



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO

GÊNESE E CONDICIONANTES NA FORMAÇÃO DE TERRACETES DO SUDESTE DE
MINAS GERAIS

Eloá Carolina Vilela de Oliveira

Ouro Preto, novembro de 2018

**GÊNESE E CONDICIONANTES NA FORMAÇÃO DE
TERRACETES DO SUDESTE DE MINAS GERAIS**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Marco Antônio Fonseca

MONOGRAFIA

Nº 297

GÊNESE E CONDICIONANTES NA FORMAÇÃO DE TERRACETES DO SUDESTE DE MINAS GERAIS

Eloá Carolina Vilela de Oliveira

Orientador

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentada ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2018/2.

OURO PRETO

2018

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Eloá Carolina Vilela de Oliveira

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

O482g Oliveira, Eloá Carolina Vilela de.
Gênese e condicionantes na formação de terracetes do sudeste de Minas Gerais [manuscrito] / Eloá Carolina Vilela de Oliveira. - 2018.
79f.: il.: color; grafs; tabs; mapas; Quadro.
Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.
1. Geotecnia. 2. Ciência do solo. 3. Geomorfologia. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.
CDU: 551.4

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: GÊNESE E CONDICIONANTES NA FORMAÇÃO DE TERRACETES DO SUDESTE DE MINAS GERAIS

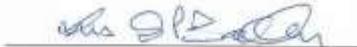
AUTORA: ELOÁ CAROLINA VILELA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luis de A. P. Bacellar

Aprovada em: 19 de novembro de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luis de A.P Bacellar



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Frederico G. Sobreira



DEGEO/UFOP

Ramon Messias Martins



DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 19/11/2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força, sabedoria e coragem para seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis da graduação. Aos meus pais, Antônio e Tânia, por serem meus maiores exemplos, me motivarem a correr atrás dos meus objetivos e por estarem sempre ao meu lado com seu apoio e amor incondicional. Ao meu irmão Rafael, por me incentivar a ser minha melhor versão. Sem vocês, eu não teria percorrido todo esse caminho, e é por vocês que continuo sempre e frente.

Aos meus amigos da Engenharia Geológica e de Ouro Preto, parceiros nos momentos bons, mas também nos momentos difíceis. Essa vitória é nossa, e sem a amizade esse caminho teria sido muito mais árduo.

A todos os professores do Degeo e da Escola de Minas, mas em especial ao Professor Bacellar pela orientação e apoio que sempre me dedicou. Obrigada pela paciência e compreensão. Ambos sabemos que não foi fácil, principalmente pela distância, mas acredito que fizemos um bom trabalho ao tratar de um tema pouco abordado no meio acadêmico. Agradeço também por ter me ensinado tanto durante a elaboração do TCC, mas principalmente durante a graduação. Geologia de Engenharia foi e sempre será minha disciplina favorita do curso.

Ao Bruno e ao João Paulo, alunos de doutorado e mestrado, respectivamente, do NUGEO, que me auxiliaram durante os ensaios laboratoriais, e a Laura, aluna de mestrado do Degeo, que me ajudou com as simulações no GeoSlope. Ao Antônio Pinto, pela coleta e análise de dados que foram muito relevantes para esse trabalho. Vocês foram essenciais, e serei sempre grata.

Em especial, gostaria de agradecer aos meus primos André e Felício, e novamente meu pai e irmão, que estiveram comigo durante os campos, me ajudaram nas coletas de amostras, escavação de trincheiras e afins. Não é todo estudante que tem a sorte de poder contar com a família durante um campo. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto, o Departamento de Geologia e a Escola de Minas por terem sido fonte de crescimento e conhecimento que levarei comigo para sempre. À FAPEMIG – Fundação de Amparo à pesquisa de Minas Gerais, pelo apoio e incentivo à pesquisa e pelos recursos financiados para a execução deste trabalho. Cada porta que se abriu, e que ainda se abrirá para mim eu devo ao ensino de qualidade ao qual eu tive o privilégio de ter acesso.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xvi
ÍNDICE DE QUADROS.....	xvii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 JUSTIFICATIVAS.....	2
1.4 LOCALIZAÇÃO.....	3
1.5 CARACTERÍSTICAS REGIONAIS	5
1.5.1 Geologia	5
1.5.2 Pedologia.....	7
1.5.3 Clima e Vegetação	9
1.5.4 Uso e ocupação do solo.....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 CONDICIONANTES EXTERNOS.....	12
2.1.1 Agricultura e Ocupação da Terra	12
2.1.2 Ação de Rebanhos no Terreno	13
2.2 FATORES GEOLÓGICOS.....	16
2.2.1 Terracetes por Crescimento de Dobras	16
2.2.2 Falhas por Deslizamento Flexural.....	16
2.2.3 Morfologia das Encostas	16
2.2.4 Movimentos de Massa	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.2 RECONHECIMENTO INICIAL DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	21
3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO.....	21
3.3.1 Aspectos morfológicos dos terracetes	21
3.3.2 Coleta de amostras deformadas e indeformadas	22
3.3.3 Aplicação de traçador <i>Brilliant Blue FCF</i>	22
3.3.4 Penetrometria	24

3.4	CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL	25
3.4.1	Solo – Análise Granulométrica.....	25
3.4.2	Limites de Consistência.....	27
3.4.3	Ensaio de Cisalhamento Direto	29
3.4.4	Ensaio de Compactação (Proctor Normal)	30
3.4.5	Análise de Estabilidade dos Terracetes	31
4	RESULTADOS	33
4.1	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DOS TERRACETES	33
4.2	ENSAIO COM O TRAÇADOR AZUL BRILHANTE.....	34
4.3	ENSAIOS DE PENETROMETRIA	35
4.4	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA	36
4.4.1	Itaverava	38
4.4.2	Conselheiro Lafaiete.....	39
4.4.3	Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas	40
4.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO SATURADO E NÃO-SATURADO	40
4.6	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	44
4.7	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	45
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa parcial do estado de Minas Gerais, evidenciando a localização das áreas de estudo.....	3
Figura 1.2 - Terracetes estudados na região de Itaverava – MG	4
Figura 1.3 - Terracetes estudados na região de Conselheiro Lafaiete - MG	4
Figura 1.4 - Terracetes estudados em Ouro Preto - MG, Acaiaca - MG e Entre Rios de Minas – MG.....	4
Figura 1.5 - Mapa geológico marcando o plutonismo félsico da porção ao sul do Quadrilátero Ferrífero (QF).....	6
Figura 1.6 - (a) Localização dos Cráton São Francisco e Oeste Congo, e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo; (b) Mapa tectônico mostrando a distribuição do embasamento Paleoproterozóico e no Cráton SF e suas imediações	6
Figura 1.7 - Mapa de solos com a localização das áreas estudadas.....	8
Figura 2.1 - Terracete, com as bermas e taludes bem evidenciados.....	11
Figura 2.2 - Exemplo de terracetes com padrão anastomosado	14
Figura 2.3 - Tensão de cisalhamento em relação ao tempo, em diferentes contextos. (a) Solo natural, sem reforço; (b) solo reforçado com vetiver; e (c) solo reforçado com ruzi .	15
Figura 2.4 - Ilustração esquemática do desenvolvimento dos terracetes de acordo com a hipótese do deslizamento flexural. (a) Deslizamento flexural (b) causa a elevação e ruptura da superfície da unidade superior. (c) Colapso e degradação da unidade superior	16
Figura 2.5 - Diagrama da combinação de formas de encostas, e como elas afetam o fluxo de água pela superfície	17
Figura 2.6 - Ilustração esquemática dos possíveis modelos de evolução dos terracetes, de acordo com a hipótese dos escorregamentos. Note que neste caso, há uma descontinuidade gerada por camada rígida de solo argiloso. (A) Rupturas planares. (B) Rupturas circulares...	18

Figura 2.7 - Ilustração esquemática do desenvolvimento de terracetes de acordo com a hipótese do rastejo. (a) Perfil de um lento movimento coluvionar, paralelo ao movimento de rastejo. (b) Perfil transversal ao rastejo, evidenciando a formação de <i>buckle folds</i>	19
Figura 3.1 - Coleta de amostra indeformada em campo	22
Figura 3.2 - Aplicação do traçador no solo em área de 1m ² . Itaverava	23
Figura 3.3 - Abertura de trincheira para análise da infiltração do traçador. Profundidade indicada pela fita métrica: 70 cm. Conselheiro Lafaiete.	24
Figura 3.4 - Penetrômetro modelo Stolf reduzido.....	25
Figura 3.5 - Peneiras usadas para o peneiramento grosso.....	26
Figura 3.6 - Ensaio de sedimentação.....	26
Figura 3.7 - Peneiras usadas para o peneiramento fino, no agitador.....	27
Figura 3.8 - Cone britânico utilizado para o teste do Limite de Liquidez	28
Figura 3.9 - Ensaio de Limite de Plasticidade.....	28
Figura 3.10 - Esquema de uma máquina de cisalhamento direto.....	29
Figura 3.11 - Curva de compactação.....	31
Figura 4.1 - Perfil da trincheira, com a infiltração do traçador delimitada pela linha negra. Comprimento da fita na parede da trincheira: 35cm. Notar que na berma o traçador infiltrou menos. Conselheiro Lafaiete.....	34
Figura 4.2 - Perfil da trincheira, com a infiltração do traçador delimitada pela linha negra. Comprimento do traço vermelho na parede da trincheira: 30cm. Notar que na berma a infiltração é quase imperceptível. Itaverava	34
Figura 4.3 - Rarefação de gramíneas nas trilhas geradas pelo andar do gado. Conselheiro Lafaiete	35
Figura 4.4 - Ensaio de penetrometria realizados nas áreas de Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas.....	35
Figura 4.5 - Ensaio de penetrometria realizados nas áreas de Itaverava e Conselheiro Lafaiete.....	36
Figura 4.6 - Classificação SUCS.....	37

Figura 4.7 - Curva de distribuição granulométrica do solo do talude de Itaverava.....	38
Figura 4.8 - Limite de Liquidez do solo de Itaverava, método cone britânico.....	38
Figura 4.9 - Curva de distribuição granulométrica do solo de Conselheiro Lafaiete..	39
Figura 4.10 - Limite de liquidez, método do cone britânico.	39
Figura 4.11 - Gráfico da resistência ao cisalhamento do solo, submetido a uma tensão normal de 12kPa.	40
Figura 4.12 - Gráfico da resistência ao cisalhamento do solo, submetido a uma tensão normal de 20,15kPa.	41
Figura 4.13 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo, submetido a uma tensão normal de 50kPa.	41
Figura 4.14 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo não-saturado sob influência de diferentes valores de tensão normal.	42
Figura 4.15 - Gráfica tensão cisalhante x tensão normal.	42
Figura 4.16 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo saturado sob influência de diferentes valores de tensão normal.	43
Figura 4.17 - Gráfico tensão cisalhante x tensão normal.	43
Figura 4.18 - Ensaio de compactação - Conselheiro Lafaiete.	44
Figura 4.19 - Ensaio de compactação - Itaverava.	45
Figura 4.20 - Análise de estabilidade do terracete inferior. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.	46
Figura 4.21 - Análise de estabilidade dos terracetes medianos. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.	46
Figura 4.22 - Análise de estabilidade dos terracetes superiores. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.	46
Figura 4.23 - Análise de estabilidade dos terracete superior. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.	47
Figura 4.24 - Análise de estabilidade do terracete inferior (condição saturada); carga distribuída ao longo da largura da berma.	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Hipóteses de desenvolvimento de terracetes.....	12
Tabela 4.1 - Características morfológicas dos terracetes estudados.	33
Tabela 4.2 - Resultados da granulometria e limites de consistência das áreas de Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas.....	40
Tabela 4.3 - Parâmetros de resistência do solo.	44

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Tipos de solos encontrados nas regiões de estudo.	7
--	---

Resumo

Terracetes são feições que se apresentam como uma série de ‘degraus’, distribuindo-se ao longo de encostas naturais de maiores declividades, sendo facilmente reconhecidos quando avistados. Estas feições são importantes, pois são muito comuns e podem levar ao desencadeamento de processos mais perigosos ou economicamente mais onerosos, como erosões ou grandes movimentos de massa em encostas. Há poucos estudos voltados para o real entendimento da origem dessas estruturas, embora a sabedoria popular comumente as associe com a presença de rebanhos. Há diversas teorias sobre a gênese de terracetes, algumas que defendem uma origem relacionada a processos geológico-estruturais, outras os associam ao pisoteio animal ou ainda a movimentos de massa. Esse trabalho tem a finalidade de contribuir com a literatura já existente, buscando a compreensão dos fatores que acarretam na formação dos terracetes. O estudo foi composto por incursões em campo em duas áreas selecionadas para coletas de amostras e testes *in situ*, análises laboratoriais e computacionais. Amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas para análises de granulometria, de limites de consistência, compactação e ensaios de cisalhamento direto. No campo, foram realizados testes com o penetrômetro Stolf e análises de infiltração e percolação da água no solo, com o traçador colorimétrico *Brilliant Blue FCF* para verificar, respectivamente, o grau de compactação do solo e a existência de planos preferenciais de escorregamento. Aspectos morfológicos dos terracetes (dimensão das bermas e taludes; inclinação média dos taludes inter-rampas; forma das encostas) também foram medidos. Com o software GeoSlope® foram feitas simulações de escorregamento para averiguar se a carga vertical imposta pelo pisoteio do gado seria capaz de iniciar pequenos movimentos de massa. As simulações mostraram que esta carga pode provocar escorregamentos quando o solo se encontra saturado, mas estes devem ser localizados, pois as análises com o traçador não evidenciaram planos preferenciais de percolação condicionado por discontinuidades. Portanto, constatou-se que embora o tipo de solo e a morfologia das encostas tenham influência na formação dos terracetes, eles não estão ligados a movimentos de massa ou aspectos geológico-estruturais. A causa mais provável nas áreas estudadas é o caminhamento do gado pelo terreno, que pode desencadear diversos processos, como compactação superficial, erosão hídrica e pelo impacto da pata do gado ao caminhar, deformação plástica quando a umidade é superior ao limite de liquidez e pequenos escorregamentos.

Palavras-chave: terracetes; movimentos de massa; traçador colorimétrico; penetrometria; pisoteio animal.

Abstract

Terracettes are features that present a series of steps spreading along natural slopes with considerable declivity, being easily recognized when sighted. These features are important because they are very common, and may carry out processes more dangerous or economically expensive, like erosions or big mass movements in slopes. There are few studies aimed at the real understanding of the origin of these structures, although popular wisdom commonly associates them with the presence of cattle. There are several theories about terracettes' genesis, and some which defend an origin related to geological-structural processes, others associate it with animal trampling or yet mass movements. This work has the purpose of contributing with the existing literature, seeking the understanding of the factors that in fact lead to the formation of terracettes. The study consisted of field incursions in two selected areas for the collection of samples and *in situ* tests, laboratory and computational analyzes. Deformed and undeformed samples of soil were collected with the purpose of running sedimentation and sieve analysis, compaction, consistency limits and direct shear test. In the field, were performed tests with the Stolf penetrometer to verify soil compactation and analyzes of infiltration and percolation of the water in the soil, with the Brilliant Blue FCF colorimetric tracer in order to verify the existence of preferential displacement plans. Morphological aspects of terracettes (berms and slope dimensions, mean inclination of inter-ramp slopes, slope shape) were also measured. With the software GeoSlope®, slide simulations were made to find out if the vertical load imposed by cattle treading would be able to initiate small mass movements. These simulations showed that the load can cause mass movement when the soil is saturated, but this can be small, since the tracer tests did not show any preferential plans of percolation conditioned by discontinuities. Therefore, it was possible to verify that although the soil type and the morphology of the slopes influence the formation of terracetes, they are not linked to mass movements or geological-structural aspects. The most likely cause in the studied areas is the cattle walking through the terrain, provoking several processes such as surface compaction, hydric erosion and treading erosion, plastic deformation when the soil humidity is greater than liquid limit and small slides

Key words: terracettes; landslides; colorimetric tracer; penetrometry; animal treading.

1.1 APRESENTAÇÃO

Terracetes são feições irregulares em forma de pequenos terraços, mais comumente encontradas em áreas íngremes de encostas. Essas feições têm sido relacionadas ao pisoteio animal (Carson & Kirby 1972, Howard & Higgins 1987), porém há também aqueles que defendam outras hipóteses. Alguns autores (Clayton 1966, Mueller & Suppe 1997, Bielecki 1998) sugerem que fatores puramente geológicos podem desencadear a formação dos terracetes, e como exemplo, tem-se o rastejo, ou *creeping*, que é tido por alguns autores (Clayton 1966, Bielecki & Mueller 2002) como um dos possíveis processos formadores dessas feições geológicas.

A forma de relevo e as características dos solos da área afetada são elementos que associados à compactação, podem agravar o nível de degradação. Já dentre as características morfológicas do solo, a textura é a que mais influencia na circulação da água (Giroldo 2013).

Após a coleta de amostras de solo em 2 áreas com essas feições, situadas em Itaverava – MG e Conselheiro Lafaiete – MG, as hipóteses mais populares acerca da formação dos terracetes serão discutidas, levando em conta a presença animal, os fatores geológicos, geomorfológicos e a influência ou não desses aspectos na sua gênese. As informações sobre terracetes coletadas por Pinto (2015) nas áreas de Ouro Preto – MG, Acaiaca – MG e Entre Rios de Minas – MG assim como análises feitas por ele são utilizadas como base teórica e metodológica para várias etapas do presente estudo. Portanto, esses dados também serão citados nos resultados.

1.2 OBJETIVOS

Tendo como base a análise de estudos que discorrem e levantam hipóteses sobre a geração de terracetes, o principal objetivo deste trabalho é compreender os fatores que levam à formação dos terracetes situados nas regiões de Conselheiro Lafaiete e Itaverava, ambas em Minas Gerais. Aspectos geológicos e externos (presença de rebanhos em pasto) serão discutidos e as hipóteses levantadas pela literatura deverão ser averiguadas por análises feitas em amostras de solo deformadas e indeformadas, obtidas em campo nas áreas de estudo selecionadas, assim como em fotografias de trincheiras escavadas nos pontos analisados, com o intuito de examinar a infiltração da água em possíveis planos preferenciais de rastejo.

