

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA,
UTILIZANDO UM EQUIPAMENTO REDUZIDO, EM
AMOSTRAS DE UM SOLO TÍPICO DA CIDADE DE MANAUS**

EVAILTON ARANTES DE OLIVEIRA

MANAUS
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EVAILTON ARANTES DE OLIVEIRA

**ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA,
UTILIZANDO UM EQUIPAMENTO REDUZIDO, EM
AMOSTRAS DE UM SOLO TÍPICO DA CIDADE DE MANAUS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da
Universidade Federal do
Amazonas, como requisito
parcial para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil

ORIENTADOR: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS
2014

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

O48e Oliveira, Evalton Arantes de
Ensaio de arrancamento de geogrelha, utilizando um equipamento reduzido, em amostras de um solo típico da cidade de Manaus / Evalton Arantes de Oliveira. 2014
222 f.: il. color; 29 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Talude reforçado. 2. geogrelha. 3. ensaio de arrancamento. 4. cidade de Manaus. I. Campelo, Nilton de Souza II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

EVAILTON ARANTES DE OLIVEIRA

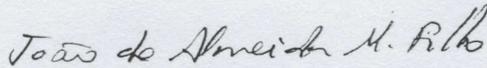
ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA, UTILIZANDO UM
EQUIPAMENTO REDUZIDO, EM AMOSTRAS DE UM SOLO TÍPICO DA
CIDADE DE MANAUS

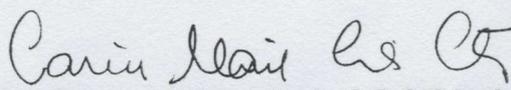
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da Universidade
Federal do Amazonas, como parte do requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil, área de concentração Materiais
e Componentes de Construção.

Aprovada em 02 de maio de 2014

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. NILTON DE SOUZA CAMPELO, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. JOÃO DE ALMEIDA MELO FILHO, Membro.
Universidade Federal do Amazonas


Prof^a. Dr^a. CARINA MAIA LINS COSTA, Membro Externo.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esta dissertação a Rosalvo Pedroso de Oliveira e Maria Arantes de Oliveira, meu pai e minha mãe, que tanto amo e admiro, cuja dedicação e apoio foram essenciais para a formação do meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus todo-poderoso, e ao seu Filho Jesus Cristo, que me deu saúde e sabedoria para elaboração deste trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo pela dedicação, paciência, ensinamento e excelente trato.

A todos os professores, funcionários e alunos do PPGEC pela amizade e profissionalismo, em especial ao Coordenador Prof. Dr. Kennedy.

Às Professoras Dras. Virgínia Mansanares Giaccon e Adalena Kennedy pela grande contribuição e sugestões apresentadas na pesquisa.

Aos colegas de turma: Luciano Neto, Roger, Jorge Spíndola, Flávia, Klícia, Wanderson Félix, Igor, Fabrício, Edda e ao grande amigo Luciano Filho.

Ao técnico Zeca, que sempre me ajudou nos ensaios realizados, sempre de bom humor e disposição invejáveis, e ao Engenheiro Reinaldo, pelos ensinamentos das normas e cálculos dos ensaios utilizados no Laboratório de Pavimentação da UFAM.

À empresa MACCAFERRI pelo apoio técnico e doação de materiais à pesquisa e, principalmente, pelo cordial tratamento que sempre demonstraram à minha pessoa e ao meu orientador, destacando o profissionalismo e a competência do Gerente Regionaldo do Amazonas Esdras.

À empresa JJ Comércio de Borracha Ltda. pela doação de um compressor pneumático para apoio à pesquisa realizada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas e, em especial, ao Professor Mauro Barreto, que gentilmente cedeu as instalações do Laboratório de Mecânica dos Solos para a realização dos ensaios triaxiais das amostras de solos pesquisadas.

Ao Ministério dos Transportes e ao DNIT pelo entendimento da importância desta pesquisa no exercício prático da engenharia desses importantes órgãos federais.

As doações supracitadas demonstram a confiança da Sociedade nos pesquisadores brasileiros, sendo um reconhecimento da importância do estudo de novas tecnologias para melhoria dos processos construtivos no Brasil.

Aos meus filhos Ana Louisa, Anna Rafaella e Gustavo Augusto, pela paciência e compreensão durante a elaboração deste trabalho científico.

“Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé.”
II Timóteo 4:7, Ap. Paulo

RESUMO

OLIVEIRA, E. A. (2014). Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha, utilizando um equipamento reduzido, em amostras de um solo típico da cidade de Manaus. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM, 2014.

Este trabalho visa à realização de ensaios de arrancamento de geogrelha em um solo típico da cidade de Manaus, utilizando um equipamento reduzido de laboratório. O solo *in natura* utilizado nos ensaios foi coletado dentro de uma Área de Proteção Permanente (APP), no *campus* da Universidade Federal do Amazonas, representando um solo superficial de vasta área da cidade de Manaus, de composição argilo-silto-arenosa. A partir da amostra original, foram confeccionadas misturas com a adição de 20%, 40% e 60% de areia de jazida, em massa. As amostras de solo e misturas foram caracterizadas através dos ensaios de Granulometria, Densidade Real, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Compactação (Proctor Normal), Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Compressão Triaxial. Posteriormente, foram realizados ensaios de tração das geogrelhas, visando um comparativo com as especificações do fabricante, e ensaios de arrancamento das geogrelhas em um equipamento reduzido de laboratório, de cunho experimental, em que se variou o tipo de solo, a velocidade do ensaio e o tipo de geogrelha. Durante a pesquisa, um programa computacional foi desenvolvido, para facilitar a análise estatística dos resultados dos ensaios de arrancamento e possibilitar o dimensionamento de taludes reforçados com geogrelhas. Esses ensaios comprovaram que a inserção da geogrelha, aliada à aplicação de areia, ao solo original, incrementa o desempenho geotécnico do conjunto, frente às solicitações de arrancamento, sendo a mistura com 60% de areia a que melhor representa a qualidade dos parâmetros de resistência, para os taludes reforçados.

Palavras-chave: Talude reforçado; geogrelha; ensaio de arrancamento; cidade de Manaus.

ABSTRACT

OLIVEIRA, E. A. (2014). Study of geogrid pullout tests using a small device with soil samples of a typical city Manaus. Thesis (Master) - Federal University of Amazonas, Manaus-AM, 2014.

This work aims at the realization of geogrid pullout tests in a typical soil of the city of Manaus, using a small laboratory equipment. The soil in natura used in the tests was collected within an Area of Permanent Protection (APP) at the Federal University of Amazonas campus, representing a wide area of topsoil from the city of Manaus, the clayey-silty-sandy composition. From the original sample mixture with the addition of 20%, 40% and 60% sand deposit by mass were prepared. The soil samples and mixtures were characterized by the writings of Grit, Real Density, Liquid Limit, Limit Plasticity, Compression (Standard Proctor), California Support Index (CSI) and Triaxial Compression. Subsequently, tensile testing of Tensar geogrids in pullout of small laboratory equipment, experimental in nature, in which they varied the type of soil were performed, aiming a comparison with the manufacturer's specifications, and the test speed and type geogrid. During the research, a computer program was developed to facilitate statistical analysis of the results of pullout tests and enable the design of reinforced embankments with geogrids. Those tests proved that the insertion of the geogrid coupled to sanding, the original soil increments the geotechnical performance of the assembly, opposite the pullout requests, in which the mixture of 60% sand that best represents the quality of the strength parameters for reinforced embankments.

Keywords: Reinforced Slope; geogrid; peel test; city of Manaus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Camada de solo compactado intercalada por geogrelha.	26
Figura 2	- Detalhe de reforço de geogrelha no solo.	26
Figura 3	- Esquema sintetizado de uma estrutura reforçada com geogrelha.	28
Figura 4	- Ponto de atuação de $T_{m\acute{a}x}$ para reforço de taludes íngremes.	29
Figura 5	- Esquema de tensões para taludes íngremes.	32
Figura 6	- Características do problema analisado por Jewell (1991), reforço de talude inclinado.	35
Figura 7	- Ábacos para o dimensionamento de taludes íngremes.	37
Figura 8	- Ábacos para determinação de $T_{m\acute{a}x}$ em maciços reforçados com solos coesivos.	41
Figura 9	- Representação de ensaios de cisalhamento com inclusão no plano de cisalhamento.	45
Figura 10	- Representação do ensaio de arrancamento.	45
Figura 11	- Representação do ensaio de arrancamento.	46
Figura 12	- Caixa de ensaio de arrancamento em elementos transversais.	47
Figura 13	- Equipamento de pequenas dimensões.	49
Figura 14	- Caixa de testes de pequeno porte.	50
Figura 15	- Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes tensões de confinamento.	52
Figura 16	- Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes tensões de confinamento, representado da relação entre taxa de deslocamento e posicionamento dos nós.	52
Figura 17	- Relação entre deslocamentos e força de arrancamento para diferentes tensões confinantes.	53
Figura 18	- Influência qualitativa do aumento da dimensão dos grãos do solo em movimento relativo de cisalhamento direto.	55
Figura 19	Resistência ao arrancamento para vários tipos de solos.	56
Figura 20	- Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes aberturas entre membros transversais de geogrelhas. Constatação de que quanto maior a abertura da grelha maior será a resistência ao arrancamento, isto para solos arenosos.	57
Figura 21	- Relação entre tensão cisalhante e normal vs deslocamento nos ensaios de arrancamento para diferentes rugosidades da parede frontal do equipamento.	58
Figura 22	- Representação do atrito nas paredes interna da caixa de arrancamento.	59
Figura 23	- Resultados de ensaios de arrancamento de geogrelha para diferente espessura de solo arenoso.	60
Figura 24	- Resultados de ensaio de arrancamento executados com diferentes velocidades de ensaio.	61
Figura 25	- Diagrama esquemático da caixa de testes de arrancamento de geogrelha.	62
Figura 26	- Distribuição Granulométrica da areia usada no ensaio.	62
Figura 27	- Resultado dos ensaios de variação de velocidade no arrancamento de geogrelha.	63

Figura 28	- Influência da compactação no ensaio de arrancamento, adaptado de Kakuda (2005).	64
Figura 29	- Caixa de testes para ensaio de arrancamento de geogrelha.	65
Figura 30	- Distribuição granulométrica da areia utilizada nos ensaios de arrancamento, originária do Japão.	66
Figura 31	- Resultado dos ensaios de arrancamento das geogrelhas Tensar SS-1 e SR-55.	66
Figura 32	- Estruturação dos perfis lateríticos selecionados na cidade de Manaus.	67
Figura 33	- Localização da cidade de Manaus no contexto da Bacia do Amazonas.	68
Figura 34	- Mapa geológico da cidade de Manaus.	68
Figura 35	- Coleta e preparação de uma amostra de solo típica da Região Amazônica. (a) Leitura do GPS para marcação das coordenadas do local.	71
Figura 36	- Foto de satélite do local de coleta de amostras deformadas, Latitude: 3°05'14,9"S e Longitude 59°57'45,5"W.	72
Figura 37	- Preparação das amostras 1, 2, 3, 4 e 5 (misturas do solo <i>in natura</i> com areia).	73
Figura 38	- Ensaio de sedimentação.	74
Figura 39	- Ensaio de sedimentação.	74
Figura 40	- Ensaio de sedimentação.	75
Figura 41	- Peneiramento do material grosso.	75
Figura 42	- Ensaio de limite de liquidez.	76
Figura 43	- Ensaio de limite de plasticidade.	76
Figura 44	- Ensaio de densidade real.	77
Figura 45	- Ensaio de compactação.	77
Figura 46	- Ensaio de compactação.	78
Figura 47	- Ensaio de determinação da massa específica.	78
Figura 48	- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.	79
Figura 49	- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.	79
Figura 50	- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.	80
Figura 51	- Ensaio de compressão triaxial do solo.	81
Figura 52	- Elementos constituintes das geogrelhas usadas neste trabalho.	83
Figura 53	- Fios de poliéster utilizados na fabricação de geogrelha tecida na fábrica da Maccaferri em Camaçari – BA	84
Figura 54	- Microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando Estereoscópio marca Leica modelo EZ4.	86
Figura 55	- Microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando Estereoscópio marca Leica modelo EZ4.	87
Figura 56	- Ensaio de geogrelha realizado na fábrica da MACCAFERRI, Camaçari – BA.	88
Figura 57	- Adaptações construídas em uma oficina de tornearia.	89
Figura 58	- Ensaio de tração em geogrelha.	90
Figura 59	- Ensaio de tração em geogrelha.	90
Figura 60	- Equipamento reduzido de laboratório. (a) Caixa metálica de testes de arrancamento.	91
Figura 61	- Equipamento reduzido de laboratório.	92
Figura 62	- Borracha que infla, pressionando o solo confinado, com o intuito de simular o confinamento natural do solo.	93

Figura 63	- Desenho elaborado na pesquisa para construção da caixa de testes de arrancamento para uso no equipamento reduzido de laboratório.	94
Figura 64	- Desenho elaborado na pesquisa para construção da garra de testes de arrancamento para uso no equipamento reduzido de laboratório.	95
Figura 65	- Equipamento reduzido de laboratório.	96
Figura 66	- Tampa com borracha inflável para simular a tensão confinante do solo.	97
Figura 67	- Ensaio de Arrancamento de geogrelha utilizando um equipamento reduzido de laboratório.	99
Figura 68	- Ensaio de arrancamento de geogrelha.	100
Figura 69	- Fluxograma do programa computacional elaborado na pesquisa.	102
Figura 70	- Resultado dos Ensaios de Granulometria e Sedimentação das Amostras de Solo 1 a 5 (realizados 2 ensaios para cada tipo de amostra de solo).	104
Figura 71	- Resultado dos Ensaios de Limite de Plasticidade das amostras de solo de 1 a 4.	106
Figura 72	- Resultado dos Ensaios de Limite de Liquidez das Amostras de Solo 1 a 4.	106
Figura 73	- Resultado dos ensaios de densidade real (DNER 9364) das amostras de solo 1 a 5.	108
Figura 74	- Resultado dos ensaios de grau de compactação das amostras de solo de 1 a 4.	109
Figura 75	- Resultado dos Ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras de solo n° 1 a 5.	110
Figura 76	- Resultado do ensaio de compressão triaxial das amostras de solo n° 1, 2, 3, 4 e 5 sendo que foram realizados 3 ensaios para cada amostra nas tensões 200, 100 e 50.	111
Figura 77	- Resultado do ensaio de compressão triaxial : Envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras de solo n°1, 2, 3 e 4 e 5.	112
Figura 78	- Resultado da microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando Estereoscópio marca Leica modelo EZ4.	115
Figura 79	- Resultado da microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando Estereoscópio marca Leica modelo EZ4.	115
Figura 80	- Resultado dos Ensaios de Tração na Geogrelha MacGrid 60x30.	116
Figura 81	- Resultado dos Ensaios de Tração na Geogrelha MacGrid 40x30.	117
Figura 82	- Resultado dos ensaios de calibração do equipamento reduzido com oito ensaios de arrancamento.	118
Figura 83	- Resultado do efeito de variação de velocidade no ensaio de arrancamento com oito diferentes velocidades.	120
Figura 84	- Resultado do efeito de variação de velocidade no ensaio de arrancamento com oito diferentes velocidades.	121
Figura 85	- Resultado do efeito de variação de tipo de geogrelha no	123

	ensaio, realizados quatro ensaios com cada tipo de geogrelha.	
Figura 86	- Resultado do efeito de variação do tipo de solo (1 a 5) na tensão de arrancamento.	126
Figura 87	- Resultado da tensão máxima de arrancamento ($\tau_{arr. \text{ máx.}}$) para cada amostra de solo ensaiada.	127
Figura 88	- Tela inicial do programa computacional elaborado.	128
Figura 89	- Tela de cálculos estatísticos do programa computacional elaborado.	129
Figura 90	- Gráficos elaborados pelo programa computacional.	129
Figura 91	- Tela de resultados com o cálculo realizado pelo método de Jewell.	130
Figura 92	- Tela de resultados com o cálculo realizado pelo método de Erlich e Mitchel.	130
Figura 93	- Arranjo estrutural elaborado pelo programa computacional.	131
Figura 94	- Levantamento de quantitativo e custos elaborado pelo programa computacional.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Influência da taxa de deslocamento	61
Tabela 2	- Processo de misturas do solo <i>in natura</i> com areia	72
Tabela 3	- Faixa de cargas de geogrelhas fabricadas na MACCAFERRI	82
Tabela 4	- Propriedade das geogrelhas utilizadas nos ensaios	83
Tabela 5	- Resumo dos ensaios realizados em geogrelhas	85
Tabela 6	- Resultado do ensaio de granulometria das amostras de solo	105
Tabela 7	- Resultado do ensaio de limite de plasticidade das amostras de solo	105
Tabela 8	- Resultado do ensaio de limite de liquidez das amostras de solo	107
Tabela 9	- Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo 1	107
Tabela 10	- Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo 2	107
Tabela 11	- Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo 3	107
Tabela 12	- Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo 4	108
Tabela 13	- Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo 5	108
Tabela 14	- Resultado do ensaio de densidade real das amostras de solo	108
Tabela 15	- Resultado do ensaio de compactação das amostras de solo	110
Tabela 16	- Resultado do ensaio do índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras de solo	110
Tabela 17	- Resumo do ensaio de compressão triaxial das amostras de solo 1, 2, 3, 4 e 5	113
Tabela 18	- Resumo da Caracterização das amostras	114
Tabela 19	- Resultado do ensaio de tração de geogrelha	116
Tabela 20	- Resultado do ensaio de tração de geogrelha	117
Tabela 21	- Resultado dos ensaios de calibração do equipamento reduzido com oito ensaios de arrancamento	118
Tabela 22	- Características do ensaio de variação de velocidade, realizado oito vezes para verificar o efeito	120
Tabela 23	- Características do ensaio de variação de geogrelha, realizado quatro vezes para cada tipo de geogrelha	122
Tabela 24	- Características do ensaio de variação de tipo de solo (1 a 5) para verificar o efeito quanto à resistência ao arrancamento	125
Tabela 25	- Resultado do cálculo do coeficiente de interação da interface solo-geogrelha (f), ângulo de atrito e da coesão da interface solo-geogrelha para as amostras de solo ensaiadas (1 a 5), calculados através da envoltória de resistência de arrancamento pela tensão de confinamento	126
Tabela 26	- Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios 1 a 8	132
Tabela 27	- Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 40x30 de 1 a 3, realizados na fábrica	132
Tabela 28	- Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 40x30 de 1 a 3, realizados na UFAM	133
Tabela 29	- Resultados do calculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de variação de velocidade	133
Tabela 30	- Resultados do calculo estatístico gerado pelo programa	134

	computacional dos ensaios de tração na geogrelha 60x30, de 1 a 3, realizado na fábrica	
Tabela 31	- Resultados do calculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 60x30, de 1 a 3, realizado na UFAM	134
Tabela 32	- Resultados do calculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de variação do tipo de geogrelha	135
Tabela 33	- Resultados do calculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de variação do tipo de amostras de solo (1 a 5)	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Características de equipamentos de ensaio de arrancamento projetados por alguns autores, ao longo do tempo.....	48
----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a_b	Fração unitária do elemento transversal da geogrelha onde é possível desenvolver a resistência passiva
a_s	Fração unitária de área cheia do geossintético
A	Área plana de geogrelha em contato com o solo
B	Espessura do elemento transversal
C	Coesão do solo obtido de ensaio de cisalhamento
c'	Coesão do solo efetiva
c_a	Adesão de interface
C_u	Resistência não drenada do solo
D_{50}	Diâmetro médio das partículas do solo
D_r	Densidade relativa da areia
F	Relação entre $tg(\delta)$ e $tg(\phi)$
f^*	Coefficiente de interação entre o solo e geogrelha
f_a	Coefficiente de aderência
f_b	Fração do elemento transversal no qual a resistência passiva é totalmente desenvolvida
F^*	Fator de resistência ao arrancamento
F_{anc}	Fator de segurança contra a ruptura por deficiência de ancoragem
FF	Face frontal do equipamento flexível
F_q	Fator de capacidade de carga para considerar o embutimento
F_p	Fator de segurança associado à resistência de arrancamento
F_{ms}	Fator de segurança parcial a ser aplicado no ângulo de atrito efetivo do material do aterro a grandes deformações
FS	Fator de segurança
GC	Grau de compactação em relação a Energia do Proctor Normal
H	Altura média de aterro sobre o comprimento do reforço
L	Comprimento de ancoragem do reforço
l_{anc}	Comprimento mínimo de ancoragem
L_b	Distância mínima além da linha mais externa de capitéis
L_e	Comprimento do reforço na zona resistente além da superfície potencial de ruptura; comprimento do reforço para que não ocorra o deslizamento do aterro sobre a inclusão
LL	Limite de Liquidez
l_0	Comprimento inicial da geogrelha no ensaio de tração nos elementos longitudinais
Δl	Varição do comprimento de geogrelha no ensaio de tração nos elementos longitudinais
LP	Limite de Plasticidade
L_r	Comprimento do reforço no ensaio de arrancamento
LVDTs	Linear Variable Differential Transformer
N_c, N_{cl}	Fatores de capacidade de resistência ativa (idênticos aos fatores de capacidade de carga)
N_q, N_{qt}	Fatores de capacidade de resistência passiva
P_b	Resistência passiva gerada pelos elementos transversais quando são solicitados contra o solo na frente de avanço da geogrelha
PEAD	Polietileno de alta densidade

PET	Poliéster
P_f	Resistência de interface entre a área exposta de membros longitudinais e transversais e o solo
PP	Polipropileno
P_r	Resistência ao arrancamento por unidade de largura
P_{TE}	Máxima resistência efetiva ao arrancamento
P_{2-D}	Força de arrancamento para interação bidimensional
P_{3-D}	Força de arrancamento para interação tridimensional
PVC	Policloreto de vinila
RF	Face frontal do equipamento rígido
S	Espaçamento entre elementos transversais consecutivos
S_x	Espaçamento longitudinal entre os elementos transversais
T	Espessura do elemento transversal de geogrelha
T	Força resistente ao esforço de tração no reforço; espessura do solo
T_a	Força de arrancamento obtido do ensaio
UV	Ultra violetas
W_r	Largura de reforço
W_{ot}	Umidade ótima de compactação na energia Proctor Normal
A	Fator de correção do efeito escala; adesão
α'	Coeficiente de interação relacionando o ângulo de atrito do solo com a resistência de interface solo-reforço
α''	Coeficiente de interação relacionando o ângulo de atrito do solo com a resistência de interface solo-reforço em um dos lado do reforço
α_{ds}	Coeficiente de deslizamento
α_{ad}	Coeficiente de aderência
α_s	Fração da superfície sólida de geogrelha
δ_t	Deslocamento total obtido registrado pelo equipamento
Δ	Ângulo de atrito de interface solo-geogrelha
ε_v	Deformação volumétrica
ε_1	Deformação principal maior
Γ	Peso específico do solo
Λ	Relação entre adesão e coesão do solo
Φ	Ângulo de atrito interno do solo
$\Phi_{cv'}$	Ângulo de atrito obtido de ensaio de cisalhamento a volume constante
Ψ	$\arctg dx/dy$
M	Coeficiente de atrito
P	Ângulo de atrito de interface solo-geogrelha
ρ_s	Massa específica dos sólidos
ρ_{dmax}	Massa específica seca máxima obtida ensaios Proctor Normal
σ_v'	Tensão efetiva na interface solo-reforço
Σ	Tensão normal no plano do reforço
σ_n'	Tensão normal atuante na interface solo-geogrelha
σ_p'	Resistência passiva
σ_1'	Tensão principal maior no plano de deformação
σ_3'	Tensão principal menor no plano de deformação
$\sigma_{1cv'}$	Tensão principal maior no plano de deformação na condição de estado crítico
$\sigma_{3cv'}$	Tensão principal menor no plano de deformação na condição de estado crítico

T	Tensão tangencial na interface solo-geogrelha
τ_{as}	Tensão de aderência na face superior
τ_{ai}	Tensão de aderência na face inferior
τ_{arrmax}	Tensão de arrancamento de pico

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE QUADROS	15
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Generalidades	22
1.2 Justificativa	22
1.3 Objetivo	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Histórico	24
2.2 Reforço de solos com geogrelhas	25
2.2.1 Muros e taludes reforçados com geogrelhas	27
2.3 Cálculo de reforço estrutural com geogrelhas	30
2.3.1 Análise de Estabilidade Externa	30
2.3.1.1 Estudo de segurança contra os processos de colapso do solo	31
2.3.1.1.1 Segurança contra o deslizamento da base	31
2.3.1.1.2 Segurança contra o tombamento	31
2.3.1.1.3 Segurança contra a ruptura do solo de fundação	31
2.3.1.1.4 Segurança contra a ruptura global	32
2.3.2 Análise de Estabilidade Interna	33
2.3.3 Dimensionamento, Equações e Ábacos utilizados no <i>programa computacional</i> desenvolvido na pesquisa	34
2.3.3.1 Método de Jewell (1991)	34
2.3.3.2 Método de Ehrlich e Mitchell (1994)	38
2.3.3.3 Análise para verificação do arrancamento	43
2.4 Ensaios de arrancamento	44
2.5 Mecanismo de interação solo-inclusão no ensaio de arrancamento	44
2.6 Ensaio de arrancamento em laboratório	47
2.6.1 Ensaios de pequeno porte (equipamento reduzido de laboratório)	49
2.7 Efeitos a serem considerados na execução do ensaio de arrancamento	51
2.7.1 Efeitos da tensão confinante	51
2.7.2 Efeitos do tipo de solo	54
2.7.2.1 Solos arenosos	56
2.7.2.2 Solos coesivos	57

2.7.3	Efeito da rugosidade da parede interna da caixa	58
2.7.4	Espessura da camada de solo acima e abaixo da inclusão	59
2.7.5	Influência da velocidade de ensaio (mm/min)	60
2.7.6	Influência da compactação no ensaio de arrancamento	64
2.7.7	Influência do tipo de geogrelha no ensaio de arrancamento	65
2.8	Solo da cidade de Manaus	66
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	Solos utilizados no programa experimental	70
3.1.1	Caracterização das amostras de solo	72
3.1.1.1	Análise Granulométrica	73
3.1.1.2	Granulometria	75
3.1.1.3	Limites de Atterberg	76
3.1.1.4	Ensaio de Densidade real	77
3.1.1.5	Ensaio de Compactação	79
3.1.1.6	Ensaio de determinação de massa específica pelo Frasco de Chapman	79
3.1.1.7	Ensaio de ISC	80
3.1.1.8	Ensaio de compressão triaxial	81
3.2	Geogrelhas utilizadas no programa experimental	83
3.2.1	Ensaio realizados com geogrelhas	85
3.2.1.1	Microscopia das geogrelhas	87
3.2.1.2	Ensaio de tração das geogrelhas	88
3.2.1.3	Ensaio de arrancamento	92
3.3	Elaboração de programa computacional para cálculo de reforço de taludes utilizando as geogrelhas, amostras de solo e resultados dos ensaios realizados	102
4	RESULTADOS	104
4.1	Ensaio de Caracterização das Amostras de Solo	104
4.1.1	Ensaio de sedimentação e granulometria das amostras de solo	105
4.1.2	Ensaio de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	105
4.1.2.1	Ensaio de Limite de Plasticidade	105
4.1.2.2	Ensaio de Limite de Liquidez	106
4.1.3	Ensaio de Densidade real	106
4.1.4	Ensaio de Grau de Compactação	108
4.1.5	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)	109
4.1.6	Ensaio de compressão triaxial	111
4.1.7	Resumo dos Ensaio de Caracterização das Amostras de Solo	113
4.2	Microscopia	115
4.3	Ensaio de Tração nas Geogrelhas	116

4.4	Ensaio de Arrancamento	118
4.4.1	Calibração do Equipamento Reduzido	118
4.4.2	Análise Paramétrica Experimental com uso do Equipamento de Pequeno Porte	118
4.4.2.1	Efeito da velocidade de ensaio na resistência ao arrancamento	119
4.4.2.2	Comparativo entre tipos de geogrelha na resistência ao arrancamento	121
4.4.2.3	Efeito da variação do tipo de amostra de solo na resistência ao arrancamento	123
4.5	Resultados obtidos pelo programa computacional elaborado	127
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
6	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
	Apêndice – A (CD-ROM com programa computacional e demais arquivos)	147
	Apêndice – B (Códigos de Programação)	148

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO.

1.1. Generalidades.

Este trabalho de pesquisa aborda o estudo das geogrelhas utilizadas para reforço de aterros, implantadas entre camadas de solo compactado, bem como a sua interação com o solo.

A finalidade de se intercalar a geogrelha entre camadas de aterro compactado é aumentar a resistência dos aterros ao colapso, isto é, reforçar os aterros, aumentando sua capacidade de carga.

Segundo VERTEMATTI (2004), geogrelha é um produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, e constituída por elementos resistentes à tração.

A geogrelha é um geossintético, fabricada a partir do entrelaçamento de fios poliméricos sintéticos que são responsáveis pela resistência à tração do material.

1.2. Justificativa.

As obras de terra na Região Amazônica, principalmente as portuárias, estão utilizando cada vez mais materiais geossintéticos, em especial a geogrelha, por possuir propriedades estruturais para reforço de aterro, justificando a importância do estudo das características deste material, no que tange ao seu funcionamento estrutural e sua resistência ao arrancamento na interação solo-geogrelha.

O estudo dos ensaios de arrancamento de geogrelha em um solo típico da cidade de Manaus, realizado através de um equipamento reduzido de laboratório, irá trazer a possibilidade de obtenção de parâmetros de cálculo mais confiáveis, o que possibilitará um dimensionamento mais econômico e seguro deste material, utilizado como reforço de aterros.

Concomitantemente, verificar-se-á a influência da areia na melhoria da qualidade do solo utilizado como aterro, através da análise da caracterização das amostras de solo, bem como dos resultados dos ensaios de arrancamento e sua interação com o solo objeto de análise.

1.3. Objetivo.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de se trabalhar com taludes reforçados com geogrelha, empregando-se um solo típico da cidade de Manaus, com adições de 20%, 40% e 60% de areia, por meio de ensaios de arrancamento, realizados através de um equipamento laboratorial de dimensões reduzidas.

Dessa forma, pretende-se:

- a) Verificar a melhoria das qualidades do solo *in natura*, através do acréscimo de areia, obtida no comércio local;
- b) Definir a melhor proporção de areia a ser acrescentada no solo *in natura*, para melhorar o desempenho do sistema solo-geogrelha;
- c) Construir um equipamento de ensaio de arrancamento de pequeno porte, nos moldes da caixa de testes fabricada por TEIXEIRA (2003);
- d) Gerar parâmetros para dimensionamento de geogrelhas, através de ensaios experimentais, utilizando o equipamento de pequeno porte supramencionado, que permitam a variação do tipo de amostra de solo, da velocidade de arrancamento e do tipo de geogrelha; e
- e) Elaborar um programa computacional “não comercial” de domínio público, para o dimensionamento de taludes de solos reforçados com geogrelhas, utilizando os dados obtidos nesse trabalho científico.

Capítulo 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Histórico.

Segundo SILVA (1996), historicamente, a idéia de reforçar aterros, através da inclusão de elementos sintéticos ou naturais em uma massa de solo, vem desde a Antiguidade, e como exemplo disso, temos as obras de Zigurate (Mesopotâmia, 1400 a.C.), as Muralhas de China (200 a.C.) - que foram construídas utilizando solo reforçado com raízes -, e a estrada para o templo de La Luna, construída pelos Incas, que utilizavam misturas de argilas e lãs de lhamas para reforço de pavimentos. JOHN (1987) reportou a primeira aplicação de um geotêxtil tecido de algodão, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul (Estados Unidos da América), em um reforço de aterros para pavimentos, durante a construção de uma estrada.

VERTEMATTI (2004) informou que o aparecimento do polímero sintético ocorreu nos anos 40. A primeira aplicação de um geotêxtil de fibras sintéticas data de 1950, na Flórida. Na Europa, a aplicação de geotêxteis tecidos data de 1960, especificamente na Holanda, e de geotêxteis não tecidos em 1969, na França.

De acordo com KOERNER (1994), geossintético é um produto planar, fabricado a partir de um material polimérico. Podem ser classificados nos seguintes tipos: geotêxteis, geomembranas, geodrenos, geocélulas, geogrelhas, georredes, geocompostos, fibrossolo, geoespaçadores, geomantas e geocompostos argilosos.

Conforme descrição de FAHEL (2003), os materiais geossintéticos são compostos industriais à base de polímeros de naturezas diversas, os quais podem ser inseridos em uma massa de solo, sob a forma de filamentos contínuos ou não, tiras, mantas tecidas ou não, membranas, grelhas ou ainda uma composição de dois ou mais desses elementos (geocompostos), interagindo com o meio e desempenhando diferentes funções, como: reforço, separação, drenagem, filtração, barreira para fluidos e gases, proteção, etc.

No entendimento de VERTEMATTI (2004), geossintético é um produto plano fabricado a partir de materiais poliméricos (sintéticos ou naturais) usado em contacto com os maciços naturais, solos ou rochas, ou outro material geotécnico em obras de Engenharia.

VERTEMATTI (2004) explicou que o grande desenvolvimento dos geossintéticos ocorreu na década de 1970, com o aparecimento de outros materiais como as geomembranas,

as geogrelhas, os geocompósitos e outros. O termo geossintético apareceu nos anos 80, como uma designação mais genérica, englobando, portanto, os geotêxteis, as geomembranas e todos os produtos afins. Geossintético é um termo composto por “geo + sintético”, que significa “terra + um produto manufaturado pelo homem”.

É nesse contexto que surgiu, em 1977, o primeiro grande evento internacional de Paris, França, sobre o assunto, reconhecendo de forma definitiva a importância dos materiais geossintéticos.

A partir dessa data, destaca-se a constituição da Sociedade Internacional de Geotêxteis, em 1983, em Paris, e o surgimento da Sociedade Internacional de Geossintéticos, em 1994. Nessa ocasião, surgiram várias revistas especializadas, com realce para o “International Journal of Geotêxteis and Geomembranes”, a partir de 1987, e o “Geosynthetics International”, a partir de 1994.

No Brasil, somente a partir de 1980 que se iniciou a fabricação nacional de produtos geossintéticos, enquanto que, em 1982, a ABNT estabeleceu uma comissão específica do assunto.

Segundo a NBR 12553, geossintético é um produto polimérico (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para aplicação em obras geotécnicas.

Nesse trabalho, o geossintético que será estudado é a geogrelha, material flexível com resistência estrutural à tração, o qual, ultimamente, vem sendo muito empregado em obras de terra, em substituição a obras convencionais de reforço de aterro, pois apresentam durabilidade e baixo custo de execução. As estruturas de solo reforçado são constituídas por camadas horizontais de solos compactados intercalados, por geogrelhas.

ANTUNES (2008) reportou que as geogrelhas são materiais planares flexíveis, formados por uma rede regular de elementos, com aberturas de tamanhos suficiente para interagir com o material de enchimento circundante.

2.2 Reforço de solos com geogrelhas.

Nos projetos de reforço de aterro com geogrelhas, deve-se verificar as condições de ruptura quanto à estabilidade interna e externa. Um dos parâmetros fundamentais nos cálculos é a resistência ao arrancamento da geogrelha no solo.

A resistência ao arrancamento é obtida através de ensaios de arrancamento. No caso das geogrelhas, por apresentarem uma estrutura vazada em forma de grelha e por serem extensíveis, o ensaio de arrancamento é o que melhor simula as condições de solicitações

geradas pelo mecanismo de ruptura (RAJU *et al*, 1998).

Conforme ANTUNES (2008), os solos podem ser reforçados com geogrelhas, aumentando, assim, a sua capacidade de suporte. O método de reforço consiste na aplicação de camadas horizontais de solos compactados, intercalados por geogrelhas, Figura 1.



Figura 1 - Camada de solo compactado intercalada por geogrelha.
Fonte: MACCAFERRI, 2012.

A estrutura de reforço conta também com uma drenagem efetiva do aterro, um geocomposto anti-erosão, uma geocélula, por exemplo, e uma camada de vegetação ou concreto, para proteção da camada superficial do aterro, Figura 2.

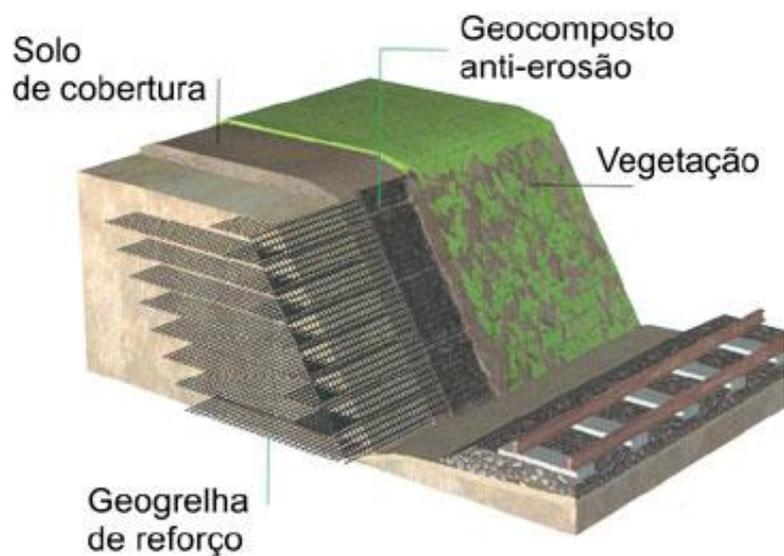


Figura 2 - Detalhe de reforço de geogrelha no solo.
Fonte: MACCAFERRI, 2012.

A geogrelhas, devido às suas propriedades de resistência à tração, podem ser utilizadas na maioria das obras de terra, como taludes compactados íngremes, reforço de base de aterro de solo mole, reforço de base de pavimentos rodoviários, ferroviários, aeroportuários e portuários.

A resistência à tração da geogrelha tecida é devida aos fios poliméricos, dentre eles os fios de PET, que possuem propriedades de resistência à tração e flexibilidade, o que facilita o manuseio, porém, é um material sensível aos raios UV, daí o seu uso restrito em obras de terra (subterrâneas).

Segundo CALLISTER (1999), o Poliéster (PET) é o resultante da polimerização do etileno glicol e dimetil tereftalato (ácido terrefitálico). Apresenta alta resistência à tração, mas sofre degradação pelo calor e pelos raios UV.

2.2.1 Muros e taludes reforçados com geogrelhas.

As estruturas em solos reforçados com geogrelhas são constituídas de camadas horizontais de solo compactado, intercalada por inclusões de geogrelhas. Através da interação entre as inclusões e o solo, o sistema ganha uma condição de estabilidade para resistir a esforços de tração.

Na Figura 3, observam-se drenos horizontais na camada inferior do aterro, constituído de brita e um de tubo perfurado colocado na parte interna do pé da face do talude. A colocação de drenos tem a finalidade de minimizar as pressões neutras no interior do maciço reforçado. Essa figura demonstra um reforço de talude com geogrelhas intercaladas no solo compactado, além da proteção da superfície do talude com blocos pré-moldados.

A verificação da estabilidade dos projetos de muros de arrimo ou contenção é feita segundo duas condições, as estabilidades externa e interna. Na verificação da estabilidade externa, deve-se admitir que o maciço de solo reforçado atue como um corpo rígido, ou seja, a zona reforçada funcione como uma estrutura de gravidade. A partir desse pressuposto, verifica-se a segurança do maciço segundo três mecanismos clássicos de ruptura de estruturas de contenções:

- a) Deslizamento ao longo da base;
- b) Tombamento;
- c) Ruptura do solo de fundação; e
- d) Ruptura global, ou seja, ruptura por uma superfície envolvendo todo o maciço.

reforçado.

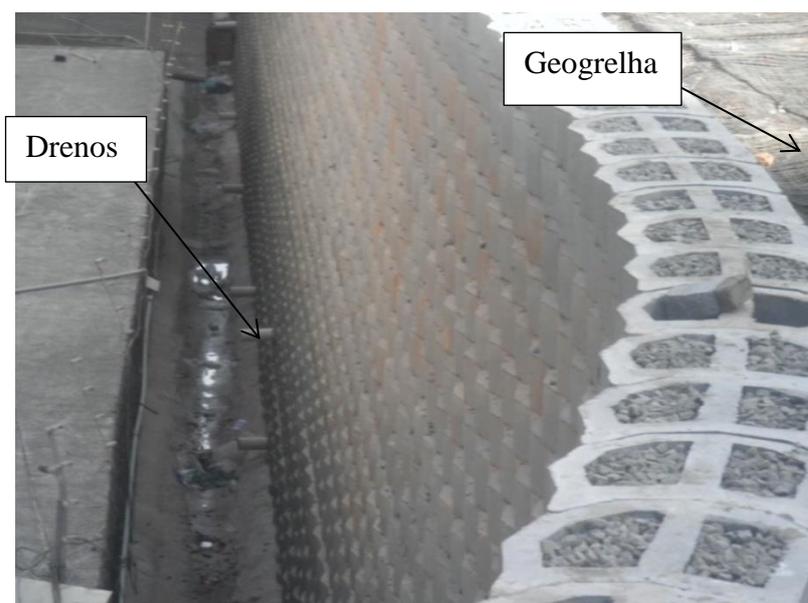


Figura 3 – Esquema sintetizado de uma estrutura reforçada com geogrelha.

Já na verificação da estabilidade interna, cada inclusão é analisada separadamente. A verificação baseia-se na análise por equilíbrio limite, separando o maciço em duas regiões denominadas de zona ativa e resistiva, revelando duas condições:

- a) Arrancamento do reforço; e
- b) Ruptura do reforço.

Segundo TEIXEIRA (2003), o elemento de reforço, presente no interior do maciço de solo, é capaz de mobilizar um adicional de resistência ao cisalhamento do conjunto, que só se torna efetiva quando surge uma força de tração na inclusão, conforme a Figura 4.

Nos projetos de estruturas de contenção em solo reforçado, determina-se inicialmente o comprimento da inclusão necessário para garantir a estabilidade do sistema, de forma que atenda aos dois mecanismos clássicos de ruptura supracitados. Assim, determinado o comprimento da inclusão, efetua-se a verificação quanto ao arrancamento e ao colapso do reforço. Para efetuar essa análise, deve-se determinar o comprimento de ancoragem na zona resistente do maciço (VERTEMATTI, 2004).

Pela Teoria de Rankine¹ (1856), o mecanismo de ruptura usualmente empregado consiste em assumir a condição de ruptura ativa, em que o plano de ruptura forma um ângulo de $45^\circ + \phi/2$ com o plano horizontal a partir do pé do talude.

¹ A Teoria Clássica de Rankine (1856), para cálculo de empuxo de terra, considera que o solo produz um estado ativo, se o solo sofre expansão, e estado passivo, se o solo sofre compressão. *Apud* VERTEMATTI, 2004.

A análise da resistência ao arrancamento por unidade de largura do reforço (P_r), proposta por CHRISTOPHER *et al* (1990), segue a expressão (1):

$$P_r = 2 L_e \alpha \sigma'_v f^* \geq FS T_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

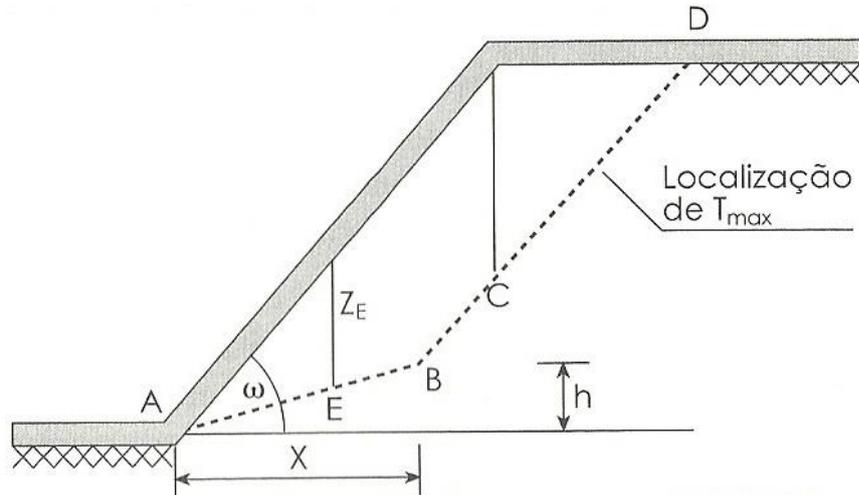


Figura 4 – Ponto de atuação de $T_{m\acute{a}x}$ para reforço de taludes íngremes.
Fonte: DANTAS e EHRLICH, 2000.

Nessa expressão, L_e é o comprimento de reforço na zona resistente além da superfície potencial de ruptura; α é o fator de correção do efeito escala; σ'_v é a tensão efetiva vertical na interface solo-reforço e f^* é o fator de resistência ao arrancamento, que é determinado com maior precisão através de ensaios de arrancamento, enquanto FS é o fator de segurança e $T_{m\acute{a}x}$ é a força máxima de tração do solo, localizada conforme a Figura 4.

$$f^* = \frac{P_r}{c + \rho T g \phi} \quad (2)$$

Quanto ao f^* (fator de resistência ao arrancamento), o qual mede a interação solo/geogrelha, tem-se na expressão (2), P_r , Tensão máxima de arrancamento, c é a coesão, ρ é a tensão no solo e ϕ é o ângulo de atrito do solo.

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão (2), considerando que o fator f^* é uma combinação de resistência passiva e a mobilizada pelo atrito entre a geogrelha e o solo (JEWELL, 1991).

$$f^* = F_q \left\{ \left(\frac{a_b}{B} \right) / 2 S \right\} + \text{tg} \delta a_s \quad (3)$$

Nessa expressão, os parâmetros utilizados para análise do arrancamento são: F_q é o fator de capacidade de carga para considerar o embutimento; a_b representa a fração unitária do elemento transversal da geogrelha, onde é possível desenvolver a resistência passiva; B é a espessura do elemento; S é o espaçamento entre os elementos transversais; δ é o ângulo de atrito de interface solo-geogrelha; e a_s é a fração da superfície sólida de geogrelha.

2.3 Cálculo de reforço estrutural com geogrelhas.

Conforme reportado por TEIXEIRA (2003), a literatura especializada disponibiliza uma diversidade de métodos de análise e projetos de muros e taludes em solos reforçados com geossintéticos, como Steward et al (1977), Broms (1987), Collin (1985), Bonaparte et al (1987), Jewell e Milligan (1989), Juran et al (1990) e Jewell (1991).

As variáveis utilizadas nos cálculos são:

- a) Altura do talude reforçado (H);
- b) Ângulo de inclinação do terreno (α);
- c) Inclinação da estrutura de arrimo (ω);
- d) Propriedades de resistência do solo;
- e) Resistência da interface solo/geossintético;
- f) Resistência, comprimento (L) e espaçamento (S_v) do geossintético;
- g) Condições de compactação do aterro;
- h) Carregamentos externos (q); e
- i) Fatores de segurança de estabilidade.

O dimensionamento de estruturas de solo reforçado é geralmente realizado em duas etapas: análise de estabilidade externa e interna da estrutura (VERTEMATTI, 2004).

2.3.1 Análise de Estabilidade Externa.

Segundo TEIXEIRA (2003), a análise de estabilidade externa envolve o estudo de quatro processos de colapso do solo:

- a) Deslizamento da base;
- b) Tombamento;
- c) Capacidade de carga da fundação; e
- d) Ruptura global.

2.3.1.1 Estudo de segurança contra os processos de colapso do solo.

2.3.1.1.1 Segurança contra o deslizamento da base.

Pela fórmula clássica do Empuxo:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (4)$$

O fator de segurança ao deslizamento FS_d é determinado por:

$$FS_d = \frac{\gamma H L_r \operatorname{Tg} \emptyset}{E_a} \geq 1,5 \quad (5)$$

Sendo:

FS_d = fator de segurança contra o deslizamento da base;

γ = peso específico do solo (kN/m^3);

H = altura do talude (m);

\emptyset = ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$);

E_a = empuxo ativo (kN/m);

L_r = comprimento do reforço (m).

2.3.1.1.2 Segurança contra o tombamento.

Para o fator de segurança contra o tombamento FS_t é determinado por:

$$FS_t = \frac{W L_r}{2 E_a Y_E} \geq 2,0 \quad (6)$$

Onde:

FS_t = fator de segurança contra o tombamento;

W = peso próprio da estrutura de contenção (kN/m);

Y_E = braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura (m).

2.3.1.1.3 Segurança contra a ruptura do solo de fundação.

Para o fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação FS_f é determinado por:

$$FS_f = \frac{Q_{\text{máx}}}{\sigma} \geq 3,0 \quad (7)$$

Onde:

FS_f = fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação;

$Q_{\text{máx}}$ = capacidade de carga do solo de fundação (kPa);

e = excentricidade entre as tensões atuantes, conforme Figura 5;

σ = tensões normais (kPa).

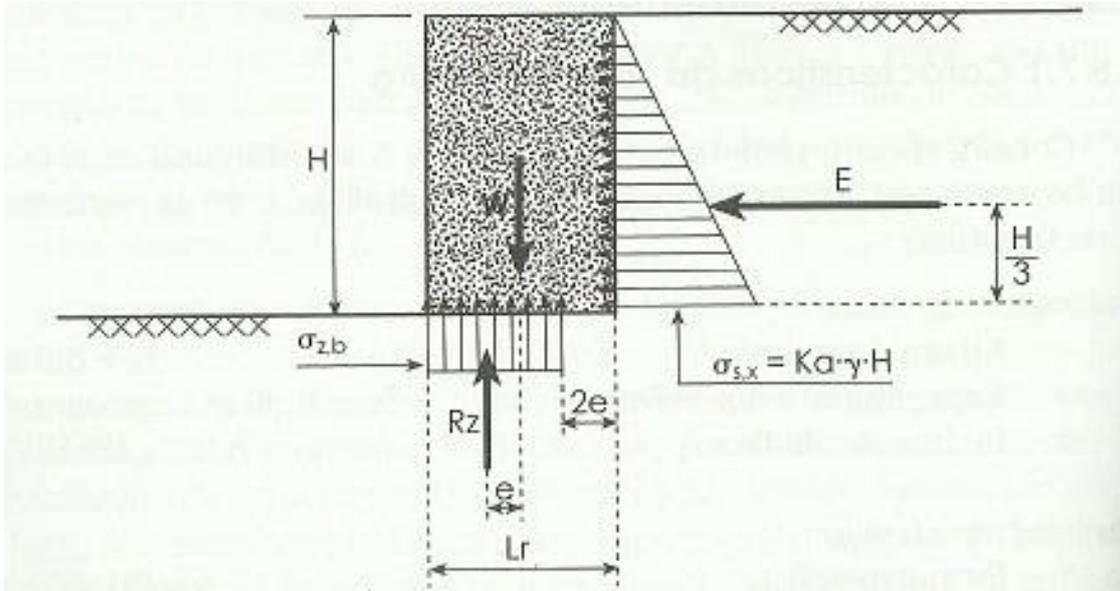


Figura 5 – Esquema de tensões para taludes íngremes.
Fonte: DANTAS e EHRLICH, 2000.

Considerando as tensões normais atuantes na base do muro:

$$\sigma = \frac{R}{L_r - 2e} \quad (8)$$

Segundo TERZAGUI & PECK (1967), a capacidade de carga do solo de fundação pode ser estimada pela expressão:

$$Q_{\text{máx}} = c'N_c + q_s N_q + 0,5\gamma_f B'N_\gamma \quad (9)$$

Sendo:

$Q_{\text{máx}}$ = capacidade de carga do solo de fundação (kPa);

c' = coesão do solo (kPa);

q_s = sobrecarga no nível da base da estrutura (kgf/cm²);

γ_f = peso específico do solo de fundação (kgf/cm²).

N_c , N_γ e N_q = fatores de capacidade de carga segundo as expressões:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cotg(\emptyset) \quad (10)$$

$$N_\gamma = 1,80 (N_q - 1) \operatorname{tg}(\emptyset) \quad (11)$$

$$N_q = e^{(\pi \cdot \operatorname{tg}\emptyset)} \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \emptyset/2) \quad (12)$$

2.3.1.1.4 Segurança contra a ruptura global.

Utilizando o fator de segurança contra a ruptura global FS_g que é determinado por:

$$FS_g = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_s} \geq 1,3 \text{ para obras provisórias} \quad (13)$$

$$FS_g = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_s} \geq 1,5 \text{ para obras permanentes} \quad (14)$$

Sendo:

ΣM_r = somatório dos momentos dos esforços resistentes, em relação ao centro de rotação (kNm/m);

ΣM_s = somatório dos momentos dos esforços solicitantes, em relação ao centro de rotação (kNm/m).

2.3.2 Análise de estabilidade interna.

Segundo ELIAS *et al* (2001), a ruptura interna pode ocorrer quando as solicitações impostas ao reforço são superiores àquelas que o mesmo pode suportar, ou quando há o escorregamento do reforço na massa de solo por insuficiência de ancoragem.

Para evitar a ruptura interna, o valor da tensão máxima atuante $T_{m\acute{a}x}$ não deverá ser superior ao menor valor esperado para resistência de projeto do geossintético T_d , majorado por um fator de segurança.

A estabilidade interna deverá atender aos seguintes fatores de segurança (ELIAS *et al*, 2001),:

$$\begin{aligned} \text{a) Ruptura do reforço: } T_d &\geq T_{m\acute{a}x} FS & (15) \\ FS &\geq 1,5 \text{ (obras permanentes e cr\acute{it}icas)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Arrancamento: } P_r &\geq T_{\text{máx}} \text{ FS} & (16) \\ \text{FS} &\geq 1,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) Estabilidade das conexões: } P_{r,o} &\geq T_o \text{ FS} & (17) \\ \text{FS} &\geq 1,5 \end{aligned}$$

Sendo:

$T_{\text{máx}}$ = Tensão máxima atuante;

T_d = Resistência de projeto do geossintético;

P_r = Resistência ao arrancamento do reforço;

$P_{r,o}$ = Resistência admissível da conexão;

T_o = Solicitação máxima do reforço junto à face.

Segundo EHRlich e MITCHELL (1994), a tensão ou deformação na condição de equilíbrio solo-reforço depende da razão entre os valores de rigidez do reforço e do solo, denominada índice de rigidez relativa (S_i):

$$S_i = \frac{E_r A_r}{k P_a S_v S_h} \quad (18)$$

Sendo:

E_r = módulo de elasticidade do reforço (kPa);

A_r = Área da seção transversal do reforço (m^2);

k = parâmetro de módulo tangente inicial do solo (DUNCAN *et al.* 1980);

P_a = pressão atmosférica (kPa);

S_v = espaçamento vertical entre reforços (m);

S_h = espaçamento horizontal entre reforços (m).

2.3.3 Dimensionamento.

Quanto ao dimensionamento, inicialmente, será apresentado o método de JEWELL (1991), que permite a determinação do comprimento dos reforços e dos espaçamentos verticais, a partir do conhecimento dos parâmetros geométricos do maciço, das características geométricas do maciço, das características geotécnicas do solo e das características mecânicas dos reforços. JEWELL (1991) propôs ábacos para o dimensionamento de taludes íngremes, através de superfícies de deslizamento em forma de espiral logarítmica.

Esse método foi escolhido porque é simplificado e segue um roteiro simples, o que facilita a elaboração de algoritmos de programação.

