compactação



Fonte: o autor

O aumento do peso específico aparente seco, com aumento da energia de compactação acarreta o aumento capacidade de suporte dos aterros compactados. Fernandes (2015) estudando a material do aterro construído com o solo do mesmo maciço estudado aqui, verificou que há um aumento de 68% no CBR deste solo, quando comparado ao valor obtido na umidade ótima da energia intermediária com o da energia normal. No entanto, como há uma grande diferença entre os teores de umidade ótimos das energias mais altas e o teor de umidade natural, neste caso aqui, 5,1 e 7,5 pontos percentuais, pode ser difícil levar o material aos teores ótimo de compactação nas obras de aterro que exijam a utilização das energias intermediária e modificada. UFSC (2010), relata que esta dificuldade de redução da umidade, ocorreu nas obras de aterro do contorno ferroviário e nas obras rodoviárias da região, onde os materiais eram do mesmo perfil e origem geológica que o solo aqui estudado.

Na Tabela 5.3 mostra-se um resumo dos índices físicos do solo compactado nas diferentes energias. Também se apresenta na mesma tabela uma estimativa da umidade ótima de compactação e do peso específico aparente seco máximo para o solo estudado, obtidos a partir das equações 5.1 e 5.2 apresentadas por Braja (2011), que correlacionam o limite de liquidez e a energia de compactação com os valores ótimos das curvas.

$$w_{ot} = [1,95 - 0,38(\log EC)](LP)[\%] \quad \text{equação 5.1}$$

$$\gamma_{dm\acute{a}x} = 22,6e^{-0,018w_{ot}}[kN/m^3] \quad \text{equação 5.2}$$

Onde, LP é o limite de plasticidade (%) e EC é energia de compactação (kJ/m³)

A única finalidade da apresentação dos valores ótimos de compactação obtidos pelas equações 5.1 e 5.2 é mostrar que estas têm certa aplicabilidade para o solo em questão e possivelmente para outros solos residuais. Estas correlações podem ser usadas na determinação da umidade de início do ensaio, que, segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), deve estar entorno de 5% abaixo da umidade ótima presumível. Constata-se também a partir destas correlações, que o solo aqui estudado apresenta a mesma tendências de comportamento, que, os 181 solos estudados pelos seus autores. Sendo que os valores de umidade ótima estimados e os obtidos do ensaio Proctor do solo são bem próximos. A discrepância em relação aos pesos específicos se dá em função da diferença entre a de densidade real dos grãos do solo aqui estudado e dos solos que foram a base de dados para elaboração das correlações.

Tabela 5.3: Índices físicos do solo compactado

	Energia normal	Energia intermediária	Energia modificada
Umidade ótima [%]	24,1	19,9	17,5
Peso específico aparente seco máximo [kN/m ³]	15,27	16,36	17,45
Índice de vazios	0,743	0,627	0,528
Porosidade [%]	42,7	38,6	34,5
Grau de saturação [%]	88,0	86,1	90,4
Umidade ótima * [%]	24,7	21,02	17,4
Peso específico aparente seco máximo [kN/m ³] *	14,53	15,53	16,57

*valores estimados a partir das equações 5.1 e 5.2

Fonte: o autor

5.3 CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE ERODIBILIDADE

Como mencionado na seção 4.4.1.2, os corpos de prova utilizados nos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, foram moldados a partir da massa de solo extraída do cilindro de compactação. Nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 apresenta-se os índices físicos de cada ponto de compactação e os índices físicos de cada corpo de prova.

Tabela 5.4: Índices físicos dos corpos de prova da energia normal

Energia de compactação normal								
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Umid. de comp.	24,3%		24,2%		24,1%		23,8%	
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	14,94		15,05		15,18		15,3	
Grau de comp.	98%		99%		99%		100%	
Índice de vazios	0,781		0,768		0,753		0,739	
Porosidade	43,8%		43,4%		42,9%		42,5%	
Grau de saturação	84,5%		85,3%		86,8%		87,2%	
Corpos de prova	P-48	I-24	P-UM	P-24	P-96	I-96	I-UM	I-48
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	14,02	14,46	14,32	14,17	14,60	14,91	14,88	14,83
Grau de comp.	92%	95%	94%	93%	96%	98%	97%	97%
Índice de vazios	0,898	0,840	0,858	0,878	0,822	0,784	0,788	0,793
Porosidade	47%	46%	46%	47%	45%	44%	44%	44%
Grau de saturação *	73%	78%	76%	75%	79%	83%	83%	82%
Grau de saturação **	51%	70%	76%	64%	54%	42%	83%	60%

Grau de compactação em relação ao γ_d máximo da curva, 15,27 kN/m³

Tabela 5.5: Índices físicos dos corpos de prova da energia intermediária

Energia de compactação intermediária								
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Umid. de comp.	19,6%		19,5%		19,4%		18,8%	
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	15,93		16,02		16,37		16,51	
Grau de comp.	97%		98%		100%		101%	
Índice de vazios	0,670		0,661		0,625		0,611	
Porosidade	40,1%		39,8%		38,5%		37,9%	
Grau de saturação	79,3%		80,0%		84,2%		83,4%	
Corpos de prova	P-96	I-96	I-48	P-24	I-24	P-UM	I-UM	P-48
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	15,82	15,49	16,47	15,46	16,18	15,32	15,98	15,31
Grau de comp.	97%	95%	101%	95%	99%	94%	98%	94%
Índice de vazios	0,681	0,718	0,615	0,721	0,645	0,736	0,665	0,738
Porosidade	41%	42%	38%	42%	39%	42%	40%	42%
Grau de saturação *	71%	75%	85%	70%	81%	70%	77%	71%
Grau de saturação **	42%	33%	62%	67%	68%	70%	77%	47%

Grau de compactação em relação ao γ_d máximo da curva, 16,36 kN/m³

Tabela 5.6: Índices físicos dos corpos de prova da energia modificada

Energia de compactação modificada								
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Umid. de comp.	16,9%		16,6%		16,3%		16,5%	
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	17,03		17,22		17,28		17,42	
Grau de compactação	98%		99%		99%		100%	
Índice de vazios	0,562		0,545		0,540		0,527	
Porosidade	36,0%		35,3%		35,0%		34,5%	
Grau de saturação	81,5%		82,6%		81,9%		84,9%	
Corpos de prova	P-96	I-UM	I-96	I-24	P-UM	P-48	I-48	P-24
Peso esp. ap. seco [kN/m ³]	16,85	16,54	16,75	17,16	16,16	16,59	17,05	17,40
Grau de compactação	97%	95%	96%	98%	93%	95%	98%	100%
Índice de vazios	0,579	0,608	0,588	0,550	0,646	0,604	0,561	0,529
Porosidade	37%	38%	37%	35%	39%	38%	36%	35%
Grau de saturação *	78%	74%	77%	77%	69%	75%	80%	83%
Grau de saturação **	39%	74%	32%	60%	69%	42%	53%	75%

Grau de compactação em relação ao γ_d máximo da curva, 17,45 kN/m³

I= ensaio de infiltrabilidade, P = ensaio de perda de massa por imersão

UM= corpos de prova ensaiados na umidade de compactação, 24= secos ao ar por 24 horas

48= secos ao ar por 48 horas, 96= secos ao ar por 96 horas, * moldagem do corpo de prova

** início do ensaio

Fonte: o autor

Nas tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, é possível verificar que para a maioria dos casos, o peso específico aparente seco (γ_d) dos corpos de prova são menores que os valores dos pontos de compactação. Sendo que, para a energia normal a maior redução acontece no ponto 1, onde há uma redução de 6,4% no γ_d do corpo de prova P-48, na energia intermediária a maior redução acontece no ponto 4 no corpo de prova P-48 e na energia modificada no ponto 3, no corpo de prova P-UC. Apenas o corpo de prova I-48 da energia intermediária apresentou γ_d um pouco acima do γ_d do ponto de compactação.

Neste trabalho, buscou-se verificar algumas hipóteses para explicar a variação no peso específico aparente seco dos corpos de prova. A primeira hipótese se refere a variação de densidade que pode ocorrer no corpo de prova compactado, pelo fato da compactação ser feita em camadas, o que sugere que as camadas inferiores recebem mais energia. Isso se verifica no ponto 2 da Tabela 5.5 onde o corpo de prova I-48 foi moldado da parte inferior da massa extraída do cilindro de compactação e o corpo de prova I-24 foi moldado da parte superior. A outra hipótese levantada refere-se a possível expansão que a massa de solo sofre ao ser extraída

do cilindro. Para investigar esta hipótese dois pontos compactação foram feitos, sendo um na energia normal com teor de umidade de 25,4 % e outro na energia modificada com teor de umidade de 18,4 %. Constatou-se a partir destes pontos, como pode ser verificado com os dados contidos nas figuras 5.4a, b, c, d, e e f, que há uma pequena expansão da massa de solo quando esta, é extraída do cilindro.