Entre os objetivos específicos do trabalho, podemos citar:

- ✓ Correlacionar fatores condicionantes (geologia, geomorfologia, pedologia, geotecnia) às características dos terracetes nas áreas estudadas;
- ✓ Discutir sobre os fatores puramente geológicos que podem gerar ou agravar a geração dos terracetes;
- ✓ Averiguar a presença ou não de planos preferenciais de movimentos de massa como indutor de terracetes;

1.3 JUSTIFICATIVAS

A crescente degradação dos solos é uma grande preocupação no meio agropecuário. Estima-se que, nos últimos 50 anos, a quantidade de terra agricultável per capita diminuiu cerca de 50% no mundo (FAO 2015). Dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura apontam que cerca de 33% das terras têm alto ou médio grau de degradação (FAO 2015). Nesse sentido, é importante entender se os terracetes estariam relacionados a processos de erosão e movimentos de massa.

A compactação do solo por pisoteio animal, agravada pela remoção da vegetação pelo pastejo, pode diminuir a taxa de infiltração, aumentar a erosão e reduzir o crescimento radicular das plantas. Esse fenômeno ocorre como consequência do superpastejo, havendo uma perda da cobertura do solo devido ao impacto do pisoteio excessivo sob altas taxas de lotação. Caso os terracetes estejam ligados a esse fator, é de suma importância entender os impactos da presença animal no terreno para assim adotar técnicas de manejo que amenizem tais efeitos. É importante ressaltar que essa compactação depende, principalmente, da classe do solo, do seu teor de umidade, da taxa de lotação animal e da espécie forrageira utilizada no sistema (Marchão *et al.* 2007).

Logo, a presença de terracetes pode estar ligada a aspectos que afetam a eficiência e qualidade do solo, tais como erosão, movimentação de massa e compactação, causando a degradação da área (Trimble *et al.* 1995, Evans 1998). Portanto, entender essas feições deve ajudar a melhorar o cenário atual de manejo de solos e dos recursos hídricos das áreas afetadas, uma vez que os conhecendo, é possível ponderar sobre ações que diminuam os efeitos da degradação ou até mesmo recuperem as áreas afetadas.

Por outro lado, alguns autores acreditam que a formação dos terracetes pode ser um indício de movimentos de massa. Nesse sentido, é importante relacionar os terracetes a esses processos geológicos podendo assim identificar possíveis áreas de risco, e aplicar as medidas cabíveis para atenuar os efeitos desses processos.

1.4 LOCALIZAÇÃO

Duas áreas foram escolhidas para o levantamento de dados e coleta de amostras, ambas pertencentes à Microrregião de Conselheiro Lafaiete-MG (Figura 1.1) de acordo com o IBGE (2001). As cidades foram Itaverava e Conselheiro Lafaiete. Nesses municípios, as coletas foram realizadas nas áreas rurais do Pé do Morro (Figura 1.2) e Rancho Novo (Figura 1.3), respectivamente,

O acesso à área de estudo em Conselheiro Lafaiete se dá pela MG-129, sentido Ouro Branco. É possível acessar a localidade rural do Rancho Novo, pela rua Joaquim Martins. Já o acesso à segunda área de estudo é feito pela BR-482, sentido Itaverava. Há um acesso à propriedade privada, onde foi realizada a coleta de dados e amostras.

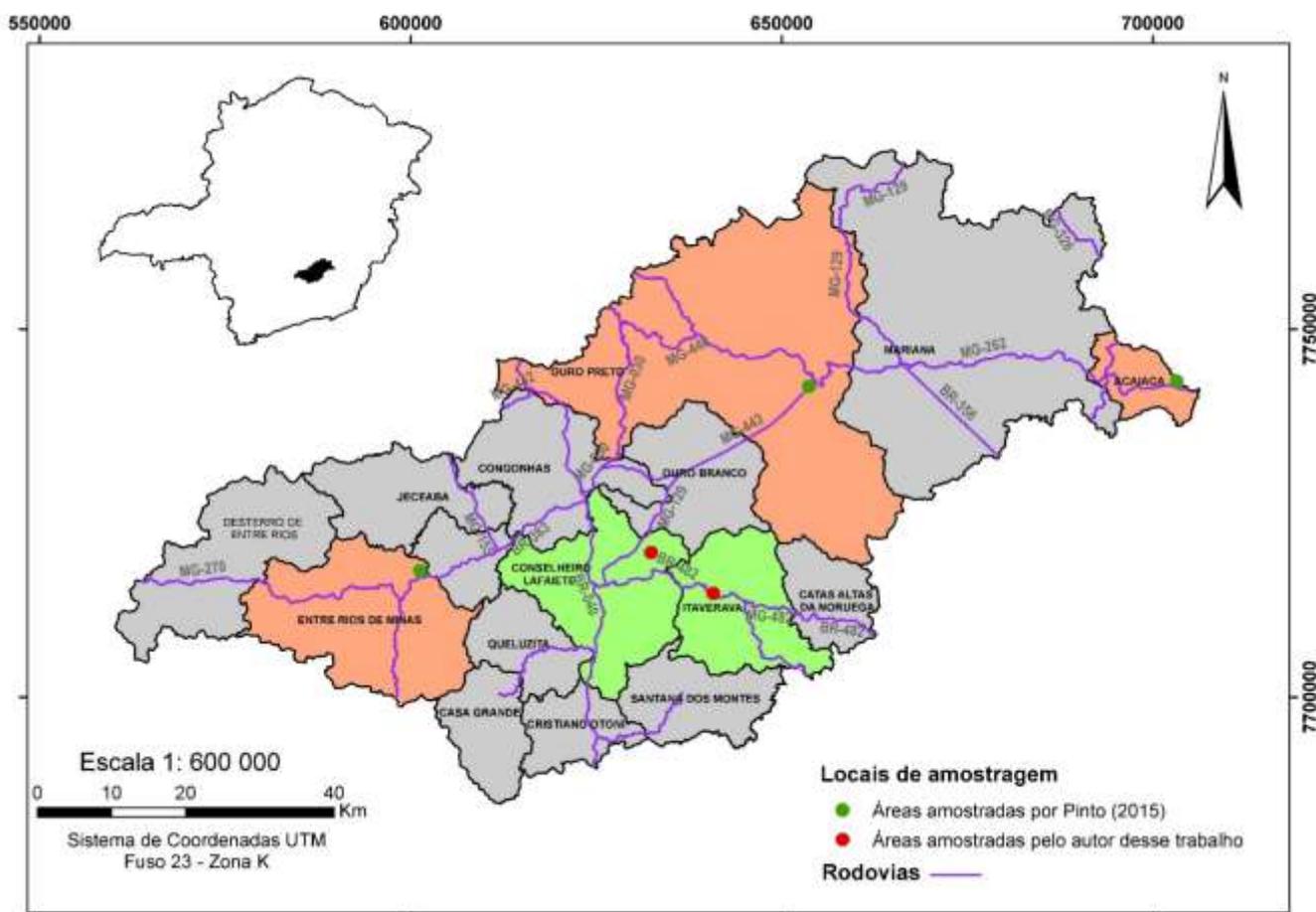


Figura 1.1 - Mapa parcial do estado de Minas Gerais, evidenciando a localização das áreas de estudo. Áreas em rosa: amostradas por Pinto (2015). Áreas em verde: amostradas pela autora desse trabalho.



Figura 1.2 - Terracetes estudados na região de Itaverava – MG (Arquivo pessoal).



Figura 1.3 - Terracetes estudados na região de Conselheiro Lafaiete - MG (Arquivo pessoal).

Algumas informações contidas neste trabalho foram anteriormente reunidas por Pinto (2015) durante a realização de sua dissertação de mestrado sobre a gênese de terracetes. Os dados coletados por ele são oriundos de três unidades amostrais, situadas em Ouro Preto, Entre Rios de Minas e Acaiaca nas proximidades das duas áreas amostradas no presente estudo (Figura 1.4).



Figura 1.4 - Terracetes estudados em Ouro Preto - MG, Acaiaca - MG e Entre Rios de Minas – MG.

1.5 CARACTERÍSTICAS REGIONAIS

1.5.1 Geologia

A região de Conselheiro Lafaiete é caracterizada por apresentar grande ocorrência de rochas félsicas plutônicas paleoproterozóicas de composição quartzo-diorítica a granodiorítica, com predomínio dos termos tonalíticos, intrusivas em terrenos vulcanossedimentares e no embasamento ortognáissico arqueano (Guild 1957, Pires 1977, Grossi Sad *et al.* 1983, Seixas 1988). Este conjunto plutônico foi agrupado sob a denominação de Suíte Alto Maranhão, e se estende desde a região sudeste do Quadrilátero Ferrífero (limite norte), até São João Del Rei (limite sul) (Figura 1.5) (Heineck *et al.* 2003).

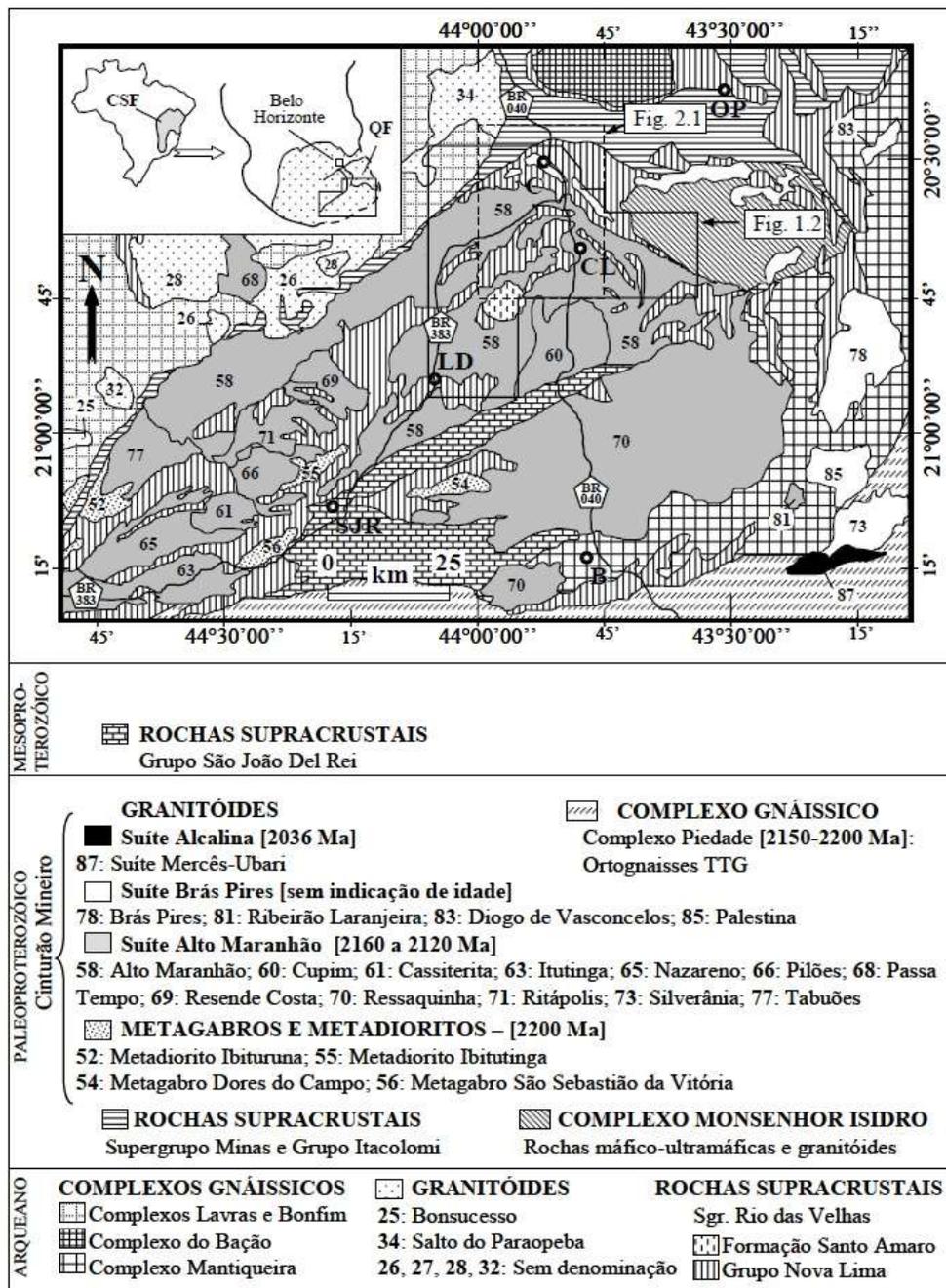


Figura 1.5 - Mapa geológico marcando o plutonismo félsico da porção ao sul do Quadrilátero Ferrífero (QF). Cidades: OP-Ouro Preto; C-Congonhas; CL-Conselheiro Lafaiete; LD-Lagoa Dourada; B-Barbacena; SJR-São João Del Rei (Retirado de Martins 2008).

A Suíte Alto Maranhão é parte integrante do Cinturão Mineiro (Figura 1.6), que se situa na porção sul do Cráton São Francisco, e possui aproximadamente 170 km de exposição de rocha (Barbosa 2015). Sua porção oriental foi retrabalhada durante a aglutinação do Gondwana (Noce *et al.* 2007). Um grande número de corpos plutônicos máficos-ultramáficos, com pico de idades de cristalização 2,2 – 2,1 Ga são interpretados como resultantes da evolução desse orógeno acrescionário paleoproterozóico (Teixeira 1985, Almeida *et al.* 2000, Teixeira *et al.* 2000, Teixeira & Ávila 2007).

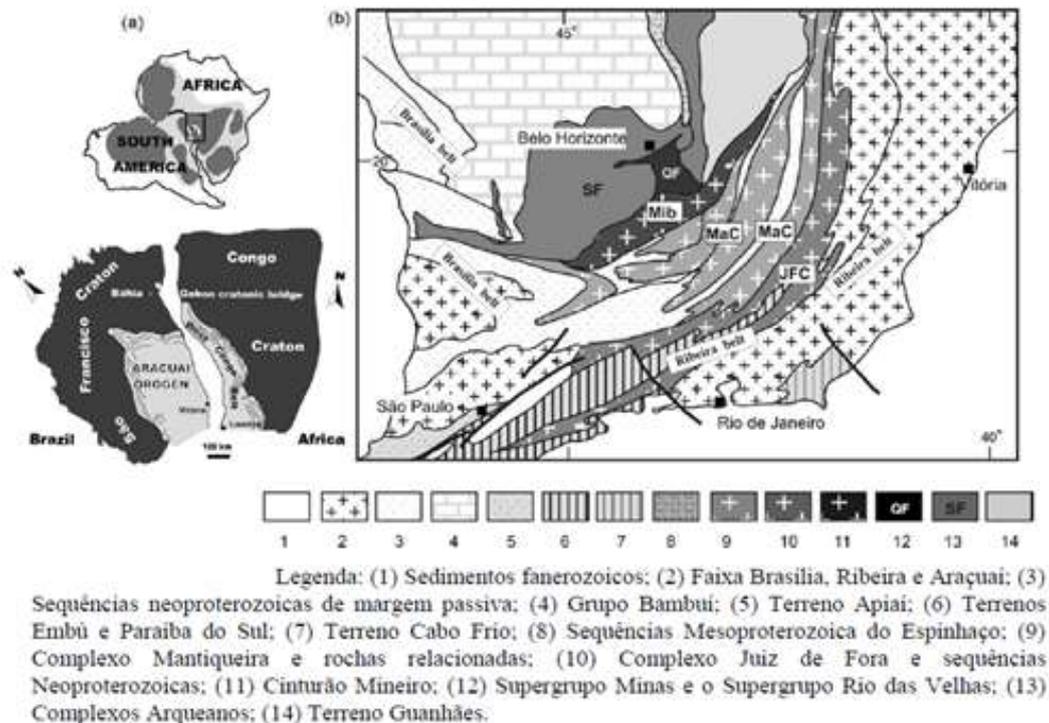


Figura 1.6 - (a) Localização dos Cráton São Francisco e Oeste Congo, e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo; (b) Mapa tectônico mostrando a distribuição do embasamento Paleoproterozóico e no Cráton SF e suas imediações (Retirado de Barbosa 2015).

Na localidade de Pé do Morro (Itaverava), a suíte Alto Maranhão é representada por hornblenda-biotita tonalito, com foliação de alto ângulo de mergulho (Martins 2008). No local escolhido para estudo, é possível observar a rocha fresca, caracterizada por textura granular, homogênea, com cristais de biotita, quartzo e plagioclásio evidentes.

Segundo Heineck *et al.* (2003), em Conselheiro Lafaiete predominam biotita-tonalitos, consideradas como sendo parte integrante do plutonismo paleoproterozóico atribuído à Suíte Alto Maranhão. No local onde foram feitas as amostragens, não é possível observar afloramentos de rocha, visto que o manto intempérico é espesso.

1.5.2 Pedologia

O trabalho teve como enfoque áreas com cobertura de solo, visto que o intuito é discutir a gênese de terracetes.

Segundo o mapa 1: 650 000 gerado pelo Projeto “Banco de Solos do Estado de Minas” (Figura 1.7) que faz parte do Programa Solos de Minas (UFV, UFLA, FEAM, 2010) foi possível separar as áreas de estudo em duas classes diversas (em acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos): a região de Conselheiro Lafaiete - Rancho Novo é classificada como LVAd27 – Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, Argissolo Vermelho Eutrófico, Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico; enquanto os solos da região de Itaverava – Pé do Morro são LVd13 - Latossolo Vermelho Distrófico e Neossolo Litólico Distrófico (Quadro 1.1).

Quadro 1.1 - Tipos de solos encontrados nas regiões de estudo. Dados compilados da AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica.