2.3.3.1 Método de JEWELL (1991).

JEWELL (1991), analisando o problema de maciços de solo reforçado, conforme a Figura 6, relatou que o seu método de cálculo permite a consideração ou não de poropressões, definidas por:

$$r_u = \frac{u}{\gamma z} \quad (19)$$

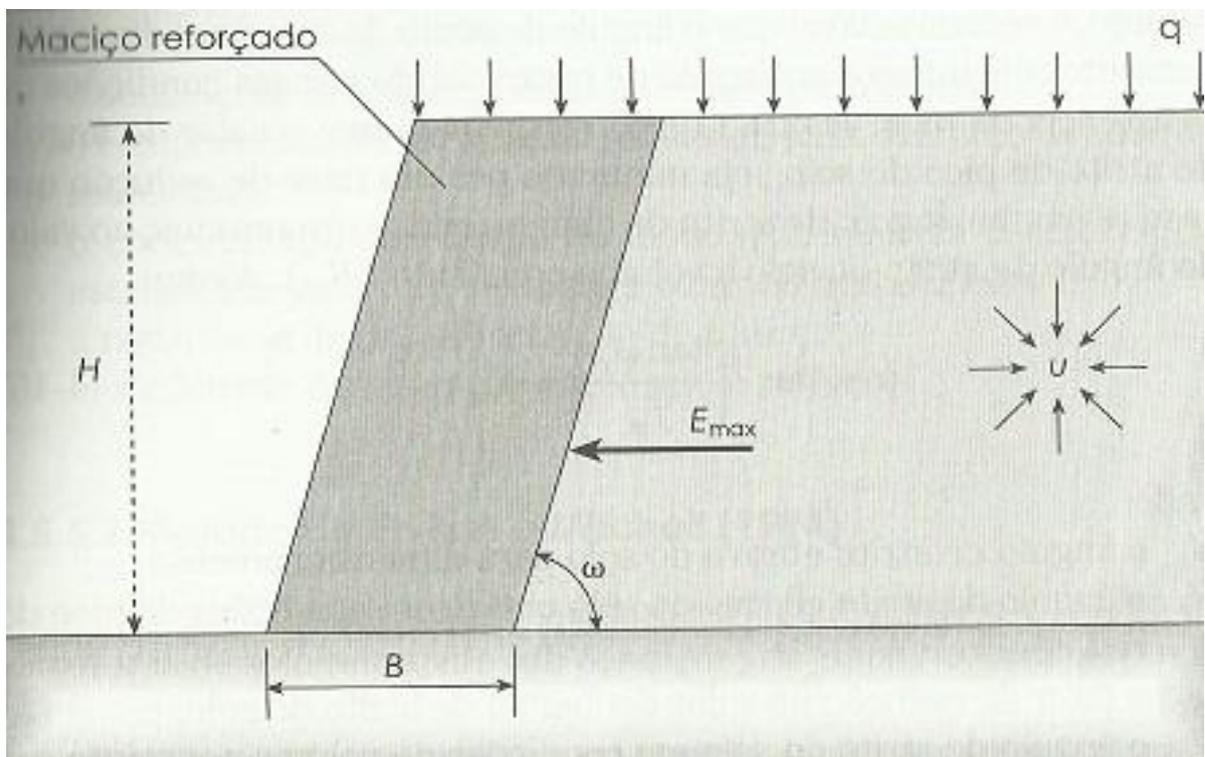


Figura 6 – Características do problema analisado por Jewell (1991), reforço de talude inclinado.

Fonte: JEWELL, 1991.

Onde:

r_u = poropressão;

z = profundidade do elemento de solo considerado.

Pode-se considerar uma sobrecarga uniformemente distribuída no terrapleno, ou seja:

$$H_{eq} = H + h_o \quad (20)$$

Onde:

H_{eq} = altura equivalente do terrapleno levando em conta a sobrecarga na superfície;

H = altura real do terrapleno;

h_0 = espessura de solo equivalente à sobrecarga aplicada na superfície do terrapleno.

$$h_0 = \frac{q}{\gamma} \quad (21)$$

Onde:

q = sobrecarga uniforme distribuída na superfície do terrapleno;

γ = peso específico do solo.

Jewell (1991) recomenda que o ângulo de atrito do solo seja minorado:

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{tg\phi}{f} \right) \quad (22)$$

Onde:

ϕ' = ângulo de atrito efetivo para o dimensionamento;

ϕ = ângulo de atrito efetivo do solo em condições de pico de resistência;

f = fator de redução.

O espaçamento entre camadas horizontais de reforços é adotado como constante e calculado por:

$$S_v = \frac{T_d}{k_d \gamma H_{eq}} \quad (23)$$

Sendo:

$$K_d = \frac{k_{req}}{1 - L_b/L_r} \quad (24)$$

$$L_b = \left(\frac{T_d}{2 \gamma H} \right) \left(\frac{1}{1 - r_u} \right) \left(\frac{1}{f_b tg\phi'} \right) \quad (25)$$

Onde:

K_d = coeficiente de empuxo usado no dimensionamento;

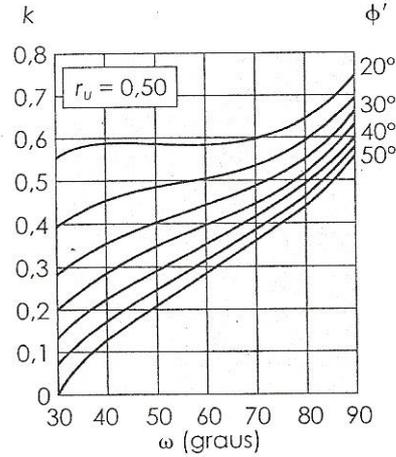
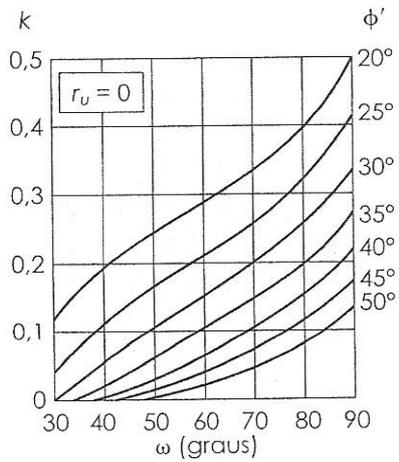
L_b = comprimento de ancoragem requerido para o reforço na base da estrutura;

T_d = resistência de projeto à tração da geogrelha;

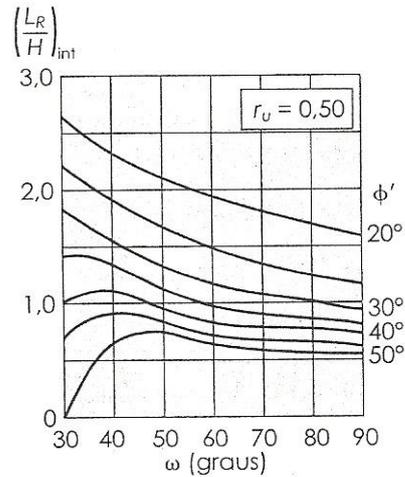
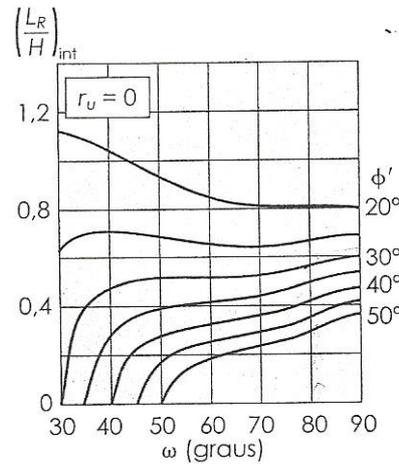
f_b = coeficiente de interação entre o solo e a geogrelha.

Os valores do coeficiente de empuxo horizontal k_{req} e do comprimento dos reforços L_r estão disponíveis nos ábacos da Figura 7.

(a) Coeficiente de empuxo



(b) Estabilidade interna



(c) Deslizamento ao longo da base

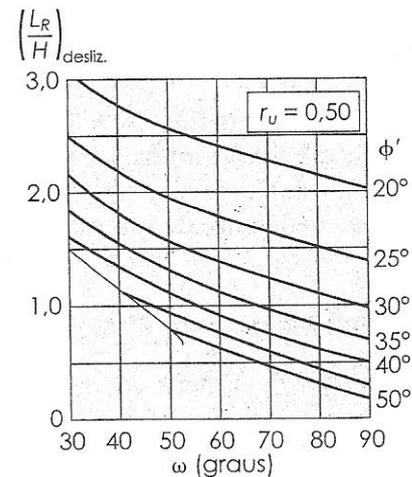
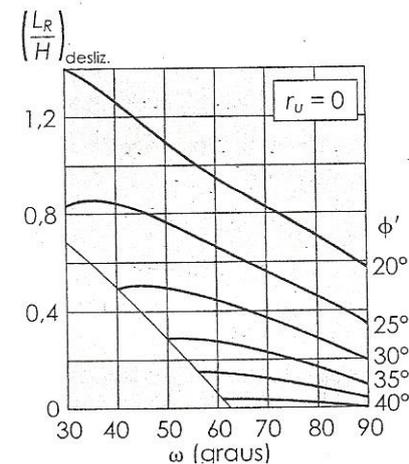


Figura 7 – Ábacos para o dimensionamento de taludes íngremes. a) Cálculo do coeficiente de empuxo k . b) cálculo do comprimento do reforço de modo a atender às condições de estabilidade interna. c) cálculo do comprimento do reforço de modo a atender às condições de segurança contra o deslizamento da base. Como observação entre os valores de L_r das alíneas de “b)” e “c)” deve-se considerar o maior valor. Fonte: JEWELL, 1991.

Os ábacos para a determinação de K_{req} (empuxo horizontal) podem ser obtidos para valores de de poropressão (r_u) iguais a 0,0 ou 0,5, conforme o caso. O comprimento de reforço (L_r) pode ser determinado de modo a atender a estabilidade interna da estrutura de reforço com geogrelhas, bem como atender a segurança contra o deslizamento da base, devendo-se adotar o maior valor entre eles, conforme Figura 7.

2.3.3.2 Método de EHRlich e MITCHELL (1994).

Os reforços com geogrelha devem ser calculados para evitar a ruptura por tração ou o arrancamento da zona resistente. O comprimento, a resistência e a quantidade de reforços são determinados com base na tensão máxima nos reforços $T_{máx}$.

Os cálculos são iterativos em relação a $T_{máx}$ e A_r (seção transversal dos reforços de geogrelha), pois as tensões são dependentes da rigidez relativa solo-reforço. Assim, é necessário utilizar os fatores de segurança FS calculados utilizando-se o procedimento convencional.

Como o método é iterativo, utiliza-se um parâmetro inicial, que reflete a deformabilidade do reforço:

$$\beta = \frac{(\sigma'_{zc}/P_a) n}{S_i} \quad (26)$$

Sendo:

β = parâmetro inicial que representa a deformabilidade do reforço;

n = módulo expoente da curva tensão-deformação do solo (DUNCAN *et al*, 1980);

S_i = índice de rigidez relativa solo-reforço;

P_a = Pressão atmosférica;

σ'_{zc} = Tensão na profundidade da cota “z”;

σ'_z = Tensão vertical geostática no nível do reforço.

Como S_i é função de A_r (área da seção transversal dos reforços de geogrelha) a determinação de $T_{máx}$ dá-se por um processo iterativo.

No caso em que σ'_{zc} é inferior a tensão geostática, tem-se $\sigma'_z = \sigma'_{zc}$ e a tensão vertical ao final da construção σ'_z pode ser determinada considerando a excentricidade da resultante das tensões na base. A expressão é:

$$\sigma'_{z} = \frac{\gamma' z}{1 - \left(\frac{k_a}{3}\right) \left(\frac{z}{L_r}\right)^2} \quad (27)$$

Onde:

L_r = comprimento dos reforços de geogrelha;

K_a = coeficiente do empuxo ativo.

Com base na teoria supracitada, o método de EHRLICH e MITCHELL (1994) possui o seguinte roteiro:

a) Cálculo da tensão vertical induzida pela compactação.

$$V_0 = \frac{1 - \text{sen}\phi'}{2 - \text{sen}\phi'} \quad (28)$$

$$N_\gamma = \text{tg}(45^\circ + \phi'/2) (\text{tg}^4(45^\circ + \phi'/2) - 1) \quad (29)$$

Sendo o valor da tensão vertical induzida pela compactação igual a:

$$\sigma'_{zc} = (1 - v_0) (1 + K_a) (1/2 \gamma' (Q N_\gamma)/L)^{-1} \quad (30)$$

b) Cálculo da tensão vertical geostática no nível do reforço.

$$\sigma'_{z} = \frac{\gamma' z}{1 - \left(\frac{k_a}{3}\right) \left(\frac{z}{L_r}\right)^2} \quad (31)$$

Sendo:

γ' = peso específico do solo compactado;

z = profundidade no solo;

c) Cálculo da tensão que σ'_{zc} .

Para profundidades nas quais $\sigma'_z < \sigma'_{zc}$, tem-se se $\sigma'_z = \sigma'_{zc}$.

d) Cálculo de β .

Somente na primeira iteração se calcula β , para isto, adota-se um valor adequado de S_i , de acordo com o tipo de reforço. Para geogrelhas adota-se $S_i = 0,03$ (VERTEMATTI, 2004. p. 120).

$$\text{Então calcula-se: } \beta = \frac{(\sigma'_{zc}/P_a) n}{S_i} \quad (32)$$

Para primeira iteração considera-se:

$$\beta = \frac{(\sigma'_{zc}/P_a) 0,5}{0,03} \quad \text{e recalculá-se o valor de } S_i.$$

Nas demais iterações:

$$\beta = \frac{(\sigma'_{zc}/P_a) 0,5}{S_i}$$

$$\text{Onde, } S_i = \frac{E_r A_r}{k P_a S_v S_h} \quad (33)$$

e) Cálculo da Tração máxima ($T_{\text{máx}}$).

O valor de $T_{\text{máx}}$ é determinado para cada nível de reforço de geogrelha, considerando os valores de β , σ'_z e σ'_{zc} , a partir dos ábacos da Figura 8 a seguir:

f) Cálculo das características dos reforços.

Com as tensões máximas deve-se definir as características das geogrelhas.

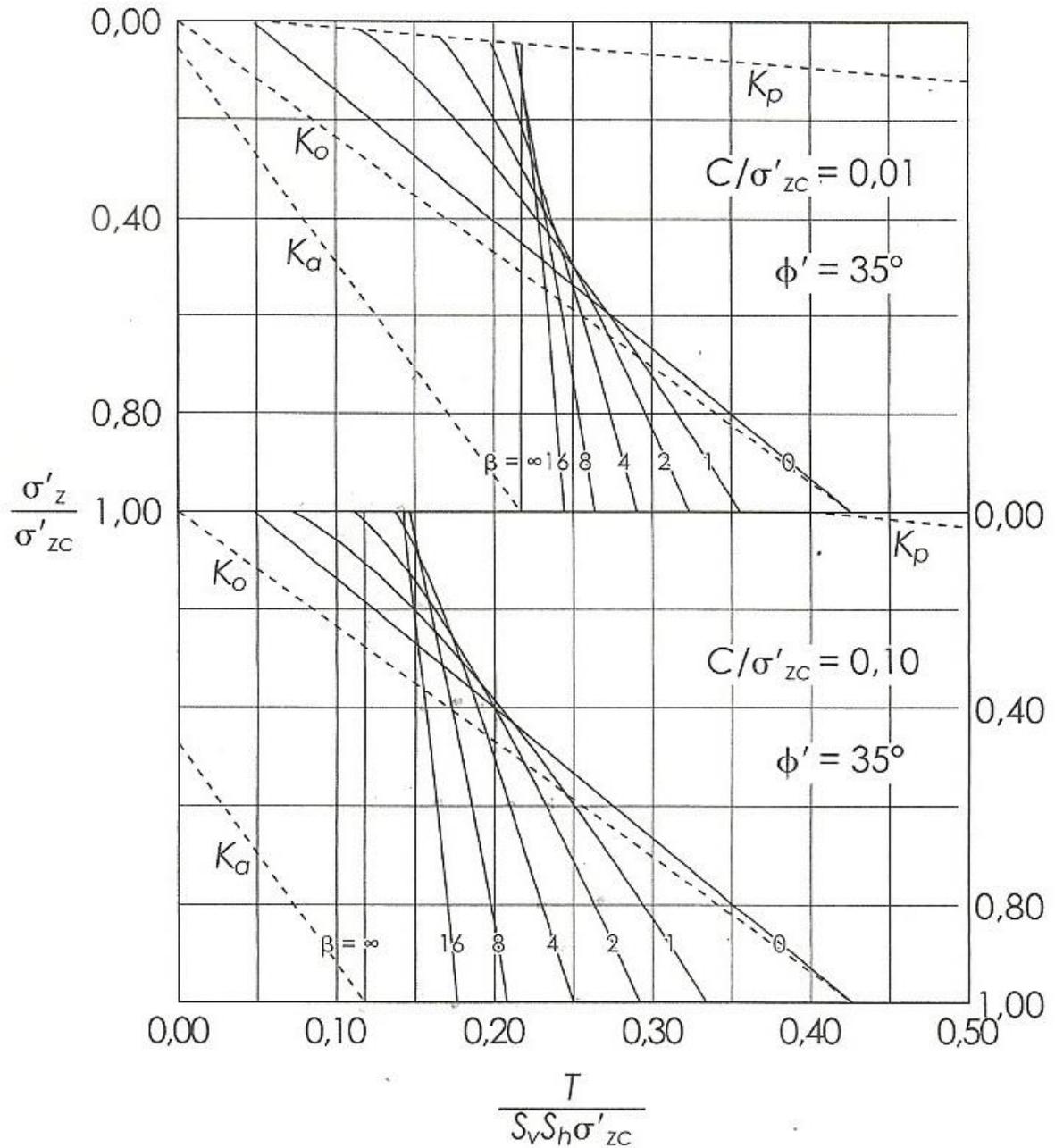


Figura 8 – Ábacos para determinação de T_{\max} em maciços reforçados com solos coesivos.
Fonte: DANTAS e EHRLICH, 1999 – *Apud* VERTEMATTI, 2004.

g) Refinamento do cálculo.

A partir das características das geogrelhas definidas pela primeira iteração, é possível calcular o valor de S_i . Tendo em vista que os valores de S_i calculados serão diferentes dos definidos na primeira iteração, deve-se repetir as etapas “b” até “e”. O processo iterativo segue até que os valores calculados e assumidos para S_i sejam coerentes e conduzam a valores de $T_{m\acute{a}x}$ semelhantes.

h) Resistência à tração admissível no reforço.

Considerá-se o FS = 1,5 com respeito à ruptura tração da geogrelha e aplica-se na resistência da mesma ($T_d = T_r \times 1,5$).

i) Estabilidade ao arrancamento.

Calcula-se o valor de:

$$L_e = L_r - (H - z) [\text{tg}(45^\circ - \phi/2) - 1/\text{tg}\omega] \quad (34)$$

Onde:

L_e = comprimento de ancoragem disponível além da cunha ativa;

z = profundidade de cada reforço.

E finalmente calcula-se o valor de P_r , conforme demonstrado no item 2.2.1:

$$P_r = 2 f^* \alpha \sigma'_v L_e \geq \text{FS } T_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

Onde:

P_r = resistência ao arrancamento da geogrelha;

α = fator de efeito de escala;

f^* = fator de resistência ao arrancamento da geogrelha.

Este f^* pode ser determinado com precisão através de ensaios de arrancamento de geogrelha em laboratório, com equipamento reduzido ou através da fórmula de CHRISTOPHER *et al* (1990):

$$f^* = f_a \operatorname{tg}\emptyset \quad (35)$$

Onde:

f_a = coeficiente de aderência.

Assim, conclui-se o dimensionamento calculando o fator de segurança para cada camada de reforço de geogrelha, através da expressão:

$$FS = \frac{P_r}{T_{máx}} \quad (36)$$

2.3.3.3 Análise para Verificação do Arrancamento.

Segundo CHRISTOPHER *et al* (1990), a resistência ao arrancamento por unidade de comprimento transversal do reforço (P_r) pode ser calculada pela expressão:

$$P_r = 2 f^* \alpha \sigma_v' L_e \geq FS T_{máx} \quad (1)$$

$$f^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \mu^* \cdot \alpha_f \quad (37)$$

Onde:

F_q = fator de capacidade de carga para o embutimento (ou carregamento);

α_β = fator geométrico estrutural para resistência passiva;

μ^* = coeficiente de atrito aparente na interface solo/geogrelha;

α_f = fator geométrico estrutural para resistência friccional.

2.4 Ensaios de arrancamento.

Os ensaios de arrancamento podem ser realizados em campo ou no laboratório. Os parâmetros dos ensaios podem ser obtidos também por correlações empíricas. Os ensaios de campo envolvem o manuseio de grandes quantidades de solo, cerca de 0,5 m³, dependendo do equipamento, possuem custos elevados e necessitam de tempo disponível. Os ensaios no laboratório apresentam menores custos e são mais rápidos, além de apresentarem condições de contorno controláveis, sendo, por isto, os mais utilizados atualmente para quantificação da interação solo-geogrelha, isto é, a determinação da resistência de interface (OCHIAI et al, 1996; SUGIMOTO, 2001; TEIXEIRA, 2003; KAKUDA, 2005; e outros).

Resultados de ensaios de arrancamento têm sido utilizados, não somente para o esclarecimento do mecanismo de interação entre solo-inclusão, mas também para projetos e análises do comportamento de estrutura de solo reforçado. Assim, as condições em que são realizados estes ensaios tornam-se de grande importância para a determinação desses parâmetros.

A boa técnica e a responsabilidade civil exigem o respaldo adequado para a elaboração de projetos de reforço de aterros, daí a necessidade de realização dos ensaios de arrancamento para obtenção de parâmetros confiáveis que sirvam de base para o projeto em pauta.

2.5 Mecanismo de interação solo-inclusão no ensaio de arrancamento.

A resistência de interface solo-inclusão é determinada em ensaios de laboratório: de arrancamento e de cisalhamento direto. As Figuras 9 (a) e 9 (b) representam esquemas desses ensaios. Variações geométricas desses ensaios são encontradas na literatura, como, por exemplo, a que impõe uma inclinação à inclusão (JEWELL, 1980).

Conforme os estudos de TUPA (1994), no início da utilização de geossintéticos pela Geotécnica, na ausência de resultados de ensaios, era comum a utilização da relação $\delta = 2/3 \phi$, para solos granulares, sendo “ δ ” o ângulo de atrito entre solo e reforço geossintético e “ ϕ ” o ângulo de atrito interno do solo, valor considerado conservador, conforme as pesquisas de PALMEIRA (1987) e GOMES (1993). Também BUENO e CARVALHO (1986) ensaiaram um solo saprolítico com ângulo de atrito (ϕ) de 27°, em

interação com um geotêxtil não-tecido, e obtiveram um ângulo de atrito de interface (δ) de 36° .

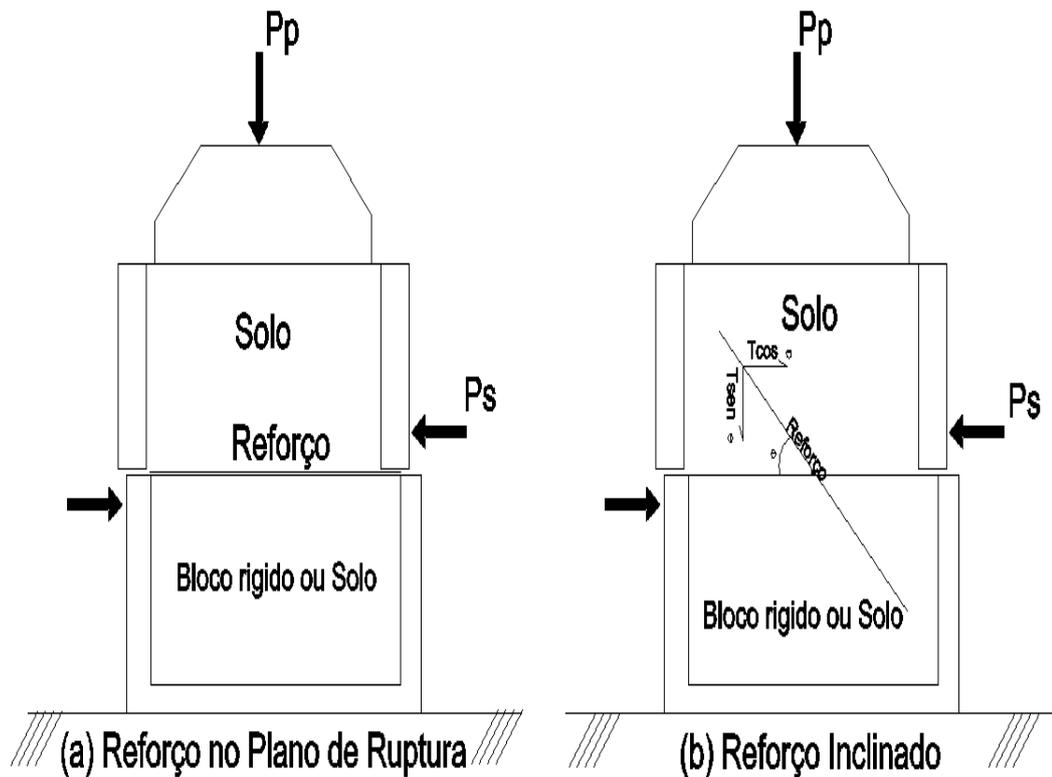


Figura 9 – Representação de ensaios de cisalhamento com inclusão no plano de cisalhamento; (a) com inclusão inclinada e (b) com relação ao plano cisalhante. Fonte: INGOLD, 1983.

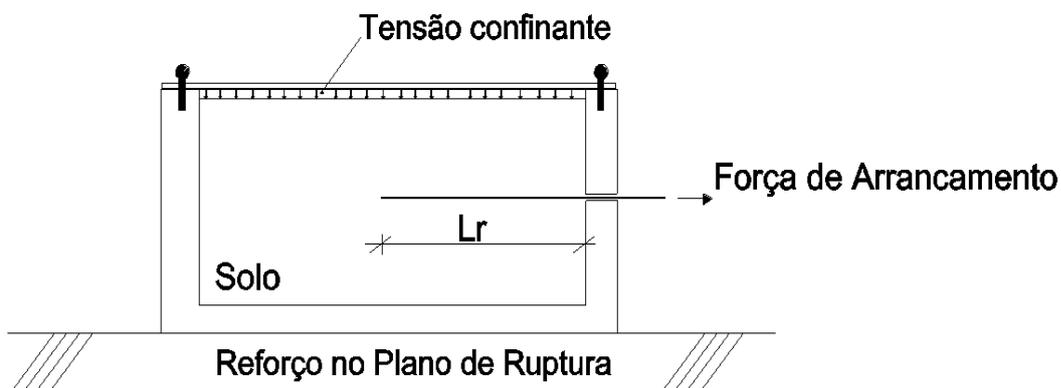


Figura 10 – Representação do ensaio de arrancamento. Fonte: TEIXEIRA, 2003.

Os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento, mostrados nas Figuras 9 e

10, respectivamente, diferem-se entre si pelos mecanismos de ruptura impostos ao corpo de prova, pelas condições de contorno e pela forma com que os esforços são aplicados aos geossintéticos.

A Figura 11 mostra uma estrutura típica de solo reforçado com geossintéticos, em que o mecanismo observado na região A pode ser representado pelo ensaio de cisalhamento direto. Por sua vez, o mecanismo de ruptura que ocorre na região B pode ser representado por ensaio de arrancamento, em que a inclusão é disposta horizontalmente. Na região C, o mecanismo de ruptura pode ser o de cisalhamento direto com a inclusão disposta inclinada relativa ao plano de ruptura (TEIXEIRA, 2003).

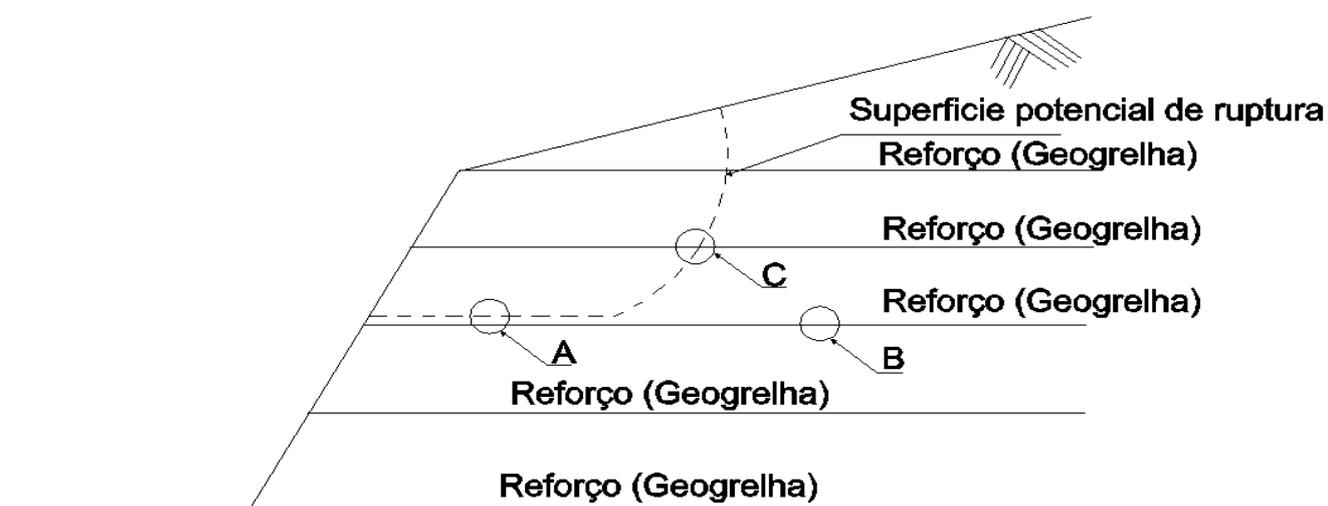


Figura 11 – Representação do ensaio de arrancamento. Na região A o mecanismo de ruptura pode ser representado pelo ensaio de cisalhamento direto. Na região B pode ser representado por ensaio de arrancamento. Na região C, o mecanismo de ruptura pode ser o de cisalhamento direto.

Fonte: PALMEIRA e MILLIGAN, 1989.

Uma das razões que justifica as possíveis diferenças nos resultados obtidos entre os ensaios de cisalhamento direto e arrancamento é o fato da mobilização da deformação cisalhante ser teoricamente uniformemente distribuída ao longo da interface solo-inclusão, enquanto no ensaio de arrancamento, a mobilização da deformação é a combinação da deformação de interface solo-inclusão e o alongamento do geossintético. Nos casos em que se utiliza a geogrelha como reforço, o ensaio de arrancamento é o que melhor simula os mecanismos de interação solo-inclusão, uma vez que a geometria de grelha e a baixa rigidez à flexão dos membros transversais fazem com que os resultados

obtidos nos ensaios de cisalhamento direto não simulam as condições que estão sujeitas as geogrelhas no maciço reforçado (PALMEIRA e MILLIGAN, 1989).

2.6 Ensaio de arrancamento em laboratório.

Um equipamento de arrancamento típico é constituído de uma caixa metálica rígida com seção transversal retangular. A força de tração no elemento de reforço é aplicada por uma força motriz, que possibilita o controle da velocidade do ensaio. A tensão confinante é aplicada por um colchão inflável na maioria dos modelos propostos na literatura.

Uma adaptação bem sucedida foi elaborada por TEIXEIRA (2003), Figura 12, criando um equipamento similar de pequenas dimensões que apresentou bons resultados em laboratório, com ensaios de arrancamento de geogrelha.

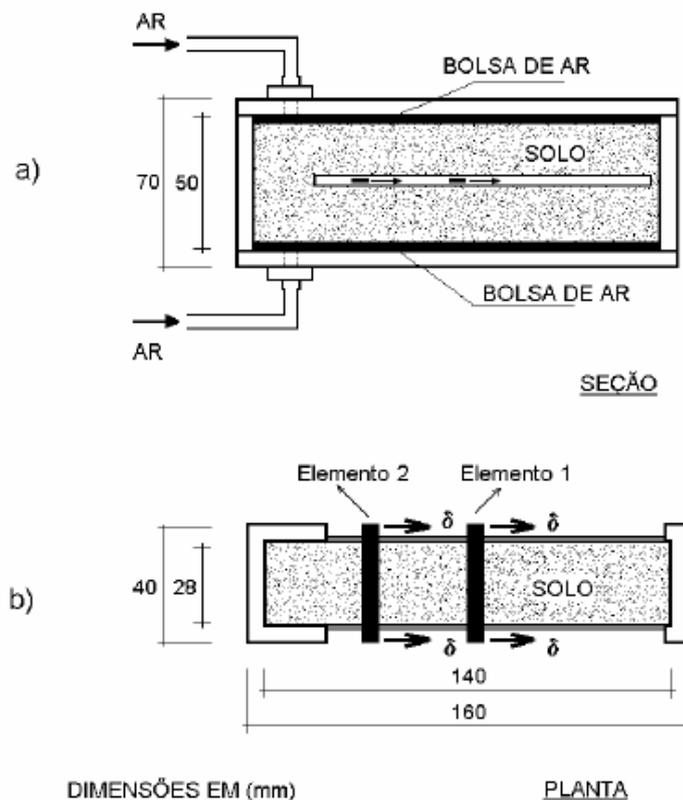


Figura 12 – Caixa de ensaio de arrancamento em elementos transversais; a) Vista em corte e b) Vista em planta.

Fonte: TEIXEIRA, 2003.

A instrumentação básica do ensaio consiste de células de cargas utilizadas para

medir a força de arrancamento, células de tensão total, piezômetros e transdutores de deslocamentos internos.

Vários autores desenvolveram seus próprios equipamentos, acarretando diferentes dimensões e condições de contorno do ensaio. No quadro a seguir, são apresentadas as características dos equipamentos desenvolvidos ao longo do tempo.

Quadro 1 – Características de equipamentos de ensaio de arrancamento em laboratório, projetados por alguns autores, ao longo do tempo.

Autores	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Sistema de aplicação de sobrecarga	Medidas efetuadas
Christopher e Berg (1990)	310	600	1220	Bolsa de ar	Deslocamento e força de arrancamento
Farrag <i>et al</i> (1993)	760	900	1520	Bolsa de ar	Deslocamento, força de arrancamento e velocidade
Bergado e Chai (1994)	510	750	1250	Bolsa de ar	Deformação, deslocamento, dilatação e força de arrancamento
Alfaro <i>et al</i> (1995)	400	600	1500	Bolsa de ar	Deformação, deslocamento, dilatação e força de arrancamento
Chang <i>et al</i> (1995)	150	500	400	Bolsa de ar	Deslocamento, deformação e força de arrancamento
Ladeira e Lopes (1995)	600	1000	1530	Cilindros hidráulicos	Deslocamento e força de arrancamento
Miyata (1996)	220	325	660	Bolsa de ar	Dilatação, deslocamento e força de arrancamento
Ochiai <i>et al</i> (1996)	200	400	600	Bolsa de ar	Deslocamento frontal e força de arrancamento
Baker <i>et al</i> (1998)	152	610	610	Pistão pneumático	Deslocamento frontal e força de arrancamento
Teixeira e Bueno (1999)	500	700	1500	Bolsa de ar	Força de arrancamento, tensões no solo e deslocamentos
Sugimoto <i>et al</i> (2001)	625	300	680	Bolsa de ar	Deslocamentos, força de arrancamento, força na parte frontal e movimento do solo
Teixeira e Bueno (2003)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, tensões no solo e deslocamentos
Nakamura <i>et al</i> (2003)	200	220	500	Bolsa de ar	Deslocamentos nos nós e força de arrancamento

Fonte: TEIXEIRA, 2003.

Os dados, apresentados no Quadro 2, mostram que os equipamentos desenvolvidos pelos diferentes autores, que em função da necessidade de execução do

ensaio com menores custos e tempo, alguns buscaram desenvolver equipamentos em pequenas dimensões. Quanto à forma de aplicação da tensão confinante, a utilização de bolsa de ar é a mais utilizada nas pesquisas, pois, resultam em distribuições de tensões mais uniformes sobre a camada de solo compactado, conforme TEIXEIRA (2003).

2.6.1 Ensaios de pequeno porte (equipamento reduzido de laboratório).

TEIXEIRA e BUENO (1999) e NAKAMURA *et al* (2003) desenvolveram equipamentos em dimensões reduzidas para realização de ensaios de arrancamento de geogrelhas, tendo em vista a facilidade desses equipamentos no controle de umidade, na compactação do solo e na rapidez de realização.

NAKAMURA *et al* (2003) utilizaram uma caixa para ensaio de arrancamento com dimensões de 500 mm de comprimento, 220 mm de largura e 200 mm de profundidade. As paredes internas da caixa foram lubrificadas com graxa e revestidas com membranas de borracha, assim minimizando o efeito de atrito entre o solo e as paredes internas do equipamento. A abertura para aplicação da força de arrancamento foi disposta a meia profundidade e, para possibilitar uma mudança da abertura (t), foi acoplado um dispositivo removível conforme apresentado na Figura 13.

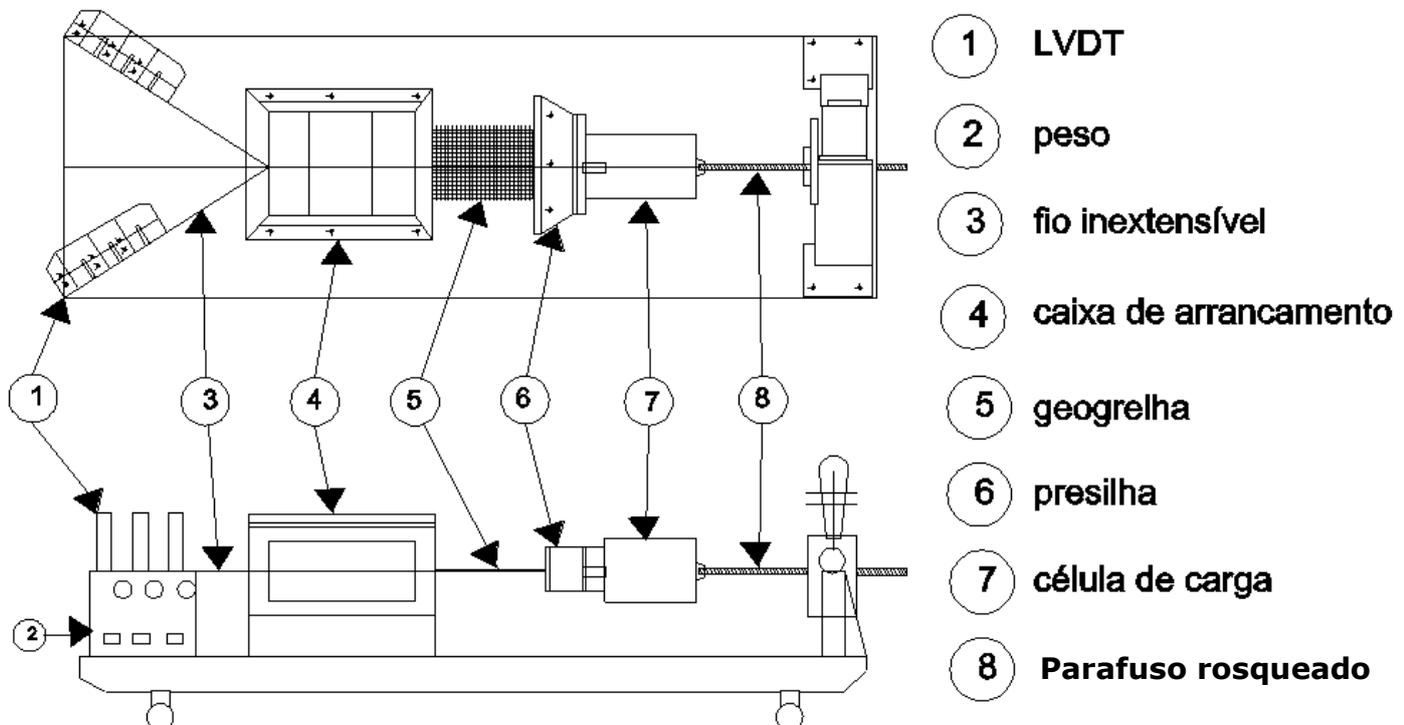


Figura 13 – Equipamento de pequenas dimensões.
 Fonte: NAKAMURA *et al*, 2003.

TEIXEIRA e BUENO (1999) projetaram um equipamento de pequeno porte, cujas dimensões da caixa de ensaio são de 250 mm de comprimento por 300 mm de largura e 150 mm de altura, como pode ser observado na Figura 14.

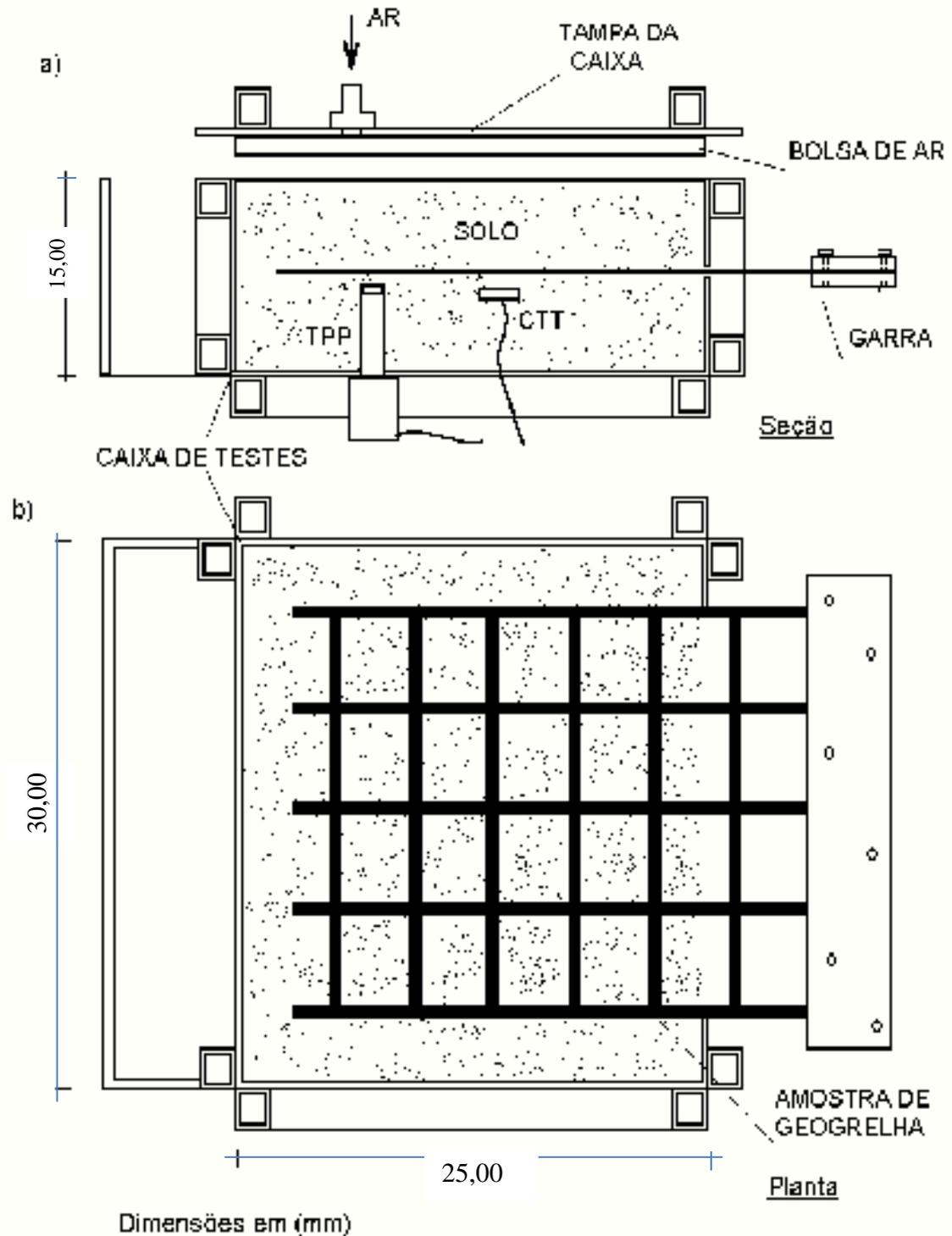


Figura 14 – Caixa de testes de pequeno porte.

Fonte: TEIXEIRA e BUENO, 1999.

A aplicação da força de arrancamento é feita por uma máquina universal de ensaios e, para a aplicação de sobrecarga, utilizou-se uma bolsa inflável acoplada à tampa da caixa, inflada por um compressor elétrico, simulando desta forma a tensão de confinamento, controlada por uma célula de carga no interior da caixa de testes.

Outros autores como SUGIMOTO *et al* (2001) e ALAGIYANNA *et al* (2001) também realizaram ensaios de arrancamento com equipamentos de dimensões reduzidas em suas pesquisas.

2.7 Efeitos a serem considerados na execução do ensaio de arrancamento.

Devem ser consideradas os seguintes efeitos durante a execução do ensaio de arrancamento de geogrelha:

- a) Efeito da tensão confinante do solo;
- b) Efeitos do tipo de solo;
- c) Efeito da rugosidade da parede interna da caixa;
- d) Espessura da camada de solo acima e abaixo da inclusão; e
- e) Influência da velocidade de ensaio (mm/min).

2.7.1 Efeitos da tensão confinante.

Segundo ALFARO *et al* (1995), a tensão confinante pode afetar tanto a resistência ao arrancamento quanto os deslocamentos relativos entre nós sucessivos, conforme resultados de ensaios de geogrelhas Tensar SR80, inclusas num cascalho bem graduado ($D_{50} = 4,74$ mm), com variação da tensão de confinamento. Verifica-se que um aumento da tensão confinante provoca um aumento do ponto de ruptura de arrancamento e diminui o deslocamento relativo entre os nós e a parede frontal. Os resultados deste estudo estão apresentados nas Figuras 15 e 16.

Conforme os estudos de TEIXEIRA (2003), a tensão confinante pode influenciar no nível de deslocamento necessário para mobilizar a resistência passiva dos elementos transversais, bem como os outros fatores, como o tipo de geogrelha e o tipo de

solo.

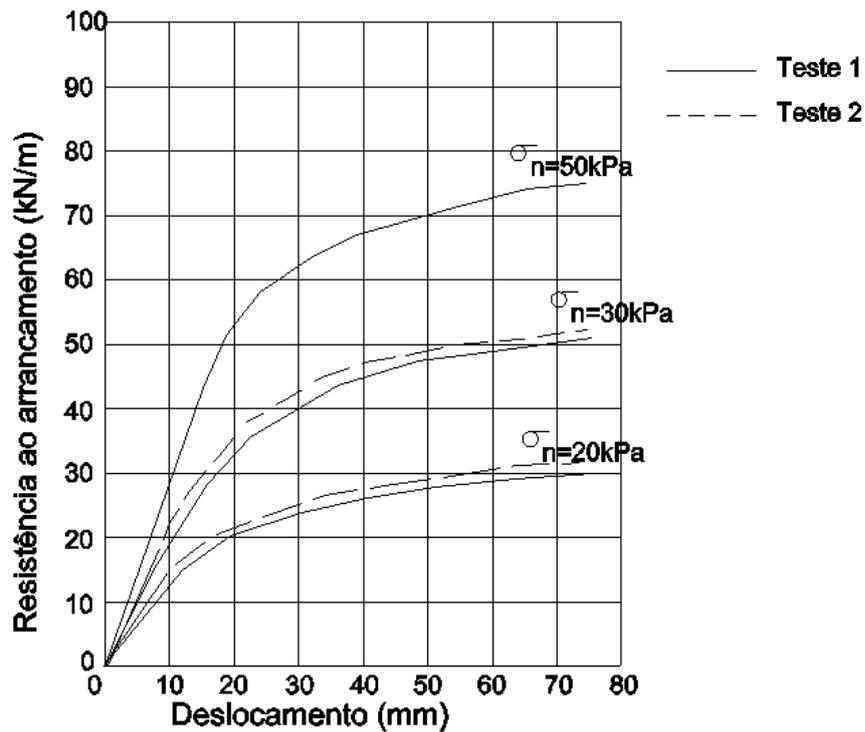


Figura 15 – Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes tensões de confinamento.

Fonte: ALFARO *et al*, 1995.

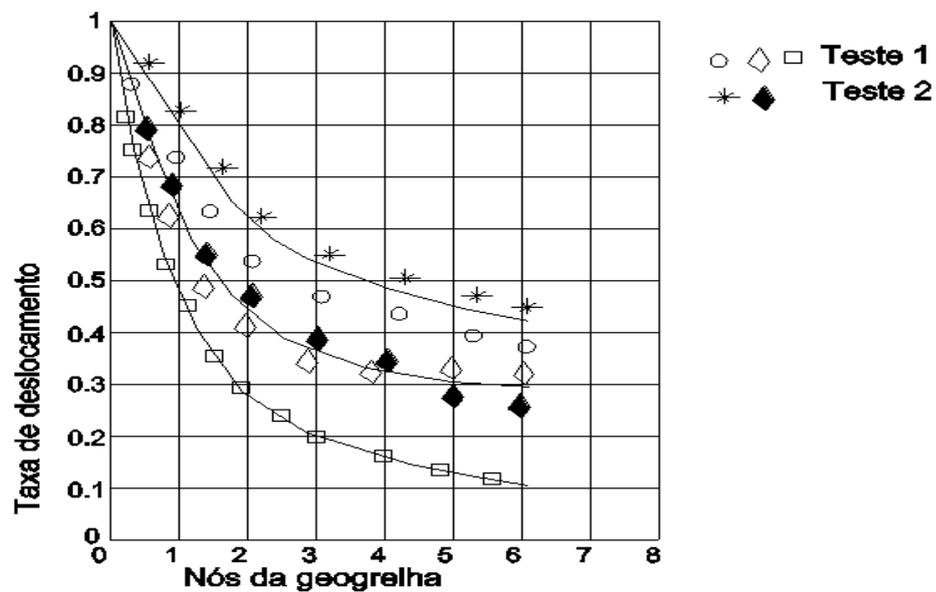


Figura 16 – Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes tensões de confinamento, representado da relação entre taxa de deslocamento e posicionamento dos nós.

Fonte: ALFARO *et al*, 1995.

Ensaio de arrancamento de geogrelhas enterradas em areia constataram que o aumento da tensão confinante provoca um deslocamento para a esquerda da curva da força máxima de arrancamento “versus” deslocamento, ou seja, o aumento da força de arrancamento deve-se ao aumento da rigidez do sistema, Figura 17. Quando a inclinação das curvas aumenta, o material de reforço sofre menores deslocamentos para atingir a resistência de pico ao arrancamento, conforme OCHIAI *et al* (1996).

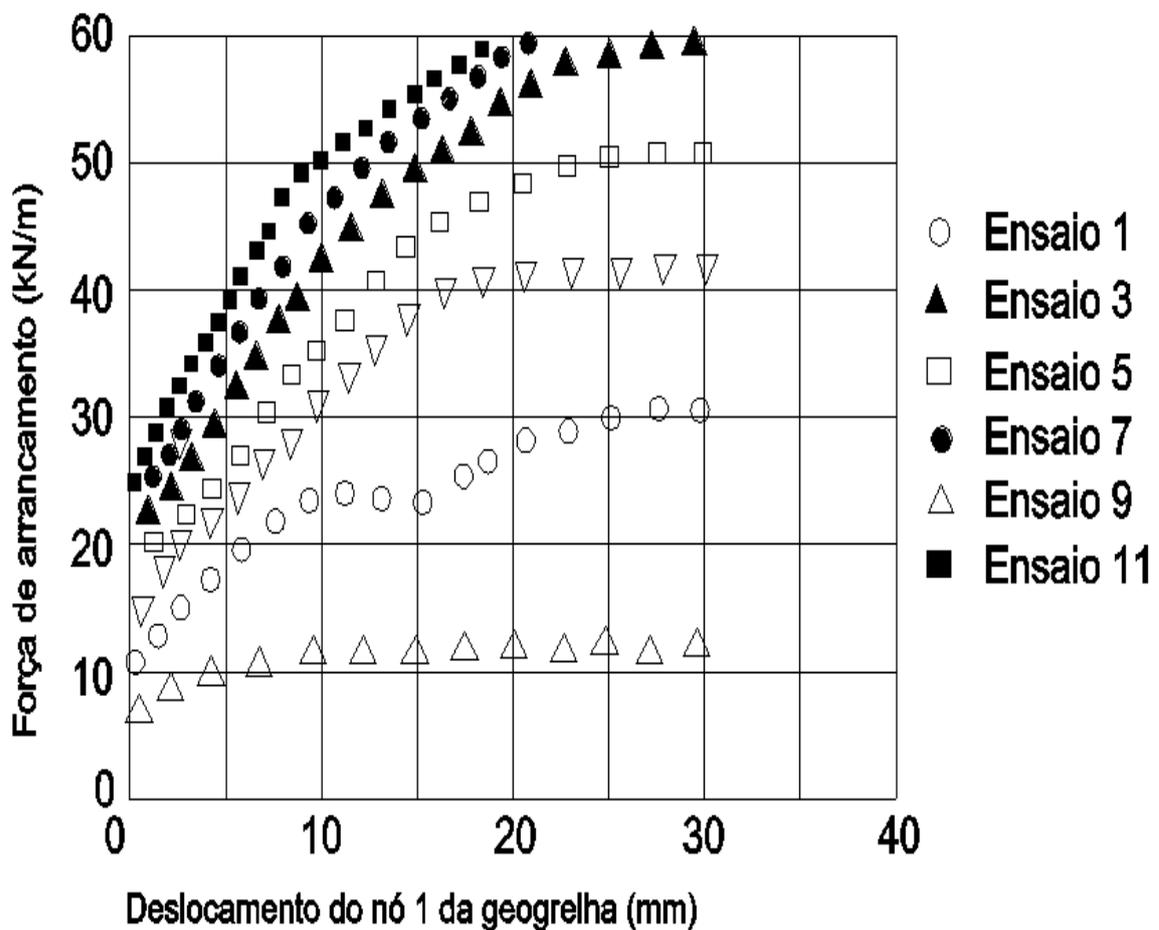


Figura 17 – Relação entre deslocamentos e força de arrancamento para diferentes tensões confinantes.

Fonte: OCHIAI *et al*, 1996.

2.7.2 Efeitos do tipo de solo.

As geogrelhas, quando submetidas ao ensaio de arrancamento, podem estar sujeitos a uma variação de comportamento mecânico, dependendo do tipo de solo utilizado no ensaio (KAKUDA, 2005).

Normalmente, os solos arenosos apresentam maiores resistências ao arrancamento, se comparados com os solos finos. Os fatores relacionados a esse aumento são o ângulo de atrito de interface solo-geogrelha e o ângulo de atrito interno do solo (CHANG *et al*, 1995).

BAUER e SHANG (1993), que realizaram ensaios utilizando quatro tipos de solos (solos arenosos, argilosos, areias argilosas e agregados), constataram que quanto maior o diâmetro das partículas, maior a resistência ao arrancamento. Tal fato foi atribuído parte ao bom entrosamento entre a abertura da grelha e as partículas do solo.

