VICTOR EDUARDO PIMENTEL

Avaliação da resistência ao cisalhamento em GCLs – Uma nova metodologia de ensaio

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos

2008

Aos meus Pais, José S. Pimentel e Rosângela Pimentel;

À minha noiva, Tali;

Ao meu irmão, Julio S. Pimentel;

À Tina

Dedico essa dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por minha família.

A minha amada noiva Talita que, em todos os nossos momentos, me encorajou nas decisões tomadas, parabenizando nos bônus e confortando, com ressalvas, nos ônus.

A meus Pais, que sempre tornaram fácil, ao voltar pra casa, a confirmação dos ensinamentos escolares.

A meu irmão Júlio, pelo companheirismo e elevado nível de aconselhamento.

Ao Professor Dr. Benedito de Souza Bueno que, além de assíduo orientador desse trabalho, é um amigo incondicional.

Ao amigo Silvio L. Palma, um agradecimento especial, pelo constante apoio e crédito em mim depositado.

Ao Dr. Carlos Vinícius Benjamim, pela amizade sincera e valiosa orientação científica.

Ao Eng. Eduardo Janela, pelo consistente aconselhamento pessoal.

Aos Professores Orêncio e Lázaro e Paulo Lodi, pela disponibilidade e atenção nos momentos de dúvida.

Ao Dr. Heraldo Pitanga, que me auxiliou decisivamente na realização dos ensaios.

Aos meus amigos de São Carlos, que sempre se mostraram companheiros e comprometidos com o sucesso alheio.

Aos professores Carlos de Souza Pinto e Marcos Massao Futai da POLI-USP, pela atenção dispensada.

Aos professores da EESC-USP, pelos ensinamentos, que sempre serão a porção mais sólida de meu acervo técnico.

Aos técnicos do laboratório de geossintéticos, pelo auxílio na realização dos ensaios.

A todos os funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC-USP pelo apoio sempre eficaz.

A OBER S.A. por acreditar e investir em pesquisas científicas.

“Quem pode garantir que estivemos aqui?
Nossos amigos, nossa família, nossas realizações?
O que pode garantir que conseguiremos?
Nossa fé?
Que assim seja!”

Rosângela Pimentel

RESUMO

PIMENTEL, V. E. (2008). Avaliação da resistência ao cisalhamento em GCLs- Uma nova metodologia de ensaio. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Os GCLs (*Geosynthetic Clay Liners*) são materiais geossintéticos destinados a compor sistemas de controle de fluxo em obras geotécnicas e ambientais. Suas propriedades vêm sendo cada vez mais estudadas visando a avaliação de seu comportamento de curto e longo prazo. Dentre as propriedades mais importantes de um GCL, está a sua resistência ao cisalhamento interno, tendo em vista que o seu principal componente, a bentonita, possui baixa resistência quando hidratada. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia de ensaio-índice para estimativa da resistência ao cisalhamento em GCLs- o método CTM (cisalhamento por tração modificado). A principal inovação do método proposto é o formato "U" da garra para fixação dos corpos-de-prova. Foram executadas duas séries de ensaios, nas quais, realizou-se uma seleção criteriosa das amostras e um plano de preparação dos corpos-de-prova, de forma a evitar que a variabilidade inerente à fabricação dos GCLs, influenciasse nos resultados obtidos. A primeira fase de testes foi realizada com o objetivo de se correlacionar os resultados do método CTM com dois outros métodos de ensaios-índice existentes: ensaio de adesão (*peeling-test*) e ensaio de cisalhamento por tração (*shear-tensile test*). Os resultados obtidos apresentaram boa correlação e o método CTM se mostrou bastante prático. A segunda série de ensaios foi realizada visando aprimorar a montagem do ensaio CTM e comparar os seus resultados com ensaios de cisalhamento direto. Novamente as metodologias se correlacionaram bem, o que justifica o desenvolvimento do método CTM.

Palavras-chave: GCL. Resistência ao cisalhamento. Ensaios-índice

ABSTRACT

PIMENTEL, V. E. (2008). GCL shear strength evaluation- A new test method. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GCLs (Geosynthetic Clay Liners) are geosynthetic products used to compose flux control barriers in geotechnical and environmental works. The mechanical properties of GCLs have to be investigated in short and long term. Among its mechanical parameters, GCL internal shear strength plays an important role in the stability of slopes of geotechnical works. The main component of a GCL, the bentonite, when hydrated, presents very low shear strength. This work presents the development of a new index test method that aims cheaply and quickly to estimate the shear strength of GCLs- the CTM method (modified shear-tensile test). The main innovation of the proposed method is the U-shape grip that imposes a state of deformation close to that observed in field works. Two series of tests were performed in which a careful selection of samples and specimens were done. This aimed to minimize variation effects, inherent to the GCL production, on the obtained results. The first series was carried out to correlate results from the CTM tests to other two index tests: peel test and shear-tensile test. The results showed a good correlation between CTM and the other test results. The second series of tests was planned to improve CTM test method in order to get even better results than peel or shear-tensile tests, apart from correlating its results to results of direct shear test. Comparisons of results show very good agreement what justifies the use of the cheaper and quicker CTM method.

Keywords: GCL. Shear strength. Index tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Entrelaçamento das fibras do GT NT no núcleo de bentonita, (b) Configuração de um GCL AG T/NT acabado (GCL FortLiner®) *33*

Figura 2.2 - GCL AG com laminação de geomembrana (GCL Bentomat® CLT) *33*

Figura 2.3 - Seção esquemática do GCL CT (GCL Huesker Synthetic GmbH) *34*

Figura 2.4 – (a) GCL não-reforçado compostos por dois geotêxteis nãotecidos (GCL ref. Claymax® 200R), (b) GCL não-reforçado com laminação de geomembrana PEAD (GCL ref. Gundseal® smooth HDPE). *35*

Figura 2.5 - Exemplo de aplicação de GCLs em barreira impermeabilizante de fundo de aterros de resíduos (HEERTEN, 2002). *36*

Figura 2.6 – Exemplo de aplicação de GCLs em cobertura final de aterros de resíduos (HEERTEN, 2002). *36*

Figura 2.7 - Aplicação de GCLs em sistema de impermeabilização de fundo de lagoas e canais (HEERTEN, 2002) *37*

Figura 2.8– Aplicação de GCLs em rodovias (HEERTEN, 2002) *38*

Figura 2.9 – (a) Ancoragem do GCL e (b) Instalação contínua ao longo do talude (PIMENTEL ; PALMA, 2006) *41*

Figura 2.10 – Camada de solo de confinamento sobre o GCL (PIMENTEL ; PALMA, 2006) *42*

Figura 2.11 - Geomembrana instalada sobre GCL (faixa branca) no mesmo dia (PIMENTEL e PALMA, 2006) *42*

Figura 2.12– Tipos de emendas para os diferentes tipos de GCLs (BUENO, VILAR e BENVENUTO, 2004) *43*

Figura 2.13 Execução de emenda entre GCLs AG (PIMENTEL e PALMA, 2006) *44*

Figura 2.14 - Barreira dupla com geomembranas (KOERNER, 1994). *45*

Figura 2.15 – Barreira simples com geomembrana (primária) e barreira compósita com geomembrana e CCL (KOERNER,1994) *46*

Figura 2.16 – Barreira dupla com georrede em substituição ao material granular (KOERNER, 1994). *46*

Figura 2.17– Barreira dupla compósita com CCL como elemento impermeabilizante na camada composta primária (KOERNER, 1994). *47*

Figura 2.18– Barreira dupla com GCL em substituição ao CCL (KOERNER, 1994). *48*

Figura 2.19– Barreira dupla compósita- várias camadas de geossintéticos (KOERNER, 1994). *48*

Figura 2.20– Curva tensão-deslocamento típica de um GCL hidratado (FOX e STARK, 2004) *52*

Figura 2.21 – Envoltórias de resistência de pico e residual de um GCL hidratado sob tensão de confinamento de ensaio, $\sigma_{n,h}$= $\sigma_{n,c}$ (EID e STARK, 1996). 61

Figura 2.22 – Resistências de pico e residual de um GCL hidratado sob baixa tensão de confinamento ($\sigma_{n,h}$= 17 kPa) e adensado sob tensões de ensaio (EID e STARK, 1996). Envoltórias de resistência da Figura 2.21 são apresentadas para comparação. 61

Figura 2.23– Variação da resistência de pico normalizada ($\tau_p/\sigma_{n,c}$) com a razão de deslocamento, para dois níveis de tensão vertical de ensaio, $\sigma_{n,c}$ = 17 kPa e 170 kPa. Ensaios realizados com GCLs não-reforçados hidratados (GILBERT et al., 1997). 63

Figura 2.24– Efeito da taxa de deslocamento na medida da resistência de pico de GCLs AG T/NT. (a) Curvas tensão-deslocamento para ensaios realizados sob baixa tensão de confinamento $\sigma_{n,c}$= 50 kPa. (b) Curvas tensão-deslocamento para ensaios com elevada tensão de confinamento $\sigma_{n,c}$= 520 kPa. (c) Tendência de comportamento de τ_p em função da taxa de deslocamento (ZORNBERG et al., 2005). 65

Figura 2.25– Curvas tensão-deslocamento resultantes de ensaios com GCLs não-reforçados hidratados e secos (FOX ; STARK, 2004). 69

Figura 2.26– Curvas tensão-deslocamento de ensaios com GCLs reforçados (FOX e STARK, 2004) 70

Figura 2.27– Curvas tensão-deslocamento resultantes de ensaios em quatro tipos de interface com GCLs AG (FOX ; STARK, 2004). 71

Figura 2.28– (a) Curvas tensão-deslocamento de ensaios com o mesmo GCL em quatro níveis de sobrecarga (b) envoltórias de resistência na condição de pico e residual (FOX et al, 1998). 73

Figura 2.29– Envoltórias típicas de cisalhamento interno de GCLs e de interfaces com GCLs (FOX ; STARK, 2004) 74

Figura 2.30– Envoltórias de resistência de pico e residual bilineares de um ensaio tipo ring-shear test feito em GCL encapsulado (EID e STARK, 1997). 74

Figura 2.31– Envoltórias de resistência de pico e residual de GCLs reforçados e não-reforçados (FOX et al. 1998). 76

Figura 2.32– Configuração inicial do ensaio de adesão em GCLs (ASTM D 6496) 78

Figura 2.33– Mecanismo básico do ensaio CT. 81

Figura 2.34– Decréscimo da resistência de adesão sob condição de expansão livre (MAUBEUGE e LUCAS, 2002) 84

Figura 2.35– Diagrama proposto para projeto sobre taludes (HEERTEN, 1995).....85

Figura 2.36– Envoltórias de resistência de pico de vários GCLs AG, com diferentes resistências de adesão, ensaiados sob mesmas condições. (MAUBEUGE; LUCAS, 2002).....86

Figura 2.37- Correlação de valores de resistência de adesão, F_p, e τ_p em GCLs AG (ZORNBERG et al.,2005)..87

Figura 2.38– Comparação de resultados de ensaios P e CT em GCLs AG. . (MAUBEUGE; EHRENBERG, 1999).....88

Figura 3.1– Mecanismo básico do ensaio de adesão- P.....94

Figura 3.2– CP fixo às garras – Ensaio P.....95

Figura 3.3– CP (CT 3) preparado para ensaio CT.....98

Figura 3.4– CP (CT 3) fixado à garra na prensa universal.....98

Figura 3.5– Mecanismo básico do ensaio CTM.....100

Figura 3.6– Representação gráfica da garra "U" desenvolvida para o ensaio CTM- (a) vista lateral, (b) perspectiva.....102

Figura 3.7– (a) posicionamento do GT NT na garra "U" e (b) CP posicionado e garras unidas para serem levadas à prensa.....103

Figura 3.8– Montagem ensaio CTM.....104

Figura 3.9– Disposição e identificação dos CPs, classificação das amostras e ensaios realizados.....107

Figura 4.1– Curvas F_{CTMmax} vs. Largura CP: (a) AT 3.6; (b) PT 3.6; (c) AT 5.0; (d) PT 5.0......111

Figura 4.2 – Aspecto dos CPs após execução do ensaio CTM: (a) CTM2; (b) CTM4.....112

Figura 4.3– Curvas força-deslocamento – ensaio CTM: (a) AT 5.0; (b) PT 5.0.....113

Figura 4.4– Representação gráfica dos processos simultâneos A e B- ensaio CTM: (a) curva força versus deslocamento CP CTM 4 PT 5.0; (b) Instante intermediário do ensaio CTM; (c) Ensaio CT- curvas força versus deslocamento típicas.....115

Figura 4.5– Análise da influência da largura do CP na determinação de F_{CTmax}.....116

Figura 4.6– Estricção dos CPs obtidos de amostras PT: (a) CP CT2- estricção no geotêxtil nãotecido; (b) CP CT2- formação de estrias no geotêxtil tecido; (c) comparação entre CP rompido e intacto.....117

Figura 4.7– Curvas tensão-deformação típicas – Ensaio P.....118

Figura 4.8– Ensaio P durante sua execução.....119

Figura 4.9– Correlação de resultados entre os diferentes tipos de ensaio: (a) PxCT; (b) PxCTM; (c) CTxCTM.....120

Figura 5.1– Preparação do CP para realização do ensaio CTM B.....126

Figura 5.2- CP empregado no ensaio de cisalhamento direto.....127

Figura 5.3- Face inferior do suporte de madeira: detalhe dos canalículos transversais e dos orifícios verticais destinados a facilitar a hidratação do GCL no sentido ascendente.....128

Figura 5.4- Face superior do suporte de madeira: detalhe da área periférica sobre a qual o CP é colado......128

Figura 5.5- Marcação da área retangular livre de colagem sobre o GT T......129

Figura 5.6- Colagem da amostra de GCL sobre o suporte de madeira com especial atenção para a superposição das áreas quadrangulares.....130

Figura 5.7- (a) Procedimento de eliminação das bordas do GT NT; (b) detalhe das bordas remanescentes do GT T que seriam posteriormente coladas ao suporte de madeira.....131

Figura 5.8- (a) Marcação da área de cisalhamento sobre o GT NT; (b) Colagem da placa de madeira sobre a área cisalhada.....132

Figura 5.9- Colagem das bordas remanescentes do GT T ao redor das extremidades do suporte de madeira...132

Figura 5.10. Aspecto final da amostra a ser cisalhada com detalhe da placa de madeira colada sobre o GT NT. 133

Figura 5.11. Anel de cisalhamento envolvendo o CP a ser hidratado......133

Figura 5.12- Conjunto anel-amostra assentado no interior do reservatório metálico.....134

Figura 5.13- (a) Almofada de carregamento assentada sobre o CP a ser hidratado ; (b) Haste metálica assentada sobre almofada de carregamento; (c) Braço de alavanca e discos metálicos de carregamento posicionados.....135

Figura 5.14- Relógio comparador assentado sobre almofada de carregamento......135

Figura 5.15- Inundação dos CPs e início das medidas de expansão por meio dos relógios comparadores......136

Figura 5.16- Curva de expansão do GCL durante a fase de hidratação sob confinamento ($\sigma_{n,h}$- 50kPa).....137

Figura 5.17 – Detalhe da caixa de cisalhamento.....137

Figura 5.18 – Equipamento de cisalhamento.....139

Figura 5.19 – Aspecto de um CP logo após a ruptura.....140

Figura 5.20- Curvas τ versus Δ obtidas de ensaios de cisalhamento direto com $\sigma_{n,c}$= 50 kPa.....142

Figura 5.21– Disposição e identificação dos CPs, classificação das amostras e ensaios realizados..... 143

Figura 6.1 – Curvas força-deslocamento ensaios CTM – amostras tipo A; (a) CTM A, (b) CTM B..... 145

Figura 6.2 – (a) representação gráfica do instante inicial do ensaio CTM A (c) Processo de extração no ensaio CTM A..... 147

Figura 6.3 – (a) representação gráfica do processo de alongamento do CP no método CTM B; (b) alongamento do CP- CTM B..... 148

Figura 6.4 –Envoltórias de ruptura- Tipo A (a) ajuste linear; (b) ajuste polinomial..... 150

Figura 6.5 –Envoltórias de ruptura- Tipo B (a) ajuste linear; (b) ajuste polinomial..... 151

Figura 6.6 –Comparação das curvas tensão x deslocamento- cisalhamento direto / CTM..... 153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Algumas diferenças entre GCLs e CCLs. 28

Tabela 2.1 – Funções desempenhadas por cada material que compõe um GCL..... 32

Tabela 2.2 – Critérios de aceitação de GCLs em obra – Ensaios recomendados (ASTM D 6495) 40

Tabela 2.3– Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de ensaios de cisalhamento e ensaios-índice em GCLs..... 50

Tabela 2.4– Comparação de resultados do ensaio CT e de cisalhamento direto com tensão vertical nula para GCLs semelhantes (EICHENAUER ; REITHER, 2002). 89

Tabela 3.1– Propriedades dos GCLs ensaiados –Fase I..... 92

Tabela 3.2– Dimensões dos CPs- ensaio CT..... 97

Tabela 3.3– Dimensões dos CPs- ensaio CTM- Fase I..... 102

Tabela 4.1– Resultados da série de ensaios realizados- Fase I..... 109

Tabela 4.2– Comparação qualitativa entre ensaios P, CT e CTM. 121

Tabela 5.1– Propriedades dos GCLs ensaiados na Fase II..... 125

Tabela 6.1- Resultados dos ensaios CTM A e CTM B – Fase II 145

Tabela 6.2- Resultados dos ensaios de cisalhamento direto – Fase II..... 149

Tabela 6.3- Comparação de resultados dos métodos CTM A e cisalhamento direto – Fase II..... 152

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 26

1.1 OBJETIVOS 29

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 31

2.1 GENERALIDADES 31

2.1.1 TIPOS DE GCLS 32

2.1.1.1 GCLs reforçados 32

2.1.1.2 GCLs não-reforçados 34

2.1.2 APLICAÇÕES DOS GCLS 35

2.1.2.1 Barreiras impermeabilizantes de fundo e cobertura final de aterros de resíduos. 36

2.1.2.2 Revestimentos anti-erosivos de lagoas e canais 37

2.1.2.3 Taludes de montante e fundo de reservatório de barragens 37

2.1.2.4 Rodovias e ferrovias na proximidade de cursos d'água e regiões de recarga de aqüíferos.... 38

2.1.3 RECEBIMENTO, ARMAZENAMENTO E INSTALAÇÃO DOS GCLS EM OBRAS 39

2.1.3.1 Recebimento em obra 39

2.1.3.2 Armazenamento 39

2.1.3.3 Preparação do terreno 40

2.1.3.4 Cuidados na instalação 41

2.1.3.5 Reparos no GCL 44

2.1.4 CLASSIFICAÇÃO DAS BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES 44

2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE GCLs 49

2.2.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO INTERNO E DE INTERFACE DE GCL PELO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO - ASTM D 6243 -98..... 51

2.2.1.1 Considerações gerais..... 51

2.2.1.2 Equipamento 54

2.2.1.3 Amostragem..... 56

2.2.1.4 Hidratação do CP..... 57

2.2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM GCLS.... 57

2.2.2.1 Tipo de GCL 58

2.2.2.2 Procedimento de Hidratação..... 58

2.2.2.3 Procedimento de Adensamento..... 60

2.2.2.4 Taxa de deslocamento..... 62

2.2.2.5 Metodologia de fixação do CP..... 66

2.2.3 COMPORTAMENTO TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO..... 67

2.2.3.1 GCLs não-reforçados..... 68

2.2.3.2 GCLs reforçados 69

2.2.3.3 Interfaces com GCLs reforçados..... 71

2.2.4 ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA 72

2.2.5 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO 75

2.2.5.1 GCLs não-reforçados..... 75

2.2.5.2 GCLs reforçados 75

2.3 ENSAIOS-ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM GCLs 77

2.3.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA DE ADESÃO ENTRE AS CAMADAS SUPERIORES E INFERIORES DE GCLS AGULHADOS (PEEL TEST) - ASTM D 6496 -99. 77

2.3.1.1 Considerações gerais 77

2.3.1.2 Equipamento 78

2.3.1.3 Amostragem 79

2.3.1.4 Determinação da resistência de adesão 79

2.3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO POR TRAÇÃO-ENSAIO CT (SHEAR-PEEL TEST / SHEAR-TENSILE TEST) 80

2.3.2.1 Considerações gerais 80

2.3.3 COMPARAÇÃO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO E ENSAIOS-ÍNDICE EM GCLS AG. 82

2.3.3.1 Comparação de ensaios de adesão (P) a ensaios de cisalhamento direto 82

2.3.3.2 Comparação de ensaios de adesão (P) a ensaios de cisalhamento por tração (CT) 87

2.3.3.3 Comparação de ensaios CT a ensaios de cisalhamento direto 88

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS – FASE I 90

3.1 COMPARAÇÃO ENSAIO CTM X ENSAIOS-ÍNDICE 91

3.1.1 PROPRIEDADES DOS GCLS ENSAIADOS 91

3.1.2 METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM 91

3.1.2.1 Preparação e acondicionamento das amostras 93

3.1.3 RESISTÊNCIA DE ADESÃO- P (PEEL TEST) 93

3.1.3.1 Equipamentos 94

3.1.3.2 Preparação dos corpos-de-prova 94

3.1.3.3 Medida da resistência de adesão 96

3.1.3.4 Determinação da resistência média de adesão 96

3.1.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO- CT (SHEAR-TENSILE TEST) 96

3.1.4.1 Equipamentos 97

3.1.4.2 Preparação dos corpos-de-prova 97

3.1.4.3 Medida da resistência de cisalhamento por tração 99

3.1.4.4 Determinação da resistência máxima de cisalhamento por tração 99

3.1.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO MODIFICADO (CTM)..... 99

3.1.5.1 Conceito Ensaio CTM..... 100

3.1.5.2 Equipamentos..... 101

3.1.5.3 Preparação dos corpos-de-prova 102

3.1.5.4 Medida da resistência ao cisalhamento no ensaio CTM 104

3.1.5.5 Determinação da resistência máxima de cisalhamento por tração 105

3.1.6 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS 105

3.1.6.1 Seleção dos corpos-de-prova 106

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS- FASE I 108

4.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO CONFINADO – CTM 110

4.1.1 CURVA FORÇA VERSUS DESLOCAMENTO – ENSAIO CTM..... 113

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO – CT 116

4.2.1 CURVA FORÇA VERSUS DESLOCAMENTO – ENSAIO CT..... 117

4.3 ENSAIO DE ADESÃO – P 118

4.3.1 CURVA FORÇA VERSUS DESLOCAMENTO – ENSAIO P..... 118

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS 119

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS- FASE I 122

CAPÍTULO 5 – MATERIAIS E MÉTODOS - FASE II 124

5.1 PROPRIEDADES DOS GCLS ENSAIADOS 124

5.2 PREPARAÇÃO E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS 125

5.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO MODIFICADO (CTM) 126

5.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO..... 127

5.4.1 PREPARAÇÃO DOS CPS 127

5.4.2 HIDRATAÇÃO DA AMOSTRA SOB CARREGAMENTO 133

5.4.3 FASE DE CISALHAMENTO 137

5.4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO MÁXIMA, τ_p, E OBTENÇÃO DA ENVOLTÓRIA DE RUPTURA.....140

5.5 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS – FASE II 142

5.5.1 SELEÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA 142

CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS- FASE II 144

6.1 ENSAIO DE CISALHAMENTO POR TRAÇÃO CONFINADO – CTM A E CTM B.....144

6.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....149

6.3 COMPARAÇÃO MÉTODO CTM A X CISALHAMENTO DIRETO.....152

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES 154

Capítulo 1 – Introdução

A crescente necessidade de busca de soluções inovadoras para resolver os problemas da engenharia geotécnica, faz dos geossintéticos um dos materiais mais investigados e efetivamente utilizados em obras de engenharia atualmente. Dentre os geossintéticos, cujo números de aplicações e volumes instalados mais crescem, estão os geocompostos bentoníticos ou *geosynthetic clay liners* (GCLs). Os GCLs, substituem ou complementam camadas de argila compactada (CCLs) para fins de controle de fluxo. A função primordial de um GCL é atuar como uma barreira impermeabilizante, dada propriedade da bentonita ser expansiva ao entrar em contato com o percolado. O processo de expansão, no momento em que o GCL se encontra confinado, gera uma diminuição do índice de vazios de seu núcleo, garantindo índices baixíssimos de permeabilidade (K ~10^{-11} m/s). A bentonita, por ser um material natural muito expansivo, confere ao GCL, a capacidade de auto-selagem, propriedade extremamente benéfica em suas aplicações.

Camadas de argila compactada são a solução mais comumente utilizada na impermeabilização de grandes áreas, nos casos onde argila de boa qualidade é encontrada em jazidas próximas à obra e sem restrição de exploração. A limitação na utilização dessa solução reside no fato de ser relativamente complexa sua execução, principalmente sobre superfícies

inclinadas, como na lateral de células de aterros de resíduos sólidos ou de lagoas. Com base nesse fato e diante da implacável atuação de órgãos ambientais, restringindo a exploração de materiais naturais e a ocupação de áreas de proteção ambiental, os *liners* de argila compactada tendem a se tornar uma técnica cada vez menos praticada em obras ambientais. Assim, os GCLs vêm ganhando destaque e se tornando materiais com extremo potencial de crescimento e aceitação no meio técnico. **A utilização dos GCLs minimiza a probabilidade de ocorrerem falhas quando se deseja construir camadas impermeabilizantes, permanentemente, eficazes.** Diante dessa ótica, o conhecimento das propriedades técnicas dos GCLs tornou-se uma tarefa obrigatória e desafiadora para os engenheiros geotécnicos. Para a plena aceitação e incorporação de tais materiais no âmbito das soluções ambientais especificadas mundialmente, é importante conhecer as suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas com profundidade, por meio de ensaios de laboratório e de campo.

Desde o surgimento dos GCLs, que ocorreu no início da década de 1980, inúmeras investigações foram desenvolvidas nesse sentido podendo-se afirmar que seus resultados corroboram com a idéia inicial de que esses materiais realmente poderiam ser considerados, por suas propriedades físicas e hidráulicas, uma evolução. GIROUD[1] (Citação verbal) considera que uma solução pode ser considerada uma evolução quando esta apresenta menores problemas do que a solução tradicional. Tal afirmação parece ser verdade quando se compara os GCLs às camadas de argila compactadas ou *compacted clay liners* (CCLs). Em estudo realizado por Koerner e Daniel (1994), uma comparação analítica entre os GCLs e os CCLs é apresentada sendo suas principais diferenças resumidas na Tabela 1.1 .

[1] Sardinia 2005- Mercer Lecture

Tabela 1.1 – Algumas diferenças entre GCLs e CCLs.

Característica	GCL	CCL
Materiais	Bentonita, adesivos, geotêxteis e geomembranas	Solos nativos ou mistura entre solo nativo e bentonita
Espessura	Normalmente entre 7 e 10 mm (quando hidratado)	Entre 300 e 900 mm
Condutividade hidráulica	(1 a 5) x 10-9 cm/s	1 x 10-7 cm/s
Velocidade de construção	Rápida, instalação simples	Lenta, construção complexa
Necessidade de controle de qualidade de fabricação (CQF) e de garantia de qualidade de fabricação (GQF)	Industrialização necessita de monitoramento constante	Materiais naturalmente encontrados ou camadas minerais que não requerem monitoramento
Controle de qualidade de instalação (CQI) e garantia de qualidade de instalação (GQI)	Relativamente simples, direto, obtido de procedimentos corriqueiros	Procedimentos complexos que requerem pessoas especializadas e hábeis
Sensibilidade de ressecamento no campo	GCLs não ressecam durante a construção a não ser que tenham sido previamente hidratados	CCLs são quase saturados; podem ressecar durante a construção
Disponibilidade de materiais	Materiais prontamente enviados para qualquer local	Varia imensamente desde prontamente disponível até indisponível
Custo instalado	Tipicamente US$ 6,00 a US$ 8,00 por metro quadrado para uma grande área (EUA)	Altamente variável – faixa estimada: US$ 6,00 a US$ 30,00 por metro quadrado
Experiência	Limitada devido ao tempo de existência e não-familiaridade	Vem sendo usado por muitas décadas com grande confiabilidade como material impermeabilizante.

Fonte: KOERNER; DANIEL, 1994

Dentre as propriedades dos GCLs constantemente investigadas, a resistência ao cisalhamento interno, possui relevante destaque tendo em vista a sua importância nas análises de estabilidade das camadas impermeabilizantes com a utilização de geossintéticos. Ao se hidratar, a bentonita tem os seus parâmetros geomecânicos sensivelmente alterados e a resistência interna ao cisalhamento do GCL passa a ser uma propriedade de interesse.

Por se tratar de um material industrializado, o GCL deve ser concebido na linha de produção com propriedades adequadas ao uso e, mais importante, o processo industrial deve

garantir extrema repetibilidade ao longo da fabricação dos GCLs. Uma das ferramentas que atestam a consistência do processo industrial e, conseqüentemente, o cumprimento das especificações técnicas de um material industrializado, é o ensaio-índice. Os ensaios-índice são procedimentos criados com o objetivo de fornecer uma indicação da magnitude de uma determinada propriedade do material fabricado. São ensaios simples e de velocidade equivalente à de produção do material, uma vez que seus resultados são critérios de aprovação dos lotes produzidos.