Figura 5.4: a) e b) Dimensões internas do cilindro, c) e d) dimensões da massa de solo energia normal, e) e f) dimensões da massa de solo energia modificada



a



b



c



d



e



f

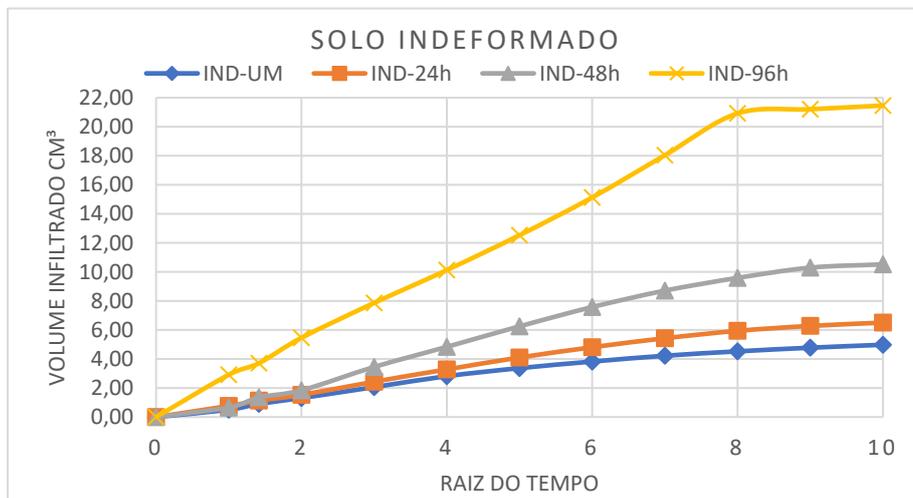
Foto: o autor

O γ_d calculado com massa dentro do cilindro foi de 14,30 kN/m³ para o ponto da energia normal e 16,93 kN/m³ para o ponto da energia modificada. Quando extraída a massa de solo, o γ_d calculado foi de 14,17 kN/m³ para energia normal e 16,72 kN/m³ para energia modificada. Embora a redução tenha sido muito baixa, 0,92 % para o caso da energia normal e 1,26 % para a modificada, esta redução em conjunto com variação da densidade que pode ocorrer nas camadas de compactação, explicam o porquê de os corpos de prova apresentarem pesos específicos diferentes dos calculados no cilindro de compactação.

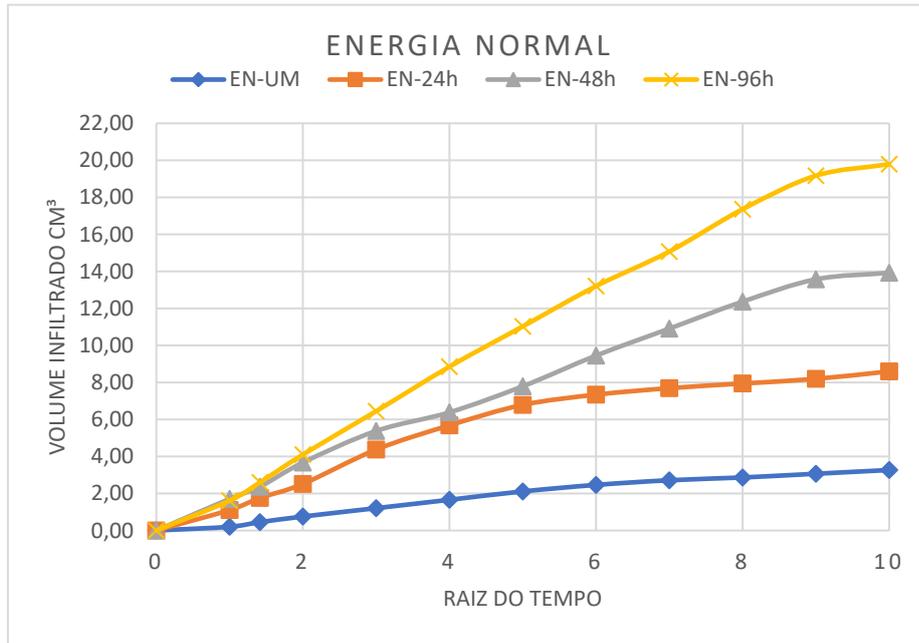
5.4 ENSAIOS DE INFILTRABILIDADE

Os resultados dos ensaios de infiltrabilidade são apresentados nos gráficos das figuras 5.5a, b, c e d. Estes gráficos mostram o volume de água infiltrado *versus* a raiz do tempo, em cada condição de umidade para cada condição de compactação do solo, sendo estas variações designadas pelas siglas: IND - amostras indeformadas, EN - amostras compactadas na energia normal, EI – amostras compactadas na energia intermediária, EM- amostras compactadas na energia modificada, UM- amostras ensaiadas na umidade de moldagem, sendo esta, a umidade natural para o caso da amostra indeformada e para o caso das amostras de solo compactado esta umidade refere-se a umidade de compactação conforme as tabelas 5.4, 5.5 e 5.6. As siglas 24h, 48h e 96h referem-se ao tempo em que as amostras foram deixadas secando ao ar, sendo respectivamente 24 horas, 48 horas e 96 horas.

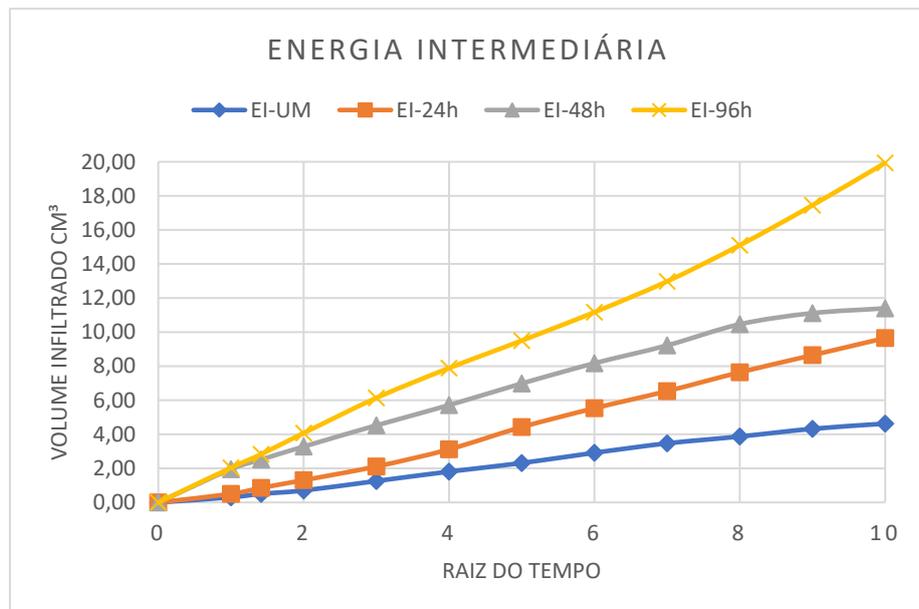
Figura 5.5: Resultados dos ensaios de infiltrabilidade, a) amostras indeformadas, b) amostras da energia normal, c) amostras da energia intermediária e d) amostras da energia modificada