Baseados nos resultados de ensaios, JEWELL *et al* (1984) chegaram às seguintes conclusões, resumidamente:

- a) Nos solos finos, a zona de plastificação pode ser ondulada, adaptando-se aos elementos longitudinais e transversais da grelha, observada na Figura 18a.
- b) À medida que a dimensão da areia aumenta, a superfície de plastificação torna-se plana, apenas tangente aos elementos transversais da grelha, Figura 18b.
- c) Quando o solo contém partículas de dimensões idênticas às das aberturas da grelha, ocorre a inibição do deslizamento do solo ao longo das barras transversais, ocorrendo a zona de plastificação no interior da massa do solo, Figura 18c.
- d) Quando as dimensões dos grãos do solo são tão elevadas que não é possível a sua penetração nas aberturas das grelhas, a resistência na interface torna-se muito baixa, apenas resultante do contato das partículas de solo com o reforço, Figura 18d.

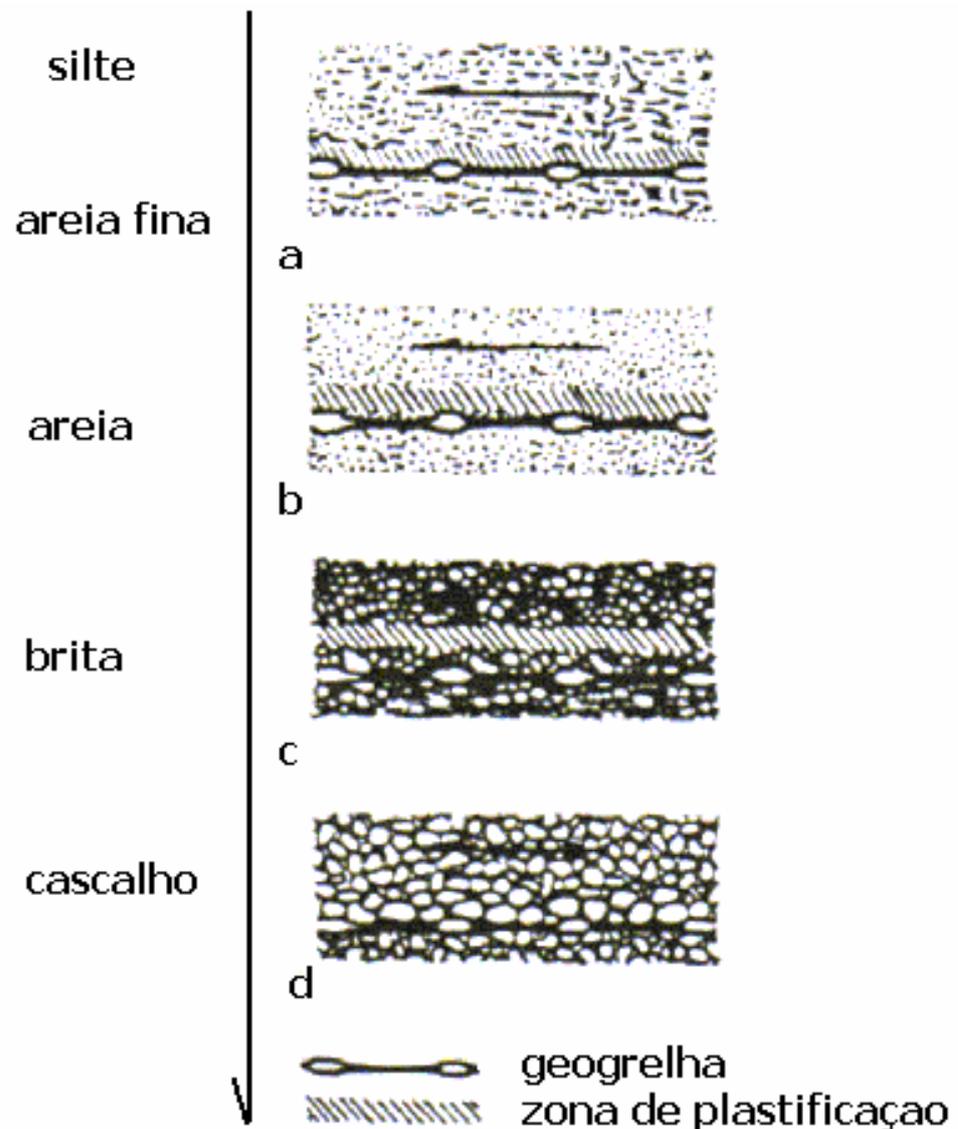


Figura 18 – Influência qualitativa do aumento da dimensão dos grãos do solo em movimento relativo de cisalhamento direto. a) Zona de plastificação ondulada. b) Zona de plastificação plana. c) Plastificação no interior da massa de solo. d) Ausência de zona de plastificação.

Fonte: JEWELL *et al.*, 1984.

CHANG *et al.* (1995) concluíram em suas pesquisas que o tamanho da partícula dos grãos do solo são responsáveis pelas alterações de resultados nos ensaios de arrancamento, entre solos granulares e solos finos, porque os grãos do solo preenchem os vazios das geogrelhas influenciando no desempenho da mesma, conforme demonstrado na Figura 19.

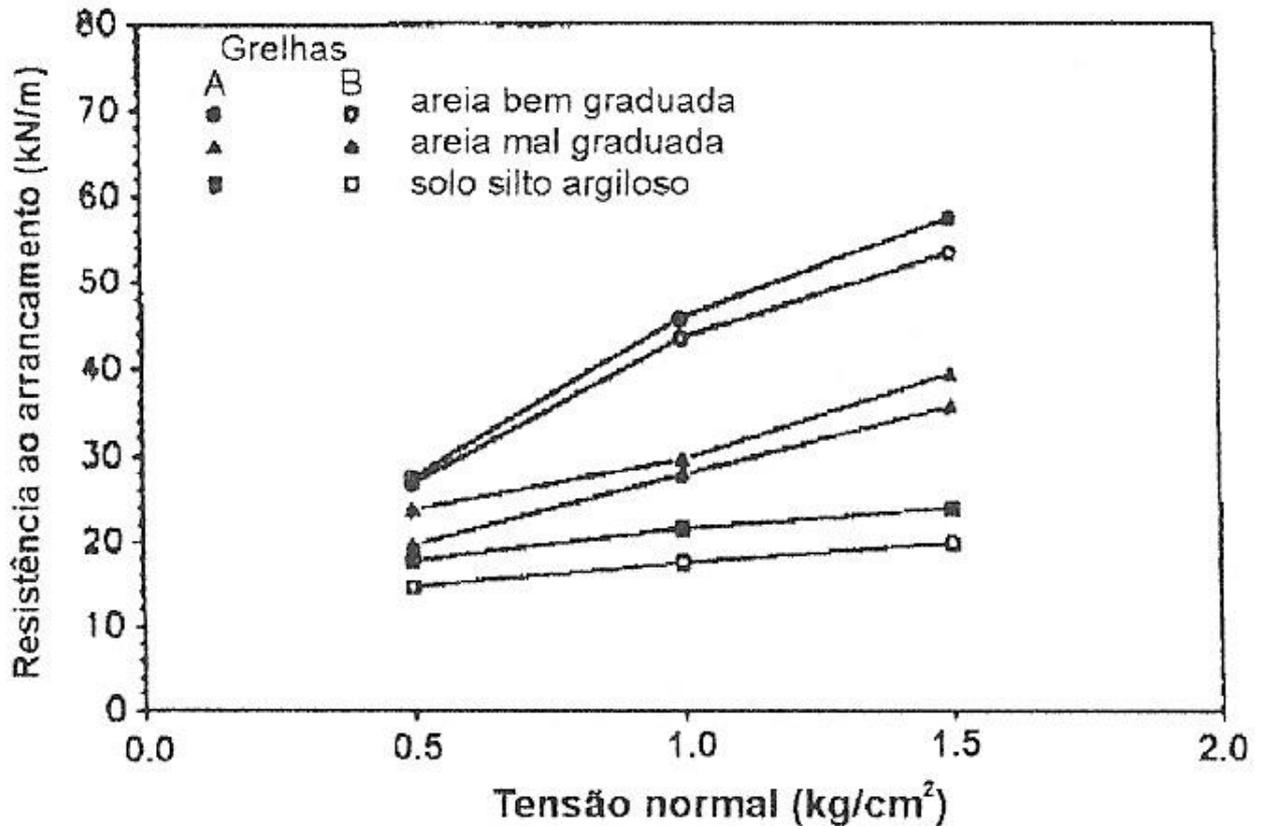


Figura 19 – Resistência ao arrancamento para vários tipos de solos.
Fonte: CHANG *et al.* (1995)

2.7.2.1 Solos arenosos.

PALMEIRA e MILLIGAN (1989) realizaram ensaios com solos arenosos, constatando que a relação entre o diâmetro das partículas dos solos arenosos (D_{50}) e a abertura da grelha (S) afetam os resultados do ensaio de arrancamento. A Figura 20 apresenta resultados de ensaios realizados por PALMEIRA e MILLIGAN (1989), em que foram utilizadas grelhas com diferentes aberturas (S). Observa-se nos gráficos que o aumento da resistência ao arrancamento é crescente com o aumento do espaçamento (S).

As pressões neutras não influenciam nos ensaios de arrancamento com solos arenosos, devido à drenagem natural das partículas (KAKUDA, 2005).

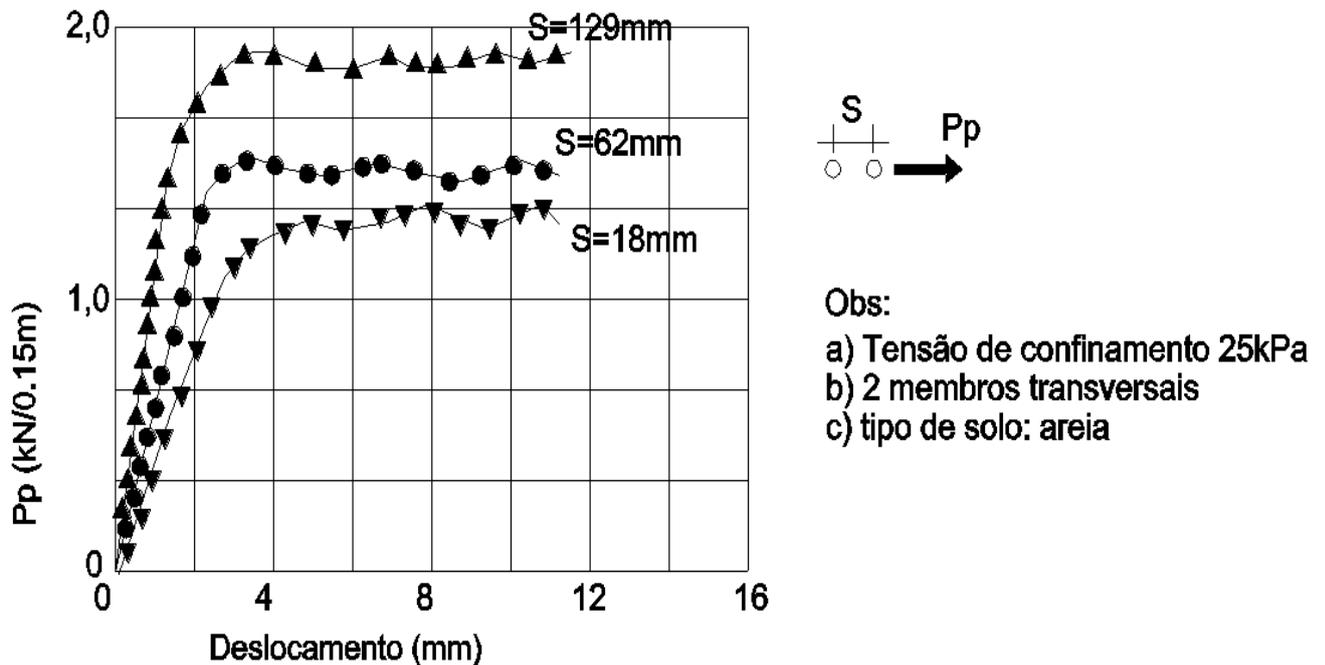


Figura 20 – Resultados de ensaios de arrancamento para diferentes aberturas entre membros transversais de geogrelhas. Constatção de que quanto maior a abertura da grelha maior será a resistência ao arrancamento, isto para solos arenosos.
Fonte: PALMEIRA e MILLIGAN, 1989.

2.7.2.2 Solos coesivos.

Nos ensaios de arrancamento de geogrelhas em solos coesivos, as pressões neutras passam a ter forte influência na resistência ao arrancamento, ao contrário dos solos arenosos (KAKUDA, 2005).

CHRISTOPHER *et al* (1990) verificaram a importância do teor de umidade na realização de testes de arrancamento de geogrelhas em solos coesivos, em condições drenada e não drenada, constatando as alterações na resistência ao arrancamento.

TAN *et al* (2001) realizaram ensaios de arrancamento com geogrelhas e geotêxtil em solos argilosos residuais de Singapura, constatando que o geotêxtil foi útil na dissipação da pressão neutra na interface solo-inclusão.

TEIXEIRA (2003) também realizou ensaios de arrancamento com solos coesivos, constatando a importância do controle de umidade das amostras.

2.7.3 Efeito da rugosidade da parede interna da caixa.

PALMEIRA e MILLIGAN (1989) constataram que o grau de rugosidade da parte interna da parede frontal da caixa de arrancamento pode resultar em valores sobrestimados da relação τ/σ_y , trazendo, por consequência, o aumento da resistência ao arrancamento da inclusão. O aumento da rugosidade da parede frontal provoca um acréscimo no ângulo de atrito de interface entre solo-parede frontal da caixa, conforme o tipo de rugosidade: face áspera, lisa, metal e geomembrana, conforme a Figura 21.

Os autores supracitados recomendam, para minimizar os efeitos de atrito na interface solo-face interna, que sejam colocadas duas geomembranas intercaladas com um material lubrificante em todas as paredes internas da caixa, conforme Figura 22.

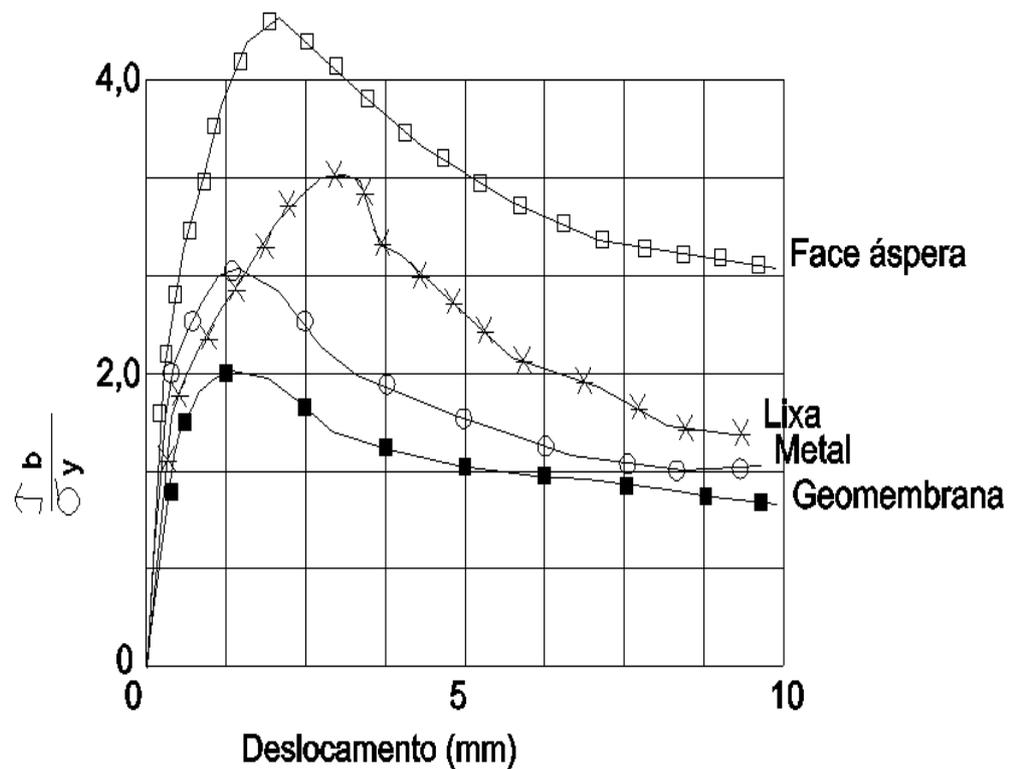


Figura 21 – Relação entre tensão cisalhante e normal vs deslocamento nos ensaios de arrancamento para diferentes rugosidades da parede frontal do equipamento.
Fonte: PALMEIRA e MILLIGAN, 1989.

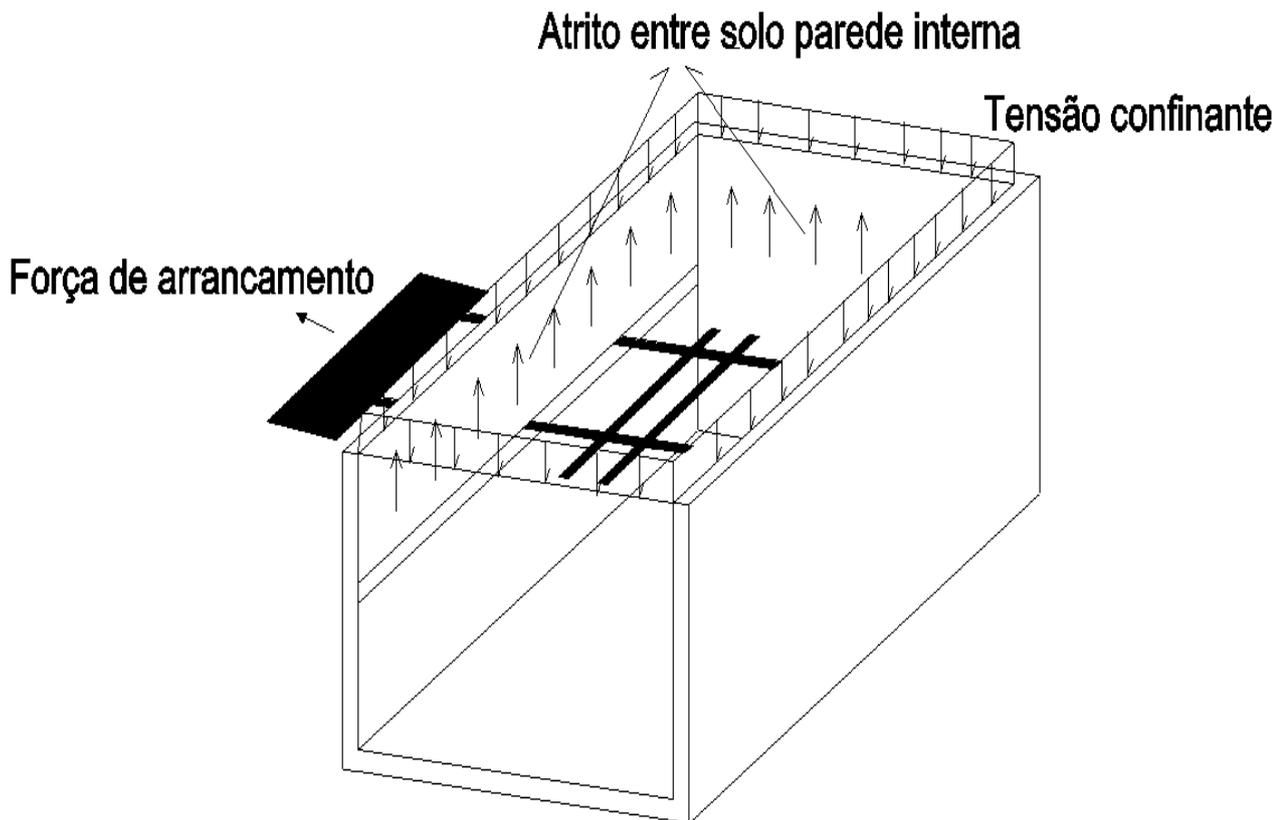


Figura 22 – Representação do atrito nas paredes interna da caixa de arrancamento.
 Fonte: PALMEIRA e MILLIGAN, 1989.

Costa, C.M.L (2004) recomenda a utilização de membrana de látex, similar a utilizada no envolvimento dos corpos de prova do ensaio de Compressão Triaxial, com o intuito de redução do efeito da rugosidade das paredes da caixa de testes de arrancamento.

2.7.4 Espessura da camada de solo acima e abaixo da inclusão.

FARRAG *et al* (1993) realizaram ensaios de arrancamento onde constataram que a espessura da camada de solo acima e abaixo do reforço pode afetar o mecanismo de interação solo-geogrelha, conforme mostrado na Figura 23. Tal fato pode levar a um acréscimo da tensão confinante próximo à superfície do reforço, especialmente quando a espessura da camada não é suficiente para impedir a dilatância do solo.

Para se evitar a influência da altura do solo compactado na resistência ao arrancamento no ensaio em laboratório, vem-se adotando uma espessura superior a cinquenta vezes o diâmetro médio das partículas de solo (TEIXEIRA, 2003).

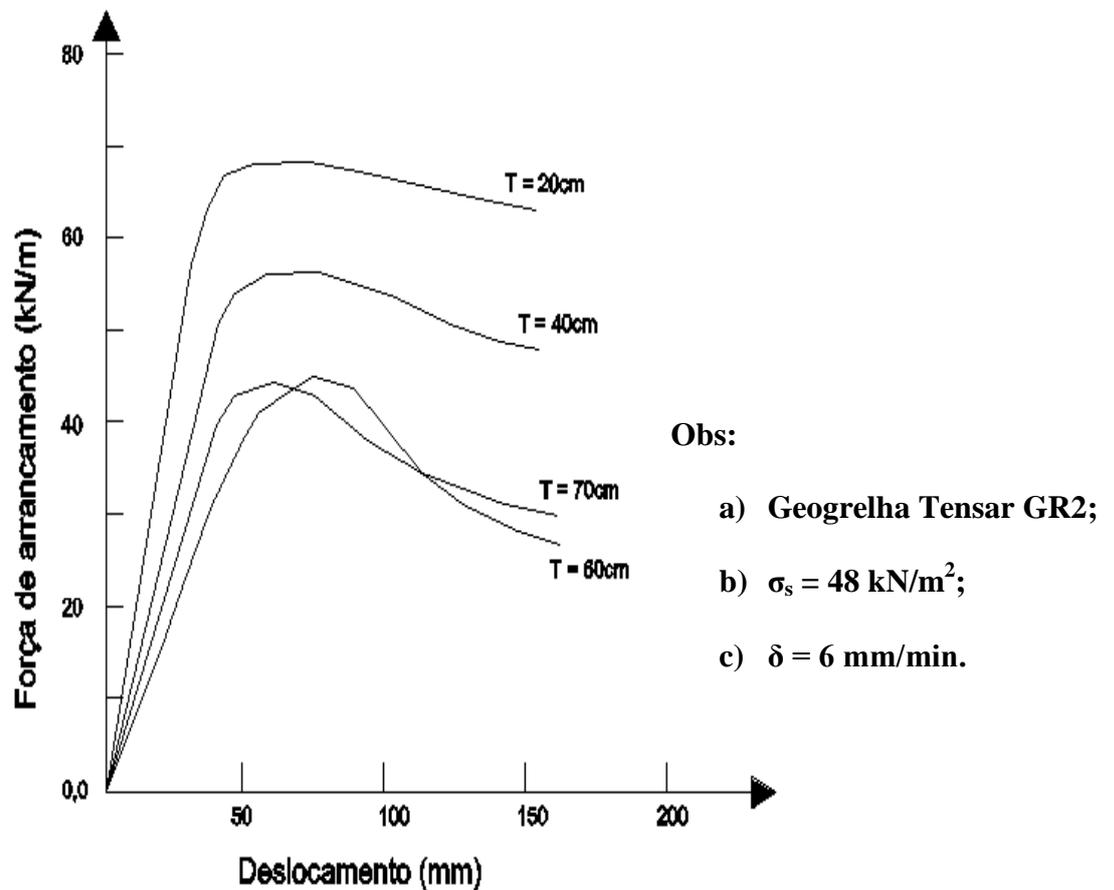


Figura 23 – Resultados de ensaios de arrancamento de geogrelha para diferente espessura de solo arenoso.

Fonte: FARRAG *et al.*, 1993.

2.7.5 Influência da velocidade de ensaio (mm/min).

LADEIRA e LOPES (1996) realizaram ensaios de arrancamento com mudança da velocidade de ensaio (mm/min) e constataram o aumento da resistência ao arrancamento. Os resultados mostram que a mudança da taxa de deslocamento de 1,8 mm/min para 22 mm/min aumenta a resistência ao arrancamento em cerca de 30%, conforme apresentado na Figura 24.

O fator de aderência (f) apresentado na Tabela 1 pode ser calculado segundo a expressão (37):

$$f = \frac{\tau}{\sigma_n \cdot \text{tg}\phi} \quad (38)$$

Nesta expressão, τ e σ_n são as tensões tangencial e normal na interface da geogrelha.

Tabela 1 – Influência da taxa de deslocamento.

Taxa de Deslocamento (mm/min)	Máxima Força de Arrancamento (kN/m)	Fator de Aderência (f)
1,8	28,9	0,506
5,4	32,2	0,564
11,8	34,6	0,616
22	38	0,677

Fonte: LADEIRA e LOPES, 1996.

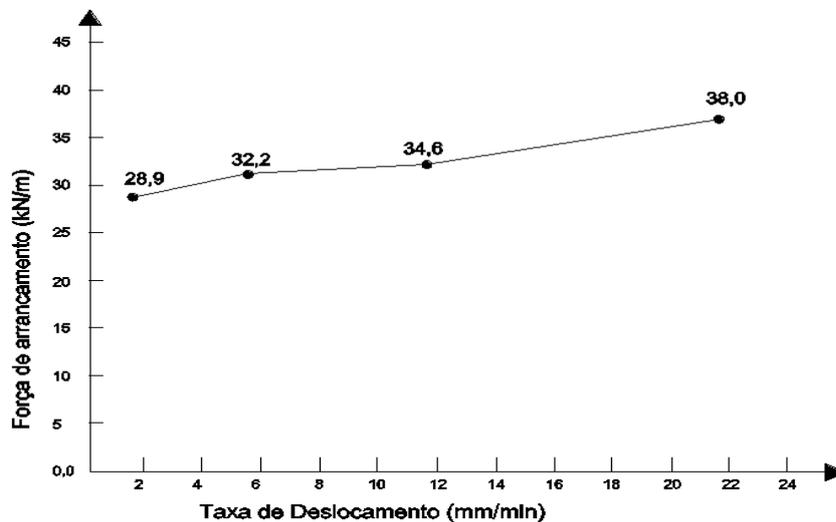


Figura 24 – Resultados de ensaio de arrancamento executados com diferentes velocidades de ensaio.

Fonte: LADEIRA e LOPES, 1996.

LADEIRA e LOPES (1996), com base nos resultados de seus ensaios, resumidamente, concluíram que o aumento na velocidade de ensaio leva a um aumento da

resistência ao arrancamento e do fator de aderência e, também, que este fenômeno é decorrente do aumento da rigidez do sistema solo-reforço e da redução da capacidade de rearranjo dos grãos de solo, com o aumento da velocidade de ensaio.

FARRAG *at al.* (1993), realizaram um programa de testes de ensaios de arrancamento, utilizando a geogrelha da Tensar SR2, e uma caixa de testes com 1,52 m (comprimento), 0,90 m (largura) e 0,76 m (altura), com variação da velocidade de arrancamento da geogrelha Tensar SR2, conforme demonstrado na Figura 25

O solo utilizado por FARRAG *at al.* (1993) foi uma areia com granulometria apresentada na Figura 26.

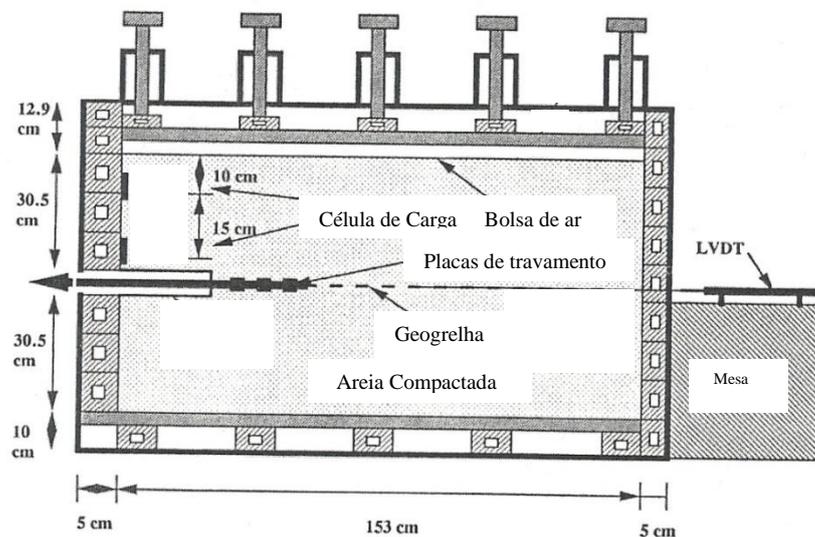


Figura 25 – Diagrama esquemático da caixa de testes de arrancamento de geogrelha. Fonte: FARRAG *at al.* (1993).

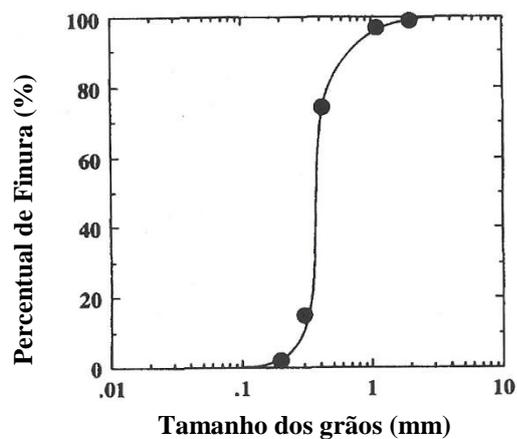


Figura 26 – Distribuição Granulométrica da areia usada no ensaio. Fonte: FARRAG *at al.* (1993).

FARRAG *at al.* (1993) apresentaram o resultado dos ensaios de arrancamento, com relação a geogrelha Tensar SR2, com tensão de confinamento de 48 kN/m² e densidade real da amostra de solo de 16,4 kN/m³, conforme demonstrado na Figura 27.

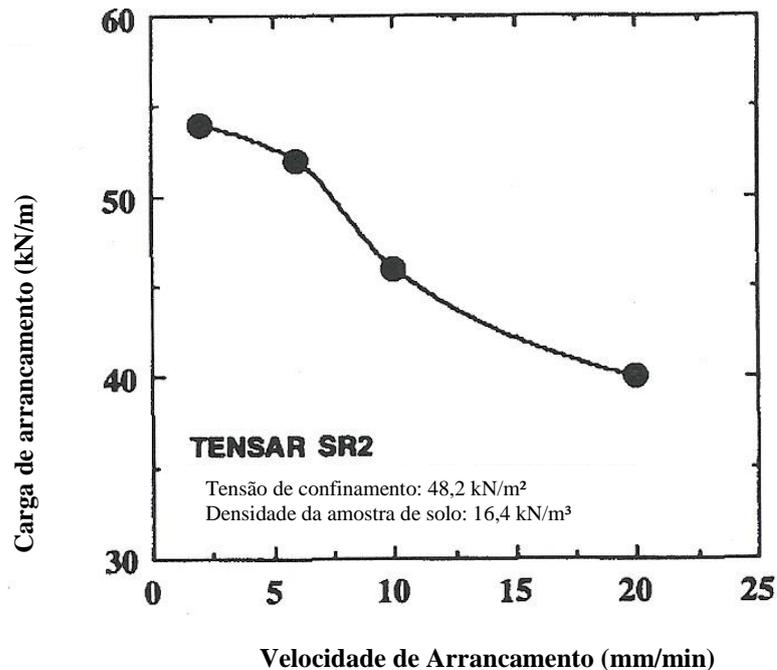


Figura 27 – Resultado dos ensaios de variação de velocidade no arrancamento de geogrelha.

Fonte: FARRAG *at al.* (1993).

KAKUDA (2005) ao realizar os ensaios de sua pesquisa, concluiu que o mecanismo de interação solo-inclusão nos testes de arrancamento é complexo e depende de vários fatores relacionados à geometria e característica do reforço, o tipo de solo utilizado e alguns parâmetros de ensaio. Inclusive recomendou que a largura da amostra de geogrelha para execução do ensaio de arrancamento deveria ser de 30 cm e o comprimento da amostra inserida no interior da caixa de testes com 25 cm (KAKUDA, 2005).

De tudo que foi exposto, verifica-se que realmente o mecanismo de interação solo-inclusão é complexo, mas os ensaios de arrancamento para verificar a interação do solo-geogrelha podem ser realizados com equipamento reduzido de laboratório, desde que se tome as precauções recomendadas pelos diversos autores da área de pesquisa.

2.7.6 Influência da compactação no ensaio de arrancamento.

Conforme o programa experimental de ensaios realizados por KAKUDA (2005), o aumento no grau de compactação conduz a um aumento da adesão das partículas do solo, sem afetar o ângulo de atrito, que se mantém constante, conforme demonstrado na Figura 28.

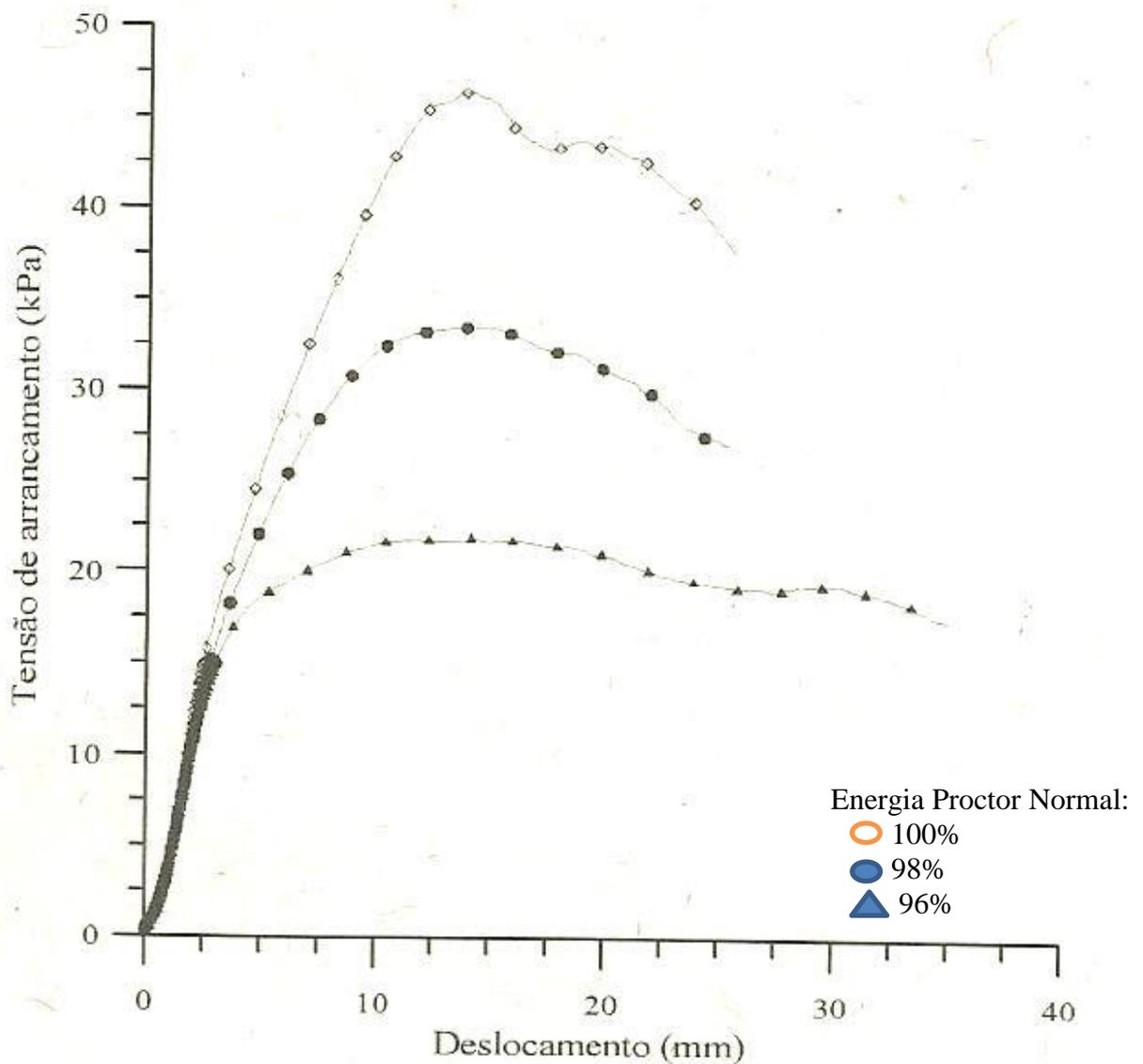


Figura 28 – Influência da compactação no ensaio de arrancamento, adaptado de Kakuda (2005).

Fonte: KAKUDA, 2005.

Os estudos supracitados de KAKUDA (2005) demonstraram que a utilização de 96% do Proctor Normal, com 20 kPa de tensão confinante a tensão de arrancamento apresenta uma linearidade, demonstrado na Figura 28 por ser solo argiloso. Por isto, nas amostras de solo n^{os} 1 a 4 do programa de ensaios da nossa pesquisa, optou-se pela utilização de 96% de energia de compactação no Proctor Normal, pois estas amostras continham argila. Quanto a areia (Amostra de solo n^o 5) optou-se pela compactação em 100% do Proctor Normal, já que o ângulo de atrito não é afetado.

2.7.7 Influência do tipo de geogrelha no ensaio de arrancamento

Um extenso programa experimental de ensaios de arrancamento foi realizado por SUGIMOTO e ALAGIYANNA (2003), onde variou-se o tipo de geogrelhas utilizadas nos ensaios. Utilizaram um equipamento reduzido de laboratório, demonstrado na Figura 29, com as geogrelhas Tensar SS-1 e a Tensar SR-55 confinadas em uma areia originária do Japão, com granulometria mostrada na Figura 30. Os resultados estão plotados nos gráficos da Figura 31.

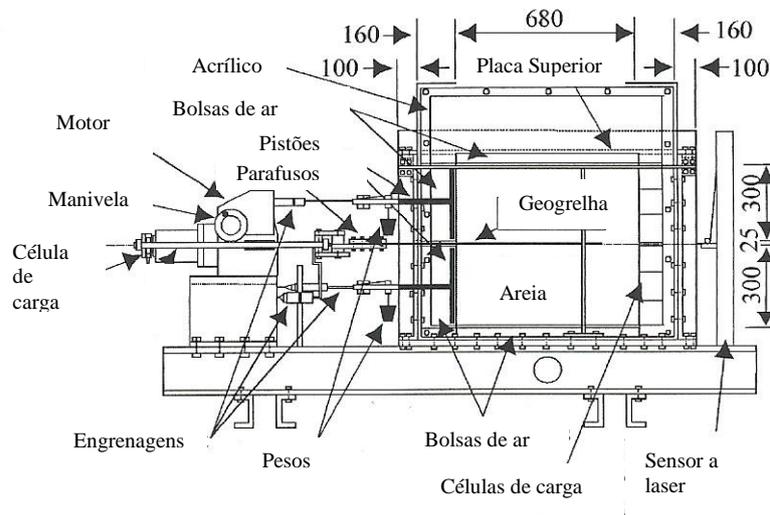


Figura 29 – Caixa de testes para ensaio de arrancamento de geogrelha.
Fonte: SUGIMOTO e ALAGIYAWANNA (2003).

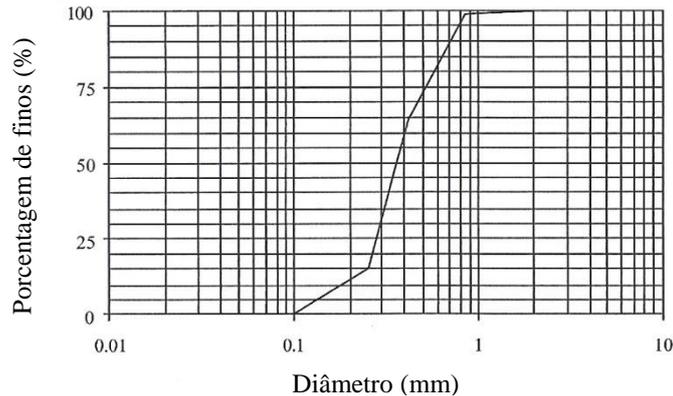


Figura 30 – Distribuição granulométrica da areia utilizada nos ensaios de arrancamento, originária do Japão.

Fonte: SUGIMOTO e ALAGIYAWANNA (2003).

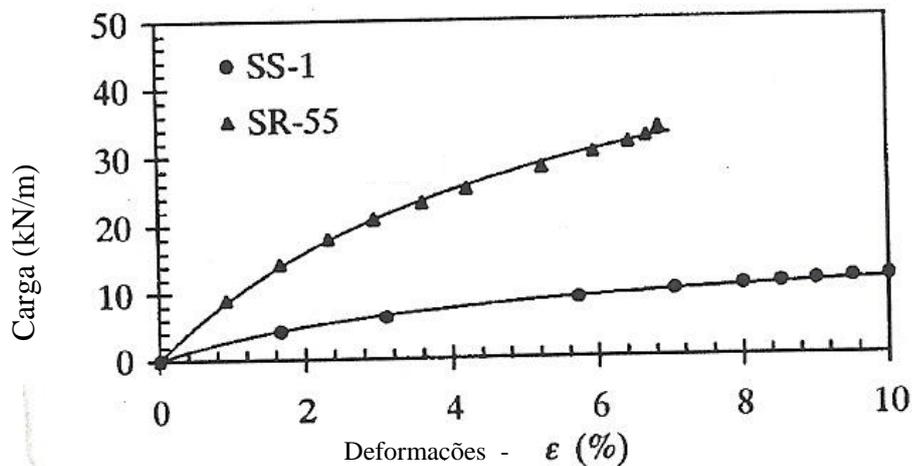


Figura 31 – Resultado dos ensaios de arrancamento das geogrelhas Tensar SS-1 e SR-55.

Fonte: SUGIMOTO e ALAGIYAWANNA (2003).

2.8 Solo da cidade de Manaus

Segundo os estudos de FERNANDES FILHO *et al.* (1997), no Brasil os lateritos, solos lateríticos e rochas associadas, ocupam uma posição de destaque na Região Amazônica, graças à abundância e aos depósitos minerais associados, e normalmente encontram-se encobertos por espesso pacote argilo-arenoso amarelo denominado argila de Belterra. Na Amazônia são encontrados dois tipos de lateritos bem distintos, denominados maduros e imaturos. Os lateritos maduros e imaturos podem ser divididos em autóctones e aloctótones, de acordo com as suas naturezas na sucessão de horizontes do solo e suas respectivas texturas e estruturas.

Os autores supracitados explicam que o quadro geológico regional é composto

por unidades litológicas do Cretáceo, Mioceno e Holoceno. A unidade do Cretáceo é a formação Alter do Chão, que compreende sedimentos continentais vermelhos (arenitos argilosos, argilitos, quartzo grauvacas, quartzo arenitos e brechas intraformacionais), e o substrato rochoso da cidade de Manaus e tem ampla distribuição na região.

Os perfis lateríticos encontram-se estruturados em horizontes bem definidos, às vezes truncados ou rotacionados por falhas normais e transcorrentes. Esses perfis estão expostos em cortes de estrada e possuem espessuras que variam de 3 m a 20 m. A estruturação dos perfis lateríticos da cidade de Manaus e os seus respectivos horizontes estão demonstrados na Figura 32.

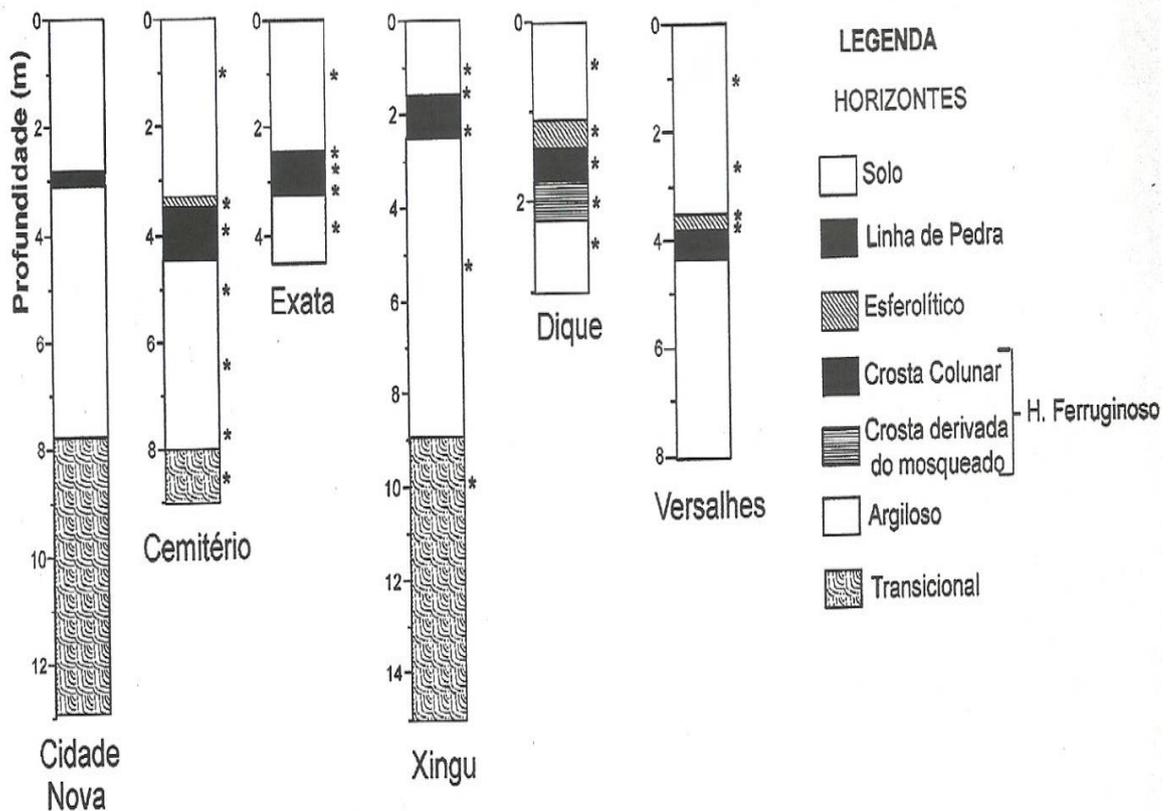


Figura 32 – Estruturação dos perfis lateríticos selecionados na cidade de Manaus.
Fonte: FERNANDES FILHO *et al.*, 1997.

O horizonte solo, mostrado na Figura 24, acha-se amplamente distribuído na região da cidade de Manaus e é composto por um material argiloso a areno-argiloso de cor amarela. Essa cobertura ocorre de maneira contínua ao longo dos perfis, possui espessura variando de menos de 1 m até dezenas de metros, e frequentemente encontra-se afetada por falhas, que a coloca lado a lado com unidades inferiores, a exemplo dos horizontes ferruginoso, argiloso e transicional. FERNANDES FILHO *et al.* (1997).

O solo da cidade de Manaus pode ser definido como latossolo amarelo argilo-arenoso, com crosta laterítica.

A cidade de Manaus está inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Amazonas, conforme apresentado na Figura 33, e com uma distribuição ampla da Formação Alter do Chão, conforme mostrado na Figura 34.



Figura 33 – Localização da cidade de Manaus no contexto da Bacia do Amazonas.
Fonte: ALMEIDA et al. (1977) *Apud* SILVA e RIBEIRO, 2008.

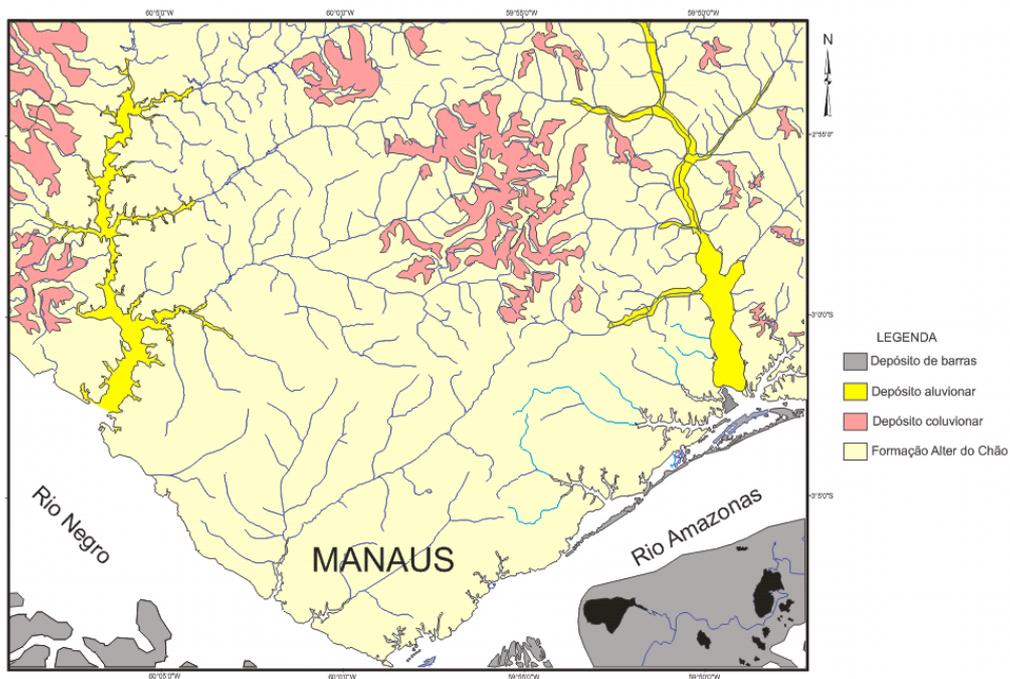


Figura 34 – Mapa geológico da cidade de Manaus.
Fonte: SILVA e RIBEIRO, 2008.

Capítulo 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

Nesta pesquisa buscou-se a obtenção de resultados de ensaios de arrancamento de geogrelha, para isto, utilizou-se amostras de um solo típico da cidade de Manaus, misturas deste solo *in natura* com areia comercial, geogrelhas, um compressor de ar 2HP – 110L, uma célula de carga CTZL5T, um medidor digital para a célula de carga, uma máquina universal de 300kN de capacidade nominal (tração) e um equipamento reduzido de laboratório para arrancamento de geogrelha. Além desses materiais e equipamentos, elaborou-se um programa computacional para dimensionamento de taludes reforçados com geogrelhas. As características do solo, geogrelhas e todos os outros materiais utilizados são descritos em detalhes, a seguir.

Primeiramente, nesta pesquisa, ocorreu a coleta de um solo típico da cidade de Manaus, visto que no *Campus* da UFAM existe uma reserva ecológica da Floresta Amazônica Preservada, Área de Proteção Preservada (APP), a qual contribui para a manutenção do solo com as suas propriedades típicas do maciço de solo superficial do entorno da cidade. O solo *in natura*, após ser coletado, foi submetido a misturas de areia nas proporções de 20%, 40% e 60%, em massa. A areia utilizada foi adquirida no comércio da cidade de Manaus.

As cinco amostras de solo supracitadas foram caracterizadas conforme os ensaios de granulometria, sedimentação, densidade real, compactação, índice de suporte Califórnia (ISC), limite de liquidez, limite de plasticidade e ensaio triaxial.

Após a caracterização geotécnica das cinco amostras de solo, procedeu-se à construção de um equipamento de pequeno porte, para ensaios de arrancamento de geogrelha no solo, a partir daquele desenvolvido por TEIXEIRA (2003). Quando o equipamento foi concluído, em uma tornearia local, realizaram-se os ensaios de tração tanto nas geogrelhas, quanto nos ensaios de arrancamento das geogrelhas, confinadas nas amostras de solo de estudo. Nos ensaios de arrancamento, variou-se o tipo de amostra de solo, a velocidade do ensaio e o tipo de geogrelha. Os dados dos ensaios foram parametrizados para análise estatística adequada.

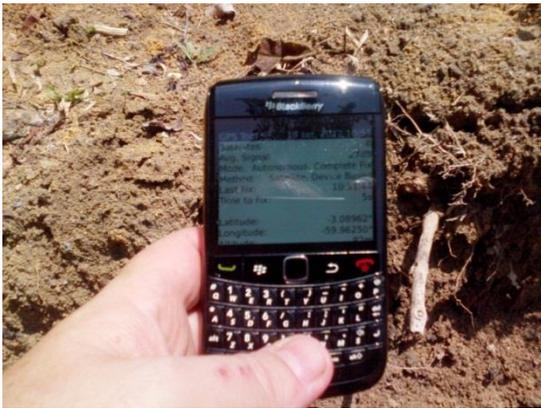
Optou-se pela elaboração de um programa computacional na linguagem Pascal Estruturado, com implementação na plataforma *Visual Basic*, capaz de realizar os cálculos estatísticos, desenhar os gráficos e os arranjos estruturais. O programa computacional utiliza todos os dados coletados nos ensaios de arrancamento de geogrelha nas amostras de solo estudadas, para dimensionamento de taludes reforçados com geogrelhas.

As fórmulas de (1) a (34), relativas ao Método de Jewell e ao Método de Erlich e Mitchell, demonstradas no Capítulo 2, foram utilizadas na elaboração do programa computacional, o qual utiliza os dois métodos de cálculo para o dimensionamento de reforços de taludes com geogrelhas, fazendo uso dos dados coletados nos ensaios de arrancamento de geogrelha em laboratório. Dessa forma, o programa computacional realiza os cálculos estatísticos dos resultados e também dimensiona o arranjo estrutural.

3.1 Solos utilizados no programa experimental.

Inicialmente, coletaram-se amostras deformadas de solo no “campus” da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), em área de Preservação Permanente (APP), uma vez que esse material representa cerca de 3/4 do solo superficial da cidade de Manaus e do seu entorno, classificado pedologicamente como latossolo argiloso amarelo, solo residual de rochas da Formação Alter do Chão. O solo da cidade de Manaus pode ser definido como latossolo amarelo argilo-arenoso, com crosta laterítica, em algumas regiões.

No local escolhido para a coleta de amostras deformadas de solo, demonstrado na foto por satélite da Figura 36, procedeu-se à leitura do GPS, utilizando um aplicativo de celular para localização por satélite, conforme ilustrado na Figura 35 (a). Após a leitura do GPS, realizou-se uma escavação de aproximadamente um metro de profundidade, Figura 35 (b) e, a partir deste ponto, procedeu-se à coleta de amostras com uma colher de pedreiro, Figura 35 (c). Com as amostras coletadas, as mesmas forma transportadas para o Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da UFAM e lá iniciou-se o destorroamento das mesmas, conforme a Figura 35 (d); com as amostras sem torrões, iniciou-se o peneiramento das mesmas, visando à eliminação de detritos e impurezas, Figura 35 (e), e, finalmente, o ensacamento do material, estando o mesmo pronto para a realização de ensaios, após um certo período de secagem ao ar, Figura 35 (f).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 35– Coleta e preparação de uma amostra de solo típica da cidade de Manaus. (a) Leitura do GPS para marcação das coordenadas do local. (b) Escavação do local a 1,00 (um metro) de profundidade. (c) Coleta de amostras de solo com uma colher de pedreiro. (d) Destorramento das amostras. (e) Peneiramento das amostras para retirada de impurezas. (f) Finalmente, o ensacamento das amostras de solo *in natura*, prontas para realização de ensaios.