TIPOS DE SOLOS NAS ÁREAS ESTUDADAS

Latossolos (L): Solos de intemperização intensa chamados popularmente de solos velhos, sendo definidos pelo SiBCS (Embrapa, 2011) pela presença de horizonte diagnóstico latossólico e características gerais como: argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, argilas de baixa atividade (baixa CTC), fortemente ácidos e baixa saturação de bases. Estão distribuídos sobre superfícies de erosão: tabuleiros, chapadas, planaltos, terraços fluviais, estando associados normalmente a relevos planos e suave ondulados e, mais raramente, a áreas mais acidentadas.

- **LV** – Latossolos Vermelhos: altos teores de de óxidos de ferro presentes no material originário em ambientes bem drenados, e características de cor, textura e estrutura uniformes em profundidade. Solos suscetíveis à compactação quando possuem textura argilosa ou muito argilosa.
- **LVA** – Latossolos Vermelho-Amarelos: comuns em extensas áreas dispersas em todo o território brasileiro. Associados aos relevos plano, suave ondulado ou ondulado. Ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura em profundidade.

Argissolos (P): Solos definidos pelo SiBCS (Embrapa 2011) pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo. Apresentam frequentemente, mas não exclusivamente, baixa atividade da argila (CTC), podendo ser alíticos (altos teores de alumínio), distróficos (baixa saturação de bases) ou eutróficos (alta saturação de bases), sendo normalmente ácidos. Ocorrem em paisagens de relevos mais acidentados, com superfícies pouco suaves.

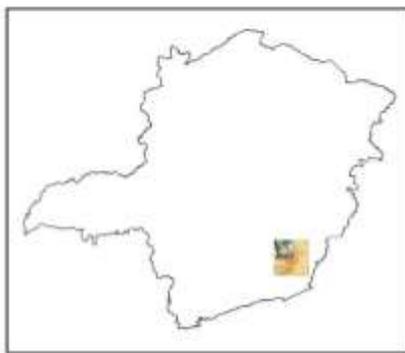
- **PV** – Argissolos Vermelhos: cores vermelhas acentuadas devido a teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário, em ambientes bem drenados. Apresenta fertilidade natural muito variável devido à diversidade de materiais de origem. O teor de argila no horizonte subsuperficial (de cor vermelha) é bem maior do que no horizonte superficial, sendo esse incremento de argila percebido sem dificuldade quando se faz o exame de textura, no campo.
- **PVA** – Argissolos Vermelhos – Amarelos: Constitui a classe de solo das mais extensas no Brasil, ao lado dos Latossolos. Ocorrem em áreas de relevos mais acidentados e dissecados do que os relevos nas áreas de ocorrência dos Latossolos. As principais restrições são relacionadas à fertilidade, em alguns casos, e susceptibilidade à erosão.

Neossolos (R): Solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, com insuficiência de manifestação dos atributos diagnósticos que caracterizem possíveis processos de formação dos solos. Isso se deve em razão da maior resistência do material de origem ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos. Apresentam predomínio de características herdadas do material originário, sendo definido pelo SiBCS (Embrapa 2011) como solos pouco evoluídos e sem a presença de horizonte diagnóstico. Associados desde áreas de relevos muito movimentados (ondulados a montanhosos) até as áreas planas, sob a influência

do lençol freático.

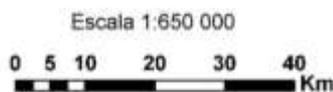
- **RL** – Neossolos Litólicos: Compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos. As limitações ao uso estão relacionadas a pouca profundidade, presença da rocha e aos declives acentuados associados às áreas de ocorrência destes solos. Estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas e elevam o risco de erosão.

<p>Conselheiro Lafaiete</p> <p>LVA_d27 – Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico: LVA de baixa fertilidade;</p> <p>Argissolo Vermelho Eutrófico: PV de alta fertilidade;</p> <p>Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico: PVA de alta fertilidade.</p>	<p>Itaverava</p> <p>LV_d13 – Latossolo Vermelho Distrófico: LV de baixa fertilidade;</p> <p>Neossolo Litólico Distrófico: RL de baixa fertilidade</p>
--	---



Pontos de coleta de amostras

- 1 • Rancho Novo - Conselheiro Lafaiete
- 2 • Pé do morro - Itaverava



Sistema de Coordenadas UTM
Fuso 23 - Zona K

Tipos de Solos

- LVA_d27 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Argissolos Vermelhos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos
- LV_d13 - Latossolos Vermelhos Distróficos + Neossolos Litólicos Distróficos

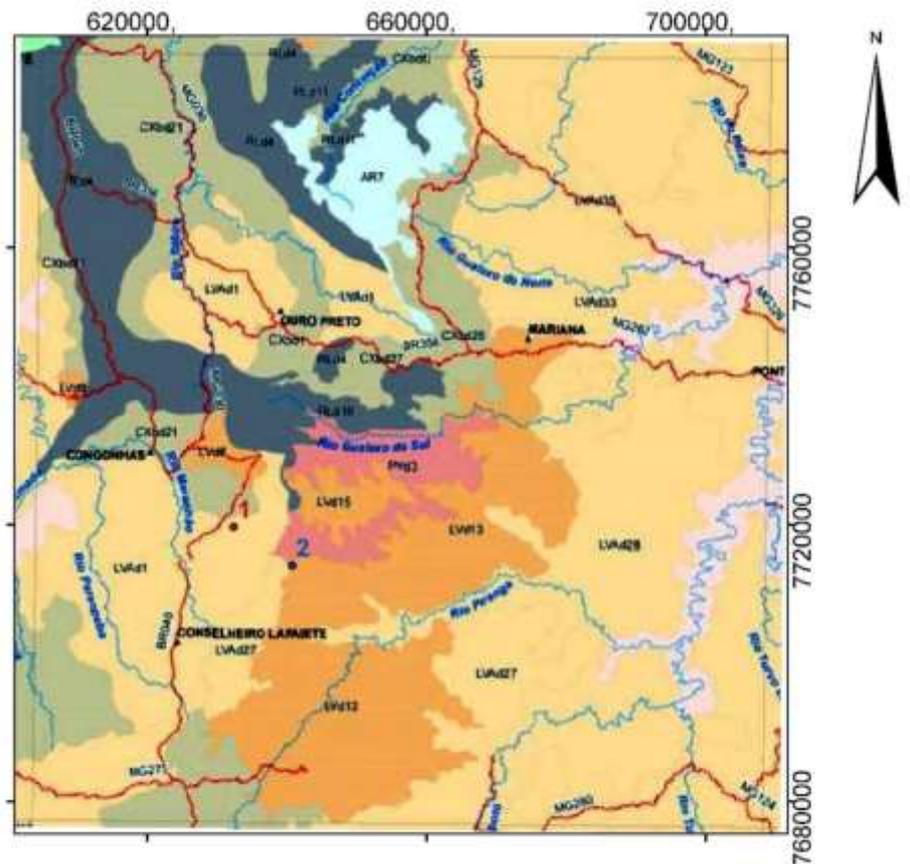


Figura 1.7 - Mapa de solos com a localização das áreas estudadas (Retirado de Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, Fundação Estadual do Meio Ambiente 2010).

1.5.3 Clima e Vegetação

O clima dessa região é compreendido por duas estações distintas, uma mais chuvosa no verão e outra seca no inverno, com predominância do clima tropical de altitude (Alvim 2012). A temperatura média anual é de cerca de 20 °C. Os períodos chuvosos se desenvolvem entre outubro a março, e a estiagem vai de abril a setembro (IBGE 2006).

Na região, a vegetação é representada pelo tipo floresta latifoliada tropical, sendo que em muitas áreas pode-se observar uma transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado (Pires 1977). A vegetação encontra-se preservada dispersa, compondo a mata de reserva legal de propriedades rurais. As matas ciliares estão preservadas no curso dos rios que drenam a área.

Atualmente grande parte da área é usada como pastagem. As áreas estudadas se encaixam nessa categorização, sendo que nelas quase não é possível identificar vegetação nativa.

1.5.4 Uso e ocupação do solo

O setor agropecuário prevalece nas zonas rurais onde este trabalho foi realizado. Em geral, são propriedades rurais que criam principalmente rebanhos bovino de corte e leite. Em menor escala encontram-se as criações de galináceos e suínos. O cultivo agrícola se restringe a plantações de milho, cana e batata-inglesa. Já a nível de culturas de pequeno porte temos banana, mandioca e feijão (IBGE 2006).

Nas localidades estudadas há a presença de rebanho bovino de corte. O gado utiliza as áreas esporadicamente. Há rotação de terreno, e de tempos em tempos as áreas são deixadas livres da presença animal.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Terracetes são feições perceptíveis em relevo em encostas (Figura 2.1), que se assemelham a ‘escadas’, onde o solo se dispõe em pequenas bermas horizontais a sub-horizontais, separados por pequenos taludes entre as bermas. Odum (1922, citado em Bielecki & Mueller 2002), identificou e denominou os terracetes pela primeira vez, escolhendo um nome descritivo, mas que não implica em aspectos genéticos.



Figura 2.1 - Terracete, com as bermas e taludes bem evidenciados. Wiltshire, Inglaterra (Retirado de www.geograph.org.uk/photo/1345952).

A maior parte dos estudos sobre a formação de terracetes tem como objetivo entender o impacto do pisoteio animal na compactação dos solos, e como isso afeta a germinação de culturas nas áreas onde existe presença animal. Porém, a formação dessas feições pode estar diretamente relacionada a fatores geológicos, tais como as características do solo, do relevo e aspectos estruturais (presença de descontinuidades).

Embora grupos de terracetes em diferentes localidades possam diferir entre si em alguns aspectos, Rahm (1962) descreveu as características em comum geralmente observadas:

- ✓ A maioria das bermas são sub-paralelas ao longo do seu comprimento, ou seja, elas se assemelham a rampas horizontais. No entanto, algumas são inclinadas em parte ou em todo o seu comprimento. Inclinações de até

30° são comuns, fazendo com que alguns terracetes possam se combinar, se mostrando como uma série de rampas conectadas, ligeiramente inclinadas, com padrão anastomosado.

- ✓ Em alguns casos, ao invés de se combinarem, terracetes terminam abruptamente em porções interrompidas da encosta. Algumas bermas são planas, mergulham suavemente segundo a direção da encosta, enquanto uma minoria mergulha na direção oposta.
- ✓ Os taludes entre rampas, sempre mais íngremes que a encosta, mergulham quase que invariavelmente na mesma direção da encosta.

Em seu trabalho sobre os terracetes formados em colinas sobre falhas ativas na Califórnia, Bielecki & Mueller (2002) levantam hipóteses sobre sua formação, que seria condicionada tanto por fatores geológicos quanto externos. Na Tabela 2.1, tais autores reuniram as hipóteses possíveis de geração de terracetes e os autores que as formularam.

Tabela 2.1 - Hipóteses de desenvolvimento de terracetes (Modificado de Bielecki & Mueller 2002).

Hipóteses	Referências
Agricultura e ocupação da terra	Aten & Bollich (1981)
Ação de rebanhos no terreno	Howard & Higgins (1987)
<i>Coseismic folding</i> (terracetes por crescimento de dobras)	Mueller & Suppe (1997)
<i>Flexural slip faulting</i> (falhas por deslizamento flexural)	Mueller & Suppe (1997), Bielecki (1998) Dalquest & Scheffer (1942)
Escorregamentos	Sharpe (1938)
Solifluxão	Costin (1950)
Rastejo	Clayton (1966)

2.1 CONDICIONANTES EXTERNOS

2.1.1 Agricultura e Ocupação da Terra

Kerney (1964) obteve evidências que terracetes encontrados em Kent, na Inglaterra, eram posteriores ao desmatamento de florestas, que ocorreu cerca de 1000 a.C. Isso sugere que a formação dos terracetes foi desencadeada pelo uso da terra pelos habitantes da época. Nessas áreas foram encontrados associados aos terracetes artigos de cerâmica que datavam em cerca de 500 a 300 a.C.

Aten & Bollich (1981) também propuseram que encostas delineadas por terracetes na costa do Texas - EUA foram geradas por técnicas primitivas de agricultura utilizadas pelos nativos-americanos.

Na região norte da China, na província de Sichuan, terracetes foram estudados por Henck *et al.* (2010). Neste trabalho, os autores demonstraram que múltiplas linhas de terracetes sugerem uma longa história de habitação humana na região e que estes possuem relação direta com ação do homem, quer seja caminhando repetidas vezes nos mesmos trilhos, quer seja pastoreando animais por estes. Entrevistas etnográficas realizadas na região sugerem que os ciclos de plantio e a agricultura extensiva aplicada ao solo na época removiam as raízes das árvores, fazendo com que os sedimentos perdessem coesão, deslizassem, e que terracetes se formassem ao longo das encostas com o passar do tempo. Essa evidência é sustentada pela presença de sedimentos oriundos de deslizamentos de solos, encontrados nos terracetes. A presença humana também é evidenciada por vestígios de ossos, ferramentas de pedra e cerâmicas, todos datando pelo menos 2200 anos atrás.

2.1.2 Ação de Rebanhos no Terreno

Os terracetes muitas vezes encontrados ao longo de encostas podem ser causados por erosão decorrente da formação de trilhos pelos animais. Em muitos trabalhos consultados (*eg* Rahm 1962, Trimble & Mendel 1995) os autores se referem aos bovinos como sendo os principais agentes modificadores, já que a criação destes animais é amplamente difundida pelo mundo, e seu número é maior se comparado ao de outros animais grandes o suficiente para modificarem significativamente o solo.

Daubenmire (1968), Young (1972) & Stoddart *et al.* (1975) afirmam que os terracetes são primariamente associados ao pisoteio de rebanhos, e que essa seria a explicação mais provável do seu desenvolvimento. Nesse caso, os terracetes se desenvolveriam quando os animais atravessam as encostas íngremes enquanto pastam. Por onde os animais passam, a vegetação tende a ser removida. Para Howard & Higgins (1987), os terracetes formados por presença animal geralmente seguem um padrão anastomosado com rampas interconectadas (Figura 2.2).

Carson & Kirby (1972) afirmam que em algumas encostas, o aparecimento de terracetes foi acentuado pelo movimento de animais ao longo delas, mas como terracetes também ocorrem em áreas onde a presença animal é rara, há de se pensar que outros mecanismos, que não somente a presença animal, podem estar associados.

Em suas investigações sobre o assunto, Buckhouse & Krueger (1981) relatou ter observado terracetes que terminavam abruptamente na interface de um tipo diferente de solo. Seria de se presumir que se eles tivessem sido gerados pelo andar do rebanho, também estariam presentes no outro tipo de solo adjacente.



Figura 2.2 - Exemplo de terracetes com padrão anastomosado (Arquivo Pessoal).

De acordo com Girollo (2013), dentre as características morfológicas do solo, a textura influencia diretamente na circulação de água e na taxa de erosão, visto que solos arenosos retêm menos água se comparados a solos argilosos, o que torna estes mais suscetíveis à compactação. Logo, a presença animal, associada a um tipo de solo propício à compactação podem ser fatores agravantes à formação dos terracetes.

Analisando a influência das raízes nos parâmetros de resistência dos solos, Teixeira (2017) concluiu que a resistência ao cisalhamento de solos em taludes com a presença de vegetação aumenta. A análise dos parâmetros geotécnicos do solo com e sem a presença de Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) demonstrou que a contribuição das raízes ocorre no aumento da coesão do solo. Teerawattanasuk *et al* (2014) chegaram a conclusões semelhantes ao realizaram ensaios de cisalhamento direto de grande porte *in situ* em solos contendo raízes das gramíneas Vetiver e Ruzi (*Brachiaria ruzizienses*) (Figura 2.3). Concluiu-se que as raízes de Vetiver ajudam no aumento da resistência ao cisalhamento do solo, enquanto as raízes mais curtas de Ruzi auxiliam no controle da erosão superficial.

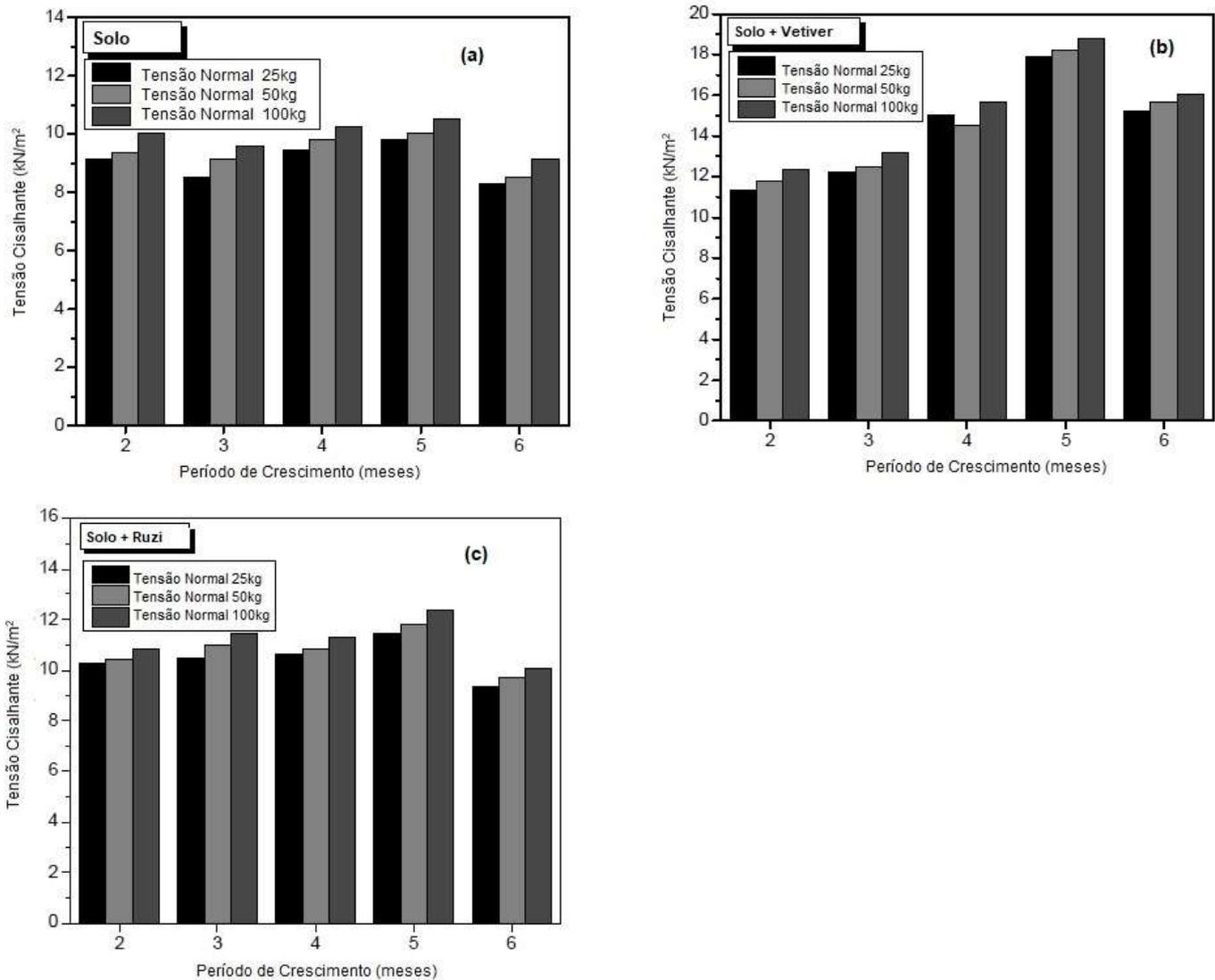


Figura 2.3 - Tensão de cisalhamento em relação ao tempo, em diferentes contextos. (a) Solo natural, sem reforço; (b) solo reforçado com vetiver; e (c) solo reforçado com ruzi (Modificado de Teerawattanasuk *et al.* 2014).