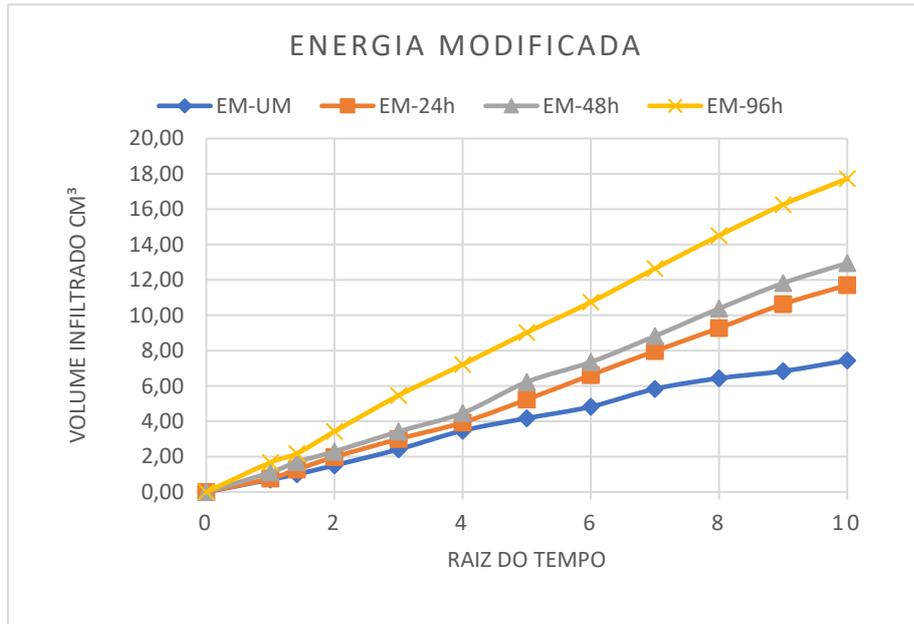
a



b



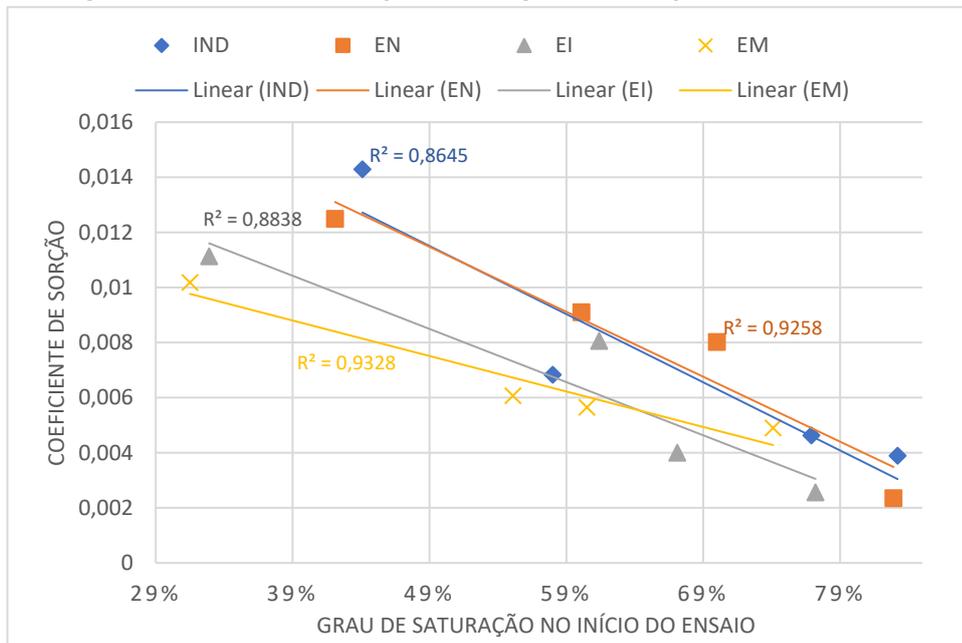
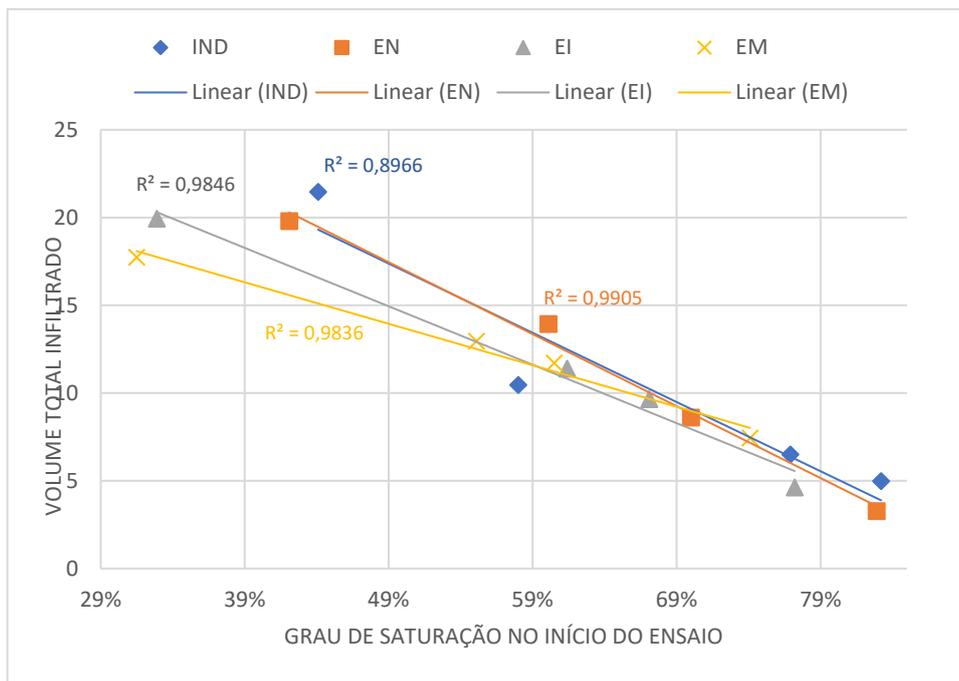
c



d

Fonte: o autor

Como pode ser observado nos gráficos das Figuras 5.5a, b, c e d, há uma tendência geral de aumento na taxa de infiltração e no volume total infiltrado com o aumento do tempo de secagem. Estes resultados já eram esperados, pois quanto maior o tempo em que amostras ficam expostas ao ar, menor será seu grau de saturação no início do ensaio. Este efeito é mais bem ilustrado nos gráficos da Figura 5.6 e 5.7, que mostram o coeficiente de sorção (s) (definido pela equação 2.3) e o volume total infiltrado em função do grau de saturação das amostras no início do ensaio.

Figura 5.6: Coeficiente de sorção *versus* o grau de saturação no início do ensaioFigura 5.7: Volume total infiltrado *versus* o grau de saturação no início do ensaio

Fonte: o autor

No gráfico da Figura 5.6, observa-se que a tendência de variação inversamente proporcional do coeficiente de sorção com o grau de saturação inicial, é razoavelmente representada por um ajuste linear. Possivelmente a linha de tendência não se ajusta melhor,

devido as variações de índices físicos que existem entre as amostras do mesmo grupo. Na tentativa de verificar esta hipótese, foi avaliada a variação do peso específico aparente seco das amostras e os erros de umidade de cada grupo, os valores médios e desvios padrões destes índices são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Peso específicos aparente seco das amostras

	IND	EN	EI	EM
γ_d médio das amostras	14,727	14,750	16,079	16,898
Desvio padrão	0,072	0,217	0,413	0,283
Teor de umidade médio das amostras	24,9%	24,0%	19,4%	16,6%
Desvio padrão	1,04%	0,10%	0,35%	0,51%

Fonte: o autor

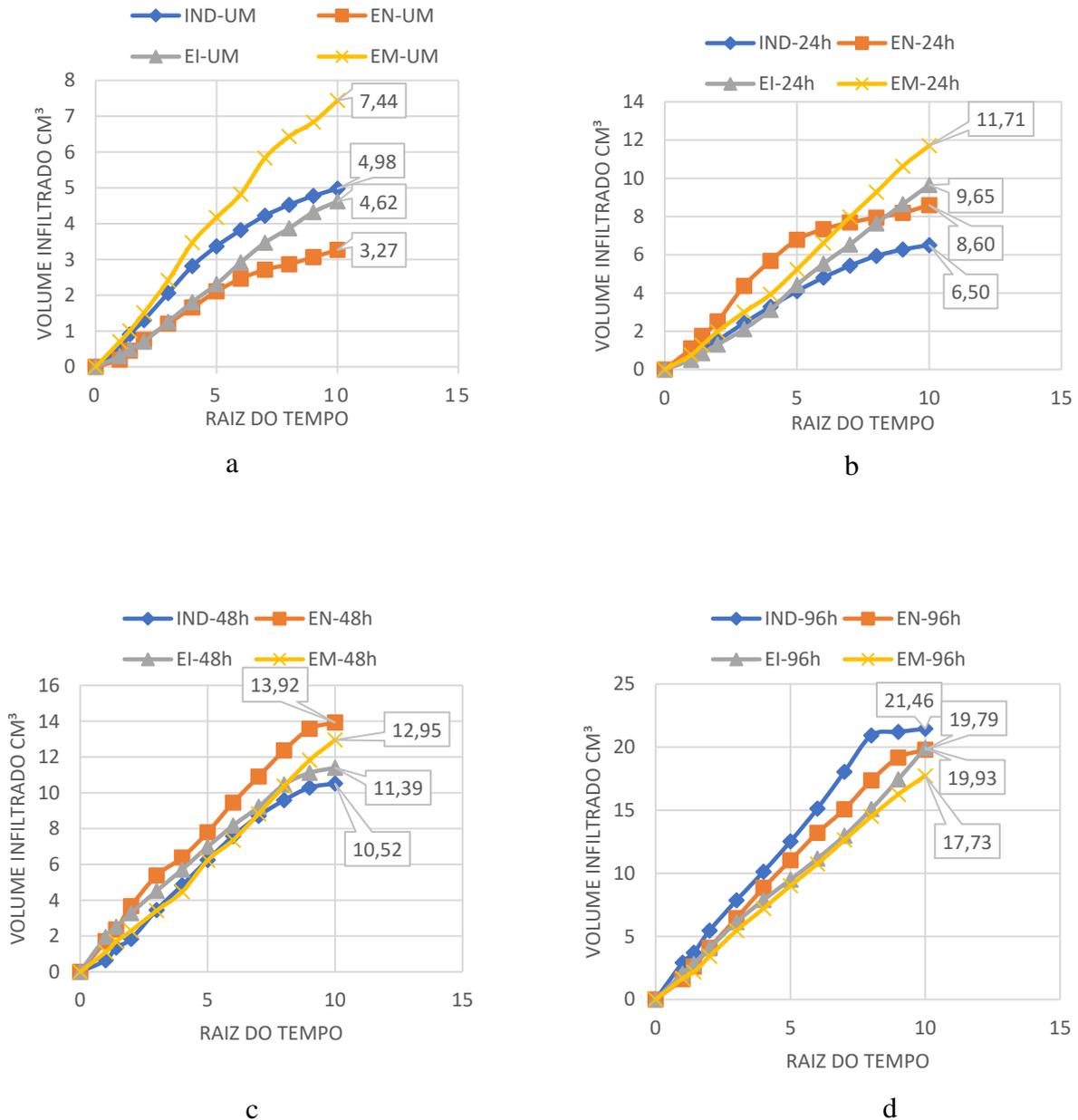
Com base nos dados da Tabela 5.7, pode se dizer ao menos para o caso do solo indeformado, que o peso específico aparente seco não interferiu na tendência de variação do coeficiente de sorção, visto que, o desvio padrão apresentado por este grupo de amostras foi 3,9 vezes menor que o desvio padrão do grupo de amostra que apresentou a melhor relação estatística. No entanto, observa-se que o desvio padrão do teor de umidade deste grupo de amostras foi o maior registrado, quando comparado os valores dos corpos de prova compactado. Isto pode ter influenciado no comportamento deste grupo de amostras nos ensaios de infiltrabilidade, porém como se trata do solo extraído da condição natural, não é possível controlar esta variação. Com relação aos solos compactados, o solo que apresentou a pior relação apresentou também o maior desvio. Portanto, não se descarta a possibilidade de interferência da variação do peso específico das amostras nos resultados dos ensaios.