O local de coleta das amostras de solo apresentou as seguintes coordenadas: Latitude: 3°05'14,9"S e Longitude 59°57'45,5"W, conforme demonstrado na Figura 28.

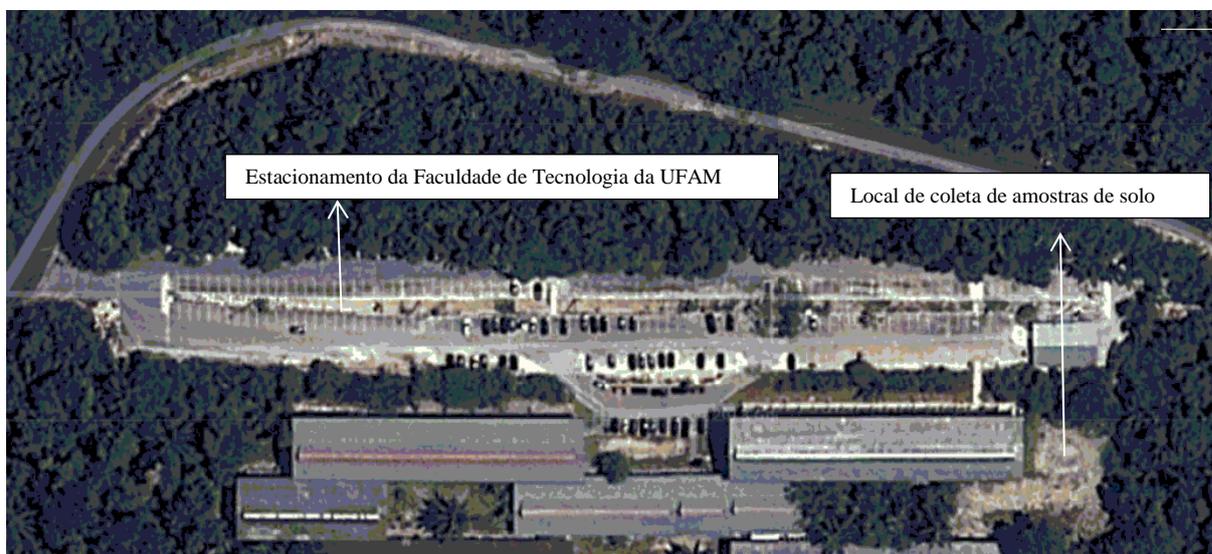


Figura 36 – Foto de satélite do local de coleta de amostras deformadas, Latitude: 3°05'14,9"S e Longitude 59°57'45,5"W.

Fonte: <www. googlemaps.com>, acesso em 19/03/2014.

3.1.1 Caracterização das amostras de solo.

Após a coleta do solo *in natura*, procedeu-se à confecção de misturas deste solo com areia, obtida no comércio varejista da cidade de Manaus/AM, visando à verificação das melhorias de qualidade deste solo *in natura*, no que tange à caracterização geotécnica e, também, nos ensaios de arrancamento de geogrelha.

Procedeu-se à pesagem da amostra de solo *in natura* e da areia para a elaboração das misturas de solo, nas seguintes proporções: 20%, 40% e 60% de partes de areia, em relação à massa total, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Processo de misturas do solo *in natura* com areia.

Número da Amostra	Massa total da Amostra (kg)	Fração de solo <i>in natura</i> (kg)	Fração de areia (kg)	Porcentagem de areia (%)
2	2,5	2	0,5	20
3	2,5	1,5	1,0	40
4	2,5	1	1,5	60

Obs: A amostra 1 é o solo *in natura* (2,5 kg) e a amostra 5 é a areia comercial (2,5 kg).

Após a pesagem das amostras de solo *in natura* e areia, conforme a Tabela 2, obteve-se as amostras n° 2, 3 e 4, relativas às misturas de solo *in natura* com areia, conforme mostrado na Figura 37, lembrando que a amostra n° 1 é composta pelo solo *in natura* e a amostra n° 5 é composta de areia, sem misturas.



Figura 37 – Preparação das amostras 2, 3 e 4 (misturas do solo *in natura* com areia), utilizando uma pequena pá.

Após a preparação das amostras de solo 1, 2, 3, 4 e 5 procedeu-se à realização dos ensaios de caracterização de cada amostra. A caracterização englobou os ensaios de granulometria, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), densidade real, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), triaxial e cisalhamento direto.

Para cada ensaio supracitado adotaram-se os procedimentos a seguir comentados:

3.1.1.1 Dispersão.

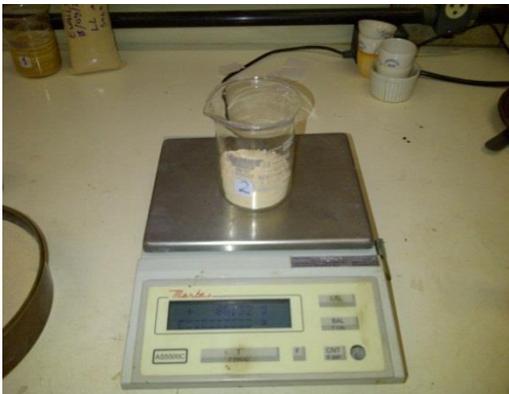
Ensaio de sedimentação e peneiramento, realizados conforme a norma NBR 7181, no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da UFAM (FT/LABPAV/UFAM). O ensaio foi realizado conforme mostrado nas Figuras 38, 39 e 40.



a)



b)



c)



d)

Figura 38 – Ensaio de Sedimentação. (a) Preparação da amostra de solo. (b) Destorroamento de amostra. (c) Pesou-se 80g da amostra destorroada. (d) Amostras em decantação.



a)



b)

Figura 39 – Ensaio de Sedimentação. (a) Amostras de solo no aspersor. (b) Acompanhamento das medições do densímetro na sedimentação.

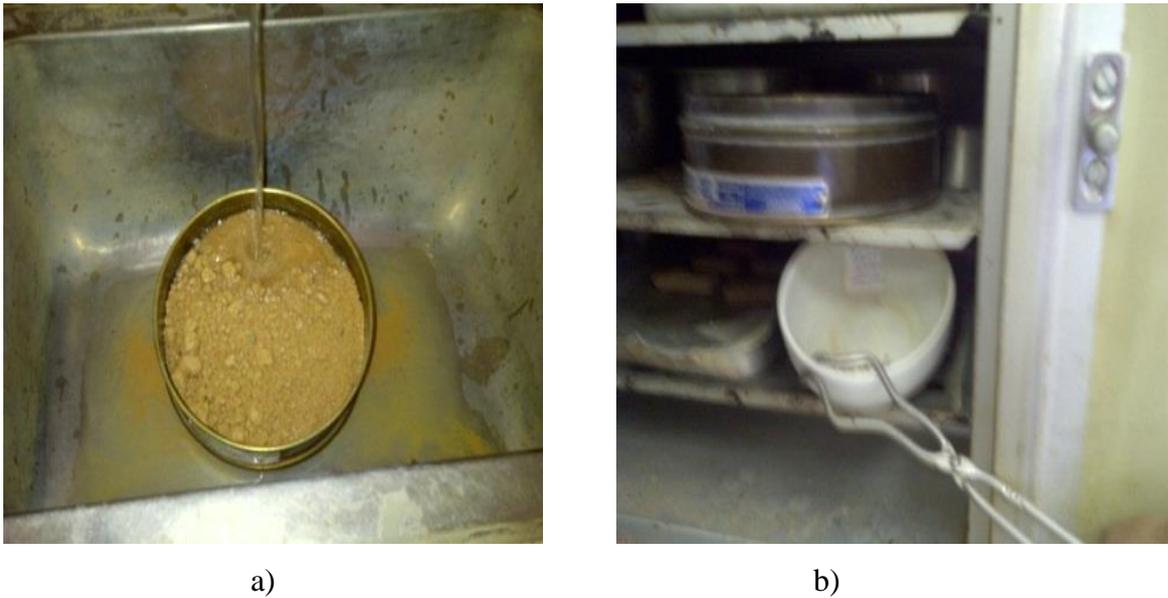


Figura 40 – Ensaio de Sedimentação. (a) Após 24 horas de leituras, derrama-se o material na peneira n° 200, retendo-se o material fino. (b) O material fino retido é levado para a estufa, por 24 horas, para determinação da amostra de solo seca.

3.1.1.2 Peneiramento.

Ensaio de análise granulométrica foi realizado conforme a norma NBR 7181, Figura 41.



Figura 41 – Ensaio de Peneiramento do material grosso. (a) O material de solo é submetido as peneiras n° 2", 1 ½", 1", ¾", 3/8", 4 e 10. (b) O material de solo retido em cada peneira é pesado.

3.1.1.3 Limites de Atterberg

Ensaio de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), conforme a norma NBR 7180. Os ensaios foram realizados conforme mostrado nas Figuras 42 e 43.



a)



b)

Figura 42 – Ensaio de Limite de Liquidez das amostras. (a) Material necessário para o ensaio. (b) Realização do ensaio.



a)



b)

Figura 43 – Ensaio de Limite de Plasticidade. (a) Amostra de solo na concha do aparelho de Casagrande. (b) Pesa-se as amostras de solo, para determinação da massa de solo úmida.

3.1.1.4 Ensaio de Densidade Real pelo método do picnômetro.

Ensaio de Densidade real, conforme a norma NBR 6508 e DNER 9364. O ensaio foi realizado conforme mostrado na Figura 44.

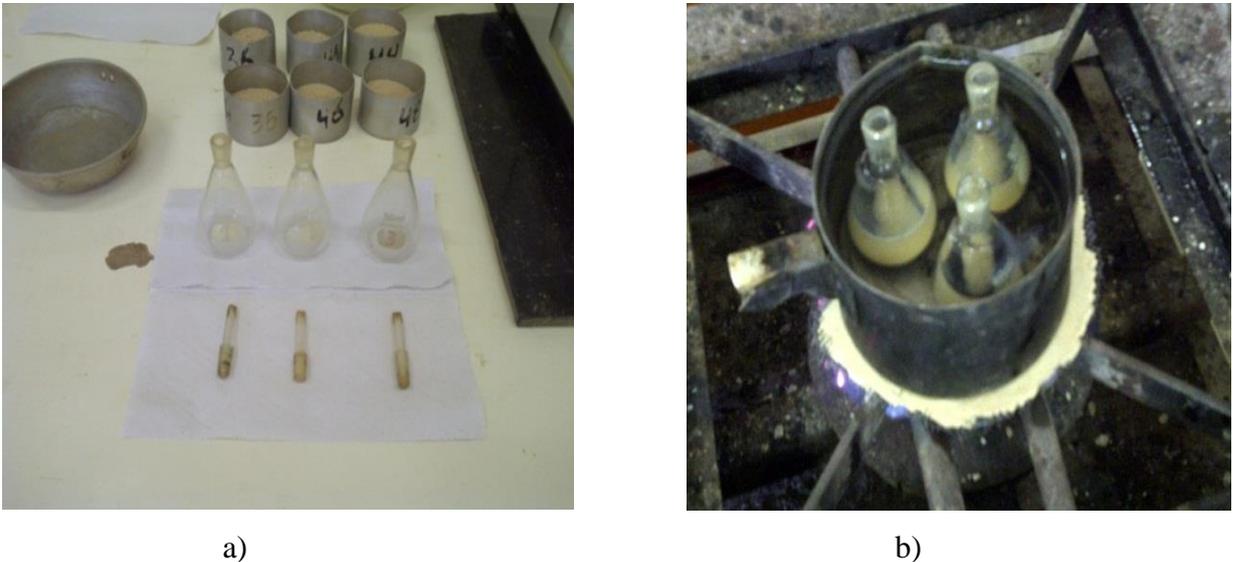


Figura 44 – Ensaio de densidade real por meio do picnômetro. (a) Separa-se o material necessário para o ensaio. (b) Insere-se amostras de solo nos picnômetros, acrescenta-se água destilada e aquece-se no fogo brando.

3.1.1.5 Ensaio de Compactação.

Ensaio do Grau de Compactação, conforme a norma NBR 7182. Ensaio realizado conforme as Figuras 45 e 46.

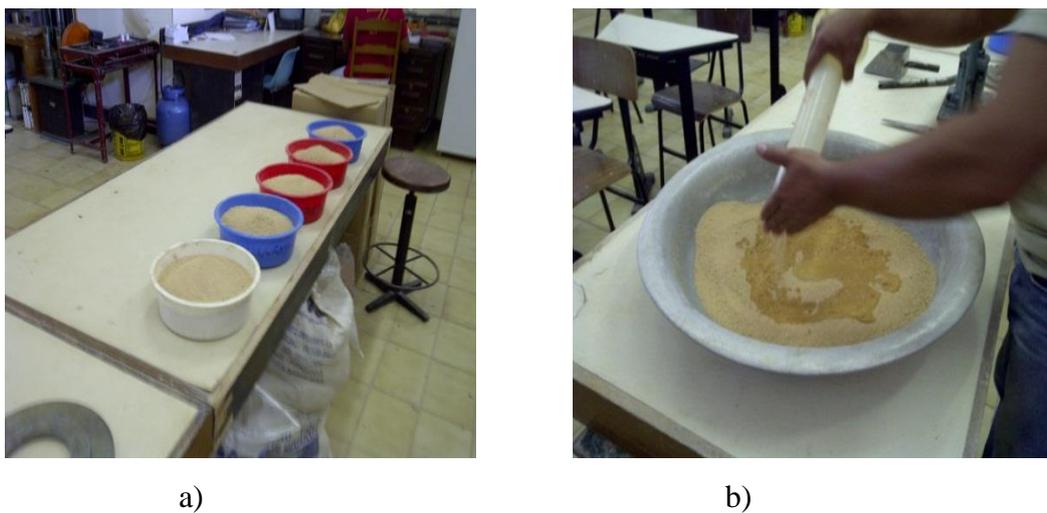


Figura 45 – Ensaio de Compactação. (a) Preparação do material necessário para o ensaio. (b) Controle de umidade para cada ensaio.

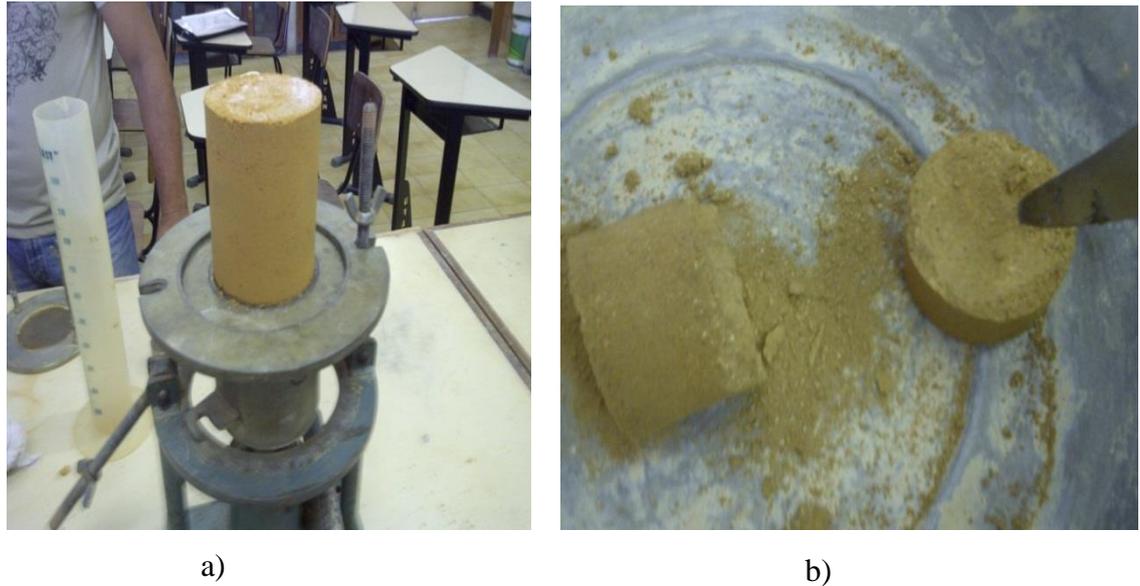


Figura 46 – Ensaio de Compactação. (a) Pesagem do molde com o solo dentro, depois retiro o molde. (b) Quebra-se ao meio a amostra e retira-se uma pequena quantidade para pesagem e cálculo da umidade, visando comparar com a umidade calculada.

3.1.1.6 Ensaio de Determinação de Massa Específica pelo Frasco de Chapman.

Ensaio de determinação de massa específico de agregados miúdos, pelo Frasco de Chapman, conforme a norma NBR 9776. Ensaio realizado conforme a Figura 47.

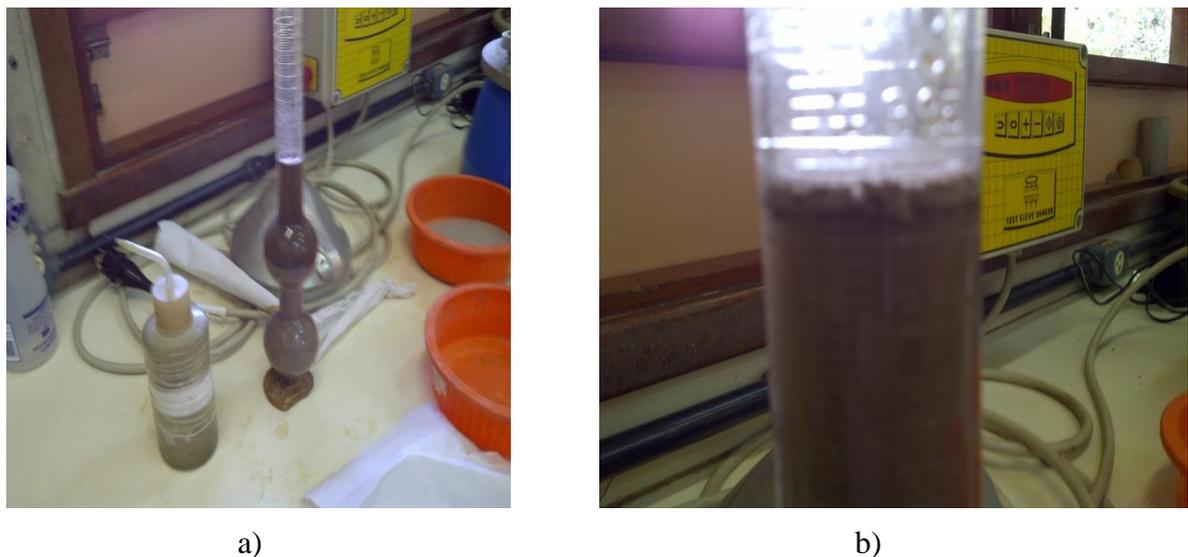


Figura 47 – Ensaio de determinação de massa específica pelo Frasco de Chapman. (a) Inserção de 200 ml de água destilada e 500 g de areia no frasco. (b) Leitura do frasco.

3.1.1.7 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), realizado conforme a norma NBR 9895. Ensaio realizado conforme as Figuras 48, 49 e 50.

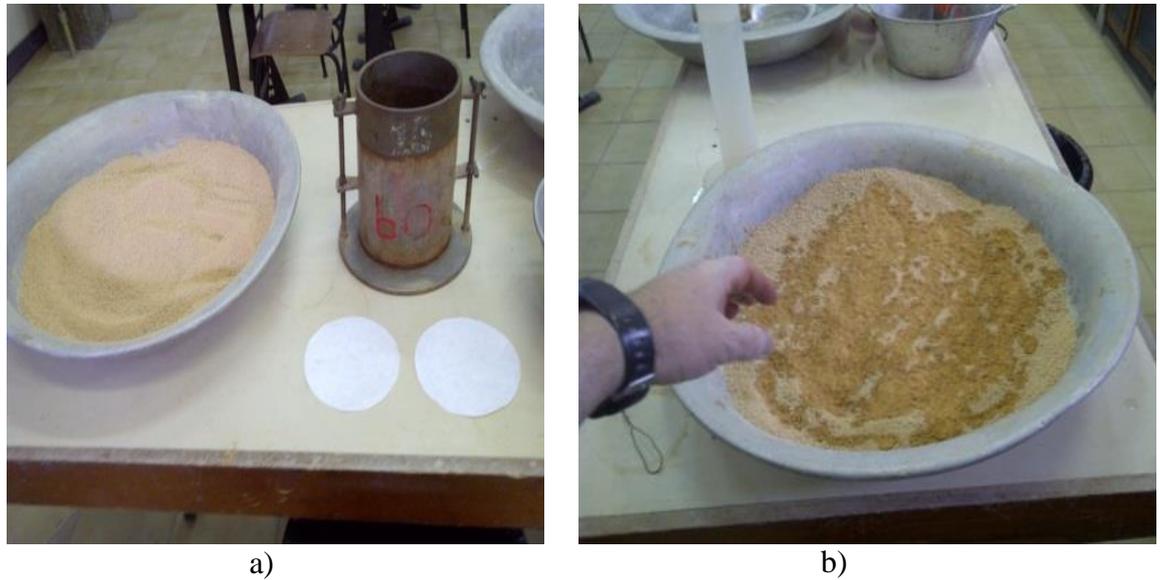


Figura 48 – Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC. (a) Separa-se o material necessário para o ensaio. (b) Coloca-se a amostra de solo na umidade ótima.

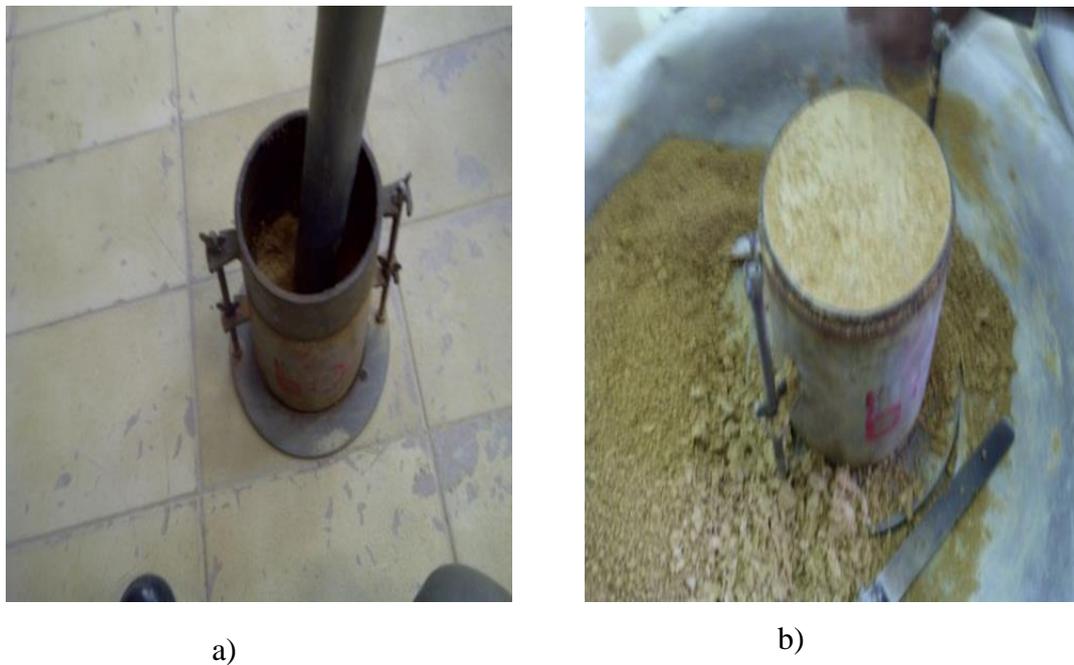


Figura 49 – Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC. (a) Compacta-se o solo em 3 (três) camadas na energia do Proctor Normal, 25 golpes. (b) Concluindo a compactação efetua-se a raspagem da superfície do solo no molde e peso o conjunto (molde e solo).

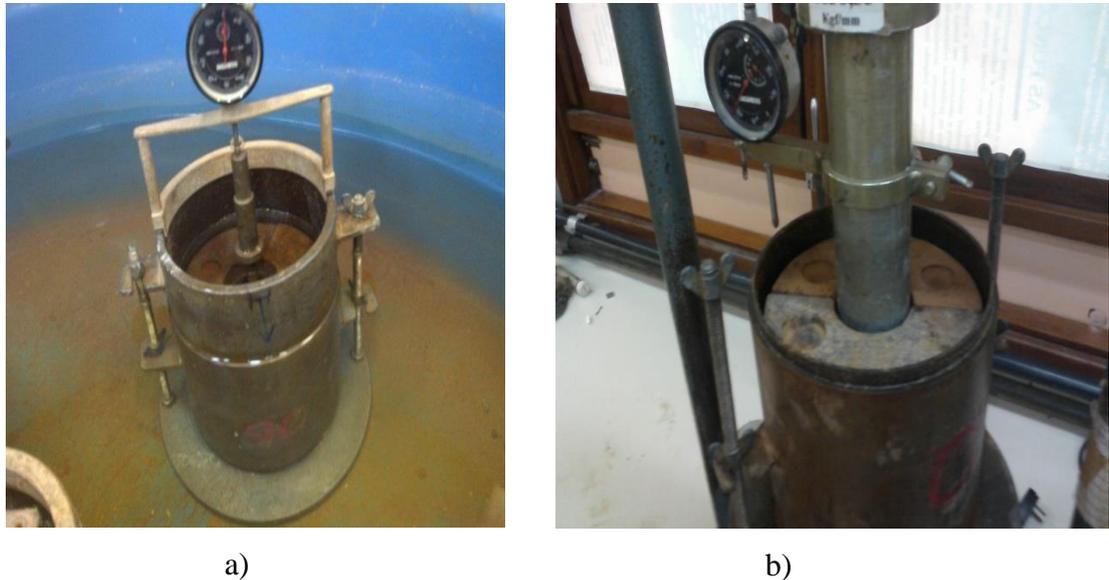


Figura 50 – Ensaio de Índice de Suporte Califórnia - ISC. (a) Conjunto submerso por 96 horas, realizando-se medições diárias no deflectômetro para verificar a expansão. (b) Após 96 horas de imersão em água realiza-se o ensaio de compressão do ISC.

3.1.1.8 Ensaio de compressão Triaxial.

Ensaio de compressão triaxial do solo realizado conforme a norma ASTM D2850 (UU – ensaio não consolidado, não drenado). Neste ensaio, não se pode permitir o adensamento das amostras, desta forma as válvulas do equipamento, Figura 51, são fechadas não permitindo a drenagem da amostra durante a aplicação das tensões. O ensaio é iniciado com a saturação do corpo de prova, então aplica-se uma tensão hidrostática (σ_3) e, finalmente, inicia-se a aplicação de uma tensão axial (σ_1), em velocidades padronizadas, até a ruptura do corpo de prova.

Todas as amostras de solo foram utilizadas no ensaio de compressão triaxial do solo, verificando-se, ao final do ensaio, as propriedades geotécnicas de cada amostra, sendo a amostra 01 o solo *in natura* e amostra 05 a areia, adquirida no comércio de Manaus. As outras amostras 2 a 4 são as misturas de solo *in natura* com a areia.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 51 – Ensaio de compressão triaxial do solo. a) Corpo de prova de amostra de solo sendo moldado. b) Conferência das dimensões do corpo de prova. c) Inserção do corpo de prova na câmara de compressão triaxial. d) Corpo de prova preparado. e) Corpo de prova durante o ensaio de compressão triaxial. f) Corpo de prova após ruptura.

3.2 Geogrelhas utilizadas no programa experimental.

A geogrelha é fabricada a partir de fios poliméricos, onde os polímeros dos filamentos é o PET (Politereftalato de etileno), material termoplástico, revestido com PVC, na forma de rolos com as dimensões de 5,10 m (largura) por 100,00 m (comprimento), podendo ter aberturas que variam de 30 mm a 60 mm (longitudinais) e 20 mm a 35 mm (transversais).

As geogrelhas utilizadas foram a MacGrid WG40x30 e MacGrid 60x30 da empresa MACCAFERRI, fabricada pelo processo de tecelagem, utilizando polímero dos filamentos de PET, com revestimento em PVC, com abertura longitudinal de 30 mm e transversal de 20 mm, resistência última (T_{ult}) longitudinal de 40 kN/m e transversal de 30 kN/m, para a WG40x30, e resistência última (T_{ult}) longitudinal de 60 kN/m e transversal de 30 kN/m, para a WG60x30.

A geogrelha em estudo é constituída pelo entrelaçamento de fios poliméricos, que aglomerados fornecem resistência à tração, força esta que atua no sistema estrutural de reforço do solo. A interação solo-geogrelha é de suma importância e é quantificada através dos ensaios de arrancamento.

A faixa de valores de cargas das geogrelhas é apresentada na Tabela 3, demonstrada a seguir.

Tabela 3 – Faixa de cargas de geogrelhas fabricadas na MACCAFERRI.

MacGrid® WG é uma geogrelha tecida de poliéster revestida com PVC.

Nome do Produto	Processo de Fabricação	Polímero dos Filamentos	Tipo de Revestimento	Dimensões				Resistência Última (T_{ult})	
				Rolos		Aberturas		Longitudinal (kN/m)	Transversal (kN/m)
				Larg. (m)	Comp. (m)	Longitudinal (mm)	Transversal (mm)		
MacGrid® WG 40	Tecida	PET	PVC	5,10	100	30	20	40	30
MacGrid® WG 55/55	Tecida	PET	PVC	5,10	100	25	25	55	55
MacGrid® WG 60	Tecida	PET	PVC	5,10	100	30	20	60	30
MacGrid® WG 90	Tecida	PET	PVC	5,10	100	45	20	90	30
MacGrid® WG 120	Tecida	PET	PVC	5,10	100	65	20	120	30
MacGrid® WG 150	Tecida	PET	PVC	5,10	100	25	40	150	30
MacGrid® WG 200	Tecida	PET	PVC	5,10	100	60	35	200	30

Fonte: MACCAFERRI, 2013.

A geogrelha constitui-se de elementos longitudinais e transversais unidos através de uma junção, conforme mostra a Figura 52.

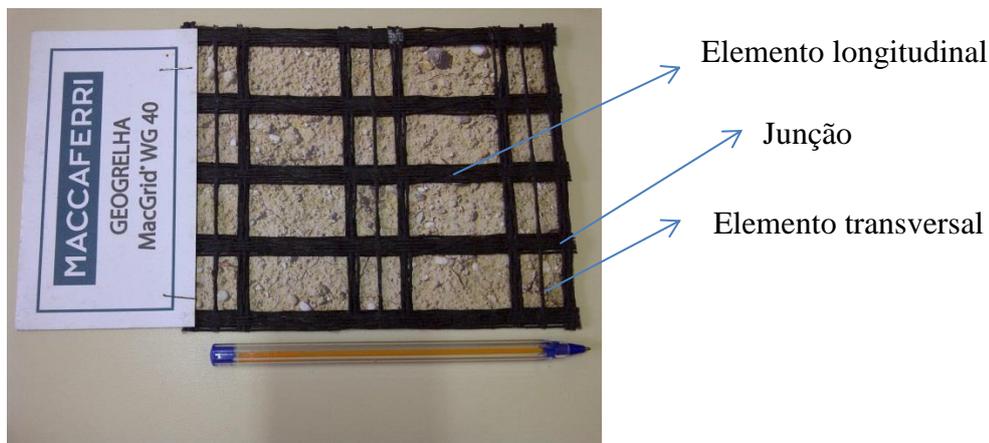


Figura 52 – Elementos constituintes das geogrelhas usadas neste trabalho. (a) elementos longitudinais. (b) elementos transversais. (c) junção entre os elementos longitudinais e transversais.

As geogrelhas utilizadas na pesquisa são fabricadas a partir de polímeros, no caso PET, conforme características da Tabela 1 (Capítulo 2).

As geogrelhas ficam enterradas, encontrando-se protegidas dos efeitos dos raios ultravioletas, o que aumenta a longevidade do produto.

As geogrelhas utilizadas foram doadas pela empresa MACCAFERRI, sendo constituídas por fios de poliéster de alta tenacidade revestidos com PVC. A Tabela 4 apresenta as propriedades e características das geogrelhas utilizadas nos ensaios.

Tabela 4 – Propriedade das geogrelhas utilizadas nos ensaios.

Propriedades	Disposição das tiras	Geogrelha MacGrid 40-30	Geogrelha MacGrid 60-30
Resistência à tração (kN/m)	Longitudinal	40	60
	Transversal	30	30
Largura do elemento (mm)	Longitudinal	7	7
	Transversal	4	4
Abertura entre elementos (mm)	Longitudinal	37	21
	Transversal	37	21
	Longitudinal	1,0	1,0
Espessura do elemento (mm)	Transversal	1,0	1,0

A geogrelha utilizada é a tecida, sendo fabricada numa máquina semelhante a uma

máquina comum de fábrica de tecelagem, no entanto, a diferença é que os carretéis de linha são substituídos por carretéis de fios poliméricos (Figura 53).

Na fábrica, o material é constantemente testado, de acordo com amostragens dos lotes fabricados. A cada 2.000 metros lineares de geogrelha, são realizados testes completos de tração daquele lote, objetivando a verificação da resistência máxima de tração de cada geogrelha.



Figura 53 – Fios de poliéster utilizados na fabricação de geogrelha tecida na fábrica da Maccaferri em Camaçari – BA.

3.2.1 Ensaios realizados com geogrelhas.

Primeiramente, procedeu-se à microscopia das amostras de geogrelha, para verificação do estado das mesmas em nível microscópico.

Na próxima etapa, realizaram-se os ensaios de tração nas geogrelhas utilizadas na pesquisa, MACGRID 40-30 e 60-30, no laboratório da fábrica em Camaçari/BA e, posteriormente, no Laboratório de Ensaios de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM).

Após os ensaios de tração nas geogrelhas utilizadas, dando prosseguimento ao programa experimental, partiu-se para os ensaios de arrancamento, onde foram utilizadas as

amostras de solo 1, 2, 3, 4 e 5, conforme explicitado nos itens anteriores.

A Tabela 5 resume os ensaios realizados em geogrelhas.

Tabela 5 – Resumo dos ensaios realizados em geogrelhas.

Ensaio	Descrição	Metodologia
Microscopia	Observação através de estereoscópio das geogrelhas MacGrid 40-30 e MacGrid 60-30.	Normas internas do Laboratório de Físico-Química da UFAM.
Tração	Ensaio de Tração realizado no Laboratório da Fábrica e no Laboratório de Materiais da UFAM (LEM/FT/UFAM) nas geogrelhas MacGrid 40-30 e MacGrid 60-30.	ASTM D6637 NBR 12593
Arrancamento	Calibração do equipamento, com intuito de verificar a uniformidade dos resultados dos ensaios.	ASTM D6706-01
Arrancamento	Variação do tipo de amostra de solo, sendo a amostra nº 1 (solo in natura), 2 (mistura 20% de areia), 3 (mistura 40% de areia), 4 (mistura 60% de areia) e 5 (areia).	ASTM D6706-01
Arrancamento	Variação do tipo de Geogrelha, sendo utilizada as geogrelhas MacGrid 40-30 e MacGrid 60-30.	ASTM D6706-01
Arrancamento	Variação da velocidade de arrancamento, sendo utilizada as velocidades: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 120mm/min.	ASTM D6706-01

Paralelamente, elaborou-se um programa computacional para análise estatística dos resultados e utilização dos mesmos para cálculo de reforços estruturais em taludes.

Para cada ensaio supracitado, adotou-se o procedimento, a seguir comentado.

3.2.1.1 Microscopia das geogrelhas.

Utilizando um estereoscópio, localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, marca Leica modelo EZ4, suíço, com sistema óptico incorporado à estativa, sistema óptico *zoom* fator 4,4:1, para aumentos contínuos de 8x a 70x, iniciaram-se as observações em nível

microscópico.

1° Passo: Prepara-se uma amostra de material, uma geogrelha MACGRID 40-30, realizando cortes sem danificar os fios poliméricos. Separa-se também uma folha de papel milimetrado para servir de fundo e parâmetro de comprimento dos elementos observados, Figura 54.

2° Passo: Inicia-se as observações (aumento de gradação da lente em 30x), primeiramente nas junções entre os elementos transversais e longitudinais, verificando-se a ocorrência de alguma falha ou defeito de emenda, Figura 55 (a).

3° Passo: Prossegue-se no ensaio (aumento de gradação da lente em 50x), verificando-se as tramas de entrelaçamento dos fios poliméricos, bem como a cobertura de PVC (cor negra) do material, e a ocorrência de alguma falha ou defeito, Figura 55 (b) e Figura 55 (c).

4° Passo: Continuam-se as observações (aumento de gradação da lente em 70x), agora verificando-se os próprios fios poliméricos, a cor, alguma ocorrência de falha ou defeito e a verificação da espessura do fio, conforme Figura 55 (d).

5° Passo: Repete-se o ensaio para uma segunda amostra de geogrelha, alterando-se o material para geogrelha MACGRID 60-30.

Ensaio concluído.

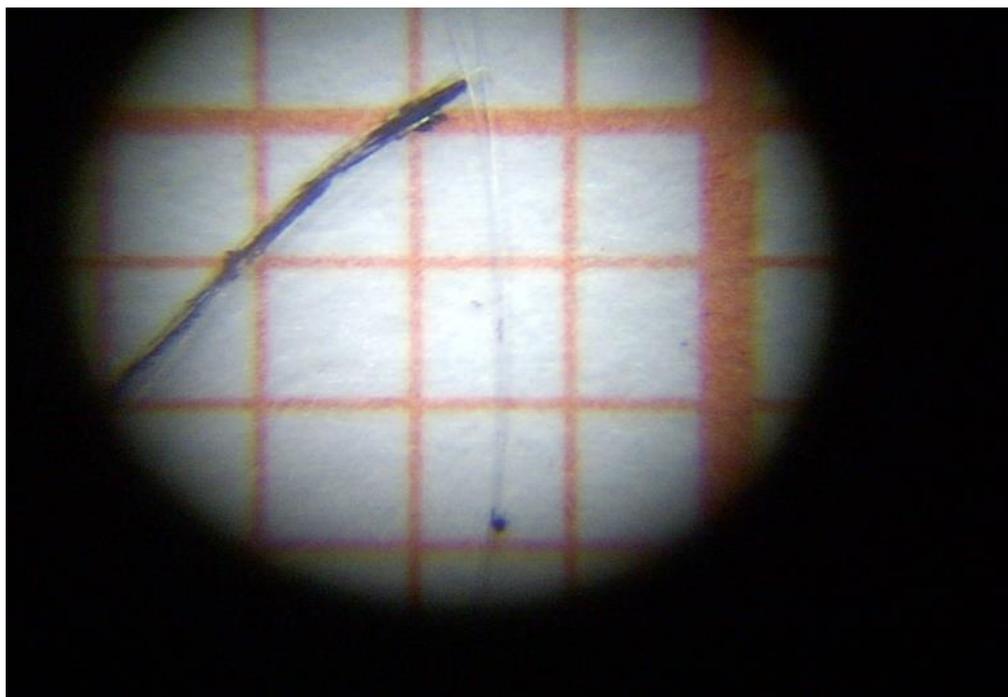


Figura 54 – Microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30).

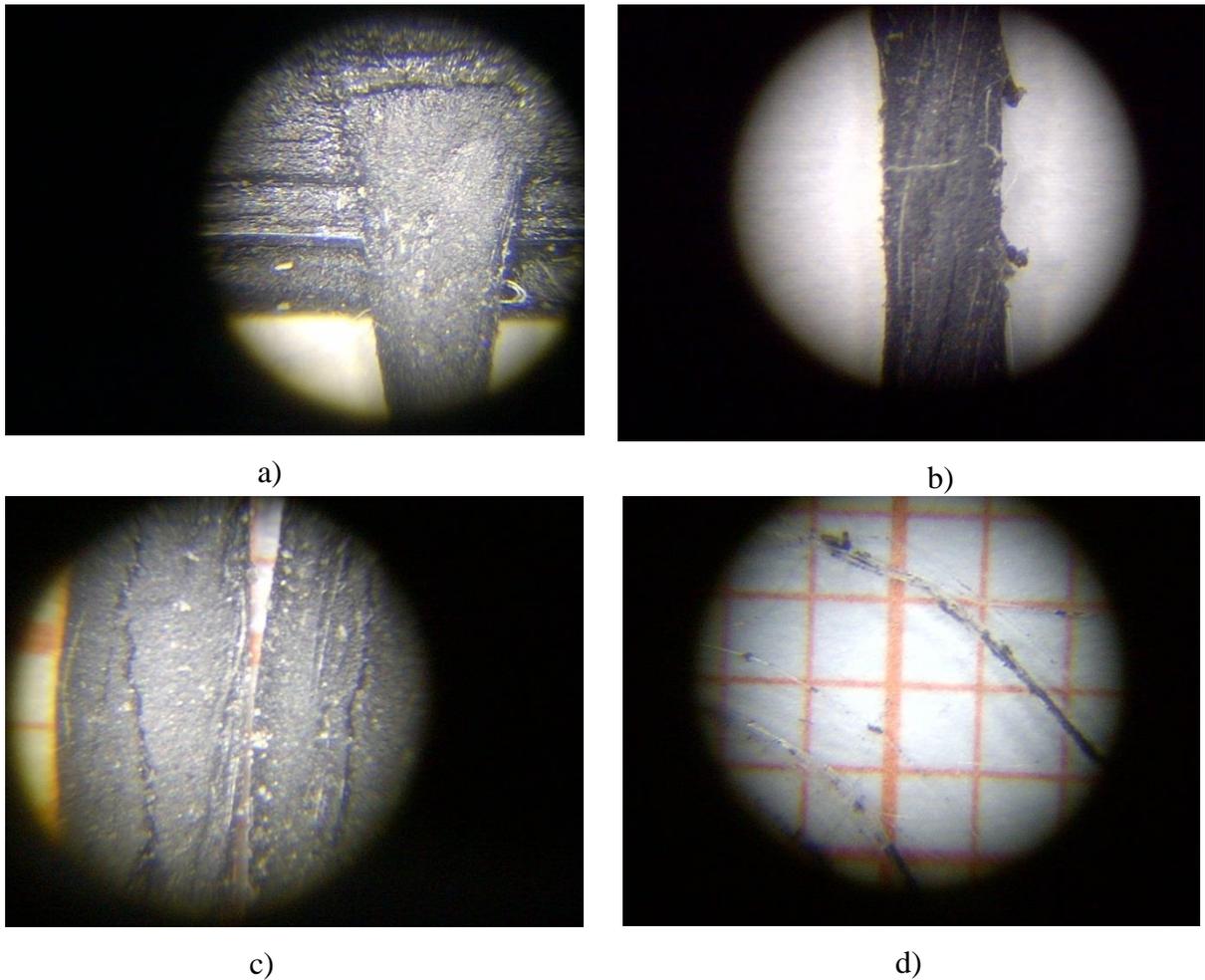


Figura 55– Microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando Estereoscópio marca Leica modelo EZ4. (a) Inicia-se as observações (aumento de gradação da lente em 30x), primeiramente nas junções entre os elementos transversais e longitudinais, verificando-se a ocorrência de alguma falha ou defeito de emenda. (b) e (c) Prossegue-se no ensaio (aumento de gradação da lente em 50x), verificando-se as tramas de entrelaçamento dos fios poliméricos, bem como a cobertura de PVC (cor negra) do material, e a ocorrência de alguma falha ou defeito. (d) Finalmente, com aumento de gradação da lente em 70x, verifica-se os próprios fios poliméricos, a cor, alguma ocorrência de falha ou defeito e a espessura dos fios.

3.2.1.2 Ensaios de tração das geogrelhas.

Realizaram-se ensaios de tração nas geogrelhas utilizadas na pesquisa, MACGRID 40-30 e 60-30, no laboratório da fábrica em Camaçari/BA, conforme a Figura 56, e, posteriormente, no laboratório de ensaios de materiais da UFAM, Manaus/AM, Figura 57.

Na fábrica em Camaçari/BA, os ensaios de tração foram realizados conforme ASTM D6637 e a coleta de amostra seguiu os procedimentos da NBR 12593.



a)



b)



c)



d)

Figura 56 – Ensaio de geogrelha realizado na fábrica da MACCAFERRI, Camaçari – BA, em 26 de julho de 2011. (a) A amostra é inserida na máquina universal de 30 kN e enrolada nos roletes da mesma. (b) Procedese ao ajuste da máquina universal para tração da amostra de geogrelha. (c) O computador ligado à máquina universal registra com precisão a força de tração e o alongamento (%), já transformando a carga (N) para tensão (kN/m). (d) A medida que a geogrelha atinge o estado plástico inicia-se o alongamento da mesma.

Procedimentos adotados:

A fábrica realiza testes a cada 2.000 metros lineares produzidos, conforme plano de qualidade da mesma, coletando a amostra conforme a NBR 12593. Os ensaios de tração são realizados conforme a ASTM D6637.

No Laboratório de Ensaios de Materiais da UFAM (LEM/FT/UFAM), utilizou-se a metodologia de norma NBR 12593 para coleta de amostras e a metodologia do ensaio de tração da norma ASTM D6637.

Utilizou-se a máquina universal TORSEE, fabricada pela TOKIO Testing Machine MFG. CO. Ltda., modelo RAT NO. 30, com capacidade de 300 kN, sistema mecânico analógico. As adaptações para tração de geogrelha na máquina TORSE foram fabricadas em uma oficina de tornearia, como a garra de mordedura da geogrelha (parte superior da tração), demonstrada na Figura 57 (a), e o peça metálica em forma de “T” para fixação da geogrelha (parte inferior da tração, Figura 57 (b)).



a)



b)

Figura 57 – Adaptações construídas em uma oficina de tornearia. (a) Garra de mordedura da geogrelha (parte superior da tração). (b) Peça de aço maciço com diâmetro de 40 mm em forma de “T” (parte inferior da tração).

1º Passo: A geogrelha é cortada nas medidas de 50x30 cm² e inserida na máquina universal, primeiramente, na parte inferior da tração, fixando-a na peça em “T” de aço maciço, Figura 58 (a).

2º Passo: Depois, prende-se a geogrelha na parte superior da tração, utilizando-se a garra de mordedura da geogrelha, conforme a Figura 58 (b).

3º Passo: Ajusta-se a máquina universal para tração e escala adequadas, Figura

59 (a), e inicia-se a tração da geogrelha, medindo-se o alongamento (%) e a força máxima até a ruptura, Figura 59 (b). Realiza-se o ensaio nas direções transversais e longitudinais da geogrelha, três vezes cada. Esse ensaio é realizado oito vezes para calibração da máquina universal. Ensaio concluído.



a)



b)

Figura 58 – Ensaio de tração em geogrelha. (a) Fixação da geogrelha na parte inferior da tração, utilizando-se a peça em “T”. (b) Fixação da geogrelha na parte superior da tração, através da garra de mordedura de geogrelha.



a)



b)

Figura 59 – Ensaio de tração em geogrelha. (a) Ajuste da máquina universal para tração e escala de força, sistema mecânico analógico. (b) Geogrelha rompida por tração. Anota-se a força máxima de tração e o alongamento (%) sofrido pelo material.

3.2.1.3 Ensaios de arrancamento.

O ensaio de arrancamento é um ensaio onde se realiza o arrancamento de uma geogrelha confinada em uma caixa de testes, em modelo reduzido, Figura 60 (a), com solo compactado dentro da mesma, Figura 60 (b).

A caixa de testes foi fabricada em uma tornearia mecânica, com o intuito de utilização nesta pesquisa.

Dentro da caixa de testes é instalada uma célula de tensão total para medição da tensão de confinamento, simulada por uma força de compressão lateral exercida por uma borracha inflável presa na tampa da caixa; na tampa, liga-se uma mangueira que transfere ar comprimido oriundo de um compressor.

Dessa forma, obtêm-se uma tensão (σ_v) de tração da geogrelha (oriunda do arrancamento) e uma tensão (σ_h) de confinamento (oriunda do ar comprimido aplicada na borracha inflável). A partir daí, pode-se calcular a envoltória das tensões, obtendo-se o ângulo de atrito da interação da interface solo-geogrelha e o coeficiente (f) de interação da interface solo-geogrelha.



a)



b)

Figura 60 - Equipamento reduzido de laboratório. (a) Caixa metálica de testes de arrancamento. (b) Colocação de solo na caixa de testes.



a)



b)

Figura 61 - Equipamento reduzido de laboratório. (a) Compactação de solo. (b) Amostra de solo compactada e geogrelha confinada na caixa de testes, com a célula de carga.

O equipamento reduzido é composto por uma caixa de testes metálica, com chapa de aço A36, espessura de 1,02 mm, com 250 mm de comprimento, 300 mm de largura e 150 mm de altura, resultando num volume de $0,01125\text{m}^3$, conforme apresentado na Figura 61 (a). O solo é compactado nesta caixa, em duas camadas, sendo inserida entre as camadas uma amostra de geogrelha, Figuras 61 (b). O ensaio consiste na tração da amostra de geogrelha inserida entre as camadas de solo compactado na caixa. A força de tração e o deslocamento da geogrelha são os resultados do ensaio de arrancamento.

A caixa possui um bico metálico onde foi acoplado uma mangueira de um compressor, marca Chiaperini, modelo Top, com 110 litros e um motor de 2 HP de potência, Figura 62. Esse compressor atua de forma a realizar pressão no solo, que está confinado na caixa de teste para simulação de uma carga na direção horizontal (tensão de confinamento), para que isto ocorra, existe uma borracha que infla, conforme demonstrado na Figura 62, pressionando o solo confinado. Utiliza-se uma máquina universal fabricada pela TOKIO Testing Machine MFG. CO. Ltda., modelo RAT NO. 30, com capacidade de 300 kN, para realizar a força de tração de arrancamento da geogrelha implantada dentro do solo confinado na caixa de testes.



Figura 62 – Borracha que infla, pressionando o solo confinado, com o intuito de simular o confinamento natural do solo.

No interior da camada de solo confinado foi implantada uma célula de tensão total cilíndrica CT ZL/5T, com capacidade para 5.000 kgf (50 kN), com indicador digital MK 5T, que serve para medição e calibração da célula de carga supracitada, Figura 59 (b).

O solo foi compactado dentro da caixa de teste, em duas camadas, 26 golpes, para simular a energia de compactação do Proctor Normal, estando o solo na umidade ótima. Na primeira camada foi implantada a célula de carga CT ZL/5T, Figura 59 (c), para medição da pressão horizontal ocasionada pela pressão da borracha inflável, na segunda camada foi acrescida a amostra de geogrelha e, finalmente, a última camada de solo compactado.

Então, procedeu-se ao lacre da caixa de testes, parafusando a tampa superior, que possui uma borracha acoplada, objetivando o inflamento por parte do ar comprimido enviado pelo compressor instalado no laboratório, simulando, dessa forma, a tensão de confinamento da amostra de solo. A célula de carga fica ligada ao medidor digital, podendo-se desta forma medir-se a carga de confinamento do solo, mesmo durante a tração de arrancamento da geogrelha de teste.

Foram elaborados dois desenhos esquemáticos durante a pesquisa científica, conforme mostrado nas Figuras 63 e 64, tratam dos desenhos da caixa de testes e da garra de testes, em modelo reduzido, com o intuito da fabricação desses equipamentos em uma oficina de tornearia, conforme demonstrado na Figura 65 (d).

CAIXA DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA

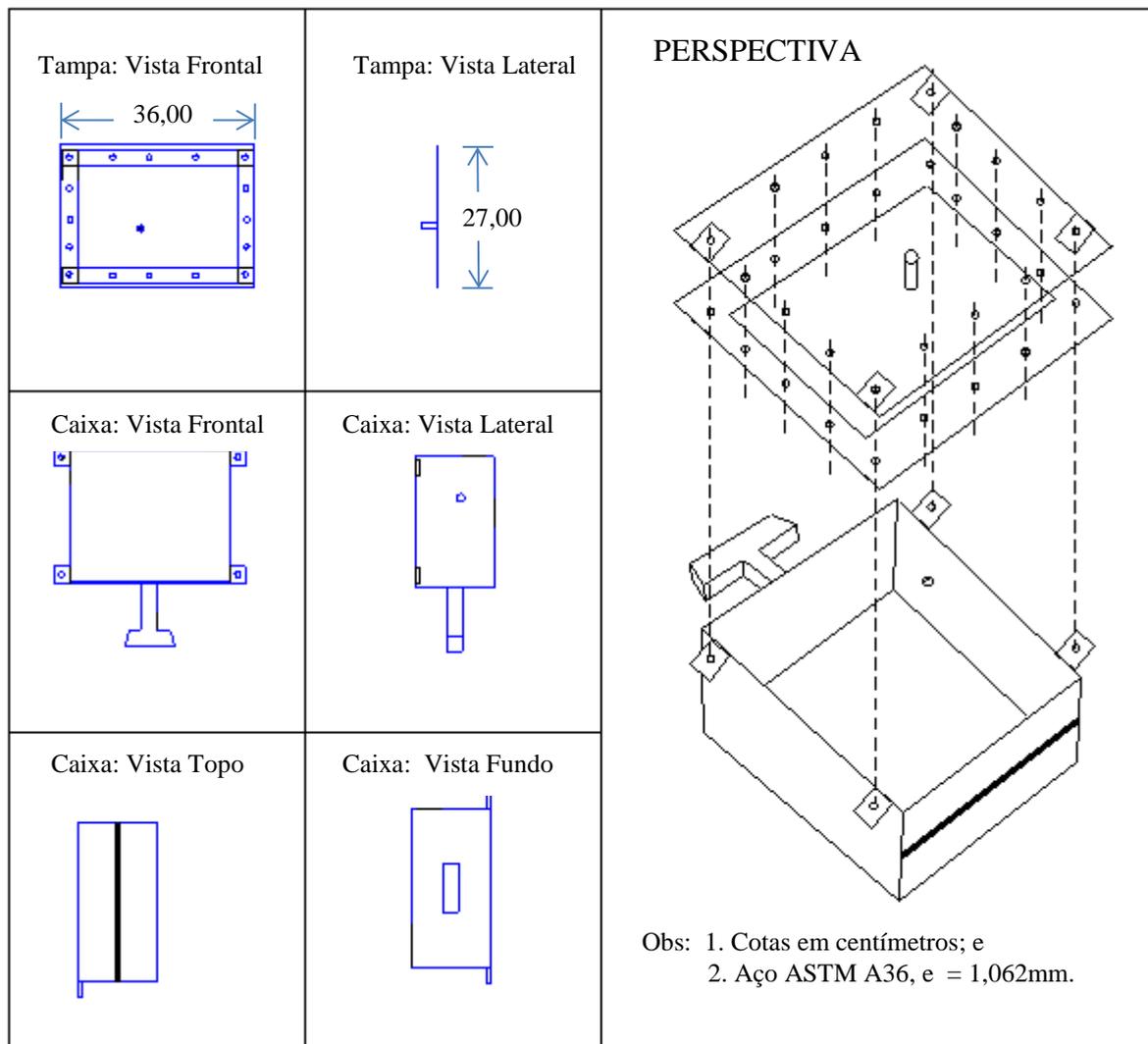


Figura 63 - Desenho elaborado na pesquisa para construção da caixa de testes de arrancamento para uso no equipamento reduzido de laboratório.