No Brasil, a *Brachiaria ruzizienses* está entre as espécies mais utilizadas em pastagens (Embrapa, 2002). Com a intensa remoção de vegetação normalmente causada pelo rebanho, e levando em conta os resultados expostos acima, o solo se torna mais suscetível à erosão e a movimentos de massa, devido à perda de resistência por perda de raízes.

Um aspecto pouco explorado é a força direta que o pisoteio animal exerce sobre o solo. Quando em movimento, a massa de um bovino, por exemplo, se concentra sobre um ou dois cascos. Usando um simulador mecânico, Scholefield & Hall (1986) calcularam que uma vaca exerceria 250 kPa de tensão vertical ao caminhar.

Carvalho (2006) destacou que a pata do boi pressiona o solo de acordo com a inclinação da encosta, pois a área de contato da pata com o solo decresceria com a declividade. Para declividades de 100%, a tensão aplicada pelo casco atingiria 200 kPa, valor parecido com o obtido por Scholefield & Hall (1986).

2.2 FATORES GEOLÓGICOS

2.2.1 Terracetes por Crescimento de Dobras

Esse modelo assume que um prisma de sedimentos que se forma sobre a base dos flancos da dobra é transladado no sentido oposto ao mergulho do flanco, durante sismos. Esse prisma transladado corresponde aos degraus do terracete (Mueller & Suppe 1997). Ainda segundo essa hipótese, o traço da superfície axial deveria corresponder aos limites externos dos degraus (Mueller & Suppe 1997).

2.2.2 Falhas por Deslizamento Flexural

Uma outra hipótese tectônica para o desenvolvimento de terracetes é baseada na deformação por deslizamento flexural que ocorre em dobras, um mecanismo de deformação comum em dobras relacionadas a falhas ativas. O deslizamento flexural ocorre entre camadas, fazendo com que planos acamadados de pequena escala se formem, e rompam a superfície do flanco da dobra. O colapso do teto das falhas de deslizamento flexural produz o que corresponde ao piso dos terracetes (Bielecki 1998). De acordo com esse modelo, a largura do piso do terracete é equivalente ao rejeito gerado pelo deslizamento flexural (Figura 2.4).

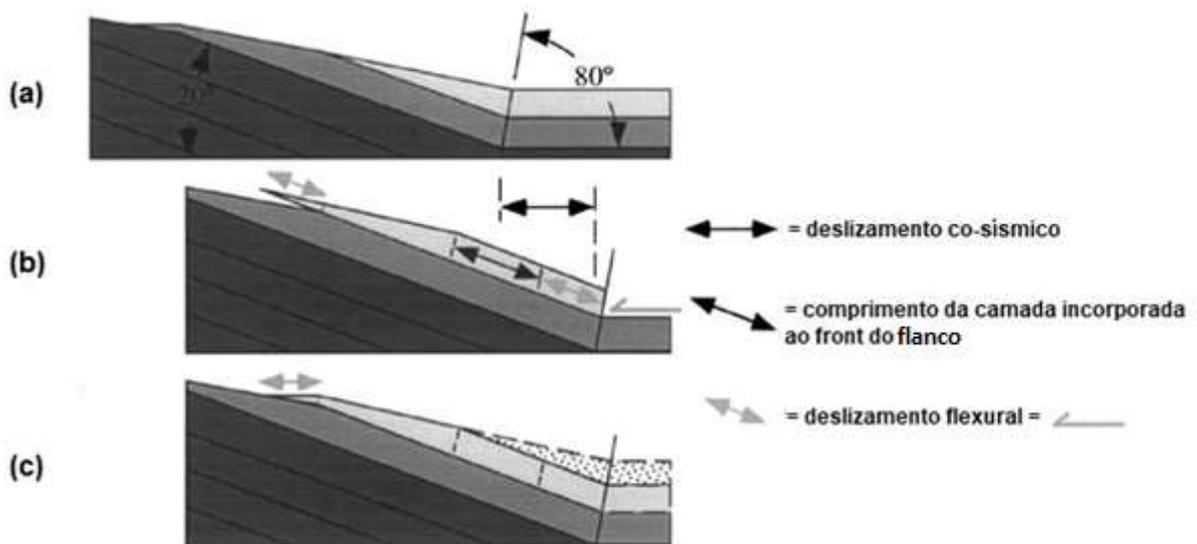


Figura 2.4 - Ilustração esquemática do desenvolvimento dos terracetes de acordo com a hipótese do deslizamento flexural. (a) Deslizamento flexural (b) causa a elevação e ruptura da superfície da unidade superior. (c) Colapso e degradação da unidade superior (Modificado de Bielecki & Mueller 2002).

2.2.3 Morfologia das Encostas

A forma das vertentes (Figura 2.5) influencia na taxa de erosão, assim como no escoamento superficial (Ruhe 1975) e, conseqüentemente, na saturação do solo. Sendo assim, componentes geométricos como

declividade, comprimento e forma (côncava, convexa ou retilínea) são fatores a serem destacados, já que os processos morfológicos e erosivos agem de maneira diversa, em função do tipo. Ruhe (1975) ainda afirma que nos segmentos côncavos das encostas ocorre maior convergência do fluxo de água, ocasionando formas erosivas mais significativas, como a erosão em sulco. Nesse mesmo cenário, quando o escoamento superficial se concentra, amplia a magnitude e frequência da erosão e saturação do solo (Girollo 2013). A saturação pode, em tese, facilitar a formação de terracetes.

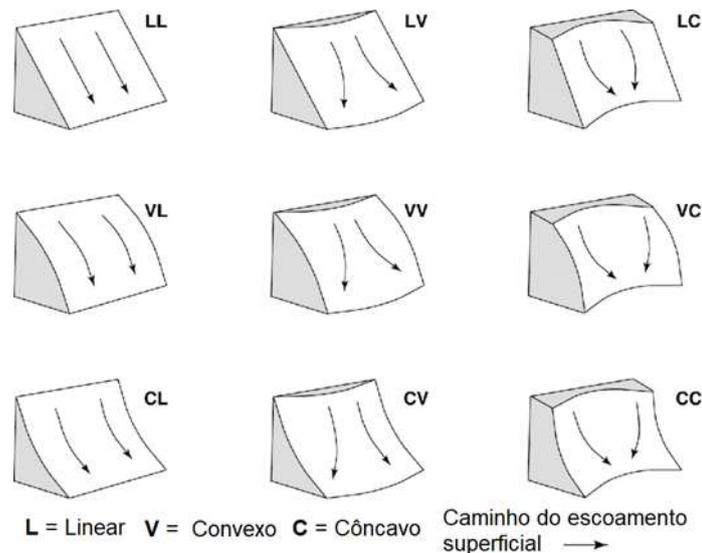


Figura 2.5 - Diagrama da combinação de formas de encostas, e como elas afetam o fluxo de água pela superfície (Adaptado de Ruhe, 1975).

2.2.4 Movimentos de Massa

Segundo Bielecki & Mueller (2002), há movimentos de massa específicos que podem ter influência na formação de terracetes. De acordo com esses autores, são dois os tipos principais:

- ✓ Tipo i - Movimentos onde predominam o escorregamento de encostas sobre planos de descontinuidade;
- ✓ Tipo ii - Fluxo de massa, como rastejos e solifluxão

2.2.4.1 Escorregamentos

Movimentos caracterizados por velocidade alta, que se desenvolvem comumente em encostas com declividade e amplitude média a alta e segundo superfície de ruptura planar (translacional), circular (rotacional) ou em cunha (acompanhando planos de fragilidade estrutural dos maciços terrosos ou rochosos). É geralmente deflagrado por eventos de chuvas de alta intensidade ou com elevados índices pluviométricos acumulados, condicionados por fatores predisponentes intrínsecos aos terrenos. O processo é também denominado deslizamento (CPRM 2014).

Se encaixam nos movimentos de massa do tipo (i), que foram propostos por Sharpe (1938) como um modelo de formação dos terracetes. O modelo envolve tanto a translação planar quanto rotacional de blocos de massa sobre uma superfície de escorregamento. Essa superfície pode se desenvolver em camadas de fraqueza dentro do solo, no limite entre a rocha e sedimentos coluvionares, ou no limite entre o solo e um substrato rígido, como camadas densas de solo.

Ao estudarem os terracetes formados em colinas em área com falhas ativas na Califórnia, Bielecki e Mueller (2002) propuseram que escorregamentos de blocos causariam o abatimento de parte da estrutura transladada, assim como a abertura de fissuras, que mais tarde seriam preenchidas com sedimentos e dariam origem às bermas dos terracetes (Figura 2.6).

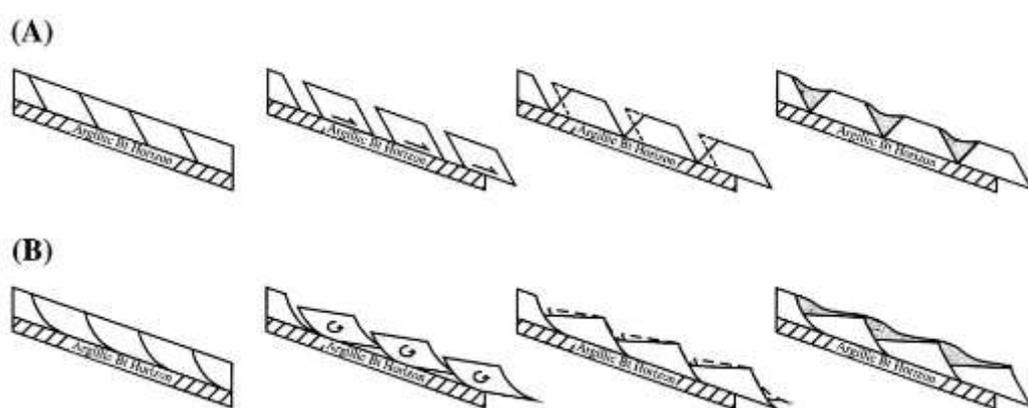


Figura 2.6 - Ilustração esquemática dos possíveis modelos de evolução dos terracetes, de acordo com a hipótese dos escorregamentos. Note que neste caso, há uma descontinuidade gerada por camada rígida de solo argiloso. (A) Rupturas planares. (B) Rupturas circulares (Retirado de Bielecki & Mueller 2002).

2.2.4.2 Rastejo (*soil creep*)

O rastejo é um movimento relativamente lento quando comparado ao processo de deslizamento, que pode ocorrer mesmo em terrenos com baixas declividades, como colúvios ou tálus, em depósitos de sopé e/ou meia encosta. O deslocamento lento da massa possibilita detectar previamente a presença de feições de instabilização, como trincas no solo, degraus de abatimento, deformações na superfície e surgências d'água na base da encosta (CPRM 2014). Pode ser deflagrado por eventos de chuvas de longa duração e altos índices pluviométricos acumulados, que acarretam a elevação progressiva do nível d'água subterrâneo e tendem a instabilizar os terrenos. Desenvolve-se segundo superfícies de ruptura irregulares e pode ser acelerado por intervenções humanas efetuadas no sopé da encosta afetada. Pode ocorrer de modo isolado ou associado a deslizamento (CPRM 2014). A taxa de movimentação do rastejo é maior na superfície, e diminui abruptamente com a profundidade, com movimento confinado à zona superficial (Carson & Kirby 1972).

Segundo Sharpe (1938) e Young & Saunders (1986), apresentam taxas de deslocamento que variam de poucos milímetros a no máximo alguns centímetros ao ano. Embora a taxa de movimento seja menor que a gerada pela solifluxão, ela pode ser facilitada por bioturbação, variações na umidade no solo e terremotos.

Modelos de desenvolvimento de paisagens envolvendo *soil creep* postulam que os terracetes se formam em resposta à diminuição da velocidade em que o solo se move (Clayton 1966, Benedict 1976). Isso geralmente ocorre quando há uma diminuição no gradiente de movimento do solo (em encostas mais baixas e côncavas, por exemplo). Pode levar ao desenvolvimento de *buckle folds* (dobras de flambagem) (Figura 2.7a e b).

Após estudarem flancos de dobras existentes na Califórnia, e analisarem todas as hipóteses mencionadas na tabela 2.1, Bielecki & Mueller (2002) concluíram que o rastejo é o mecanismo primário de formação de terracetes nesta área. Embora nos dias atuais esse fenômeno seja mais comum em estações chuvosas, em períodos glaciais passados o clima do sudoeste americano era muito mais úmido e as taxas de movimento de massa teriam sido maiores que nos tempos atuais, sendo um ambiente ideal para a formação dos terracetes, segundo Bielecki & Mueller (2002).

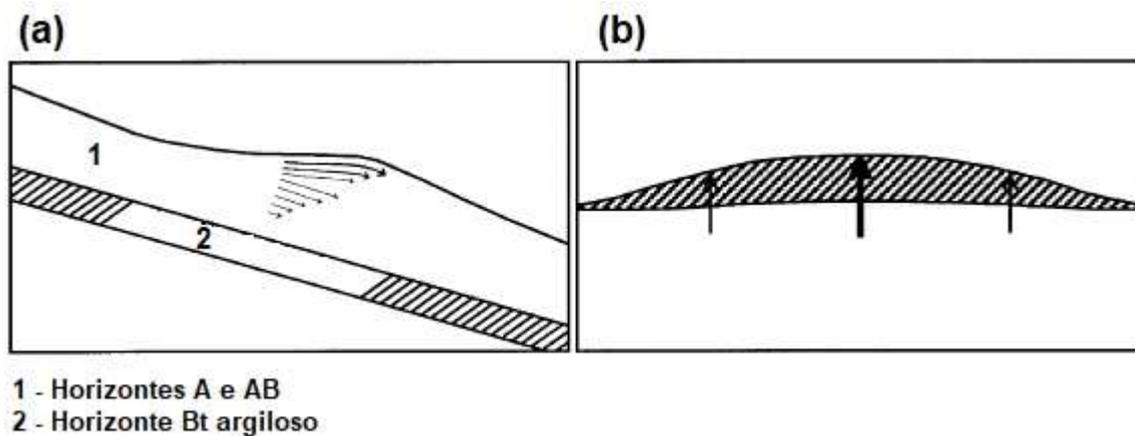


Figura 2.7 - Ilustração esquemática do desenvolvimento de terracetes de acordo com a hipótese do rastejo. (a) Perfil de um lento movimento coluvionar, paralelo ao movimento de rastejo. (b) Perfil transversal ao rastejo, evidenciando a formação de *buckle folds* (Modificado de Bielecki e Mueller 2002).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Os passos metodológicos empregados nesse estudo têm como base a revisão bibliográfica, aquisição de dados e de amostras em campo, testes em campo, caracterização laboratorial de amostras, discussão dos resultados obtidos e conclusão.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi feita com leitura e análise de artigos que tratavam sobre temas pertinentes ao desenvolvimento do trabalho. Essa revisão é explicitada no capítulo 2.

3.2 RECONHECIMENTO INICIAL DAS ÁREAS DE ESTUDO

A pesquisa foi feita em duas propriedades privadas, uma na localidade Pé do Morro, pertencente ao município de Itaverava (UTM 7714113S/640774E), e outra na localidade Rancho Novo, em Conselheiro Lafaiete (UTM 7719622S/632355E).

As áreas foram escolhidas por uma análise preliminar para identificar a presença de terracetes, em imagens aéreas do aplicativo *Google Earth*.

Após a constatação da existência das feições, foram feitas visitas às localidades para assegurar que seriam viáveis ao estudo, e também para solicitar aos proprietários a autorização para as coletas em suas propriedades. Previamente foram selecionadas 4 áreas de estudo, para a escolha de 3. No entanto, somente dois proprietários concederam a autorização.

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

3.3.1 Aspectos morfológicos dos terracetes

Com o intuito de verificar os parâmetros observados por Rahm (1962), foram coletadas:

- ✓ as dimensões de bermas e taludes dos terracetes;
- ✓ a inclinação média dos taludes inter-rampas;
- ✓ a forma das encostas em planta e perfil (concavidade e convexidade);
- ✓ a inclinação média das encostas.