Os ensaios-índice normalmente utilizados na fabricação de GCLs agulhados, para avaliar o nível de adesão entre as camadas de geotêxtil são: ensaio de adesão (*peel test*) e o ensaio de cisalhamento por tração (*shear-peel test*). Alguns autores vêm buscando a correlação entre resultados desses métodos com os ensaios de cisalhamento direto. O método de cisalhamento direto é o mais preciso na determinação dos parâmetros de resistência de cisalhamento interno e de interface com GCLs, no entanto, a sua execução é relativamente custosa e complexa. Encontrar uma correlação entre os métodos citados, representaria um grande avanço na estimativa de parâmetros de resistência de projeto de *liners* em obras ambientais.

1.1 Objetivos

O presente trabalho propõe a criação de um ensaio-índice, alternativo aos já existentes, que possua um mecanismo de ruptura análogo ao ensaio de cisalhamento direto. Tal método, inclusive, possibilitará a aplicação de tensão normal à amostra, em fase futura de desenvolvimento. O método proposto é denominado **ensaio de cisalhamento por tração**

modificado-CTM e será realizado na máquina de tração universal. Seus resultados serão comparados com os ensaios-índice existentes e com ensaios de cisalhamento direto.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta algumas generalidades sobre os GCLs tais como; tipos existentes, funções, aplicações, metodologias de instalação, configurações de barreiras impermeabilizantes. Posteriormente são discutidos, especificamente, aspectos relacionados ao cisalhamento interno em GCLs, procedimentos de ensaio, resultados publicados e correlações já realizadas.

2.1 Generalidades

A Norma americana ASTM D4439 define o GCL como barreira hidráulica manufaturada, normalmente composta por argila bentonítica ou outro material de muito baixa permeabilidade, suportado por geotêxteis e/ou geomembranas, que são unidos por agulhagem, costura ou adesivagem química.

A Tabela 2.1 apresenta as principais funções desempenhadas pelos materiais que compõem um GCL.

Tabela 2.1 – Funções desempenhadas por cada material que compõe um GCL

Material	**Funções**
Geotêxtil nãotecido	Reforço e proteção mecânica
Geotêxtil tecido	Reforço
Geomembrana	Impermeabilização
Bentonita	Impermeabilização
Adesivos	Aderência entre bentonita e geomembrana

2.1.1 Tipos de GCLs

São várias as configurações de GCLs existentes no mercado mundial, sendo cada qual mais indicado para situações específicas. Pode-se dividir os GCLs em duas famílias; os GCLs reforçados e os não-reforçados.

2.1.1.1 GCLs reforçados

Os GCLs reforçados são aqueles que possuem em sua estrutura, elementos que contribuem para o aumento da resistência ao cisalhamento da camada de bentonita, sendo mais apropriados para a instalação nos taludes ou nas situações em que, em algum momento, serão solicitados por tensões cisalhantes significativas. Os GCLs reforçados mais comumente encontrados no mercado são os agulhados (GCLs AG) e os costurados (GCLs CT).

Os GCLs AG são concebidos pela associação de dois geotêxteis, sendo sempre um deles nãotecido (GT NT) e outro, que pode ser nãotecido (GCL AG NT/NT) ou tecido (GCL AG T/NT), a depender do fabricante ou da aplicação. A Figura 2.1a apresenta o processo de entrelaçamento das fibras do GT NT ao núcleo de bentonita, durante o

procedimento de agulhagem do GCL AG. A Figura 2.1b mostra a configuração de um GCL AG T/ NT acabado.

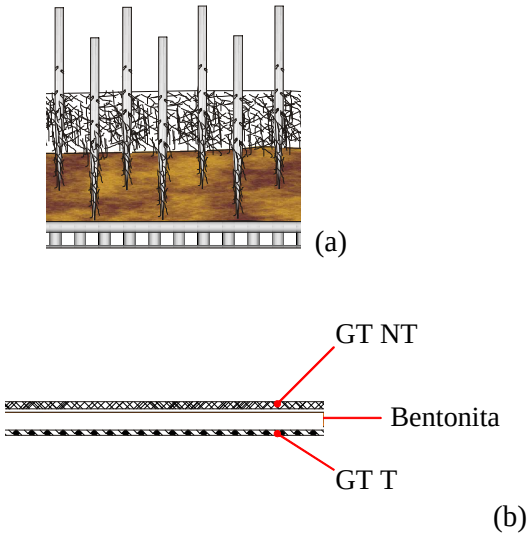


Figura 2.1 – (a) Entrelaçamento das fibras do GT NT no núcleo de bentonita, (b) Configuração de um GCL AG T/NT acabado (GCL FortLiner®)

Existem também GCLs AG que recebem uma laminação de geomembrana (GM) de PEAD lisa ou texturizada, conferindo menor condutividade hidráulica ao produto final (Figura 2.2).

Figura 2.2 - GCL AG com laminação de geomembrana (GCL Bentomat® CLT)

Os GCLs CT são obtidos da união dos geotêxteis através de costura. Normalmente, tais produtos são formados por dois GT T. A Figura 2.3 apresenta um corte

esquemático de um GCL CT. As costuras são sempre executadas no sentido longitudinal de fabricação e possuem espaçamento de, aproximadamente, 10cm.

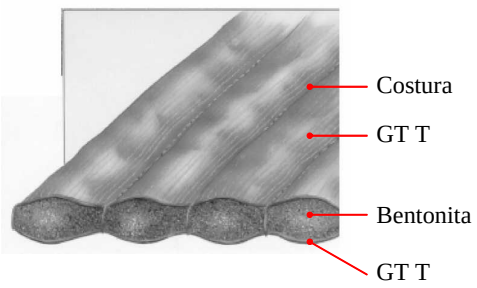
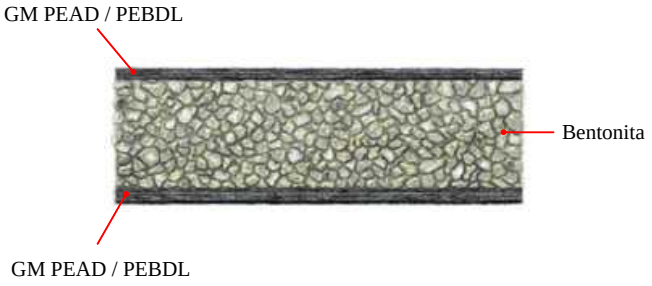


Figura 2.3 - Seção esquemática do GCL CT (GCL Huesker Synthetic GmbH)

2.1.1.2 GCLs não-reforçados

Os GCL não-reforçados não dispõem de elementos que aumentam diretamente a resistência ao cisalhamento da bentonita, portanto, em geral, são mais indicados para as aplicações que não submeterão o material a tensões cisalhantes significativas. Sua resistência ao cisalhamento é governada pela resistência da bentonita no teor de umidade em que ela se encontra. Dentre os GCLs não-reforçados destacam-se os que são compostos por dois GT NT (Figura 2.4a) e aqueles que levam laminação de geomembrana, sendo a camada de bentonita adesivada à esta (Figura 2.4b). Nesse caso, as geomembranas geralmente são em PEAD ou PEBDL e podem ainda ser lisas ou texturizadas.



(a)

(b)

Figura 2.4 – (a) GCL não-reforçado compostos por dois geotêxteis nãotecidos (GCL ref. Claymax® 200R), (b) GCL não-reforçado com laminação de geomembrana PEAD (GCL ref. Gundseal® smooth HDPE).

Outras configurações possíveis são os GCLs encapsulados, obtidos pela colocação de uma segunda geomembrana diretamente em contato com a camada de bentonita nos GCLs não-reforçados suportados por geomembranas. Dessa forma, a bentonita estará parcialmente protegida de hidratação e apresentará resistência ao cisalhamento média superior à resistência em seu estado hidratado (FOX ; STARK, 2004).

A indústria dos geossintéticos vem constantemente aprimorando as configurações dos GCLs visando agregar cada vez mais valor ao produto final.

O comportamento dos diferentes tipos de GCLs quando submetidos a ensaios-índice e de cisalhamento direto, será avaliado e discutido nos itens subseqüentes.

2.1.2 Aplicações dos GCLs

Os GCLs são materiais concebidos para desempenhar a função de controlar o fluxo de água e/ou de contaminante em diversas situações. Para tal, devem ser sempre bem dimensionados e instalados para garantir a integridade do elemento impermeabilizante, a

bentonita. Considerando que são materiais cada vez mais versáteis, e que possuem elevado valor agregado, apresentam um número crescente de aplicações.

2.1.2.1 Barreiras impermeabilizantes de fundo e cobertura final de aterros de resíduos.

Em ambas as situações o GCL geralmente é aplicado em conjunto com uma ou duas geomembranas formando-se barreiras compósitas simples ou duplas. A Figura 2.5 e Figura 2.6 ilustram as aplicações dos GCLs na base e cobertura de aterros de resíduos, respectivamente.

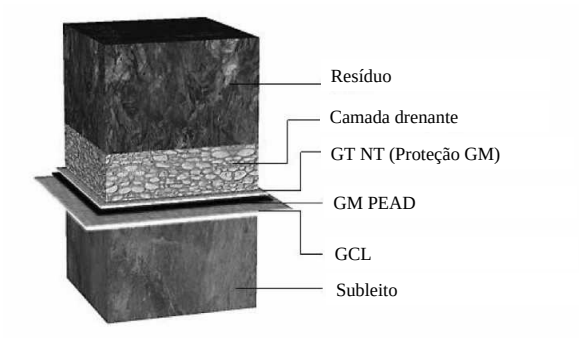


Figura 2.5 - Exemplo de aplicação de GCLs em barreira impermeabilizante de fundo de aterros de resíduos (HEERTEN, 2002).

Figura 2.6 – Exemplo de aplicação de GCLs em cobertura final de aterros de resíduos (HEERTEN, 2002).

É importante observar que no caso em que diversos geossintéticos são instalados diretamente em contato, algumas interfaces são formadas. Tais interfaces podem eventualmente representar superfícies potenciais de ruptura, se apresentarem baixa resistência ao cisalhamento. Para se avaliar essa resistência, ensaios de cisalhamento direto multicamadas podem ser efetuados.

2.1.2.2 Revestimentos anti-erosivos de lagoas e canais.

Nessa aplicação deve-se prever que o GCL trabalhará completamente saturado sendo, portanto, necessário considerar o efeito de diminuição da resistência ao cisalhamento da bentonita. A Figura 2.7 ilustra a aplicação.

Figura 2.7 - Aplicação de GCLs em sistema de impermeabilização de fundo de lagoas e canais (HEERTEN, 2002).

2.1.2.3 Taludes de montante e fundo de reservatório de barragens

Nos casos onde são mantidas elevadas cargas hidráulicas estáticas, como nas barragens, lagoas e canais, o GCL é geralmente utilizado em camada única ou em conjunto com uma camada mineral existente, desempenhando a função de reduzir a percolação de água (HEERTEN, 2002). Dessa maneira, pode-se controlar a perda d'água nas lagoas e canais além

de minimizar a infiltração através do talude de montante de barragens, melhorando suas condições de estabilidade.

2.1.2.4 Rodovias e ferrovias na proximidade de cursos d'água e regiões de recarga de aqüíferos

Em vários países europeus, a densidade populacional restringe a disponibilidade de área para implantação de ruas, ferrovias e aeroportos resultando na ocupação de áreas ambientalmente sensíveis (HEERTEN, 1995). Em conseqüência disso, os GCLs podem ser aplicados com a finalidade de conter a infiltração de contaminantes que possam eventualmente atingir aqüíferos subterrâneos ou cursos d'água (Figura 2.8).

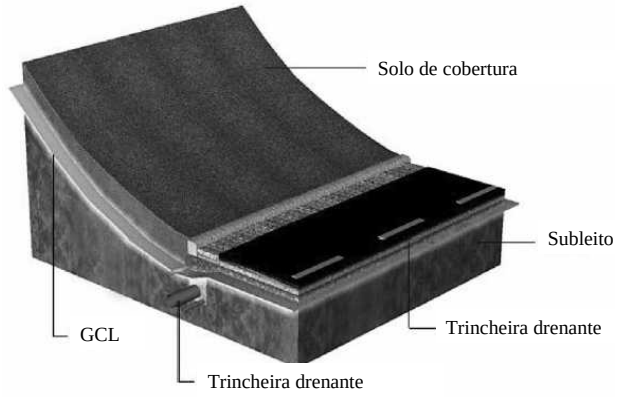


Figura 2.8– Aplicação de GCLs em rodovias (HEERTEN, 2002)

2.1.3 Recebimento, armazenamento e instalação dos GCLs em obras

O presente item apresenta aspectos relacionados aos procedimentos práticos recomendados desde o desembarque dem um GCL na obra até a sua efetiva instalação. O cumprimento dos procedimentos apresentados, minimiza o risco de ocorrerem danos ao material e uma eventual perda de resistência ao cisalhamento antes da aplicação. Vale ressaltar que tais procedimentos são passíveis de ajustes em funções de condições específicas de campo ou de projeto.

2.1.3.1 Recebimento em obra

A Norma ASTM D6495 apresenta critérios para aceitação de GCLs nas obras, enfatizando a necessidade de realização de alguns ensaios que atestam a conformidade do produto. A Tabela 2.2 apresenta os ensaios, suas respectivas normas e freqüência de testes requerida.

2.1.3.2 Armazenamento

Após recebimento na obra, as bobinas de GCL devem ser armazenadas até a sua efetiva aplicação. O material deve ser estocado em local seco, em pilhas de, no máximo, cinco bobinas para evitar o esmagamento das bobinas inferiores. Todo o processo de içamento das bobinas na obra deve ser feito com, no mínimo, duas cintas para evitar a flexão do produto na região central das bobinas.

Tabela 2.2 – Critérios de aceitação de GCLs em obra – Ensaios recomendados (ASTM D 6495)

Ensaio	Norma	Freqüência de ensaio
Massa de bentonita por unidade de área (seca)	D 5993	cada 10.000m²
Inchamento	D 5890	cada 10.000m²
Perda de massa	D 5891	cada 10.000m²
Resistência à Tração do tipo Grab ou Faixa Larga	D 4632	cada 25.000m²
Resistência à Tração de Geomembrana[1]	D 638 ou D 882	cada 25.000m²
Espessura de Geomembrana[1]	D 5199	cada 10.000m²
Densidade de Geomembrana[1]	D 792	cada 10.000m²
Adesão (bonding peel strength)	D 6496	cada 10.000m²
Permeabilidade[2]	D 5887	Cada 25.000m²

Fonte: ASTM D 6495

2.1.3.3 Preparação do terreno

O terreno sobre o qual se deseja executar a camada impermeabilizante deve ser devidamente regularizado. Sua capacidade de carga deve ser avaliada para que se possa prever o nível de deformações que, efetivamente, ocorrerá durante a obra. Antecedendo a instalação do GCL, deve-se certificar de que o subleito esteja livre de irregularidades, raízes e galhos. A compactação (apiloamento) prévia da superfície também é um procedimento recomendado.

Nos casos de subleitos compostos, predominantemente, por materiais de granulometria grossa como cascalho, por exemplo, recomenda-se um estudo específico para se definir qual o tipo mais apropriado de GCL a ser instalado. A diferença de granulometria entre os materiais do subleito e a bentonita, combinada com elevado gradiente que possa se formar, acarreta uma possível perda de bentonita, que pode comprometer o desempenho da barreira impermeabilizante.

---

[1] aplicável apenas para GCLs com laminação de geomembrana

[2] não se aplica a GCLs com laminação de geomembrana

2.1.3.4 Cuidados na instalação

O GCL deve ser manejado de forma cuidadosa para evitar danos que venha a comprometer sua aplicação. Na aplicação sobre taludes, após escavação da valeta de ancoragem de acordo com as recomendações de projeto, deve-se ancorar o GCL (Figura 2.9a) e iniciar a abertura do rolo ao longo da superfície a ser coberta. O material deve ser estendido de forma contínua desde o topo até o pé do talude (Figura 2.9b), sempre que possível, para evitar a necessidade de emendas transversais no centro do talude.

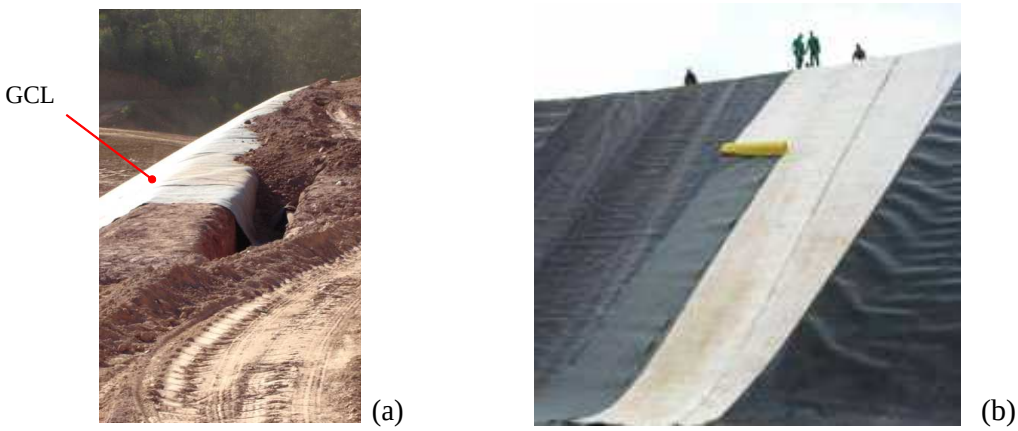


Figura 2.9 – (a) Ancoragem do GCL e (b) Instalação contínua ao longo do talude (PIMENTEL ; PALMA, 2006)

Na presença de vento com alta velocidade, deve-se fixar as pontas do GCL com sacos de areia ou material similar. Quando o GCL é composto por dois tipos de geotêxteis, deve-se consultar o projeto sobre qual o sentido correto da instalação. Conforme já citado em 2.1.2.1, certos materiais, diretamente em contato podem produzir interface com baixa resistência ao cisalhamento, podendo gerar uma superfície potencial de ruptura.

Não se deve proceder a aplicação do GCL em dias de chuva ou sobre áreas alagadas, exceto nas aplicações submersas, que são casos específicos. Em caso de hidratação

prévia do GCL, esse deve ser removido e substituído por material com umidade adequada. Em alguns casos, os projetos podem especificar uma camada de confinamento do GCL em solo local (Figura 2.10). Nessa situação, deve-se prever que, devido à umidade natural do solo, muito provavelmente, a hidratação da bentonita ocorrerá de forma generalizada rapidamente, ou seja, antes do contato com o percolado. Tal fato implica em queda acentuada de resistência ao cisalhamento da bentonita, o que deve ser objeto de análise criteriosa.

Figura 2.10 – Camada de solo de confinamento sobre o GCL (PIMENTEL ; PALMA, 2006)

A aplicação do GCL deve ser feita apenas em quantidade que possa ser coberta pela geomembrana ou solo de cobertura num mesmo dia (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Geomembrana instalada sobre GCL (faixa branca) no mesmo dia (PIMENTEL e PALMA, 2006)

Figura 2.12 apresenta alguns tipos de emendas possíveis entre mantas de GCL. É importante observar que o tipo de emenda é dependente do tipo de GCL instalado.

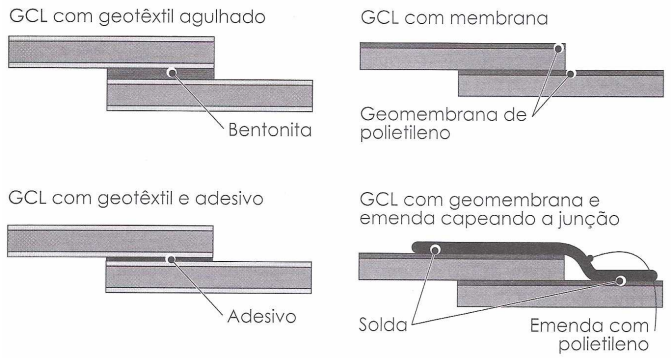


Figura 2.12– Tipos de emendas para os diferentes tipos de GCLs (BUENO, BENVENUTO e VILAR, 2004)

Na instalação dos GCLs AG, para garantir a impermeabilização das juntas de sobreposição, deve-se aplicar argila bentonítica, semelhante àquela que compõe o núcleo do GCL, entre as partes sobrepostas (Figura 2.13). Nesses casos, recomenda-se que a sobreposição seja de pelo menos 150 mm tanto no sentido transversal quanto no longitudinal. Tal dimensão pode ser alterada diante de exigências de projeto. Quando o GCL é instalado abaixo de uma geomembrana, interessa garantir que a sobreposição do GCL esteja deslocada de pelo menos 1,5m da sobreposição das geomembranas. De forma análoga, ao se dispor faixas paralelas do GCL, deve-se observar um deslocamento mínimo de 1,5m nas juntas horizontais entre faixas adjacentes.

Figura 2.13 Execução de emenda entre GCLs AG (PIMENTEL e PALMA, 2006)

2.1.3.5 Reparos no GCL

Ao notar qualquer tipo de imperfeição na superfície do GCL, deve ser feito o seu reparo antes da aplicação. Para tal, deve-se cobrir a área afetada com uma peça do mesmo material, de forma a exceder em 300 mm as extremidades do dano.

2.1.4 Classificação das Barreiras Impermeabilizantes

Para um melhor entendimento de como os GCLs se encontram posicionados nas barreiras impermeabilizantes, o presente capítulo é dedicado ao relato da evolução de suas configurações, descrevendo a função de cada geossintético que as compõe e enfatizando as suas classificações. As configurações de barreiras impermeabilizantes descritas se referem àquelas presentes na base de aterros de resíduos para controle de fluxo de chorume.

O histórico evolutivo das barreiras impermeabilizantes é, de certa forma, recente uma vez que apenas a partir do ano de 1982, com a promulgação de regulamentação feita pela EPA (Environmental Protection Agency) no EUA, os geossintéticos foram inseridos como

elementos que "previnem e não, minimizam, a migração de chorume, gerando melhores resultados ambientais no caso de aterros de disposição de resíduos perigosos" (Regulamentação EPA, 1982 apud KOERNER, 1994). A partir de então, muito interesse começa a ser despertado em torno dos geossintéticos para proteção ambiental e, assim, rápidas inovações começam a surgir. Logo em 1983, implementou-se o uso das barreiras duplas, concebidas pela interposição de uma camada drenante entre duas camadas impermeabilizantes. A Figura 2.14 apresenta uma barreira dupla constituída por duas geomembranas e um dreno testemunho construído com material granular e tubo dreno (KOERNER, 1994).

A realização de novos estudos, re-inseriu a camada de argila compactada (CCL) no perfil transversal das barreiras impermeabilizantes, sendo introduzido o conceito de barreiras compósitas (Figura 2.15). As barreiras compósitas são obtidas pela associação de dois elementos impermeabilizantes diretamente em contato. Gerald e Bonaparte (1989) confirmam o fato de que as barreiras compósitas reduzem significativamente a infiltração quando os elementos impermeabilizantes encontram-se em "contato íntimo".

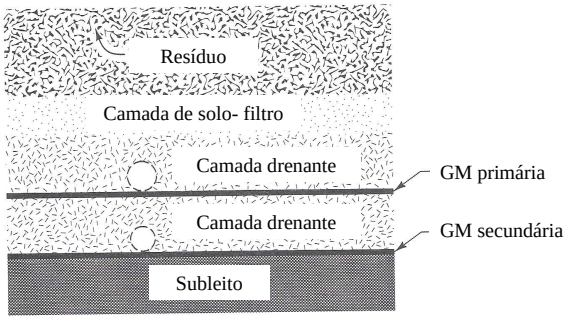


Figura 2.14 - Barreira dupla com geomembranas (KOERNER, 1994).

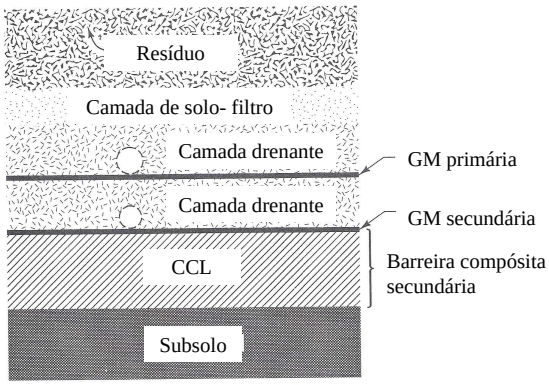


Figura 2.15 – Barreira simples com geomembrana (primária) e barreira compósita com geomembrana e CCL (KOERNER, 1994).

Posteriormente, aspectos executivos levaram a conclusão de que a interposição de camadas de geossintéticos e materiais naturais apresentavam certa complexidade para serem construídas, especialmente nos casos em que se desejava executar camadas drenantes sobre taludes em aterros de resíduos. Assim, introduziu-se o uso das georredes substituindo o material granular e o tubo-dreno nos drenos-testemunho (Figura 2.16). As georredes também geraram um aumento do volume útil de armazenamento de resíduo, fator extremamente relevante para viabilizar o uso dos geossintéticos em barreiras de aterros de resíduos (KOERNER ,1994).

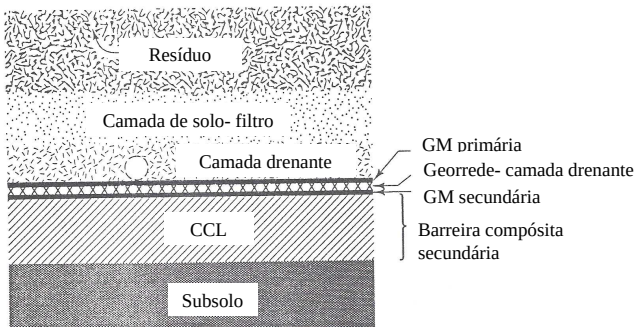


Figura 2.16 – Barreira dupla com georrede em substituição ao material granular (KOERNER, 1994).

A eficiência das camadas compósitas já havia sido plenamente estabelecida, no entanto, apenas vinham sendo utilizadas na barreira secundária. Nesse momento surgiu uma indagação: “se para as barreiras secundárias, as camadas compósitas eram a melhor estratégia, porque não utilizá-las nas barreiras primárias?” (KOERNER, 1994). A resposta veio com o surgimento das barreiras duplas compósitas (Figura 2.17), ou seja, barreiras formadas por dois conjuntos de elementos impermeabilizantes em contato direto, interpostas por uma camada drenante. Na configuração apresentada na Figura 2.17, pode-se observar que o segundo elemento impermeabilizante da barreira primária é constituído por argila compactada. Constata-se que tal camada, por motivo já exposto, é de extrema complexidade de execução sobre outras camadas de geossintéticos, além do que, o fato de ser compactada com teor de umidade próximo da ótima, e de sofrer compressão com o lançamento do resíduo, pode gerar a expulsão de água intersticial falseando uma possível detecção de vazamento.

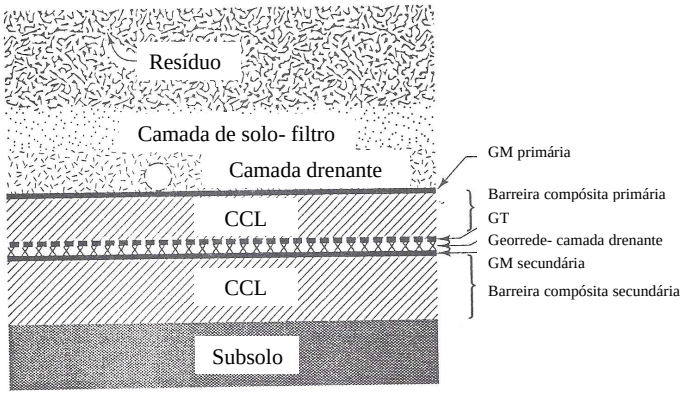


Figura 2.17– Barreira dupla compósita com CCL como elemento impermeabilizante na camada composta primária (KOERNER, 1994).

Assim surgiu o uso potencial dos GCLs nos aterros de resíduos (Figura 2.18). O GCL resolveria os problemas expostos e aumentaria ainda mais o volume útil de armazenamento de resíduos (KOERNER, 1994).

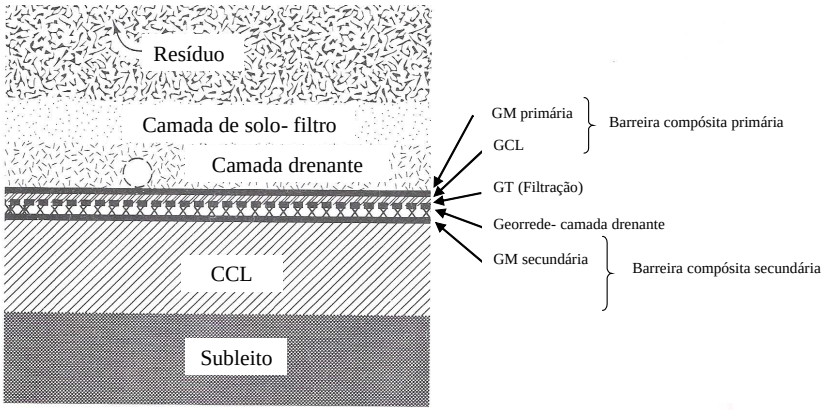


Figura 2.18– Barreira dupla com GCL em substituição ao CCL (KOERNER, 1994).