A tampa da caixa de testes foi projetada para acoplamento de uma borracha, que quando expandida, devido à pressão do ar comprimido, simula as pressões internas da inclusão do solo na direção horizontal. O sistema possui similaridade com o ensaio de Compressão Triaxial, possibilitando, dessa forma, o traçado do círculo de Mohr das tensões atuantes na amostra de solo.

GARRA DE FIXAÇÃO DE GEOGRELHA

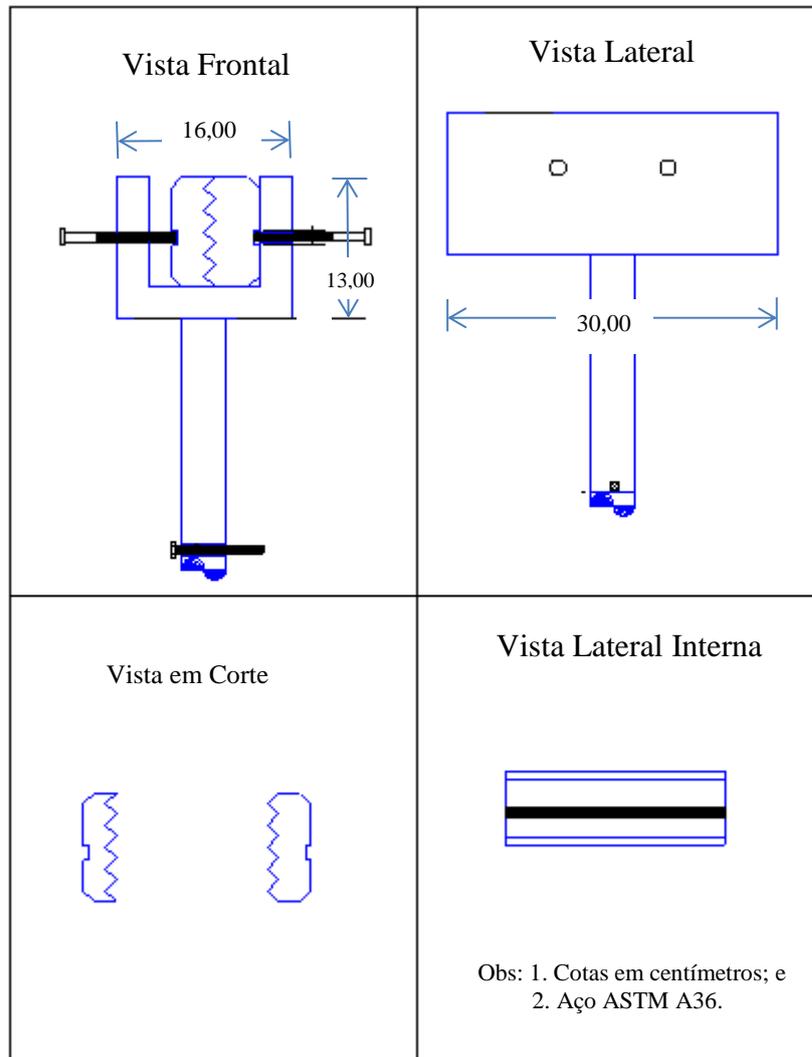


Figura 64 – Desenho elaborado na pesquisa para construção da garra de testes de arrancamento para uso no equipamento reduzido de laboratório.

A garra metálica foi projetada para resistir aos esforços aplicados na geogrelha inclusa no solo, para isto, as peças metálicas foram construídas de aço maciço, com o intuito de evitar o “esmagamento” da haste cilíndrica e das garras. As garras possuem dentes metálicos que não estão afiados, para se evitar que a geogrelha seja cortada pelos dentes metálicos da garra, durante o ensaio de arrancamento.



a)



b)



c)



d)

Figura 65 - Equipamento reduzido de laboratório. (a) Compressor de ar 110 litros, com potência de 2HP. (b) Célula de carga CT ZL/5T com indicador digital MK 50 kN. (c) Implantação da célula de carga em um orifício do solo compactado na primeira camada de solo. (d) Fabricação da caixa de testes e da garra em uma oficina de tornearia.

A pressão de ar na borracha inflável, na tampa da caixa de testes, é controlada por um manômetro e uma válvula reguladora. Garante-se assim que a sobrecarga seja aplicada de forma homogênea e constante sobre toda a superfície de solo compactado no interior da caixa, de acordo com a Figura 66.



Figura 66 – Tampa com borracha inflável para simular a tensão confinante do solo.

Procedimentos aplicados para a realização do ensaio:

1° Passo: O solo da amostra de solo 1 foi seco à sombra e posteriormente peneirado na malha #4. Logo após, determinou-se a sua umidade higroscópica e fez-se a correção de umidade para adequá-la à umidade de compactação, no caso a umidade ótima. A fim de garantir uma homogeneização, os solos foram mantidos, após o preparo, em sacos plásticos por 24 horas, Figura 67 (a);

2° Passo: Engraxam-se as paredes da caixa para instalação de duas camadas de material sintético, Figura 67 (b), com o intuito de reduzir a rugosidade das paredes internas. Após revestidas todas as paredes internas, iniciou-se a compactação da primeira camada de solo;

3° Passo: A compactação foi controlada através do conhecimento da massa de solo a ser compactada no interior da caixa de teste. A compactação foi executada em duas camadas de 0,075 m, com volume em cada camada de 0,0028 m³. O grau de compactação do

solo nos ensaios em que se utilizou as amostras 1, 2, 3 e 4 foi de 96% e no solo 5 foi de 100% da energia do ensaio de Proctor Normal, Figura 67 (c), conforme estudos realizados no Capítulo 2.

4° Passo: A primeira camada foi compactada de maneira que a sua superfície acabada coincidissem com a metade da abertura frontal, ou seja, 0,075 m de espessura. Compactada a primeira camada, então inseriu-se a célula de tensão total, através de um orifício de 30 mm de diâmetro por 20 mm de profundidade, escavado no solo compactado na caixa de testes. Em seguida, implantou-se a célula de tensão total CTZ/5T, de tal forma que ficasse aproximadamente 10 mm abaixo da geogrelha, Figura 67 (d);

5° Passo: Recompôs-se o furo no solo compactado, de forma a se ter a superfície plana coincidente com a superfície da primeira camada compactada. Colocou-se a geogrelha, com dimensões de 30 cm de largura e, no interior da caixa, adotou-se 25 cm de comprimento, conforme padronizado no Capítulo 2, sobre a primeira camada, após escarificação da superfície do solo compactado, de forma a ter-se 110 mm de comprimento para fora da abertura da caixa para fixação da garra. Então, compactou-se a segunda camada de solo até uma altura de 5,0 mm da borda da caixa de ensaio, para facilitar a acomodação da borracha inflável sobre a segunda camada de solo, Figura 68 (a);

6° Passo: Fixou-se a tampa à caixa e o conjunto preso à base da máquina universal de ensaio. Aplicou-se, em seguida, a sobrecarga através de ar comprimido. Finalmente, fixou-se a geogrelha à garra de tração, com cuidado para protegê-la contra eventuais danos no aperto da garra, e realizou-se o ensaio de tração para arrancamento da geogrelha, Figura 68 (b);

7° Passo: Realizou-se o ensaio de arrancamento, registrando-se a carga máxima de resistência ao arrancamento e o deslocamento, Figura 68 (c) e (d). Finalmente, repete-se mais 5 (cinco) vezes o ensaio, objetivando à calibração do equipamento;

Após a calibração do equipamento reduzido de laboratório, partiu-se para a realização dos ensaios de arrancamento com a variação do tipo de geogrelha, do tipo de solo e da velocidade de arrancamento.



Figura 67 – Ensaio de Arrancamento de geogrelha utilizando um equipamento reduzido de laboratório. (a) A fim de garantir uma homogeneização, os solos foram mantidos, após o preparo, em sacos plásticos por 24 horas. (b) Engraxou-se as paredes da caixa para instalação de camadas de material sintético para reduzir a rugosidade. (c) Compactação executada em duas camadas de 0,075 m, com volume em cada camada de 0,0028 m³ e energia do Proctor Normal (d) Instalação da célula de tensão total CTZ/5T a aproximadamente 10 mm abaixo da geogrelha.



a)



b)



c)



d)

Figura 68 – Ensaio de arrancamento de geogrelha. (a) Compactação da segunda camada de solo na caixa de testes. (b) Ensaio de arrancamento sendo realizado. (c) Realização do ensaio e calibração do equipamento reduzido. (d) Finalização do ensaio de arrancamento.

Para todos os ensaios de arrancamento realizados o comprimento não confinado da geogrelha foi de 11 centímetros (l_0), entre a garra de mordedura e a face frontal do equipamento.

Os procedimentos para leitura do deslocamento da geogrelha durante o ensaio foram:

1° Passo: Iniciou-se o ensaio com o comprimento inicial de 11 cm (l_0);

2° Passo: De acordo com cada força aplicada, anotou-se o valor do deslocamento (Δl) devido à deformação da geogrelha, no trecho não confinado;

3° Passo: Ao final do ensaio, obteve-se o deslocamento total (D_t), então subtraiu-se o deslocamento (Δl) do deslocamento total (D_t), obtendo-se o deslocamento real (Δr);

4° Passo: Para a próxima etapa de força, o comprimento inicial será a soma de l_0 e Δr .

O tamanho da amostra de geogrelha adotada foi o sugerido por KAKUDA (2005), uma amostra de 30 cm de largura por 25 cm de comprimento, a ser inserida no interior da caixa de testes. Dessa forma, adotaram-se estas dimensões como padrão nos ensaios realizados.

Durante os ensaios de arrancamento, registraram-se as variáveis de tempo, força resistente ao arrancamento, deslocamento e leitura da célula de carga. Os ensaios foram repetidos, variando-se o tipo de amostra de solo (1 a 5), a velocidade de ensaio para cada amostra de solo (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 120 mm/min) e o tipo de geogrelha (40x30 e 60x30).

3.3 Elaboração de programa computacional para cálculo de reforço de taludes utilizando as geogrelhas, amostras de solo e resultados dos ensaios realizados.

O programa computacional elaborado é uma ferramenta que realiza a análise estatística dos resultados dos ensaios da pesquisa, além disso, calcula o reforço estrutural de taludes utilizando os dados dos ensaios, como tipo de geogrelha, tipo de solos, coeficiente de interação solo-geogrelha, coeficientes de segurança, tipo de rolo compressor e demais dados.

Utilizou-se o compilador Pascalzim 5.1.1 para criação das rotinas e sub-rotinas de programação.

O programa no modo executável, extensão “.exe”, pode ser executado em qualquer ambiente Windows, sem problemas aparentes detectados. O código fonte somente é visível com o compilador, mas pode ser acessado no CD-ROM, apêndice - A, além de estar transcrito nesta pesquisa no apêndice - B.

Quanto ao algoritmo utilizado no programa computacional, segue o fluxograma na Figura 69.

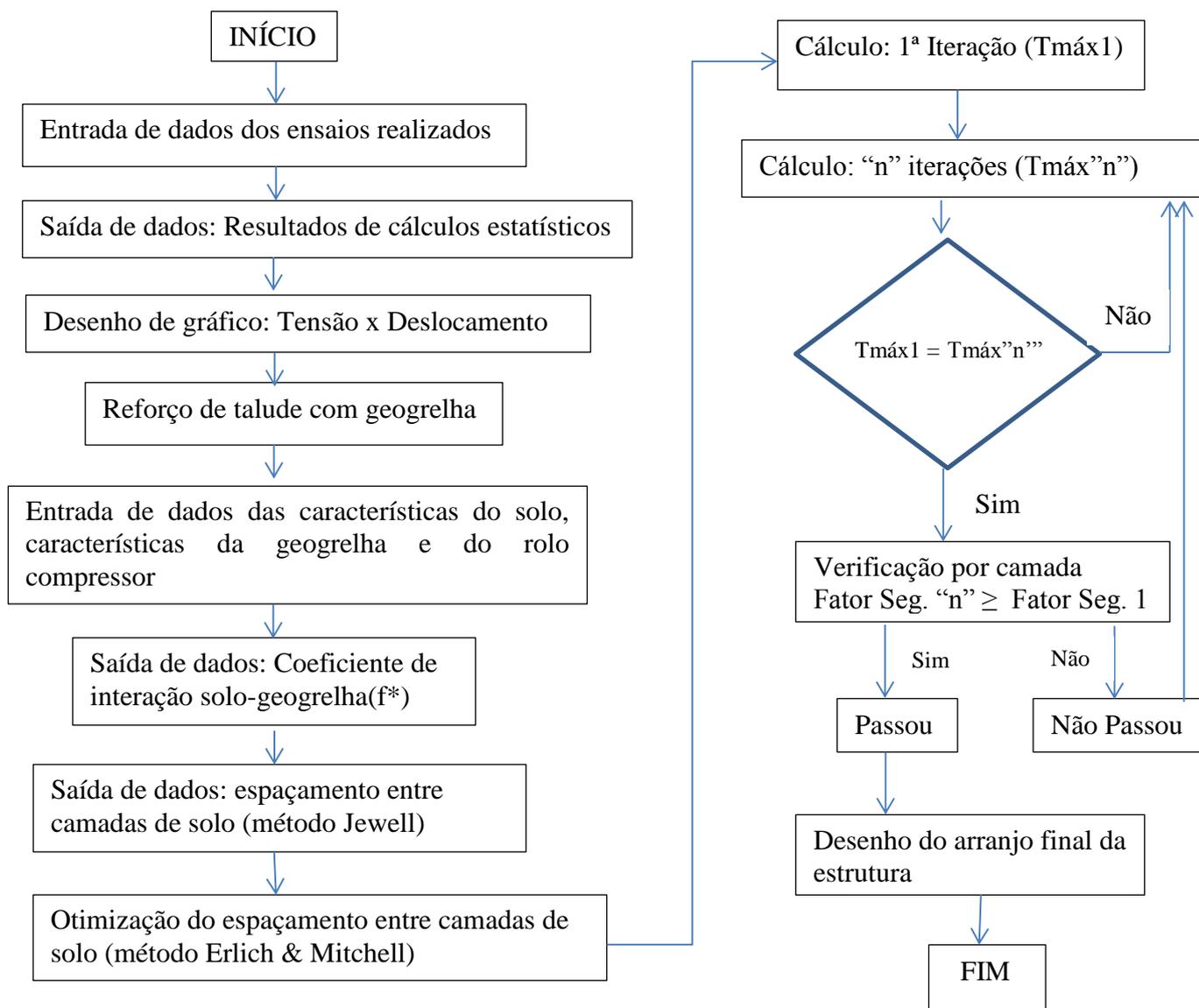


Figura 69 - Fluxograma do programa computacional elaborado na pesquisa.

Em sequência, transmutou-se o código do programa para a plataforma de programação do *Visual Basic* (VB), utilizando-se a planilha eletrônica Microsoft Excel, com o

intuito de se melhorar o aspecto estético dos gráficos e das janelas de comunicação com o usuário.

Prossegue-se com o passo a passo da elaboração do programa computacional, que encontra-se no apêndice.

Durante a pesquisa, optou-se pela utilização do Excel como plataforma de programação em VB (*Visual Basic*), tendo em vista que o mesmo possui códigos já prontos, como a poderosa ferramenta Solver³, utilizada para cálculos de otimização. Segundo SACOMAN (2012), a empresa americana Frontline Systems Inc. adquiriu os direitos de utilização do método GRG (Gradiente Reduzido Generalizado) e criou o Solver em diferentes versões para uso comercial, tendo como clientes a NASA, Bell Aerosystems, Boeing, etc. A Frontline iniciou uma parceria com a Microsoft onde foram desenvolvidas versões específicas do Solver para otimização em planilhas, com isto a Microsoft incluiu o Frontline Solver no Microsoft Office, possibilitando que qualquer pessoa que utilize o Excel possa usufruir do Solver e do método GRG, bem como do compilador VB (*Visual Basic*).

³ MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft excel solver**. Disponível em:<office.microsoft.com>. Acesso 2013.

Capítulo 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Nesse capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das amostras de solo, nos ensaios de tração das geogrelhas, nos ensaios de arrancamento e, finalmente, os resultados obtidos pelo programa computacional elaborado, com as análises respectivas.

4.1 Ensaios de Caracterização das Amostras de Solo.

As cinco amostras de solo utilizadas nos ensaios de arrancamento foram caracterizadas através dos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real, compactação, índice de suporte Califórnia (ISC) e ensaios de compressão triaxial (UU), rápido não drenado, comentados a seguir:

4.1.1 Ensaio de análise granulométrica conjunta (sedimentação e peneiramento) das amostras de solo (NBR 7182).

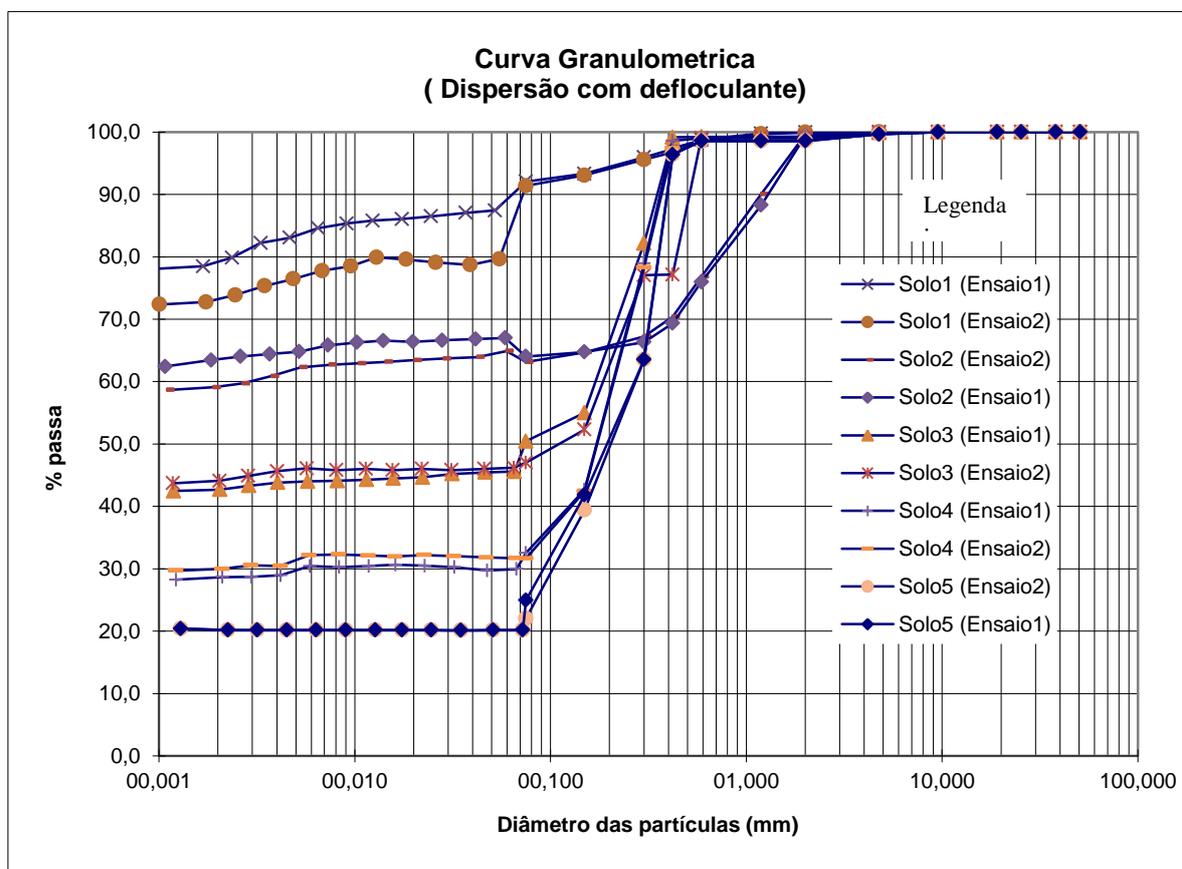


Figura 70 – Resultado dos Ensaios de Análise Granulométrica Conjunta das Amostras de Solo 1 a 5 (realizados dois ensaios para cada tipo de amostra de solo).

As curvas de granulometria das amostras de solo de 1 a 5, Figura 70, comportaram-se conforme o esperado, a amostra de solo n° 1, composta do solo *in natura* típico da cidade de Manaus, apresentou uma curva granulométrica de uma argila com os grãos bem finos; e à medida que ocorreram as misturas com areia, as curvas granulométricas foram ficando mais heterogêneas, apresentando, além dos grãos finos, grãos grossos provenientes da areia, reduzindo, portanto, a porcentagem de silte e de argila na mistura, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de granulometria das amostras de solo.

Amostra n°:	%		
	areia	silte	argila
1	9,89	10,97	79,13
2	36,28	4,32	59,17
3	51,43	5,19	42,67
4	68,01	2,36	28,67
5	77,78	0,71	20,19

4.1.2 Ensaio de Limites de Liquidez e Limite de Plasticidade.

4.1.2.1 Ensaio de limites de plasticidade (NBR 7180).

A Tabela 7 mostra o resultado dos ensaios de plasticidade nas amostras de solo de 1 a 4. A amostra 5 não foi ensaiada por se tratar de material não plástico.

A curva da Figura 71 demonstra o resultado dos limites de plasticidade para os quatro ensaios, verificando-se a tendência de redução da plasticidade da amostra de solo n° 1 até a 4, o que era esperado, tendo em vista que a amostra de solo n° 1 é uma argila pouco arenosa, material plástico, e à medida que foram ocorrendo as misturas com areia nas proporções de 20%, 40% e 60%, tornou-se evidente que a plasticidade seria reduzida.

Notar a redução da plasticidade, praticamente linear, à exceção do quarto ensaio.

Dessa forma, os resultados dos ensaios de limite de plasticidade demonstraram estar coerentes com o comportamento esperado.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de limite de plasticidade das amostras de solo.

Amostras	1	2	3	4	5
Umidade (%)	45	33	24	18	NP

*NP = não plástico.

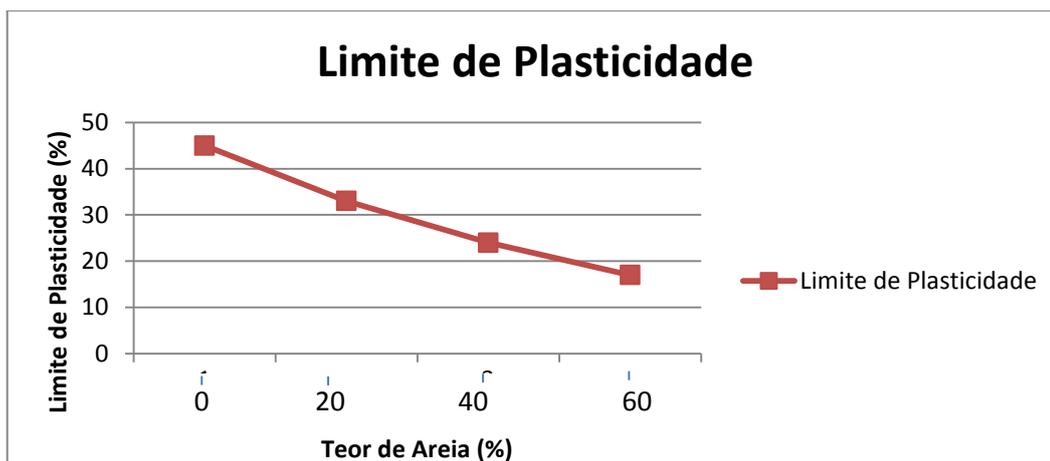


Figura 71 – Resultado dos Ensaio de Limite de Plasticidade das amostras de solo de 1 a 4.

4.1.2.2 Ensaio de limite de liquidez (NBR 6459).

Conforme as curvas da Figura 72, os resultado dos ensaios de limite de liquidez das amostras de 1 a 4 indicam que o limite de liquidez foi reduzindo da amostras de solo n° 1 até a 4, o que é esperado, haja vista que o solo, quando misturado com areia, torna-se menos plástico. Os resultados estão resumidos na Tabela 8. Pelos mesmos motivos expostos no item anterior, a amostra de solo 5 não foi ensaiada, por ser constituída de areia peneirada, não plástica.

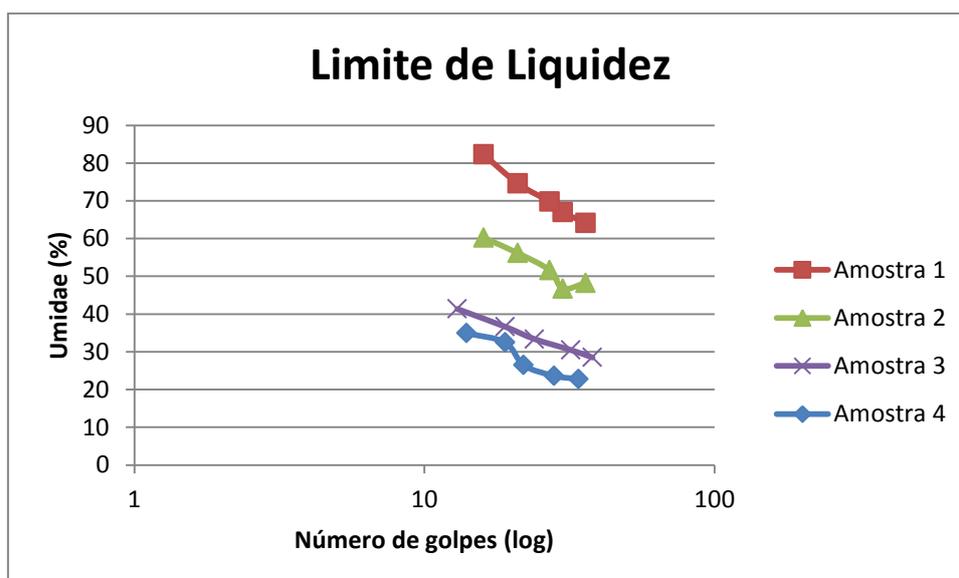


Figura 72 – Resultado dos Ensaio de Limite de Liquidez das Amostras de Solo 1 a 4.

Tabela 8 – Resultado do ensaio de limite de liquidez das amostras de solo.

Amostra n°:	1	2	3	4
LL (%)	71	51	31	27

4.1.3 Ensaio de Densidade real (DNER 9364).

O resultado dos ensaios de densidade real para as amostras de solo n° 1 a 5, conforme Figura 73 mostraram-se coerentes. Conforme apresentado nas Tabelas de 9 a 13, verifica-se que dentre as misturas o solo 4 apresentou a maior densidade real, possivelmente os grãos da areia geram um arranjo de partículas que proporciona menos vazios no solo *in natura* contribuindo para uma melhoria nas qualidades geotécnicas do material.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo n°1.

Densidade Real # 2mm			
Temperatura (°C)	26,8	26,8	26,8
Pic. Vazio	38,516	41,216	38,331
Pic. + água (g)	89,19	92,04	92,51
Pic.+água+solo(g)	97,01	98,41	99,47
Pic. + solo	50,23	51,90	50,90
Densidade Real Média	G_s:		2,57

Tabela 10 – Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo n°2.

Densidade Real # 2mm			
Temperatura (°C)	31	31	31
Pic. Vazio	38,067	40,621	39,383
Pic. + água (g)	89,19	92,04	92,51
Pic.+água+solo(g)	96,48	98,28	98,60
Pic. + solo	48,96	51,80	49,24
Densidade Real Média	G_s:		2,63

Tabela 11 – Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo n°3.

Densidade Real # 2mm			
Temperatura (°C)	32,7	32,7	32,7
Pic. Vazio	38,528	41,216	38,333
Pic. + água (g)	89,70	91,96	91,84
Pic.+água+solo(g)	96,56	98,26	98,60
Pic. + solo	50,25	51,57	49,12
Densidade Real Média	G_s:		2,65

Tabela 12 – Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo n°4.

Densidade Real # 2mm			
Temperatura (°C)	32,7	32,7	32,7
Pic. Vazio	38,521	41,214	38,329
Pic. + água (g)	89,73	91,96	91,84
Pic.+água+solo(g)	95,75	98,04	97,86
Pic. + solo	48,24	51,23	48,06
Densidade Real Média	G_s:		2,66

Tabela 13 – Resultado do ensaio de densidade real da amostra de solo n°5.

Densidade Real # 2mm			
Temperatura (°C)	32,8	32,8	32,8
Pic. Vazio	38,519	41,212	38,328
Pic. + água (g)	89,70	91,95	91,85
Pic.+água+solo(g)	95,92	98,48	97,92
Pic. + solo	48,67	51,95	48,98
Densidade Real Média	G_s:		2,49

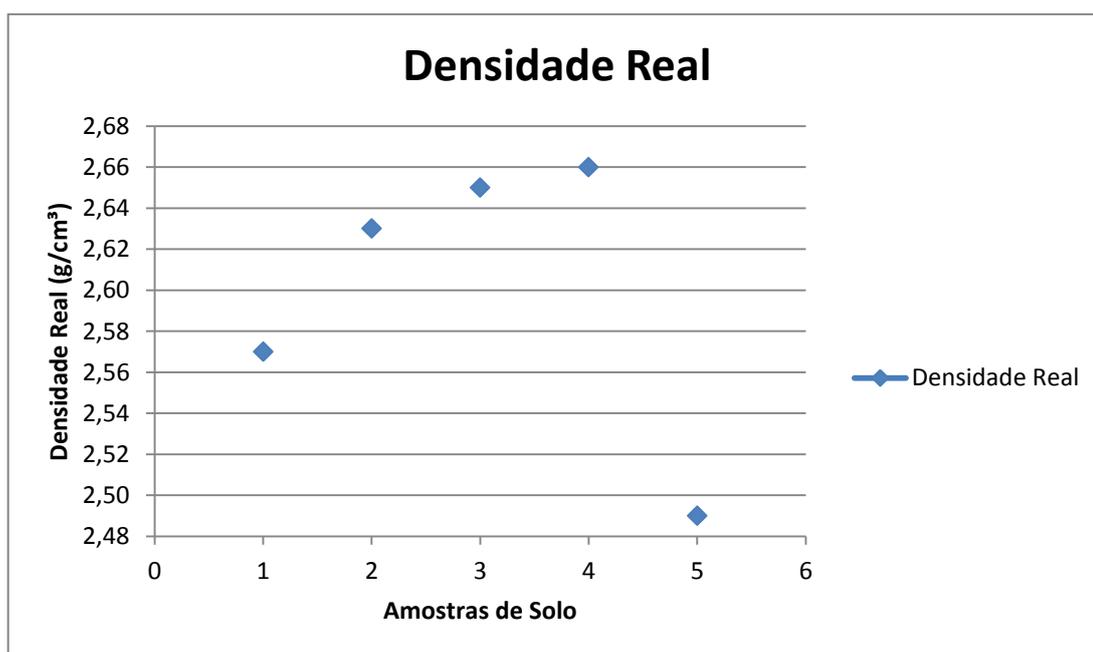


Figura 73 – Resultado dos ensaios de densidade real (DNER 9364) das amostras de solo 1 a 5.

Tabela 14 – Resultado do ensaio de Densidade Real das Amostras de Solo.

Amostra n°:	1	2	3	4	5
Densidade Real do Solo (g/cm ³)	2,57	2,63	2,65	2,69	2,49

4.1.4 Ensaio de Compactação (NBR 7182).

O maior valor da massa específica seca e sua respectiva umidade ótima pode ser retirada das curvas dos ensaios de n^{os} 1 a 4, conforme a Figura 74. Verifica-se que a amostra de solo n^o 4 apresentou o maior valor de massa específica seca, com relação às demais amostras de solo. A amostra de solo n^o 4 apresentou uma massa específica seca 33,6% maior que a massa específica seca da amostra de solo n^o 1, amostra de argila *in natura*.

Denota-se, então, que a amostra de solo n^o 4, por apresentar uma massa específica seca 33,6% superior a da amostra de solo n^o 1 (solo *in natura*), demonstrou assim uma melhoria de qualidade geotécnica do material de solo, devido à mistura de 60% de areia. Com certeza, a areia gerou um arranjo de partículas que proporciona menos vazios no solo *in natura*, diminuindo a superfície específica e, por consequente, o teor de umidade ótima do solo. A Tabela 15 mostra o resumo dos ensaios de compactação.

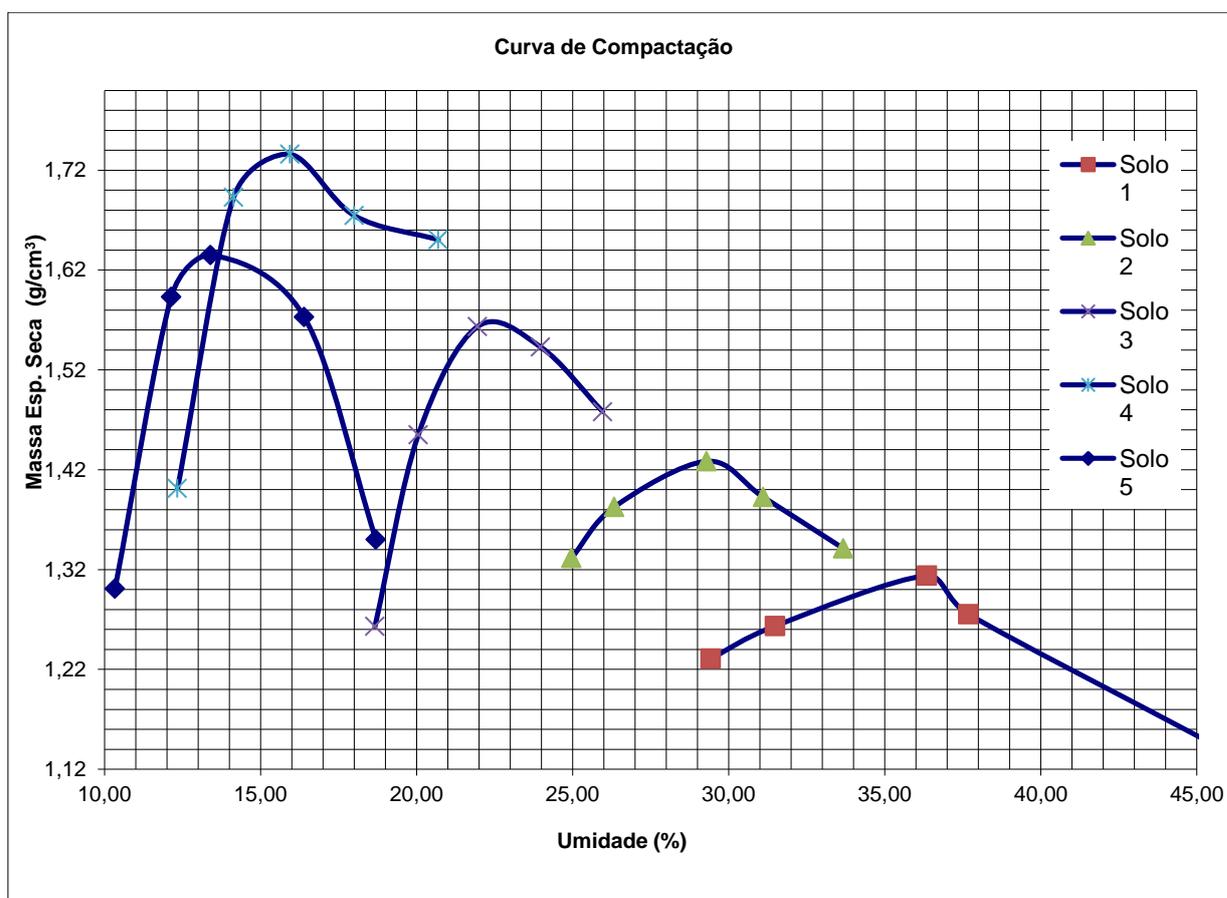


Figura 74 – Resultado dos ensaios de compactação das amostras de solo de 1 a 4.

Tabela 15 – Resultado do ensaio de compactação das amostras de solo.

Amostra n°:	1	2	3	4	5
ρ_s (g/cm ³)	1,31	1,43	1,56	1,75	1,63
W _{ót} (%)	36,20	29,50	22,60	15,60	13,18

4.1.5 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) – NBR 9895.

Os resultados dos ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras de solo n^{os} 1 a 5, na energia normal, estão demonstrados na Figura 75. Os resultados dos ensaios de ISC da amostra de solo n^{os} 1 a 5 mostraram-se coerentes, conforme Tabela 16. O maior valor foi da amostra de solo n^o 4, que apresentou um valor 13% de ISC superior da amostra de solo n^o 1 (solo *in natura*), demonstrou assim uma melhoria de qualidade geotécnica do material de solo *in natura*. Provavelmente, a areia preencheu de forma eficaz a estrutura do solo n^o 1 (solo *in natura*).

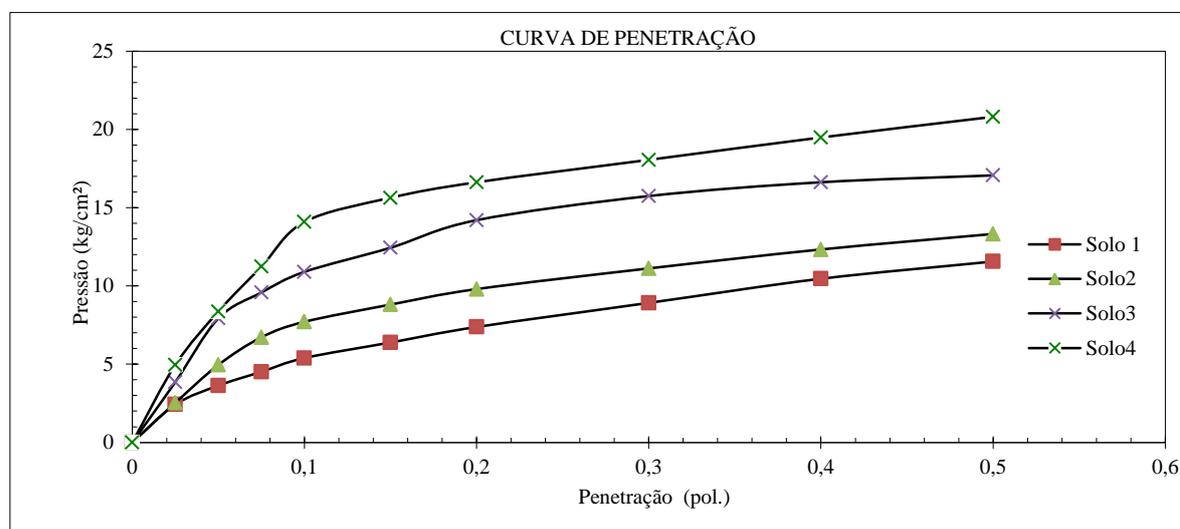


Figura 75 – Resultado dos Ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) das amostras de solo n^{os} 1 a 5.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) das amostras de solo.

Amostra n°:	1	2	3	4
ISC (%)	7,67	10,96	15,50	20,04
Expansão (%)	1,31	0,96	0,78	0,44

4.1.6 Ensaio de Compressão Triaxial.

A amostra de solo n° 1 apresentou coesão de 89,80 kPa e ângulo de atrito de 7,17° e, tendo em vista tratar-se de argila *in natura*, o resultado foi considerado normal, dentro dos parâmetros de coerência. A amostra de solo n° 4 apresentou menor índice de vazios, aparentando estar mais compacta, o maior ângulo de atrito, explicado pela adição de areia e uma coesão mediana.

A Figura 76 mostra o gráfico do ensaio de compressão triaxial e a Figura 77 mostra o gráfico da envoltória de resistência ao cisalhamento, já a Tabela 17 resume as principais propriedades geotécnicas das amostras, obtidas do ensaio de compressão triaxial.

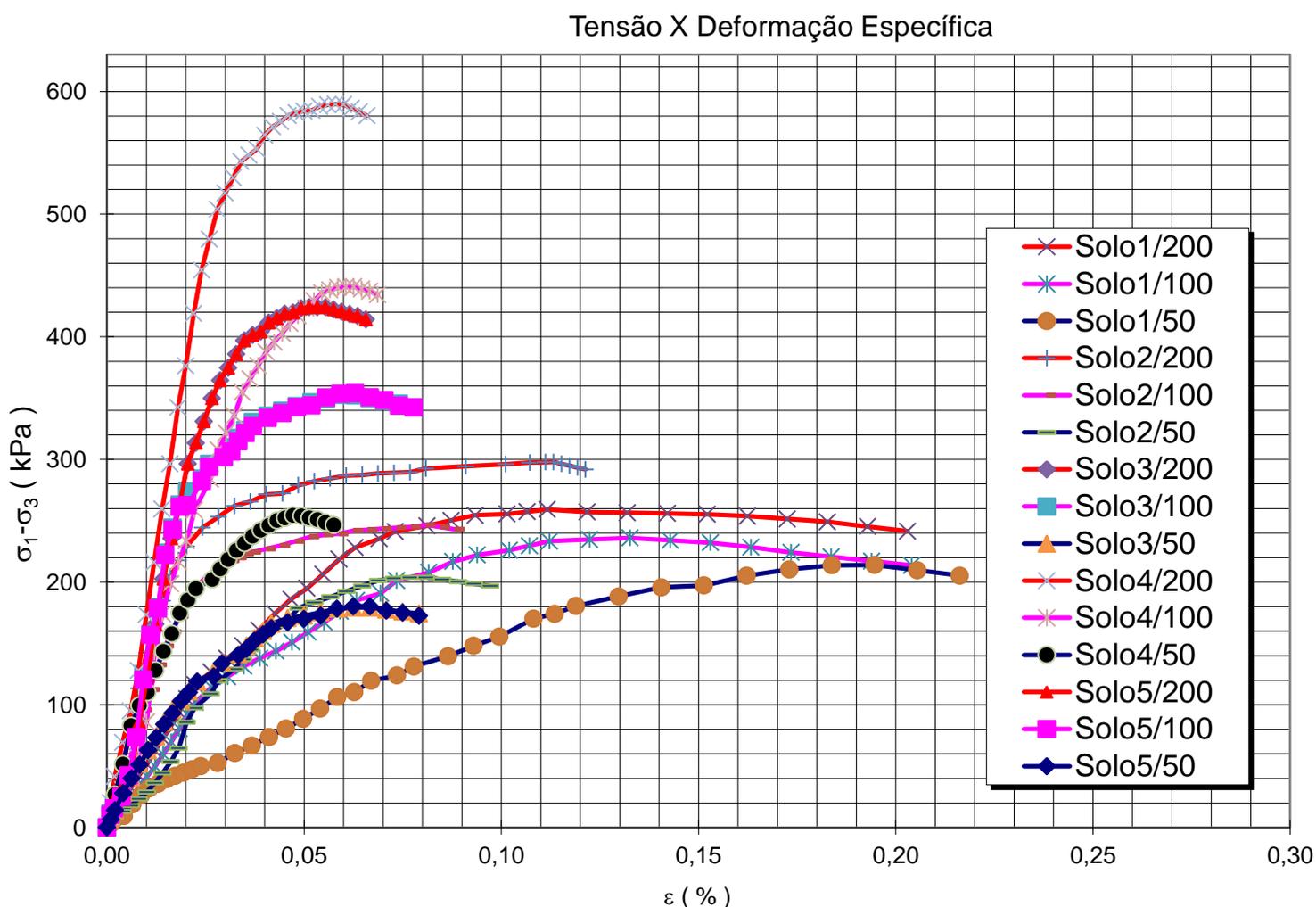


Figura 76 – Resultado do ensaio de compressão triaxial das amostras de solo n° 1, 2, 3, 4 e 5 sendo que foram realizados três ensaios para cada amostra nas tensões de 200, 100 e 50 kPa.

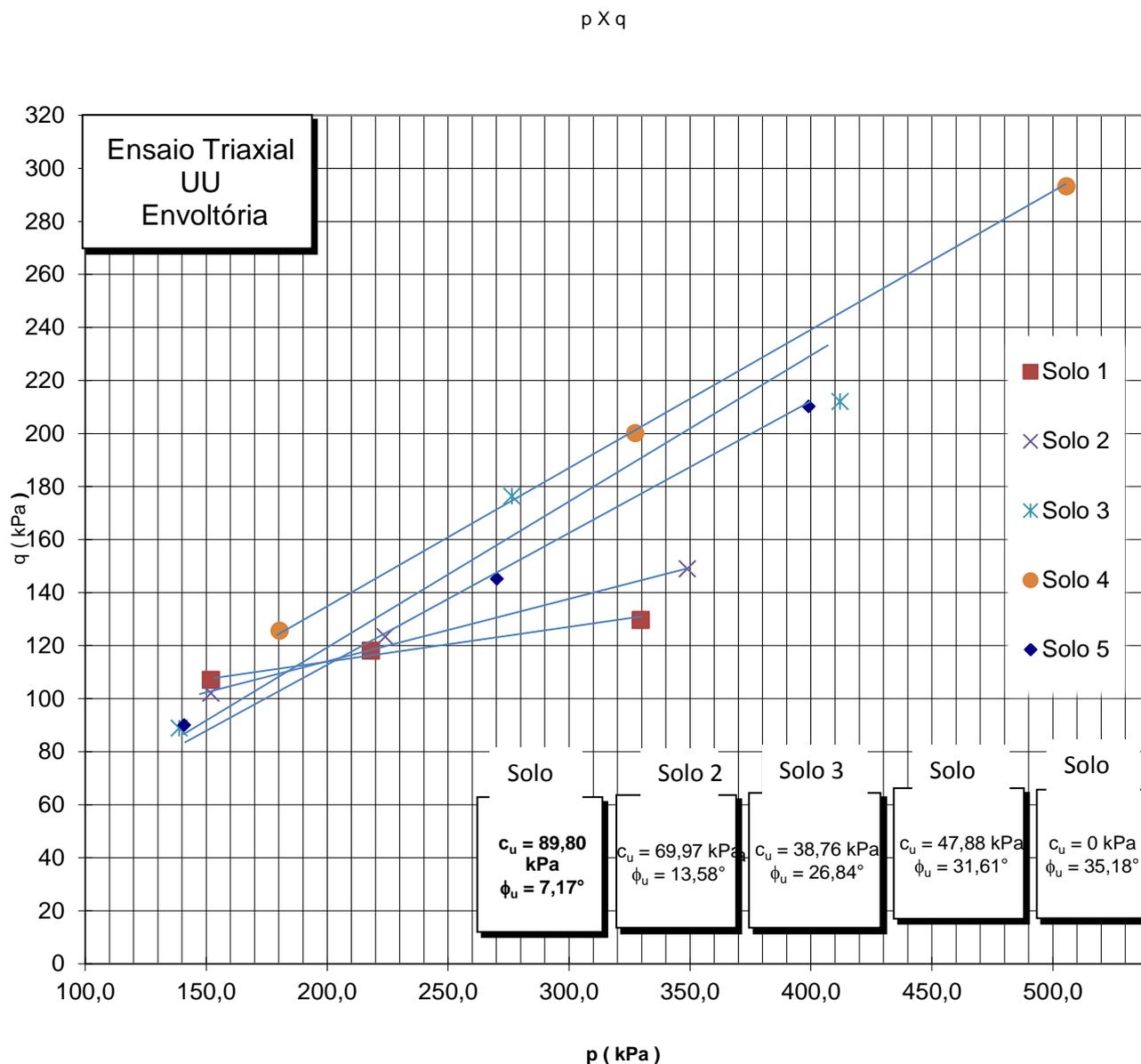


Figura 77 – Resultado do ensaio de compressão triaxial : Envoltórias de trajetória ao cisalhamento das amostras de solo n°1, 2, 3 e 4 e 5.

Segundo BISHOP et al. (1960), que realizou um extenso programa de ensaios de compressão triaxiais modificados, sem qualquer medição de poropressão, obras geotécnicas envolvem mudanças no estado de tensões e, conseqüentemente, variações na posição e raios do círculo de Mohr, o que pode ocasionar dificuldade na visualização de vários estágios de carregamento, por isto, utilizam-se as trajetórias de tensão, definidas a partir do ponto correspondente a tensão cisalhante máxima. Nesse caso pode-se plotar o diagrama a partir dos eixos “p x q”:

$$p' = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - u_a \right) \quad (39)$$

$$q = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \quad (40)$$

Sendo:

σ_1 : tensão vertical;

σ_3 : tensão principal confinante; e

u_a : pressão neutra.

Tabela 17 – Resumo do ensaio de compressão triaxial das amostras de solo n° 1, 2, 3, 4 e 5.

Propriedades	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4	Solo 5
$W_{ót}$ (%)	36,20	29,50	22,60	15,60	13,18
γ_s (kN/m ³)	13,08	14,26	15,62	17,52	16,31
e - vazios	1,18	0,94	0,65	0,52	0,71
Sr (%)	81,6	83,20	90,50	76,50	81,20
C_u (kPa)	89,80	69,97	38,76	47,88	0
ϕ_u (°)	7,17	13,58	26,84	31,61	35,18

4.1.7 Resumo dos ensaios de caracterização das amostras de solo.

A Tabela 18 apresenta o resumo da caracterização das amostras de solo de n° 1 a 5, apresentando as características geotécnicas do solo “in natura” e as demais misturas nas proporções de 20%, 40%, 60% e 100% de areia. A amostra de solo n° 4 apresentou os melhores resultados de qualidade geotécnicos.

Tabela 18 – Resumo dos resultados da caracterização das amostras de solo com a devida classificação de cada amostra de solo.

Propriedades	Solo 1 (solo <i>in natura</i>)	Solo 2 (mistura de 20% areia)	Solo 3 (mistura de 40% areia)	Solo 4 (mistura de 60% areia)	Solo 5 (areia)
Massa Específica dos Sólidos - ρ (g/cm ³)	2,57	2,63	2,65	2,66	2,63
Limite de Liquidez LL(%)	71,55	52,60	34,05	28,05	*np
Limite de Plasticidade LP(%)	44,87	33,16	23,62	19,17	*np
Massa Específica Seca Máxima obtida no Proctor Normal - $\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,31	1,43	1,56	1,75	1,63
Umidade Ótima obtida no Proctor Normal Wot (%)	36,20	29,50	22,60	15,60	13,18
Ângulo de Atrito Interno ϕ (°)	7,17	13,58	26,84	31,61	39,30
Coesão do Solo c (kPa)	89,80	69,97	38,76	47,88	0
Grau de Compactação GC (%)	96,00	96,00	96,00	96,00	100,00
Índice de Suporte Califórnia - ISC (%)	13,47	10,96	12,62	15,50	11,09
Expansão Exp. - (%)	0,13	0,96	0,78	1,13	0,00
Classificação SUCS	CH	CL	CL	CL	SF
Classificação TRB	A-7-5	A-4	A-4	A-2	A-3

*np = solo não plástico

Obs: SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos.

TRB – Transportation Research Board.

4.2 Ensaios de microscopia das geogrelhas.

Na observação dos fios poliméricos, conforme mostrado nas Figuras 78 e 79, bem como a observação das tramas e junções, constatou-se que os fios possuem um diâmetro de $\bar{\mp}$ 1mm, por comparação com o traço do papel milimetrado, o fio tem aparência transparente, não foi encontrado nenhum defeito nas tramas que pudesse prejudicar o desempenho da geogrelha. A cobertura que envolve a trama de fios é da cor preta, sendo um material de PVC, utilizada para proteger a trama contra os raios UV, mantendo o conjunto de fios interligados uns aos outros, e que apresentou algumas fissuras, mas é considerado normal, tendo em vista ser um material flexível, sujeito a esforços de tração.

O material analisado apresentou boas condições de fabricação e conservação, estando apto para ser submetido a ensaios de tração e de arrancamento.

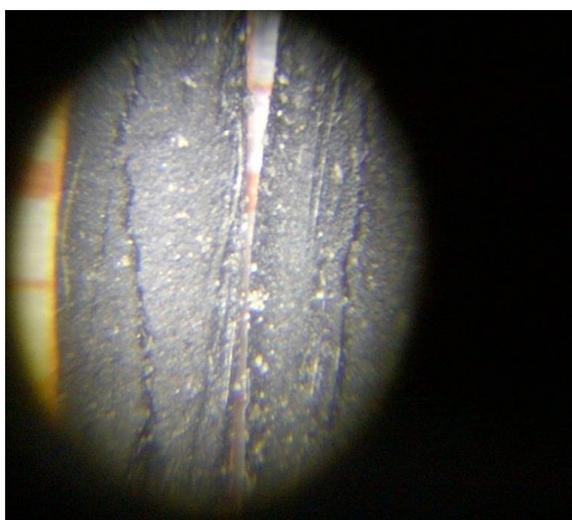


Figura 78 – (a) Resultado da microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando estereoscópio marca Leica modelo EZ4: Constatação de fissuras na cobertura de PVC que envolve os fios poliméricos, considerado normal.

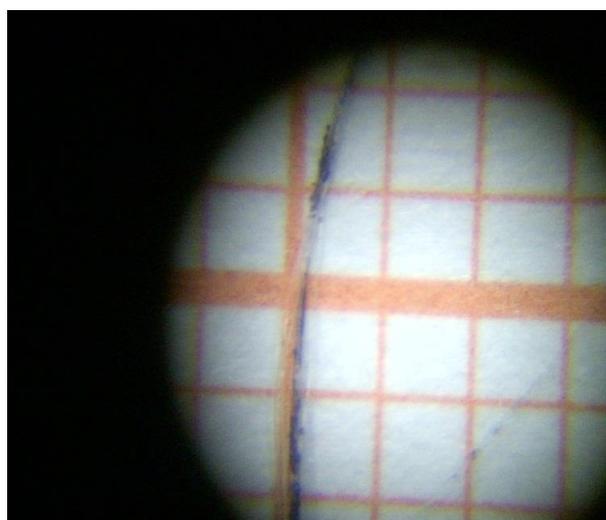


Figura 79 – (b) Resultado da microscopia das geogrelhas (MacGrid WG40/30 e WG60/30) utilizando estereoscópio marca Leica modelo EZ4: Verificação dos fios poliméricos, com aparência transparente e diâmetro de $1\text{mm} \bar{\mp} 0,1\text{mm}$. Não foram encontrados nenhum defeito que prejudicasse o desempenho da geogrelha.

4.3 Ensaios de Tração nas geogrelhas.

Os ensaios de tração nas geogrelhas, realizados na fábrica e na Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM), mostraram-se coerentes, conforme os gráficos das Figuras nº 80 e 81, comprovando as especificações e a qualidade do material do fabricante. As Tabelas 19 e 20 demonstram resumidamente os resultados dos ensaios de tração realizados.

Percebe-se que os ensaios realizados na Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM) apresentaram valores ligeiramente superiores aos da fábrica, cerca de 1,4% em média, o que deve ser relacionado à diferença de precisão dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios, o que é perfeitamente aceitável.