Em relação ao volume total infiltrado, observa-se no gráfico da Figura 5.7 que há uma forte relação deste, com o grau de saturação das amostras no início do ensaio, sendo apenas as amostras do solo indeformado distam da tendência geral.

Os gráficos das Figuras 5.8 a, b, c e d, mostram um comparativo entre os resultados dos ensaios de infiltrabilidade das amostras de cada grupo na mesma condição de secagem. Observa-se que para as condições de secagem iniciais, ensaios feitos logo após a moldagem e secos ao ar por 24 horas, as curvas de infiltração apresentam comportamento bastante distinto entre elas. Já nas condições em que as amostras foram expostas por 48 e 96 horas ao ar, nota-se uma semelhança entre as curvas de infiltração. No entanto, não cabe ao escopo deste trabalho inferir qualquer especulação que tente explicar estes comportamentos, pois é muito provável

que cada grupo de amostras possua distintas curvas de retenção de água e sem o conhecimento destas nada pode ser inferido a respeito de como a água infiltra em cada amostra.

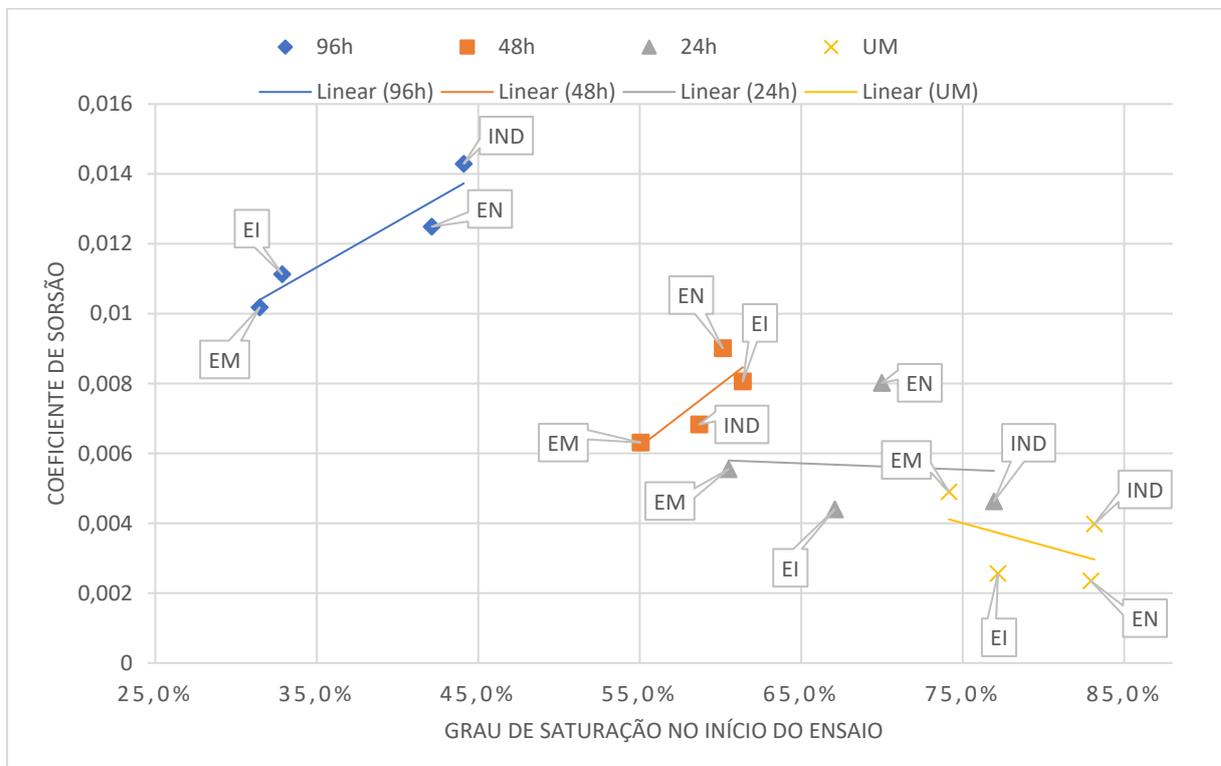
Figura 5.8: Curvas de infiltração das amostras de cada condição de compactação para as mesmas condições de secagem, a) amostras ensaiadas logo após a moldagem, b) secas ao ar por 24 horas, c) secas ao ar por 48 horas e d) secas ao ar por 96 horas



O gráfico da Figura 5.9 mostra os mesmos dados do gráfico da Figura 5.6, no entanto agrupados em função do tempo de secagem, observa-se que, não há uma tendência clara do comportamento do coeficiente de sorção em função do grau de saturação inicial, quando se

compara os coeficientes de amostras de diferentes grupos. Mostra-se neste gráfico que os valores dos coeficientes de sorção são da mesma ordem de grandeza para as diferentes condições de compactação na mesma condição de secagem. Portanto, com base nos dados apresentado infere-se que o coeficiente de sorção do solo estudado não depende da destruição da estrutura natural e nem da energia de compactação empregada. Assim, parece não haver alteração significativa da erodibilidade deste solo em função da compactação, ao menos no que tange a parcela que é quantificada pelo coeficiente de sorção.

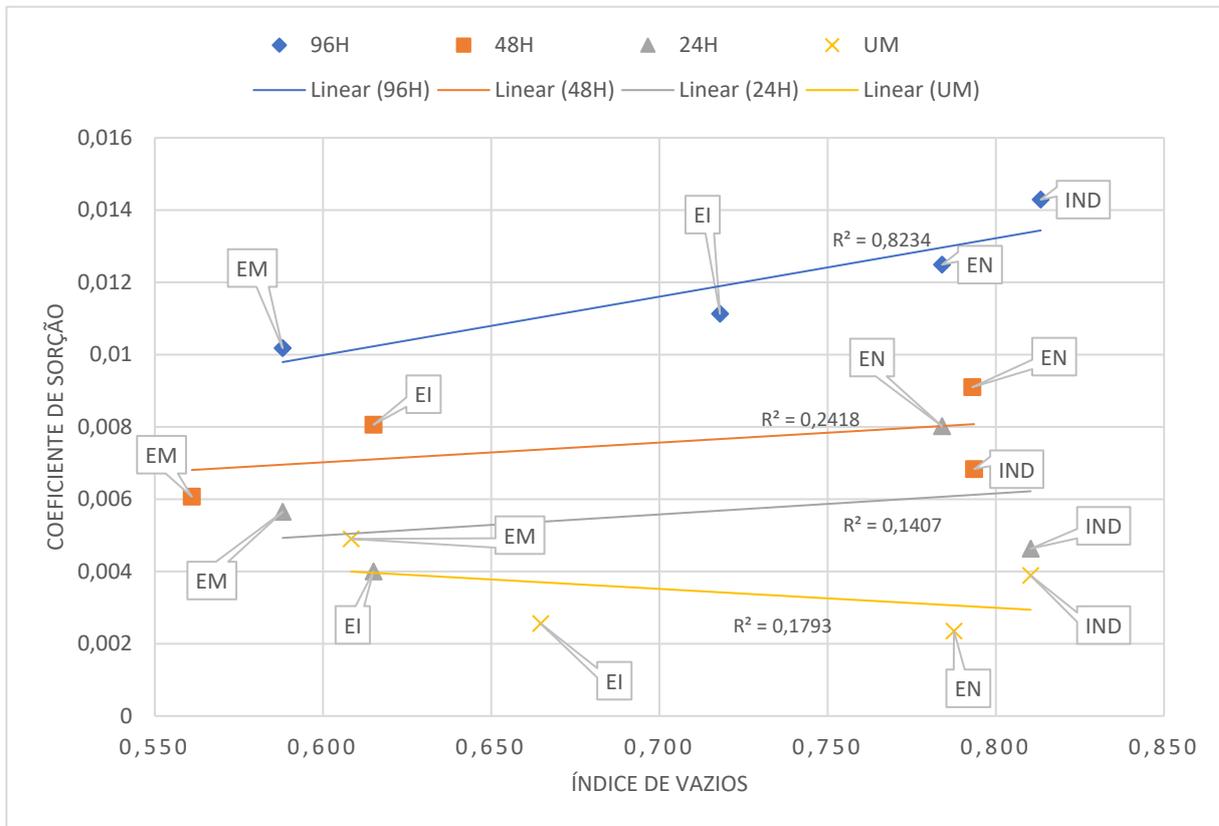
Figura 5.9: Coeficientes de sorção das amostras agrupadas nas mesmas condições de secagem em função do grau de saturação inicial



Fonte: o autor

O gráfico da Figura 5.10, mostra a variação do coeficiente de sorção em função do índice de vazios das amostras agrupadas nas mesmas condições de secagem. Avaliando o grupo de amostras secas ao ar por 96 horas, observa-se uma fraca dependência do coeficiente de sorção em função do índice de vazios. Entretanto quando se analisa os quatro conjuntos de amostra percebe-se que não há uma tendência geral, o que leva a conclusão de que, para o solo estudado aqui não há uma relação de dependência entre o coeficiente de sorção e o índice de vazios, que é variável em função da energia de compactação.