Com base em todos os benefícios obtidos com a introdução dos geossintéticos, o aumento de seu uso foi inevitável e, progressivamente, os materiais naturais foram sendo substituídos até a disposição de camadas apresentada na Figura 2.19. O motivo pelo qual um CCL aparece como segundo material impermeabilizante da camada secundária, reside no fato de serem geralmente fáceis de se executar sobre o terreno natural. Nos casos em que tal execução se torna complexa, como nos taludes muito íngremes ou no caso de indisponibilidade de argila de boa qualidade na proximidade da obra, outro GCL pode ser utilizado, substituindo ou complementando o CCL.

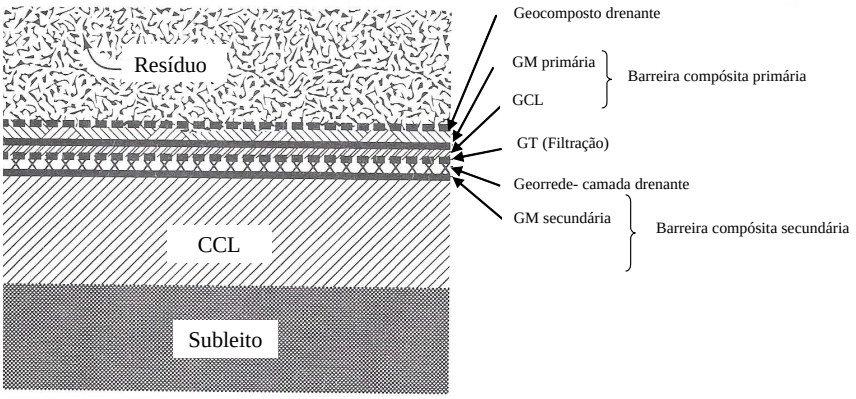


Figura 2.19– Barreira dupla compósita- várias camadas de geossintéticos (KOERNER, 1994).

2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE GCLs

A avaliação da resistência ao cisalhamento dos GCLs deve ser realizada sob duas superfícies de ruptura: uma passando pelo corpo da bentonita (resistência interna) e outra ao longo da superfície de contato entre o GCL e os materiais adjacentes (resistência de interface) (BUENO, BENVENUTO e VILAR, 2004) . A determinação das resistências ao cisalhamento interno e de interface com GCLs, é de fundamental importância para as análises de estabilidade estática e sísmica em projetos de aterros de resíduos e em outras aplicações.

A baixa resistência ao cisalhamento do principal componente do GCL, a bentonita, quando hidratada, torna a resistência interna do GCL, objeto de atenção especial (FOX e STARK, 2004). Uma argila bentonítica sódica hidratada apresenta uma das mais baixas resistências ao cisalhamento dos solos argilosos encontrados na natureza (MESRI e OLSON, 1970).

A diferenciação entre os tipos de GCLs está na forma de como manter uniforme a camada de bentonita: por adesivagem (GCLs não-reforçados) ou por processos mecânicos de costura ou agulhagem (GCLs reforçados). Na primeira família de produtos, a resistência interna ao cisalhamento do GCL é governada pela resistência da bentonita no teor de umidade em que se encontra, sendo portanto, pouco recomendada para aplicações onde se espera que o produto esteja submetido a elevadas tensões de cisalhamento. No caso dos GCLs reforçados tal nível de resistência é inerente ao tipo de reforço empregado, sendo o mecanismo de transferência de tensões bastante particular para cada um dos materiais.

As técnicas de medição direta ou indireta da resistência ao cisalhamento nos GCLs são várias, cada qual apresentando particularidades e limitações. Eichenauer e Reither

(2002) relatam uma comparação entre diversos métodos de ensaio de cisalhamento e adesão em GCLs apresentando suas vantagens e desvantagens (

Tabela 2.3)

Tabela 2.3– Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de ensaios de cisalhamento e ensaios-índice em GCLs.

Método de Ensaio	Vantagens	Desvantagens
Cisalhamento Direto	Necessário para a maioria dos projetos de taludes Muito flexível e facilmente orientado Possibilita ensaios hidratados e multicamadas Possibilita ensaios com elevadas tensões verticais Possibilita boa comparação entre tipos de GCLs	Montagem complicada Exige muita experiência do operador Custo elevado de equipamentos
Plano Inclinado	Muito flexível e facilmente orientado Equipamento não tão custoso quanto cisalhamento direto Possibilita ensaios hidratados e multicamadas Possibilita realização de ensaios de longo prazo Possibilita boa comparação entre tipos de GCLs	Montagem complicada Exige muita experiência do operador Permite aplicação apenas de baixas tensões normais Tensões normais não uniformes
Adesão (*peeling*)	Ensaio-índice rápido para GCLs agulhados Ensaio simples e barato	Não permite comparação entre diferentes tipos de GCLs Não é relevante para dimensionamento em taludes Não possibilita testes multicamadas Não possibilita aplicação de tensões normais durante o ensaio
Cisalhamento por tração *(Shear-peel)*	Ensaio-índice rápido para diferentes tipos de GCLs Permite comparação entre diferentes tipos de GCLs Simples e barato	Relevantes apenas para taludes sob baixos níveis de sobrecarga Não permite ensaio multicamadas Não possibilita aplicação de tensões normais durante o ensaio

Fonte: EICHENAUER; REITHER, 2002

2.2.1 Determinação da resistência ao cisalhamento interno e de interface de GCL pelo ensaio de cisalhamento direto - ASTM D 6243 -98.

O ensaio de cisalhamento direto é o método mais antigo para determinação da resistência ao cisalhamento de solos e se baseia diretamente no critério de Coulomb. Para GCLs, o método utilizado para solos foi adaptado e a norma ASTM D 6242-98 apresenta um procedimento atualizado que será discutido no presente item.

2.2.1.1 Considerações gerais

A Norma ASTM D 6242-98 orienta o procedimento para determinação da resistência ao cisalhamento interno de um GCL ou a resistência ao cisalhamento na interface entre GCLs e outros materiais. O ensaio pode ser realizado sob uma taxa de deslocamento constante ou sob tensão de cisalhamento constante, permitindo a simulação de condições de campo. Todos os tipos de GCLs podem ser testados seguindo esse procedimento.

O procedimento de ensaio consiste, basicamente, da aplicação de uma tensão normal representativa de campo e de uma força tangencial que gera o deslocamento de uma porção móvel da caixa em relação à outra porção fixa. A tensão de tangencial de cisalhamento (τ) é registrada em função do deslocamento horizontal (Δ). A Figura 2.20 ilustra o resultado típico de um ensaio de cisalhamento direto realizado com um GCL reforçado hidratado. Através da análise da curva tensão-deslocamento, pode-se determinar pares de valores referentes à situação de pico (τ_p, Δ_p), residual (τ_r, Δ_r) ou relativa a um determinado nível de deslocamento (τ_d, Δ_d).

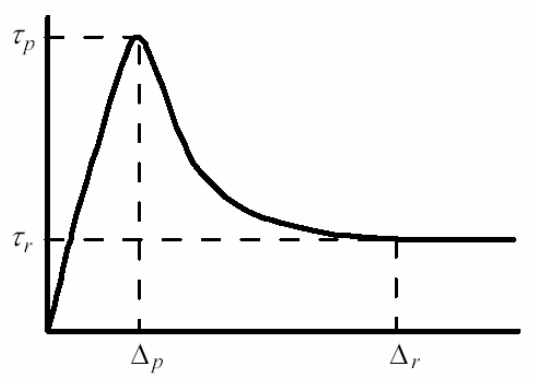


Figura 2.20– Curva tensão-deslocamento típica de um GCL hidratado (FOX e STARK, 2004)

O procedimento de ensaio deve ser realizado para, pelo menos, três níveis de sobrecarga. Com isso, pode-se traçar envoltórias de resistência nas situações de pico, residual ou intermediária através do ajuste aos pontos experimentais obtidos. A inclinação da envoltória, se linear, define o ângulo de atrito (ϕ) ao longo da superfície ensaiada. O intercepto da envoltória com o eixo das ordenadas define o valor de coesão (c) quando se analisa a resistência interna do GCL, ou a adesão (c_a) quando o plano cisalhado se refere a uma interface.

O procedimento descrito permite a adoção de dois métodos de ensaio: deslocamento controlado (taxa de deslocamento constante) ou tensão controlada. Quando se deseja conhecer o comportamento do GCL na situação residual, recomenda-se o uso do método de deslocamento controlado. A Norma ASTM D 6243 recomenda a aplicação da equação 2.1 para determinar a máxima taxa de deslocamento , R(mm/min);

$$R = \frac{\Delta_f}{50 \cdot t_{50} \cdot \eta} \qquad \text{(Eq. 2.1)}$$

onde:

Δ_f = deslocamento estimado na situação de pico ou residual,

t_{50}= tempo necessário para que o GCL atinja 50% de adensamento (condição drenada em ambas as faces) sob tensão vertical equivalente à de ensaio.

η= 1 – cisalhamento interno com drenagem em ambas as faces

η = 4 – cisalhamento na interface entre o GCL e um material impermeável

η= 0.002 – cisalhamento de interface entre GCL e material permeável.

Caso não seja esperada a geração de pressão neutra na superfície ensaiada ao longo do período de ensaio, a Norma ASTM D 6243 permite a adoção do valor de 1 mm/min como a máxima taxa de deslocamento para o ensaio (FOX e STARK, 2004).

O método de tensão controlada pode ser executado seguindo três procedimentos:

- Método da taxa de tensão controlada – a força de cisalhamento é aplicada ao CP com incrementos uniformes de intensidade até a ruptura.
- Método dos incrementos controlados de tensão- a força de cisalhamento é aplicada com incrementos uniformes ou dobrados, mantidos constantes até a aplicação de novos incrementos, até a ocorrência de ruptura.
- Método da tensão constante (fluência) – Um dos métodos previamente descritos são aplicados até que a tensão desejada seja atingida, sendo mantida até o final do ensaio. Tal procedimento busca avaliar o comportamento do GCL ou da interface quanto à sua susceptibilidade à perda de resistência por fluência.

Cada uma das três situações pode representar bem as condições de campo, tanto no período de operação de um aterro de resíduos, durante a qual os resíduos são lançados gradualmente, como na avaliação do comportamento de longo período do GCL sob tensão constante (fluência). Para qualquer situação, recomenda-se a realização do ensaio até que se atinja deslocamento mínimo de 50 mm.

2.2.1.2 Equipamento

O presente item apresenta uma breve descrição de alguns dos dispositivos que devem compor um equipamento de cisalhamento direto para GCLs e interfaces;

Dispositivo de cisalhamento- Constituído por dois recipientes, sendo um estacionário e outro móvel, podendo ser preenchidos com solo remoldado. Ambos devem ser suficientemente rígidos para evitar distorções ao longo do processo de aplicação de tensão de cisalhamento. Recomenda-se que seu formato deve ser quadrado ou retangular com dimensões mínimas de 300 mm. As razões para que as dimensões desse equipamento sejam consideravelmente maiores que os tradicionalmente utilizados para solos, reside nos seguintes fatores;

Os níveis de deslocamentos necessários para que se mobilize resistência de pico ou resistência residual, são normalmente maiores para os GCLs e interfaces;

- As irregularidades das superfícies em geossintéticos são relativamente maiores;

- No caso de GCLs CT, por exemplo, a distância entre costuras podem chegar a 100 mm, o que pode gerar elevada variabilidade nos resultados.
- Amostras maiores minimizam efeitos de borda e eventuais irregularidades de fabricação (p.ex. má distribuição de agulhagem do GCL AG).

Entretanto, os equipamentos de cisalhamento de maiores dimensões também possuem algumas desvantagens relativas à maior complexidade e custo de realização dos ensaios e à dificuldade de aplicação de cargas verticais mais elevadas (FOX ; STARK, 2004). Por esses motivos, a Norma ASTM D 6243 apresenta uma nota, através da qual, permite o uso de equipamento de dimensões menores, desde que, por meio de realização de ensaios sob condições análogas, sejam obtidos resultados equivalentes, ou seja, que não apresentem discrepâncias decorrentes de efeito de borda ou de escala.

Dispositivo de aplicação de tensão vertical - aparato capaz de aplicar cargas constantes com acurácia de ± 2%, durante todo o procedimento de ensaio. Tal dispositivo pode ser concebido por sistemas hidráulicos, pneumáticos ou por alavancas com contrapesos.

Dispositivo de aplicação de carga cisalhante - deve ser competente na realização de ensaios com deformação controlada (taxa de deslocamento constante) ou com tensão controlada (carga constante). A carga é aplicada na direção paralela à direção de deslocamento da caixa. O dispositivo é geralmente dotado de célula de carga e deve possibilitar a leitura da carga aplicada a qualquer momento do ensaio.

Indicadores de deslocamento - utilizados para determinação dos valores de deslocamento horizontal e, quando se deseja, deslocamento vertical do topo da amostra durante a fase de cisalhamento ou de adensamento da amostra. Os instrumentos de medida, indicadores analógicos ou LVDTs, devem ser capazes de medir deslocamentos horizontais da

ordem de 75 mm e verticais de 25 mm. Os deslocamentos horizontais devem ser medidos com precisão de 0,02 mm.

Garras para fixação das amostras no dispositivo de cisalhamento - mecanismo de atenção especial. No caso da determinação de resistência de interface, normalmente são utilizadas as garras do tipo mandíbulas. Quando se deseja determinar a resistência interna do GCL, devem-se revestir as superfícies que promovem contato íntimo com as amostras, com um material rugoso a fim de garantir a transferência total de tensão cisalhante para o centro do plano ensaiado. Tais revestimentos devem permitir drenagem do CP caso necessário (FOX ; STARK,2004)

Recipiente para preparação de amostras de solo remoldado - indispensável no caso de ensaio de interface com solo. A escolha e preparação do substrato é de fundamental importância para uma precisa análise de resistência do conjunto.

2.2.1.3 Amostragem

Tendo sido realizada a amostragem do lote de fabricação, deve-se preparar a amostra de laboratório, para posteriormente, proceder com a preparação dos corpos-de-prova (CPs) para ensaio. As amostras de laboratório consistem de peças com a largura da bobina e comprimento suficiente para preparação dos corpos-de-prova. A Norma ASTM D 6243 recomenda a retirada de, no mínimo, três CPs para cada direção ensaiada. Vale ressaltar que, normalmente, os GCLs são solicitados por cisalhamento na direção longitudinal de fabricação, o que, muitas vezes, acaba por dispensar o ensaio na outra direção. Os CPs devem possuir dimensões levemente superiores às dimensões do dispositivo de cisalhamento, e

devem permitir fixação com as garras ou através de outro procedimento. O CPs devem ser retirados na direção diagonal da amostra de laboratório, ao longo de seu comprimento, tendo-se cuidado para não atingir as bordas do produto (1/10 largura da bobina).

2.2.1.4 Hidratação do CP

O procedimento de hidratação do CP pode ser definido para melhor atender às condições de ensaio ou de campo. Lançamento de água sobre o CP, pulverização, saturação por capilaridade são algumas das práticas possíveis. A aplicação de tensão durante a hidratação, adensamento posterior, tempo de hidratação, critério para interromper a hidratação e o tipo de fluido são importantes aspectos a serem levado em conta no plano de realização dos ensaios.

2.2.2 Fatores que influenciam nos resultados de ensaios de cisalhamento em GCLs

Ao se analisar as propriedades dos componentes que formam os diferentes tipos de GCLs, assim como, as possíveis configurações de ensaio, podem-se identificar uma série de variáveis que influenciam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Tais variáveis devem ser claramente relatadas na apresentação dos resultados de tais ensaios. São variáveis importantes como: tipo de GCL, fluido de hidratação, procedimentos de hidratação, taxa e magnitude de deslocamento, tipo de garra, entre outros.

2.2.2.1 Tipo de GCL

O tipo de GCL é um fator de extrema relevância uma vez que diferentes GCLs apresentam mecanismos de transferência de tensões de cisalhamento totalmente distintos. As curvas força versus deslocamento resultantes assumem configurações características de cada tipo de GCL, o que é claramente discutido no item 2.2.3.

2.2.2.2 Procedimento de Hidratação

Quando se deseja medir a resistência ao cisalhamento de GCLs hidratados, o fluido e o procedimento de hidratação são de importante conhecimento. Ambos influem no grau de saturação da bentonita e, por conseqüência, na sua resistência ao cisalhamento. Fluidos que causam maior expansão livre da bentonita, como a água, por exemplo, são normalmente utilizados pois apresentam resultados conservativos. Um maior inchamento da bentonita indica aumento de seu grau de saturação, e como conseqüência, a diminuição de sua resistência ao cisalhamento. Ao se expandir, a bentonita pode, também, extrudar através das aberturas dos geotêxteis e solicitar os reforços com maior intensidade (GILBERT et. al. 1997). Fluidos que representem melhor as condições reais da aplicação também podem ser normalmente utilizados.

Os procedimentos de hidratação devem, sempre que possível, simular as condições de campo. GCLs não-encapsulados tendem a atingir elevado grau de saturação em um período relativamente curto, cerca de dias ou semanas, quando em contato com o terreno natural ou argila compactada (DANIEL, 1993). A adoção de um tempo insuficiente para

hidratação total da amostra pode levar a valores de resistência ao cisalhamento não-conservadores. A hidratação deve se desenvolver até que o CP atinja o equilíbrio, caracterizado pela cessão de variação de seu volume. O tempo necessário para que tal ocorra pode ser de até 3 semanas (GILBERT et al. 1996, STARK ; EID 1996), o que em questões práticas pode representar um tempo muito longo. GILBERT et al. (1996) propuseram um método prático para definição da completa hidratação do CP; caso a variação de altura do CP seja inferior a 5% durante o período de 12h, pode-se admitir o GCL totalmente hidratado. Tal procedimento pode ainda levar de 10 a 20 dias de duração. Técnicas de aceleração da hidratação podem ser utilizadas, desde que, devidamente testadas e comparados aos processos convencionais. O tempo total de hidratação depende da drenabilidade das duas superfícies em contato com o CP. Nos casos em que apenas uma superfície, em contato com o CP, seja drenante, o tempo de hidratação aumentará consideravelmente (FOX ; STARK, 2004).

Outro aspecto importante é a tensão de confinamento do material ao longo do processo de hidratação, $\sigma_{n,h}$. No campo, normalmente, a bentonita hidratará sob uma determinada tensão vertical inicial que pode ser reproduzida na preparação de ensaio.

FOX et al. (1998) propuseram um procedimento de hidratação em duas etapas ao ensaiar três tipos de GCLs. A primeira etapa consistia na hidratação livre ou com baixa tensão de confinamento, e a segunda, com aplicação da tensão vertical de ensaio ($\sigma_{n,c}$). Ao se realizar medidas de pressões neutras geradas e deslocamento vertical do corpo-de-prova, verificou-se que, com esse procedimento, o conjunto atingia equilíbrio mais rapidamente, quando se comparava com o método de hidratação em fase única. Uma vez atingido o equilíbrio, iniciava-se a fase de cisalhamento e os valores de resistência obtidos não apresentavam diferença significativa.

2.2.2.3 Procedimento de Adensamento

No campo, a hidratação completa do GCL ocorre, na maioria das vezes, sob baixa tensão de confinamento quando este não é do tipo encapsulado. Ao longo da vida útil da obra o GCL pode se submeter a tensões verticais crescentes, como ocorre nas aplicações de impermeabilização de fundo de aterros de resíduos. Em decorrência desse fato, é importante levar em consideração o efeito do adensamento da amostra ao se ensaiar o material sob tensões verticais superiores à tensão de hidratação ($\sigma_{n,c} > \sigma_{n,h}$). Os acréscimos de carga decorrentes do lançamento e compactação de resíduos em aterros, ocorrem de forma lenta e gradual, o que favorece a dissipação de pressões neutras. Em laboratório, a seqüência hidratação-adensamento deve ser levada em consideração quando se deseja simular etapas de carregamento para determinação das envoltórias de resistência em termos de tensões efetivas. As Figura 2.21 e Figura 2.22 apresentam pares de envoltórias de resistência (situação de pico e residual) resultantes de ensaios que apenas se diferenciam na sequência de hidratação-adensamento (EID ; STARK, 1996). A primeira série de ensaios (Figura 2.21) foi realizada com CPs hidratados sob a mesma tensão vertical da fase de cisalhamento ($\sigma_{n,h} = \sigma_{n,c}$). Na segunda série (Figura 2.22), os CPs foram hidratados a uma tensão vertical inicial baixa, $\sigma_{n,h}$= 17 kPa, e posteriormente adensados sob tensões verticais, $\sigma_{n,c,}$ de 50, 100, 200 e 400 kPa, para então iniciar a fase de cisalhamento. Observa-se um decréscimo de resistência da ordem de 25 a 30% na segunda série de ensaios. Ao hidratar a bentonita sob baixa tensão de confinamento, o volume de água adsorvida na camada dupla das partículas de bentonita é maior, o que confere à bentonita um maior teor de umidade e, conseqüentemente, uma menor resistência ao cisalhamento (DANIEL et al.1993, ZELIC et al. 2002, FOX e STARK, 2004).

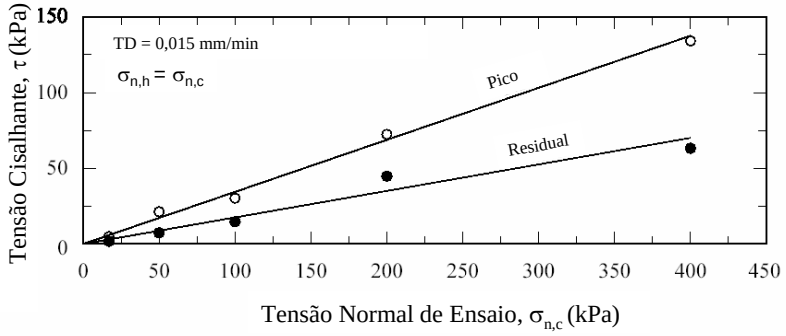


Figura 2.21 – Envoltórias de resistência de pico e residual de um GCL hidratado sob tensão de confinamento de ensaio, $\sigma_{n,h}= \sigma_{n,c}$ (EID e STARK, 1996).

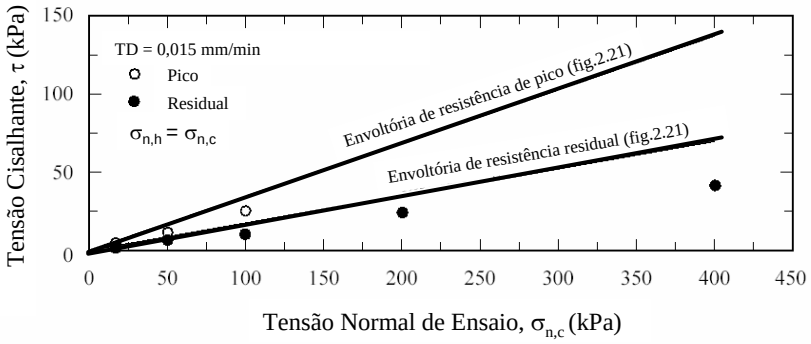


Figura 2.22 – Resistências de pico e residual de um GCL hidratado sob baixa tensão de confinamento ($\sigma_{n,h}$= 17 kPa) e adensado sob tensões de ensaio (EID e STARK, 1996). Envoltórias de resistência da Figura 2.21 são apresentadas para comparação.

A sequência hidratação-adensamento em GCLs AG pode interferir na sua resistência ao cisalhamento. A expansão da bentonita gera uma solicitação de tração nas fibras de reforço, que podem se desprender do geotêxtil suporte, minimizando a resistência ao cisalhamento do GCL. Em um posterior processo de adensamento, ocorre um alívio de tensão nas fibras de reforço devido à diminuição de espessura do GCL. Tal alívio provoca um aumento de deslocamento para atingir a condição de pico (Δ_p) durante o ensaio. Outro fenômeno possível durante a posterior fase de adensamento, é a expulsão de bentonita pelo

geotêxtil suporte, principalmente quando esse é um geotêxtil tecido. A expulsão da bentonita pode gerar uma lubrificação da superfície de interface com material adjacente, ocasionando o surgimento de um potencial plano de ruptura. Visando evitar essa ocorrência, sugere-se o aumento lento e gradual da tensão de confinamento até o valor $\sigma_{n,c}$ desejado (FOX e STARK, 2004).

2.2.2.4 Taxa de deslocamento

A velocidade de deslocamento do dispositivo de cisalhamento é objeto de investigação de diversas pesquisas que buscam avaliar qual o seu nível de influência na medição de resistência ao cisalhamento de GCLs. Uma taxa de deslocamento baixa, 0,001 mm/min, por exemplo, pode levar a um longo período de duração do ensaio completo. Em termos práticos, tal taxa pode ser proibitiva uma vez que os ensaios de cisalhamento podem fazer parte de critérios de aceitação de produto em obra ou até procedimento de controle de qualidade de fabricação. Imaginando-se a realização de um ensaio com deslocamento total de 50 mm a uma taxa de 0,001 mm/min, a sua conclusão levaria 34,7 dias, sendo esse período apenas referente à etapa de cisalhamento de um CP.

Diversos estudos demonstram que podem ser muitas as causas de interferência nos resultados de cisalhamento em GCLs, por conta da taxa de deslocamento. DANIEL et al. (1993), EID e STARK (1997), GILBERT et al. (1997) e ZELIC et al. (2002) apresentaram resultados de estudos realizados com GCLs não-reforçados hidratados, demonstrando que com o aumento na taxa de deslocamento ocorre um aumento da resistência de pico (τ_p). Em ensaios realizados sob $\sigma_{n,c}$ mais elevada, a influência da taxa de deslocamento parece ser

menor. A Figura 2.23 ilustra esse fato (GILBERT et al., 1997). Nota-se uma clara diferença de comportamento quando se compara resultados de ensaios realizados sob $\sigma_{n,c}$ tão distintos. Para $\sigma_{n,c}$ = 17 kPa, a razão $\tau_p/\sigma_{n,c}$ assume valores dobrados em relação aos ensaios com $\sigma_{n,c}$ dez vezes maior. Com base nesses resultados Fox e Stark (2004) sugerem, para GCLs não-reforçados hidratados, a adoção de taxa de deslocamento da ordem de no máximo 0,01 mm/min.

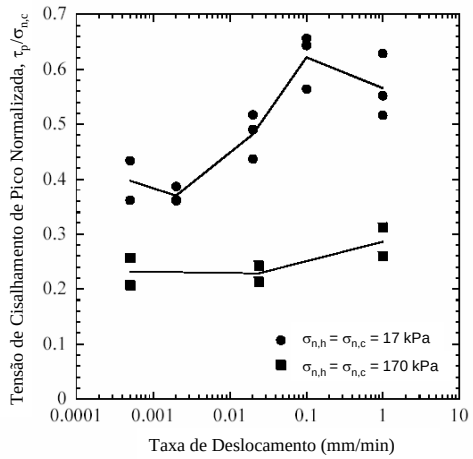


Figura 2.23– Variação da resistência de pico normalizada ($\tau_p/\sigma_{n,c}$) com a razão de deslocamento, para dois níveis de tensão vertical de ensaio, $\sigma_{n,c}$ = 17 kPa e 170 kPa. Ensaios realizados com GCLs não-reforçados hidratados (GILBERT et al., 1997).

Em GCLs não-reforçados e não-hidratados, a razão de deslocamento parece não interferir consideravelmente para valores até 1 mm/min, sendo esse o valor recomendado na Norma ASTM D6243 para materiais nessa situação.

Os GCLs reforçados possuem a particularidade de serem dotados de fibras ou costuras traspassando o plano do material. A taxa de deslocamento na fase de cisalhamento do ensaio pode influir de forma particular em cada um desses materiais, quando se deseja medir suas resistência ao cisalhamento. FOX et al. (1998), realizaram estudo para avaliar tal influência e verificaram um leve crescimento das resistências de pico medidas, com o

aumento da taxa de deslocamento, tanto para GCLs AG como GCLs CT. Os autores relatam que três poderiam ser as causas hipotéticas para o ocorrido: geração de pressões neutras negativas ao longo do ensaio, a fluência da bentonita ou a fluência das fibras de reforço ao longo do ensaio. Após análises mais criteriosas, atribuem o ocorrido, principalmente, à fluência da bentonita:

- Ao analisar os CPs rompidos, verificou-se que os planos de ruptura situavam-se sempre muito próximos do GTT (suporte), que é uma superfície drenante e que, portanto, dificulta o desenvolvimento de pressões-neutras ao longo do ensaio.
- O aumento de resistência com a razão de deslocamento ocorreu tanto para τ_p quanto para τ_r, indicando pouca influência da fluência dos geossintéticos, uma vez que estes, praticamente, não contribuem para o aumento de resistência na fase residual.