3.3.2 Coleta de amostras deformadas e indeformadas

A coleta de amostras deformadas foi feita com o intuito de analisar aspectos texturais e físicos do solo. Com elas, fizeram-se ensaios laboratoriais de determinação da granulometria dos solos, limites de Atterberg (limite de plasticidade e liquidez) e compactação.

Coletaram-se amostras indeformadas de solo (Figura 3.1) para a realização de ensaios de cisalhamento direto, com o intuito de analisar a resistência ao cisalhamento, e comparar com os valores impostos pelo pisoteio do rebanho no terreno. A amostra de solo foi colhida durante um período predominantemente chuvoso (dezembro), fazendo com que os resultados expressem o comportamento do solo em umidade natural maior que a média anual.



Figura 3.1 - Coleta de amostra indeformada em campo (Arquivo pessoal).

Os dados em campo foram coletados segundo a norma NBR 9604 (ABNT 1986).

3.3.3 Aplicação de traçador *Brilliant Blue FCF*

Os traçadores colorimétricos têm sido mais utilizados a partir da segunda metade do século passado (Flury & Way 2003) no estudo de fluxos nos horizontes mais superficiais dos solos. Neste trabalho, o traçador foi empregado como ferramenta para avaliar a infiltração da água pelo solo das bermas e taludes inter bermas. Com os padrões de fluxo observados, é possível verificar se há taxas distintas de infiltração condicionada pela compactação devido ao pisoteio do gado. Também é possível verificar se há algum plano preferencial de percolação condicionada por planos basais de ruptura devido a eventuais movimentos de massa.

Do ponto de vista toxicológico, o *Brilliant Blue FCF* pode ser considerado como um traçador adequado e aceitável em termos de danos ao meio ambiente para o estudo de transporte de solutos no solo, especialmente no campo. É um dos mais utilizados, devido à sua baixa sensibilidade às variações de pH, pequena toxicidade, baixa adsorção pelo solo e fácil detecção. Ele também não se acumula em animais ou plantas, mas se degrada lentamente no meio ambiente (Flury & Fluhler 1994).

Tendo como base o estudo feito por Morais (2007), uma concentração de 4 mg.L^{-1} desse traçador foi utilizada. Em cada uma das duas áreas de estudo, foi selecionado um trecho representativo (abrangendo berma e taludes inter bermas) onde foi demarcada uma área superficial de 1 m^2 , sendo $62,5 \text{ cm}$ de largura paralelos aos terracetes, e $1,60 \text{ m}$ de comprimento, ortogonais.

Para garantir boa infiltração do traçador, foram aplicados 60 litros de solução nesta área, na concentração sugerida (Figura 3.2). Essa quantidade equivale a uma chuva de 60 mm , o que corresponde a um valor comum para a precipitação diária no mês de dezembro/2017 (Inmet), época da coleta dos dados.



Figura 3.2 - Aplicação do traçador no solo em área de 1 m^2 . Itaverava (Arquivo Pessoal).

A área irrigada foi coberta com uma lona plástica clara, para atenuar os efeitos da evaporação. Dois dias (48 horas) após a aplicação do traçador, uma trincheira foi aberta em cada área com o intuito de visualizar a infiltração, e analisar a presença ou não de planos preferenciais de fluxo, assim como o impacto causado pela compactação nos solos (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Abertura de trincheira para análise da infiltração do traçador. Profundidade indicada pela fita métrica: 70 cm. Conselheiro Lafaiete. Arquivo Pessoal.

3.3.4 Penetrometria

Essa etapa constitui-se da análise da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP). Foram feitas medidas nas bermas e taludes dos terracetes estudados, para averiguar se há diferenças consideráveis entre a resistência nessas porções.

Para a análise do solo, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo Stolf reduzido (Figura 3.4), fabricado pela Sondaterra[®] Equipamentos Agrônômicos LTDA.



Figura 3.4 - Penetrômetro modelo Stolf reduzido (Retirado de Sondaterra).

A haste do penetrômetro possui marcações de 5 em 5cm, e as leituras foram realizadas até 50cm de profundidade. O peso aplicado é de 1,5kg, sendo que a cada baque, o número de batidas necessários para penetrar 5cm de solo foi anotado.

O ensaio foi realizado em uma seção composta de uma berma de menor cota (denominada ‘berma inferior’), seguida por um talude inter berma, e finalmente pela berma superior a este talude (denominada ‘berma superior’). Foram coletados dados em diversos pontos ao longo das bermas e do talude inter berma. Para análise dos dados, a média entre os valores obtidos na mesma berma/talude foi utilizada.

3.4 CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL

Os testes laboratoriais foram feitos com o intuito de caracterizar texturalmente e fisicamente os solos das regiões estudadas, tendo assim uma base de dados para relacionar os resultados obtidos com as características dos terracetes estudados.

3.4.1 Solo – Análise Granulométrica

Inicialmente, todo o material, após a secagem natural e a homogeneização, foi passado na peneira de 2mm. O material retido foi separado para o peneiramento grosso (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Peneiras usadas para o peneiramento grosso (Arquivo pessoal)

Do material passante, separou-se cerca de 120gramas para a sedimentação, que tem como objetivo mensurar a quantidade de partículas finas do solo menores que 0,075mm (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Ensaio de sedimentação (Arquivo pessoal).

Após essa etapa, o material úmido foi lavado na peneira de 0,075mm, e levado à estufa numa temperatura de aproximadamente 105°. Após seco, utilizando-se o agitador mecânico, passou-se nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075mm para o peneiramento fino (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Peneiras usadas para o peneiramento fino, no agitador (Arquivo pessoal).

Para a realização desses ensaios, utilizou-se a norma NBR 7181 (ABNT 1984).

Com as análises texturais foi possível classificar geotenicamente os solos das duas áreas, de acordo com a classificação unificada – SUCS.

3.4.2 Limites de Consistência

O Limite de Liquidez (w_L) é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico. É a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente, pela norma britânica (BS 1377: parte 2, 1990), corresponde ao teor de umidade do solo que foi penetrado por 20mm por um cone padrão em queda livre, de massa igual a $80 \pm 0,05$ gramas, e tempo de penetração igual a 5 ± 1 segundo (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Cone britânico utilizado para o teste do Limite de Liquidez (Arquivo pessoal).

O Limite de Plasticidade (w_P) é tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço; é a umidade de transição entre os estados plástico e semisólido do solo. Em laboratório, pela norma NBR 7180 (ABNT 1984), o w_P é obtido determinando-se o teor de umidade no qual um cilindro de um solo com 3mm de diâmetro começa a apresentar fissuras quando progressivamente seco (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Ensaio de Limite de Plasticidade (Fonte: Torres Geotecnia).

A obtenção dos limites de consistência (ou limites de Atterberg) do solo permite estimar, através da Carta de Plasticidade, suas propriedades, principalmente no tocante a compressibilidade.

3.4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto mensura diretamente as tensões normal e cisalhante aplicadas a um corpo de prova confinado em uma caixa bipartida. Quando este corpo de prova é levado à ruptura, o par de valores tensão de cisalhamento - tensão normal (no plano de ruptura) define um ponto sobre a envoltória de tensões do solo. Pode-se definir a envoltória de resistência de um solo qualquer se aplicando diferentes valores de tensão normal a várias amostras do solo, medindo-se sua resistência e então marcar num gráfico de τ x σ os pares de valores determinados em cada amostra, onde:

τ – tensão cisalhante; e

σ – tensão normal.

O ensaio caracteriza-se por impor um plano de cisalhamento ao corpo de prova (Figura 3.10). O princípio é bastante simples e consiste em mover uma porção de solo sobre a outra aumentando a força horizontal e mantendo constante a carga aplicada normalmente ao plano de movimento.

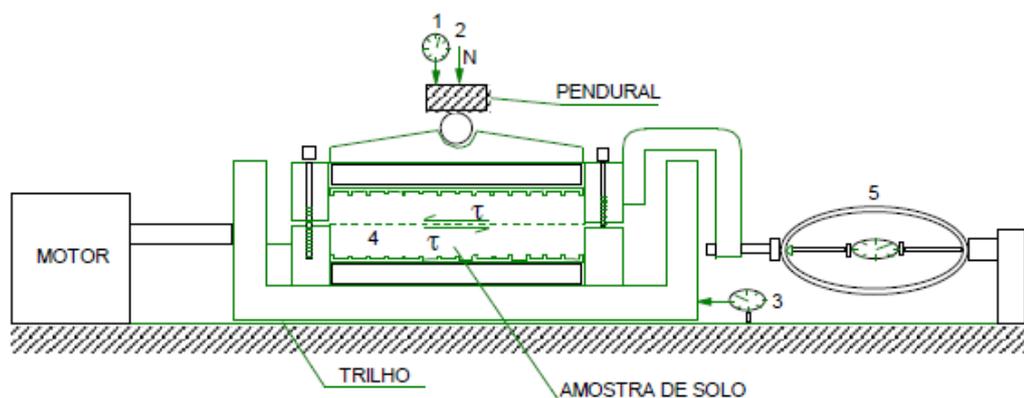


Figura 3.10 - Esquema de uma máquina de cisalhamento direto (Retirado de Fonte: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2012/03/2-05-teoria-sobre-ensaio-de-cisalhamento-direto1.pdf>).

Como se pode observar na Figura 3.10, o equipamento apresenta:

1. Extensômetro para medir as deformações verticais;
2. Força normal aplicada por um pendural;
3. Extensômetro para medir deformações horizontais;
4. Plano de cisalhamento do corpo de prova; e
5. Anel dinamométrico e extensômetro para medir a força cisalhante, τ .

Os ensaios foram realizados adensados e não-drenados (CU), na umidade de campo e saturados, para que a queda de resistência fosse analisada.

As tensões normais (σ) aplicadas foram 12,5 kPa, 20,15 kPa e 50kPa. Os ensaios não-saturados foram realizados em duas etapas, adensamento e ruptura. Já os ensaios saturados tiveram uma fase prévia de saturação dos corpos de prova.

A partir dos valores de τ encontrados para cada valor de tensão normal, foi possível traçar uma reta. Por meio da equação da reta, é possível obter o valor do ângulo de atrito do solo, e a coesão.

A equação reduzida de uma reta apresenta a forma $y = ax + b$, onde

a = coeficiente angular da reta; e

b = coeficiente linear. O coeficiente angular da reta é numericamente igual à tangente do ângulo formado com a reta e o eixo x , ou seja,

$$a = \tan \phi.$$

Logo,

$$\phi = \tan^{-1} a,$$

sendo ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

Pode-se relacionar a coesão c do solo com as tensões cisalhantes (τ) e normais (σ_n), através da critério de ruptura de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi.$$

O intuito dessa análise é obter os parâmetros de resistência do solo na condição de umidade natural e saturada. Por meio dos valores de coesão e ângulo de atrito, é possível rodar simulações computacionais de ruptura do solo, estimando assim o fator de segurança e verificar se a formação de terracetes por escorregamentos planares ou circulares é factível. Com isso, será possível determinar se o pisoteio animal por si só seria capaz de dar início a processos de deslizamentos de terra, gerando assim os terracetes.

3.4.4 Ensaio de Compactação (Proctor Normal)

A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento, e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade. Com o ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia (Figura 3.11). O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), realizado com certo número impactos de um soquete padronizado na amostra com umidades distintas. Normalmente, a norma americana ASTM D3080 (2011) é utilizada como base para esse ensaio.

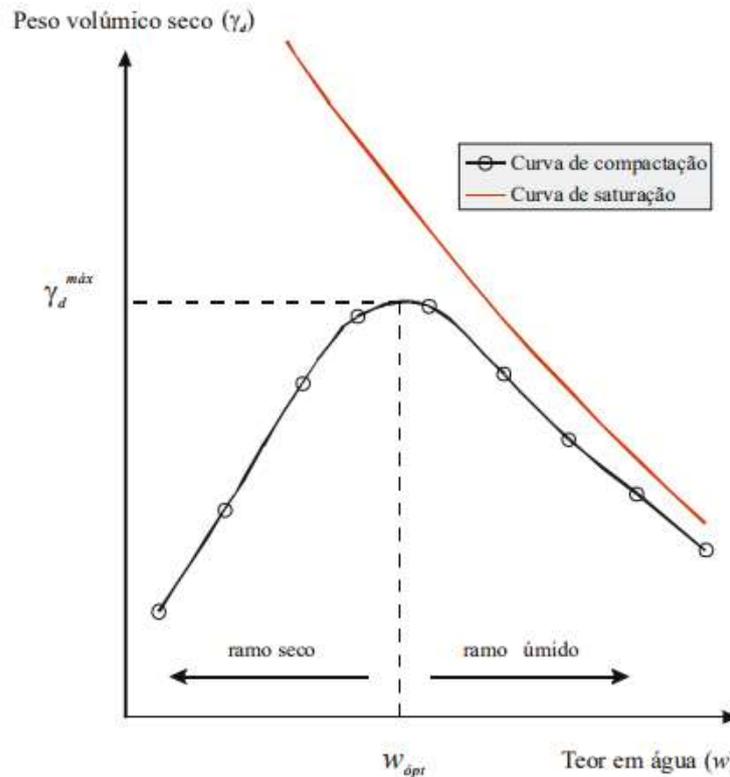


Figura 3.11 - Curva de compactação (Retirado de Jaime A. Santos. Compactação – Elementos Teóricos. IST – Instituto Superior Técnico).

Determinando-se o valor da umidade ótima, é possível avaliar qual seria o possível impacto causado pelo pisoteio animal, em condições de umidade elevada, durante épocas de chuvas intensas.

3.4.5 Análise de Estabilidade dos Terracetes

Por meio do software GeoSlope®, a estabilidade dos terracetes foi analisada pelo método do equilíbrio limite, que permite o balanço entre as forças ou momentos resistentes e atuantes. O método de resolução empregado foi o de Morgenstern-Price. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados na literatura especializada (Morgenstern & Price 1965).

Através das medidas do comprimento das bermas, dos taludes inter-bermas e do ângulo de inclinação dos taludes foi possível criar o perfil topográfico da seção.

Considerando que o pisoteio de uma vaca exerceria uma tensão vertical de 250 kPa sobre o terreno (Scholefield & Hall 1986), juntamente com os parâmetros de resistência obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, foi possível simular no software se haveria a possibilidade dos terracetes serem formados por escorregamentos.

Foram feitas simulações em quatro segmentos dos taludes da área de estudo e a tensão vertical exercida pelo pisoteio foi aplicada nas bermas, onde os animais geralmente caminham.

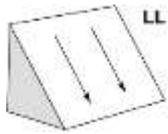
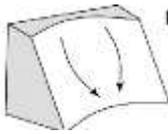
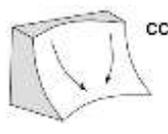
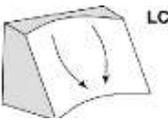
CAPÍTULO 4**RESULTADOS**

As vertentes estudadas foram introduzidas nos capítulos anteriores. Agora, os resultados das coletas de amostras e testes realizados serão apresentados para posterior discussão. Os dados coletados por Pinto (2015) serão mostrados quando necessário, e discutidos em conjunto com os dados obtidos pela autora deste trabalho.

4.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DOS TERRACETES

Características dos terracetes foram coletadas em campo, e estão relacionadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características morfológicas dos terracetes estudados.

Parâmetro	C. Lafaiete	Itaverava	Ouro Preto	Acaiaca	E. Rios de Minas
Largura média das bermas (cm)	61,4	53,6	-	-	-
Amplitude média das bermas (cm)	74	82	-	-	-
Largura média dos taludes entre bermas (cm)	144	125,4	-	-	-
Inclinação média dos taludes entre bermas (°)	31,73 °	40,28 °	47,30 °	34,60 °	40,37 °
Forma da encosta	LL 	LC 	CC 	LC 	LC 
Padrão dos terracetes	Linear	Anastomosado	-	Linear	Anastomosado

4.2 ENSAIO COM O TRAÇADOR AZUL BRILHANTE

Nesse ensaio, a existência de planos preferenciais basais que condicionariam um possível rastejo foi avaliada, assim como o efeito da compactação do casco do gado no solo (Figura 4.1 e Figura 4.2).



Figura 4.1 - Perfil da trincheira, com a infiltração do traçador delimitada pela linha negra. Comprimento da fita na parede da trincheira: 35cm. Notar que na berma o traçador infiltrou menos. Conselheiro Lafaiete (Arquivo pessoal).

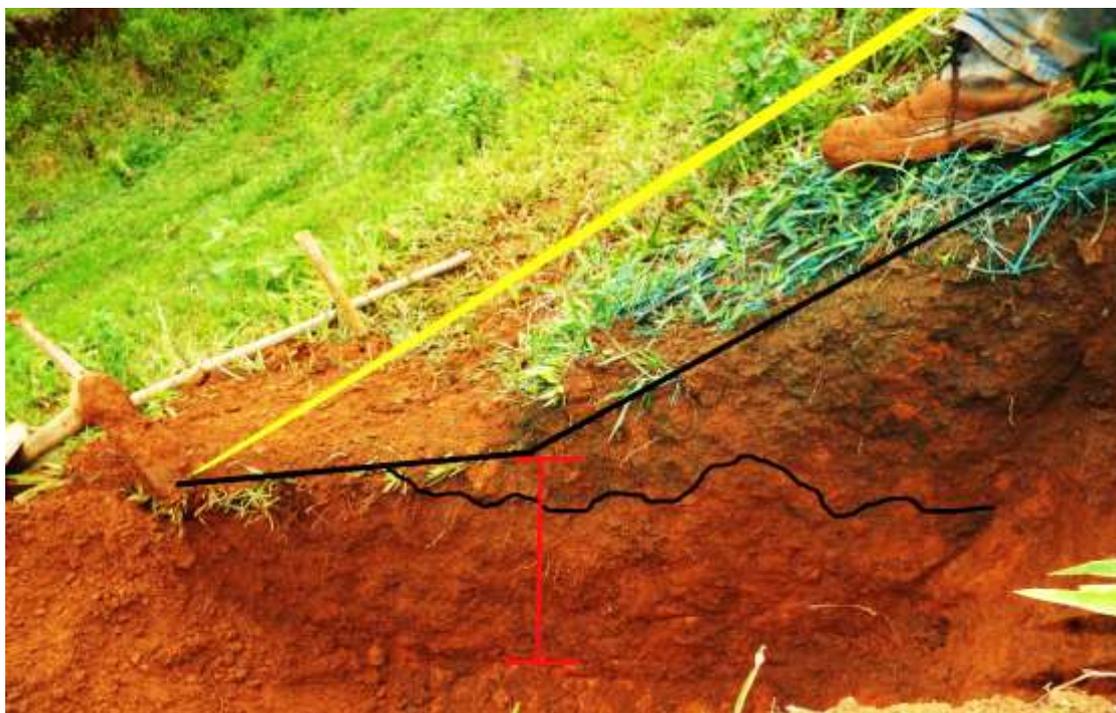


Figura 4.2 - Perfil da trincheira, com a infiltração do traçador delimitada pela linha negra. Comprimento do traço vermelho na parede da trincheira: 30cm. Notar que na berma a infiltração é quase imperceptível. Itaverava (Arquivo pessoal).