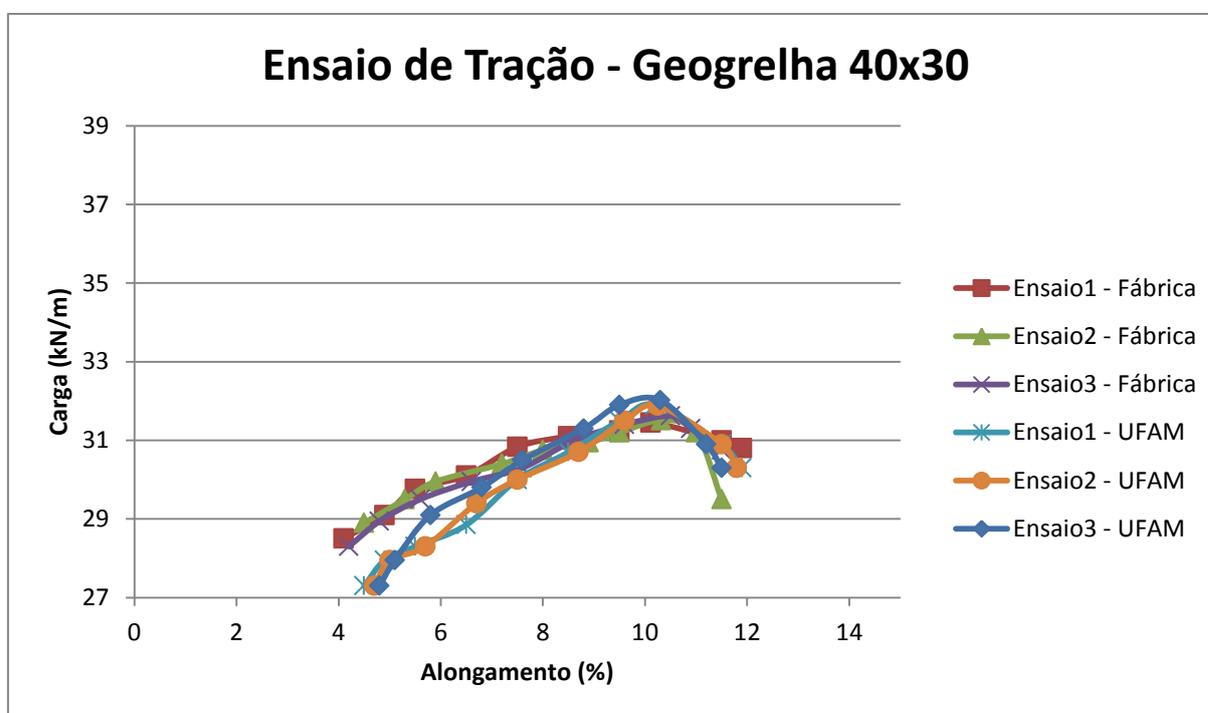


Figura 80 – Resultado dos Ensaios de Tração na Geogrelha MacGrid 40x30.

Tabela 19 – Resultado do ensaio de tração de geogrelhas.

Amostra nº:	Ensaio 1 Geogrelha 40x30 (Fábrica)	Ensaio 2 Geogrelha 40x30 (Fábrica)	Ensaio 3 Geogrelha 40x30 (Fábrica)	Ensaio 1 Geogrelha 40x30 (UFAM)	Ensaio 2 Geogrelha 40x30 (UFAM)	Ensaio 3 Geogrelha 40x30 (UFAM)
Carga máxima na ruptura (kN)	43,69	43,68	41,62	44,20	44,60	44,30
Alongamento (%)	10,48	10,60	10,37	10,80	10,70	10,50

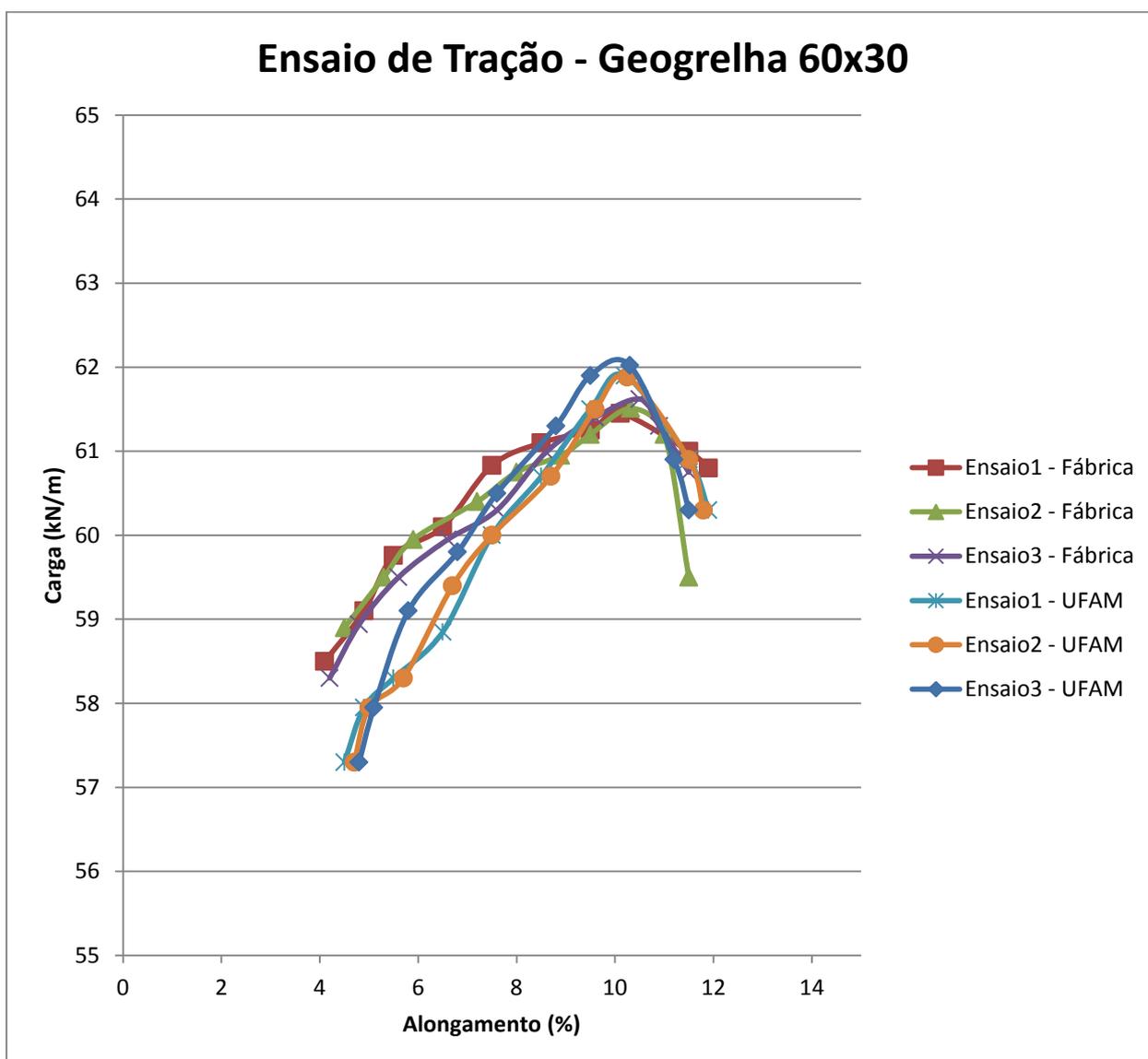


Figura 81 – Resultado dos Ensaios de Tração na Geogrelha MacGrid 60x30.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de tração de geogrelhas.

Amostra n°:	Ensaio 1 Geogrelha 60x30 (Fábrica)	Ensaio 2 Geogrelha 60x30 (Fábrica)	Ensaio 3 Geogrelha 60x30 (Fábrica)	Ensaio 1 Geogrelha 60x30 (UFAM)	Ensaio 2 Geogrelha 60x30 (UFAM)	Ensaio 3 Geogrelha 60x30 (UFAM)
Carga máxima na ruptura (kN)	61,45	61,51	61,62	61,90	61,88	62,02
Alongamento (%)	10,11	10,32	10,50	10,20	10,25	10,30

4.4 Ensaios de Arrancamento.

4.4.1 Calibração do Equipamento Reduzido.

A calibração do equipamento reduzido de laboratório foi composto por oito ensaios de arrancamento, com as características apresentadas na Tabela 21, e estes resultados, que estão plotados nos gráficos da Figura 82, foram repetitivos tanto para a força de arrancamento quanto para os deslocamentos, o que demonstra a confiabilidade do equipamento, dentro dos parâmetros desta pesquisa.

Tabela 21 – Características do ensaio de calibração, realizado oito vezes para verificar a repetição.

Ensaios de Arrancamento	Geogrelha	Amostra de Solo	Sobrecarga (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Grau de Compactação (%)	Tamanho da Amostra (cm)
1 a 8	MacGrid 60x30	4	70	5	96	30x50

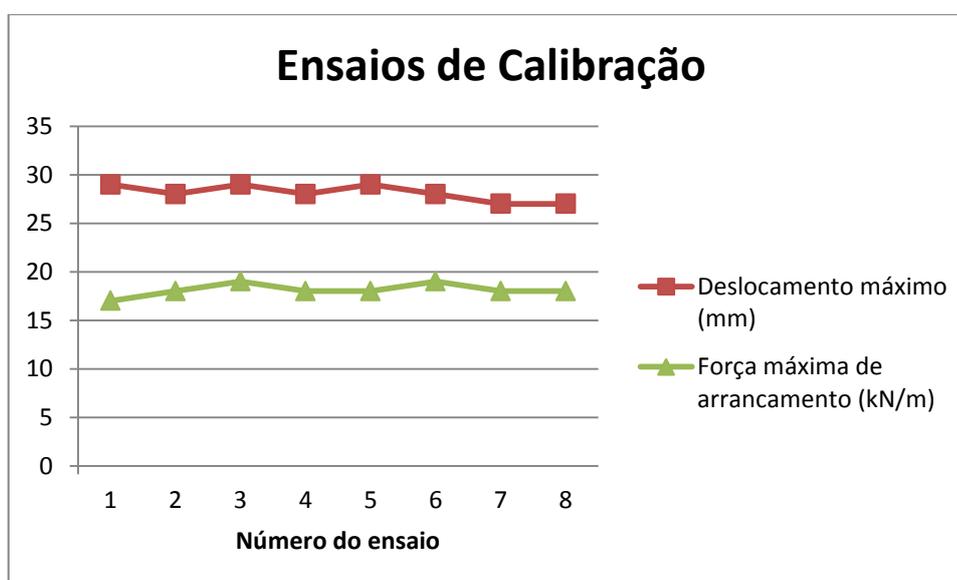


Figura 82 – Resultado dos ensaios de calibração do equipamento reduzido com oito ensaios de arrancamento.

4.4.2 Análise experimental com uso do equipamento de pequeno porte.

Realizaram-se uma série de ensaios de arrancamento variando-se a velocidade de ensaio, o tipo de geogrelha e o tipo de solo, conforme a descrição dos resultados a seguir.

4.4.2.1 Efeito da velocidade de ensaio na resistência ao arrancamento.

Realizaram-se ensaios de arrancamento de geogrelha, num total de oito ensaios numerados de 9 a 16, com as características apresentadas na Tabela n° 22, onde se variou a velocidade do ensaio nos parâmetros de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 120 mm/min, cujo resultado está apresentado no gráfico da Figura n° 83 e da Figura 84.

Analisando-se os resultados constata-se que o parâmetro do deslocamento sofre um aumento, na proporção de 0,79%, comparando-se o deslocamento do ensaio n° 9 com o ensaio n° 16. A força máxima de arrancamento sofre uma redução de 14,30%, comparando-se o ensaio n° 9 com o ensaio n° 16.

Estudos do efeito da velocidade na força de arrancamento foram realizados por LOPES e LADEIRA (1996), o qual observaram um aumento de 18% na força de arrancamento, quando a velocidade passou de 5,4 mm/min para 22,0 mm/min. LOPES e LADEIRA realizaram ensaios de arrancamento com variação de velocidade, com geogrelha de polietileno de alta densidade inseridas em uma amostras de solo de areia.

KAKUDA (2005) também realizou ensaios de arrancamento com variação de velocidade, com geogrelhas do tipo FORTRAC (55/30-20) inseridas em um solo laterítico da Universidade de São Carlos, estado de São Paulo, chegando a resultados de um acréscimo da força de arrancamento superior a 10%, quando a velocidade passou de 8 mm/min para 100 mm/min.

É bom lembrar que a norma ASTM-D6706-01 recomenda uma velocidade de 1,0 mm/min para ensaios de arrancamento, padronizando, dessa forma, este fator variável da velocidade de arrancamento.

Constatou-se que o aumento de velocidade aumenta a força de arrancamento, o que condiz com os resultados da literatura que trata do assunto.

A velocidade de 4,6 mm/min foi a mesma adotada por TEIXEIRA (2003), em equipamentos de arrancamento de grande porte, e por KAKUDA (2005), devido à necessidade de tempo suficiente para anotação dos dados das tensões normais durante o ensaio.

FARRAG *et al.* (1993) realizaram um programa de testes de ensaios de arrancamento de geogrelhas, utilizando uma caixa de testes com 1,52 m (comprimento), 0,90 m (largura) e 0,76 m (altura), conforme demonstrado no Capítulo 2. A geogrelha utilizada foi a Tensar SR2. Nesse programa de testes, variou-se a velocidade do ensaio nos parâmetros de 4, 6, 10 e 20 mm/min.

Comparando-se o resultado obtido por FARRAG *at al.* (1993), com o resultado obtido nesta pesquisa, apresentado na Figura 84, observamos a mesma ligeira redução da força máxima de arrancamento, quando se aumenta a velocidade de arrancamento, tendendo a uma estabilização. Bom lembrar que FARRAG *at al.* utilizaram areia nos ensaios, enquanto que nesta pesquisa utilizou-se o solo n° 4 (solo natural com adição de 60% de areia).

A seguir são demonstrados os resultados dos ensaios realizados, de n° 9 a 16, com a variação de velocidade nos parâmetros de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 120 mm/min, conforme a Tabela 22 e as Figuras 83 e 84

Tabela 22 – Características do ensaio de variação de velocidade, realizado oito vezes para verificar este efeito nos resultados obtidos.

Ensaio	Geogrelha	Amostra de Solo	Sobrecarga (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Tamanho da Amostra (cm)	Força máxima de arrancamento (kN)	Deslocamento máximo (mm)
9	MacGrid 60x30	4	70	1	30x50	20,28	27,95
10	MacGrid 60x30	4	70	2	30x50	20,03	27,99
11	MacGrid 60x30	4	70	4	30x50	18,89	27,87
12	MacGrid 60x30	4	70	8	30x50	18,26	28,15
13	MacGrid 60x30	4	70	16	30x50	17,99	28,05
14	MacGrid 60x30	4	70	32	30x50	17,56	28,25
15	MacGrid 60x30	4	70	64	30x50	17,54	28,01
16	MacGrid 60x30	4	70	120	30x50	17,38	28,17

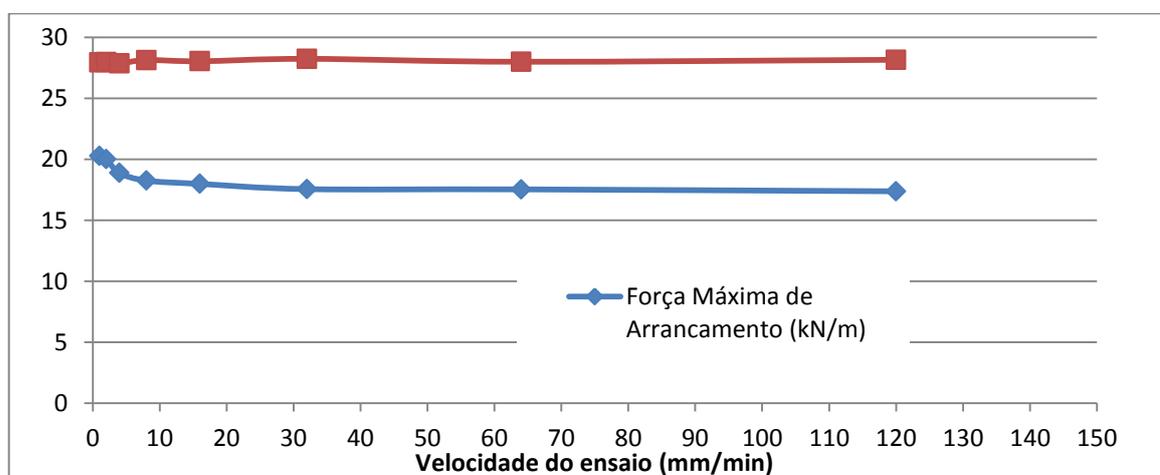


Figura 83 – Resultado do efeito de variação de velocidade no ensaio de arrancamento.

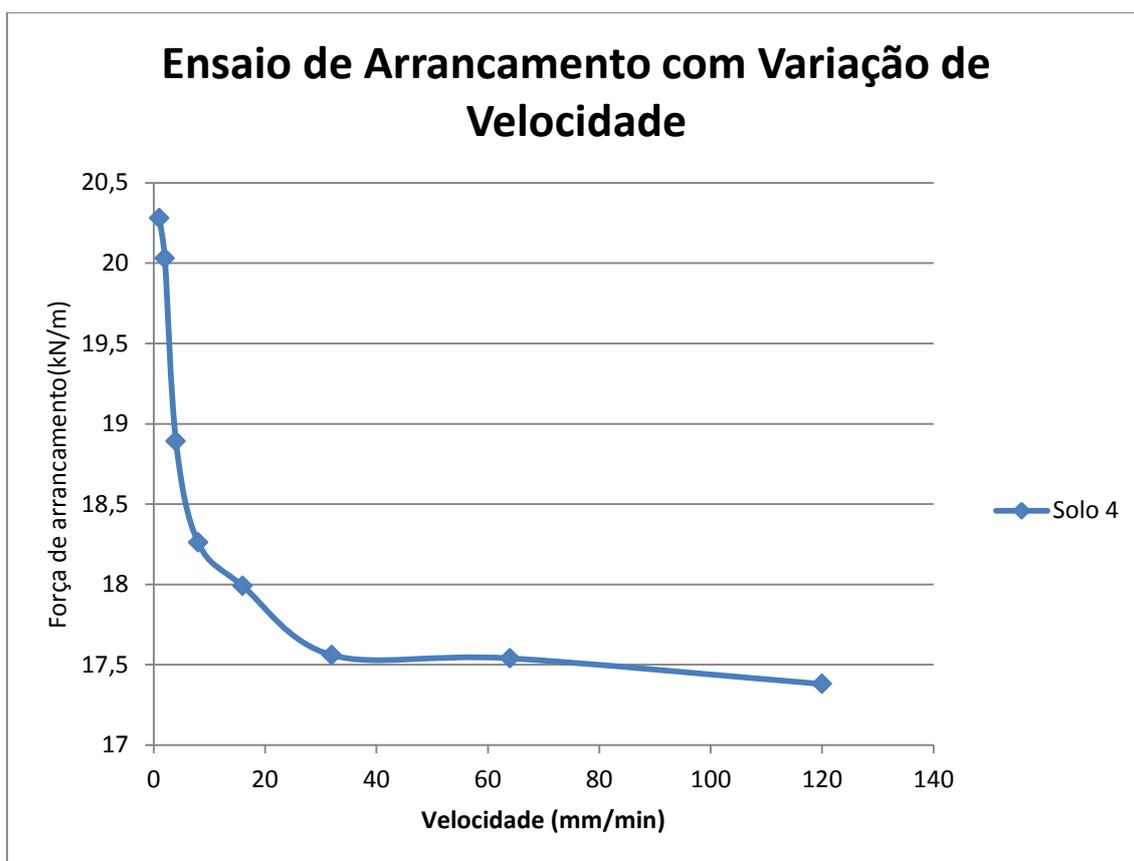


Figura 84 – Resultado do efeito de variação de velocidade no ensaio de arrancamento com oito diferentes velocidades.

4.4.2.2 Comparativo entre tipos de geogrelha na resistência ao arrancamento.

Realizaram-se ensaios de arrancamento de geogrelha, num total de oito ensaios numerados de 17 a 24, com as características apresentadas na Tabela 23, onde se variou o tipo de geogrelha da MacGrid 40x30 para a MacGrid 60x30, cujo resultado está apresentado no gráfico da Figura 85.

Na análise do resultado, constata-se que a geogrelha 60x30 possui um aumento de força de arrancamento, em média na faixa de 10%, com relação a geogrelha de 40x30, já o deslocamento sofre um aumento na faixa de 14%. Isto é explicado pelo aumento de espessura da geogrelha de 60x30 em relação a geogrelha 40x30. As dimensões das aberturas internas são as mesmas, tanto para a geogrelha 60x30 como para a geogrelha 40x30, isto é, a mesma abertura longitudinal de 30 mm e transversal de 20 mm.

KAKUDA (2005) também realizou ensaios comparativos com diferentes geogrelhas, no caso ele utilizou as geogrelhas FORTRAC 55/20-20 e 55/30-20, chegando

também a resultados de aumento na força de arrancamento e no deslocamento, causados pela diferença do espaçamento entre elementos internos transversais da geogrelha.

LOPEZ e LOPEZ (1999) mostraram que o comportamento da tensão cisalhante na interface solo-geossintético é influenciado pela abertura da malha, a espessura dos elementos transversais, bem como a dimensão das partículas da amostra de solo.

Tendo em vista que a geometria das amostras de geogrelhas 60x30 e 40x30 é bastante similar, constatou-se que a espessura foi o fator preponderante nos resultados apresentados.

SUGIMOTO e ALAGIYAWANNA (2003) realizaram um programa experimental de ensaios de arrancamento, utilizando geogrelhas Tensar SS-1 e SR-55, confinadas em uma areia originária do Japão. Os ensaios de arrancamento foram realizados com um equipamento reduzido de laboratório, com as seguintes dimensões de 0,68 m (comprimento), 0,30 m (largura) e 0,625 m (altura). Os resultados foram demonstrados no Capítulo 2, onde percebe-se uma tendência crescente nas duas curvas de força máxima de arrancamento, mesma tendência observada nos testes desta pesquisa, demonstrada na Figura 85.

Tabela 23 – Características do ensaio de variação de geogrelha, realizado quatro vezes para cada tipo de geogrelha.

Ensaio de Arrancamento	Geogrelha MacGrid	Amostra de Solo	Sobrecarga (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Tamanho da Amostra (cm)	Força máxima arrancamento (kN)	Deslocamento máximo (%)
17	40x30	4	70	5	30x50	29,05	13,21
18	40x30	4	70	5	30x50	34,22	15,55
19	40x30	4	70	5	30x50	42,29	14,80
20	40x30	4	70	5	30x50	48,15	15,20
21	60x30	4	70	5	30x50	30,89	11,79
22	60x30	4	70	5	30x50	43,08	12,55
23	60x30	4	70	5	30x50	55,24	13,23
24	60x30	4	70	5	30x50	41,05	14,05

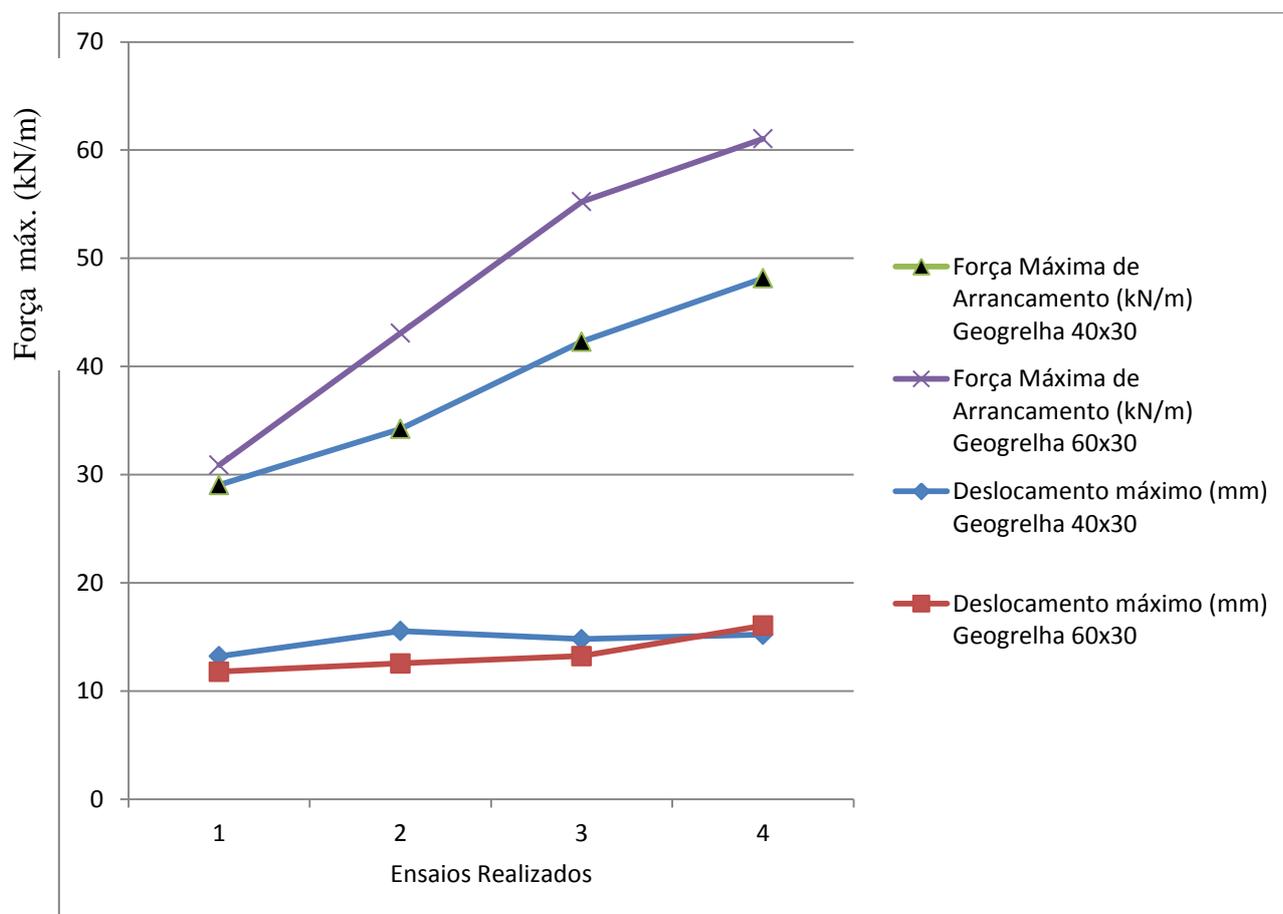


Figura 85 – Resultado do efeito de variação de tipo de geogrelha no ensaio, realizados quatro ensaios com cada tipo de geogrelha.

4.4.2.3 Efeito da variação do tipo de amostra de solo na resistência ao arrancamento.

Realizaram-se ensaios de arrancamento de geogrelha, num total de cinco ensaios numerados de 25 a 29, com as características apresentadas na Tabela 24, onde se variou o tipo de amostra de solo de 1 a 5, cujo resultado está apresentado no gráfico das Figuras 86 e 87, com este resultado calculou-se as envoltórias para as 5 amostras de solo, obtendo-se o ângulo de atrito, a coesão e o coeficiente de interação (f) da interface solo-geogrelha, conforme Tabela 25.

Analisando o resultado da Figura 86 e da Figura 87, constata-se que a amostra de solo n° 4 apresentou a melhor performance no ensaio, com a tensão máxima de arrancamento ($\tau_{arr. \text{ máx.}}$) de 45,37 kPa, um percentual de 41% superior a tensão de arrancamento da amostra de solo n° 5. O ensaio está coerente pois a amostra de solo n° 4

também foi a que apresentou o comportamento geotécnico, conforme Tabela 25.

KAKUDA (2005), utilizando solo lateríticos do estado de São Paulo, chegou a resultados de que solos com partículas de maiores diâmetros apresentaram melhor interação com a geogrelha analisada pelo mesmo.

TEIXEIRA (2003) citou o fato de que o efeito do tipo de solo no comportamento de geogrelhas submetidas ao arrancamento é geralmente feito considerando-se duas classes extremas de solos: os granulares e os argilosos.

Segundo CHANG *et al.* (1995) o tamanho da partícula dos grãos do solo são responsáveis pelas alterações de resultados nos ensaios de arrancamento, entre solos granulares e solos finos, porque os grãos do solo preenchem os vazios das geogrelhas influenciando no desempenho da mesma, conforme demonstrado no Capítulo 2.

CHANG *et al.* (1995) realizaram ensaios de arrancamento de geogrelhas inclusas em três tipos de solos, um silte argiloso, uma areia mal graduada e uma areia bem graduada e constataram que o parâmetro do tipo de solo afeta a resistência ao arrancamento, sendo que os solos arenosos fornecem maiores taxas de resistência ao arrancamento, enquanto que os solos finos as menores taxas de resistência ao arrancamento, isto é, os fatores de capacidade de carga aumentam com o aumento do ângulo atrito interno do solo.

Os ensaios realizados nesta pesquisa também concluíram a melhoria da capacidade de carga do solo, nos ensaios de arrancamento de geogrelha, com o aumento do ângulo de atrito interno do solo.

Segundo TEIXEIRA (2003), o atrito solo-geogrelha, o atrito interno do solo e os fatores de capacidade de carga estão intimamente relacionados com a resistência ao arrancamento. Os fatores de capacidade de carga crescem com o aumento do ângulo de atrito interno do solo e, conseqüentemente, a resistência ao arrancamento também cresce. Entre os solos granulares, os solos graduados oferecem uma resistência ao arrancamento de geogrelha maior que os solos mal graduados, conforme demonstrados nos ensaios de CHANG *et al.* (1995), devido aos solos granulares bem graduados apresentarem um melhor intertravamento entre os seus grãos, além disso, os grãos maiores deslizam com maior dificuldade quando empurrados pelos elementos transversais da geogrelha. A resistência passiva cresce à medida que os grãos maiores vão de encontro aos grãos menores, aumentando a resistência ao arrancamento. Comparando esses resultados com os realizados nesta pesquisa, encontra-se coerência nos resultados, uma vez que a resistência ao arrancamento aumentou com as amostras de solo com a maior porcentagem de solo granular, isto é, areia.

LOPES E MOUTINHO (1997) realizaram ensaios de arrancamento em geogrelhas com dois tipos de solos granulares: um arenoso e um areno-pedregulhoso, onde concluíram que a resistência ao arrancamento aumenta até 50% com os ensaios realizados com os solos areno-pedregulhoso, provavelmente porque os grãos maiores, ao encontrarem os grãos menores formaram uma camada de solo resistente ao arrancamento, provavelmente um fenômeno que ocorreu também nos ensaios realizados nesta pesquisa. Dessa forma, o atrito dos grãos e a boa graduação aparecem como os principais responsáveis pelo aumento gradativo de capacidade de carga e resistência ao arrancamento de geogrelhas.

Quanto aos solos coesivos, os autores CHRISTOPHER e BERG (1990) e INGOLD (1980) estudaram o arrancamento de geogrelhas em diferentes solos coesivos, verificando as condições da umidade de solos coesivos saturados, o qual concluíram que a dissipação de pressões neutras na interface solo-inclusão tem influência direta na resistência ao arrancamento. Nesta pesquisa, os ensaios de arrancamento de geogrelhas foram realizados com a umidade ótima de compactação, afastando desta forma a influência da pressão neutra na variação de resultados.

Comparando os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa, quanto ao aspecto do aumento gradativo da resistência ao arrancamento, com o aumento da porcentagem de areia nas misturas, é uma conclusão compatível com os resultados de TEIXEIRA (2003), KAKUDA (2005) e CHANG *et al.* (1995), onde se percebe a influência do atrito do solo granular e da boa graduação do mesmo, colaborando ambos para a melhoria da capacidade de carga e do aumento da resistência ao arrancamento.

Tabela 24 – Características do ensaio de variação de tipo de solo (1 a 5) para verificar o efeito quanto à resistência ao arrancamento.

Ensaio de Arrancamento	Geogrelha MacGrid	Amostra de Solo	Sobre carga (kPa)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Tamanho da Amostra (cm)	Força máxima de arrancamento (kN)	Deslocamento máximo (%)
25	60x30	1	70	5	30x50	32,25	22,33
26	60x30	2	70	5	30x50	36,80	20,31
27	60x30	3	70	5	30x50	37,39	19,91
28	60x30	4	70	5	30x50	45,37	20,65
29	60x30	5	70	5	30x50	26,55	15,15

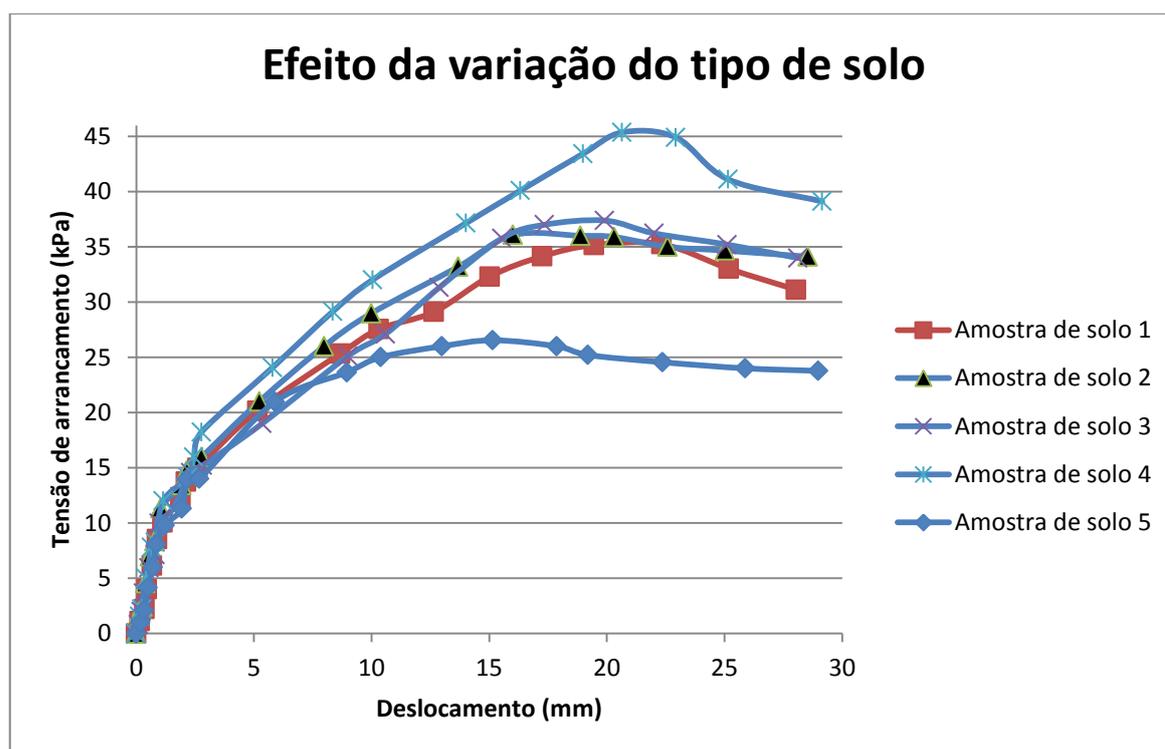


Figura 86 – Resultado do efeito de variação do tipo de solo (1 a 5) na tensão de arrancamento.

Tabela 25 – Resultado do cálculo do coeficiente de interação da interface solo-geogrelha (f), ângulo de atrito e da coesão da interface solo-geogrelha para as amostras de solo ensaiadas (1 a 5), calculados através da envoltória de resistência de arrancamento pela tensão de confinamento.

Propriedades	Amostra de solo 1	Amostra de solo 2	Amostra de solo 3	Amostra de solo 4	Amostra de solo 5
Força de arrancamento máx. (kPa)=	35,25	36,08	37,39	45,37	26,55
Deslocamento Máx. (mm)=	22,33	20,31	19,91	20,65	15,15
Ângulo de atrito da interface solo-geogrelha (°)	14,7	18,2	16,8	19,8	30,7
Coesão da interface solo-geogrelha (kPa)	17,38	16,96	16,31	12,32	0
$f =$	0,56	0,38	0,53	0,73	0,27

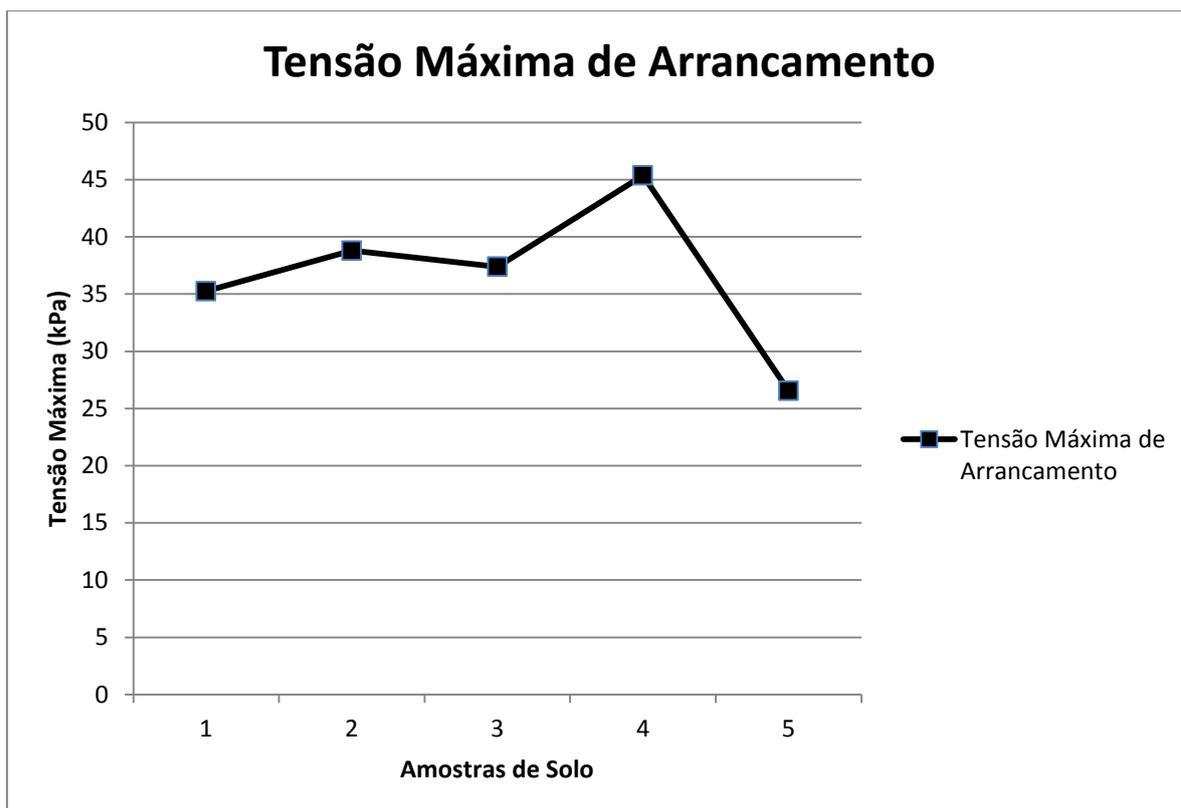


Figura 87 – Resultado da tensão máxima de arrancamento ($\tau_{arr. \text{máx.}}$) para cada amostra de solo ensaiada.

4.5 Resultados obtidos pelo programa computacional elaborado.

O programa realiza todos os cálculos estatísticos, como média, desvio padrão, coeficiente de variação, etc., além de calcular os arranjos estruturais para reforço de geogrelha em taludes.

A Figura 88 apresenta a tela inicial do programa, com informações sobre a instituição de ensino, o tipo de pesquisa em que foi elaborado o mesmo, a data de atualização, o responsável pelo programação, etc.

Após a entrada de dados dos ensaios de arrancamento, podem-se calcular os dados estatísticos dos mesmos, conforme demonstrado na Figura 89, tela de cálculo estatístico do programa.

Com os cálculos estatísticos realizados, o programa fornece o gráfico de forma de arrancamento (kN/m) pela deformação (mm), conforme a Figura 90.

A Figura 91 demonstra os resultados do cálculo do reforço com geogrelha para o talude respectivo, através do método de Jewell.

Após o cálculo pelo método de Jewell o programa inicia outro cálculo, desta vez, pelo método de Erlich e Mitchel, o qual busca uma otimização do cálculo, baseado na tensão máxima de tração atuante no talude, conforme a Figura 92.

Após o cálculo o programa desenha o arranjo estrutural, demonstrando a espessura da camada de solo, onde as geogrelhas serão intercaladas, e quantidade de camadas, bem como o tipo de geogrelha, conforme a Figura 93.

Além de desenhar o arranjo, é possível a realização de um cálculo do quantitativo de material e custos estimados, conforme a Figura 94.

O programa permite a atualização dos custos unitários dos materiais, através da planilha eletrônica.

O programa computacional desenvolvido apresentou os resultados estatísticos dos ensaios realizados, conforme as Tabelas 26 a 33, ao todo foram 29 ensaios realizados. Os resultados apresentados pelo programa foram considerados coerentes.

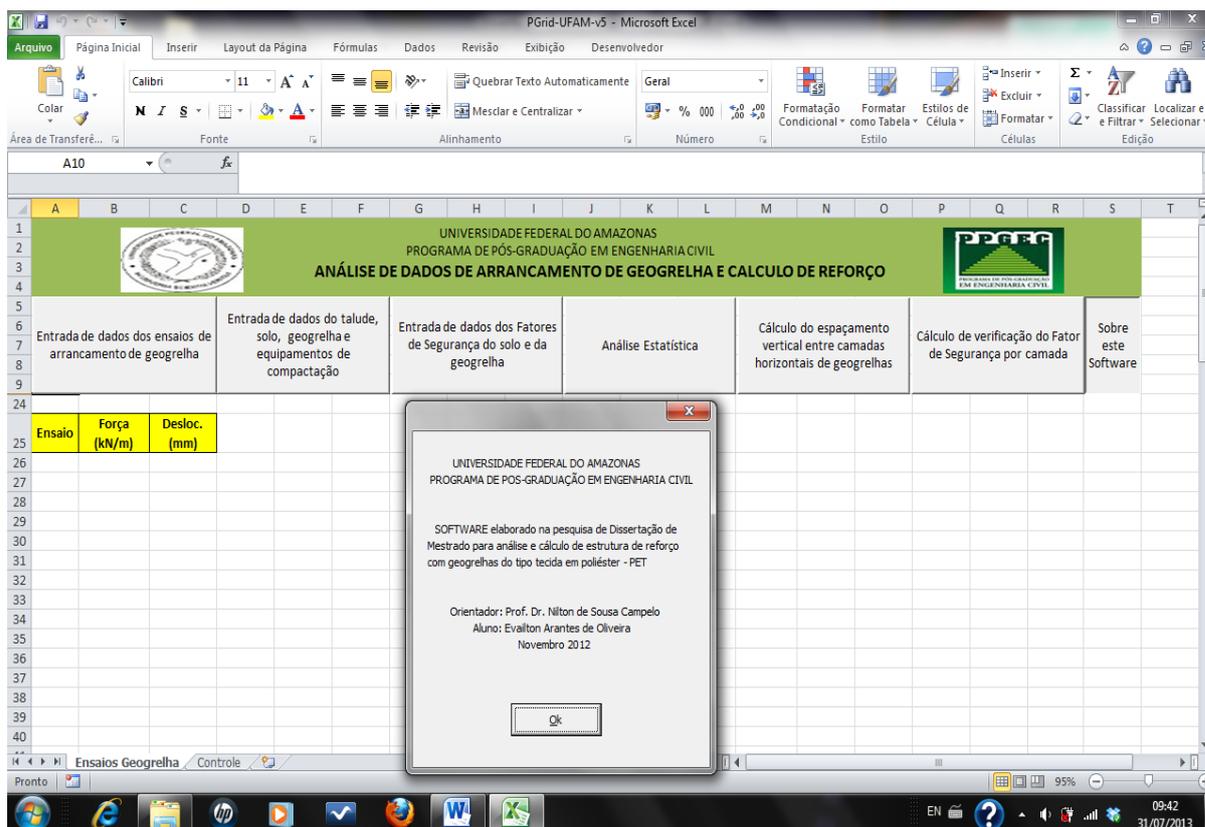


Figura 88 – Tela inicial do programa computacional elaborado.

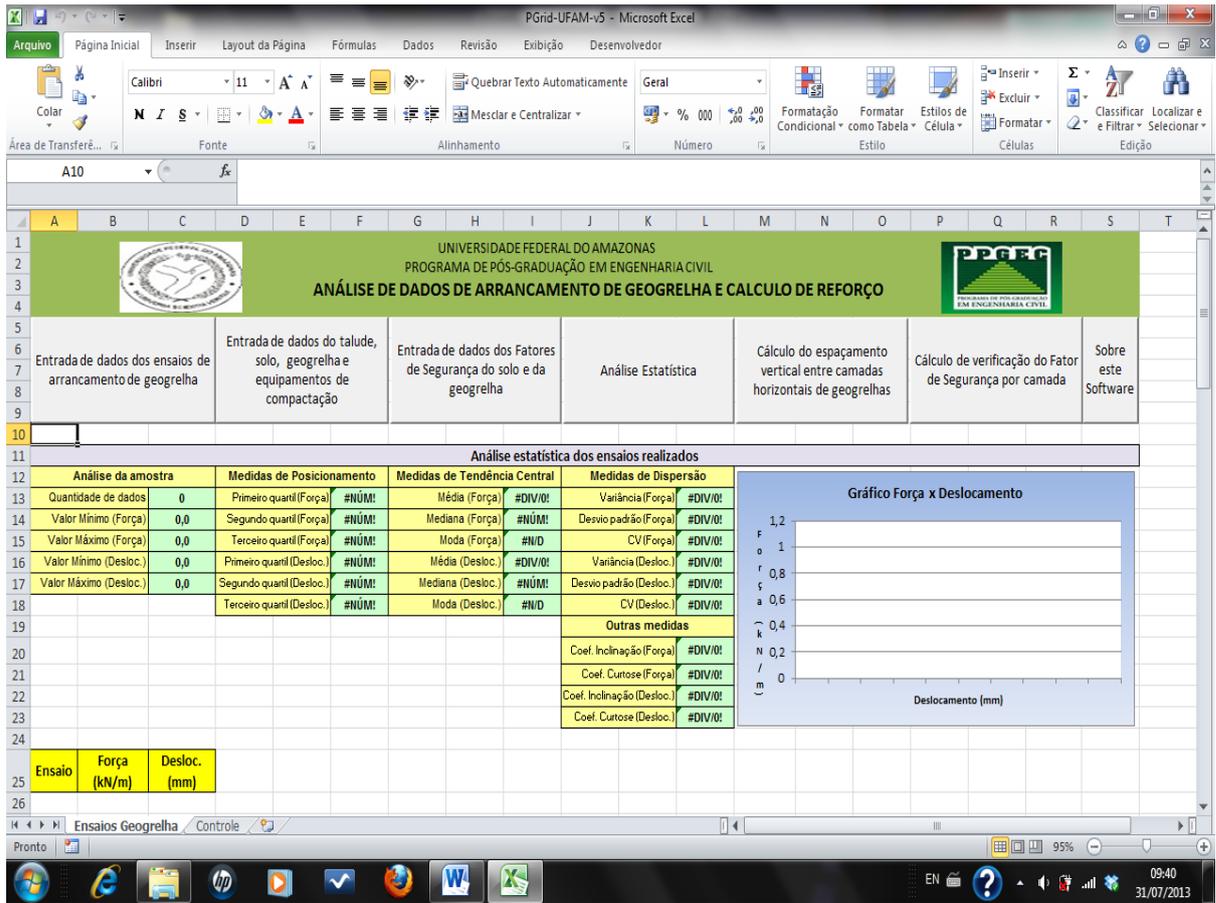


Figura 89 – Tela de cálculos estatísticos do programa computacional elaborado.

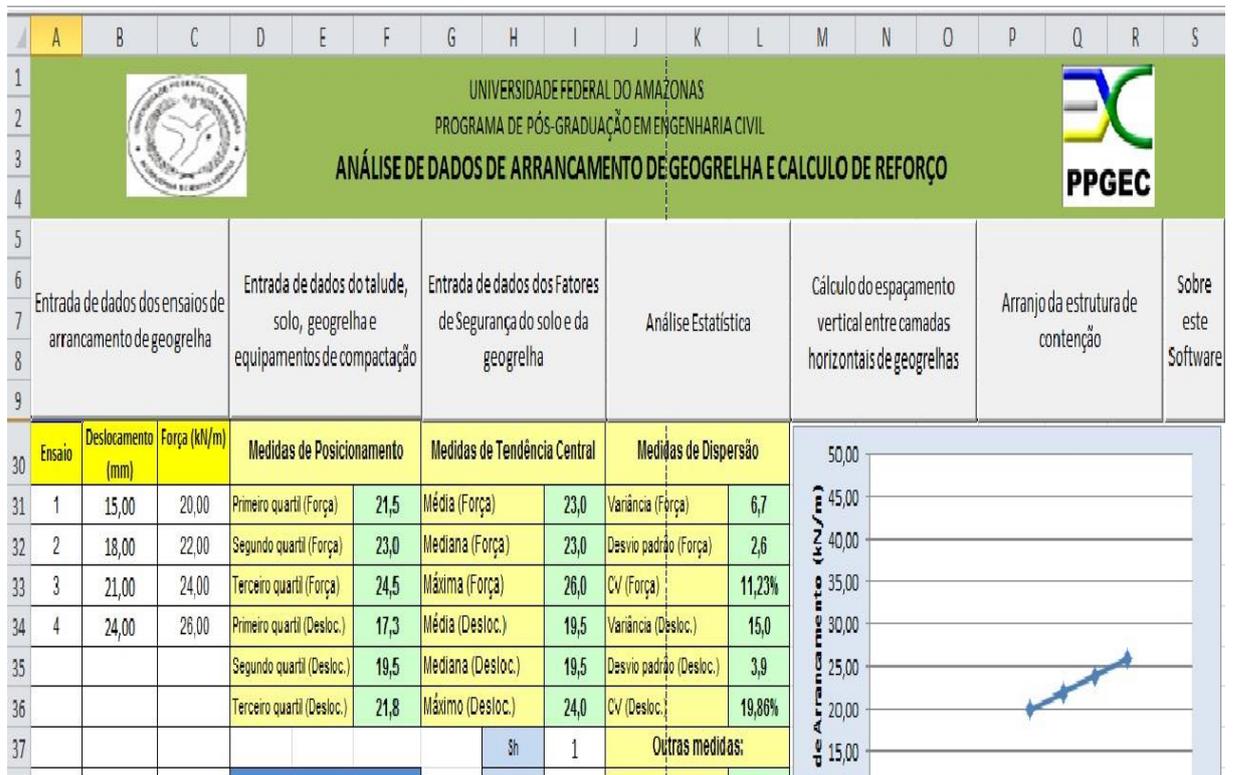


Figura 90 – Gráficos elaborados pelo programa computacional.

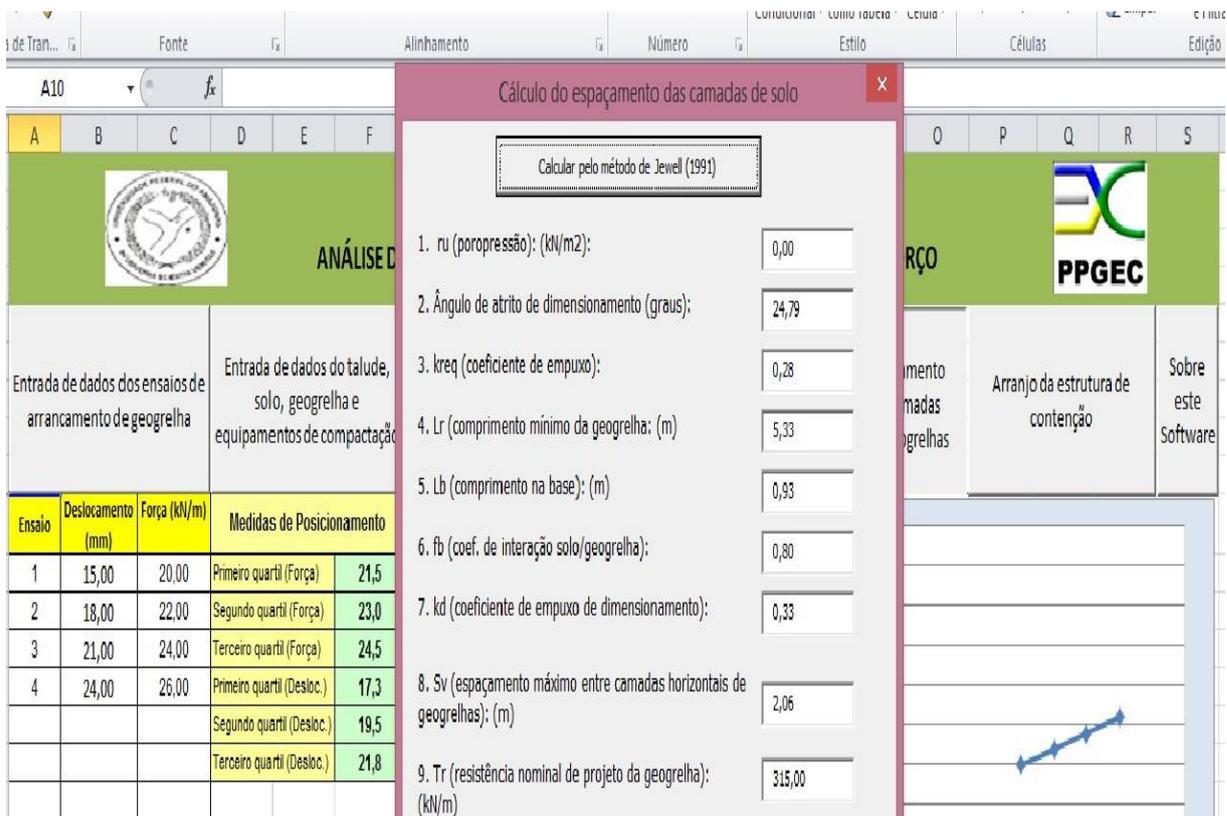


Figura 91 – Tela de resultados com o cálculo realizado pelo método de Jewell.

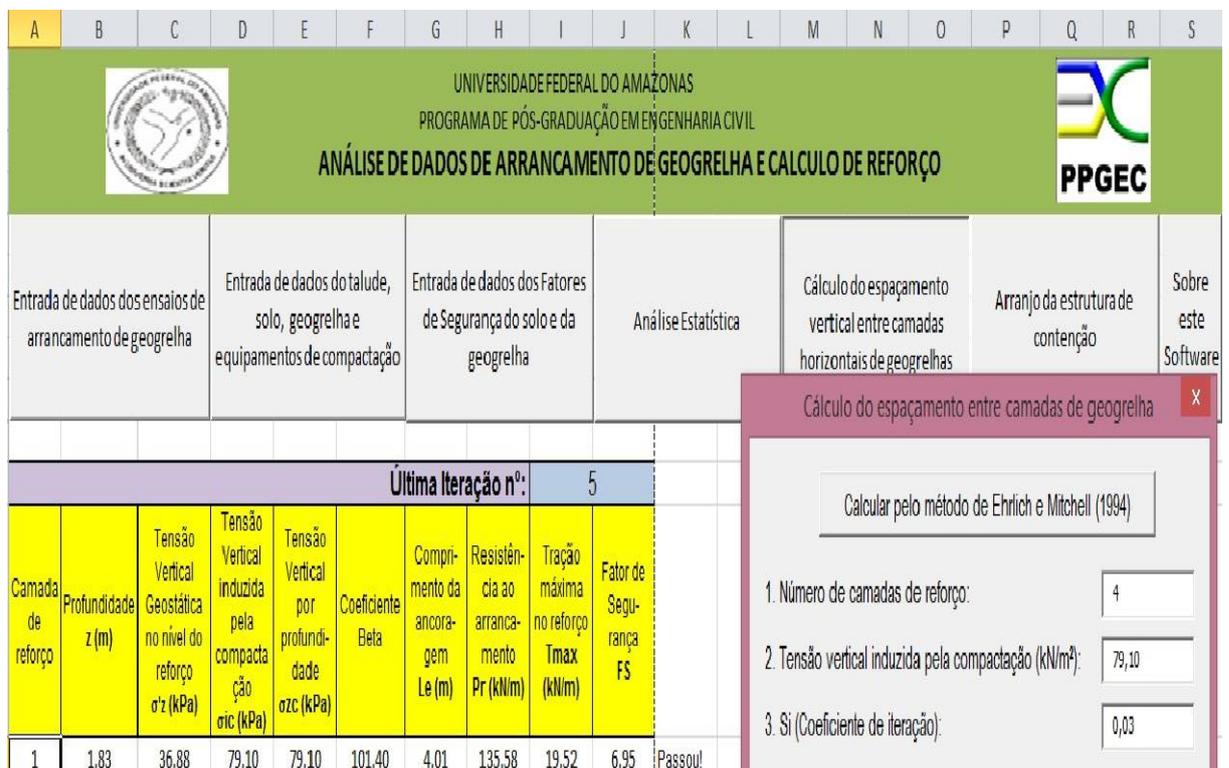


Figura 92 – Tela de resultados com o cálculo realizado pelo método de Erlich e Mitchel.