ZORNBERG et al. (2005) compararam ensaios de cisalhamento direto com GCLs AG T/NT hidratados e cisalhados sob $\sigma_{n,c=}$ 50 kPa e 520 kPa, para diversas taxas de deslocamento. Para $\sigma_{n,c}$ = 520kPa (Figura 2.24b), o aumento da taxa de deslocamento gerou diminuição das resistências de pico medidas, contrariando os resultados de estudos até então desenvolvidos. O contrário ocorreu para $\sigma_{n,c}$= 50kPa, como pode ser visualizado na Figura 2.24a. Observa-se claramente na Figura 2.24c a tendência de comportamento em ambos os casos. Os autores justificam que nos ensaios realizados com $\sigma_{n,c}$ maiores do que a tensão de expansão da bentonita (130– 140kPa), existe uma tendência de geração de pressões neutras positivas ao longo da fase de cisalhamento. O contrário também é verdade, ou seja, para tensões $\sigma_{n,c}$ abaixo da tensão de expansão da bentonita, ocorre a geração de pressões neutras negativas, ocasionando um crescimento da resistência de pico com a velocidade de deslocamento.

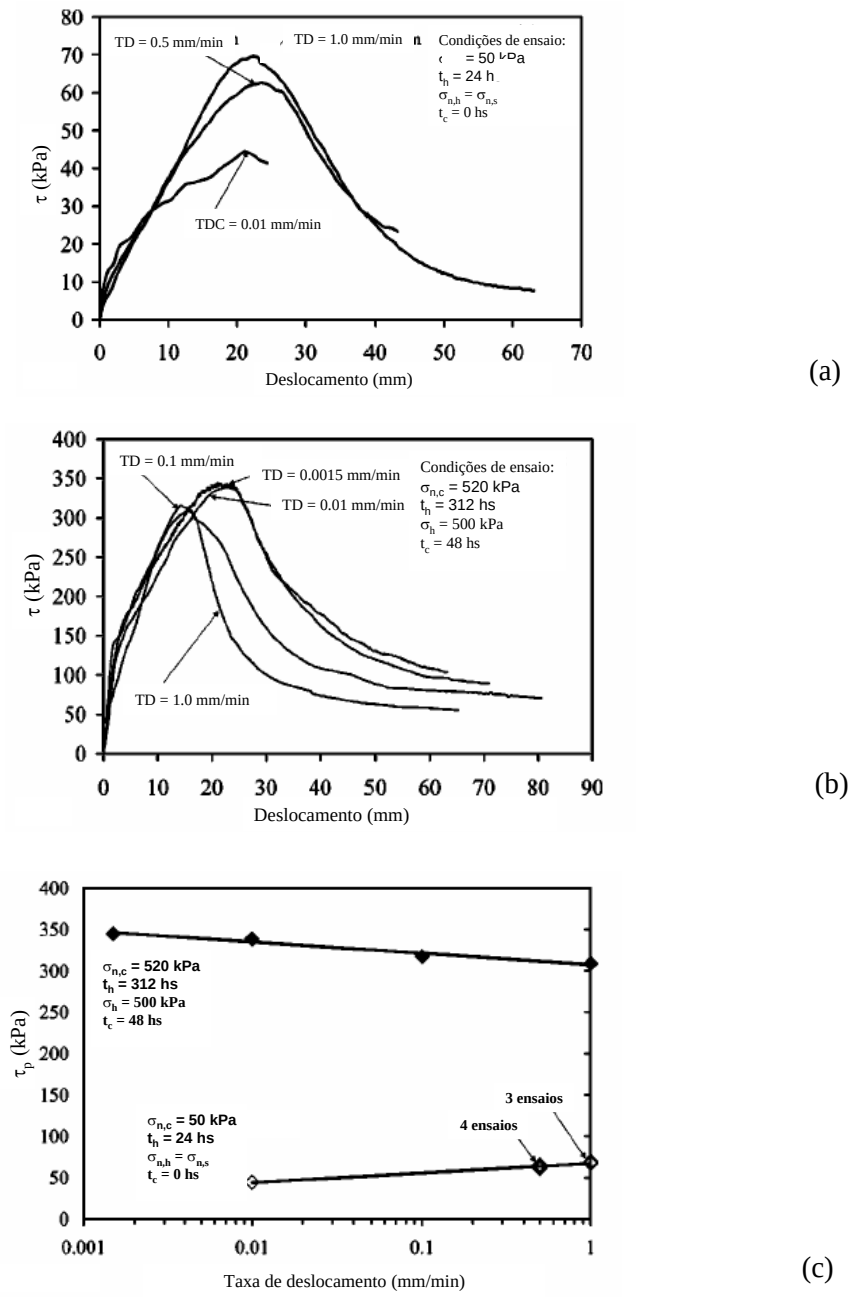


Figura 2.24– Efeito da taxa de deslocamento na medida da resistência de pico de GCLs AG T/NT. (a) Curvas tensão-deslocamento para ensaios realizados sob baixa tensão de confinamento $\sigma_{n,c}$= 50 kPa. (b) Curvas tensão-deslocamento para ensaios com elevada tensão de confinamento $\sigma_{n,c}$= 520 kPa. (c) Tendência de comportamento de τ_p em função da taxa de deslocamento (ZORNBERG et al., 2005).

Assim como para os GCLs não-reforçados hidratados, a taxa de deslocamento de 1 mm/min, normalmente empregada para os GCLs reforçados, parece ser elevada, sendo sugeridos valores da ordem de, no máximo, 0,01 mm/min (FOX e STARK, 2004). Conforme já ressaltado, a adoção de taxas de deslocamento muito pequenas pode ocasionar tempos de ensaio extremamente elevados, o que torna sua realização proibitiva para fins mercadológicos. Uma forma de amenizar o problema é realizar ensaios com taxas de deslocamento variáveis. EID et al. (1999) propuseram um método para acelerar os ensaios de cisalhamento. Nesse método, adota-se uma taxa de deslocamento baixa, por exemplo, 0,01 mm/min, até a determinação de τ_p, aumentando-a após essa fase, até a determinação de τ_r. Alguns estudos, no entanto, mostram que τ_r também pode sofrer influência da taxa deslocamento. Essa constatação foi o motivo para que Fox e Stark (2004) propusessem outra alternativa para aceleração do ensaio de cisalhamento. Os autores propõem aumentar a taxa de deslocamento após atingir a condição de pico, até o quase estabelecimento da condição residual, quando, é novamente diminuída até o final do ensaio.

2.2.2.5 Metodologia de fixação do CP

O método de fixação do CP ao dispositivo de cisalhamento é um dos aspectos mais fundamentais para a realização de um ensaio de cisalhamento adequado. A adoção de um procedimento correto, garante que o plano cisalhado seja aquele que realmente apresente os menores valores de resistência. Entretanto, ainda não existe um procedimento padrão recomendado, sendo assim, várias formas já foram testadas e relatadas na literatura por diversos autores.

Os métodos até então adotados consistem da obtenção de uma superfície rugosa que transmita, uniformemente, a tensão cisalhante ao longo do CP, muitas vezes associada a um sistema de garras que "mordem" suas extremidades, garantindo que não se desloquem. Fox e Stark (2004) relatam, no entanto, que a utilização de garras não é uma prática recomendada devido à extensibilidade dos geossintéticos. Quando estes são solicitados em suas extremidades geram uma transferência de tensões desuniformes ao longo do CP. Esse fato, reforça a necessidade de obtenção uma superfície extremamente rugosa que evite a necessidade do uso de garras nas extremidades garantindo que não ocorra deslocamento relativo entre o CP e os blocos de cisalhamento. Outro aspecto relevante é que as superfícies de contato devem ser drenantes, facilitando a hidratação do CP e favorecendo a dissipação de pressões neutras eventualmente desenvolvidas ao longo do ensaio.

2.2.3 Comportamento Tensão versus Deslocamento

O entendimento do comportamento tensão-deslocamento da estrutura interna de um GCL ou de sua interface com outro material, é fundamental para a realização de análises de estabilidade. Tal relação indica a ordem da magnitude dos deslocamentos para se atingir condições de pico ou residual em situações reais de campo. Contudo, parece haver, para cada tipo de GCL, um comportamento típico correspondente. A mobilização da resistência de pico (τ_p) em GCL e interfaces ocorre, de forma geral, para Δ_p menores que 50 mm. Tal valor tende a ser mais baixo para os GCLs não-reforçados, assume valores intermediários para GCLs AG e são maiores para os GCLs CT (FOX e STARK, 2004). Uma fase pós-pico se estabelece entre a condição de pico e a residual. Essa, por sua vez, é caracterizada pelo estabelecimento de uma resistência mínima constante (τ_r). O deslocamento correspondente à condição residual

(Δ_r) pode variar entre 0,1m e 0,5m a depender do tipo de material ensaiado e do nível de tensão vertical aplicada (FOX e STARK, 2004).

A razão de resistência residual (τ_r/τ_p) é um parâmetro importante para identificar a magnitude de queda da resistência de pico até atingir a condição residual. Tal relação também parece ser característica para os diferentes tipos de GCLs e condições de ensaio (hidratação e magnitude de deslocamentos). Fox et al (1998) e Chiu e Fox (2004) relacionam em ordem crescente a razão de resistência residual para alguns tipos de GCLs: GCL AG hidratado < GCL CT hidratado < GCL não-reforçado hidratado < GCL não-reforçado seco suportado GM lisa < GCL não-reforçado seco suportado GM texturizada.

2.2.3.1 GCLs não-reforçados

A resistência ao cisalhamento dos GCLs não-reforçados é claramente governada pela resistência da bentonita no teor de umidade em que se encontra. Em aplicações onde a bentonita se encontra encapsulada por duas geomembranas, a possibilidade de hidratação da mesma é bastante reduzida, e uma eventual análise de estabilidade deve levar tal fato em consideração. A Figura 2.25 mostra resultados de ensaios realizados com GCLs não-reforçados com teor de umidade distintos; um CP apresenta-se seco (bentonita na umidade de fabricação) e outro completamente hidratado. Ao analisar a razão τ_r/τ_p, pode-se concluir que esta se apresenta mais alta para o material seco (τ_r/τ_p= 0.81), indicando pouca perda de resistência na condição pós-pico (FOX ; STARK, 2004). Ao se comparar τ_p, observa-se que a amostra seca apresenta valor aproximadamente 5 vezes superior. Tal fato denota uma queda significativa de resistência da bentonita devido à hidratação, o que reforça o fato de que GCLs não-reforçados não devem ser indicados para aplicação em taludes ou em

terrenos planos sujeitos a transferência de tensões oriundas de taludes próximos (STARK et al., 1998). Observa-se também que a condição de pico foi atingida para Δ_p extremamente baixos em ambos os casos.

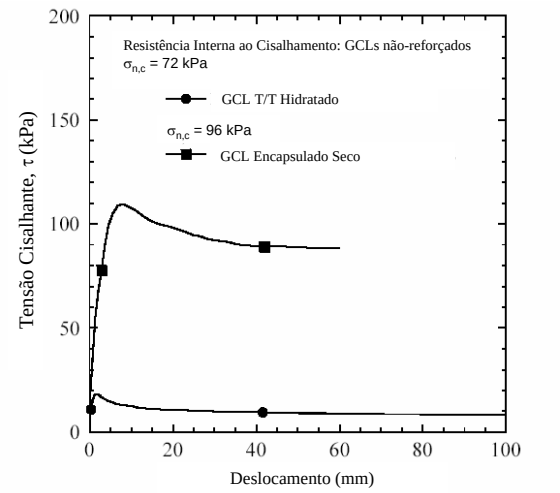


Figura 2.25– Curvas tensão-deslocamento resultantes de ensaios com GCLs não-reforçados hidratados e secos (FOX ; STARK, 2004).

2.2.3.2 GCLs reforçados

Ambos os processos de fabricação aplicados aos GCLs reforçados, a costura e, mais comumente, a agulhagem, têm a finalidade de interceptar a camada de bentonita para realizar a tarefa de absorver as tensões de cisalhamento que possam vir a solicitar o material. Esse processo torna a bentonita responsável por uma única função, o controle de fluxo. Porém, os mecanismos de transferência de tensões de ambos os tipos de GCLs são distintos e portanto apresentam comportamento tensão- deslocamento característicos. A Figura 2.26 apresenta duas curvas tensão-deslocamento de ensaios de cisalhamento direto realizados exatamente nas mesmas condições (σ_n= 72 kPa, dimensão do CP= 406 x 1067 mm, taxa de

deslocamento = 0.1 mm/min.). Ao observar os resultados, alguns fatos podem ser relacionados;

- $\tau_{p\ GCL\ AG} > \tau_{p\ GCL\ CT}$
- $\Delta_{p\ GCL\ CT} > \Delta_{p\ GCL\ AG}$. FOX e STARK (2004) atribuem esse fato ao processo de ruptura do GCL CT. Sabe-se que o GT T sofre um alongamento em torno das linhas de costura antes dos laminetes serem rasgados.
- τ_r/τ_p GCL CT > GCL AG, no entanto, ambos muito abaixo do GCL não-reforçado. Tal fato indica que até a situação de pico os reforços governaram o comportamento tensão-deslocamento, ocasionando uma queda de resistência considerável por conta da ruptura até a condição residual. O mecanismo de ruptura interna do GCL AG, ocorre devido ao desprendimento das fibras do GT NT superior da estrutura do GT suporte. Para o GCL CT tal processo ocorre devido ao rasgamento do GT suporte pelas linhas de costura (FOX e STARK, 2004).
- Ambos apresentam valores de τ_r muito próximos, indicando a cessão da contribuição dos reforços na resistência ao cisalhamento que, nesse estágio, é conferida pela bentonita hidratada ($\tau_{r\ GCLs\ reforçados\ hidratados}$ $\tau_{r\ GCLs\ não\text{-}reforçados\ hidratados}$)

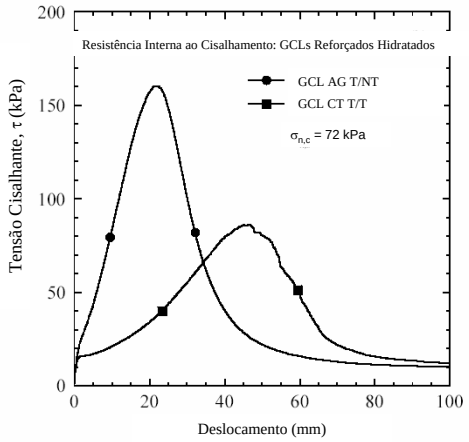


Figura 2.26– Curvas tensão-deslocamento de ensaios com GCLs reforçados (FOX e STARK, 2004)

2.2.3.3 Interfaces com GCLs reforçados

Os GCLs reforçados são constituídos de um ou dois tipos de geotêxteis, podendo formar algumas configurações de interfaces que apresentam comportamentos distintos. Além desse fato, as geomembranas podem ser lisas ou texturizadas o que cria ainda mais possibilidades de combinações. A Figura 2.27 ilustra resultado de um ensaio de cisalhamento direto para quatro configurações de interface com GCLs AG hidratados constituídos com geotêxtil tecido (suporte) e nãotecido (superior).

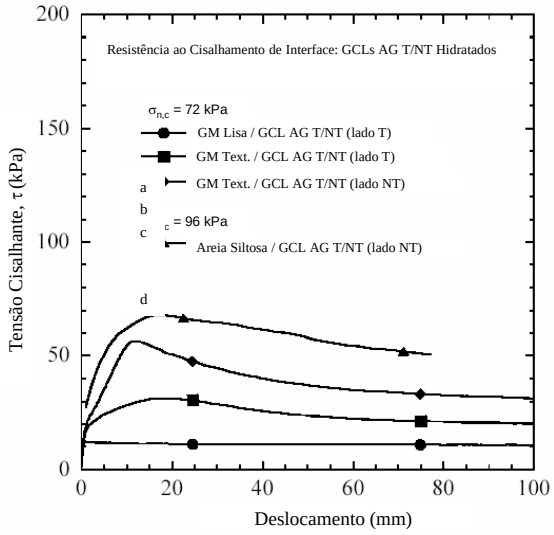


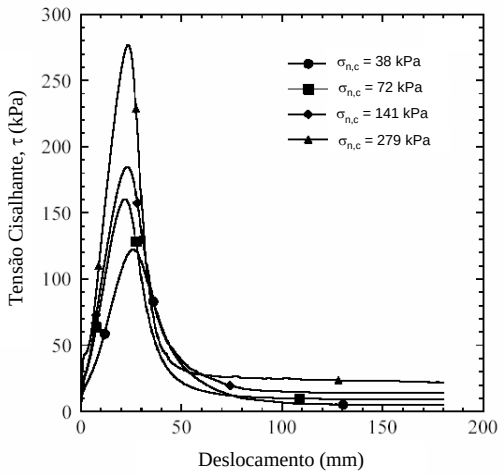
Figura 2.27– Curvas tensão-deslocamento resultantes de ensaios em quatro tipos de interface com GCLs AG (FOX ; STARK, 2004)

Os resultados mostram que a menor τ_p, Δ_p e a maior relação τ_r/τ_p ocorreu para a configuração a. O geotêxtil tecido em direto contato com a geomembrana atingiu condição de pico para Δ_p extremamente baixo e praticamente não perdeu resistência com a continuação do deslocamento. No caso de interfaces com geomembranas lisas, o tipo de geotêxtil do GCL diretamente em contato, parece não ser significante na resistência ao cisalhamento

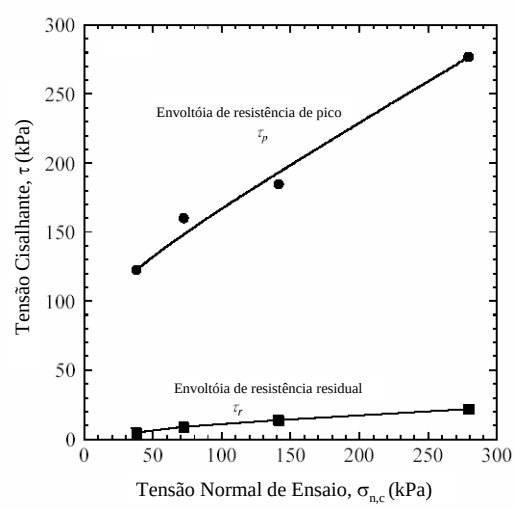
(TRIPLETT e FOX, 2001). Tal fato não é observado com as geomembranas texturizadas, que apresentam τ_p e τ_r maiores quando em contato com o GT NT. Interfaces com solos possuem comportamento variável com o tipo de solo utilizado, método de preparação e compactação (CHIU e FOX, 2004). Comparando os resultados apresentados na Figura 2.27, com aqueles obtidos para cisalhamento interno em GCLs reforçados (Figura 2.26), nota-se que as resistências de pico de interface se mostram menores que τ_p e foram mobilizados para Δ_p menores.

2.2.4 Envoltórias de resistência

Assim como nos solos, um importante fator que influi na resistência ao cisalhamento interno e de interface com GCLs é o seu nível de confinamento. Os valores de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento direto (τ), são plotados em função da tensão vertical efetiva (σ') e assim são obtidas envoltórias de resistência. A Figura 2.28a apresenta resultados de ensaios cisalhamento direto para diversos níveis de sobrecarga. A Figura 2.28b mostra as τ_p e τ_r plotadas em função de $\sigma_{n,c}$. Observa-se um claro crescimento de τ_p e τ_r com $\sigma_{n,c}$.



(a)



(b)

Figura 2.28– (a) Curvas tensão-deslocamento de ensaios com o mesmo GCL em quatro níveis de sobrecarga (b) envoltórias de resistência na condição de pico e residual (FOX et al, 1998).

As envoltórias de resistência podem ser lineares, multi-lineares ou não-lineares. Podem passar pela origem ou apresentar um intercepto de coesão (Figura 2.29). As envoltórias de resistência interna de pico de um GCL são geralmente curvas, ou seja, apresentam diminuição gradual do ângulo de atrito com o aumento de σ'. As interfaces com GCLs, por sua vez, apresentam envoltórias lineares, multi-lineares ou curvas, a depender dos elementos em contato. Na condição residual, os GCLs e suas interfaces apresentam envoltórias quase lineares. As envoltórias que passam pela origem são típicas de interfaces com GCLs e de GCLs não-reforçados. Os GCLs reforçados possuem envoltórias que não apresentam um comportamento claro quanto ao intercepto de coesão. Os GCLs CT tendem a apresentar elevados valores de intercepto de coesão devido ao seu processo produtivo, que parece conferir uma espécie de "confinamento inicial" ao produto.

Análises de resistência ao cisalhamento de interfaces com GCLs, muitas vezes, apresentam envoltórias multi-lineares. Dependendo dos materiais analisados, pode ocorrer

uma mudança do plano de ruptura com base na tensão vertical aplicada. A Figura 2.30 apresenta um caso em que um GCL seco encapsulado, ao ser cisalhado, apresenta mudança do plano de ruptura, a partir de uma determinada tensão de confinamento. O produto ora ensaiado consiste de um núcleo de bentonita adesivado a uma geomembrana lisa que é coberto por uma geomembrana texturizada. Para valores de σ'< 65 kPa a ruptura ocorria pela interface GM text/bentonita. Acima de 65kPa a ruptura passou a ocorrer pela interface GM lisa/ bentonita, indicado por uma falha na adesivagem.

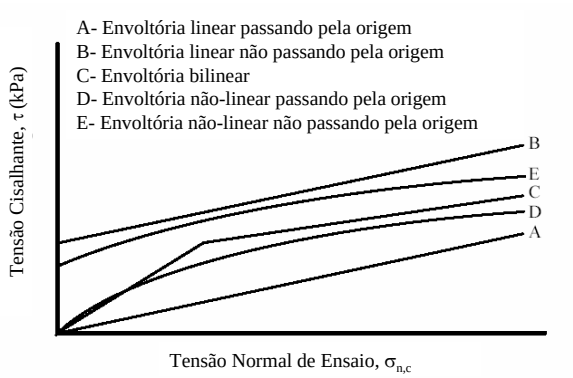


Figura 2.29– Envoltórias típicas de cisalhamento interno de GCLs e de interfaces com GCLs (FOX ; STARK, 2004)

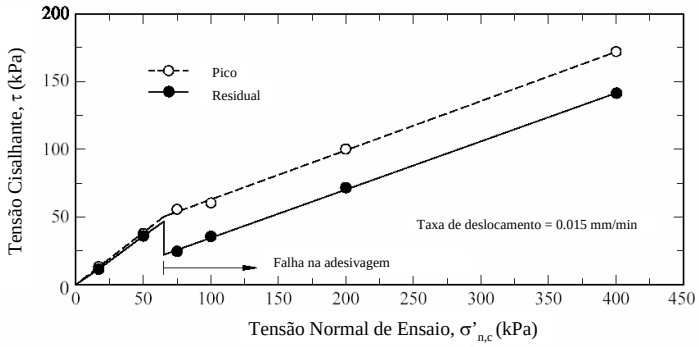


Figura 2.30– Envoltórias de resistência de pico e residual bilineares de um ensaio tipo ring-shear test feito em GCL encapsulado (EID e STARK, 1997).

2.2.5 Resultados de resistência ao cisalhamento

2.2.5.1 GCLs não-reforçados

Sabe-se que a bentonita, no teor de umidade natural, apresenta resistência ao cisalhamento, consideravelmente, superior à bentonita no estado hidratado. Com base nessa afirmação, pode-se esperar que os GCLs não-reforçados encapsulados apresentem resistência ao cisalhamento mais elevada, pois, normalmente se mantém secos. A bentonita seca não extruda, portanto, melhora as condições de estabilidade da interface com outros materiais. Shan e Daniel (1991) apresentam parâmetros de resistência para GCLs não-reforçados secos, na condição de pico, de c'=26 kPa, e ϕ_p'= 28°. Os mesmos autores apresentam para o GCL não-reforçado hidratado, na condição de pico, os seguintes parâmetros: c'= 4 kPa, e ϕ_p'= 9°. FOX et al. (1998^a) obtiveram valores de ϕ_p'= 10,2^{o}e ϕ_r'= 4,7^o para GCLs não-reforçados com dois GT NT, nas condições de pico e residual, respectivamente.

2.2.5.2 GCLs reforçados

A presença dos elementos de reforço contribui substancialmente para o aumento de resistência ao cisalhamento interno de um GCL. A Figura 2.31 exibe resultados de ensaios realizados com três amostras de GCLs reforçados (dois AG/ um CT) e uma amostra de GCL não-reforçado. Os resultados confirmam, para o GCL não-reforçado, o comportamento exposto no item 2.2.5.1

Os GCLs CT apresentam elevado valor de intercepto de coesão devido ao "confinamento inicial" promovido pelo processo de costura. É importante notar que os

ângulos de atrito do GCL CT são similares para as condições de pico e residual. O aumento da resistência ao cisalhamento com o grau de confinamento do GCL CT, parece ser garantido pela interface GT tecido / bentonita (FOX ; STARK, 2004). A contribuição da costura para a resistência de pico do GCL CT é dependente da resistência ao rasgo do geotêxtil suporte (FOX et al., 1998ª). Os GCLs AG apresentam uma tendência linear de aumento de τ_p com σ', indicando a presença do fenômeno de atrito das fibras entrelaçadas ao núcleo. As duas amostras de GCL AG apresentaram diferenças nas envoltórias de resistência o que, provavelmente, se deve aos valores F_p obtidos de ensaios de adesão. Para maiores valores de F_p, τ_p se apresenta maior, para qualquer nível de confinamento. Outro dado importante é o elevado intercepto de coesão da amostra que apresenta maior F_p. Tal fato pode ser atribuído a um provável "confinamento aparente", análogo ao do CGL CT, conferido por um processo de agulhagem mais intenso. O ensaio de adesão entre geotêxteis do GCL AG, assim como a correlação de seus valores com os de cisalhamento direto, serão discutidos nos itens subseqüentes.

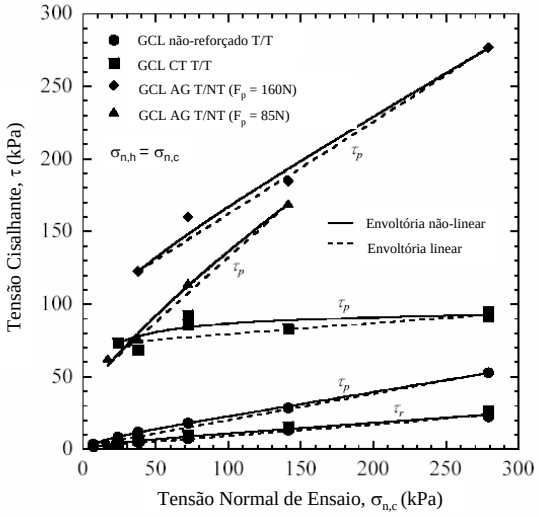


Figura 2.31– Envoltórias de resistência de pico e residual de GCLs reforçados e não-reforçados (FOX et al. 1998).

2.3 ENSAIOS-ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM GCLs

Desde o surgimento dos primeiros GCLs AG, ensaios-índice para controle de qualidade de fabricação são realizados. Tais ensaios avaliam a resistência de adesão entre as camadas de geotêxteis que envolvem o núcleo bentonítico dos GCLs AG. A resistência de adesão, em termos lógicos, leva à idéia de que quanto maior o seu valor, maior será a resistência interna ao cisalhamento do material (MAUBEUGE; EHRENBERG, 2000). Ao medir indiretamente importantes parâmetros de projeto e permitir o controle da repetibilidade do processo produtivo, os ensaios-índice são de extrema relevância e, portanto, serão discutidos detalhadamente no presente item. Normalmente, dois tipos de ensaios-índice são utilizados para controle de qualidade de fabricação de GCLs AG;

a) Ensaio de adesão (P) ou "*peel test*"

b) Cisalhamento por tração (CT) ou "*shear-peel test*" / "*shear-tensile test*")

2.3.1 Determinação da resistência média de adesão entre as camadas superiores e inferiores de GCLs agulhados (Peel test) - ASTM D 6496 -99.

2.3.1.1 Considerações gerais

Este item descreve os procedimentos prescritos na Norma ASTM D 6496-99 para determinação da resistência média necessária para a separação das duas camadas de geotêxteis, em GCLs agulhados.

O método consiste, basicamente, na fixação dos geotêxteis inferior e superior de um GCL AG à garras, que são afastadas lentamente a uma taxa deslocamento constante. O início do ensaio é caracterizado pela separação de 50 mm das bordas do CP fixadas às garras (Figura 2.32). Nesse momento o deslocamento relativo entre as garras é considerdo nulo. Inicia-se o afastamento entre garras, e os valores de resistência são registrados continuamente para deslocamentos de 25 mm até 1250 mm. O procedimento deve ser realizado para, no mínimo, cinco CPs.