A redução da cobertura de gramíneas nas trilhas (Figura 4.3) também é um fator fundamental para a comprovação do efeito da compactação gerada pelos animais, visto que o crescimento das plantas é prejudicado se a exposição do solo à presença animal é contínua (Marchão *et al.* 2007).



Figura 4.3 - Rarefação de gramíneas nas trilhas geradas pelo andar do gado. Conselheiro Lafaiete (Arquivo pessoal).

4.3 ENSAIOS DE PENETROMETRIA

Os ensaios de penetrometria mostraram que a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em geral é maior até cerca de 5-10 cm de profundidade (Figura 4.4). Nota-se também que até essa profundidade, a resistência tende a ser ligeiramente maior nas bermas.

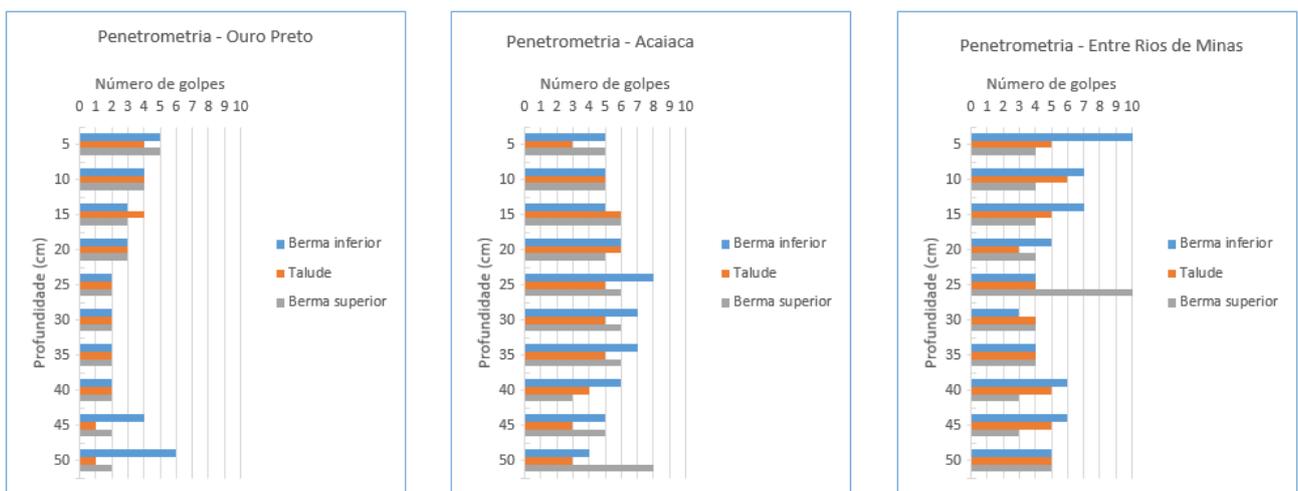


Figura 4.4 - Ensaio de penetrometria realizados nas áreas de Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas. Pinto (2015)

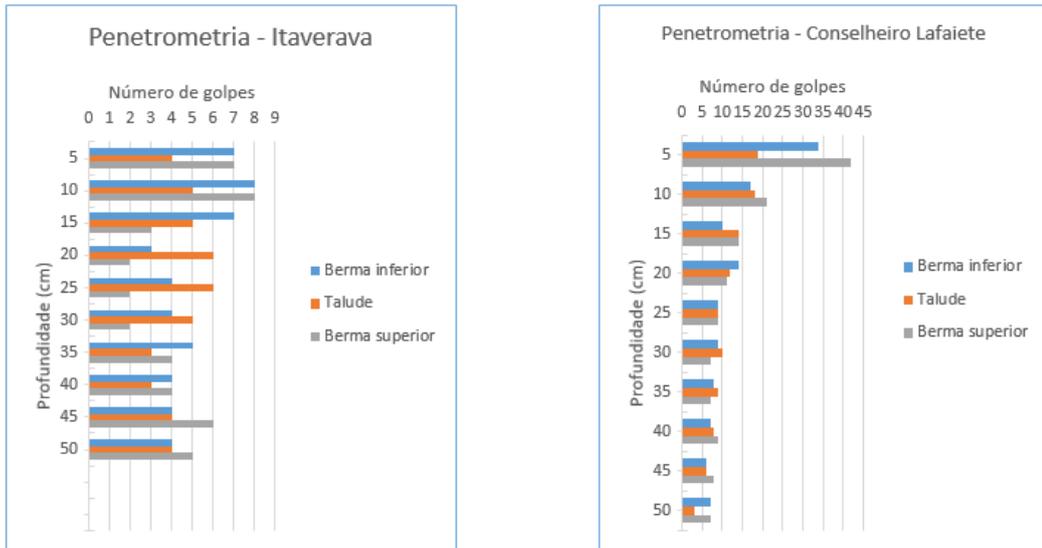


Figura 4.5 - Ensaios de penetrometria realizados nas áreas de Itaverava e Conselheiro Lafaiete.

4.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Por meio da análise granulométrica dos solos foi possível determinar a percentagem das partes constituintes do solo.

Os limites de consistência são utilizados na classificação SUCS dos solos (Figura 4.5) e para determinar o Índice de Plasticidade ($IP = LL - LP$). Quanto maior for o IP, mais compressível é o solo. Para a classificação, utilizou-se o gráfico de plasticidade de Casagrande.

CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS - SUCS

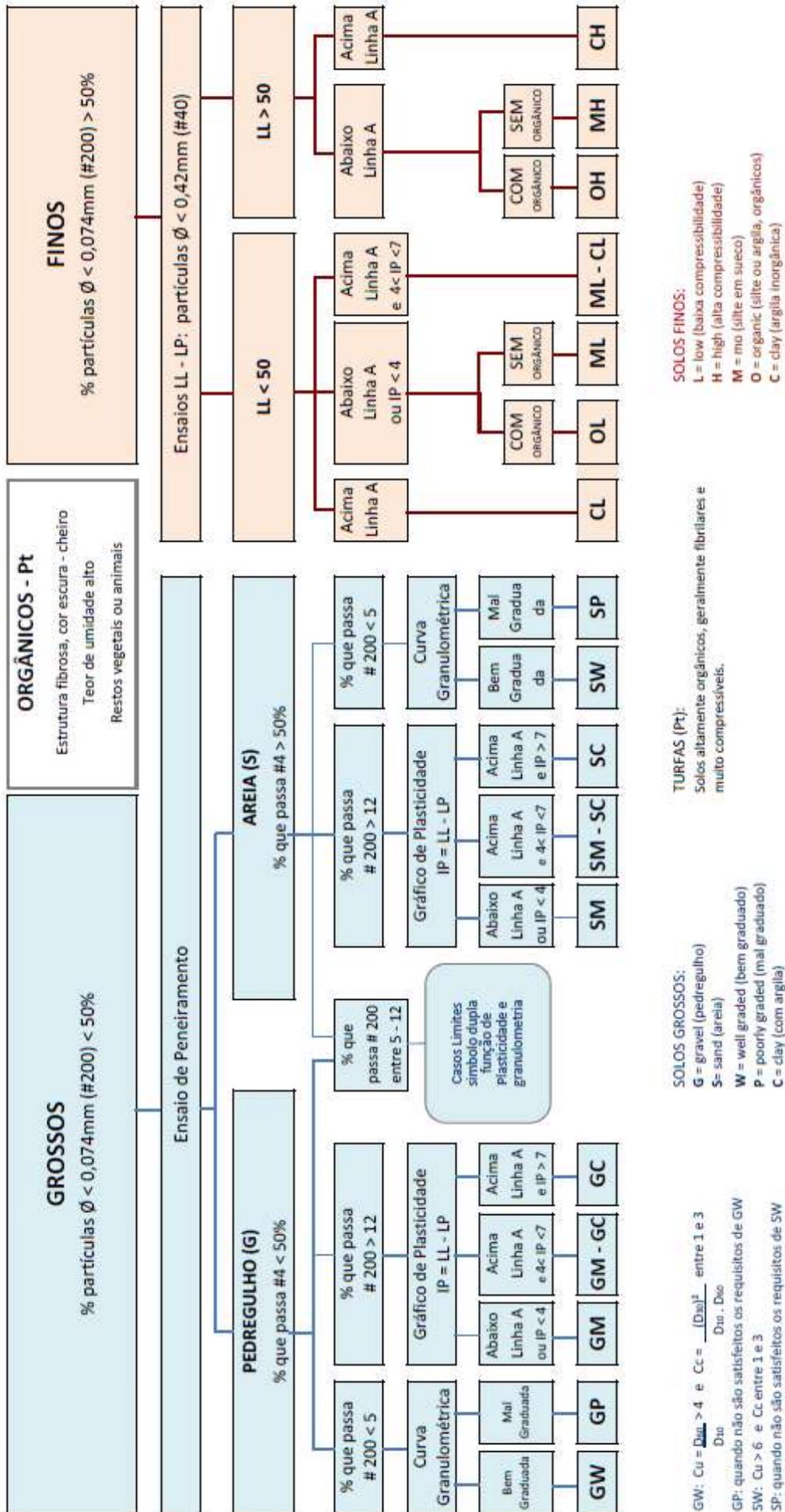


Figura 4.6 - Classificação SUCS (Elaborada pelo Laboratório de Geotecnia e Pavimentação - UDESC).

4.4.1 Itaverava

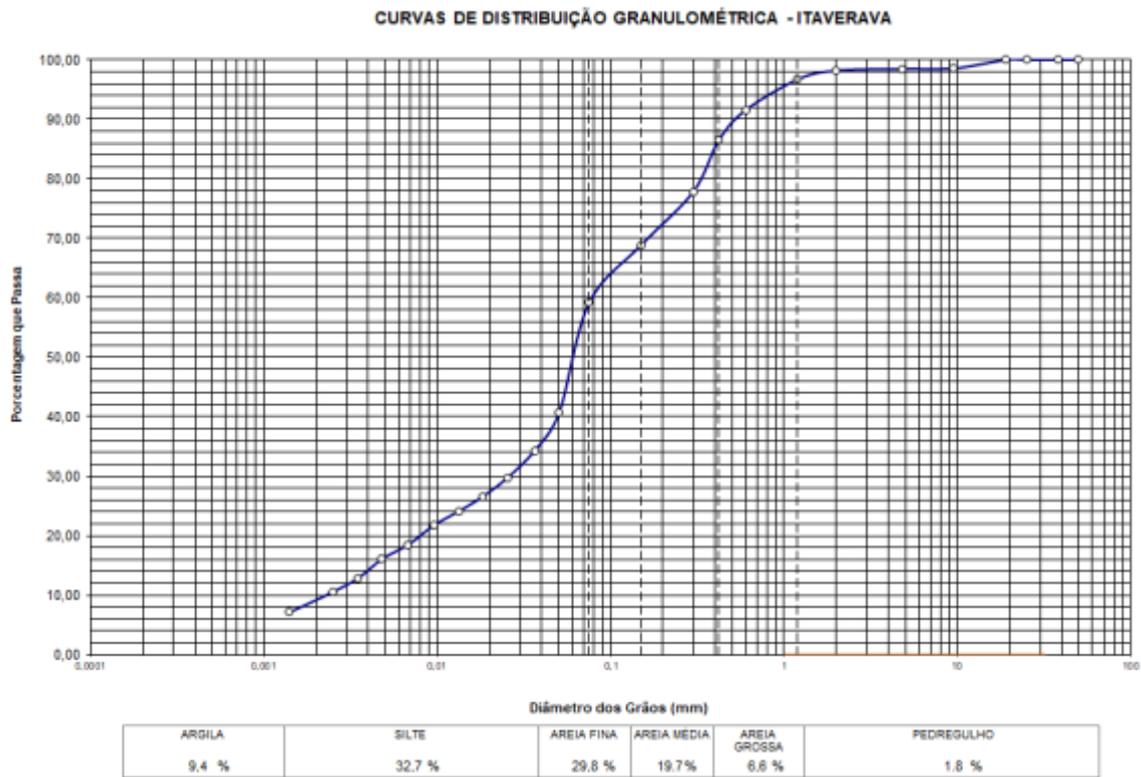


Figura 4.7 - Curva de distribuição granulométrica do solo do talude de Itaverava.

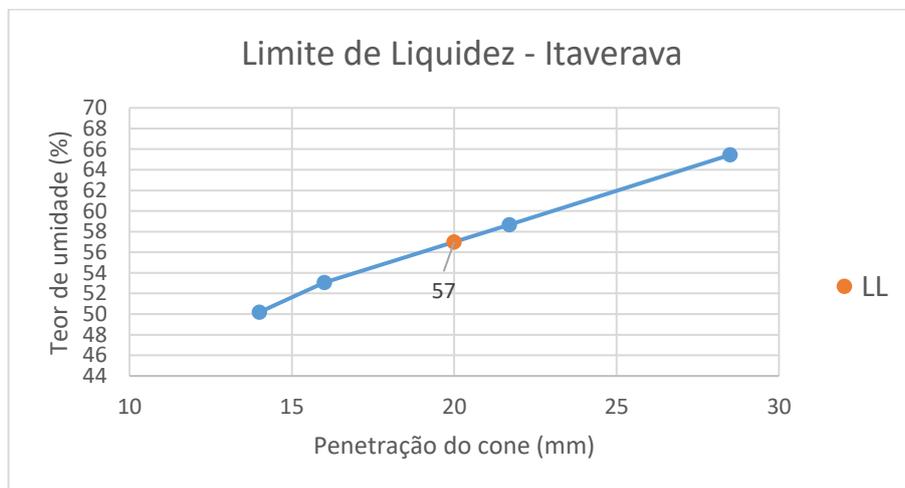


Figura 4.8 - Limite de Liquidez do solo de Itaverava, método cone britânico (BS 1377: parte 2, 1990).

O Limite de Liquidez encontrado foi 57%, enquanto o de Plasticidade foi 35,38%. Sendo assim o índice de plasticidade é de 21,62. Pela classificação SUCS, o solo é um MH – silte de alta compressibilidade.

4.4.2 Conselheiro Lafaiete

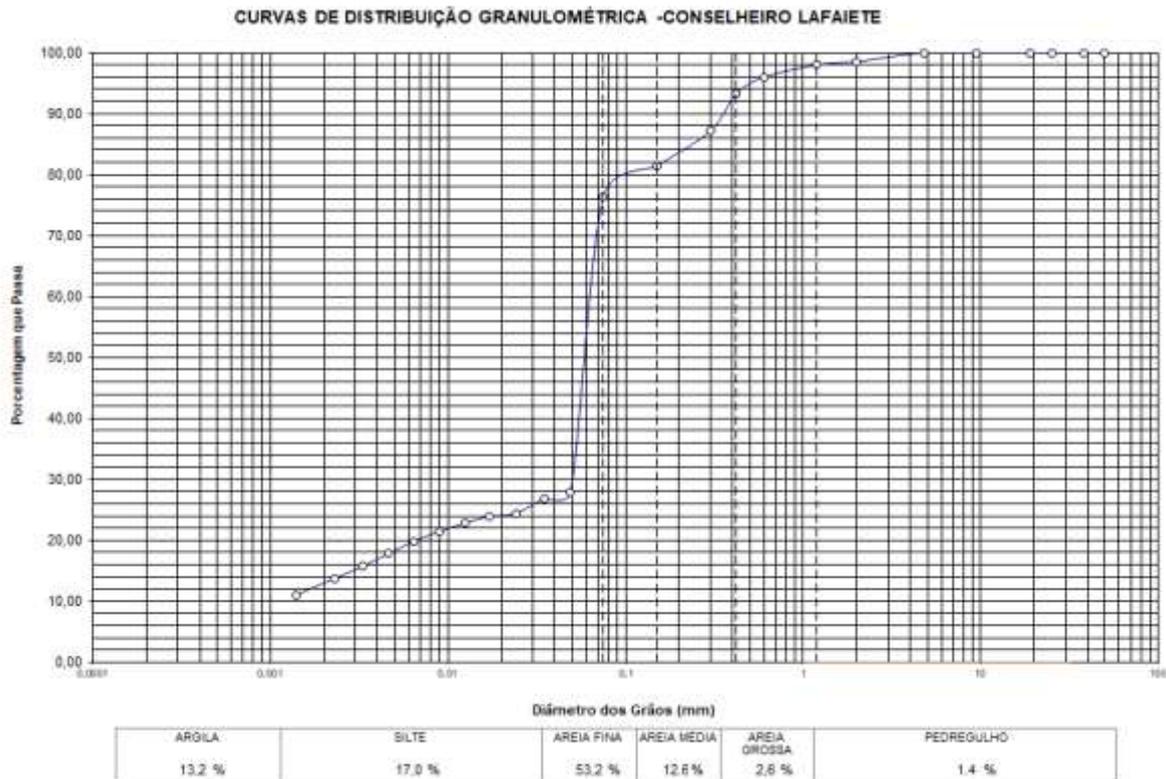


Figura 4.9 - Curva de distribuição granulométrica do solo de Conselheiro Lafaiete.