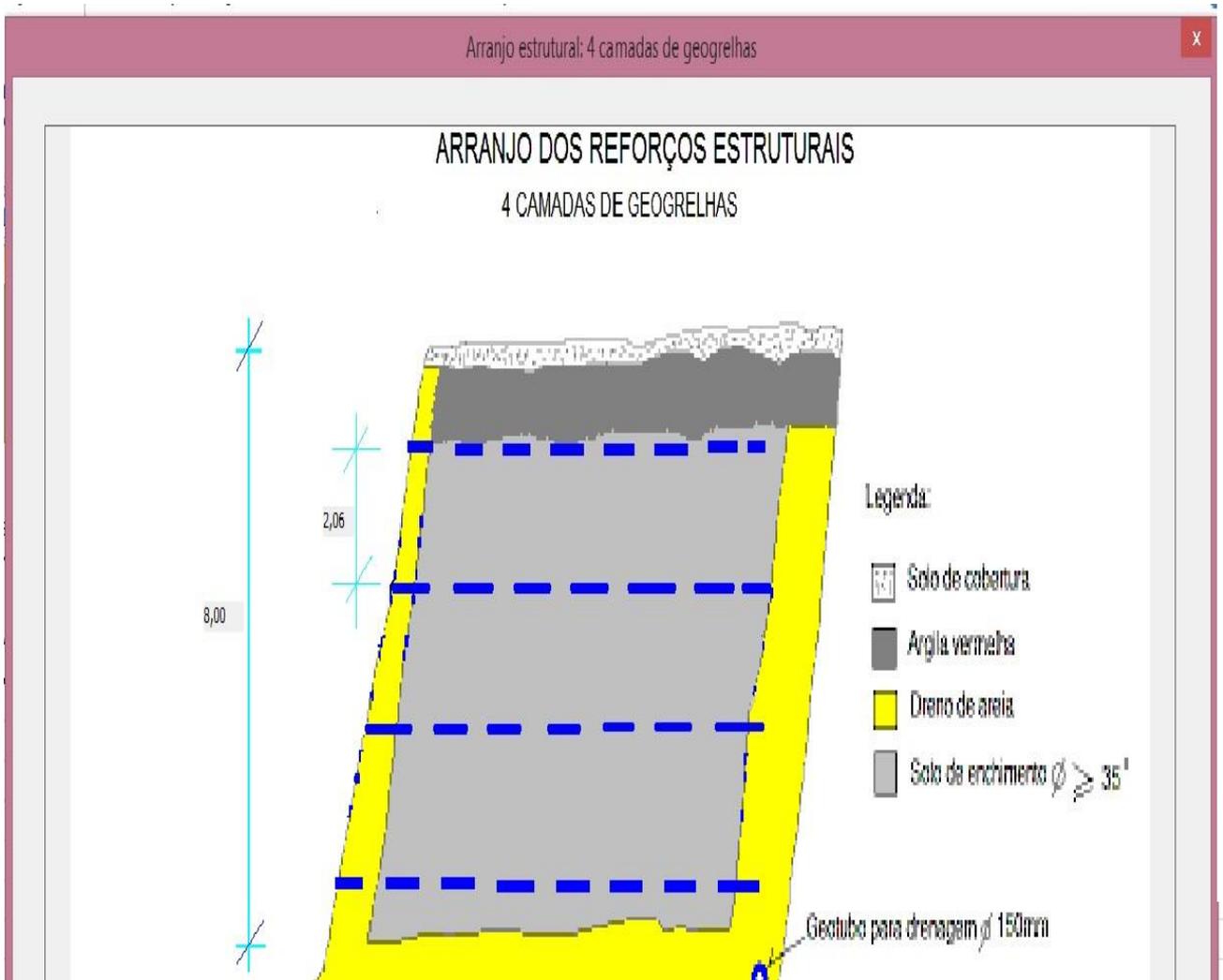


Figura 93 – Arranjo estrutural elaborado pelo programa computacional.

Levantamento quantitativo e custos

LEVANTAMENTO QUANTITATIVO E CUSTOS

Tipo de Reforço	Resistência na Faixa Larga	Quant. (m)	Custo (R\$)
Geogrelha flexível	84.05 kN/m	6.39	12.211.29
Geogrelha flexível	143.09 kN/m	19.17	47.100.69
Custo Total:			59.311.98

Sair

Figura 94 – Levantamento de quantitativo e custos elaborado pelo programa computacional.

Seguem os resultados das análises estatísticas realizadas pelo programa computacional durante os ensaios realizados:

Tabela 26 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios 1 a 8.

CALIBRAÇÃO		
Ensaio de Arrancamento	Força Máxima de Arrancamento (kN/m)	Deslocamento máximo (mm)
1	17,38	29,31
2	18,22	28,25
3	18,79	28,88
4	17,99	28,11
5	18,15	28,98
6	18,89	27,22
7	17,97	28,33
8	18,05	28,15
Média:	18,18	28,40
Desvio Padrão:	0,48	0,65
Variança:	0,23	0,42
Valor máx.:	18,89	29,31

Tabela 27 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 40x30 de 1 a 3, realizados na fábrica.

Ensaio Realizados na Fábrica Geogrelha 40x30	Resistência à tração a 2% (kN/m)	Resistência à tração a 5% (kN/m)	Resistência à tração a 10% (kN/m)
1	72,25	160,89	460,81
2	75,37	145,99	455,21
3	70,11	167,22	480,22
Média:	72,58	158,03	465,41
Desvio Padrão:	2,65	10,90	13,13
Coef. Variação:	7,00	118,80	172,27
Valor Máximo:	75,37	167,22	480,22

Tabela 28 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 40x30 de 1 a 3, realizados na UFAM.

Ensaio Realizados na UFAM Geogrelha 40x30	Resistência à tração a 2% (kN/m)	Resistência à tração a 5% (kN/m)	Resistência à tração a 10% (kN/m)
1	74,1	178,31	491,22
2	85,25	180,56	501,22
3	79,23	170,44	498,11
Média:	79,53	176,44	496,85
Desvio Padrão:	5,58	5,31	5,12
Coef. Variação:	31,15	28,24	26,19
Valor Máximo:	85,25	180,56	501,22

Tabela 29 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios variação de velocidade.

Ensaio	Velocidade (mm/min)	VARIACÃO DA VELOCIDADE	
		Força Máxima de Arrancamento (kN/m)	Deslocamento máximo (mm)
1	1	17,38	27,95
2	2	17,54	27,99
3	4	17,56	27,87
4	8	17,99	28,15
5	16	18,26	28,05
6	32	18,89	28,25
7	64	19,02	28,01
8	120	20,28	28,17
Média:		18,37	28,06
Desvio Padrão:		0,99	0,13
Coef. Variação:		0,97	0,02
Valor Máximo:		20,28	28,25

Tabela 30 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 60x30 de 1 a 3, realizados na fábrica.

Ensaio Realizados na Fábrica Geogrelha 60x30	Resistência à tração a 2% (kN/m)	Resistência à tração a 5% (kN/m)	Resistência à tração a 10% (kN/m)
1	107,49	226,86	682,05
2	119,31	255,97	669,91
3	104,82	222,21	647,59
Média:	110,54	235,01	666,52
Desvio Padrão:	7,71	18,30	17,48
Coef. Variação:	59,47	334,79	305,51
Valor Máximo:	119,31	255,97	682,05

Tabela 31 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios de tração na geogrelha 60x30 de 1 a 3, realizados na UFAM.

Ensaio Realizados na UFAM Geogrelha 60x30	Resistência à tração a 2% (kN/m)	Resistência à tração a 5% (kN/m)	Resistência à tração a 10% (kN/m)
1	110,22	235,88	692,1
2	115,61	265,11	700,31
3	107,23	218,99	695,22
Média:	111,02	239,99	695,88
Desvio Padrão:	4,25	23,33	4,14
Coef. Variação:	18,04	544,45	17,17
Valor Máximo:	115,61	265,11	700,31

Tabela 32 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios variação do tipo de geogrelha.

VARIACÃO DO TIPO DE GEOGRELHA				
	Força Máxima de Arrancamento (kN/m) Geogrelha		Deslocamento máximo (mm) Geogrelha	
	40x30	60x30	40x30	60x30
	29,05	30,89	13,21	11,79
	34,22	43,08	15,55	12,55
	42,29	55,24	14,8	13,23
	48,15	61,05	15,2	16,05
Média:	38,43	47,57	14,69	13,41
Desvio Padrão:	8,47	13,40	1,03	1,86
Coef. Variação:	71,70	179,64	1,07	3,46
Valor Máximo:	48,15	61,05	15,55	16,05

Tabela 33 – Resultado do cálculo estatístico gerado pelo programa computacional dos ensaios variação do tipo de amostra de solo (1 a 5).

VARIACÃO DO TIPO DE AMOSTRA DE SOLO					
	Amostra de solo 1	Amostra de solo 2	Amostra de solo 3	Amostra de solo 4	Amostra de solo 5
$\tau_{arr. \text{ máx.}}$ (kPa)	35,25	36,8	37,39	45,37	26,55
Desl. Máx. (mm)	22,33	20,31	19,91	20,65	15,15
Média:	28,79	28,56	28,65	33,01	20,85
Desvio Padrão:	9,14	11,66	12,36	17,48	8,06
Coef. Variação:	83,46	135,96	152,78	305,54	64,98
Valor Máximo:	35,25	36,80	37,39	45,37	26,55

Capítulo 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho científico, avaliou-se a possibilidade de uso de ensaios de arrancamento de geogrelhas, realizados através de um equipamento laboratorial de dimensões reduzidas, utilizando um solo argiloso típico da cidade de Manaus, bem como amostras deste solo *in natura* com as misturas de 20%, 40% e 60% de areia. Este equipamento é composto por uma caixa de testes, fabricada em uma tornearia mecânica local, para atender especificamente aos objetivos desta pesquisa, sendo composto por uma chapa metálica de aço A36, com espessura de 1,02 mm, nas dimensões de 250 mm de comprimento, 300 mm de largura e 150 mm de altura, seguindo as especificações de TEIXEIRA (2003). Além da caixa de testes, uma garra metálica em aço maciço também foi fabricada, visando um acoplamento do equipamento à máquina universal TORSEE 300 kN. Inicialmente, as geogrelhas utilizadas nos ensaios foram tracionadas, com o objetivo de comparar com os resultados obtidos de ensaios realizados na fábrica. Para calibrar o equipamento foram realizados oito ensaios de arrancamento, após a calibração, prosseguiu-se com os ensaios de arrancamento com a variação do tipo de geogrelha, do tipo de amostra de solo e da velocidade de arrancamento. Concomitantemente, elaborou-se um programa computacional para dimensionamento de taludes reforçados com geogrelhas. Utilizando os métodos de cálculo de dimensionamento de geogrelhas de JEWELL (1991) e ERLICH & MITCHELL (1994) criou-se um algoritmo, com intuito de processar os dados obtidos nos ensaios realizados, dimensionar os taludes reforçados com geogrelhas, desenhar um croqui do arranjo estrutural, levantar quantitativos e custos envolvidos. O programa foi elaborado numa plataforma de planilhas eletrônicas, com código totalmente aberto na linguagem *Visual Basic*, o que possibilita que os próprios usuários façam melhorias nas subrotinas ou acrescentem outras, moldando o programa às suas necessidades. O programa foi elaborado sem fins comerciais, somente objetivando uma pequena colaboração no avanço das pesquisas geotécnicas nesta área.

Analisando-se os resultados obtidos, os seguintes aspectos devem ser destacados:

- a) Ensaios de tração das geogrelhas, comprovou-se as resistências especificadas pelo fabricante nas geogrelhas utilizadas;
- b) Ensaios de caracterização das amostras de solo, verificou-se que a mistura de areia com o solo *in natura* melhora as propriedades geotécnicas do solo, alcançando melhores

resultados na amostra n° 4 (60% de areia), provavelmente devido a um arranjo das partículas (areia e argila) que possibilitou um menor índice de vazios, pela redução da superfície específica, tornando a amostra mais compacta;

c) Ensaios de arrancamento de geogrelha, constatou-se que as misturas de solo *in natura* com areia melhoram a resistência ao arrancamento, quanto ao sistema de interação solo-geogrelha, provavelmente devido ao aumento de atrito entre a geogrelha e o solo, quando do deslizamento da geogrelha confinada, beneficiando, desta forma, suas propriedades de reforço;

d) A mistura de 60% de areia acrescentada no solo *in natura* apresentou melhores resultados quanto às características de melhoria das qualidades geotécnicas e, também, quanto à resistência ao arrancamento, provavelmente, pelo aumento do atrito entre a amostra de solo e a geogrelha confinada, como também pela formação de um arranjo entre as partículas que possibilitou uma melhoria nas qualidades geotécnicas da amostra, cerca de 13%;

e) Nos ensaios de arrancamento, quanto à variação de geogrelha utilizada, os melhores resultados de resistência ao arrancamento foram atingidos pela geogrelha MacGrid 60, o que era esperado, pois além da capacidade de resistência superior, a espessura da MacGrid 60 é maior que da MacGrid 40, colaborando para um aumento do atrito entre o solo e a geogrelha confinada, o que beneficia a MacGrid 60 na resistência ao arrancamento;

f) Ensaios de arrancamento, quanto à variação de velocidade, verificou-se que o aumento da velocidade influencia na resistência ao arrancamento, reduzindo-a. Motivo pelo qual as normas fixam a velocidade padrão a ser utilizada nos ensaios de arrancamento;

e) Comprovou-se que solos com maiores teores de argila apresentaram menores coeficientes de interações no sistema solo-geogrelha. Notou-se que, à medida que se aumenta o diâmetro médio das partículas de solo, com adição de areia, melhora-se a interação solo-geogrelha e, por conseguinte, diminui-se o deslocamento necessário para atingir a resistência máxima ao arrancamento, mesma conclusão foi verificada por KAKUDA (2005);

f) Elaboração de um programa computacional, após a finalização da programação, observou-se que o mesmo facilita o dimensionamento de taludes reforçados com geogrelhas, fornecendo o esquema do arranjo geral de reforço por camadas, os quantitativos de materiais e os custos. Além de calcular o fator de interação solo-geogrelha, através dos resultados dos ensaios realizados na pesquisa.

Capítulo 6

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1 Sugestões

Esta pesquisa científica realizou ensaios de arrancamento com solo *in natura*, típico da cidade de Manaus, e suas misturas com areia, e utilizando geogrelhas poliméricas pré-fabricadas e comerciais, mas, a título de sugestão, visando ampliar os conhecimentos no assunto, sugere-se que esta pesquisa também poderia ser realizada utilizando-se:

- a) Solos de várzea, também típicos da Região Amazônica, encontrados nas margens de rios e igarapés da Região Amazônica;
- b) Geogrelhas fabricadas a partir de fibras naturais de juta e outras fibras naturais da Região Amazônica;
- c) Geogrelhas modificadas, com a superfície áspera, com o intuito de aumentar o atrito com o solo;
- d) Material reciclado de construção civil em vez de areia, visando sustentabilidade na construção civil;
- e) Energia de compactação do Proctor Modificado, em vez do Proctor Normal; e
- f) Realização de ensaios de arrancamento em duas direções, transversal e longitudinal, necessitando de adaptações no equipamento reduzido de laboratório.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALAGIYANNA *et al.* **Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout deformation.** Geotextiles and Geomembranes, n. 19. 2001.

ALAGIYANNA, A.M.N., SUGIMOTO, M., SATO, S., TOYOTA, H. **Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behavior during deformation.** Geotextiles and Geomembranes, n. 19. 2001.

ALFARO, M.C. *et al.* **Soil-Geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests.** Geotechnical testing Journal, n. 18. 1995.

ALFARO, M.C., HAYASHI, S., MIURA, N., WATANABE, K. **Pullout interaction mechanism of geogrid strip reinforcement.** Geosynthetics International, n.4. 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard a test method for determination by tensile properties of geogrids:** ASTM D6637. 2010.

_____. **Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil:** ASTM D6706-01. 2007.

_____. **Standard test method for unconsolidated-undrained triaxial:** ASTM D2850. 2007.

ANTUNES, L.G.S. **Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos.** 2008. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do índice de suporte califórnia:** NBR 9895. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Solo – Determinação do limite de plasticidade:** NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Solo – Determiniação do Ensaio de compactação:** NBR 7182. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Solo – Geossintéticos:** NBR 12553. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **Solo – Granulometria:** NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Solos - Ensaio de Densidade real:** NBR 6508. Rio de Janeiro, 1986.

BAKER, R. M., SAYED, S.M., CATES, P., SUBRAMANIAN, R. **Pullout and shear tests on geogrid reinforced lightweight aggregate.** Geotextiles and Geomembranes, n. 16. 1998.

BAKER, R.M., ABDEL-RAHMAN, A.H., NAPOLITANO, P.J., **Geotextile friction mobilization during field pullout test.** Geotextiles and Geomembranes, n. 16. 1998.

BARROS NETO, Benício de. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BAUER, G. E. SHANG, Q. **Pullout resistance of large geogrid specimens in site specific soils.** Geotechnical Engineering, v.24, n.1. 1993.

BERGADO, D.T., CHAI, J. **Pullout force/displacement relationship of extensible grid reinforcements.** Geotextiles and Geomembranes, n. 13. 1994.

BERGADO, D.T., LO, K., CHAI, J., SHIVASHANKAR, R., ALFARO, M.C., ANDERSON, L. **Pullout tests using steel grid reinforcements with low-quality backfill.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 118, n. 7. July. 1992.

BISHOP, A. *et al.* **Factors controlling the strength of partially saturated cohesive soils.** American Society of Civil Engineers. 1960.

BUENO, B. S. et al. **Um panorama do desempenho de geossintéticos comercializados no país sob a ótica de ensaios de laboratório.** In: Anais do 5o. Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Recife-PE, 2007.

BUENO, B.S. e CARVALHO, C.A.B. **Estudo comparativo da aderência solo-geotextil medida em ensaios de cisalhamento direto e arrancamento.** VI Congresso Brasileiro de Geotecnia, Salvador, 2: 139-145. 1986.

CALLISTER, W.D.J. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5 ed. São Paulo: LTC, 1999. 574p.

CHANG, D.T. *et al.* **Pullout mechanism of geogrids under confinement by sandy and clayey soils.** Transportation Research Record, n. 1474. 1995.

CHRISTOPHER, B.R. BERG, R.R. **Pull evaluation of geosynthetics in cohesive soils: Geotextiles, geomembranes and relatec products.** Rotterdam: Den Hoedt. 1990.

CHRISTOPHER, B.R. *et al.* **Reinforced soil structures.** Design and construction guidelines, n. FHWA/RD/89-043. 1990.

CLAYBOURN, A.F. **Geosynthetic-reinforced soil wall design.** Geotextiles and Geomembranes, n. 12. 1993.

COSTA, C. M. L. *et al.* **Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos.** Polímeros: ciência e tecnologia, vol. 18, n. 2. p. 158-169, 2008.

COSTA, C. M. L. *et al.* **Failure of geotextile – reinforced walls in centrifuge model tests.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013.

COSTA, C. M. L. **Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis.** Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 2004.

COSTA, Y. D. J. *et al.* **Deflection analysis of anchored retaining wall in dune sand. Applied mechanics and materials.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013.

COSTA, Y. D. J. *et al.* **Failure mechanisms in sand over a deep active trapdoor.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2009.

DE CAMPOS, T.M.P. **Medição de sucção em solos.** 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Editora Freitas Bastos: Rio de Janeiro. Vol.2, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos - Ensaio de Densidade real:** DNER 9364. Rio de Janeiro, 1986.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3a. Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DIAS, A. C. **Análise numérica da interação solo-geossintético em ensaios de arrancamento.** 2004. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

DUNCAN, J.M. *et al.* **Strength, stress-strain and bulk modulus parameter for finite element analyses of stresses and movements in soil masses.** Geotechnical engineering, n. UCB/GT/80-1. 1980.

EHRlich, M. **Análise de muros e taludes de solos reforçados.** In: 1st South American Symposium On Geosynthetics, 1999, Rio de Janeiro.

EHRlich, M. MITCHELL, J.K. **Working stress design method for reinforced soil walls.** Virginia: J. Geot. Eng. 1994.

ELIAS *et al.* **Mechanically stabilized Earth walls and reinforced soil slopes.** Design and construction guidelines, n. FHWA/NHI-00-043. 2001.

FAHEL, A. R. S. **Desempenho de encontros de pontes reforçados com geogrelhas sobre solos moles.** 2003. 247p. Tese de Doutorado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

FARRAG, K., ACAR, Y.B., JURAN, I. **Pull-out resistance of geogrid reinforcements.** Geotextiles and Geomembranes, n. 12. 1993.

FERNANDES FILHO, L.A., COSTA, M.L., COSTA, J.B.S. **Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus – Amazonas**. Geociências, v. 16, nº. 1, p. 9-33, 1997.

FERNANDES, Maicris. **Desenvolvendo aplicações poderosas com excel e vba**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2005.

GOMES, R. C. **Interação solo-reforço e mecanismos de ruptura em solos reforçados com geotexteis**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 294p, 1993.

HOULSBY, G.T. **How the dilatancy of soils affects their behaviour**. Soil Mechanics Report, n. 121/91. University of Oxford. 1991.

INGOLD, T.S. **Reinforced Clay**. PhD. Thesys. Survey University, Guilford, United Kingdon. 1980.

INGOLD, T.S. **Laboratory pull-out testing of grid reinforcement in sand**. Geotechnical Testing Journal, n. 6. 1983.

JEWELL et al. **Interaction between soil and geogrids**. In: Symposium on polymer grid reinforce in civil engeneering. 1984.

JEWELL, R. A. **Some effects of reinforcement on the mechanical behavior of soils**. PhD Dissertation, 1980. Univ. of Cambridge. Grã-Bretanha.

JEWELL, R.A. Application of revised design charts for steep reinforced slopes. Geotextiles and Geomembranes, n. 10. 1991.

JEWELL, R.A. **Soil reinforcement with geotextiles**. Ciria special publication, n. 123. 1996.

JOHN, N. W. M. **Geotextiles**. Blackie and Son Ltd., 347 p. 1987.

JURAN, I. *et al.* **Strain Compatibility analysis for geosynthetics reinforced soil walls.** Journal Geotech Eng. ASCE, 1990.

JURAN, I., ASCE, M., IDER, H.M., FARRAG, K. **Strain compatibility analysis for geosynthetics reinforced soil walls.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 116. n. 2, February. 1990.

KAKUDA, F.M. **Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido.** 2005. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics.** 3 ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1994.

LADEIRA, M.A.S.A. LOPES, M.L. **Estudo dos fenômenos da interação solo-geossintéticos através de ensaios de arranque.** Revista Geotecnia, n. 74. 1995.

LOPEZ, M. L. **Mecanismo de interação solo-geogrelhas: papel da granulometria do solo e das barras transversais do reforço.** Geotecnia, n. 87. 1999. p. 5-32.

LOPEZ, M. L & MOUTINHO, C. **Resistência das Interfaces Solo-Geogrelha: papel da densidade e granulometria do solo.** VI Congresso de Geotecnia, Lisboa, Portugal, Vol.1. 1997.

MACÊDO, I. L. **Análise numérica da construção de aterros sobre solos moles próximos a estruturas existentes: Influência da presença do reforço geossintético.** 2002. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

MIYTA, K. **Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrid in Japan.** Geosynthetics International, v. 3, n. 1. 1996.

MOLITERNO, A. **Caderno de muros de arrimo.** São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

NAKAMURA *et al.* **Estimating method for the insoil deformation behavior of geogrid based on the results of direct box shear test.** Soil and Foundations, vol. 43, n. 1, 2003.

OCHIAI *et al.* **The pull-out resistance of geogrids in reinforced soil.** Geotextiles and Geomembranes, n. 14. 1996.

PALMEIRA, E.M. **Aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos.** In: 1º Simpósio Brasileiro sobre Geossintéticos. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, v. 1. 1992.

PALMEIRA, E.M. e MILLIGAN, G.W.E. **Large scale direct shear tests on reinforced soil.** Soil and Foundations, v. 29. 1989.

PALMEIRA, E.M. e MILLIGAN, G.W.E. **Scale and other factors affecting the results of the pullout tests of grids buried in sand.** Geotechnique, v. 39, n. 3. 1989.

PALMEIRA, E.M. MILLIGAN, G.W.E. **Large scale direct shear tests on reinforced soil.** Soil and Foundations, v. 29, 1989.

PALMEIRA, E.M. **The study of soil reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests.** D. Phil. Thesis. University of Oxford. 237p. 1987.

RAJU, D.M. at all. **On large-scale laboratory pull-out testing.** Geotechnical Engineering Journal, n. 2. 1998.

SACOMAN, M.A.R. **Otimização de projetos utilizando GRG, solver e excel.** In: XL Congresso de Educação em Engenharia, 2012, Belém.

SILVA, A.R.L. **Estabilidade de aterros sobre solos moles reforçados com geossintéticos.** 1996. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

SILVA, C. L. RIBEIRO, O. L. **EIA/RIMA do porto das lajes.** Universidade Federal do Amazonas, 2008. 42p.

SUGIMOTO, M. *et al.* **Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests.** Geotextiles and Geomembranes, n. 19, 2001.

TAN, S. A. *et al.* **Large-scale drainage behaviour of composite geotextile and geogrid in residual soil.** *Geotextiles and Geomembranes*, n. 19. 2001.

TEIXEIRA, S.H.C. BUENO, B.S. **Comportamento de geogrelhas implantadas em um solo arenoso fino e solicitadas ao arrancamento.** *Revista Solos e Rochas*, São Paulo, v. 25, n. 2. 1999.

TEIXEIRA, S.H.C. **Construção e calibração de um equipamento de ensaios de arrancamento de geossintéticos.** 1999. 157p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TEIXEIRA, S.H.C. e BUENO, B.S. **Comportamento de geogrelhas implantadas em um solo arenoso fino e solicitadas ao arrancamento.** *Solos e rochas*, São Paulo, v. 25, n. 2, 2002.

TEIXEIRA, S.H.C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados.** 2003. 218p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

TERZAGUI, K. **Theoretical soil mechanics.** New York: John Wiley and Sons, inc. 1943.

TUPA, N. **Estudo da aderência e interação solo-geossintético.** 1994. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: MacGrawHill, 1992.

VERTEMATTI, J.C. **Manual brasileiro de geossintéticos.** 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. 413p.

VIANA, H. N. L. **Estudo da estabilidade e condutibilidade hidráulica de sistemas de revestimento convencionais e alternativos para obras de disposição de resíduos.** 2007.259p. Tese de Doutorado (Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.

Apêndice - A

CD com programa computacional desenvolvido na pesquisa e demais arquivos

Apêndice - B

1° Passo: Elabora-se a janela de abertura do programa computacional, informando os dados de identificação da instituição de ensino, o curso de mestrado, nome do aluno, nome do orientador e data, como demonstrado:

```

    textcolor(lightgreen);
    writeln('          PROGRAMA DE ANALISE PARAMETRICA - ENSAIOS DE
ARRANCAMENTO DE GEOGRELHAS');
    writeln;
    writeln('          CALCULO PARA REFORÇO DE TALUDES COM
GEOSSINTÉTICOS');
    writeln;
    writeln;
    writeln;
    writeln;
    writeln;
    writeln;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln('          Orientador: Nilton de Sousa Campelo');
    write('          Programa elaborado pelo aluno: Evaltonf Arantes de Oliveira');
    write('          Set - 2013');
    writeln;
    readln;
    clrscr;

```

2° Passo: Elabora-se a subrotina “Dadosmatrizensaio” para receber a entrada de dados dos ensaios realizados com equipamento reduzido em laboratório, armazenando estes dados em matrizes (*ranger*), para então processá-los, visando à organização dos mesmos, possibilitando desta forma cálculos estatísticos e aplicação nas fórmulas, como se segue:

```

Procedure Dadosmatrizensaio;
Begin

```

```

// Leitura da numero de ensaios realizados
repeat
    clrscr;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln('          LABORATORIO DE PAVIMENTACAO - UFAM');
    writeln;
    writeln('          ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA EM
EQUIPAMENTO REDUZIDO');
    writeln;
    writeln;

    Testador := true;

```

```

textcolor(lightgreen);
write(' Quantidade de ensaios realizados: ');
while testador do
begin

    read(entrada);
    val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero > 1) then //se não houve erro
        begin
            k := numero;
            Testador := false;
        end
    else
        begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir 'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
        end;
    end;

// Leitura dos dados da matriz
i:=1; j:=1;
writeln;
For i:= 1 to k do
    begin
        writeln(' Ensaio: ',i);

        Testador := true;
        textcolor(lightgreen);
        while testador do
            begin
                write(' Entre com a Força de Arrancamento (kN/m) M[' ,i, ', ',j, ' ]: ');
                read(entrada);
                val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
                if (teste_erro = 0) and (numero1 > 1) then //se não houve erro
                    begin
                        M[i,j] := numero1;
                        Testador := false;
                    end
                else
                    begin //se houve erro
                        textcolor(lightred);
                        write('Erro 001-Digite novamente:'); //imprimir 'ERRO'
                        textcolor(lightgreen);
                    end;
                end;
            end;

Testador := true;

```

```

    textcolor(lightgreen);
while testador do
begin
write(' Entre com o Deslocamento (mm) M['i, ',',j+1, ']: ');
read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) then //se não houve erro
begin
M[i,j+1] := numero1;
Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir 'ERRO'
textcolor(lightgreen);
end;
end;

j:=1;
writeln;
End;

// Mostra matriz de ensaios
clrscr;
writeln;
writeln('          DADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS: ');
writeln;
write(' Ensaio    Força de Arrancamento (kN/m)    Deslocamento (mm)');
writeln;
writeln;
For i:= 1 to k do
writeln('    ',i,'          ', M[i,1]:2:2,'          ', M[i,2]:2:2);
writeln;

repeat
writeln;
write(' Dados estao corretos? (s/n): ');
readln(letra);
if (letra <> 's') and (letra <> 'n') then
begin
textcolor(lightred);
writeln(' Erro 002 - Digite novamente:');
textcolor(lightgreen);
end;
until (letra = 's') or (letra = 'n');

//Realização dos cálculos estatísticos:

If letra = 's' then

```

```

begin

//calculo da média
auxiliar:=0;
For i:=1 to k do
  auxiliar:=(M[i,1]+auxiliar);
media1:=auxiliar/k;
auxiliar:=0;
For j:=1 to k do
  auxiliar:=(M[j,2]+auxiliar);
media2:=auxiliar/k;
//calculo do desvio padrão
auxiliar:=0;
For i:=1 to k do
  auxiliar:=(M[i,1]-media1)*(M[i,1]-media1)+auxiliar;
  desvio1:=sqrt(auxiliar/(k-1));
  auxiliar:=0;
For j:=1 to k do
  auxiliar:=(M[j,2]-media2)*(M[j,2]-media2)+auxiliar;
  desvio2:=sqrt(auxiliar/(k-1));

// calculo do coeficiente de variacao
auxiliar:=0;
cv1:=(desvio1/media1)*100;
cv2:=(desvio2/media2)*100;

  textcolor (white);
writeln;
write(' Média:          ', media1:2:2,'          ', media2:2:2);
writeln;
write(' Desvio Padrao:      ', desvio1:2:2,'          ', desvio2:2:2);
writeln;
write(' Coeficiente de Variacao: ', cv1:2:2,'%          ', cv2:2:2,'%');
writeln;

  //Ploto a matriz de Tensão vs Deformação

For i:=1 to k do
  For j:=1 to 2 do
    T[i,j] := M[i,j];

For i:=1 to k do // divido a força pela área da geogrelha 8x5
  T[i,1] := T[i,1]/0.2448;

//Desenho do gráfico Tensão x Deslocamento:

  writeln;
  write(' Ensaio      Tensao de Arrancamento (kPa)      Deslocamento (mm)');
writeln;
writeln;

```

```

    For i:= 1 to k do
      writeln('  ',i,'          ', T[i,1]:2:2,'          ', M[i,2]:2:2);
      writeln;
      textcolor(lightgreen);
      write(' Para desenhar gráfico <enter>');
      readln;

    end;
  until (letra = 's');
End;

```

3° Passo: Elabora-se a subrotina “Plotgraficos” visando o aparecimento de uma janela com um gráfico da tensão máxima de arrancamento x deslocamento, utilizando os dados de ensaios realizados na pesquisa, como se segue:

```

Procedure Plotgraficos;
begin

  Clrscr;

  //Pinta fundo da tela gráfica de amarelo

  For linha:=3 to 20 do
    begin
      For coluna:=20 to 60 do
        begin
          gotoxy(coluna,linha);
          textcolor(yellow);
          write(#178);
        end;
      end;

  //Imprime os pontos no gráfico

  For i:=1 to k do
    For j:=1 to 2 do
      N[i,j] := trunc(T[i,j]);

  gotoxy(0,0);
  If M[1,1] = 18.56 then
    begin
      For i:= 1 to k do
        Begin
          gotoxy(N[i,1]-35,N[i,2]-15);
          textcolor (lightred);
          write ('.P',i);
        end;
      end;
    end;

```

```

If M[1,1] = 14.66 then
begin
  For i:= 1 to k do
    Begin
      gotoxy(N[i,1]-35,N[i,2]);
      textcolor (lightred);
      write ('.P',i);
    end;
  end;

  // Plota gráfico

  If (M[1,1] <> 18.56) and (M[1,1] <> 14.66) then
  For i:= 1 to k do
    Begin
      gotoxy(N[i,1]-48,N[i,2]-20);
      textcolor (lightred);
      write ('.P',i);
    end;

//Imprime os eixos do gráfico

  writeln;
  textcolor (lightgreen);
  gotoxy(1,1);
  write('Tensao Arranc.(kPa)');
  writeln;
  write('      100(KPa)');
  writeln;

// Imprime eixo vertical verde

  For coluna:= 20 to 60 do
  Begin
    gotoxy(coluna,20);
    textcolor (lightgreen);
    write ('_');
  end;

// Imprime eixo horizontal verde
  For linha:= 3 to 20 do
  Begin
    gotoxy(20,linha);
    textcolor (lightgreen);
    write ('|');
  end;
  writeln;
  write('      0mm      25mm      50mm');

```

```

writeln;
write('                Deslocamento (mm)');
writeln;
writeln;
    textcolor(white);
    write('    Deseja calcular reforço de Talude com esta geogrelha? <enter>');
    Readln;

end;

```

4º Passo: Elabora-se a subrotina “CalculoTalude” visando ao calculo do coeficiente de interação solo-geogrelha, o cálculo da espessura das camadas de aterro, intercaladas por geogrelhas, e sua otimização iterativa, definindo qual melhor espaçamento entre as camadas de aterro e a melhor geogrelha a ser utilizada num reforço de talude, como se segue:

```

Procedure CalculoTalude;
Begin
    clrscr;
    textcolor(white);
    writeln;
    writeln('                UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
    writeln('                PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
CIVIL');
    writeln;
    textcolor(lightgreen);
    writeln('                CALCULO DE REFORCO DE TALUDE COM GEOGRELHA');
    writeln;
    write('1. DADOS DO TALUDE A SER REFORCADO');
    writeln;
    writeln;

    // Leitura da altura do talude
    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
    write(' Entre com a altura do talude (m): ');
    while testador do
        begin
            read(entrada);
            val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
            if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                begin
                    altura := numero1;
                    Testador := false;
                end
            else
                begin
                    //se houve erro

```



```

write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
    textcolor(lightgreen);
    end;
    end;
    writeln;

// transformo o angulo de graus para radianos pois as equações do Pascal são em
//radianos

    Awrad := Aw * 3.14159265359/180;

writeln;
write('2. DADOS DO SOLO');
writeln;
writeln;

// Leitura do peso específico do solo
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o peso especifico do solo(kN/m3): ');
while testador do
begin
    read(entrada);
    val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero1 > 0) then //se não houve erro
begin
    Psolo := numero1;
    Testador := false;
end
    else
begin //se houve erro
    textcolor(lightred);
    write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

    textcolor(lightgreen);
    end;
    end;
    writeln;

//write(' Entre com granulometria (mm): ');
//read(Fi);
//writeln;
//write(' Entre com o PH do solo: ');
//read(PH);

// Leitura do angulo de atrito interno do solo
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o angulo de atrito (Entre 20 a 50 graus): ');
while testador do
begin

```

```

        read(entrada);
        val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 20) and (numero1 <= 50)
then //se não houve erro - o intervalo de 20 a 50 é devido aos abacos de Jewell (1991)
        begin
            Aatruto := numero1;
            Testador := false;
        end
        else
            begin //se houve erro
                textcolor(lightred);
                write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

                textcolor(lightgreen);
            end;
        end;
        writeln;

// transformo o angulo de graus para radianos pois as equações do Pascal são radianos
Aatrutorad := Aatruto * 3.14159265359/180;

// Leitura da coesão do solo
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com a coesao do solo ( 0 a 100kPa): ');
while testador do
    begin
        read(entrada);
        val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) and (numero1 <= 100.0)
then //se não houve erro
        begin
            coesao := numero1;
            Testador := false;
        end
        else
            begin //se houve erro
                textcolor(lightred);
                write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

                textcolor(lightgreen);
            end;
        end;
        writeln;

//write(' Entre com Modulo Tangencial inicial (<enter> para k=460): ');
//readkey;
//if readkey = #13 then
// begin

```

```

// ktang:=460;
//textcolor(white);
//write('k= ',ktang:3:2);
//textcolor(lightgreen);
//end;
//writeln;
//writeln;
//write(' Entre com Modulo Expoente (<enter> para n=0.5): ');
//readkey;
//if readkey = #13 then
// begin
// nexp:=0.5;
// textcolor(white);
//write('n= ',nexp:2:2);
//textcolor(lightgreen);
//end;
//writeln;

// Leitura do Fator de reducao de pico
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o fator reducao pico ( <enter>(2x) para f=1.25 ): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
fpico := 1.25;
textcolor(white);
writeln(fpico:2:2);
textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de fpico <> de <enter>
while testador do
begin
read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
begin
fpico := numero1;
Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir

'ERRO'
textcolor(lightgreen);
end;

```

```

        end;
        end;
        writeln;
// Leitura do Fator de Seguranca
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com o fator de seguranca: ( <enter>(2x) para FS=1.50 ):
');

        //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
    FS := 1.5;
    textcolor(white);
    writeln(FS:2:2);
    textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de FS <> de <enter>
    while testador do
        begin
            read(entrada);
            val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
            if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                begin
                    FS := numero1;
                    Testador := false;
                end
            else
                begin //se houve erro
                    textcolor(lightred);
                    write('  Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
                    textcolor(lightgreen);
                end;
            end;
        end;
    end;
        writeln;

// Leitura do Fator de Reducao danos mec. inst.
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com o fator reducao danos mec.: (<enter>(2x) para
Fdmec=1.15): ');

        //Para caso de <enter>

```

```

readkey;
If (readkey = #13) then
  begin
    Fdmec := 1.15;
    textcolor(white);
    writeln(Fdmec:2:2);
    textcolor(lightgreen);
  end else
  begin
    //Para o caso de Fdmec <> de <enter>
    while testador do
      begin
        read(entrada);
        val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
          begin
            Fdmec := numero1;
            Testador := false;
          end
        else
          begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
            end;
          end;
        end;
        writeln;

// Leitura do Fator de Reducao deg. ambiental
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o fator reducao deg. amb.: (<enter>(2x) para
Fdamb=1.2): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
  begin
    Fdamb := 1.2;
    textcolor(white);
    writeln(Fdamb:2:2);
    textcolor(lightgreen);
  end else
  begin
    //Para o caso de Fdamb <> de <enter>
    while testador do
      begin

```

```

read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
    begin
        Fdamb := numero1;
        Testador := false;
    end
    else
        begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
            end;
        end;
        writeln;

        // Leitura do Fator de Reducao de Fluencia
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o fator reducao por fluencia: (<enter>(2x) para
Fcr=2.0): ');

        //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
    begin
        Fcr := 2.0;
        textcolor(white);
        writeln(Fcr:2:2);
        textcolor(lightgreen);
    end else
        begin
//Para o caso de Fcr <> de <enter>
            while testador do
                begin
                    read(entrada);
                    val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
                    if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                        begin
                            Fcr := numero1;
                            Testador := false;
                        end
                        else
                            begin //se houve erro
                                textcolor(lightred);
                                write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir

```

```

'ERRO'
                                textcolor(lightgreen);
                                end;
                                end;
                                end;
                                writeln;

// Leitura do Fator de Reducao por incertezas no geossintéticos
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com fator incertezas geossintético: (<enter>(2x) para
Fm=1.04): ');

                                //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
  Fm := 1.04;
  textcolor(white);
  writeln(Fm:2:2);
  textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de Fm <> de <enter>
  while testador do
begin
  read(entrada);
  val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
  if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
begin
  Fm := numero1;
  Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
  textcolor(lightred);
  write('  Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
  textcolor(lightgreen);
  end;
  end;
  end;
  end;
  writeln;

// Leitura do Peso do Rolo Compactador (Qrolo)
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com peso do rolo compactador: (<enter>(2x) para

```

```

Qrolo=120kN): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
  Qrolo := 120;
  textcolor(white);
  writeln(Qrolo:2:2);
  textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de Qrolo <> de <enter>
  while testador do
begin
  read(entrada);
  val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
  if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
begin
  Qrolo := numero1;
  Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
  textcolor(lightred);
  write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
  textcolor(lightgreen);
end;
end;
end;
writeln;

// Leitura do comprimento do tambor do Rolo Compactador (Lrolo)
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre comprimento tambor rolo compact.: (<enter>(2x) para
Lrolo=2.10m): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
  Lrolo := 2.10;
  textcolor(white);
  writeln(Lrolo:2:2);
  textcolor(lightgreen);
end else
begin

```

```

//Para o caso de Lrolo <> de <enter>
while testador do
begin
read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
begin
Lrolo := numero1;
Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

textcolor(lightgreen);
end;
end;
writeln;

// Leitura da Pressao Neutra
repeat
write(' Considerar o efeito de Poropressao (U)? (s/n) ');
readln(resp);
if (resp <> 's') and (resp <> 'n') then
begin
textcolor(lightred);
writeln(' Erro 003 - Digite novamente:');
textcolor(lightgreen);
end;
until (resp = 's') or (resp = 'n');
If (resp = 'n') then
U := 0;
If (resp = 's') then
U := 0.5;

writeln;
write('3. DADOS DA GEOGRELHA');
writeln;
writeln;
textcolor(white);
write(' Coeficiente de Interacao solo/geogrelha:');
writeln;

// Calculo do f* Utilizo a Equação n° 34 (Cap. 2)

// For i:=1 to k do
// F[i,1] := T[i,1] / (coesao + 2.3*T[i,1]*(0.5));

```

```

tangente3:=sin(Aatritorad)/cos(Aatritorad);

For i:=1 to k do
  F[i,1] := FS*T[i,1] / (coesao + (Td/0.2448)*tangente3);

// Ploto os ensaios, as tensoes de arrancamento, deslocamentos e f*
  writeln;
  write('   Ensaio      Tensao Arranc.(kPa)      Deslocamento(mm)      Coef.
Interacao (f*)');
  writeln;
  For i:= 1 to k do
    writeln('   ',i,'      ', T[i,1]:2:2,'      ', M[i,2]:2:2, '      ', F[i,1]:2:3
);
  writeln;
  textcolor(lightgreen);

// Calculo da media de f* obtido nos ensaios
  auxiliar:=0;
  For i:=1 to k do
    auxiliar:=(F[i,1]+auxiliar);
  mediaf:=auxiliar/k;

// Calculo do f* pela Formula proposta por Christopher et al. 1990

  Fidim := Aatrito;           //Obs: não estou usando o Fpico
  Fidimrad := Fidim * 3.14159265359/180;
  tangente4 := sin(Fidimrad)/cos(Fidimrad);
  fcrist := 0.8*tangente4;           // Utiliza-se a Equação n° 34 (Cap. 2)
write('   Digite <enter> para continuar:');
readkey;
clrscr;
writeln;
textcolor(white);
writeln('           UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
writeln('           PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
CIVIL');
writeln;
writeln;
textcolor(green);
write('   Escolha do Coeficiente de Interacao Solo/Geogrelha a ser adotado:');
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write(' 1. Coeficiente de interacao (obtido dos ensaios) = ',mediaf:2:2);
writeln;
write(' 2. Coeficiente de interacao (formula de Christopher) = ',fcrist:2:2);
writeln;

// Leitura do Coeficiente de interacao a ser adotado

```

```

Testador := true;
textcolor(white);
        writeln;
write(' Escolha o coeficiente de interacao a ser adotado (1 ou 2): ');
        textcolor(lightgreen);
while testador do
    begin
        read(entrada);
        val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero >= 1) and (numero <= 2) then
//se não houve erro
            begin
                if (numero = 1) then
                    fadot := mediaf;

                    if (numero = 2) then
                        fadot := fcrist;

                Testador := false;
                writeln;
                textcolor(white);
                write('          Coeficiente de interacao adotado (f*):
',fadot:2:2);

            end
        else
            begin //se houve erro
                textcolor(lightrd);
                write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
                textcolor(lightgreen);
            end;
        end;

// Escolha da METODOLOGIA DE CALCULO

        writeln;
        writeln;
        textcolor(green);
        write(' Escolha da metodologia de calculo:');
        writeln;
        writeln;
        textcolor(lightgreen);
        write(' 1. Metodo de JEWELL (1991)');
        writeln;
        write(' 2. Medodo de EHRLICH e MITCHELL (1994)');

        Testador := true;
        textcolor(white);

```

```

        writeln;
        writeln;
write(' Escolha o método de cálculo (1 ou 2): ');
        textcolor(lightgreen);
while testador do
begin
    read(entrada);
    val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero >= 1) and (numero <= 2) then
//se não houve erro
        begin
            if (numero = 1) then
                begin
                    Metcalc := 1;
                    writeln;
                    textcolor(white);
                    write(' Metodo de calculo adotado: JEWELL
(1991)');
                        end;
                    if (numero = 2) then
                        begin
                            Metcalc := 2;
                            writeln;
                            textcolor(white);
                            write(' Metodo de calculo adotado: EHRlich e
MITCHELL (1994)');
                                end;
                                Testador := false;
                                end
                            else
                                begin
                                    //se houve erro
                                    textcolor(lightred);
                                    write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
                                    textcolor(lightgreen);
                                    end;
                                end;
                                textcolor(lightgreen);
                                writeln;
                                writeln;
                                writeln;
                                writeln(' Digite <enter> para continuar: ');
                                readkey;
                                // writeln;

```

```

// write(' Entre com o fator reducao incertezas geossintético: (<enter> para Fm=1,04): ');
// readkey;
// if readkey = #13 then
//   begin
//     Fm:=1.04;
//     textcolor(white);
//     write('Fm= ',Fm:2:2);
//     textcolor(lightgreen);
//     end;
// writeln;

// Inicio dos calculos da geogrelha

// Calculo pelo METODO DE JEWELL (1991)

Metcalc := 1;
if Metcalc = 1 then
begin

  clrscr;
  writeln;
  textcolor(white);
  writeln('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
  writeln('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
CIVIL');

  // 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Jewell 1991)

  writeln;
  textcolor(green);
  writeln('          DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE JEWELL (1991));
  textcolor(lightred);
  writeln;
  write('          Geogrelha de projeto: ', Td:2:2, 'kN/m');
  textcolor(lightgreen);
  // a. Determinacao de Ru (pressão neutra)

  // Desconsidero por causa dos abacos do Jewell : Ru := U/ Psolo * altura;

  Ru := U;  Utiliza-se a Equação nº 20 (Cap. 2)

  writeln;
  writeln;
  textcolor(white);
  write(' 1. Pressao Neutra (Ru) = ', Ru:2:2);
  writeln;

  // b. Cálculo do ângulo de atrito de dimensionamento

```

```

Tangente1 := sin(Aatritorad)/cos(Aatritorad);

    Arcotang1 := tangente1/fpico;
Fidimrad := arctan(Arcotang1); // resultado em radianos

//transformo radianos em graus
Fidim := Fidimrad * 180/3.14159265359; // Utiliza-se a Equação nº 23 (Cap. 2)

textcolor(white);
write(' 2. Angulo de atrito de dimensionamento = ', Fidim:2:2, ' graus');
writeln;

// c. Cálculo do comprimento mínimo do reforço (Lr)

// Utilizo os abacos de JEWELL 1996 – Utiliza-se Figura nº 04 (Cap. 2)

//Utilizo a procedure abaco para encontrar o kreq e o Lr
AbacoJewell;

// kreq := 0.34;          //Utiliza-se a Figura nº 04 (Cap. 2)
// Lr := 0.6 * altura;   //Utiliza-se a Figura nº 04 (Cap. 2)

write(' 3. Utilizando os abacos de Jewell (1996) = kreq =', kreq:2:2);
writeln;
write(' 4. Utilizando os abacos de Jewell (1996) = Lr =', Lr:2:2);
writeln;

// d. Cálculo do coeficiente de empuxo de dimensionamento

    Fat1 := Td/(2*Psolo*altura);
    Fat2 := 1/(1 - Ru);

        tangente2 := sin(fidimrad)/cos(fidimrad);

        Fat3 := 1/(fadot*tangente2);

        Lb := fat1*fat2*fat3; // Comprimento minimo para o empuxo de
dimensionamento //Utiliza-se a Equação nº 26 (Cap. 2)

write(' 5. Comprimento mínimo para o empuxo de dimensionamento (Lb) = ',
Lb:2:2, 'm');
writeln;

// Calculo do kd (coeficiente de empuxo)

kd := kreq/(1 - Lb/Lr); //Utiliza-se a Equação nº 25 (Cap. 2)

```

```

        write(' 6. Coeficiente de empuxo de dimensionamento (kd) = ', kd:2:2);
    writeln;

// e. Cálculo do espaçamento máximo entre camadas horizontais de reforço

// Calculo do Sv

Sv := Td/(kd * Psolo * altura);    //Utiliza-se a Equação nº 24 (Cap. 2)

textcolor(lightred);
write(' 7. Espacamento vertical máximo entre camadas horizontais de geogrelha= ',
Sv:2:2, 'm');

// Calculo do Sv com f* da Formula do Christopher (1990)

    Fat1 := Td/(2*Psolo*altura);

    Fat2 := 1/(1 - Ru);

    tangente2 := sin(fidimrad)/cos(fidimrad);

    Fat3 := 1/(fcrist*tangente2);

    Lbcrist := fat1 *fat2*fat3;    //Utiliza-se a Equação nº 26 (Cap. 2)

    kdcrist := kreq/(1 - Lbcrist/Lr);    //Utiliza-se a Equação nº 25 (Cap. 2)

    Svcrist := Td/(kdcrist * Psolo * altura);    //Utiliza-se a Equação nº 26
(Cap. 2)

// Verificação comparativa fadot e fcrist

writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write(' 8. Comparativo de resultados (f*)');
writeln;
write(' a) Coeficiente interacao (resultado ensaios): ', fadot:2:2, ' -> Espacamento:
', Sv:2:2, 'm');
writeln;
write(' b) Coeficiente interacao (Formula Christian): ', fcrist:2:2, ' -> Espacamento:
', Svcrist:2:2, 'm');
writeln;

//Verificacao qual f* mais economico
If Sv > Svcrist then

```

```

begin
    fecono := fadot;
    textcolor(white);
    write('      Resultado: Coeficiente interacao (resultado ensaios): ',
fecono:2:2,' mais economico');
    textcolor(lightgreen);
end else
begin
    fecono := fcrist;
    textcolor(white);
    write('      Resultado: Coeficiente interacao (Formula Christian): ',
fecono:2:2,' mais economico');
    textcolor(lightgreen);
end;

// Calculo interativo de geogrelha e espacamento
repeat
repeat
    writeln;
    writeln;
    write(' 9. Quer alterar o espacamento e calcular uma nova geogrelha? (s/n) ');
    readln(resp);
    if (resp <> 's') and (resp <> 'n') then
begin
    textcolor(lightred);
    writeln(' Erro 002 - Digite novamente:');
    textcolor(lightgreen);
    end;
until (resp = 's') or (resp = 'n');

If resp = 's' then
begin

    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
    write(' 9.1 Qual o novo espacamento a ser adotado (m) ? ');
    while testador do
begin
    read(entrada);
    val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) then //se não houve
erro
begin
    Sv := numero1;
    Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
    textcolor(lightred);

```

```

write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
    textcolor(lightgreen);
    end;
end;

//Calculo da geogrelha pelo espacamento

Td := Sv * kd * Psolo * altura; //Utiliza-se Equação n° 24 (Cap. 2)

Td:= trunc(Td);

textcolor(lightred);
writeln;
write(' Resultado: A nova geogrelha de projeto sera: ', Td:3:2,
'kN/m');

    writeln;
    writeln;
    textcolor(white);
        end;
        fim := 's';

until (fim = 's');

end;

Metcalc := 2;
if Metcalc = 2 then
begin
repeat
    clrscr;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln(' UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
    writeln(' PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

// 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

    writeln;
    textcolor(green);
    writeln(' DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
    textcolor(lightred);
    writeln;

// Calculo pelo metodo de Ehrlich e Mitchell
//a. Calculo da tensão vertical induzida pela compactação (Tindcomp)

// Calculo do Coeficiente do empuxo de terras (Ka)

```

```

Ang45rad := 45 * 3.14159265359/180;

Fase1a := sin(Ang45rad - Aatritorad/2);
Fase2a := cos(Ang45rad - Aatritorad/2);

Tangente5 := Fase1a/Fase2a;

Ka := tangente5 * tangente5; // Coeficiente de empuxo de terra (Ka) //Utiliza-se a
Equação n° 28 (Cap. 2)

Empuxoterra := 0.5 * Psolo * (altura) * (altura) * Ka; // Empuxo de terra da zona
não reforçada (Empuxoterra) //Utiliza-se a Equação n° 3 (Cap. 2)

Vo := ( 1 - sin(Aatritorad))/( 2 - sin(Aatritorad)); //Utiliza-se a Equação n° 29
(Cap. 2)

Fase1b := sin(Ang45rad + Aatritorad/2);
Fase2b := cos(Ang45rad + Aatritorad/2);
Tangente6 := Fase1b/Fase2b;

Nsolo := tangente6 * ( tangente6*tangente6*tangente6*tangente6 - 1);
//Utiliza-se a Equação n° 30 (Cap. 2)

Tindcomp := ( 1 - Vo) * ( 1 + Ka) * (sqrt( 0.5 * Psolo * Qrolo * Nsolo/Lrolo
)); //Tensão induzida pela compactação (Tindcomp) ); //Utiliza-se a Equação n° 31
(Cap. 2)

//b. Calculo da tensão vertical geostática no nível do reforço (Tgeoz)

// Pela formulação de Meyerhof (1995):

{Fase1c := Psolo * z;
Fase1c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
Tgeoz := Fase1c/Fase1c; //Tensão vertical geostática no nível do reforço (Tgeoz)
//Utiliza-se a Equação n° 28 (Cap. 2)

//c. Calculo da tensão na profundidade(Tzc)

{ If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then
begin
Tzc := Tindcomp; //Tensão na profundidade
end else