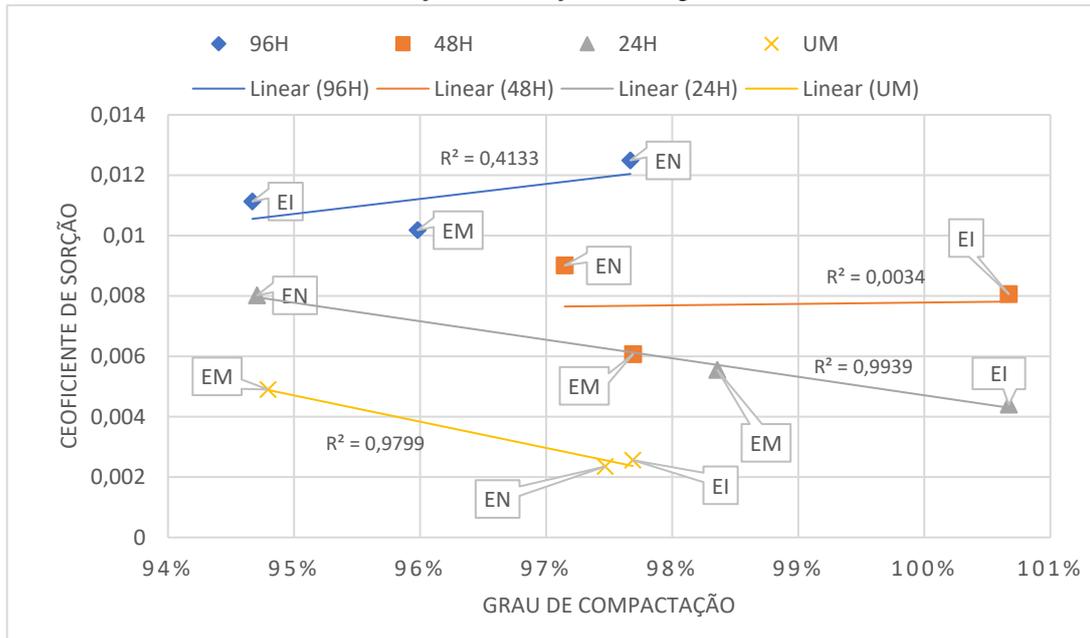
Figura 5.10: Coeficiente de sorção *versus* índice de vazios agrupados em função da condição de secagem



Fonte: o autor

O gráfico da Figura 5.11 mostra o coeficiente de sorção plotado em função do grau de compactação de cada amostra. Observa-se que para as condições de menor tempo de secagem há uma relação forte entre os índices. No entanto, a variação absoluta do coeficiente de sorção nestas condições é muito pequena e para condições de maior tempo de secagem a tendência se inverte. Sendo que, de modo geral pode-se dizer com base nestes dados, que não há uma significativa interferência do grau de compactação no coeficiente de sorção.

Figura 5.11: coeficiente de sorção versus grau de compactação dos corpos de prova agrupados em função da condição de secagem



Na Tabela 5.8 apresenta-se um resumo dos ensaios de infiltrabilidade, nela é possível observar claramente a relação de dependência entre o volume total infiltrado, o coeficiente de sorção e grau de saturação no início do ensaio para as amostras do mesmo grupo.

Tabela 5.8: Resumo dos ensaios de infiltrabilidade

	IND				EN			
	UM	24h	48h	96h	UM	24h	48h	96h
Índice de vazios	0,810	0,810	0,793	0,813	0,788	0,784	0,793	0,84
Sr in. Ensaio	83%	77%	58%	44%	83%	70%	60%	42%
Coef. Sorção x10-3	3,98	4,63	6,83	14,29	2,35	8,02	9,1	12,49
Vol. Total [cm ³]	4,98	6,5	10,46	21,46	3,27	8,6	13,93	19,79
	EI				EM			
	UM	24h	48h	96h	UM	24h	48h	96h
Índice de vazios	0,665	0,615	0,615	0,718	0,608	0,588	0,561	0,588
Sr in. Ensaio	77%	67%	61%	33%	74%	61%	55%	32%
Coef. Sorção x10-3	2,56	4	8,06	11,13	4,9	5,65	6,07	10,18
Vol. Total [cm ³]	4,62	9,65	11,39	19,93	7,44	11,71	12,95	17,73

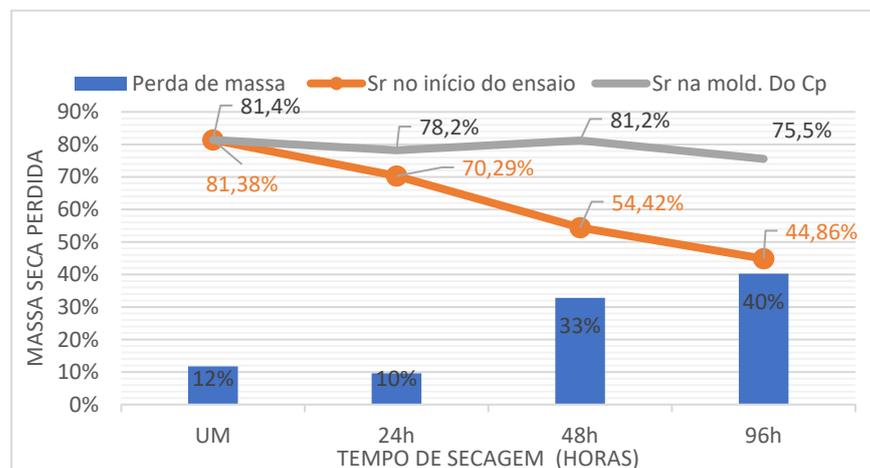
Fonte: o autor

5.5 ENSAIOS DE ERODIBILIDADE ESPECÍFICA

Aqui é mostrada uma sequência de gráficos que ilustram o comportamento do solo estudado no ensaio de erodibilidade específica. Como ilustrado na Figura 5.12, a apresentação dos dados segue os seguintes padrões, as barras representam a massa seca perdida no ensaio, a linha com pontos representa o grau de saturação no início do ensaio e linha contínua representa o grau de saturação antes do corpo de prova ser exposto ao ar, o que corresponde ao mesmo valor da moldagem dos corpos de prova. As siglas sob as barras representam as seguintes condições de ensaio: UM- amostras ensaiadas na umidade de moldagem, sendo esta, a umidade natural para o caso da amostra indeformada e para o caso das amostras de solo compactado esta umidade refere-se à umidade de compactação conforme as tabelas 5.4, 5.5 e 5.6. As siglas 24h, 48h e 96h referem-se ao tempo em que as amostras foram deixadas secando ao ar, sendo respectivamente 24 horas, 48 horas e 96 horas.

No gráfico da Figura 5.12 apresenta-se os resultados obtidos para o grupo de amostras do solo indeformado, percebe-se neste gráfico que a perda de massa é dependente do grau de saturação no início do ensaio. Embora haja um comportamento distinto entre os primeiros pontos, esta diferença é muito baixa para interferir no comportamento do grupo, sendo que estes resultados muito provavelmente ocorreram devido à heterogeneidade que o solo apresenta por se tratar de um solo saprolítico. Evidentemente seria necessário um número maior de amostra para se ter uma relação estatisticamente confiável, no entanto, como será mostrado mais adiante neste trabalho, estas pequenas variações não interferem de maneira significativa no grau de erodibilidade do solo estudado.

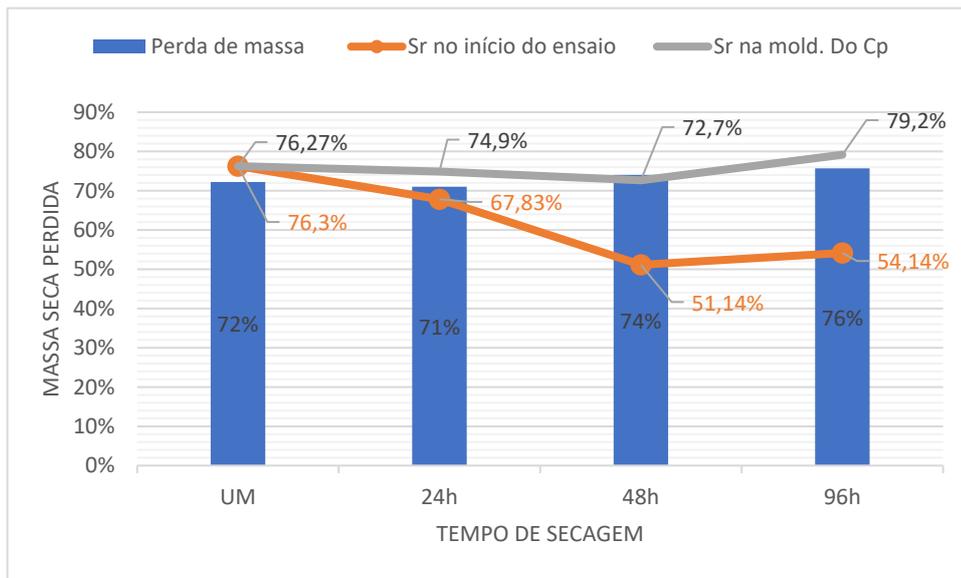
Figura 5.12: Porcentagem de massa seca perdida pelo grupo de amostras do solo indeformado



Fonte: o auto

No gráfico da Figura 5.13 apresenta-se a percentagem de massa seca perdido pelo grupo de amostras do solo compactado na energia normal. Observa-se que o grau de saturação no início do ensaio da amostra seca ao ar por 96 horas é maior que o grau da amostra seca por 48 horas, isto ocorreu porque o peso específico aparente seco desta amostra é 4,2% maior que o mesmo índice de amostra seca por 48 horas. Isso acarretou, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.13, numa diferença de 8,9 % entre os graus de saturação destas amostras quando foram moldadas. No entanto, nota-se no gráfico que perda massa para este caso não é sensível ao grau de saturação das amostras no início do ensaio. Como esse comportamento é corroborado pelos resultados apresentados pelas amostras das outras energias de compactação, pode-se dizer que esta variação não invalida o ensaio.