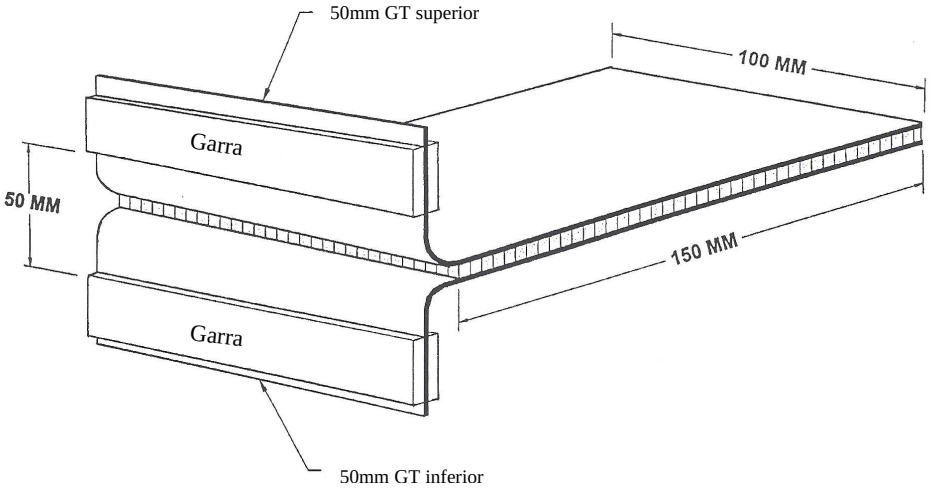


Figura 2.32– Configuração inicial do ensaio de adesão em GCLs (ASTM D 6496)

2.3.1.2 Equipamento

Os equipamentos utilizados para realização do ensaios de adesão são:

- Máquina de tração universal com precisão de 0,1 N/m.
- Garras dentadas com dimensões de 50 x 200 mm.

- Gabarito metálico com dimensões 100 x 200 mm
- Utensílios de corte dos CPs

2.3.1.3 Amostragem

As amostras de laboratório devem estar em estado representativo de campo ou de fabricação, dependendo do objetivo do ensaio. Não devem apresentar danos superficiais. A dimensão dos corpos-de-prova é de 100 mm de largura por 200 mm de comprimento. No ato do corte dos CPs, atenção especial deve ser tomada quanto à perda de bentonita, para evitar influência nos resultados. Os CPs devem ser retirados ao longo da largura da bobina amostrada, além de serem orientados no sentido longitudinal de fabricação durante o ensaio.

2.3.1.4 Determinação da resistência de adesão

A resistência de adesão de cada CP pode ser determinada pela equação 2.2;

$$\alpha_p = \frac{F_m}{B_{cp}} \qquad \text{(eq. 2.2)}$$

em que;

α_p = Resistência de adesão do C.P. (N/cm)

F_m= Força média observada para separação entre 25 mm e 1250 mm

B_{cp}= largura do C.P (cm).

A resistência média de adesão da amostra ensaiada (F_p) é dada pela média de resistência dos CPs ensaiados (α_{pn});

$$F_p = \frac{(\alpha_{p1} + \alpha_{p2} + ... + \alpha_{p5})}{5} \qquad \text{(eq. 2.3)}$$

onde;

F_p = Resistência média de adesão da amostra ensaiada, N/cm

α_{pn} = Resistência de adesão do CP, N/cm

Apesar da recomendação de Norma, os valores de resistência de adesão em GCLs são usualmente reportados em N/10cm, devido ao fato dos CPs possuírem largura de 10cm.

2.3.2 Determinação da resistência ao Cisalhamento por Tração-Ensaio CT (Shear-peel test / Shear-tensile test)

2.3.2.1 Considerações gerais

O objetivo do ensaio CT é avaliar a resistência de adesão em GCLs agulhados ou costurados, por meio da separação dos geotêxteis seguindo um mecanismo análogo ao do ensaio de cisalhamento direto, no entanto, sem aplicação de tensão de confinamento e utilizando-se de equipamentos mais simplificados. A separação entre geotêxteis ocorre em direções paralelas e em sentidos opostos, conforme representado na Figura 2.33.

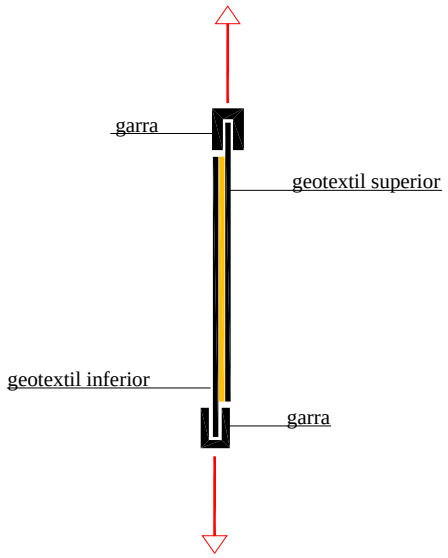


Figura 2.33– Mecanismo básico do ensaio CT

O ensaio CT possibilita o traçado de uma curva de resistência ao cisalhamento por tração (F_{CT}) versus deslocamento, que possui formato análogo às curvas Força versus deslocamento de ensaios de tração em geossintéticos, por exemplo, pois apresentam valores máximos bem definidos. Por esse motivo o valor normalmente reportado como resultado do ensaio CT é o de resistência máxima de cisalhamento por tração (F_{CTmax}). Tal resistência é determinada pela média dos valores máximos registrados para 5 CPs. Por não ser um ensaio normatizado, não há uma regra estabelecida para reportar os valores $F_{CTmax.}$ Estes podem ser apresentados em N, N por unidade de largura, como no caso dos ensaios P, ou até em kPa, quando se deseja comparar ensaios CT com ensaios de cisalhamento direto.

O ensaio de adesão (P) é o mais utilizado na atualidade para o controle de qualidade de fabricação de GCLs, por ser normatizado pela ASTM. Entretanto, até a sua normatização no ano de 1999, alguns autores defendiam a utilização o ensaio CT como ensaio-índice, argumentando que seu mecanismo de ruptura se assemelhava ao do ensaio de

cisalhamento direto em GCLs AG. O próximo item apresenta algumas discussões sobre a comparação dos diferentes métodos de ensaio apresentados.

2.3.3 Comparação de ensaios de cisalhamento direto e ensaios-índice em GCLs AG.

A correlação entre resultados de ensaios de cisalhamento direto e ensaios-índice em GCLs AG é, há alguns anos, objeto de investigação por diversos autores. Chegar a essa correlação significaria um grande avanço na obtenção de parâmetros de projeto, uma vez que os ensaios-índice são extremamente mais simples, rápidos e baratos de se executar, conforme apresentado na

Tabela 2.3.

O procedimento básico para realizar tal comparação de resultados é, inicialmente, separar uma amostra de laboratório com as dimensões adequadas e preparar os CPs em pares, posicionados estrategicamente para minimizar o efeito de variabilidade do processo produtivo. Com as amostras preparadas, procedem-se os ensaios-índice e de cisalhamento direto nas mais variadas condições e comparam-se os resultados dos pares.

2.3.3.1 Comparação de ensaios de adesão (P) a ensaios de cisalhamento direto

A comparação de resultados de ensaios P e de cisalhamento direto apresenta uma complexidade inerente às diferenças entre as metodologias. Os resultados obtidos dos ensaios são reportados em unidades distintas, além do que, possuem mecanismos totalmente diferentes. Ao se analisar uma curva força versus deslocamento resultante de um ensaio P, pode-se observar a ocorrência de inúmeros picos máximos e mínimos, em decorrência da solicitação isolada de cada seção do CP. Já, no ensaio de cisalhamento direto, a solicitação do CP ocorre de forma simultânea sobre toda sua área, o que possibilita o traçado de uma curva com um único pico de resistência.

As análises comparativas dos ensaios ocorrem na literatura de diversas formas. Amostras com F_p pré-determinados, podem ser submetidas a ensaios de cisalhamento direto para avaliação do ângulo de atrito resultante. Assim, ensaiando-se amostras com diferentes níveis de adesão, pode-se buscar um comportamento característico de variação da inclinação da envoltória com a resistência de adesão, tal como descrito no item 2.2.5.2. Outra forma de comparação é tentar correlacionar valores de intercepto de coesão com F_p.

Von Maubeuge e Lucas (2002) relatam a realização de ensaios de cisalhamento direto com três amostras de GCL AG, preparadas de forma particular no ano de 1992. Na ocasião, devido à disponibilidade apenas um equipamento de cisalhamento direto para ensaio, as três amostras foram hidratadas, uma acima da outra, sob tensão vertical de 100kPa durante 24 horas. Após esse período os CPs foram desconfinados e, um a um, destinados à fase de cisalhamento. Enquanto um CP era cisalhado, os demais permaneciam hidratados, no entanto, sem confinamento. Ensaios de adesão realizados antes da hidratação indicaram valores próximos de 30 N/10 cm para os três CPs. A resistência ao cisalhamento medida, no entanto, apresentou sensível decréscimo do primeiro CP para os CPssubseqüentes. Esse acontecimento indicou que, durante o período em que os CPs permaneceram hidratados sem

confinamento, houve uma expansão da bentonita e uma conseqüente perda de resistência ao cisalhamento interno. Ensaios P adicionais realizados, comprovaram que a resistência de adesão inicial de 30 N/10 cm também decrescia com a expansão livre do CP. Os autores então, submeteram à expansão livre, amostras com resistência de adesão maiores que 30 N/10 cm, para avaliar a influência da resistência de adesão na perda de resistência ao cisalhamento. Concluiu-se que, quanto maior a resistência de adesão inicial, menor a perda de resistência decorrente da expansão livre (Figura 2.34). Observando as curvas apresentadas na mesma figura, pode-se concluir que, para um valor de adesão inicial de 100 N/10 cm, o efeito da perda de resistência ao cisalhamento após a expansão livre é quase nula. Esses fatos acarretaram o início de um programa de investigação em torno da influência da resistência de adesão na resistência ao cisalhamento interno de GCLs AG.

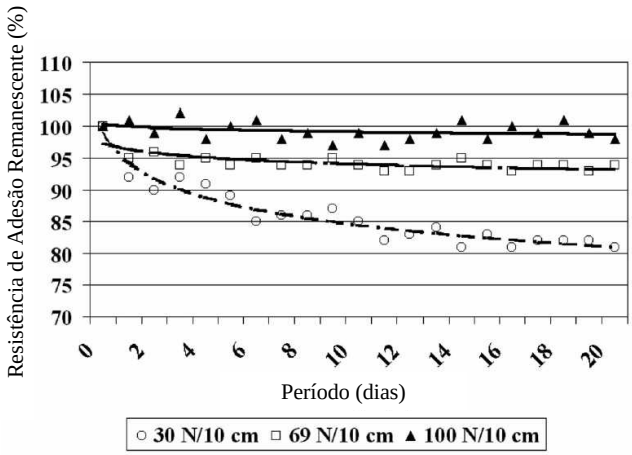


Figura 2.34– Decréscimo da resistência de adesão sob condição de expansão livre (MAUBEUGE e LUCAS, 2002)

O primeiro trabalho que, efetivamente, estudou a correlação entre resistência de adesão e cisalhamento interno em GCLs AG, foi elaborado por Heerten et al, 1995. Os

autores executaram uma grande quantidade de ensaios para relacionar ambas as resistências, resultando em um diagrama para projeto apresentado na Figura 2.35.

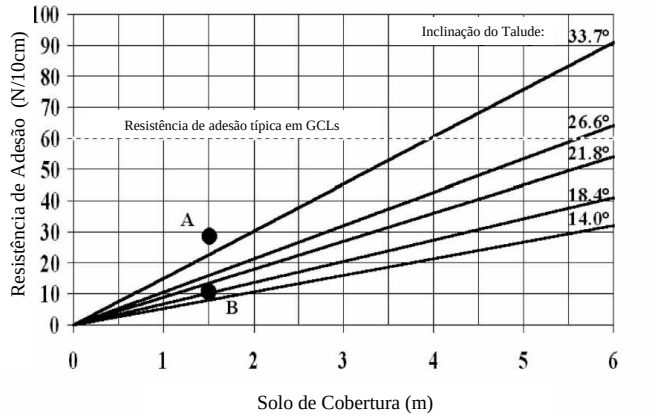


Figura 2.35– Diagrama proposto para projeto sobre taludes (HEERTEN, 1995)

O diagrama proposto determina o limite para ocorrência de ruptura interna no GCL, relacionando a resistência de adesão em N/10cm, com a espessura de solo de cobertura e a inclinação do talude revestido. Por exemplo, um GCL AG com resistência de adesão de 60 N/10 cm, sobre uma superfície com inclinação de 33,70°, sofreria ruptura interna se uma camada de solo maior que 4 m (γ-20 kN/m³) fosse lançada sobre ele. Após esse trabalho, vários outros foram elaborados com a finalidade de correlacionar a resistência à extração das fibras com resistência ao cisalhamento interno de GCLs agulhados (GILBERT et al., 1995; STARK; EID, 1996; BERARD, 1997; FOX, 1998; VON MAUBEUGE; EBERLE, 1998; VON MAUBEUGE; LUCAS, 2002; ZORNBERG et al., 2005). Embora muitos desses estudos tenham encontrado correlações entre valores de adesão e cisalhamento direto, a comparação entre os trabalhos é relativamente complexa uma vez que as condições de ensaio empregadas diferem consideravelmente (Mackey, 2002).

Von Maubeuge e Lucas (2002) selecionaram CPs com quatro valores de adesão diferentes (20, 60, 80 e 120 N/10 cm) e os submeteram a ensaios de cisalhamento com tensões verticais distintas e condições de ensaio similares. A Figura 2.36 apresenta as envoltórias de resistência obtidas. Os resultados mostram uma leve tendência de acréscimo de τ_p com o crescimento de σ', além de um leve crescimento do ângulo de atrito com o aumento da resistência de adesão.

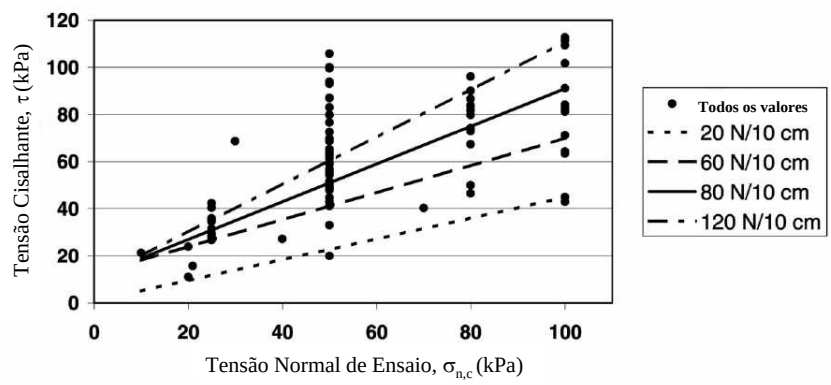


Figura 2.36– Envoltórias de resistência de pico de vários GCLs AG, com diferentes resistências de adesão, ensaiados sob mesmas condições. (MAUBEUGE; LUCAS, 2002)

Zornberg et al.(2005) comparam 75 resultados ensaios de adesão com ensaios de cisalhamento direto de amostras de um mesmo fabricante. Foram amostrados 15 lotes os quais foram submetidos a ambos os ensaios sob condições pré-determinadas. A Figura 2.37 apresenta resultados que demonstram uma grande dispersão de valores de resistência de adesão com τ_p. Apenas para $\sigma_{n,c}$= 310,30 kPa é que τ_p apresenta discreto crescimento com o aumento de F_p. Com base nesses resultados os autores concluem que a resistência à extração das fibras, fenômeno que ocorre nos ensaios de adesão, parece não ser um bom indicador da resistência de pico (τ_p) obtida nos ensaios de cisalhamento direto.

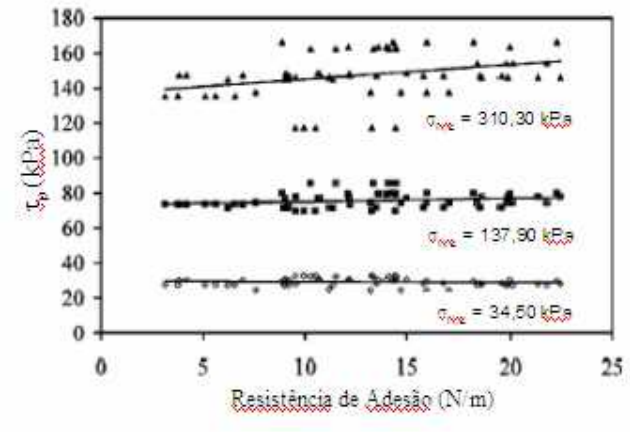


Figura 2.37- Correlação de valores de resistência de adesão, F_p, e τ_p em GCLs AG (ZORNBERG et al.,2005)

2.3.3.2 Comparação de ensaios de adesão (P) a ensaios de cisalhamento por tração (CT)

A comparação entre resultados dos ensaios P e CT pode ser realizada pela plotagem de valores de resistências reportadas nas mesmas unidades. Maubeuge e Ehrenberg (1999), pouco antes da normatização do ensaio P, realizaram ensaios P e CT (*strip-tensile test*), com o objetivo de comparar os métodos. Na Figura 2.38 são apresentados valores médios de adesão e de cisalhamento por tração versus valores máximos de adesão. Verifica-se que não ocorre uma correlação direta dos valores máximos de cisalhamento por tração com valores máximos de adesão. Atribuiu-se tal dispersão, inicialmente, às dimensões dos CPs utilizados para o ensaio CT, de 50 x 50 mm, enquanto que para ensaios P tais dimensões eram de 150 x 100 mm. Para confirmar a hipótese, os autores realizaram, posteriormente, ensaios CT com CPs de comprimentos variando de 45 a 55 mm e verificaram que os resultados variavam linearmente com o comprimento do CP, porém, a dispersão se mantinha. Talvez a

utilização de CPs com largura e comprimento equivalentes ao ensaio P (150 x 100 mm), reduzisse as dispersões de resultados, tendo em conta, a elevada variabilidade inerente ao processo de fabricação de GCLs AG.

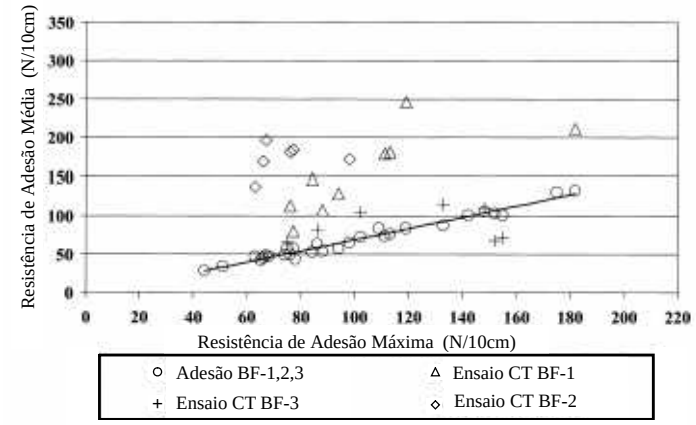


Figura 2.38– Comparação de resultados de ensaios P e CT em GCLs AG. . (MAUBEUGE; EHRENBERG, 1999)

2.3.3.3 Comparação de ensaios CT a ensaios de cisalhamento direto

Conforme já relatado, o mecanismo dos ensaios CT e de cisalhamento direto são similares. Tal fato torna a sua comparação uma atividade mais “palpável” apesar das inúmeras diferenças que existem entre os métodos.

Eichenauer e Reither (2002) apresentam resultados muito próximos entre o ensaio de cisalhamento por tração (CT) e cisalhamento direto executados sob tensão de confinamento nula, com tipos de GCLs semelhantes. Os autores utilizaram CPs com largura de 200 mm e espaçamento inicial entre garras de 100 mm. Demais condições de ensaio tais como taxa de deslocamento, metodologia de hidratação, critérios de amostragem, etc, não são

detalhadas na publicação. Entretanto, os autores afirmam que a hidratação não interferiu nos valores de pico de resistência ao cisalhamento de GCLs agulhados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4– Comparação de resultados do ensaio CT e de cisalhamento direto com tensão vertical nula para GCLs semelhantes (EICHENAUER ; REITHER, 2002).

Ensaio	Resultado
Cisalhamento direto ($\sigma_{n,c}$= 0 kPa)	12,40 kN/m²
Cisalhamento por tração (CT)	12,30 kN/m²

Os autores concluem que, por não permitir a aplicação de tensão vertical, os resultados do ensaio CT podem apenas ser utilizados para análise de estabilidade interna de GCLs em taludes sob baixa tensão vertical.

Fox e Stark (2004) publicam um relato sobre o estado da arte na determinação da resistência ao cisalhamento de GCLs, no qual sugerem um estudo mais aprofundado sobre correlação entre ensaios-índice e ensaios de cisalhamento direto em GCLs, citando o ensaio CT como uma boa alternativa de ensaio-índice.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos – Fase I

Este capítulo apresenta uma descrição dos procedimentos e materiais utilizados na primeira fase de ensaios. Esta fase consistiu na avaliação da resposta da metodologia proposta denominada cisalhamento por tração modificado (CTM). A avaliação foi feita com base na comparação dos resultados do ensaio CTM, com resultados das outras duas metodologias de ensaios-índice já descritas nos itens anteriores; ensaio de adesão (P) e cisalhamento por tração (CT).

A segunda fase de testes foi realizada com o objetivo de buscar uma correlação da metodologia CTM com o ensaio de cisalhamento direto convencional.

Em ambas as etapas foram utilizadas amostras de GCLs AG T/NT, de um único fabricante, especialmente preparadas para a pesquisa, não se tratando, portanto, de amostras comerciais.

3.1 Comparação Ensaio CTM x Ensaios-índice

Na presente etapa foram realizados diversos testes com 3 metodologias distintas. Seus resultados e discussões são apresentados e formam a base para definição dos procedimentos adotados na segunda fase de ensaios.

3.1.1 Propriedades dos GCLs ensaiados

Foram ensaiadas duas configurações de GCLs AG. Ambos eram compostos por um geotêxtil nãotecido superior, um geotêxtil tecido suporte e um núcleo de bentonita sódica ativada, se diferenciando apenas na massa de bentonita por unidade de área. As principais propriedades dos materiais ensaiados são apresentadas na Tabela 3.1.

3.1.2 Metodologia de amostragem

A metodologia empregada visou obtenção de amostras que apresentavam quatro níveis de resistência adesão entre os geotêxteis. Para tal, solicitou-se ao fabricante que, para cada tipo de GCL, fossem retiradas amostras em fases distintas de produção. O fabricante, então, separou quatro amostras com 4,6 m² (2 m x 2,30 m - LxB).

Tendo em vista que o mecanismo de agulhagem gera um considerável desgaste das agulhas decorrente da abrasão com a bentonita ao longo do processo produtivo, duas amostras foram retiradas instantes após a troca da tábua de agulhas e as demais, alguns metros antes da nova troca de agulhas. As dimensões das amostras foram definidas com base no plano de ensaio, que será discutido em item subseqüente.

Tabela 3.1– Propriedades dos GCLs ensaiados –Fase I

Propriedade	Norma	un	Tipo 1 – (3.6)	Tipo 2- (5.0)
GEOCOMPOSTO BENTONÍTICO				
Resistência à Tração	ASTM D 6768	kN/m	12,20	12,20
Coeficiente de Permeabilidade	ASTM D 5887	m/s	$2,85 \times 10^{-11}$	$2,85 \times 10^{-11}$
Espessura (natural)		mm	7,00	9,00
Massa de bentonita por unidade de área (seca)	ASTM D 5993	kg/m^2	3,60	5,00
BENTONITA				
Nome químico		Bentonita Sódica Ativada		
Massa específica real		g/cm^3	2,60	
pH (4,5% suspensão)			>9,5	
Teor de umidade natural		%	< 14	
Filtrado API		ml/30 mín.	< 24	
GEOTÊXTIL NÃOTECIDO- SUPERIOR				
Matéria- Prima			Polipropileno	
Gramatura	ASTM D 5261	g/m^2	350	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido T	ASTM D 4595	kN/m	17	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido L	ASTM D 4595	kN/m	14	
GEOTÊXTIL TECIDO- SUPORTE				
Matéria-prima		Polipropileno		
Gramatura	ASTM D 5261	g/m^2	110	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido T	ASTM D 4595	kN/m	10	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido L	ASTM D 4595	kN/m	10	

Dessa forma foram obtidas amostras que apresentavam níveis de adesão distintos e que receberam a seguinte classificação;

- **AT 3.6** – Amostra coletada antes da troca (AT) da tábua de agulhas, com 3,6 kg de bentonita/m²
- **PT 3.6** – Amostra coletada após a troca da tábua de agulhas (PT), com 3,6 kg de bentonita/m²
- **AT 5.0** – Amostra coletada antes da troca (AT) da tábua de agulhas, com 5,0 kg de bentonita/m²
- **PT 5.0** – Amostra coletada após a troca da tábua de agulhas (PT), com 5,0kg de bentonita/m²

3.1.2.1 Preparação e acondicionamento das amostras

As amostras foram preparadas no fabricante e fornecidas em bobinas com largura de 2,30 m, em embalagens totalmente estanques e devidamente protegidas contra danos mecânicos. Foram acondicionadas de forma a não alterar suas propriedades iniciais, até o momento de preparação dos CPs e início dos ensaios.

3.1.3 Resistência de Adesão- P (Peel test)

A Normas ASTM D 6496 / prEN ISO 13426-2 prescreve os procedimentos para determinação da resistência média necessária para a separação das duas camadas de

geotêxteis em GCLs agulhados. Tal separação ocorre na direção perpendicular ao plano de cisalhamento e em sentidos opostos (Figura 3.1).

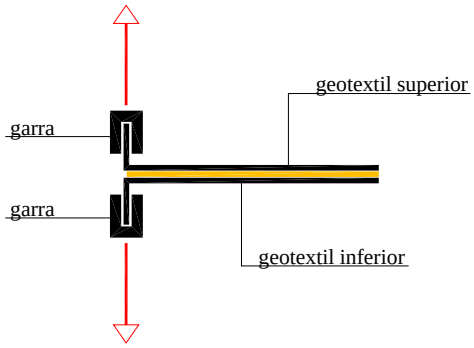


Figura 3.1– Mecanismo básico do ensaio de adesão- P

O principal objetivo deste método é a obtenção de índices de resistência de adesão que auxiliam na avaliação da qualidade do processo industrial de agulhagem dos GCLs. Os ensaios P, realizados na presente fase seguiram, quase na totalidade, os procedimentos prescritos em Norma.

3.1.3.1 Equipamentos

Foram utilizados equipamentos que atendam ao prescrito em Norma (item 2.3.1.2)

3.1.3.2 Preparação dos corpos-de-prova

A dimensão dos CPs ensaiados foi de 100 mm de largura (B) por 250 mm de comprimento (L), apesar da Norma ASTM D 6496 prever CP com L de 200 mm. Tal

alteração foi realizada por uma questão de segurança na operação da prensa, uma vez que a dimensão da garra dentada dificultava a fixação do CP. Os geotêxteis eram então separados ao longo dos primeiros 100 mm de comprimento do CP e fixados às garras, como mostra a Figura 3.2

No ato do corte dos CPs, atenção especial foi tomada quanto à perda de bentonita, para evitar influência nos resultados. Os CPs foram retirados na diagonal da bobina amostrada, sendo sua maior dimensão orientada no sentido longitudinal de fabricação (v. 3.1.6.1). Cada teste foi realizado para 5 CPs por amostra.

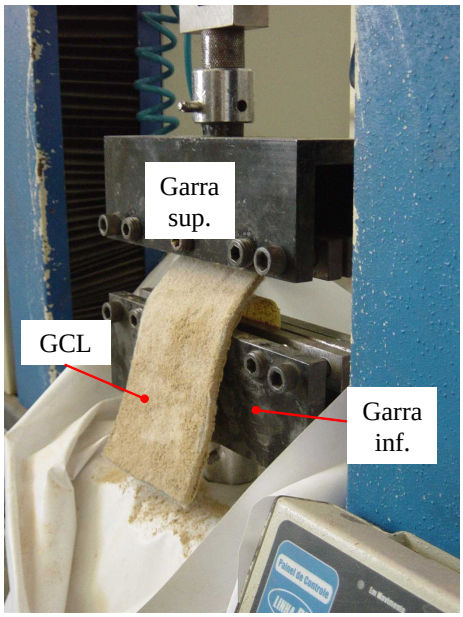


Figura 3.2– CP fixo às garras – Ensaio P

3.1.3.3 Medida da resistência de adesão

O início do ensaio é caracterizado pelo afastamento das garras, após fixação do CP, até o registro de uma pré-carga de aproximadamente 1% da força máxima esperada no ensaio. Nesse momento, o sistema de medição de deslocamento era zerado e o ensaio podia ser iniciado. Os valores de resistência de adesão eram registrados para separação de 25 mm até 1250 mm, a uma taxa de deslocamento constante de 300 mm/min. O registro das resistências gerava uma curva força x deslocamento ao longo de todo o andamento do ensaio.