```

```

Tzc := Tgeoz;    //Tensão na profundidade    }

//d. Calculo de Beta
//Adoto Si = 0.03 porque a geogrelha é tecida (VERTEMATTI,2004, p.120)

// Primeira interação Si = 0.03 e Pa = 100

Beta := 33 * sqrt(Tzc); //Beta na primeira interação - com este Beta calculo
o Tmax e uso nas demais interações //Utiliza-se a Equação nº 27 (Cap. 2)

{ Fase1d := sqrt( Tzc/100);
Si := (Er * Ar)/36800;    //Utiliza-se a Equação nº 19 (Cap. 2)

Beta := Fase1d/Si;    //Beta nas demais interações - Considero Er = Tmax e
tiro o Ar e calculo o novo Beta } Utiliza-se a Equação nº 27 (Cap. 2)

//e. Calculo da Tração Máxima (Tmax)

Numcamadas := trunc(altura/Sv);

// Exibição dos resultados: Planilha de calculo da 1a interação

textcolor(lightgreen);
write('          PLANILHA DE CALCULO -');
textcolor(lightred);
write(' 1a');
textcolor(lightgreen);
write(' INTERACAO');
writeln;
write('| Camada | Prof.(m) | Tgeoz(kPa) | Tcomp(kPa) | Tzc(kPa) |Beta|');
textcolor(lightred);
writeln(' Tmax(kN/m) |');
textcolor(white);
writeln;
auxiliar := 0;

For i:= 1 to Numcamadas do    // Planilha para a 1a interação
begin

    profundidade := 0.40 + auxiliar;
    z:= profundidade;

    Fase1c := Psolo * z;
    Fase2c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
    Tgeoz := Fase1c/Fase2c;    //Tensão vertical geostática no nível do reforço
(Tgeoz)    //Utiliza-se a Equação nº 28 (Cap. 2)

    If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then

```

```

begin
  Tzc := Tindcomp; //Tensão na profundidade
end else
  Tzc := Tgeoz; //Tensão na profundidade

  Beta := 33 * sqrt(Tzc); //Beta para Primeira interação // Utiliza-se
a Equação nº 27 (Cap. 2)

  AbacoEhrlich; // Uso a procedure do abaco do Ehrlich para calcular o
Tmax de forma interativa //Utiliza-se o Ábaco da Figura nº 05 (Cap. 2)

  Tmax1P[i] := Tmax; //Vetor do Tmax na 1a interação

  write(' ',i,' ',profundidade:3:2,' ',Tgeoz:3:2,' ',Tindcomp:3:2,'
',Tzc:3:2,' ',Beta:3:2,' ',Tmax:4:2);
  writeln;
  auxiliar := auxiliar + Sv;

end;
textcolor(lightgreen);
writeln;
writeln(' Digite <enter> para prosseguir');
readkey;

// Exibição dos resultados: Planilha de calculo das DEMAIS INTERAÇÕES

Parada:=true;
P:=2;
while Parada do
begin
  clrscr;
  writeln;
  textcolor(white);
  writeln(' UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
  writeln(' PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

  // 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

  writeln;
  textcolor(green);
  writeln(' DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
  writeln;
  textcolor(lightgreen);
  write(' PLANILHA DE CALCULO -');
  textcolor(lightred);
  write(P,'a');
  textcolor(lightgreen);

```

```

write(' INTERACAO');
writeln;
write('| Camada | Prof.(m) | Tgeoz(kPa) | Tcomp(kPa) | Tzc(kPa) |Beta|');
textcolor(lightred);
write(' Tmax(kN/m) |');
writeln;
writeln;
textcolor(white);
auxiliar := 0;

For i:= 1 to Numcamadas do // Planilha para a 1a interaçao
begin

    profundidade := 0.40 + auxiliar;
    z:= profundidade;

    Fase1c := Psolo * z;
    Fase2c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
    Tgeoz := Fase1c/Fase2c; //Tensão vertical geostática no nível do reforço
(Tgeoz) ///Utiliza-se a Equação n° 28 (Cap. 2)

    If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then
begin
    Tzc := Tindcomp; //Tensão na profundidade
end else
    Tzc := Tgeoz; //Tensão na profundidade

    {Fase1d := sqrt( Tzc/100);

    //Utiliza-se a Equação n° 19

    Ar := 36800 * 0.03 /Tmax1P[i];
    Si := (Tmax1P[i] * Ar)/36800;}

    Fase1d := 33/(1-i/100);

    Beta := Fase1d * sqrt(Tzc); //Beta para as demais interações
//Utiliza-se a Equação n° 27 (Cap. 2)

    AbacoEhrlich; // Uso a procedure do abaco do Ehrlich para calcular o
Tmax de forma interativa

    TmaxNP[i] := Tmax;

    write(' ',i,' ',profundidade:3:2,' ',Tgeoz:3:2,' ',Tindcomp:3:2,'
',Tzc:3:2,' ',Beta:3:2,' ',Tmax:4:2);

    auxiliar := auxiliar + Sv;
writeln;

```

```

end;

P := P + 1; //Contador do número de interações

Residuo := Tmax1P[1] - TmaxNP[1];
If Residuo < 0 then
  Residuo := Residuo*(-1);

If Residuo < 1 then
  parada := false;

end;

////////////////////////////////////
textcolor(lightgreen);
writeln;
write('      Digite <enter> para Verificacao do Fator de Seguranca');
  readkey;

  clrscr;
  writeln;
  textcolor(white);
  writeln('      UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
  writeln('      PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

  // 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

  writeln;
  textcolor(green);
  writeln('      DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
  writeln;
  writeln;
  textcolor(lightgreen);
  write('      PLANILHA DE CALCULO - VERIFICACAO DO FATOR DE
SEGURANCA');
  writeln;
  write(' | Camada | Prof.(m) | le(m) | Pr(kN/m) | Tmax(kN/m)');
  textcolor(lightred);
  write(' | FS |');
  textcolor(white);
  writeln;

  //Calculo de estabilidade ao arrancamento

  Fase1a := sin(Ang45rad - Aatritorad/2);
  Fase2a := cos(Ang45rad - Aatritorad/2);

```

```

Tangente5 := Fase1a/Fase2a;

Fase1e := sin(Awrad);
Fase2e := cos(Awrad);

Tangente7 := Fase1e/Fase2e;

    auxiliar := 0;

    For i:= 1 to Numcamadas do      // Planilha para a Verificação do Fator de
Segurança por camada
    begin

        profundidade := 0.40 + auxiliar;
        z:= profundidade;

        Le := Lr - ( altura - z) * ( tangente5 - (1/tangente7)); //Comprimento de
ancoragem além da cunha ativa      //Utiliza-se a Equação n° 32 (Cap. 2)

        //Utiliza-se a Equação n° 1 (Cap. 2)
        Pr := 2 * fadot * Psolo * z * 1 * Le; //Resistência ao arrancamento
        //Utiliza-se a Equação n° 34 (Cap. 2)
        FSverif := Pr/TmaxNP[i]; //Fator de Segurança por profundidade

        write('      ',i,'      ',profundidade:3:2,'      ',Le:3:2,'      ',Pr:3:2,'
',TmaxNP[i]:3:2,'      ');

        If (FSverif < FS) then
        begin
            textcolor(lightred);
            write(FSverif:3:2, ' < ',FS:2:2,' - Nao passou!');
            textcolor(white);
        end else
        begin
            write(FSverif:3:2, ' > ',FS:2:2);
            textcolor(lightgreen);
            writeln(' - passou!');
            textcolor(white);
        end;

        auxiliar := auxiliar + Sv;

    end;

writeln;
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write('      Digite <enter> para desenhar arranjo final da estrutura');

```

```

readkey;

//Desenha os resultados no talude

    DesenhaTalude;

repeat
writeLn;
writeLn;
textcolor(white);
write('          Deseja finalizar o programa? (s/n) ');
readLn(fim);
    if (fim <> 's') and (fim <> 'n') then
        begin
            textcolor(lightred);
            writeLn(' Erro 002 - Digite novamente:');
            textcolor(lightgreen);
        end;
    until (fim = 's') or (fim = 'n');
until (fim = 's');

end;

        writeLn;
writeLn;
        textcolor(lightgreen);
write('          Programa PGRID-UFAM versao 1.0 - Mestrado
PPGEC 2013');
        writeLn;
writeLn;
        textcolor(white);
write('-----FIM-----');
        write('          Digite <enter> para sair');
readLn;

End;

```

5° Passo: Finalmente, transmuta-se os códigos dos passos anteriores para a plataforma VB (*Visual Basic*) no programa Microsoft Excel, objetivando à melhoria da qualidade gráfica na interação com o usuário, mas, o algoritmo, os cálculos e fórmulas permanecem os mesmos.

Códigos de programação na linguagem Pascal Estruturado

Program Matrix;
Uses Crt, UnitGraph;

Var

TensaoG,linha, coluna, col,lin,ql,cont,aux, i, j,k,P, PH: integer;
F,M,T: array [1..20, 1..20] of real;
Tmax1P, TmaxNP: array [1..20] of real;
N: array [1..10, 1..10] of integer;
FSverif, Le, Pr, Tangente7, Fase1e, Fase2e, Tgeo, Residuo, Fase1d, Si, Er, Ar, tangente6, tangente5, fcrist, tangente4, Lrint, Lrdesl, tangente3, Fidimrad, Aattritorad, Awrad, Lb, tangente2, fm, fcr, fdamb, fdmec, kd, Td, fat1, fat2, fat3,kreq, Lr, fidim, tangente1, Arcotang1, Ru, U, mediaf , coesao, FS, fpico, nexp, ktang, Aatruto, cv1, cv2, media1, media2, auxiliar, desvio1, desvio2, altura, Sv, Aw, Psolo, Fi: real;
letra: char;
resp, fim: string;
entrada: string;
Numcamadas, Metcalc, numero,cont7, teste_erro: integer;
Ang45rad, Fase1c, Fase2c, z, profundidade, Nsolo, Fase1, Fase2, Fase1b, Fase2b, empuxoterra, Ka, Fase2a, Fase1a, Tmax, Beta, Tzc, Tgeoz, Fator1, Sh, Tindcomp, Vo, Lrolo, Qrolo, fecono, Svcrist, kdcrist, lbcrist, fadot, numero1: real; //uso no comando val para variaveis type real
Testador, Parada: boolean;

// Procedure para calcular o Tmax - abaco do Ehrlich e Mitchell (1994)
Procedure AbacoEhrlich; //Abaco Dantas & Ehrlich, 1999 - pag. 104 Vertematti - método interativo para achar o Tmax
Begin

Sh := 2; //Distancia horizontal entre camadas
Fator1 := Tgeoz/Tzc; //Fator do abaco Dantas & Ehrlich, 1999

If (Beta > 16) then //Para Beta = infinito
begin
If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
begin
Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
begin
Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
begin
Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
begin
Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
end;

```

If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
  begin
    Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
If (Fator1 = 1) then
  begin
    Tmax := 0.12 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
end;

If (Beta = 16) then //Para Beta = 16
begin
  If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
    begin
      Tmax := 0.18 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
    begin
      Tmax := 0.17 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
    begin
      Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
    begin
      Tmax := 0.15 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
    begin
      Tmax := 0.145 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 = 1) then
    begin
      Tmax := 0.14 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
end;

If (Beta = 8) then //Para Beta = 8
begin
  If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
    begin
      Tmax := 0.20 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
    begin
      Tmax := 0.19 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
    begin

```

```

    Tmax := 0.18 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
begin
    Tmax := 0.17 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
begin
    Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
If (Fator1 = 1) then
begin
    Tmax := 0.15 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
end;

If (Beta = 4) then //Para Beta = 4
begin
    If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
begin
    Tmax := 0.24 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
    If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
begin
    Tmax := 0.23 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
    If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
begin
    Tmax := 0.20 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
    If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
begin
    Tmax := 0.18 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
    If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
begin
    Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
    If (Fator1 = 1) then
begin
    Tmax := 0.15 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
end;

end;

If (Beta = 2) then //Para Beta = 2
begin
    If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
begin
    Tmax := 0.28 * (Sv * Sh * Tzc);
end;
end;

```

```

If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
  begin
    Tmax := 0.25 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
  begin
    Tmax := 0.23 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
  begin
    Tmax := 0.18 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
  begin
    Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
If (Fator1 = 1) then
  begin
    Tmax := 0.15 * (Sv * Sh * Tzc);
  end;
end;

If (Beta = 1) then //Para Beta = 1
  begin
    If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
      begin
        Tmax := 0.32 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
    If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
      begin
        Tmax := 0.28 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
    If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
      begin
        Tmax := 0.23 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
    If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
      begin
        Tmax := 0.18 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
    If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
      begin
        Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
    If (Fator1 = 1) then
      begin
        Tmax := 0.15 * (Sv * Sh * Tzc);
      end;
  end;
end;

```

```

If (Beta = 0) then //Para Beta = 0
begin
  If (Fator1 >= 0) and (Fator1 < 0.20) then
    begin
      Tmax := 0.40 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.20) and (Fator1 < 0.40) then
    begin
      Tmax := 0.31 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.40) and (Fator1 < 0.60) then
    begin
      Tmax := 0.25 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.60) and (Fator1 < 0.80) then
    begin
      Tmax := 0.16 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 >= 0.80) and (Fator1 < 1) then
    begin
      Tmax := 0.10 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
  If (Fator1 = 1) then
    begin
      Tmax := 0.05 * (Sv * Sh * Tzc);
    end;
end;
End;

// Procedure para desenhar o resultado do calculo no talude
Procedure DesenhaTalude;
Begin
  Clrscr;

  //Calculo do numero de camadas
  Numcamadas := trunc(altura/Sv);

  textcolor(white);
  writeln('          ARRANJO ESTRUTURAL DE REFORCO PARA TALUDE COM
GEOGRELHAS: ');
  writeln;
  textcolor(lightgreen);
  writeln('          ', Numcamadas, ' camadas de Geogrelhas cada ', Sv:2:2, 'm');
  writeln;

  i:=30;
  cont7:=0;
  j:= 1;

  for linha := 5 to (Numcamadas+4) do

```

```

begin
for coluna := i to 60 do
  begin
    gotoxy(coluna,linha+cont7);
    textcolor(brown);
    write(#178);
    end;
    textcolor(green);
    write('Esp: ',Sv:2:2,'m');
    i:= i - 2;
    cont7:=cont7+1;
  end;

  i:=30;
  cont7:=1;

for linha := 5 to (Numcamadas+4) do
  begin
    for coluna := i to 40 do
      begin
        gotoxy(coluna,linha+cont7);
        textcolor(yellow);
        write('_');
        end;
        textcolor(yellow);
        Tgeo := TmaxNP[j] * FS * fm*fcr*fdamb*fdmec ;
        write('Geogrelha: ',Tgeo:3:2,'kN/m');
        i:= i - 2;
        cont7:=cont7+1;
        j:=j+1;
      end;

      writeln;
      writeln;
      textcolor(lightgreen);
      write(' Digite <enter> para continuar');
      readkey;

End;

// Procedure dos abacos do Jewell (1991) - Livro do Vertematti 2012 - 1a. edicao pag. 100
- Figura 4-26
Procedure AbacoJewell;
Begin

  //Calculo do Kreq - coeficiente de empuxo nas duas situacoes Ru = 0 e Ru = 0.5
  Ru := U;

  //Kreq não considerando o efeito da Poropressão

```

```
If (Ru = 0) then
begin
    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
    begin
        Kreq := 0.46;
    end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
    begin
        kreq := 0.36;
    end;
    If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
    begin
        kreq := 0.30;
    end;
    If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
    begin
        kreq := 0.23;
    end;
    If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
    begin
        kreq := 0.19;
    end;
    If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
    begin
        kreq := 0.15;
    end;
end;

//Kreq considerando o efeito da Poropressão
If (Ru = 0.5) then
begin
    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
    begin
        Kreq := 0.73;
    end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
    begin
        kreq := 0.68;
    end;
    If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
    begin
        kreq := 0.64;
    end;
    If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
    begin
        kreq := 0.61;
    end;
    If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
    begin
```

```

    kreq := 0.59;
end;
If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
begin
    kreq := 0.56;
end;
end;

//Calculo da Estabilidade Interna (Lrint)
//Lr/H não considerando o efeito da Poropressão
If (Ru = 0) then
begin
    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
begin
    Lrint := altura * 0.70;
end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
begin
    Lrint := altura * 0.65;
end;
    If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
begin
    Lrint := altura * 0.55;
end;
    If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
begin
    Lrint := altura * 0.50;
end;
    If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
begin
    Lrint := altura * 0.43;
end;
    If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
begin
    Lrint := altura * 0.39;
end;
end;
// Calculo da estabilidade interna (Lrint)
//Lr/H considerando o efeito da Poropressão
If (Ru = 0.5) then
begin
    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
begin
    Lrint := altura * 1.30;
end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
begin
    Lrint := altura * 1.10;
end;
end;

```

```

If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
  begin
    Lrint := altura * 0.90;
  end;
If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
  begin
    Lrint := altura * 0.70;
  end;
If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
  begin
    Lrint := altura * 0.65;
  end;
If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
  begin
    Lrint := altura * 0.60;
  end;
end;

//Calculo do deslizamento ao longo da base (Lrdesl)
//Lr/H não considerando o efeito da Poropressão
If (Ru = 0) then
  begin

    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.50;
      end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.28;
      end;
    If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.15;
      end;
    If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.70;
      end;
    If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.15;
      end;
    If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.10;
      end;
  end;

// Calculo do deslizamento ao longo da base (Lrdesl)

```

```
//Lr/H considerando o efeito da Poropressão
If (Ru = 0.5) then
  begin
    If (Fidim >= 20) and (Fidim < 25) then
      begin
        Lrdesl := altura * 1.75;
      end;
    If (Fidim >= 25) and (Fidim < 30) then
      begin
        Lrdesl := altura * 1.20;
      end;
    If (Fidim >= 30) and (Fidim < 35) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.90;
      end;
    If (Fidim >= 35) and (Fidim < 40) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.15;
      end;
    If (Fidim >= 40) and (Fidim < 45) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.40;
      end;
    If (Fidim >= 45) and (Fidim < 50) then
      begin
        Lrdesl := altura * 0.25;
      end;
  end;
```

```
// Entre Lrint e Lrdesl eu adoto o maior valor - Método do Jewell (1991) - Vertematti
1a. edicao (pag. 100) - 2012
  If (Lrint >= Lrdesl) then
    Lr := Lrint/0.8
  else
    Lr := Lrdesl/0.8;
```

```
If (mediaf <> 0.80) then //Segundo Vertematti, pag. 99, se f* for diferente de 0.8
tenho que uma correção nos abacos de Jewell
  Lr := Lr*(0.8/mediaf);
```

```
End;
```

```
Procedure CalculoTalude;
```

```
Begin
```

```
  clrscr;
```

```
  textcolor(white);
```

```
  writeln;
```

```
  writeln('
```

```
    UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
```

```
  writeln('
```

```
    PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
```

```

CIVIL');
  writeln;
  textcolor(lightgreen);
  writeln('          CALCULO DE REFORCO DE TALUDE COM GEOGRELHA');
  writeln;
  write('1. DADOS DO TALUDE A SER REFORCADO');
  writeln;
  writeln;

      // Leitura da altura do talude
  Testador := true;
  textcolor(lightgreen);
  write(' Entre com a altura do talude (m): ');
  while testador do
    begin
      read(entrada);
      val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
      if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
          begin
            altura := numero1;
            Testador := false;
          end
        else
          begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
            end;
          end;
          writeln;

      // Leitura da resistência a tração da geogrelha
  Testador := true;
  textcolor(lightgreen);
  write(' Entre com a resistencia a tracao de projeto da geogrelha
(kN/m): ');
  while testador do
    begin
      read(entrada);
      val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
      if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 10) then //se não houve
erro
          begin
            Td := numero1;
            Testador := false;
          end
        else
          begin //se houve erro
            textcolor(lightred);

```



```

end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

textcolor(lightgreen);
end;
end;
writeln;

//write(' Entre com granulometria (mm): ');
//read(Fi);
//writeln;
//write(' Entre com o PH do solo: ');
//read(PH);

// Leitura do angulo de atrito interno do solo
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o angulo de atrito (Entre 20 a 50 graus: ');
while testador do
begin
read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 20) and (numero1 <= 50)
then //se não houve erro - o intervalo de 20 a 50 é devido aos abacos de Jewell (1991)
begin
Aatrito := numero1;
Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'

textcolor(lightgreen);
end;
end;
writeln;

// transformo o angulo de graus para radianos pois a eq do pascal sao radianos
Aatritorad := Aatrito * 3.14159265359/180;

// Leitura da coesao do solo
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com a coesao do solo ( 0 a 100kPa): ');
while testador do
begin

```

```

        read(entrada);
        val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) and (numero1 <= 100.0)
then //se não houve erro
        begin
        coesao := numero1;
        Testador := false;
        end
        else
        begin //se houve erro
        textcolor(lightred);
        write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
        textcolor(lightgreen);
        end;
        end;
        writeln;

//write(' Entre com Modulo Tangencial inicial (<enter> para k=460): ');
//readkey;
//if readkey = #13 then
// begin
// ktang:=460;
// textcolor(white);
// write('k= ',ktang:3:2);
// textcolor(lightgreen);
// end;
//writeln;
//writeln;
//write(' Entre com Modulo Expoente (<enter> para n=0.5): ');
//readkey;
//if readkey = #13 then
// begin
// nexp:=0.5;
// textcolor(white);
// write('n= ',nexp:2:2);
// textcolor(lightgreen);
// end;
//writeln;

// Leitura do Fator de reducao de pico
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o fator reducao pico ( <enter>(2x) para f=1.25 ): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
fpico := 1.25;
textcolor(white);

```



```

        Testador := false;
    end
    else
        begin                //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir

            textcolor(lightgreen);
        end;
    end;
end;

                                writeln;

                                // Leitura do Fator de Reducao danos mec. inst.
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com o fator reducao danos mec.: (<enter>(2x) para
Fdmec=1.15): ');

                                //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
    begin
        Fdmec := 1.15;
        textcolor(white);
        writeln(Fdmec:2:2);
        textcolor(lightgreen);
    end else
        begin
//Para o caso de Fdmec <> de <enter>
            while testador do
                begin
                    read(entrada);
                    val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
                    if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                        begin
                            Fdmec := numero1;
                            Testador := false;
                        end
                    else
                        begin                //se houve erro
                            textcolor(lightred);
                            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir

                            textcolor(lightgreen);
                        end;
                    end;
                end;
            end;
end;

```

```

end;
                                writeln;

                                // Leitura do Fator de Reducao deg. ambiental
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com o fator reducao deg. amb.: (<enter>(2x) para
Fdamb=1.2): ');

                                //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
begin
  Fdamb := 1.2;
  textcolor(white);
  writeln(Fdamb:2:2);
  textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de Fdamb <> de <enter>
  while testador do
begin
  read(entrada);
  val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
  if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
begin
  Fdamb := numero1;
  Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
  textcolor(lightred);
  write('  Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
  textcolor(lightgreen);
end;
end;
end;
                                writeln;

                                // Leitura do Fator de Reducao de Fluencia
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write('  Entre com o fator reducao por fluencia: (<enter>(2x) para
Fcr=2.0): ');

                                //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then

```

```

begin
  Fcr := 2.0;
  textcolor(white);
  writeln(Fcr:2:2);
  textcolor(lightgreen);
end else
begin
//Para o caso de Fcr <> de <enter>
  while testador do
    begin
      read(entrada);
      val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
      if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
          begin
            Fcr := numero1;
            Testador := false;
          end
        else
          begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
          end;
        end;
      end;
      writeln;

      // Leitura do Fator de Reducao por incertezas no
geossintéticos
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com fator incertezas geossintético: (<enter>(2x) para
Fm=1.04): ');

      //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
  begin
    Fm := 1.04;
    textcolor(white);
    writeln(Fm:2:2);
    textcolor(lightgreen);
  end else
  begin
//Para o caso de Fm <> de <enter>
    while testador do
      begin
        read(entrada);

```

```

val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
    begin
        Fm := numero1;
        Testador := false;
    end
    else
        begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
            end;
        end;
    end;
        writeln;

// Leitura do Peso do Rolo Compactador (Qrolo)
Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Entre com peso do rolo compactador: (<enter>(2x) para
Qrolo=120kN): ');

//Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
    begin
        Qrolo := 120;
        textcolor(white);
        writeln(Qrolo:2:2);
        textcolor(lightgreen);
    end else
        begin
//Para o caso de Qrolo <> de <enter>
            while testador do
                begin
                    read(entrada);
                    val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
                    if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                        begin
                            Qrolo := numero1;
                            Testador := false;
                        end
                        else
                            begin //se houve erro
                                textcolor(lightred);
                                write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir

```

```

'ERRO'
                                textcolor(lightgreen);
                                end;
                                end;
                                end;
                                writeln;

                                // Leitura do comprimento do tambor do Rolo
Compactador (Lrolo)
    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
    write('  Entre comprimento tambor rolo compact.: (<enter>(2x) para
Lrolo=2.10m): ');

                                //Para caso de <enter>
readkey;
If (readkey = #13) then
    begin
        Lrolo := 2.10;
        textcolor(white);
        writeln(Lrolo:2:2);
        textcolor(lightgreen);
    end else
    begin
//Para o caso de Lrolo <> de <enter>
        while testador do
            begin
                read(entrada);
                val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
                if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 1) then //se não houve
erro
                    begin
                        Lrolo := numero1;
                        Testador := false;
                    end
                    else
                        begin //se houve erro
                            textcolor(lightred);
                            write('  Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
                                textcolor(lightgreen);
                                end;
                                end;
                                end;
                                writeln;

                                // Leitura da Pressao Neutra
                                repeat
                                    write('  Considerar o efeito de Poropressao (U)? (s/n) ');
                                    readln(resp);

```

```

        if (resp <> 's') and (resp <> 'n') then
            begin
                textcolor(lightred);
                writeln(' Erro 003 - Digite novamente:');
                textcolor(lightgreen);
            end;
        until (resp = 's') or (resp = 'n');
        If (resp = 'n') then
            U := 0;
            If (resp = 's') then
                U := 0.5;

writeln;
write('3. DADOS DA GEOGRELHA');
writeln;
writeln;
textcolor(white);
write(' Coeficiente de Interacao solo/geogrelha:');
writeln;

// Calculo do f*

// For i:=1 to k do
// F[i,1] := T[i,1] / (coesao + 2.3*T[i,1]*(0.5));

    tangente3:=sin(Aatritorad)/cos(Aatritorad);

    For i:=1 to k do
        F[i,1] := FS*T[i,1] / (coesao + (Td/0.2448)*tangente3);

// Ploto os ensaios, as tensoes de arrancamento, deslocamentos e f*
    writeln;
    write('      Ensaio      Tensao Arranc.(kPa)      Deslocamento(mm)      Coef.
Interacao (f*)');
    writeln;
    For i:= 1 to k do
        writeln('      ',i,'      ', T[i,1]:2:2,'      ', M[i,2]:2:2,'      ', F[i,1]:2:3
);
    writeln;
    textcolor(lightgreen);

// Calculo da media de f* obtido nos ensaios
auxiliar:=0;
For i:=1 to k do
    auxiliar:=(F[i,1]+auxiliar);
mediaf:=auxiliar/k;

// Calculo do f* pela Formula proposta por Christopher et al. 1990
Fidim := Aatrito; //Obs: não estou usando o Fpico
Fidimrad := Fidim * 3.14159265359/180;

```

```

    tangente4 := sin(Fidimrad)/cos(Fidimrad);
    fcrist := 0.8*tangente4;      // Conforme proposto pag. 121 para a formula de
Christofer (1994)

write(' Digite <enter> para continuar:');
readkey;
clrscr;
writeln;
textcolor(white);
writeln('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
writeln('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
CIVIL');
writeln;
writeln;
textcolor(green);
write(' Escolha do Coeficiente de Interacao Solo/Geogrelha a ser adotado:');
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write(' 1. Coeficiente de interacao (obtido dos ensaios) = ',mediaf:2:2);
writeln;
write(' 2. Coeficiente de interacao (formula de Christopher) = ',fcrist:2:2);
writeln;

// Leitura do Coeficiente de interacao a ser adotado
Testador := true;
textcolor(white);
        writeln;
write(' Escolha o coeficiente de interacao a ser adotado (1 ou 2): ');
        textcolor(lightgreen);
while testador do
begin
    read(entrada);
    val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero >= 1) and (numero <= 2) then
//se não houve erro
        begin
            if (numero = 1) then
                fadot := mediaf;

            if (numero = 2) then
                fadot := fcrist;

            Testador := false;
            writeln;
            textcolor(white);
            write('          Coeficiente de interacao adotado (f*):
',fadot:2:2);

```

```

end
else
begin
    //se houve erro
    textcolor(lightred);
    write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
    textcolor(lightgreen);
end;
end;

// Escolha da METODOLOGIA DE CALCULO

writeln;
writeln;
textcolor(green);
write(' Escolha da metodologia de calculo:');
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write(' 1. Metodo de JEWELL (1991)');
writeln;
write(' 2. Medodo de EHRLICH e MITCHELL (1994)');

Testador := true;
textcolor(white);
    writeln;
    writeln;
write(' Escolha o método de cálculo (1 ou 2): ');
    textcolor(lightgreen);
while testador do
begin
    read(entrada);
    val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero >= 1) and (numero <= 2) then
//se não houve erro
        begin
            if (numero = 1) then
                begin
                    Metcalc := 1;
                    writeln;
                    textcolor(white);
                    write(' Metodo de calculo adotado: JEWELL
(1991)');
                end;
            if (numero = 2) then
                begin
                    Metcalc := 2;
                    writeln;
                    textcolor(white);

```

```

write('          Metodo de calculo adotado: EHRLICH e
MITCHELL (1994)');
end;

Testador := false;

end
else
begin          //se houve erro
  textcolor(lightred);
  write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
  textcolor(lightgreen);
end;

end;

textcolor(lightgreen);
writeln;
  writeln;
  writeln;
  writeln;
  writeln('          Digite <enter> para continuar: ');
  readkey;

// writeln;
// write(' Entre com o fator reducao incertezas geossintético: (<enter> para Fm=1,04): ');
// readkey;
// if readkey = #13 then
//   begin
//     Fm:=1.04;
//     textcolor(white);
//     write('Fm= ',Fm:2:2);
//     textcolor(lightgreen);
//   end;
// writeln;

// Inicio dos calculos da geogrelha

// Calculo pelo METODO DE JEWELL (1991)

Metcalc := 1;
if Metcalc = 1 then
begin

  clrscr;
  writeln;
  textcolor(white);
  writeln('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
  writeln('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA

```

CIVIL');

```
// 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Jewell 1991)

writeln;
textcolor(green);
writeln('          DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE JEWELL (1991)');
textcolor(lightred);
writeln;
write('          Geogrelha de projeto: ', Td:2:2, 'kN/m');
textcolor(lightgreen);
// a. Determinacao de Ru (pressão neutra)

// Desconsidero por causa dos abacos do Jewell : Ru := U/ Psolo * altura;

      Ru := U;

writeln;
writeln;
textcolor(white);
write(' 1. Pressao Neutra (Ru) = ', Ru:2:2);
writeln;

// b. Cálculo do ângulo de atrito de dimensionamento

Tangente1 := sin(Aatritorad)/cos(Aatritorad);

      Arcotang1 := tangente1/fpico;
Fidimrad := arctan(Arcotang1); // resultado em radianos

//transformo radianos em graus
Fidim := Fidimrad * 180/3.14159265359;

textcolor(white);
write(' 2. Angulo de atrito de dimensionamento = ', Fidim:2:2, 'graus');
writeln;

// c. Cálculo do comprimento mínimo do reforço (Lr)

// Utilizo os abacos de JEWELL 1996

//Utilizo a procedure abaco para encontrar o kreq e o Lr
AbacoJewell;

// kreq := 0.34;
// Lr := 0.6 * altura;

write(' 3. Utilizando os abacos de Jewell (1996) = kreq =', kreq:2:2);
```

```

writeln;
write(' 4. Utilizando os abacos de Jewell (1996) = Lr =', Lr:2:2);
writeln;

// d. Cálculo do coeficiente de empuxo de dimensionamento

Fat1 := Td/(2*Psolo*altura);

Fat2 := 1/(1 - Ru);

tangente2 := sin(fidimrad)/cos(fidimrad);

Fat3 := 1/(fadot*tangente2);

Lb := fat1*fat2*fat3; // Comprimento mínimo para o empuxo de
dimensionamento

write(' 5. Comprimento mínimo para o empuxo de dimensionamento (Lb) = ',
Lb:2:2, 'm');
writeln;

// Calculo do kd (coeficiente de empuxo)

kd := kreq/(1 - Lb/Lr);

write(' 6. Coeficiente de empuxo de dimensionamento (kd) = ', kd:2:2);
writeln;

// e. Cálculo do espaçamento máximo entre camadas horizontais de reforço

// Calculo do Sv

Sv := Td/(kd * Psolo * altura);

textcolor(lightred);
write(' 7. Espaçamento vertical máximo entre camadas horizontais de geogrelha= ',
Sv:2:2, 'm');

// Calculo do Sv com f* da Formula do Christian (1990)

Fat1 := Td/(2*Psolo*altura);

Fat2 := 1/(1 - Ru);

tangente2 := sin(fidimrad)/cos(fidimrad);

Fat3 := 1/(fcrist*tangente2);

Lbcrist := fat1*fat2*fat3;

```

```

kdcris := kreq/(1 - Lbcrist/Lr);

Svcris := Td/(kdcris * Psolo * altura);

// Verificação comparativa fadot e fcrist

writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write(' 8. Comparativo de resultados (f*)');
writeln;
write(' a) Coeficiente interacao (resultado ensaios): ', fadot:2:2, ' -> Espacamento:
', Sv:2:2, 'm');
writeln;
write(' b) Coeficiente interacao (Formula Christian): ', fcrist:2:2, ' -> Espacamento:
', Svcris:2:2, 'm');
writeln;

//Verificacao qual f* mais economico
If Sv > Svcris then
begin
fecono := fadot;
textcolor(white);
write('      Resultado: Coeficiente interacao (resultado ensaios): ',
fecono:2:2,' mais economico');
textcolor(lightgreen);
end else
begin
fecono := fcrist;
textcolor(white);
write('      Resultado: Coeficiente interacao (Formula Christian): ',
fecono:2:2,' mais economico');
textcolor(lightgreen);
end;

// Calculo iterativo de geogrelha e espacamento
repeat
repeat
writeln;
writeln;
write(' 9. Quer alterar o espacamento e calcular uma nova geogrelha? (s/n) ');
readln(resp);
if (resp <> 's') and (resp <> 'n') then
begin
textcolor(lightred);
writeln(' Erro 002 - Digite novamente:');
textcolor(lightgreen);
end;
until (resp = 's') or (resp = 'n');

```

```

If resp = 's' then
begin

    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
    write(' 9.1 Qual o novo espacamento a ser adotado (m) ? ');
    while testador do
        begin
            read(entrada);
            val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
            if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) then //se não houve
erro
                begin
                    Sv := numero1;
                    Testador := false;
                end
            else
                begin //se houve erro
                    textcolor(lightred);
                    write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir
'ERRO'
                    textcolor(lightgreen);
                    end;
                end;

                //Calculo da geogrelha pelo espacamento

                Td := Sv * kd * Psolo * altura;
                Td:= trunc(Td);

                textcolor(lightred);
                writeln;
                write(' Resultado: A nova geogrelha de projeto sera: ', Td:3:2,
'kN/m');
                writeln;
                writeln;
                textcolor(white);
            end;
            fim := 's';

        until (fim = 's');

    end;

    Metcalc := 2;
    if Metcalc = 2 then
        begin
            repeat

```

```

    clrscr;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
    writeln('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

// 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

    writeln;
    textcolor(green);
    writeln('          DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
    textcolor(lightred);
    writeln;

// Calculo pelo metodo de Ehrlich e Mitchell
//a. Calculo da tensão vertical induzida pela compactação (Tindcomp)

// Calculo do Coeficiente do empuxo de terras (Ka)

Ang45rad := 45 * 3.14159265359/180;

Fase1a := sin(Ang45rad - Aatritorad/2);
Fase2a := cos(Ang45rad - Aatritorad/2);

Tangente5 := Fase1a/Fase2a;

Ka := tangente5 * tangente5; // Coeficiente de empuxo de terra (Ka)

Empuxoterra := 0.5 * Psolo * (altura) * (altura) * Ka; // Empuxo de terra da zona
não reforçada (Empuxoterra)

Vo := ( 1 - sin(Aatritorad))/( 2 - sin(Aatritorad));

Fase1b := sin(Ang45rad + Aatritorad/2);
Fase2b := cos(Ang45rad + Aatritorad/2);
Tangente6 := Fase1b/Fase2b;

Nsolo := tangente6 * ( tangente6*tangente6*tangente6*tangente6 - 1);

Tindcomp := ( 1 - Vo) * ( 1 + Ka) * (sqrt( 0.5 * Psolo * Qrolo * Nsolo/Lrolo
)); //Tensão induzida pela compactação (Tindcomp)

//b. Calculo da tensão vertical geostática no nível do reforço (Tgeoz)

// Pela formulação de Meyerhof (1995):

{Fase1c := Psolo * z;

```

```

Fase1c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
Tgeoz := Fase1c/Fase1c; //Tensão vertical geostática no nível do reforço (Tgeoz)
}

```

```
//c. Calculo da tensão na profundidade(Tzc)
```

```

{ If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then
  begin
    Tzc := Tindcomp; //Tensão na profundidade
  end else
    Tzc := Tgeoz; //Tensão na profundidade }

```

```
//d. Calculo de Beta
```

```
//Adoto Si = 0.03 porque a geogrelha é tecida (pág. 120 Vetematti)
```

```
// Primeira interação Si = 0.03 e Pa = 100
```

```
Beta := 33 * sqrt(Tzc); //Beta na primeira interação - com este Beta calculo
o Tmax e uso nas demais interações
```

```

{ Fase1d := sqrt( Tzc/100);
  Si := (Er * Ar)/36800;

```

```

  Beta := Fase1d/Si; //Beta nas demais interações - Considero Er = Tmax e
  tiro o Ar e calculo o novo Beta }

```

```
//e. Calculo da Tração Máxima (Tmax)
```

```
Numcamadas := trunc(altura/Sv);
```

```
// Exibição dos resultados: Planilha de calculo da 1a interação
```

```

textcolor(lightgreen);
write('          PLANILHA DE CALCULO -');
textcolor(lightred);
write(' 1a');
textcolor(lightgreen);
write(' INTERACAO');
writeln;
write('| Camada | Prof.(m) | Tgeoz(kPa) | Tcomp(kPa) | Tzc(kPa) |Beta|');
textcolor(lightred);
writeln(' Tmax(kN/m) |');
textcolor(white);
writeln;
auxiliar := 0;

```

```
For i:= 1 to Numcamadas do // Planilha para a 1a interação
```

```

begin

    profundidade := 0.40 + auxiliar;
    z:= profundidade;

    Fase1c := Psolo * z;
    Fase2c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
    Tgeoz := Fase1c/Fase2c; //Tensão vertical geostática no nível do reforço
(Tgeoz)

    If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then
        begin
            Tzc := Tindcomp; //Tensão na profundidade
        end else
            Tzc := Tgeoz; //Tensão na profundidade

            Beta := 33 * sqrt(Tzc); //Beta para Primeira interação

            AbacoEhrlich; // Uso a procedure do abaco do Ehrlich para calcular o
Tmax de forma iterativa

            Tmax1P[i] := Tmax; //Vetor do Tmax na 1a interação

            write(' ',i,' ',profundidade:3:2,' ',Tgeoz:3:2,' ',Tindcomp:3:2,'
',Tzc:3:2,' ',Beta:3:2,' ',Tmax:4:2);
            writeln;
            auxiliar := auxiliar + Sv;

        end;
        textcolor(lightgreen);
        writeln;
        writeln(' Digite <enter> para prosseguir');
        readkey;

// Exibição dos resultados: Planilha de calculo das DEMAIS INTERAÇÕES

Parada:=true;
P:=2;
while Parada do
begin
    clrscr;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln(' UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
    writeln(' PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

// 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

```

```

writeln;
textcolor(green);
writeln('          DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
writeln;
textcolor(lightgreen);
write('          PLANILHA DE CALCULO -');
textcolor(lightred);
write(P,'a');
textcolor(lightgreen);
write(' INTERACAO');
writeln;
write('| Camada | Prof.(m) | Tgeoz(kPa) | Tcomp(kPa) | Tzc(kPa) |Beta|');
textcolor(lightred);
write(' Tmax(kN/m) |');
writeln;
writeln;
textcolor(white);
auxiliar := 0;

For i:= 1 to Numcamadas do // Planilha para a 1a interaçao
begin

    profundidade := 0.40 + auxiliar;
    z:= profundidade;

    Fase1c := Psolo * z;
    Fase2c := 1 - (Ka/3)*(z/Lr)*(z/Lr);
    Tgeoz := Fase1c/Fase2c; //Tensao vertical geostatica no nivel do reforço
(Tgeoz)

    If (Tgeoz < Tindcomp) or (Tgeoz = Tindcomp) then
    begin
        Tzc := Tindcomp; //Tensao na profundidade
    end else
        Tzc := Tgeoz; //Tensao na profundidade

        {Fase1d := sqrt( Tzc/100);
        Ar := 36800 * 0.03 /Tmax1P[i];
        Si := (Tmax1P[i] * Ar)/36800;}

        Fase1d := 33/(1-i/100);

        Beta := Fase1d * sqrt(Tzc); //Beta para as demais interações

        AbacoEhrlich; // Uso a procedure do abaco do Ehrlich para calcular o
Tmax de forma iterativa

        TmaxNP[i] := Tmax;

```

```

write(' ',i,' ',profundidade:3:2,' ',Tgeoz:3:2,' ',Tindcomp:3:2,'
',Tzc:3:2,' ',Beta:3:2,' ',Tmax:4:2);

    auxiliar := auxiliar + Sv;
    writeln;

end;

P := P + 1; //Contador do número de interações

Residuo := Tmax1P[1] - TmaxNP[1];
If Residuo < 0 then
    Residuo := Residuo*(-1);

If Residuo < 1 then
    parada := false;

end;

////////////////////////////////////
textcolor(lightgreen);
writeln;
write('          Digite <enter> para Verificacao do Fator de Seguranca');
    readkey;

    clrscr;
    writeln;
    textcolor(white);
    writeln('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
    writeln('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM
ENGENHARIA CIVIL');

// 1. Análise da Estabilidade Interna (Método de Ehrlich e Mitchell 1994)

writeln;
textcolor(green);
writeln('          DIMENSIONAMENTO PELO METODO DE EHRlich E
MITCHELL (1994)');
writeln;
writeln;
    textcolor(lightgreen);
    write('          PLANILHA DE CALCULO - VERIFICACAO DO FATOR DE
SEGURANCA');
    writeln;
    write(' | Camada | Prof.(m) | le(m) | Pr(kN/m) | Tmax(kN/m)');
    textcolor(lightred);
    write(' | FS |');
    textcolor(white);

```

```

writeln;

//Calculo de estabilidade ao arrancamento

Fase1a := sin(Ang45rad - Aatritorad/2);
Fase2a := cos(Ang45rad - Aatritorad/2);

Tangente5 := Fase1a/Fase2a;

Fase1e := sin(Awrad);
Fase2e := cos(Awrad);

Tangente7 := Fase1e/Fase2e;

auxiliar := 0;

For i:= 1 to Numcamadas do // Planilha para a Verificação do Fator de
Segurança por camada
begin

    profundidade := 0.40 + auxiliar;
    z:= profundidade;

    Le := Lr - ( altura - z) * ( tangente5 - (1/tangente7)); //Comprimento de
ancoragem além da cunha ativa

    Pr := 2 * fadot * Psolo * z * 1 * Le; //Resistência ao arrancamento

    FSverif := Pr/TmaxNP[i]; //Fator de Segurança por profundidade

    write('      ',i,'      ',profundidade:3:2,'      ',Le:3:2,'      ',Pr:3:2,'
',TmaxNP[i]:3:2,'      ');

    If (FSverif < FS) then
begin
    textcolor(lightred);
    write(FSverif:3:2, ' < ',FS:2:2,' - Nao passou!');
    textcolor(white);
end else
begin
    write(FSverif:3:2, ' > ',FS:2:2);
    textcolor(lightgreen);
    writeln(' - passou!');
    textcolor(white);
end;

    auxiliar := auxiliar + Sv;

end;

```

```

writeln;
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
write('      Digite <enter> para desenhar arranjo final da estrutura');
readkey;

//Desenha os resultados no talude

      DesenhaTalude;

repeat
writeln;
writeln;
textcolor(white);
write('      Deseja finalizar o programa? (s/n) ');
readln(fim);
  if (fim <> 's') and (fim <> 'n') then
    begin
      textcolor(lightred);
      writeln(' Erro 002 - Digite novamente:');
      textcolor(lightgreen);
    end;
  until (fim = 's') or (fim = 'n');
until (fim = 's');

end;

      writeln;
      writeln;
      textcolor(lightgreen);
      write('      Programa PGRID-UFAM versao 1.0 - Mestrado
PPGEC 2013');
      writeln;
      writeln;
      textcolor(white);
      write('-----FIM-----');
      write('      Digite <enter> para sair');
      readln;

End;

Procedure Plotgraficos;
begin

  Clrscr;

  //Pinta fundo da tela gráfica de amarelo

```

```

For linha:=3 to 20 do
begin
  For coluna:=20 to 60 do
    begin
      gotoxy(coluna,linha);
      textcolor(yellow);
      write(#178);
    end;
  end;

//Imprime os pontos no gráfico

For i:=1 to k do
  For j:=1 to 2 do
    N[i,j] := trunc(T[i,j]);

gotoxy(0,0);
If M[1,1] = 18.56 then
begin
  For i:= 1 to k do
    Begin
      gotoxy(N[i,1]-35,N[i,2]-15);
      textcolor (lightred);
      write ('.P',i);
    end;
  end;

If M[1,1] = 14.66 then
begin
  For i:= 1 to k do
    Begin
      gotoxy(N[i,1]-35,N[i,2]);
      textcolor (lightred);
      write ('.P',i);
    end;
  end;

// Plota gráfico

If (M[1,1] <> 18.56) and (M[1,1] <> 14.66) then
For i:= 1 to k do
  Begin
    gotoxy(N[i,1]-48,N[i,2]-20);
    textcolor (lightred);
    write ('.P',i);
  end;

//Imprime os eixos do gráfico

```

```

writeln;
textcolor (lightgreen);
gotoxy(1,1);
write('Tensao Arranc.(kPa)');
writeln;
write('      100(KPa)');
writeln;

// Imprime eixo vertical verde

For coluna:= 20 to 60 do
Begin
  gotoxy(coluna,20);
  textcolor (lightgreen);
  write ('_');
end;

// Imprime eixo horizontal verde
For linha:= 3 to 20 do
Begin
  gotoxy(20,linha);
  textcolor (lightgreen);
  write ('|');
end;
writeln;
write('      0mm      25mm      50mm');
writeln;
write('      Deslocamento (mm)');
writeln;
writeln;
  textcolor(white);
  write('  Deseja calcular reforco de Talude com esta geogrelha? <enter>');
  Readln;

end;

Procedure Dadosmatrizensaio;
Begin

// Leitura da numero de ensaios realizados
repeat
  clrscr;
  writeln;
  textcolor(white);
  writeln('      LABORATORIO DE PAVIMENTACAO - UFAM');
  writeln;
  writeln('      ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA EM
EQUIPAMENTO REDUZIDO');

```

```

writeln;
writeln;

Testador := true;
textcolor(lightgreen);
write(' Quantidade de ensaios realizados: ');
while testador do
begin

    read(entrada);
    val(entrada, numero, teste_erro); //converte para número
    if (teste_erro = 0) and (numero > 1) then //se não houve erro
    begin
        k := numero;
        Testador := false;
    end
    else
    begin //se houve erro
        textcolor(lightred);
        write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir 'ERRO'
        textcolor(lightgreen);
    end;
end;

//

// Leitura dos dados da matriz
i:=1; j:=1;
writeln;
For i:= 1 to k do
begin
    writeln(' Ensaio: ',i);

    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
    while testador do
    begin
        write(' Entre com a Força de Arrancamento (kN/m) M['i, ','j, ']: ');
        read(entrada);
        val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
        if (teste_erro = 0) and (numero1 > 1) then //se não houve erro
        begin
            M[i,j] := numero1;
            Testador := false;
        end
        else
        begin //se houve erro
            textcolor(lightred);
            write('Erro 001-Digite novamente:'); //imprimir 'ERRO'
            textcolor(lightgreen);
        end;
    end;
end;

```

```

    end;
end;

    Testador := true;
    textcolor(lightgreen);
while testador do
begin
write(' Entre com o Deslocamento (mm) M['i, ','j+1, ']: ');
read(entrada);
val(entrada, numero1, teste_erro); //converte para número
if (teste_erro = 0) and (numero1 >= 0) then //se não houve erro
begin
M[i,j+1] := numero1;
Testador := false;
end
else
begin //se houve erro
textcolor(lightred);
write(' Erro 001 - Digite novamente: '); //imprimir 'ERRO'
textcolor(lightgreen);
end;
end;

j:=1;
writeln;
End;

// Mostra matriz de ensaios
clrscr;
writeln;
writeln('          DADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS: ');
writeln;
write(' Ensaio      Força de Arrancamento (kN/m)      Deslocamento (mm)');
writeln;
writeln;
For i:= 1 to k do
writeln('      'i,'          ', M[i,1]:2:2,'          ', M[i,2]:2:2);
writeln;

repeat
writeln;
write(' Dados estao corretos? (s/n): ');
readln(letra);
if (letra <> 's') and (letra <> 'n') then
begin
textcolor(lightred);
writeln(' Erro 002 - Digite novamente:');
textcolor(lightgreen);
end;
end;

```

```

until (letra = 's') or (letra = 'n');

If letra = 's' then
begin

//calculo da média
auxiliar:=0;
For i:=1 to k do
    auxiliar:=(M[i,1]+auxiliar);
media1:=auxiliar/k;
auxiliar:=0;
For j:=1 to k do
    auxiliar:=(M[j,2]+auxiliar);
media2:=auxiliar/k;
//calculo do desvio padrão
auxiliar:=0;
For i:=1 to k do
    auxiliar:=(M[i,1]-media1)*(M[i,1]-media1)+auxiliar;
    desvio1:=sqrt(auxiliar/(k-1));
    auxiliar:=0;
For j:=1 to k do
    auxiliar:=(M[j,2]-media2)*(M[j,2]-media2)+auxiliar;
    desvio2:=sqrt(auxiliar/(k-1));

// calculo do coeficiente de variacao
auxiliar:=0;
cv1:=(desvio1/media1)*100;
cv2:=(desvio2/media2)*100;

    textcolor (white);
writeln;
    write(' Média:           ', media1:2:2,'           ', media2:2:2);
writeln;
    write(' Desvio Padrao:      ', desvio1:2:2,'           ', desvio2:2:2);
writeln;
    write(' Coeficiente de Variacao: ', cv1:2:2,'%           ', cv2:2:2,'%');
writeln;

//Ploto a matriz de Tensão vs Deformação

For i:=1 to k do
    For j:=1 to 2 do
        T[i,j] := M[i,j];

For i:=1 to k do // divido a força pela área da geogrelha 8x5
    T[i,1] := T[i,1]/0.2448;

    writeln;
    write(' Ensaio      Tensao de Arrancamento (kPa)      Deslocamento (mm)');
writeln;

```

```

        writeln;
        For i:= 1 to k do
            writeln('      ', i, '      ', T[i,1]:2:2, '      ', M[i,2]:2:2);
            writeln;
        textcolor(lightgreen);
        write(' Para desenhar gráfico <enter>');
        readln;

    end;
until (letra = 's');
End;

```

```

Procedure Coresdatela;
begin

```

```

// bandeira da Italia

```

```

{For linha:= 1 to 25 do

```

```

Begin

```

```

    // Imprime parte verde

```

```

    For coluna:= 1 to 25 do

```

```

    Begin

```

```

        gotoxy(coluna,linha);

```

```

        textcolor (lightgreen);

```

```

        write (#178);

```

```

    end;

```

```

    // Imprime parte branca

```

```

    For coluna:= 26 to 54 do

```

```

    Begin

```

```

        gotoxy(coluna,linha);

```

```

        textcolor (white);

```

```

        write (#178);

```

```

    End;

```

```

    // Imprime parte vermelha

```

```

    For coluna:= 55 to 80 do

```

```

    Begin

```

```

        gotoxy(coluna,linha);

```

```

        textcolor (red);

```

```

        write (#178);

```

```

    End;

```

```

end; }

```

```

// Cores do Brasil

```

```

For linha:= 1 to 25 do

```

```

Begin

```

```

    // Imprime parte verde

```

```

    For coluna:= 1 to 40 do

```

```

Begin
  gotoxy(coluna,linha);
  textcolor (lightgreen);
  write (#178);
end;
// Imprime parte amarela
For coluna:= 41 to 80 do
Begin
  gotoxy(coluna,linha);
  textcolor (yellow);
  write (#178);
End;
End;

end;

Procedure Matrix;
Begin
  Clrscr;
  Repeat
  col:=1+Random(79);
  lin:=1+Random(23);
  ql:= Random(10);
  for cont:= lin to lin+ql do
  Begin
    if cont<24 then
      Begin
        letra:= chr(Random(255));
        for aux:=1 to 2 do
          Begin
            if aux= 1 Then
              Textcolor(10)
            else
              Textcolor(2);
              gotoxy(col,cont);
              write(letra);
              delay(1);
            end;
          end;
        end;
      end;
    until keypressed;
  end;

Begin
  Clrscr;
  writeln;
  writeln;
  writeln;
  textcolor(white);

```

```

write('          UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS');
writeln;
write('          PPGEC - PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL');
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
textcolor(lightgreen);
writeln('          PROGRAMA DE ANALISE PARAMETRICA - ENSAIOS DE
ARRANCAMENTO DE GEOGRELHAS');
writeln;
writeln('          CALCULO PARA REFORÇO DE TALUDES COM
GEOSSINTÉTICOS');
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
writeln;
textcolor(white);
writeln('          Orientador: Nilton de Sousa Campelo');
write('          Programa elaborado pelo aluno: Evailtonf Arantes de Oliveira');
write('          Set - 2013');
writeln;
readln;
clrscr;
Dadosmatrizensaio;
Plotgraficos;
CalculoTalude;
coresdatela;
readln;
matrix;
End.

```