No solo de Conselheiro Lafaiete houve uma discrepância nos resultados. A conexão entre a sedimentação fina e o peneiramento se mostrou inadequada.

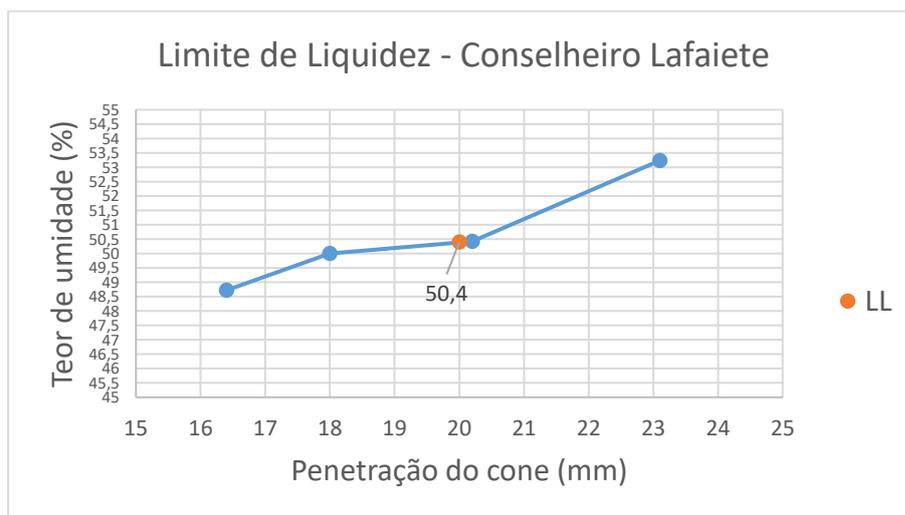


Figura 4.10 - Limite de liquidez, método do cone britânico.

O Limite de Liquidez encontrado foi 50,4% enquanto de Plasticidade foi 26,5%. Sendo assim, o índice de plasticidade é de 23,9%. Pela classificação SUCS, o solo é um CH – argila inorgânica de alta compressibilidade.

4.4.3 Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas

Tabela 4.2 - Resultados da granulometria e limites de consistência das áreas de Ouro Preto, Acaiaca e Entre Rios de Minas.

Proporção granulométrica (%)	Ouro Preto	Acaiaca	Entre Rios de Minas
Argila ($D > 0,002\text{mm}$)	17	13	20
Silte ($0,002\text{mm} < D < 0,06\text{mm}$)	23	30	31
Areia fina ($0,06\text{mm} < D < 0,2\text{mm}$)	16	23	23
Areia média ($0,2\text{mm} < D < 0,6\text{mm}$)	32	29	18
Areia grossa ($0,6\text{ mm} < D < 2\text{mm}$)	10	4	8
Pedregulho ($D > 2\text{mm}$)	2	1	0
Limites de Consistência (%)	Ouro Preto	Acaiaca	Entre Rios de Minas
Limite de liquidez	32,3	29,4	45
Limite de plasticidade	18,8	19,5	32
Índice de plasticidade	13,70	9,90	13
Classificação SUCS	ML – silte de baixa compressibilidade	CL – argila inorgânica de baixa compressibilidade	CL – argila inorgânica de baixa compressibilidade

4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO SATURADO E NÃO-SATURADO

Os ensaios de cisalhamento direto não-saturado (umidade de campo) e saturado (ambos adensados e não-drenados, CU) foram realizados apenas na amostra de solo indeformada coletada em Conselheiro Lafaiete (Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17).



Figura 4.11 - Gráfico da resistência ao cisalhamento do solo, submetido a uma tensão normal de 12kPa.



Figura 4.12 - Gráfico da resistência ao cisalhamento do solo, submetido a uma tensão normal de 20,15kPa.

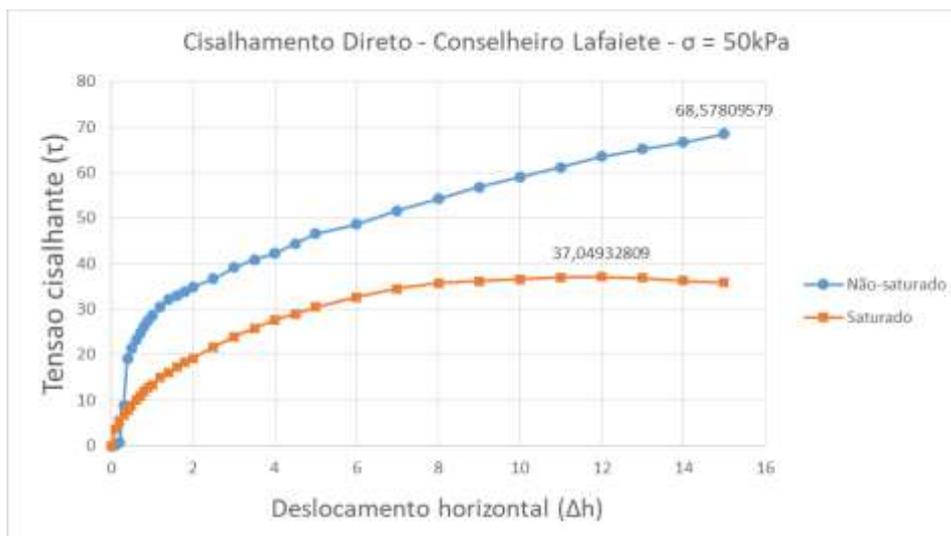


Figura 4.13 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo, submetido a uma tensão normal de 50kPa.

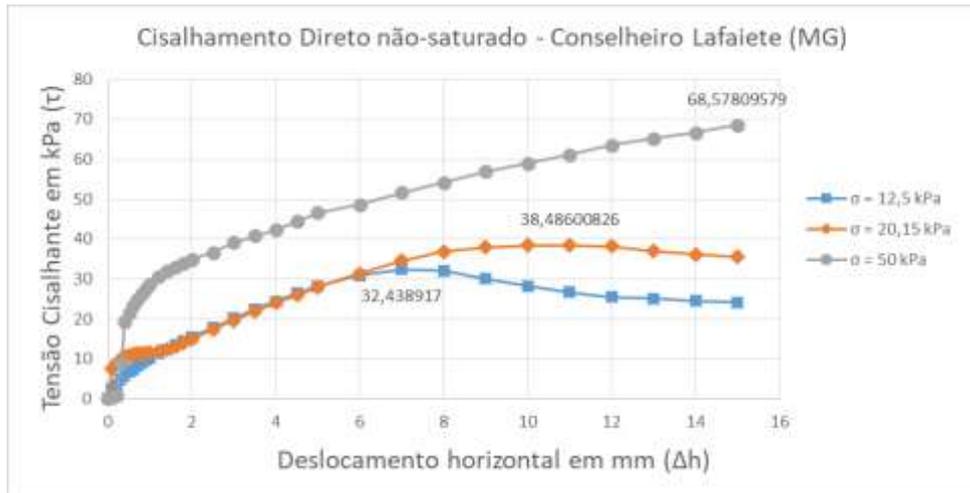


Figura 4.14 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo não-saturado sob influência de diferentes valores de tensão normal.

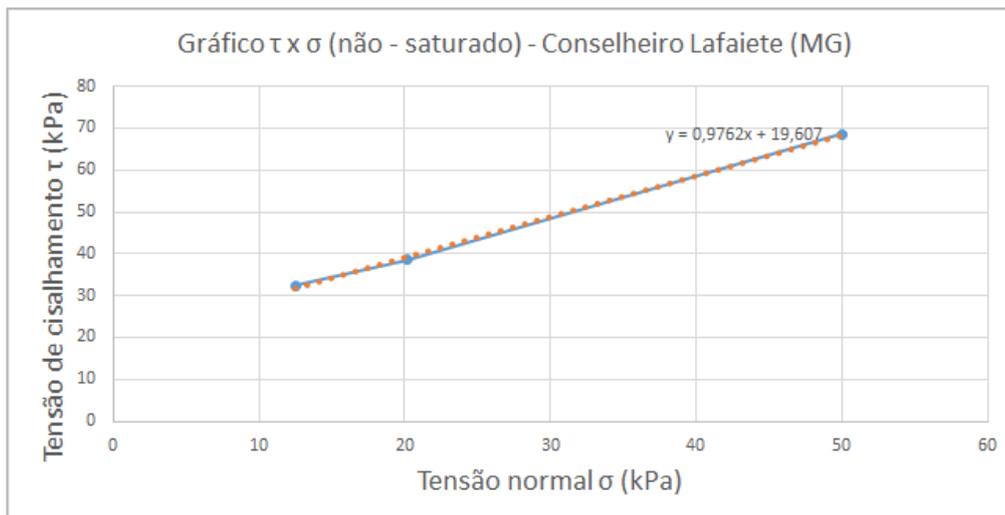


Figura 4.15 - Gráfica tensão cisalhante x tensão normal.

A resistência ao cisalhamento do solo não saturado aumenta com o aumento da tensão normal aplicada, como esperado. No entanto, esses valores são menores se comparados aos obtidos nos ensaios com solo saturado.

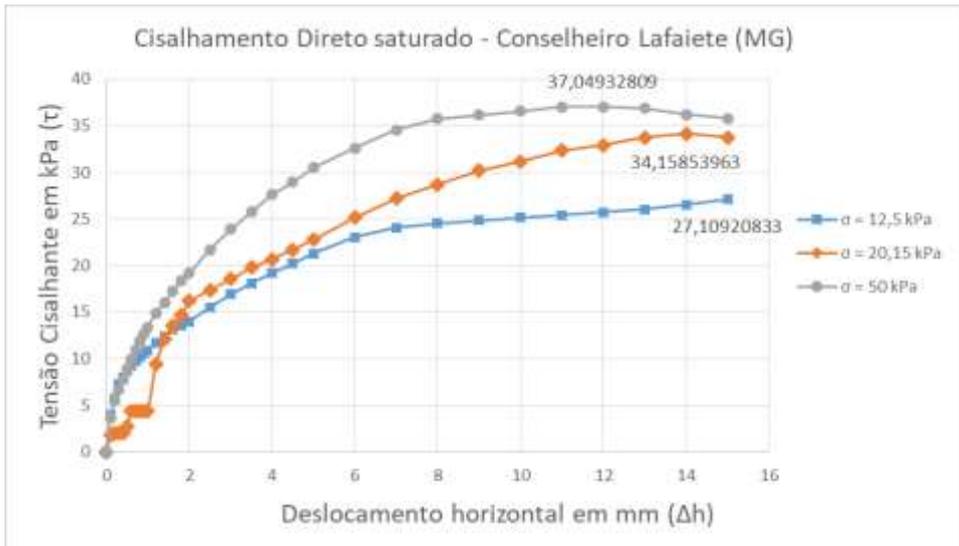


Figura 4.16 - Gráfico da resistência ao cisalhamento de um solo saturado sob influência de diferentes valores de tensão normal.

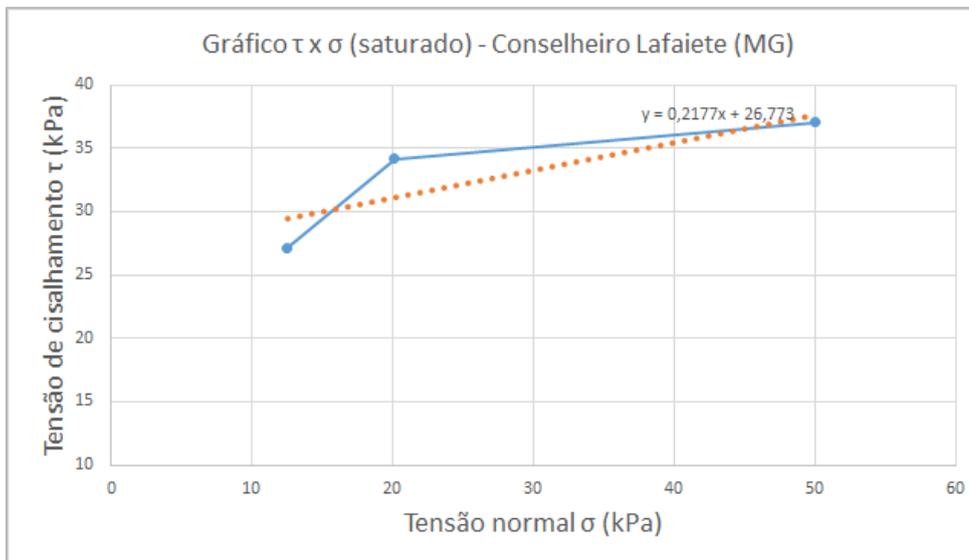


Figura 4.17 - Gráfico tensão cisalhante x tensão normal.

Houve queda de resistência dos ensaios não-saturados para os saturados. Isso influenciou diretamente no valor do ângulo de atrito do solo (

Tabela 4.3). Quanto menor ele for, mais suscetível a rupturas o solo estará. Portanto, a presença de água no sistema influencia diretamente nas propriedades físicas do solo.

Tabela 4.3 - Parâmetros de resistência do solo.

	Ângulo de atrito (ϕ)	Coesão (c)
Solo não-saturado	44,3°	20,2 kPa
Solo saturado	12,3 °	24,4 kPa
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,685	

4.6 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Nos gráficos nota-se que a compactação máxima foi de 1,5 a 2,1 g/cm³, ou seja, de cerca de 10 a 15% (Figura 4.18, Figura 4.19). Pelo ensaio de penetração percebe-se que a compactação do solo foi superficial.



Figura 4.18 - Ensaio de compactação - Conselheiro Lafaiete.



Figura 4.19 - Ensaio de compactação - Itaverava.

4.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Através das medidas do comprimento das bermas, dos taludes inter-bermas e do ângulo de inclinação dos taludes foi possível criar o perfil topográfico da seção. A partir dos parâmetros de resistência dos solos foi possível analisar a estabilidade a escorregamentos dos terracetes estudados em Conselheiro Lafaiete utilizando o software GeoSlope® (Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23), como descrito no item 3.4.5 desse trabalho.

A carga vertical aplicada pelo pisoteio do gado considerada na simulação rodada pelo GeoSlope foi de 250 kPa, seguindo recomendações da literatura (Scholefield e Hall 1986). Os parâmetros utilizados foram os obtidos por meio do ensaio de cisalhamento não-saturado (umidade de campo). As áreas em verde indicam a superfície de ruptura circular com o menor Fator de Segurança, e que conseqüentemente estaria sujeita a um possível deslizamento. O fator de segurança F_s de um talude (evidenciado pelo ponto vermelho nas imagens) é considerado crítico se menor que 1 ($F_s < 1$).

Foram feitos dois tipos de simulações para o solo não-saturado (umidade de campo): uma considerando a carga vertical distribuída ao longo da bermas, e outro com a carga pontual. As simulações para as condições do solo saturado (Figura 4.24) não seriam condizentes com a realidade, visto que é improvável que o solo se sature por completo. Como as encostas são íngremes e o solo relativamente espesso, a superfície freática é profunda e não influencia na estabilidade. No entanto, a água pode se acumular nas bermas dos taludes e saturar localmente.

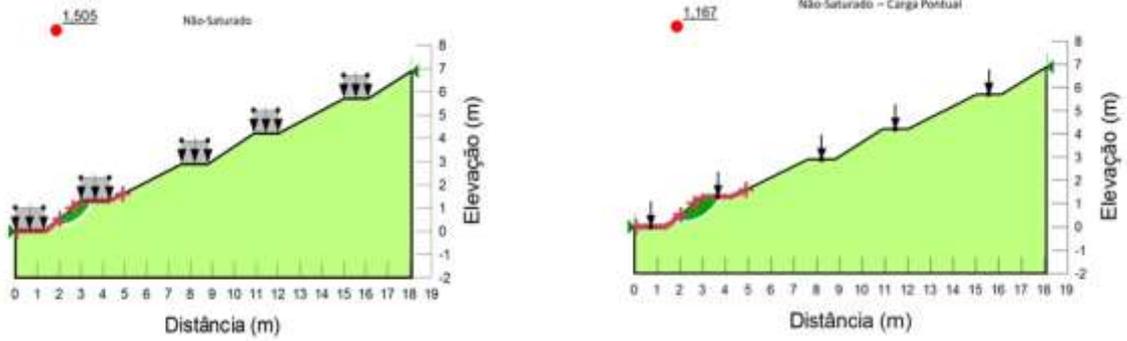


Figura 4.20 - Análise de estabilidade do terracete inferior. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.

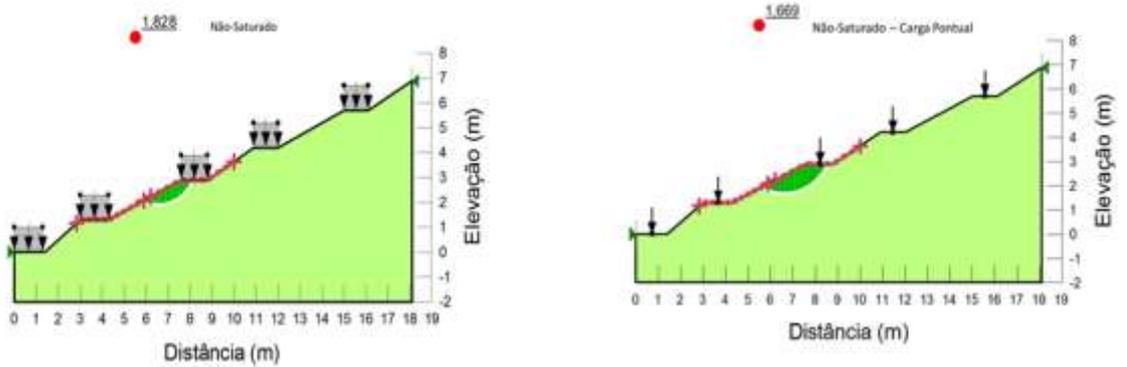


Figura 4.21 - Análise de estabilidade dos terracetes medianos. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.