Figura 5.13: Percentagem de massa seca perdida pelo grupo de amostras do solo compactado na energia normal



Fonte: o autor

No gráfico da Figura 5.14 apresenta-se a percentagem de massa seca perdido pelo grupo de amostras do solo compactado na energia intermediária. Observa-se que este grupo de amostras seguiu a mesma tendência de comportamento das amostras do solo compactado na energia normal, ou seja, a perda de massa é independente do grau de saturação inicial. Como pode ser visto no gráfico da Figura 5.15, o mesmo comportamento anteriormente relatado, foi observado para as amostras do solo compactado na energia modificada.

Figura 5.14: Porcentagem de massa seca perdida pelo grupo de amostras do solo compactado na energia intermediária

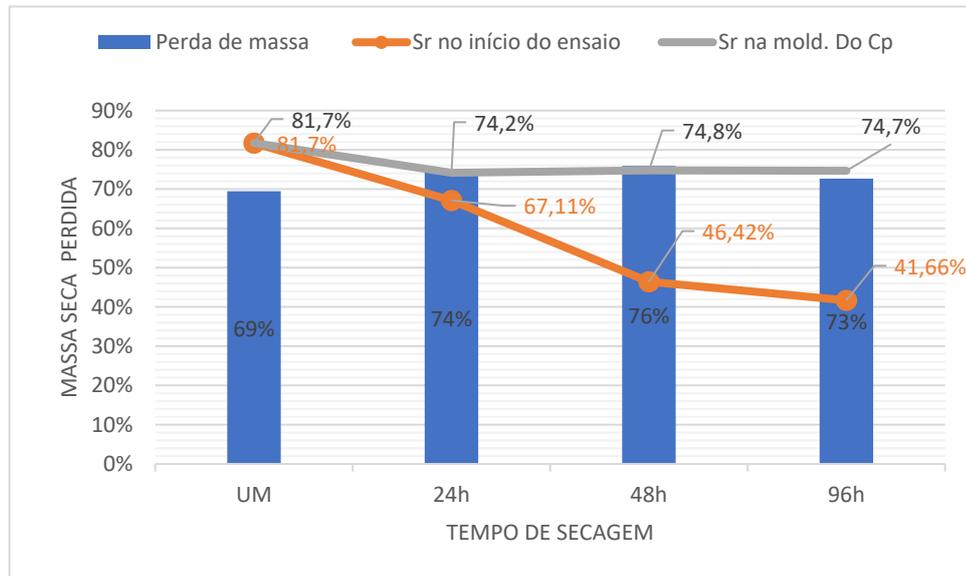
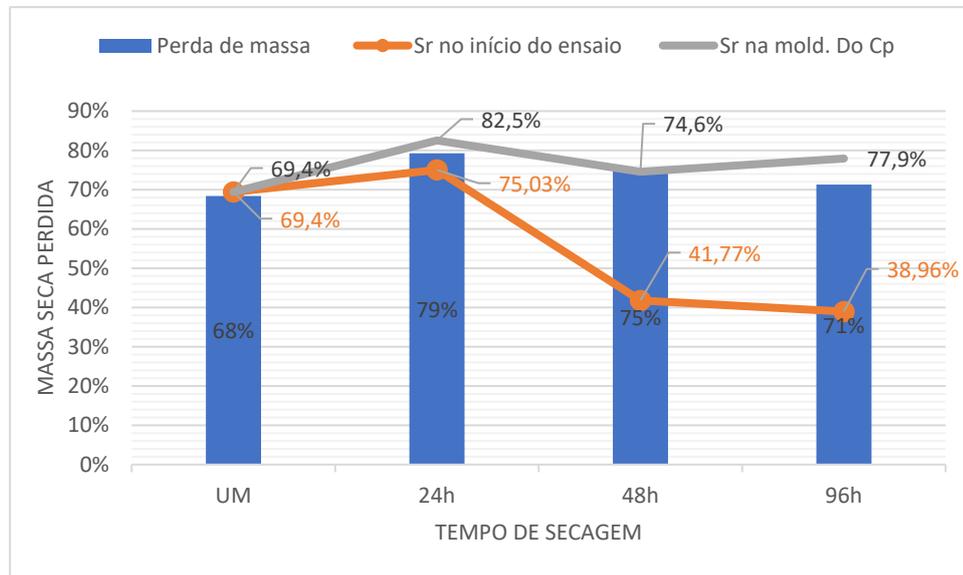


Figura 5.15: Porcentagem de massa seca perdida pelo grupo de amostras do solo compactado na energia modificada

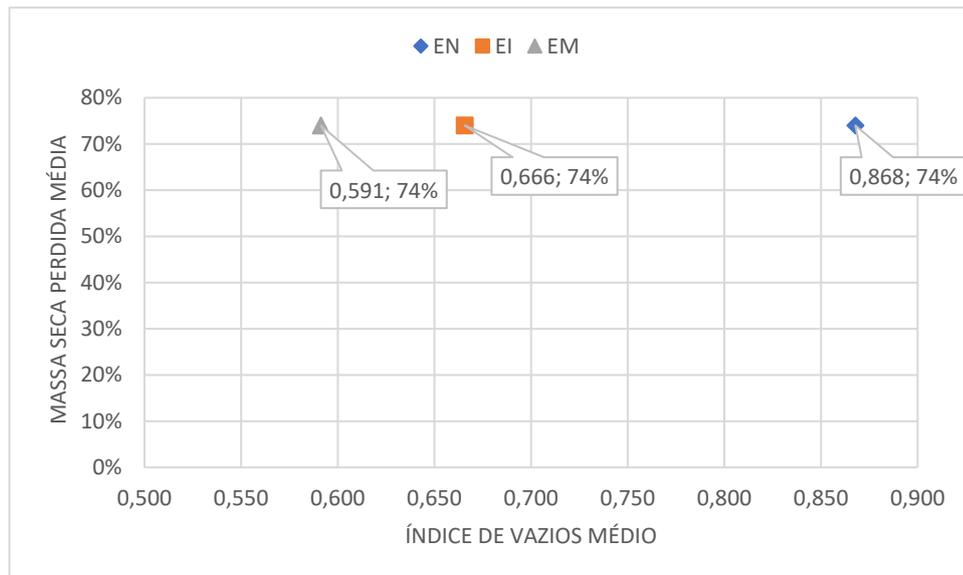


Fonte: o autor

No gráfico da figura 5.16, mostra-se a perda de massa média dos solos compactados *versus* o índice de vazios médio destas amostras. Observa-se no gráfico que, não há relação alguma de dependência entre a perda de massa e o índice de vazios dos solos compactado nas

três diferentes energias. Portanto, pode se dizer com base nos dados apresentados que, para o solo aqui estudado, a compactação, mesmo na mais elevada energia, não exerce influência sobre a porcentagem de massa que este perde no ensaio de erodibilidade específica.

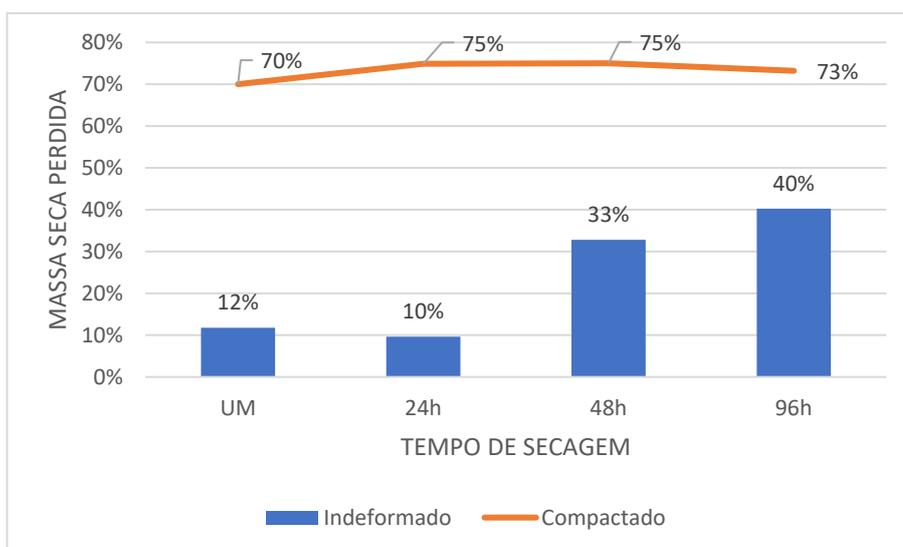
Figura 5.16: porcentagem média da massa perdida versus índice de vazios médio das amostras de solo compactado



Fonte: o autor

No gráfico da Figura 5.17 apresenta-se uma comparação entre a porcentagem de massa perdida pelas amostras de solo indeformado, em cada condição de secagem, e a média de massa perdida pelas amostras de solo compactado nas diferentes energias. Observa-se no gráfico que a perda de massa do solo compactado é muito maior que a perda registrada para o mesmo solo na condição indeformada.