3.1.3.4 Determinação da resistência média de adesão

A resistência de adesão média de cada amostra (F_p) foi determinada de acordo com o procedimento apresentado em 2.3.1.4.

3.1.4 Ensaio de Cisalhamento por Tração- CT (shear-tensile test)

O objetivo do ensaio CT é avaliar a resistência de adesão do GCL ensaiado, por meio da separação dos geotêxteis seguindo um mecanismo análogo ao do ensaio de cisalhamento direto. A separação entre geotêxteis ocorre em direções paralelas e em sentidos opostos, conforme representado na Figura 2.33. Nesse ensaio, não se prevê a aplicação de tensão de confinamento, como ocorre nos ensaios de cisalhamento direto.

3.1.4.1 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio CT são os mesmos necessários para o ensaio P (item 2.3.1.1)

3.1.4.2 Preparação dos corpos-de-prova

Considerando que não se trata de um ensaio normatizado, e que diversos trabalhos anteriores realizaram ensaios com dimensões de CP distintas, na presente série de ensaios, os CPs foram obtidos e efetivamente testados com as dimensões apresentadas na Tabela 3.2 .

Tabela 3.2– Dimensões dos CPs- ensaio CT

	Dimensões de corte		Cisalhamento		.
CP	L (mm)	B (mm)	L (mm)	B (mm)	Ref.
CT 1	150	50	50	50	Maubeuge e Ehrenberg (1999)
CT 2	200	100	100	100	
CT 3	200	200	100	200	Eichenauer e Reither (2002)

Os CPs foram cortados nas dimensões especificadas e os geotêxteis, em uma extensão de 50 mm de cada extremidade, eram separados cuidadosamente. Por esse motivo o comprimento cisalhado dos CPs é sempre 100 mm menor que o comprimento de corte dos mesmos.

A Figura 3.3 apresenta o CP CT 3 já cortado nas dimensões de ensaio. A Figura 3.4 apresenta o mesmo CP fixado às garra na máquina universal, no instante inicial do ensaio CT.

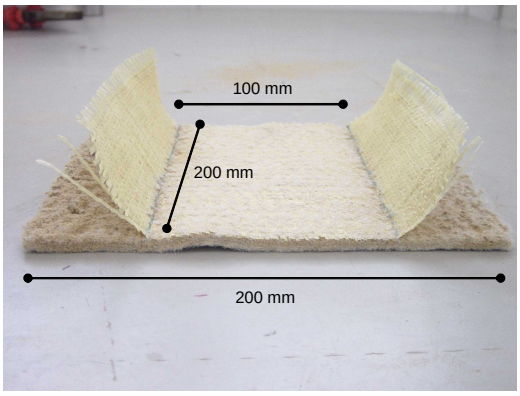


Figura 3.3– CP (CT 3) preparado para ensaio CT

Figura 3.4– CP (CT 3) fixado à garra na prensa universal

3.1.4.3 Medida da resistência de cisalhamento por tração

Com o CP já posicionado na garra, a sua separação iniciava-se lentamente até o registro de uma pré-carga de aproximadamente 1% da força máxima esperada para o ensaio. Nesse momento o ensaio era efetivamente iniciado com uma taxa de deslocamento constante de 50 mm/min, e os valores de resistência eram registrados no sistema eletrônico de aquisição de dados.

3.1.4.4 Determinação da resistência máxima de cisalhamento por tração

A resistência máxima de cisalhamento por tração do ensaio (F_{CTmax}) era determinada pela média dos valores máximos registrados para 5 CPs. Os valores de F_{CTmax} foram relatados em N e em N/mm para avaliação da influência da largura do CP nos resultados do ensaio.

3.1.5 Ensaio de Cisalhamento por Tração Modificado (CTM)

O método CTM foi concebido com o objetivo de ser correlacionado com ensaios de cisalhamento direto, uma vez que busca reproduzir o mecanismo de ruptura de forma muito similar. O conceito empregado nesse procedimento é baseado nas principais características do ensaio CT, ou seja, o movimento relativo de separação entre geotêxteis, a

velocidade, o custo de execução e a versatilidade do ensaio foram mantidos. Como ocorre em todo desenvolvimento de novos procedimentos de ensaio, uma série de testes deve ser realizada para avaliar, gradativamente, a sua validade e seu comportamento. O presente item apresenta as atividades realizadas ao longo da primeira fase de desenvolvimento do método CTM.

3.1.5.1 Conceito Ensaio CTM

Tendo sido mantidas as premissas do ensaio CT, as principais inovações do CTM residem no formato da garra e na forma de fixação do CP. A Figura 3.5 apresenta a configuração esquemática inicial do ensaio CTM. Pode-se observar que o formato "U" da garra promove o contato sobre toda área do CP que está sendo cisalhada, o que possibilitará o emprego de dispositivos de aplicação de tensão normal futuramente.

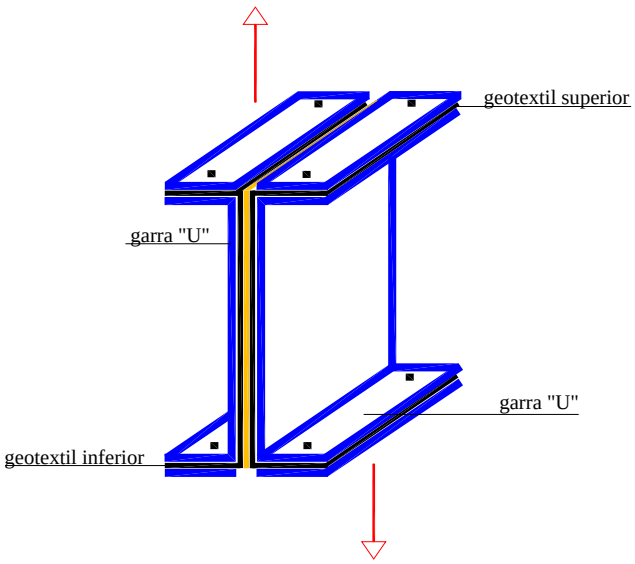


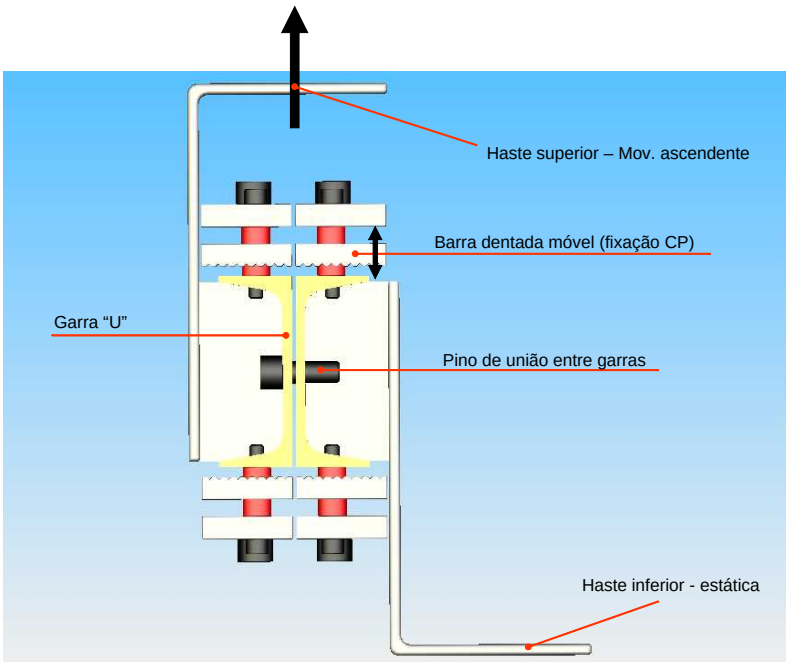
Figura 3.5– Mecanismo básico do ensaio CTM

3.1.5.2 Equipamentos

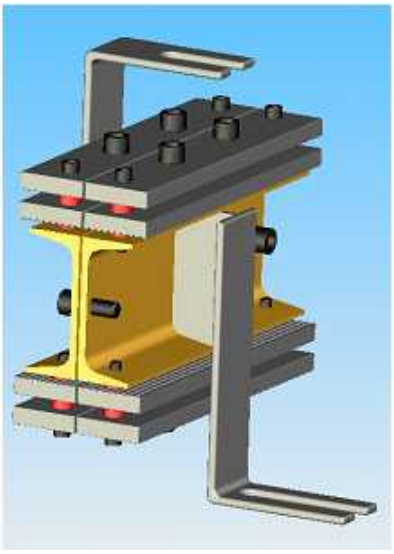
Os equipamentos utilizados para realização de ensaios CTM são:

- Máquina universal dotada de célula de carga de 10 tf e sistema eletrônico de aquisição de dados
- 2 garras "U"
- Dispositivos para auxiliar na preparação dos CPs e fixação das garras.

As garras "U" foram especialmente desenvolvidas para a realização dos ensaios do presente trabalho. As Figura 3.6 a e b mostram suas características básicas por meio de representação gráfica.



(a)



(b)

Figura 3.6– Representação gráfica da garra “U” desenvolvida para o ensaio CTM- (a) vista lateral, (b) perspectiva

3.1.5.3 Preparação dos corpos-de-prova

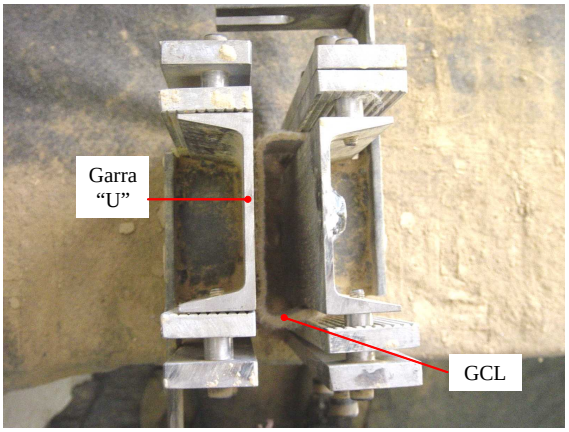
A Tabela 3.3 apresenta as dimensões dos CPs ensaiados na Fase I, pelo método CTM.

Tabela 3.3– Dimensões dos CPs- ensaio CTM- Fase I

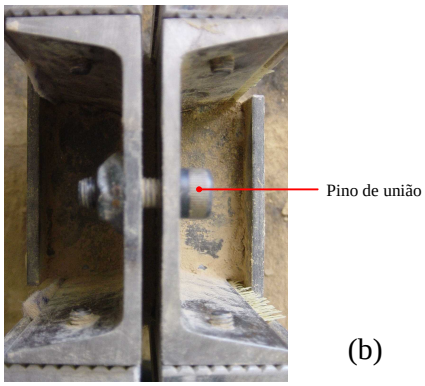
	Dimensões de corte		Cisalhamento	
CP	L (mm)	B (mm)	L (mm)	B (mm)
CTM 1	200	50	100	50
CTM 2	200	100	100	100
CTM 3	200	150	100	150
CTM 4	200	200	100	200

A preparação dos CPs, para o ensaio CTM, seguiu o mesmo procedimento descrito para o ensaio CT. Os CPs eram cortados nas dimensões especificadas, e os geotêxteis eram separados em uma extensão de 50 mm de cada extremidade. Os CPs eram então fixados

às garras sobre uma bancada, antes de serem levados à prensa. Optou-se pela fixação dos CPs por meio das abas dos dois geotêxteis, tanto na barra superior como na barra inferior, conforme mostra a Figura 3.7a. Com os CPs posicionados, as garras eram unidas provisoriamente, por meio de um pino de união, até serem levadas à prensa. As garras unidas eram fixadas à prensa pelas hastes superior e inferior, que possuíam cursos ajustáveis e garantiam o devido alinhamento da força aplicada em relação ao plano cisalhado.



(a)



(b)

Figura 3.7– (a) posicionamento do GT NT na garra "U" e (b) CP posicionado e garras unidas para serem levadas à prensa

A Figura 3.8 mostra a montagem padrão do ensaio CTM na iminência de ser iniciado.

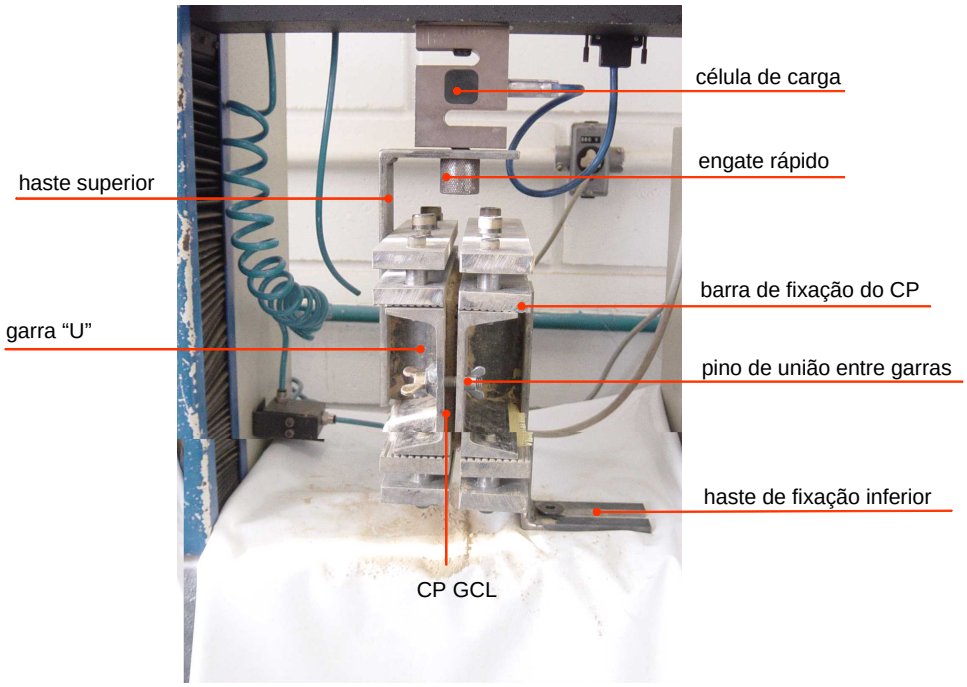


Figura 3.8– Montagem ensaio CTM

3.1.5.4 Medida da resistência ao cisalhamento no ensaio CTM

Após fixação e alinhamento das garras na prensa, a união provisória das mesmas é desfeita e o ensaio pode ser iniciado. Inicia-se a separação das garras até o registro de uma pré-carga de aproximadamente 1% da força máxima esperada para o ensaio. O ensaio era realizado com uma taxa de deslocamento constante de 50 mm/min, e os valores de resistência eram registrados no sistema eletrônico de aquisição de dados.

3.1.5.5 Determinação da resistência máxima de cisalhamento por tração

A resistência máxima de cisalhamento por tração do ensaio CTM (F_{CTMmax}) é determinada pela média dos valores máximos registrados para 5 CPs. Os valores de F_{CTMmax} são relatados em N e em N/mm para avaliação da influência da largura do CP nos resultados do ensaio.

3.1.6 Planejamento de ensaios

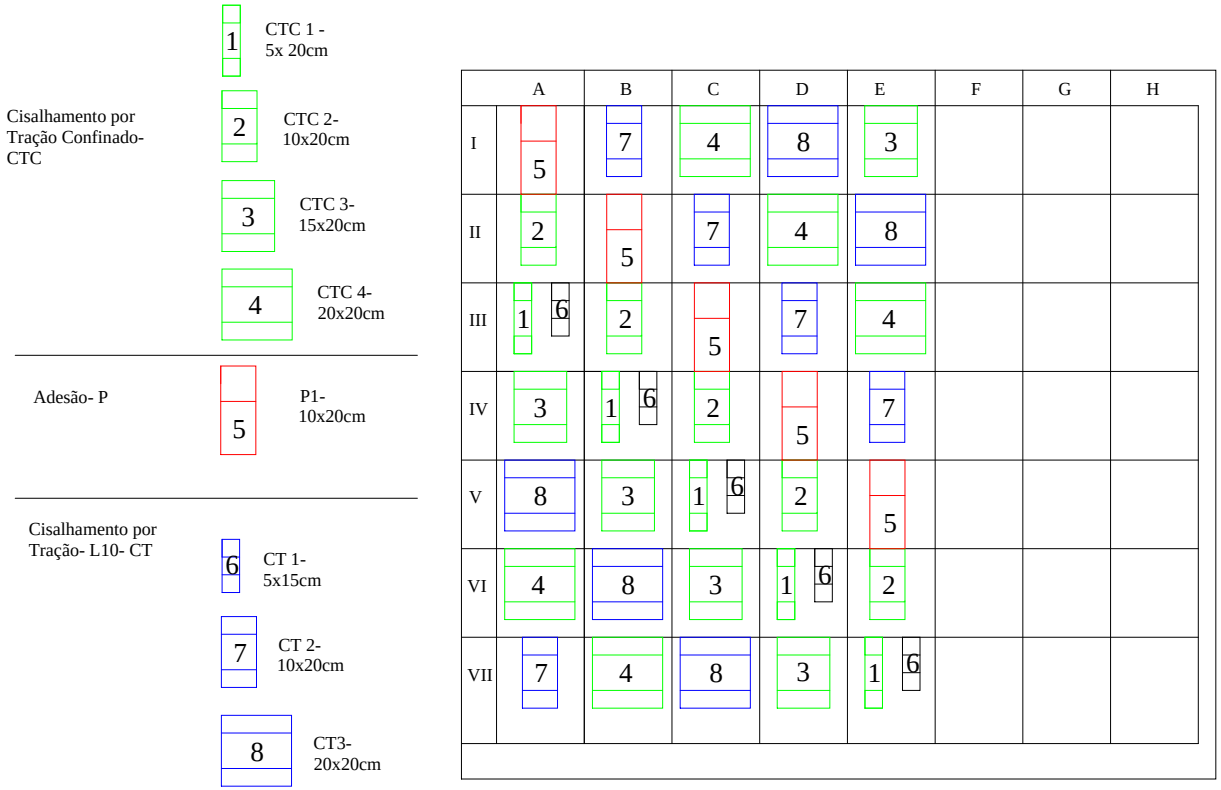
A execução dos ensaios foi planejada de forma a se obter informações consistentes em torno de aspectos importantes como;

- Avaliação do comportamento geral do ensaio CTM – Foram realizados 16 testes com CPs de larguras distintas em amostras com quatro níveis de resistência de adesão, para se avaliar a coerência dos resultados obtidos. Uma análise qualitativa sobre a praticidade na montagem do ensaio e a forma com que se dava a ruptura do CP foi, criteriosamente, realizada;
- Influência da largura dos CPs nos resultados dos ensaios CT e CTM – Buscou-se a determinação de uma largura adequada para realização dos ensaios na Fase II;
- Avaliação das características da curva força- deslocamento de cada ensaio;
- Determinação de correlações entre resultados dos três ensaios;
- Identificação de melhorias no ensaio CTM para próxima fase de desenvolvimento.

3.1.6.1 Seleção dos corpos-de-prova

A associação de dois geotêxteis, aliada ao processo de distribuição de bentonita e posterior agulhagem, provavelmente, confere um alto coeficiente de variabilidade aos resultados de resistência de adesão ou cisalhamento em GCLs. Zornberg et al. (2005) comparou uma série de resultados de ensaios de cisalhamento direto, executados com GCLs de lotes e fabricantes distintos, produzidos ao longo de 7 anos. O autor relata que a variabilidade encontrada nos resultados se aproxima de 55%. Relata ainda que ao considerar resultados de ensaios feitos no mesmo laboratório e com amostras do mesmo lote de fabricação, a variabilidade era de 6% apenas. Com base nesses fatos e considerando o objetivo de comparar resultados de ensaios distintos, definiu-se um posicionamento lógico entre todos os CPs ensaiados na presente fase, de forma a minimizar o efeito de variabilidade de fabricação dos GCLs amostrados.

A Figura 3.9 mostra a disposição de todos os CPs ensaiados e suas respectivas identificações. Esse procedimento foi repetido para as quatro amostras ensaiadas. É importante observar que todos os CPs foram retirados na diagonal, ao longo da largura, e que estão alinhados em uma faixa de 25cm. Sendo assim, todos os ensaios foram realizados com CPs obtidos de trilhas de agulhagem próximas. A identificação dos CPs e a ordem com que eram rompidos, permitiram relacionar cada curva obtida, com a posição em que foi retirado o CP na amostra ensaiada. Os primeiros CPs ensaiados eram sempre os localizados na coluna A e assim por diante, até a coluna E. Na primeira fase de ensaios foram realizados 32 testes sendo 16 CTM, 4 P e 12 CT.



CLASSIFICAÇÃO GERAL

AMOSTRA

ANTES TROCA- AT
APÓS TROCA- PT

MASSA BENTONITA - 3,6 kg/m² - 3.6
5,0 kg/m²- 5.0

4 AMOSTRAS ENSAIADAS

PT 3.6
PT 5.0
AT 3.6
AT 5.0

32 TESTES REALIZADOS

PT 3.6 - CTC 1 / CTC 2 / CTC 3 / CTC 4/ P / CT 1/ CT 2 CT 3
PT 5.0 - CTC 1 / CTC 2 / CTC 3 / CTC 4/ P / CT 1/ CT 2 CT 3
AT 3.6 - CTC 1 / CTC 2 / CTC 3 / CTC 4/ P / CT 1/ CT 2 CT 3
AT 5.0 - CTC 1 / CTC 2 / CTC 3 / CTC 4/ P / CT 1/ CT 2 CT 3

Figura 3.9– Disposição e identificação dos CPs, classificação das amostras e ensaios realizados

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados- Fase I

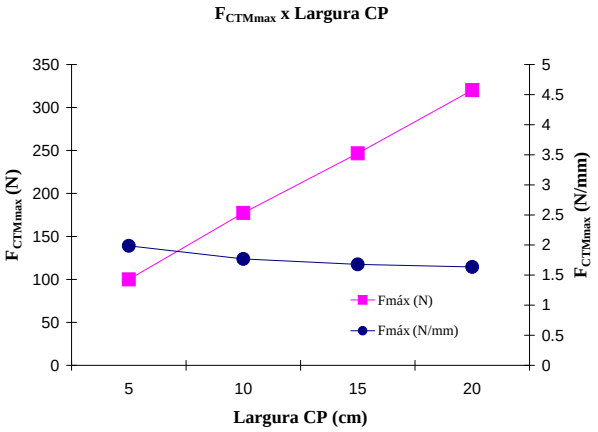
Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos na realização dos ensaios da fase I. A Tabela 4.1 apresenta um resumo de todos os resultados obtidos. As discussões são inicialmente feitas individualmente para, então, serem relatadas algumas correlações de resultados entre ensaios.

Tabela 4.1– Resultados da série de ensaios realizados- Fase I

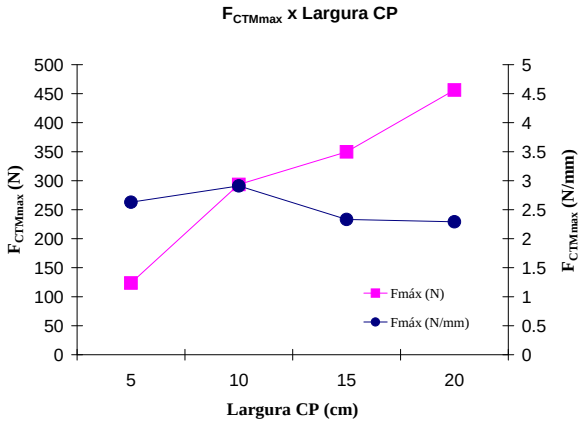
Amostra	B CP	RESULTADOS																
		Adesão - P					CT						CTM					
		Fmáx		Fméd			Fmáx		Fmáx		Desl. Fmáx		Fmáx		Fmáx		Desl. Fmáx	
	(cm)	(N)	CV (%)	(N)	CV(%)	Fmed/Fmáx	(N)	CV(%)	(N/mm)	CV (%)	(mm)	CV (%)	(N)	CV (%)	(N/mm)	CV (%)	(mm)	CV (%)
AT 3.6	5						33.8	6.667	0.684	5.119	18.36	18.37	99.94	12.32	1.987	12.77	24.39	34.01
	10	19.79	34.32	10.69	31.1	0.54	100.6	14.38	1.006	14.38	22.3	39.57	177.4	21.01	1.769	20.96	19.46	11.83
	15												246.6	14.88	1.679	14.72	19.39	12.93
	20						178.8	7.783	0.8941	7.783	25.51	12.03	320.2	22.88	1.635	23.32	20.93	25.91
PT 3.6	5						77.29	40.83	1.55	40.88	44.88	35.59	123.6	18.83	2.629	18.57	36.44	31.85
	10	32.72	44.48	17.858	41.852	0.55	172.9	36.09	1.713	36.44	32.48	30.04	293.4	38.58	2.91	39.05	24.05	30.03
	15												349.8	22.41	2.333	22.5	27.46	24.24
	20						460.2	36.78	2.338	36.66	38.59	20.61	456.3	36.15	2.292	35.54	29.88	34.91
AT 5.0	5						21.28	25.67	0.4638	30.46	26	29.84	74.33	19.04	1.491	18.12	19.43	23.13
	10	14.14	53.03	7.19	34.652	0.51	81.2	20.83	0.8363	21.6	24.71	31.87	200.1	25.14	1.97	24.81	20.71	10.6
	15												223.9	30.58	1.547	30.25	20.24	6.607
	20						139.2	22.81	0.7297	22.92	30.14	16.34	317.4	8.131	1.647	7.97	22.25	14.15
PT 5.0	5						44.97	27.57	0.9753	24.17	33.1	24.18	127	18.85	2.839	18.95	33.41	39.8
	10	35.95	42.69	24.48	36.23	0.68	156.2	33.78	1.616	32.85	41.32	32.31	264.1	21.03	2.675	20.1	24.73	27.66
	15												427.4	27.27	2.919	26.87	26.12	32.65
	20						393.2	31.77	2.062	31.3	38.32	16.68	569.3	25.03	2.975	24.86	32.71	18.47

4.1 Ensaio de cisalhamento por tração confinado – CTM

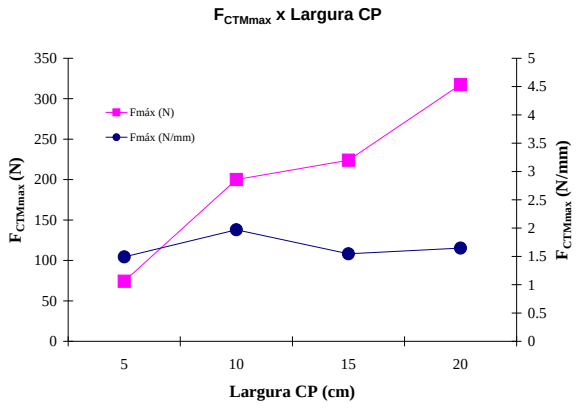
Conforme já relatado, foram realizados 16 testes pelo método CTM. Os testes foram executados para 4 amostras com níveis de adesão diferentes e 4 larguras (B) de CP distintas. As Figura 4.1(a), (b), (c) e (d) apresentam, para as 4 amostras ensaiadas, curvas F_{CTMmax}, em N e N/mm, x B (cm).



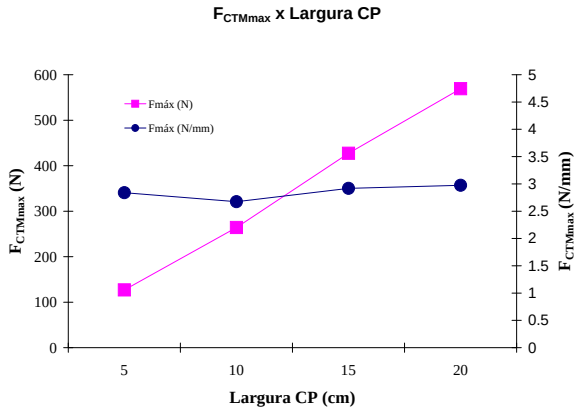
(a)



(b)



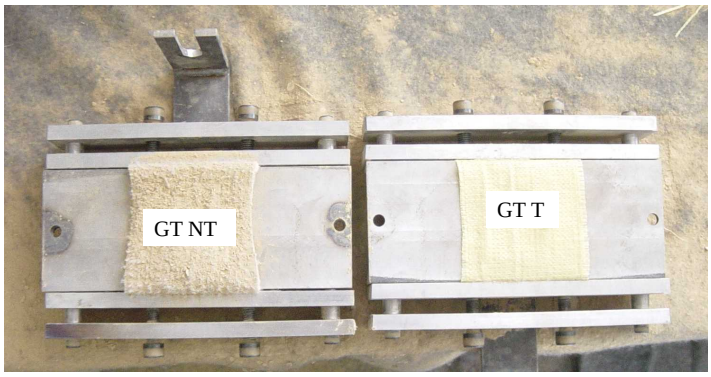
(c)



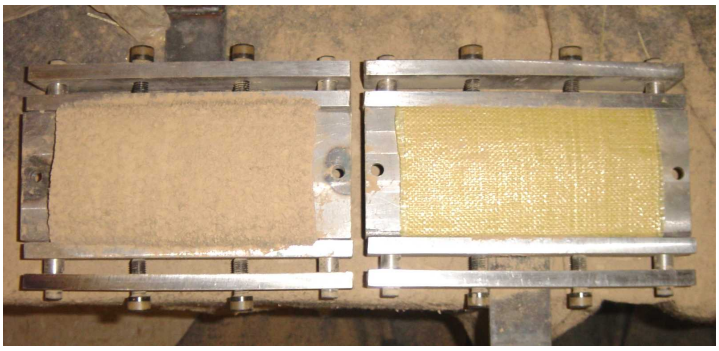
(d)

Figura 4.1– Curvas F_{CTMmax} vs. Largura CP: (a) AT 3.6; (b) PT 3.6; (c) AT 5.0; (d) PT 5.0.