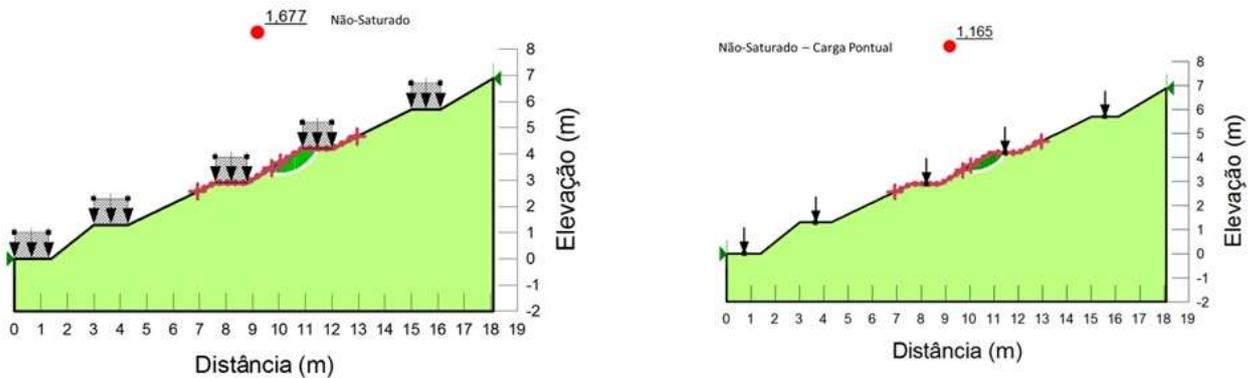


Figura 4.22 - Análise de estabilidade dos terracetes superiores. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da berma. Direita: carga pontual.

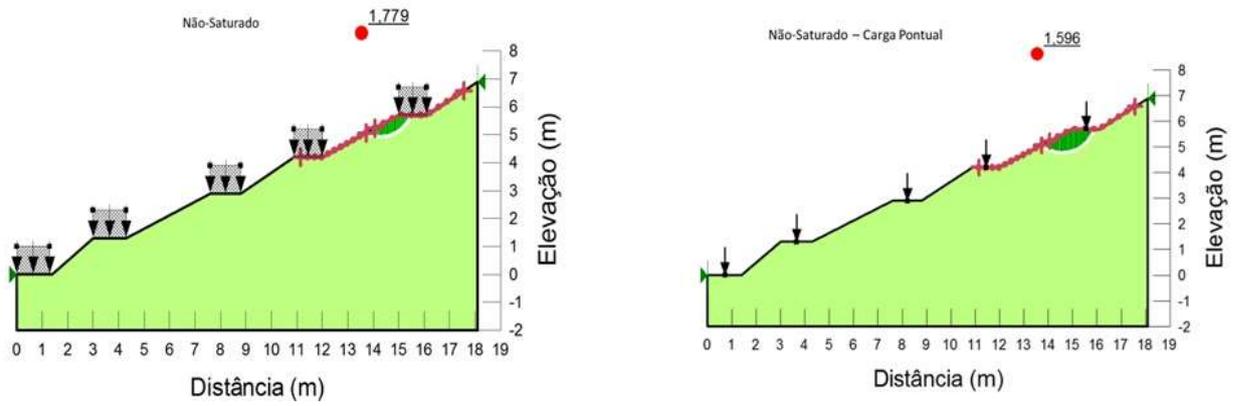


Figura 4.23 - Análise de estabilidade dos terracete superior. Esquerda: carga distribuída ao longo da largura da bermã. Direita: carga pontual.



Figura 4.24 - Análise de estabilidade do terracete inferior (condição saturada); carga distribuída ao longo da largura da bermã.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pela classificação SUCS, os solos estudados são ML – silte de baixa compressibilidade (Ouro Preto), CL – argila inorgânica de baixa compressibilidade (Acaiaca e Entre Rios de Minas), MH – silte de alta compressibilidade (Itaverava) e CH – argila inorgânica de alta compressibilidade (Conselheiro Lafaiete).

Na análise penetrométrica, os dados obtidos nas diferentes áreas são similares, mostrando que a resistência maior à penetração nos solos estudados se limita entre o intervalo de 5 a 20 cm. Após essa profundidade, a resistência do solo à penetração oscila, mas nunca ultrapassando os valores iniciais. Pelos resultados de penetrometria apresentados, observou-se que as áreas de terracetes mais compactadas foram as de Entre Rios de Minas, coincidindo com a maior notabilidade dos terracetes. O proprietário dessa área relatou a necessidade de utilizar as áreas em taxa máxima de lotação animal, o que favorece a compactação do solo. Se comparado ao solo de Itaverava, o solo de Conselheiro Lafaiete se mostrou mais resistente à penetração nas primeiras camadas. O percentual de argila nesse solo é maior, o que reflete diretamente na coesão.

Em todos os casos, os ensaios de penetrometria mostraram que a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) é maior nas bermas que nos taludes. A compactação gerada pelo pisoteio animal é a causa dessa diferença, que é perceptível até cerca de 10 a 20 cm de profundidade nos ensaios com penetrômetro. O percentual máximo de compactação encontrado nas áreas analisadas é similar, sendo valores entre 10% e 22%. Portanto, constatou-se que compactação por si só não explica os terracetes, sendo apenas um fator adicional.

Nas análises em campo com o traçador nas duas áreas estudadas, não foi possível aferir a presença de planos preferenciais de movimentos de massa. O fluxo da água seguiu a morfologia estrutural do solo, não obedecendo nenhuma direção preferencial, o que se esperaria, caso ocorresse um grande plano de ruptura basal, como advogam alguns autores (Sharpe 1938, Bielecki & Mueller 2002). Nas bermas onde o rebanho caminha, a solução infiltrou menos que nos taludes inter bermas, efeito da compactação superficial dos solos gerada pelo pisoteio.

A queda da resistência ao cisalhamento do solo saturado indica que em períodos chuvosos, o solo estaria mais suscetível a rupturas. Nas simulações em umidade de campo, nenhum FS foi menor que 1, no entanto onde a carga foi aplicada pontualmente, percebe-se que os FS encontrados são menores se comparados com as simulações onde a carga foi distribuída, porém ainda com pouco risco de ruptura.

Em geral, a análise de estabilidade mostrou que o solo é suscetível a movimentos de massa quando está mais úmido e quando se considera a carga do pisoteio mais concentrada. Na simulação com o talude saturado, o FS encontrado é menor que 1. Contudo, embora escorregamentos sejam possíveis, estes não foram identificados em campo nem na observação direta nas trincheiras, ou com o emprego de traçador colorimétrico. Portanto, não

se pode descartar os movimentos de massa, mas estes devem ser localizados e de pequenas dimensões, se configurando talvez em um processo auxiliar no desenvolvimento dos terracetes.

Por fim, no campo observou-se que o gado, ao caminhar pelas bermas dos terracetes, desencadeia uma série de processos erosivos, tais como:

- ✓ O pisoteio do gado elimina a vegetação nas bermas, compacta superficialmente o solo (até 15% de redução de volume, até no máximo 20 cm de profundidade). A compactação favorece a erosão hídrica do solo;
- ✓ Deformação plástica do solo quando a umidade se encontra acima do limite de liquidez nos trechos com água acumulada;
- ✓ Destaque de fragmentos do solo pelo impacto dos cascos do gado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Esta monografia teve como principal objetivo determinar os fatores condicionantes da formação dos terracetes em áreas compreendidas na região Sudeste de Minas Gerais. Com o auxílio da bibliografia existente sobre o assunto, e por meio de incursões e testes em campo, análises laboratoriais de solo e simulações computacionais, foi possível chegar às seguintes conclusões para os casos analisados:

- ✓ Não há evidências de rastejo nas áreas estudadas. O uso do traçador não evidenciou planos preferenciais, e muitos terracetes observados possuíam padrão anastomosado, o que não poderia ter sido causado por movimentos de massa;
- ✓ As análises de estabilidade no programa GeoSlope mostraram que os micro-taludes analisados são instáveis apenas em condições de solo mais saturado. Contudo, como não foram encontrados em campo planos de ruptura, estes movimentos de massa devem ser localizados e de pequenas dimensões, constituindo apenas como um processo auxiliar no desenvolvimento dos terracetes;
- ✓ O tipo de solo, a forma e a declividade das encostas interferem na formação de terracetes;
- ✓ Acredita-se que nas áreas com maior declive, predomine o padrão anastomosado. No entanto, não é possível fazer tal afirmação tendo-se analisado somente dois perfis.
- ✓ Nas áreas estudadas, a presença de rebanhos foi a causa da formação de terracetes. Ao caminhar pelos terracetes, o gado provoca compactação do solo, deformação plástica e erosão hídrica e por impacto dos cascos. Nenhum processo geológico pôde ser relacionado a tais feições;
- ✓ Estudos detalhados em perfis de solos mais superficiais, com um número maior e mais representativo de unidades amostrais seria necessário para a confirmação dos resultados apresentados neste trabalho. O acompanhamento do desenvolvimento de terracetes em áreas com presença de rebanhos pode futuramente ajudar a entender melhor o papel do gado na formação dos terracetes e das erosões e movimentos de massa desencadeados no processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1984. *NBR-7180 - Determinação do Limite de Plasticidade de Solos*.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1984. *NBR-7181- Solos – Análise Granulométrica*.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1986. *NBR-9604 - Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*.
- AGEITEC (Agência Embrapa de Informação Tecnológica). <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>.
- Almeida F.F.M., Neves B.B.B., Carneiro C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American platform. *Earth Science Review*, **50**: 77-111.
- Alvim Bárbara et al. 2012. *Análise da hierarquia urbana da microrregião de Conselheiro Lafaiete/MG*. <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/>>.
- ASTM International. 2011. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM D3080 / D3080M-11*.
- Aten L.E., Bollich C.N. 1981. Archeological evidence for pimple (prairie) mound genesis. *Science*, **213**: 1375–1376.
- Barbosa N. S. 2015. *Evolução Paleoproterozóica do Cinturão Mineiro: Geocronologia U-Pb, Isótopos de Nd-Hf-Sr e Geoquímica de Rochas Plutônicas*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 229p.
- Benedict J.B. 1976. Frost creep and gelifluction features: a review. *Quaternary Research*, **6**: 55–76.
- Bielecki A.E. 1998. *Structural and geomorphic analysis of enigmatic terraced hillslopes formed on active folds in the southern San Joaquin Valley using high resolution laser altimetry*. Dissertação de Mestrado. Department of Geological Sciences, University of Colorado. Boulder, 175 pp.
- Bielecki A.E., Mueller K.J. 2002. Origin of terraced hillslopes on active folds in the southern San Joaquin Valley, California. *Geomorphology*, **42**: 131-152
- BS (British Standard). 1990. *BS 1377-2 - Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification tests*.
- Buckhouse J. C., Krueger W. C. 1981. What caused those terraces? *Rangelands*, **3**: 72–73.
- Carson M.A., Kirkby M.J. 1972. Hillslope Form and Process. In: *Cambridge University Press*, Cambridge, p. 172–300.
- Carvalho E. T. 2006. Apresentação em Gestão Ambiental de Áreas de Risco. In: *Singeo*. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Clayton K.M. 1966. The origin of the landforms of the Malham area. *Field Studies*, **2**: 359–384.
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil). 2014. *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico)*. Nota técnica explicativa, Brasília, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
- Daubenmire R. 1968. *Plant communities*. New York, Harper and Row Publishers, 300p.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2002. *As principais espécies de Brachiaria utilizadas no país*. Comunicado Técnico, Juiz de Fora, Embrapa Gado de Leite

Oliveira E. C. V. 2018. Gênese e Condicionantes Geológicos na Formação de Terracetes

- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 2011. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Rio de Janeiro, EMBRAPA Solos.
- Evans R. 1998. The erosional impacts of grazing animals. *Physical Geography*, **22**(2): 251- 268.
- FAO (Food and Agriculture Organization). *Status of the World's Soil Resources: Main Report*. <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>>.
- Flury M., Flühler H. 1994. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies – A toxicological overview, *Journal of Environmental Quality*, **23**: 1108–1112.
- Flury M., Wai N.N. 2003. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. *Reviews of Geophysics*, **41**(1):1-37.
- Giroldo L. 2013. *Terracetes de pisoteio de gado e mudanças morfo-pedológicas em vertente amostral na bacia hidrográfica do rio Jacarei, Serra da Mantiqueira, SP*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 124p.
- Grossi Sad J.H., Pinto C.P., Duarte C.L. 1983. Geologia do Distrito Manganesífero de Conselheiro Lafaiete, MG. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, *Anais* **3**:259-270.
- Guild P.W. 1957. *Geology and Mineral Resources of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil*. USGS Professional Paper, 90p.
- Heineck C.A., Silva L.C., Leite C.A. 2003. *Mapa Geológico de Minas Gerais, escala 1: 1 000 000*. Belo Horizonte, Companhia Mineradora de Minas Gerais.
- Henck et al. 2010. Anthropogenic hillslope terraces and swidden agriculture in Jiuzhaigou National Park, northern Sichuan, China. *Quaternary Research*, **73**(2):201-207
- Howard J.K., Higgins C.G. 1987. Dimensions of grazing-step terracettes and their significance. In: 1st Int. Conf. Geomorphology. Wiley, p. 545– 568.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2001. *Malha Municipal Digital do Brasil de 2001*. Rio de Janeiro. <<http://www.ibge.gov.br>>.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2006. *Censo Agropecuário – Conselheiro Lafaiete (MG)*. <<http://www.ibge.gov.br>>.
- INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). <www.inmet.gov.br>.
- Kerney M.P., Brown E.H., Chandler T.J. 1964. Late-glacial and Post-glacial history of the Chalk escarpment near Brook, Kent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **745**: 135-204.
- Marchão R.L., Balbino L.C., Silva E. M., Santos Junior J.D.C., Sá M.A.C., Vilela L., Becquer T. 2007. *Qualidade física de um latossolo vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado*. Relatório Técnico, Pesquisa Agropecuária de integração lavoura-pecuária no Cerrado, v.42, p. 873-882.
- Martins L.A. 2008. *Aspectos de campo, petrográficos, química mineral, litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm/Nd de tonalitos paleoproterozóicos da porção setentrional da Suíte Alto Maranhão, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 250p.
- Morais Fernando. 2007. *Estudo dos fatores pedogeomorfológicos intervenientes na infiltração em zonas de recarga no complexo metamórfico Baçã-MG*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, 164p.
- Morgenstern N.R., Price V.E. 1965. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, **15**:79-93.
- Mueller K.J., Suppe J., 1997. Growth of Wheeler Ridge anticline, California: geomorphic evidence for fault-bend folding behavior during earthquakes. *J. Struct. Geology*, **19**:383– 396.

- Noce C.M., Tassinari C.C.G., Lobato L.M. 2007. Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archean greenstone belts. *Ore Geology Review*, **32**:500–510.
- Odum H. 1922. Faatestietnes" N atur. Dansk. *Geol. Foren. Medd.*, **6**:1-29.
- Pewe T.L. 1983. The Periglacial Environment in North America During Wisconsin Time. *University of Minnesota Press*, Minneapolis, p. 157–189.
- Pinto, A. G. 2015. *Análise dos Fatores Condicionantes da Gênese dos Terracetes*. Relatório interno. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Não publicado
- Pires F. R. M. 1977. *Geologia do distrito Manganêsífero de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 344p.
- Rahm D. A., 1962. The terracette problem, *Northwest Scientific*, **36**:65–80.
- Ruhe R. V. 1975. *Geomorphology – Geomorphic processes and surficial geology*. Indiana, Indiana University, 246p.
- Scholefield D., Hall D.M. 1986. A recording penetrometer to measure the strength of soil in relation to the stresses exerted by a walking cow. *Journal of Soil Science*, **37**:165-176.
- Seixas L.A.R. 1988. *Geologia e Metalotectos de Ouro de uma Fração do Lineamento Congonhas, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 119p.
- Sharpe C.F.S.. 1938. *Landslides and Related Phenomena—A Study of Mass Movement of Soil Rock*. New York, Columbia University Press, pp. 70–74.
- Stoddart L.A, Smith A. D., Box T. 1975. *Range Management*. Third Edition, New York, McGraw-Hill Book Company, 532p.
- Teerawattanasuk, Chairat, Maneecharoen, Jindarat, Bergado, D.T, Voottipruex, P, Lam, L. 2014. Root strength measurements of Vetiver and Ruzi grasses. *Lowland Technology International*. **16**:71-80.
- Teixeira T.M. B. 2017. *Análise da influência das raízes de vetiver nos parâmetros de resistência dos solos com a profundidade*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 219p.
- Teixeira W, Ávila C.A. 2007. Evolução Geodinâmica do Cinturão Mineiro: Revisão do Conhecimento Após Duas Décadas de estudos. In: X Simpósio de Geologia do Sudeste, Diamantina. In: Livro de Resumos. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia, 84p.
- Teixeira W. 1985. *A evolução Geotectônica da Porção Meridional do Cráton São Francisco, com base em Interpretações Geocronológicas*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 207p.
- Teixeira W., Sabaté P., Barbosa J., Noce C.M., Carneiro M.A. 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: Tectonic Evolution of South America. Instituto de Geociências, **21**:101-137.
- Trimble S. W., Mendel A. C. 1995. The cow as a geomorphic agent: a critical review. *Geomorphology*, **13**:233 – 253.
- Young A. 1972. Slopes. *New Zeland Geographer*, **31**:88-89.
- Young A., Saunders I. 1986. Rates of surface processes and denudation. In: Abrahams, A.D. *Hillslope Processes*. Allen & Unwin Publishing, Boston, p. 3 – 10.

DECLARAÇÃO

Declaro que Eloá Carolina Vilela de Oliveira fez as modificações acordadas com a banca de TCC e que estou de acordo com a versão final de seu trabalho.

Ouro Preto, 12 de dezembro de 2018.



Prof. Luis de Almeida Prado Bacellar
Orientador e presidente da banca
UFOP/EM/DEGEO