Figura 5.17: Comparativo entre perda de massa do solo na condição indeformada e na condição compactada



Fonte: o autor

A diferença entre o comportamento do solo na condição indeformada e compactada, que é evidenciada pelo gráfico da figura 5.17, pode ser atribuída à destruição da estrutura natural do solo, causada pela compactação e todas as perturbações precedentes a esse processo, que este solo sofreu. Nogami e Villibor (1995) afirmam que, a destruição da estrutura do solo, causadas pelas operações de escavação, transporte e compactação podem levar este a apresentar um comportamento bastante distinto do comportamento em taludes naturais.

Como pode ser visto nas fotografias das Figuras 5.18 e 5.19a e b, há uma nítida diferença entre a macroestrutura natural do solo aqui estudado e macroestrutura deste após a compactação. O pedaço de solo mostrado no lado esquerdo da Figura 5.18, representa uma porção do solo ainda com a estrutura natural, enquanto o pedaço do lado direito foi extraído de um corpo de prova compactado na energia modificada. Na Figura 5.19a, mostra-se uma amostra do solo compactado na energia normal, logo após o ensaio de erodibilidade específica e na figura 5.19b, mostra-se uma amostra do solo natural logo após este ensaio, ambas foram ensaiadas na umidade de moldagem.

Figura 5.18: Macroestrutura na condição natural, lado esquerdo e macroestrutura compactada do solo, lado direito



Foto: o autor

Observa-se nas Figuras 5.19a e b, que a forma final das amostras após o ensaio é bem distinta. A amostra do solo compactado tem formato de um talude, enquanto a forma do solo natural é côncava, o que sugere que durante a compactação grande parte da coesão que o solo apresentava na condição natural foi perdida. Evidenciando assim, a importância da estrutura na perda de massa deste solo, quando imerso.

Figura 5.19: Amostras do solo logo após o ensaio de perda de massa por imersão, a) compactado na energia normal, b) solo indeformado



a



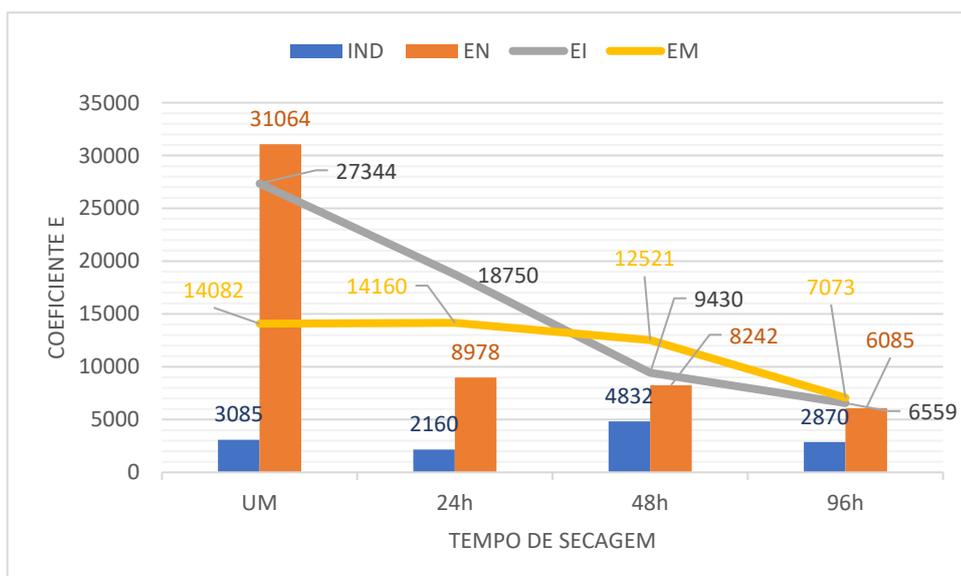
b

Foto: o autor

5.6 PARÂMETRO DE ERODIBILIDADE DO CRITÉRIO MCT

A erodibilidade dos solos segundo o critério MCT é qualificada pelo valor do parâmetro E , definido como sendo a relação entre a porcentagem de massa perdida no ensaio de erodibilidade específica e coeficiente de sorção calculado a partir da curva obtida no ensaio de infiltrabilidade. Sendo que $E=52$ é definido como o limite separador entre os solos erodíveis e não erodíveis, valores de $E < 52$ indicam solos não erodíveis. No gráfico da Figura 5.20 apresenta-se o valor de E para cada condição do solo em função do tempo de secagem. Nota-se que os valores de E são muito elevados em todas as condições. Assumindo que pode ser feita uma avaliação quantitativa do parâmetro E , percebe-se no gráfico que para os solos compactados, E tende a diminuir com o tempo de secagem, havendo uma redução média de 375% entre as amostras ensaiadas logo após a moldagem e as secas ao ar por 96 horas. Já para solo na condição indeformada, os valores de E oscilam com tempo de secagem sendo que há uma redução de 7,4 % entre a condição de umidade natural e a de secagem ao ar por 96 horas. Assim, pode-se dizer que o parâmetro E do solo indeformado é muitas vezes menos sensível à redução de umidade que pode ser causada por um período de estiagem, quando comparado ao solo compactado.

Figura 5.20: Parâmetro de erodibilidade E do solo nas diferentes condições de compactação e umidade

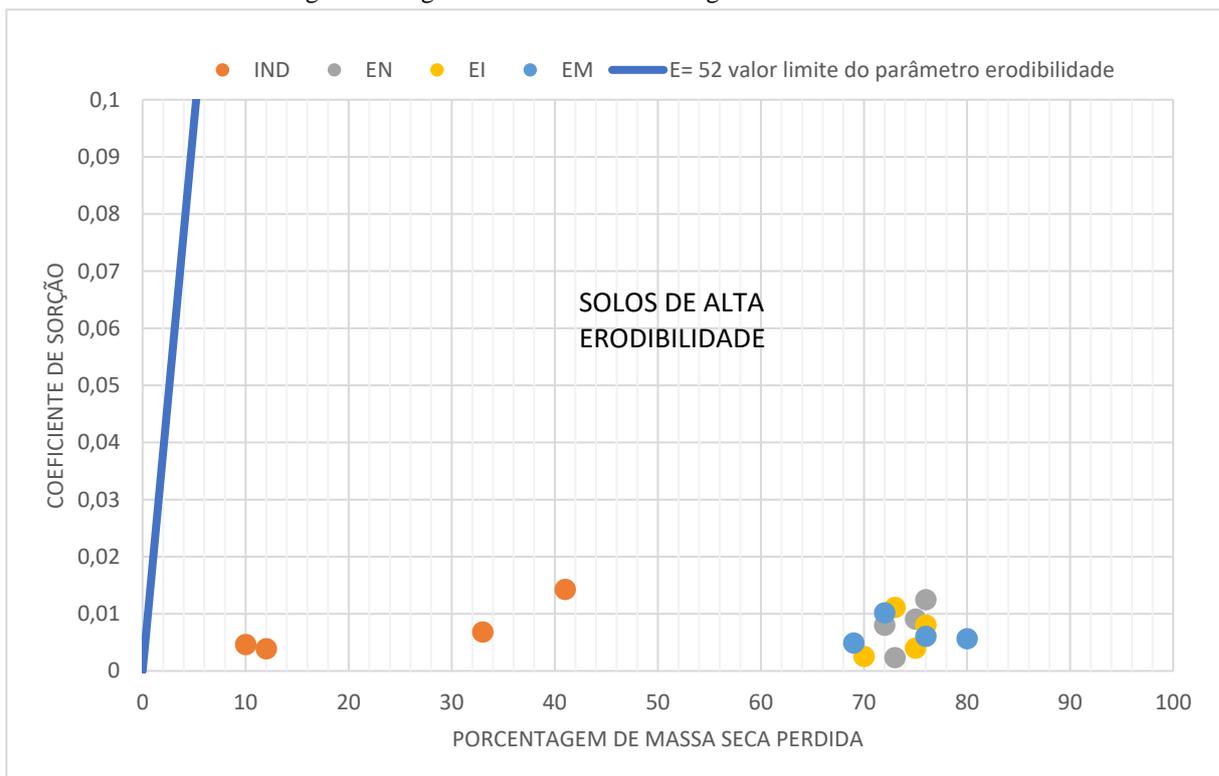


Fonte: o autor

Comparando apenas os solos compactado, e assumindo que E quantifica a erodibilidade dos solos, pode se dizer que na condição de ensaio logo após a moldagem dos corpos de prova a erodibilidade é inversamente proporcional à energia de compactação, o que está de acordo com os resultados apresentado por Hanson e Hunt (2007). Percebe-se que a influência da energia de compactação diminui com o aumento de tempo de secagem, sendo insignificante na condição mais seca. Isso ocorre porque como foi mostrado nos resultados dos ensaios de infiltrabilidade e de perda de massa por imersão, a energia de compactação não exerce influência no comportamento do solo estudado aqui, nas condições mais severas de secagem.

Quando os valores de E são plotados no gráfico (s, P_i) e comparado com o valor limite de E proposto por Nogami e Villibor (1979), como mostrado no gráfico da Figura 5.21, percebe-se que o solo é altamente erodível, tanto na condição indeformada na natureza, quanto na condição compactada, sendo nesta última mais erodível que na primeira condição.

Figura 5.21: gráfico da erodibilidade segundo o critério MCT



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A natureza siltosa do solo aqui estudado foi mostrada tanto no ensaio de granulometria quanto no gráfico de plasticidade, que o caracterizou com um silte arenoso de média plasticidade. O valor de $RD= 42,9\%$ confirmou a influência da fração silte deste material na sua erodibilidade. Assim, o solo aqui estudado foi classificado como altamente erodível na condição natural.