Pode-se observar que a largura do CP pouco influi nos resultados do ensaio CTM. A resistência máxima aumenta de forma quase linear com o aumento da largura. Tal fato pode ser explicado pela pequena estricção observada nos CPs após a realização do ensaio, o que pode visto nas Figura 4.2(a) e (b).



(a)



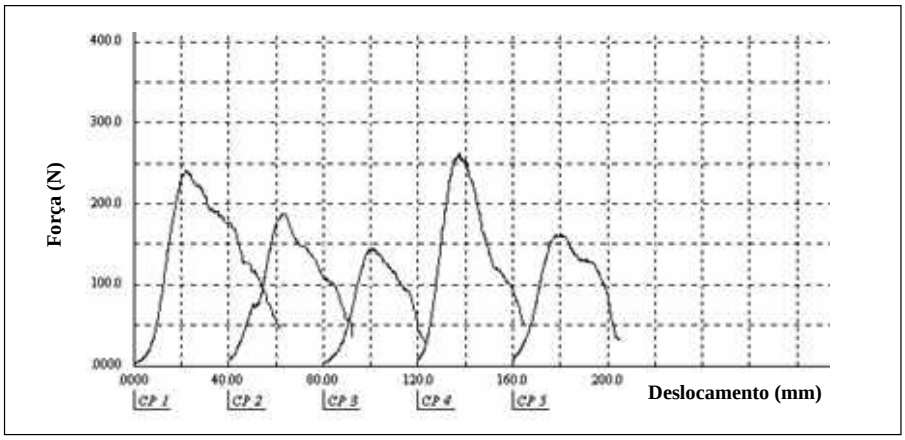
(b)

Figura 4.2 – Aspecto dos CPs após execução do ensaio CTM: (a) CTM2; (b) CTM4

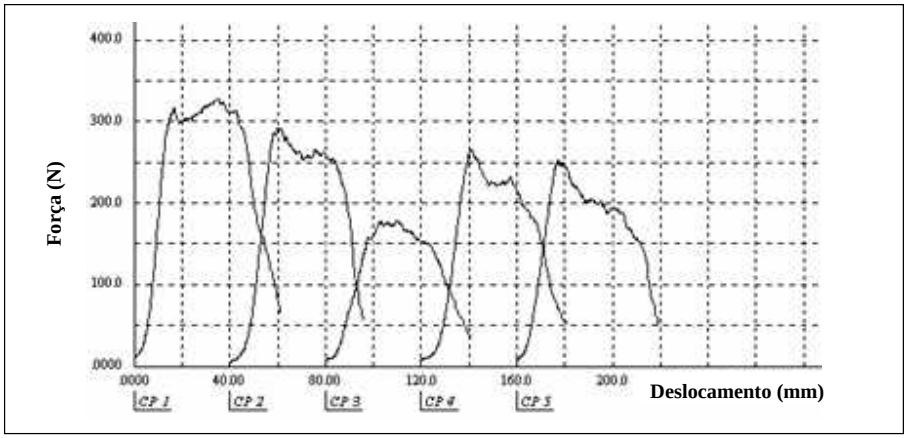
Os valores F_{CTMmax} apresentam-se mais baixos para a amostra AT 5.0. A maior quantidade de bentonita (5,00 kg/m²) confere ao material um aumento de espessura, o que acelera o desgaste das agulhas durante a produção do GCL, em função da abrasão com a bentonita. Entretanto, para amostras PT, ocorre justamente o contrário; os valores F_{CTMmax} são mais baixos para CPs com menor quantidade de bentonita. Essa hipótese pode levar à conclusão de que, no instante da coleta da amostra AT 5.0, as agulhas apresentavam maior nível de desgaste que no caso da amostra AT 3.6. Com agulhas igualmente desgastadas, como no caso das amostras PT, a maior quantidade de bentonita seca parece contribuir para a resistência de adesão da amostra. O mesmo efeito que gera aceleração do desgaste das agulhas parece atuar a favor da resistência de adesão entre os geotêxteis por aumentar o atrito entre as fibras e a bentonita. Analisando os valores do ensaio P, o mesmo comportamento é verificado.

4.1.1 Curva força versus deslocamento – Ensaio CTM

As curvas força-deslocamento do ensaio CTM apresentaram, até a condição de pico, formato análogo às tipicamente encontradas nos resultados de ensaios de cisalhamento direto. Na situação pós-pico à, aproximadamente, 70% da força F_{CTMmax}, observa-se à formação de um patamar e logo uma nova queda de resistência até a condição residual. Esse comportamento é mais acentuado nos casos de testes com amostras PT. As Figura 4.3(a) e (b) mostram curvas típicas de testes com amostras AT e PT, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.3– Curvas força-deslocamento – ensaio CTM: (a) AT 5.0; (b) PT 5.0

Ao observar atentamente o desenvolvimento do ensaio CTM, nota-se a ocorrência de dois processos simultâneos de separação dos geotêxteis, o cisalhamento ao longo do plano do CP (Processo A), e uma extração de fibras (Processo B), similar ao que ocorre no ensaio de adesão P. Ressalta-se que esses processos ocorrem em extremidades opostas do CP. Por exemplo, supondo que o GT NT esteja em ascendência durante o ensaio, à medida que as garras iniciam a sua separação, O GT NT será solicitado com mais intensidade, na região próxima à garra superior, uma vez que se encontra fixo apenas nas extremidades. Com o desenvolvimento do ensaio, a tensão ao longo do CP é gradualmente distribuída até se uniformizar. Na extremidade inferior do CP, ao iniciar o ensaio, a tensão transmitida por cisalhamento a esta seção é praticamente nula. No entanto, a extremidade inferior do geotêxtil fixa à garra, tende a iniciar um processo de subida antes da transmissão da tensão de cisalhamento ao longo do corpo do CP. Ocorre, portanto, um processo de cisalhamento (Processo A) na parte superior do CP e de extração (Processo B) na extremidade inferior do mesmo. A situação de pico parece ser atingida no instante em que o processo B diminui a sua contribuição, devido à uniformização de tensão de cisalhamento ao longo do CP. O patamar identificado na fase pós-pico, provavelmente, ocorre em função do fim do processo B, quando o cisalhamento ainda acontece com valores máximos. As Figura 4.4(a) e (b) apresentam a hipótese descrita, graficamente. A Figura 4.4(c) representa o comportamento típico da curva tensão-deslocamento para o ensaio CT, durante o qual apenas o processo de cisalhamento é verificado. Nota-se que a situação de pico, no ensaio CT, é definida por um patamar, o que pode reforçar a suposição sobre a forma da curva nos ensaios CTM.

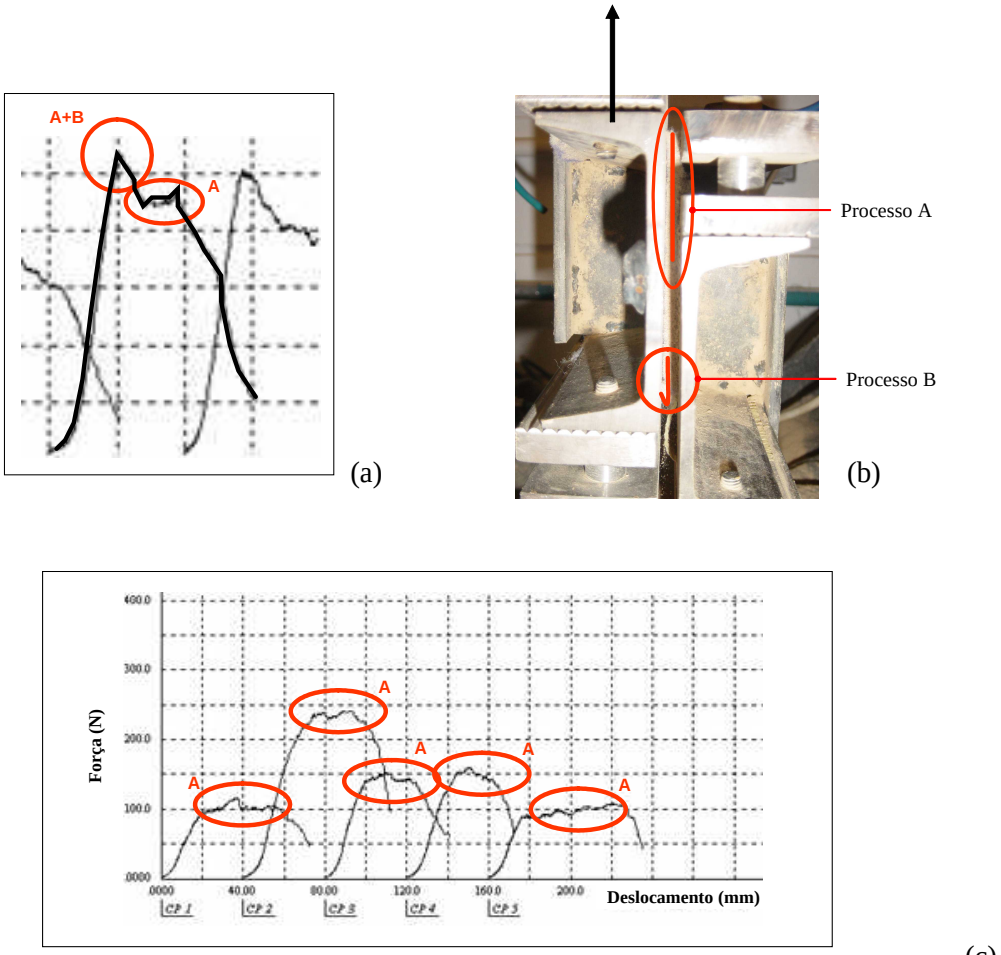


Figura 4.4– Representação gráfica dos processos simultâneos A e B- ensaio CTM: (a) curva força versus deslocamento CP CTM 4 PT 5.0; (b) Instante intermediário do ensaio CTM; (c) Ensaio CT- curvas força versus deslocamento típicas

As curvas força-deslocamento relativas às amostras AT (Figura 4.3a), mostram que o fenômeno descrito é atenuado. Talvez, por possuírem menores resistências de adesão. Existem duas alternativas para eliminar o processo de extração identificado; a não fixação da extremidade inferior do geotêxtil nãotecido, ou a aplicação de uma tensão normal sobre toda superfície do CP, de modo que a tensão de cisalhamento seja transferida uniformemente ao longo do mesmo desde o instante inicial do ensaio. A primeira alternativa será adotada na

Fase II de ensaios pois o dispositivo de aplicação de tensão normal no ensaio CTM não é o atual objetivo.

4.2 Ensaio de cisalhamento por tração – CT

Foram realizados 12 testes CT nas mesmas condições que os ensaios CTM, ou seja, mesmos procedimentos de amostragem, preparação dos CPs e velocidade de ensaio.

A Figura 4.5 apresenta curvas que avaliam a influência da largura dos CPs na execução do ensaio CT. A relação LxB dos CPs parece ser mais influenciável nesse ensaio, no entanto, um comportamento padrão não foi identificado. Para amostras AT, a força $F_{CTmáx}$, expressa em N/mm, tende a um leve decréscimo, enquanto que para amostras PT, pode-se observar um aumento substancial.

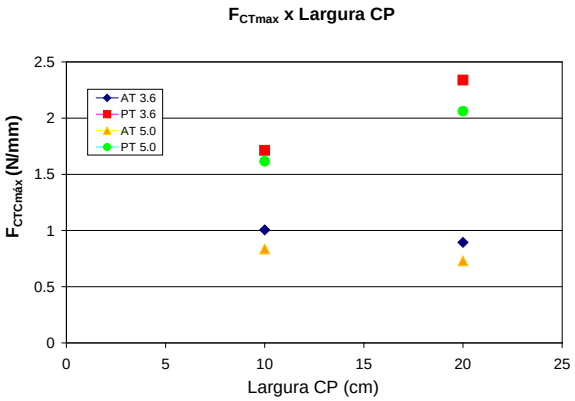


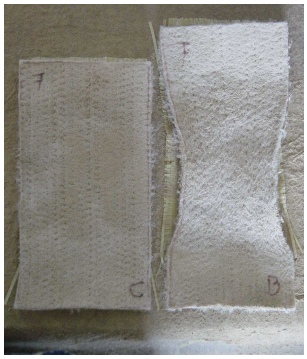
Figura 4.5– Análise da influência da largura do CP na determinação de F_{CTmax}

O efeito de estricção dos CPs no ensaio CT é consideravelmente mais nítido que no caso do ensaio CTM, principalmente para amostras PT, devido à sua maior resistência de adesão. As Figura 4.6(a), (b) e (c) mostram o aspecto de um CP , obtido de uma amostra PT durante e após o ensaio CT. Pode-se observar a formação de estrias (Figura 4.6b) ao longo do

CP. Tais estrias, possivelmente, geram concentração de tensões de cisalhamento em algumas trilhas de agulhagem, resultando em uma solicitação desuniforme do CP.

(a)

(b)



(c)

Figura 4.6– Estricção dos CPs obtidos de amostras PT: (a) CP CT2- estricção no geotêxtil nãotecido; (b) CP CT2- formação de estrias no geotêxtil tecido; (c) comparação entre CP rompido e intacto.

4.2.1 Curva força versus deslocamento – Ensaio CT

O comportamento típico das curvas força-deslocamento dos ensaios CT é apresentado na Figura 4.4c. Não parece haver uma nítida diferença entre as curvas obtidas para as diferentes amostras ensaiadas. A situação de pico é caracterizada pela formação de um patamar que se inicia para deslocamentos próximos de 20 mm, o que se mostra coerente conforme já relatado no item 4.1.1.

4.3 Ensaio de adesão – P

O ensaio de adesão (P), mais comumente empregado para obtenção de índices de resistência de adesão em GCLs agulhados, foi realizado 4 vezes na presente série de testes. Seus resultados, apresentados na Tabela 4.1, mostram F_p (N) mais elevado para amostras PT, com coeficiente de variação (CV) próximo de 35%. Nos testes com amostras AT, os resultados de F_p são mais elevados para CPs com menor quantidade de bentonita. O contrário ocorre para amostras PT. A provável explicação para esse fato é relatada em 4.1.1 .

4.3.1 Curva força versus deslocamento – Ensaio P

As curvas força-deslocamento do ensaio P diferem totalmente daquelas observadas no ensaio CT e CTM. Tendo em conta que a metodologia empregada, confere um mecanismo de ruptura muito particular, as curvas resultantes do ensaio P apresentam vários picos máximos e mínimos conforme pode ser visto na Figura 4.7.

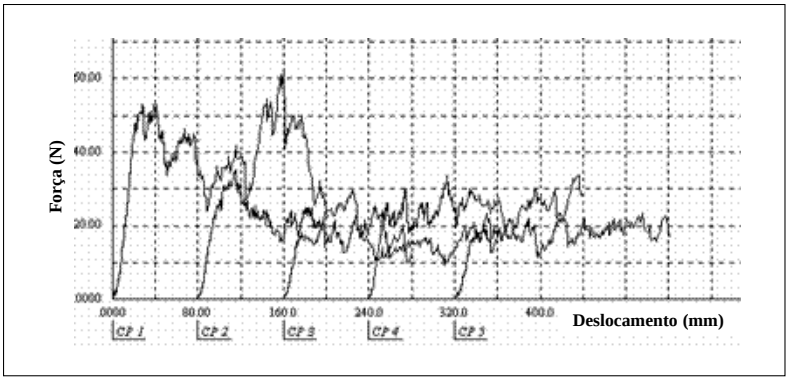


Figura 4.7– Curvas tensão-deformação típicas – Ensaio P

O formato das curvas é facilmente compreendido ao se analisar o mecanismo de extração das fibras durante o ensaio. A Figura 4.8 apresenta o aspecto do ensaio P durante o seu desenvolvimento, explicitando a forma de solicitação das fibras agulhadas. Com o afastamento das garras, os geotêxteis se separam e, a cada instante, uma determinada seção é solicitada. Os picos máximos são gerados na ocorrência de uma seção com maior nível de entrelaçamento do GT NT com o núcleo e com o GT T.

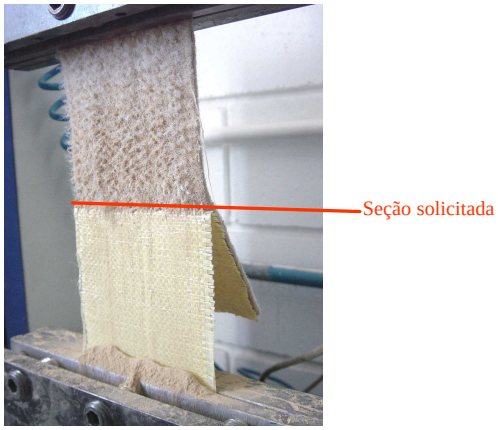
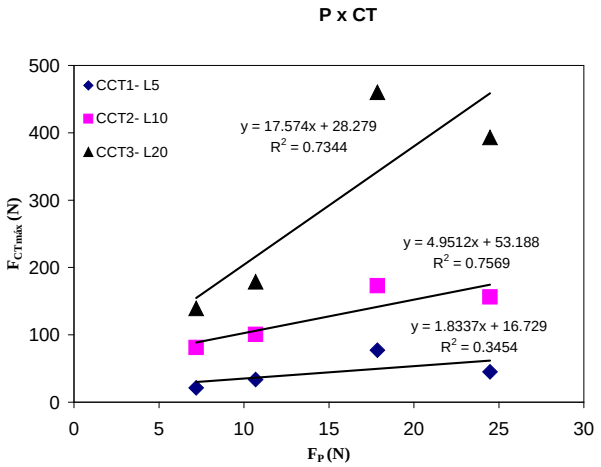


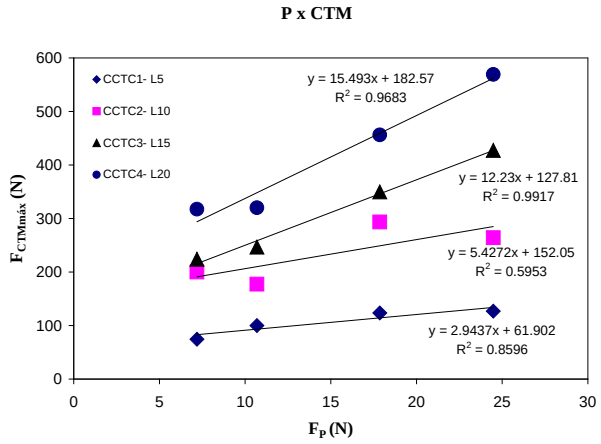
Figura 4.8– Ensaio P durante sua execução

4.4 Comparação entre os métodos

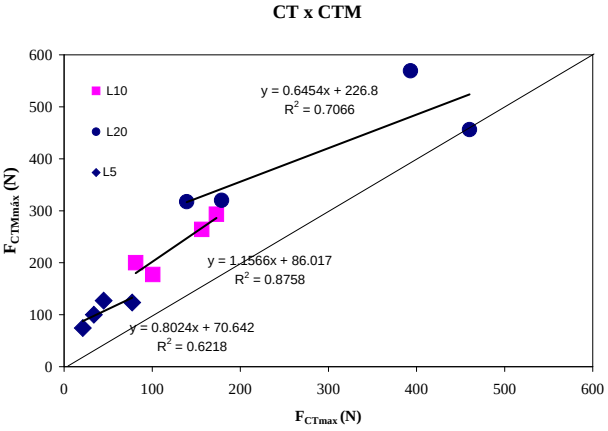
Com base nos resultados obtidos, algumas correlações entre os diferentes ensaios foram realizadas e são apresentadas nas Figura 4.9(a), (b) e (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9– Correlação de resultados entre os diferentes tipos de ensaio: (a) PxCT; (b) PxCTM; (c) CTxCTM

Observou-se uma boa correlação de resultados entre os ensaios realizados, destacando a ocorrida entre o ensaio de adesão P e o ensaio proposto CTM. Nota-se que, neste caso, apenas para CP com largura de 10cm a correlação não apresenta um bom comportamento. Não existe um motivo claro para o ocorrido uma vez que larguras superiores e inferiores se correlacionaram bem. A Tabela 4.2 apresenta algumas comparações, de ordem qualitativa, dos ensaios realizados.

Tabela 4.2– Comparação qualitativa entre ensaios P, CT e CTM.

Aspecto	**P**	**CT**	**CTM**
Apresentação dos resultados	Valores médios de 5 CPs reportados em N ou N/cm. E comum encontrar valores reportados em N/10cm	Média dos valores máximos encontrados para 5CPs, reportado em N, N/unidade de largura ou em kPa.	Média dos valores máximos encontrados para 5CPs, reportado em N, N/ unidade de largura ou em kPa.
Variabilidade	Apresenta o maior coeficiente de variabilidade entre os ensaios comparados, aprox. 35%	Variabilidade equivalente variando de 10 a 30% por amostra ensaiada	
Curvas tensão-deslocamento	Formato irregular com inúmeros picos máximos e mínimos. Difícil interpretação	Apresenta bom comportamento. Na situação de pico apresenta um patamar. Deslocamento na situação de pico próximo de 20%	Apresenta comportamento levemente distinto entre amostras com valores F_p muito distintos. Há uma tendência de aparecimento de um patamar intermediário na situação pós-pico, para amostras com F_p mais elevados.
Praticidade	Apresenta maior praticidade	Apenas diferencia do ensaio P na preparação do CP. Muito prático	Bastante prático, no entanto, o fato de ser necessária a fixação do CP à garra em uma bancada, torna sua execução um pouco mais lenta que os demais.
Versatilidade	Pouco versátil pois pode apenas ser aplicado para GCLs agulhados	Versátil. Pode ser aplicado para GCLs agulhados ou costurados	Extremamente versátil pois permite ensaiar qualquer tipo de GCL reforçado com a vantagem de, no futuro, possibilitar a incorporação de sistema de aplicação de tensão normal e hidratação.
Custo	Todos os ensaios apresentam custos de execução irrelevantes frente ao ensaio de cisalhamento direto		

4.5 Considerações Finais- Fase I

A fase I de ensaios procurou expor vários aspectos relativos à realização de ensaios rápidos de adesão e cisalhamento por meio de três procedimentos. Um dos procedimentos utilizados, o ensaio CTM, é proposto como uma nova metodologia cujas principais vantagens residem na possibilidade futura de incorporação de sistemas de aplicação de tensão normal ao CP. Os resultados de cada ensaio foram analisados individualmente para, então, serem correlacionados. Essa fase permite algumas conclusões que auxiliarão no direcionamento da próxima etapa de testes;

- A metodologia de seleção de amostras e preparo dos CPs foi extremamente criteriosa, o que tornou a comparação entre os métodos bastante confiável;
- O ensaio CTM apresentou muito bom comportamento, uma vez que se correlacionou bem com ensaios já investigados por outros autores;
- A largura do CP parece não influenciar os resultados do ensaio CTM;
- A estricção do CP observada no ensaio CT parece ser resolvida no CTM;
- A constatação de processos simultâneos de cisalhamento e extração (Processos A e B) ao longo do ensaio, levou a uma alteração de sua montagem para a próxima fase de testes;
- Tendo em conta o aprendizado adquirido na presente fase de testes, algumas atividades são propostas para a segunda fase de ensaios;
    - Seleção de amostras com dois níveis de adesão (Rolo A e B), adotando os critérios de preparação dos CPs análogos ao da Fase I;

- Realização de ensaios de cisalhamento direto em equipamento convencional com CPs 100 x 100 mm para serem correlacionados com ensaios CTM com CPs de mesmas dimensões (CP CTM 2);
- Execução do ensaio CTM com alteração na forma de fixação do CP para evitar ocorrência do processo de extração (Processo B) e avaliar a sua influência nos resultados.

Capítulo 5 – Materiais e Métodos - Fase II

Na presente fase do trabalho foram executados ensaios de cisalhamento direto e CTM. O ensaio CTM foi executado em duas configurações, CTM A e CTM B. O objetivo da Fase II é a comparação dos ensaios realizados por meio de correlação de seus resultados e análise qualitativa dos métodos.

5.1 Propriedades dos GCLs ensaiados

Na fase II de ensaios, foram testadas duas configurações de GCLs AG T/NT que se diferenciavam apenas na quantidade de bentonita. As principais propriedades dos materiais ensaiados são apresentadas na Tabela 5.1. A metodologia de amostragem empregada visou obtenção de amostras que apresentavam dois níveis distintos de adesão entre os geotêxteis. Para isso foram solicitadas amostras que apenas se diferenciavam pela quantidade de bentonita por unidade de área. As amostras foram identificadas pelo fabricante como Tipo A e Tipo B.

Tabela 5.1– Propriedades dos GCLs ensaiados na Fase II

Propriedade	Norma	un	Tipo A – (4.1)	Tipo B- (5.0)
GEOCOMPOSTO BENTONÍTICO				
Resistência à Tração	ASTM D 6768	kN/m	12,20	12,20
Coeficiente de Permeabilidade	ASTM D 5887	m/s	$2,85 \times 10^{-11}$	$2,85 \times 10^{-11}$
Massa de bentonita por unidade de área (seca)	ASTM D 5993	kg/m^2	4,10	5,00
Bentonita		v. Tabela 3.1		
GEOTÊXTIL NÃOTECIDO- SUPERIOR				
Matéria- Prima			Polipropileno	
Gramatura	ASTM D 5261	g/m^2	350	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido T	ASTM D 4595	kN/m	17	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido L	ASTM D 4595	kN/m	14	
GEOTÊXTIL TECIDO- SUPORTE				
Matéria-prima		Polipropileno		
Gramatura	ASTM D 5261	g/m^2	110	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido T	ASTM D 4595	kN/m	10	
Resistência à Tração – Faixa Larga – sentido L	ASTM D 4595	kN/m	10	

5.2 Preparação e acondicionamento das amostras

As amostras foram preparadas no fabricante e fornecidas em bobinas com largura de 2,30m, em embalagens totalmente estanques e devidamente protegidas contra danos

mecânicos. As mesmas foram acondicionadas de forma a não alterar suas propriedades iniciais, até o momento de preparação dos CPs e início dos ensaios.

5.3 Ensaio de Cisalhamento por Tração Modificado (CTM)

O ensaio de cisalhamento por tração modificado foi executado em duas configurações (CTM A e CTM B) com CPs de dimensões 100 x 200 mm (CP CTM 2). A configuração CTM A seguiu o procedimento de ensaio CTM descrito no item 3.1.5. A configuração CTM B, por sua vez, foi executada para avaliar a real influência do processo de extração de fibras verificado no ensaio CTM durante a fase I. O CP, nessa configuração, é fixo à garra "U" da forma mostrada na Figura 5.1, sendo essa a única distinção em relação ao procedimento do ensaio CTM A.

- Geotêxtil tecido – Fixo em ambas as extremidades
- Geotêxtil não tecido – Cortado na porção inferior e fixo apenas na extremidade superior

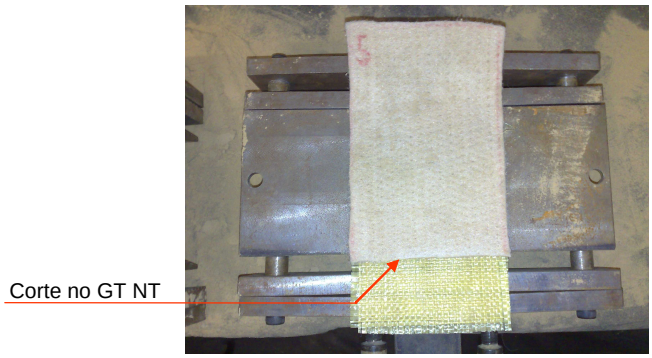


Figura 5.1– Preparação do CP para realização do ensaio CTM B

5.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Basicamente, o procedimento de execução de ensaio de cisalhamento direto executado na presente fase pode ser dividido em três etapas: preparação dos CPs, hidratação sob confinamento e cisalhamento. Os itens subseqüentes descrevem os métodos e equipamentos utilizados em cada uma das etapas.

5.4.1 Preparação dos CPs

Corpos-de-prova de aproximadamente 250 mm x 140 mm eram inicialmente cortados de 2 rolos de amostras, tipo A e B. As extremidades dos CPs eram cortadas cuidadosamente até atingirem as dimensões especificadas (Figura 5.2), sem que houvesse perda de bentonita do núcleo do GCL.