As curvas de compactação mostraram que há um acréscimo de $7,2\%$ no peso específico aparente seco do solo, quando a energia de compactação é aumentada da normal para a intermediária e quando para a energia modificada o ganho de densidade sobe para 14% . Esta densificação pode levar a um considerável aumento da resistência deste material. No entanto, como foi constatada uma grande diferença entre a umidade natural deste solo e a umidade ótima da energia modificada, $7,5\%$, o processo de secagem pode ser muito difícil, fazendo com que a compactação em campo fique muito abaixo da medida em laboratório. UFSC (2010) relatou este problema em aterros compactados feitos com material muito parecido ao estudado aqui.

Embora, a compactação tenha mudado a estrutura do material, reduzindo seu índice de vazios, estes efeitos não se mostraram significativos nos resultados dos ensaios de infiltrabilidade. Sendo que, os resultados mostram uma total independência entre o coeficiente de sorção, o índice de vazios e o peso específico aparente seco dos corpos de prova. A única dependência encontrada para o coeficiente de sorção se deu em relação a grau de saturação inicial das amostras, em todas as condições do solo aqui estudado. Quando os resultados dos ensaios de infiltrabilidade dos corpos de prova de diferentes energias de compactação foram cruzados, não se observou relação alguma entre estes e os valores foram praticamente iguais nas condições de secagem mais severas. Sendo assim, conclui-se que energia de compactação não exerce influência alguma na capacidade de infiltração deste solo.

O comportamento no ensaio de erodibilidade específica do material aqui estudado se mostrou fortemente influenciado pela estrutura natural do solo. Para o caso dos corpos de prova ensaiados na condição de umidade de moldagem, houve um aumento de $5,8$ vezes na porcentagem de massa perdida, quando se compara a média da massa perdida dos solos compactados com o solo indeformado. O solo na condição indeformada se mostrou sensível a variação da umidade causada pela secagem, perdendo 3 vezes mais massa quando foi exposto ao ar por 96 horas. Já a perda de massa do solo compactado se mostrou independente tanto da energia de compactação quanto do tempo de secagem.

A análise conjunta dos parâmetros obtidos nos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica revelou a alta suscetibilidade à erosão do solo estudado, tanto na condição indeformada quanto compactada. Na comparação entre os corpos de prova compactado observou-se que, para a condição de umidade de moldagem o menor valor do parâmetro E ocorreu para o solo compactado na energia modificada, seguido do solo da energia intermediária e normal. No entanto, para a condição mais severa de secagem, 96 horas, os valores foram praticamente iguais, confirmando assim, a independência da erodibilidade deste solo em relação a energia de compactação. Para o solo indeformado o valor médio do parâmetro E foi, $E= 3237$ e valor médio das três condições de compactação foi $E= 13690$, sendo muito maior que o valor limite $E=52$, proposto por Nogami e Villibor (1979).

Portanto, conclui-se que o solo aqui estudado é altamente erodível em qualquer situação, sendo assim, as variações de densidade ocorridas nos corpos de prova são incapazes de influenciar o comportamento global do solo e levar a uma qualificação errada deste, quanto à sua erodibilidade. No entanto, no estudo de solos naturalmente mais resistentes à erosão que o estudado aqui, por exemplo, um solo do horizonte A do mesmo perfil, a variação de densidade não pode ser desconsiderada, pois como foi mostrado, esta interfere no processo de secagem dos corpos de prova e muito provavelmente da sua infiltrabilidade.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da erodibilidade de solos compactados por meio de ensaios diretos, Inderbitzen, para assim, poder comparar os resultados de solos diferentes;
- Uso apenas do critério de erodibilidade de Middleton para estudos de classificação da erodibilidade dos solos na condição natural, sendo que, somente se o solo se mostrar não erodível por este critério, outros ensaios devem ser feitos para confirmação dos resultados;
- Elaboração de um banco de dados da erodibilidade dos solos residuais da região sul.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo-preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. São Paulo: ABNT, 1916.
- _____. **NBR 7182**: Ensaio de Compactação. São Paulo: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. São Paulo: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 6508**: Determinação da massa específica. São Paulo: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. São Paulo: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 7181**: Análise granulométrica. São Paulo: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. São Paulo: ABNT, 2016
- _____. **NBR 13602**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS. São Paulo: ABNT, 1996
- ALMEIDA, J.G.R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis-GO**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 129 p. 2014.
- ARAUJO, F. A. R. **Contribuição ao estudo da erodibilidade de solos tropicais, baseadas em ensaios de sucção na metodologia MCT**. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São Jose dos Campos- SP, 1994.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BASTOS, C.A.B. **Estudos Recentes Conduzidos na FURG sobre Solos Alternativos para Pavimentação Econômica e Obras de Terra na Planície Costeira Sul**. II Simpósio de Engenharia Geotécnica - GeoRS'2003, Rio Grande/RS, 2003. Anais... DMCFURG/ABMS-NRRS, p.31-40, 2003.
- BRAJA, M. DAS. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 7 ed. Norte americana. – São Paulo. Cengage Learning, 2011.
- SANTOS, R., CALDEIRA, L., MARANHA, E. (2012). Influência da compactação na erodibilidade de um solo parcialmente saturado sujeito a uma fuga concentrada (in Portuguese). **Revista Geotecnia**. 125. 36.
- COUTO, B.O.C. **Análise da erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação (Mestrado.) Programa de Pós-graduação em geotecnia, UFOP, Ouro Preto.2015.

DIRKSEN, S. S. **Caracterização e classificação de solos da bacia do rio pirai nas adjacências da área de implantação do campus da UFSC Joinville.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

FERNANDES, R. **Desenvolvimento de correlação entre os ensaios dcp e cbr estudo de caso: pista de testes, UFSC-Joinville.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S. LACERDA, W. A. **Evolução de uma Voçoroca por Escorregamentos Retrogressivos em Solo Não- Saturado. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas.** Salvador, 2005. Vol. 1 o. 443-452.

GRANDO, A et al. **Erodibilidade dos solos de uma microbacia experimental determinada por ensaios geotécnicos de Infiltrabilidade e Perda de massa por imersão.** Florianópolis.2009

GRANDO, A. **Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2011

HANSON G.J., WAHL T.L., TEMPLE D.M. “Erodibility characteristics of embankment materials”, Dam Safety 2010, Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Annual Conference, Seattle, WA, 19–23 September 2010.

HANSON, G. J., AND S. L. HUNT. 2007. Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils. Applied Eng. in Agric. 23(3):305-312.

HEIDEMANN, M., GOEDERT, A. N., BELLAN, C. H., Graça, T. M., Estudo do potencial erosivo de solos residuais de gnaiss-migmatito do norte de sc. 16º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2018, São Paulo.

HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar – SC.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2011.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental.** 486p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

IDE, D. M. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana. 2009.** 129p. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2009.

IGLESIAS, C. M. F **Geologia e recursos minerais da folha joinville - sg. 22-z-b escala 1:250.000,** CPERM Serviço Geológico do Brasil, 2011. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17685?show=full>, acesso em 29 de outubro de 2019.

IGLESIAS, C. M. F. **Carta geológica escala 1:250.000 -FOLHA SG. 22-Z-B JOINVILLE**, CPERM Serviço Geológico do Brasil, 2011. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17685?show=full>, acesso em 29 de outubro de 2019.

JOINVILLE (2012) – **Cobertura pedológica do município de Joinville**, disponível em http://sistemaspmj.joinville.sc.gov.br/documentos_vivacidade/Mapa%20de%20Fragilidade%20Ambiental%20de%20Joinville/Mapas/Pedologico/JOINVILLE.pdf, acesso 30 de outubro de 2019.

JOINVILLE (2018) – **Cidade em dados 2018/Aspectos físico naturais**, disponível em <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2018/09/Joinville-Cidade-em-Dados-2018-Aspectos-F%C3%ADsicos-Naturais.pdf>, acesso 30 de outubro de 2019.

MIDDLETON H.E.- **Properties of soils which influence soil erosion**. U.S. DEPARTMENT AGRICULTURAL TECHNICAL BULLETIN, n.178, 16p, 1930, disponível em https://scholar.google.com.br/scholar?cluster=12462280246566410199&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_vis=1, acesso 05 de novembro de 2019.

MIRANDA, J. G. **Mapeamento geotécnico e estudo da susceptibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala: 1:100.000**. Tese (Doutorado)-Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2005.

NOGAMI, J.S. E VILLIBOR D.F.- **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**, Editora Villibor, São Paulo: 1995, 213p.

NOGAMI, J.S. E VILLIBOR D.F.- **Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area**. Bulletin of the IAEG, n.19, p.196–199, 1979

REGO, J.J.V. **Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1978.

SILVA, D. J. B. V. **Avaliação de métodos de baixo custo para proteção de taludes em estradas rurais não-pavimentadas**. 73p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2009

SOUZA, A. C. R, MASCARENHA, M. M. A, JESUS, A. S, SILVA, M. R. Influência da Sucção na Estabilidade Estrutural de Solos Tropicais Não Saturados no Município de Silvânia-GO. XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA O FUTURO SUSTENTÁVEL DO BRASIL PASSA POR MINAS COBRAMSEG 2016 — 19-22 outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil © ABMS, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Repositório Digital. **Estudo Ambiental Simplificado do CEM UFSC**. Florianópolis, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/125875/Cap_3.5_Geo%C3%B3gico.pdf?sequence=16&isAllowed=y, acesso em 09 de novembro de 2019.