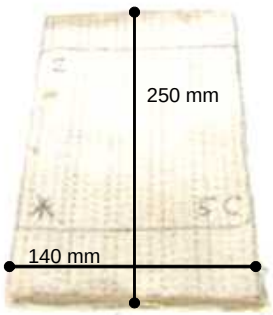


Figura 5.2- CP empregado no ensaio de cisalhamento direto.

Os CPs eram, então, pesados e suas dimensões exatas eram determinadas com o propósito de se aferir sua gramatura (massa por unidade de área), correspondente à umidade higroscópica da componente bentonita (da ordem de 13%). Assim, o CP era colado sobre

um suporte de madeira, dotado de canalículos transversais e de orifícios verticais, que permitiam o acesso da água de hidratação, através do geotêxtil tecido inferior assentado sobre o suporte (Figura 5.3).

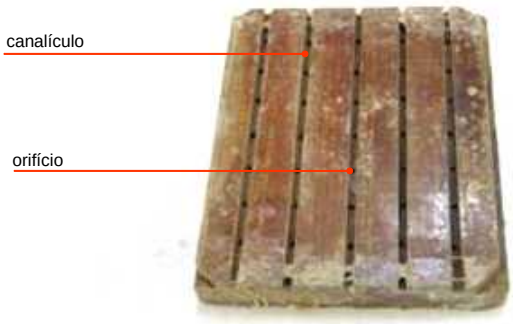


Figura 5.3- Face inferior do suporte de madeira: detalhe dos canalículos transversais e dos orifícios verticais destinados a facilitar a hidratação do GCL no sentido ascendente.

Sobre a face superior desse suporte de madeira, era traçada uma área quadrangular de aproximadamente 100 mm x 100 mm, correspondente à área a ser cisalhada durante a etapa de cisalhamento (Figura 5.4). O GT T não era colado sobre toda essa área a fim de evitar a aderência das fibras do GT NT, que traspassam o plano do GT T. Tal fato geraria um efeito que afetaria enormemente os resultados do ensaio. Assim, o geotêxtil tecido foi colado apenas sobre as margens externas a esta área quadrangular.

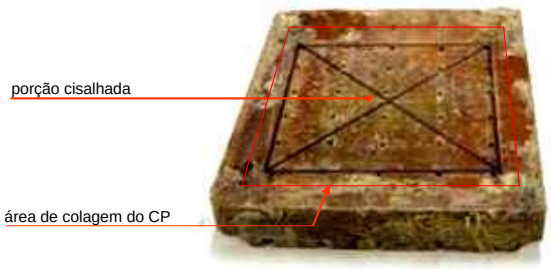


Figura 5.4- Face superior do suporte de madeira: detalhe da área periférica sobre a qual o CP é colado.

Para evitar a colagem da área quadrangular a ser cisalhada, um traçado similar àquele desenhado sobre o suporte de madeira, era realizado sobre o GT T a fim de garantir a superposição das duas áreas quando da realização da colagem. O anel de cisalhamento foi utilizado como referência para a realização desse traçado (Figura 5.5)

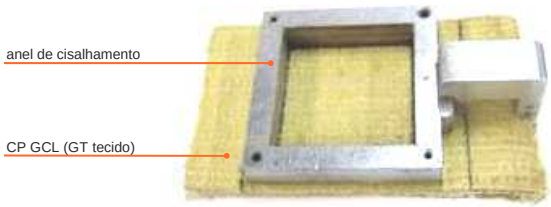


Figura 5.5- Marcação da área retangular livre de colagem sobre o GT T.

Uma cola de alta resistência era espalhada sobre as margens externas à área quadrangular, seja no suporte de madeira, seja na superfície do GT T. Passados 20 minutos, o suporte de madeira era assentado sobre o GT T, tomando-se cuidado para que as respectivas áreas quadrangulares fossem superpostas (Figura 5.6).

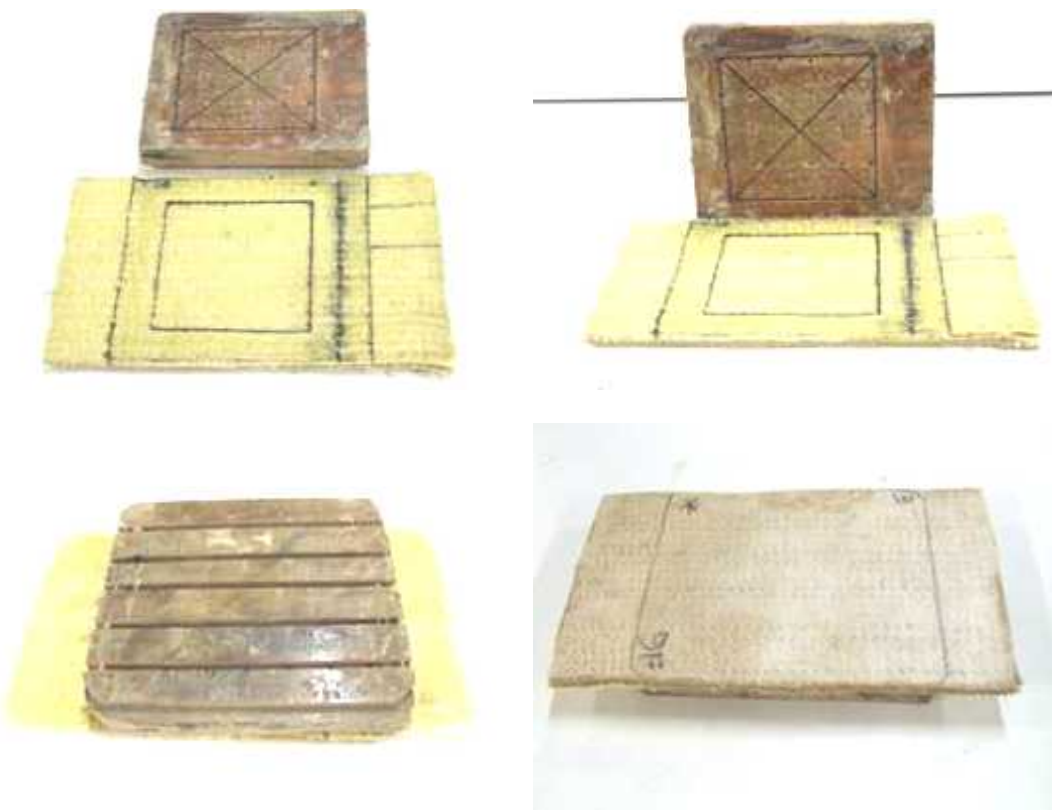


Figura 5.6- Colagem da amostra de GCL sobre o suporte de madeira com especial atenção para a superposição das áreas quadrangulares.

Feita essa colagem inicial da parte central do GT T, as bordas superior e inferior do CP eram separadas (Figura 5.7a) para que o GT NT fosse posteriormente cortado. Com o corte do GT NT, as porções remanescentes de GT T (Figura 5.7b) poderiam coladas no entorno das extremidades do suporte de madeira para reforçar ainda mais a fixação do CP sobre esse suporte. Tal colagem ocorria em fase posterior de preparação do CP é descrita ao longo do presente capítulo.

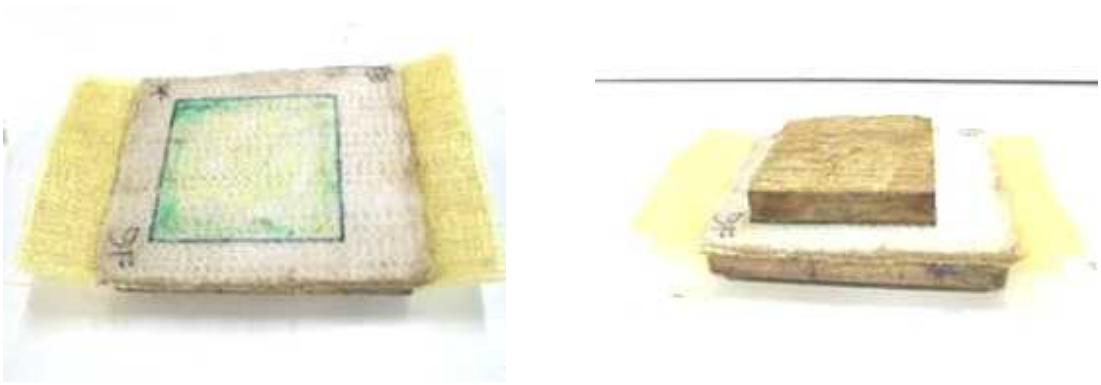
(a)

(b)

Figura 5.7- (a) Procedimento de eliminação das bordas do GT NT; (b) detalhe das bordas remanescentes do GT T que seriam posteriormente coladas ao suporte de madeira.

Utilizando-se o anel de cisalhamento como referência, traçava-se sobre a superfície do GT NT os limites da área quadrangular, sobre a qual era colada uma placa de madeira de mesmas dimensões internas do anel, 100 x 100 mm (Figura 5.8).

(a)



(b)

Figura 5.8- (a) Marcação da área de cisalhamento sobre o GT NT; (b) Colagem da placa de madeira sobre a área cisalhada

Nesse momento, as bordas do GT T eram coladas ao suporte de madeira, envolvendo-o, conforme mostra a Figura 5.9.

Figura 5.9- Colagem das bordas remanescentes do GT T ao redor das extremidades do suporte de madeira.

Por fim, a superfície do GT NT, exterior à área de cisalhamento, ou seja, exterior à área onde foi colada a placa de madeira, era cortada. Assim, o ensaio de cisalhamento é feito exclusivamente sobre a área quadrangular contemplada pela placa de madeira (Figura 5.10).

Figura 5.10. Aspecto final da amostra a ser cisalhada com detalhe da placa de madeira colada sobre o GT NT.

5.4.2 Hidratação da Amostra sob carregamento

A hidratação de cada CP, anterior à fase de cisalhamento, foi realizada numa montagem à parte daquela correspondente ao ensaio de cisalhamento direto. Tendo sido preparados os CPs, segundo procedimentos descritos no item anterior, os mesmos eram envolvidos por anéis de cisalhamento a fim de se evitar ou minimizar eventuais perturbações nas amostras quando da montagem do ensaio na caixa de cisalhamento direto (Figura 5.11).

Figura 5.11. Anel de cisalhamento envolvendo o CP a ser hidratado.

O conjunto era posteriormente colocado no interior de reservatórios metálicos retangulares apoiados sobre uma trave de carregamento, conforme mostra a Figura 5.12.

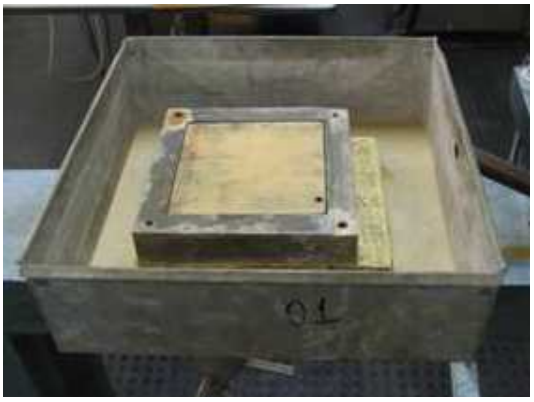
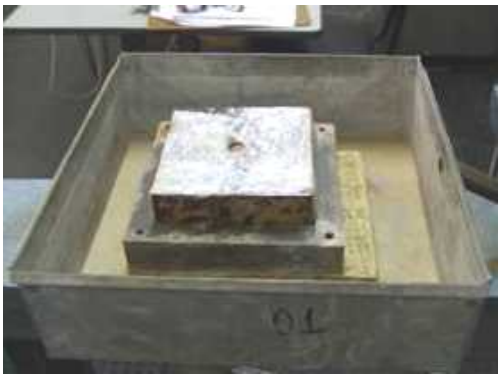


Figura 5.12- Conjunto anel-amostra assentado no interior do reservatório metálico.

O carregamento do CP é feito de forma similar ao procedimento de ensaio de cisalhamento direto, com o posicionamento da almofada de carregamento (Figura 5.13a), da haste metálica (Figura 5.13b) e do braço de alavanca com os discos metálicos de carregamento (Figura 5.13c).



(a)

(b)

(c)

Figura 5.13- (a) Almofada de carregamento assentada sobre o CP a ser hidratado ; (b) Haste metálica assentada sobre almofada de carregamento; (c) Braço de alavanca e discos metálicos de carregamento posicionados

A medida da expansão vertical da amostra durante a fase de hidratação era feita por meio de relógios comparadores conectados a bases magnéticas e apoiados sobre as almofadas de carregamento (Figura 5.14). A tensão confinante aplicada durante a fase de hidratação ($\sigma_{n,h}$) corresponde à mesma a ser aplicada na fase de cisalhamento ($\sigma_{n,c}$). Tensões confinantes de 20 kPa, 50 kPa e 100 kPa foram empregadas. Após a aplicação do confinamento, água deaerada e deionizada era acrescentada ao reservatório metálico no qual se encontrava a amostra, permitindo a inundação desta e, conseqüentemente, sua hidratação (Figura 5.15).

Figura 5.14- Relógio comparador assentado sobre almofada de carregamento.

A hidratação do CP se dava através de todas as suas extremidades e, principalmente, através de sua face inferior, por meio dos canalículos e orifícios da placa de madeira aderida ao GT T.

Figura 5.15- Inundação dos CPs e início das medidas de expansão por meio dos relógios comparadores.

Leituras de expansão vertical eram feitas ao longo do tempo, permitindo a obtenção da curva de expansão correspondente (Figura 5.16). O término da fase de hidratação obedecia a um critério de parada, proposto por GILBERT et al. (1996). Caso houvesse variação de expansão inferior a 5% entre leituras sucessivas realizadas a cada 12 horas, o processo de hidratação era interrompido. Ao atender a esse critério, O CP era considerado saturado, os dispositivos eram desmontados e o conjunto anel-CP era transferido para a caixa de cisalhamento direto, onde a etapa de cisalhamento era realizada. A Figura 5.16 apresenta uma curva de hidratação obtida de um CP confinado a 50 kPa. Observa-se que o período de hidratação levou aproximadamente 3 dias até a saturação. Para tensões confinantes mais baixas, a tendência é que o período de hidratação completa se prolongue, o contrário ocorrendo para tensões de confinamento elevadas.

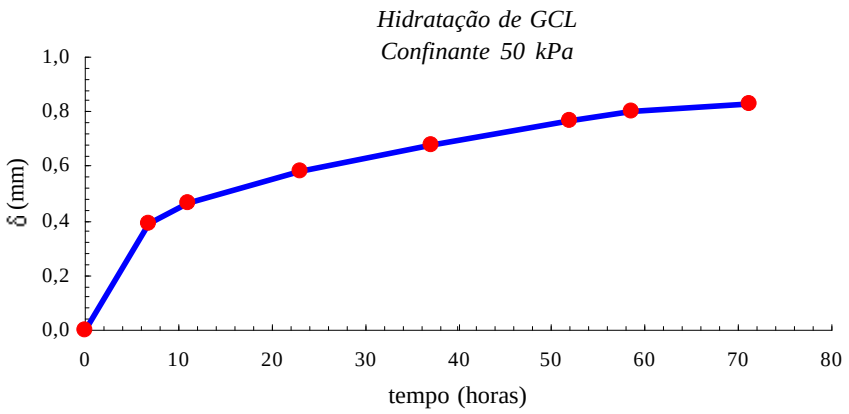


Figura 5.16- Curva de expansão do GCL durante a fase de hidratação sob confinamento ($\sigma_{n,h-}$ 50kPa)

5.4.3 Fase de cisalhamento

Após a conclusão da fase de hidratação, o CP é imediatamente transferido para a caixa de cisalhamento (Figura 5.17).

Figura 5.17 – Detalhe da caixa de cisalhamento

O conjunto era então levado ao equipamento de cisalhamento (

Figura 5.18) composto pelos seguintes dispositivos;

- **Dispositivo de aplicação de tensão vertical** - aparato concebido por alavancas e contrapesos, capaz de aplicar cargas constantes com precisão de ± 2%, durante todo o procedimento de ensaio.
- **Dispositivo de aplicação de carga cisalhante** - aparato responsável pela aplicação da carga cisalhante a uma taxa de deslocamento constante (deformação controlada). A carga é aplicada na direção paralela à direção de deslocamento da caixa de cisalhamento. O dispositivo dotado de célula de carga e possibilita a leitura da carga aplicada (F) a qualquer momento do ensaio. Ressalta-se que a taxa de deslocamento empregada na presente série de ensaios foi de 0,5 mm/min.
- **Indicador de deslocamento horizontal**- atua determinação dos valores de deslocamento horizontal durante a fase de cisalhamento. Dotado de indicador analógico é capaz de medir deslocamentos horizontais da ordem de 25 mm.

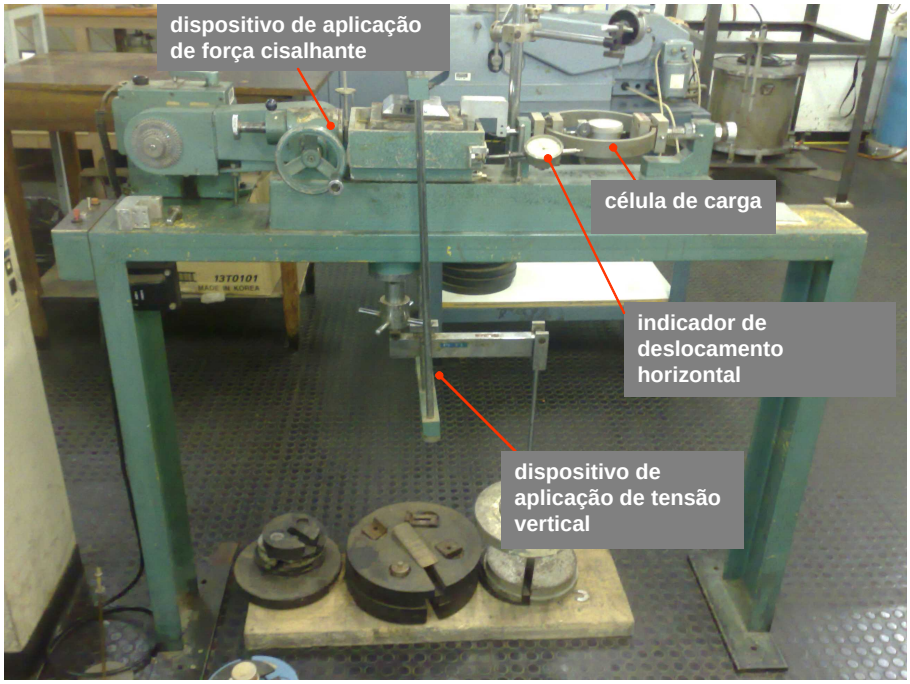


Figura 5.18 – Equipamento de cisalhamento

Alinha-se o conjunto CP-caixa de cisalhamento e aplica-se a tensão vertical ($\sigma_{n,c}$) desejada. Nesse momento, iniciava-se a fase de aplicação de carga horizontal a uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min. Os pares de valores **F,** Δ eram registrados em intervalos pré-estabelecidos até o limite de curso do equipamento. Com a conclusão da fase de cisalhamento, o CP rompido era analisado criteriosamente para avaliação da ruptura ocorrida. A Figura 5.19 apresenta o aspecto de um CP, instantes após a sua ruptura. Por fim, coletava-se uma amostra de bentonita do CP rompido para avaliação de seu teor de umidade (w).

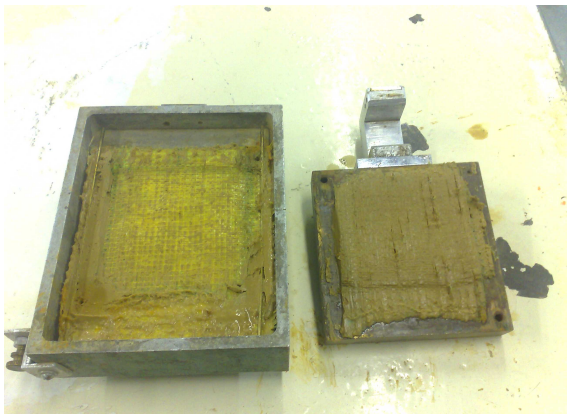


Figura 5.19 – Aspecto de um CP logo após a ruptura

5.4.4 Determinação da resistência ao cisalhamento máxima, τ_p, e obtenção da envoltória de ruptura.

Ao longo da realização da fase de cisalhamento, pares de valores F- Δ eram registrados. Os valores F eram tratados e transformados em tensão cisalhante, τ. Sabe-se que, na realização de qualquer ensaio de cisalhamento direto, a área sobre a qual se aplica a tensão confinante, se altera a cada instante. Por conseqüência disso, a tensão cisalhante, τ, deve ser corrigida para levar em conta esse fato. Segue a metodologia empregada para a referida correção. Sabe-se que;

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad \text{(Eq. 5.1)}$$

em que:

τ: tensão cisalhante

F: força cisalhante atuante sobre a área A

A: área cisalhada ao longo do ensaio

No início do ensaio, A= B x L, com B e L sendo, respectivamente, a largura e o comprimento da área a ser cisalhada (100 x 100 mm). Com o avanço do deslocamento, δ_i (deslocamento do CP no instante t_i), a área A diminui, de modo que para cada instante t_i, tem-se:

$$A_i = b \times L_i \qquad \text{(Eq. 5.2)}$$

em que:

$L_i = L - \delta_i$

Portanto, a tensão cisalhante em cada instante t_i é obtida por:

$$\tau_i = \frac{F}{A_i} \qquad \text{(Eq. 5.3)}$$

ou ainda:

$$\tau_i = \frac{F}{\left[B \times \left(L - \delta_i\right)\right]} \qquad \text{(Eq. 5.4)}$$

Na montagem em questão, devido à limitação de curso do equipamento, a curva foi determinada até deslocamento máximo de 25 mm, quando já se havia atingido a condição de pico. A Figura 5.20 apresenta uma curva τ versus Δ típica do ensaio de cisalhamento direto realizado com $\sigma_{n,c}$ = 50 kPa. Observa-se que, nesse caso, a condição de pico foi atingida para deslocamento de, aproximadamente, 13 mm e $\tau_{\mathbf{p}}$ igual a 42 kPa.

Os ensaios foram realizados para 3 níveis de $\sigma_{n,c}$ (20 kPa, 50 kPa e 100 kPa) sendo que, para cada nível de confinamento, 3 CPs eram ensaiados. Com a plotagem dos pares de valores $\tau_{\mathbf{p}}$-$\sigma_{n,c}$ de cada CP, podiam ser ajustadas as envoltórias de ruptura de cada amostra.

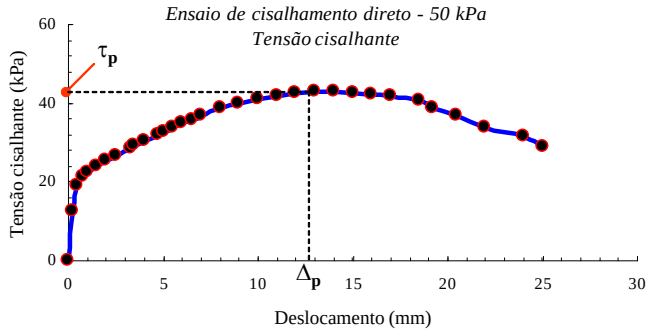


Figura 5.20- Curvas τ versus Δ obtidas de ensaios de cisalhamento direto com $\sigma_{n,c}$= 50 kPa

5.5 Planejamento de ensaios – Fase II

A execução dos ensaios da presente fase foi planejada com base nas conclusões obtidas da primeira fase de ensaios e também por conta do objetivo de se comparar o ensaio CTM com o ensaio de cisalhamento direto.

5.5.1 Seleção dos corpos-de-prova

A seleção dos CPs foi realizada com o mesmo rigor da primeira fase de ensaios, com o objetivo de minimizar a variabilidade inerente ao processo produtivo dos GCLs.

A Figura 5.21 mostra a disposição de todos os CPs ensaiados e suas respectivas identificações. Na segunda fase de ensaios foram realizados 6 testes sendo; 2 ensaio de cisalhamento direto, 2 CTM A e 2 CTM B.

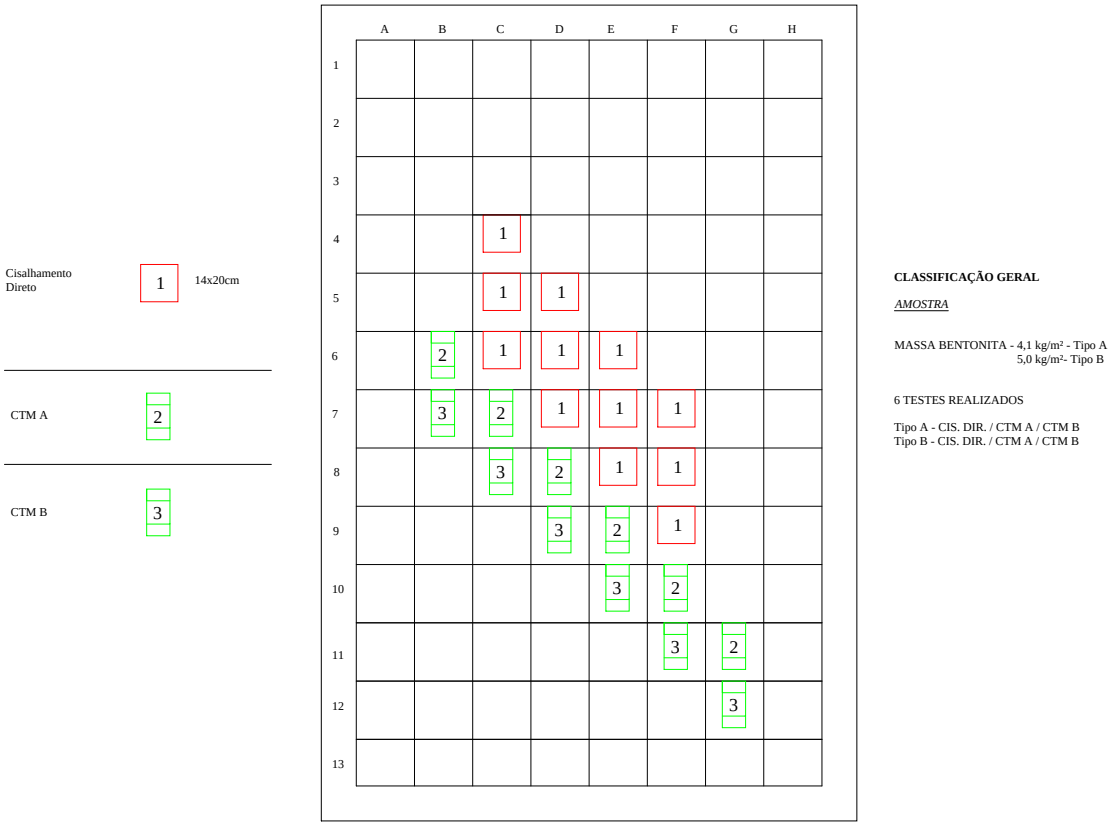


Figura 5.21– Disposição e identificação dos CPs, classificação das amostras e ensaios realizados

Capítulo 6 – Apresentação e Discussão dos Resultados- Fase II

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na fase II de ensaios. Serão discutidos, inicialmente, os resultados ensaios CTM A e CTM B. Em um segundo momento, são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para, enfim, compará-los aos ensaios CTM.

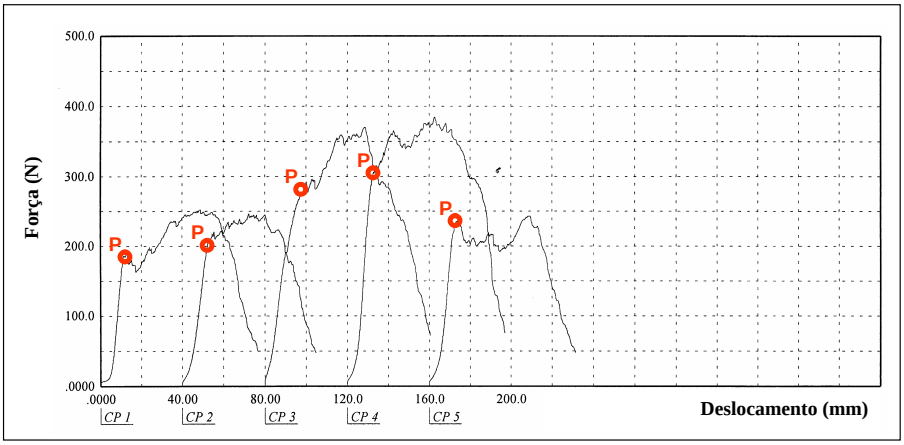
6.1 Ensaio de cisalhamento por tração confinado – CTM A e CTM B

Foram executados 4 ensaios CTM sendo, 2 CTM A e 2 CTM B. A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos. Os valores de resistência são reportados em N e em kPa para efeito de comparação posterior com os ensaios de cisalhamento direto. Ressalta-se que as tensões, τ_{CTMmax}, expressas em kPa, são obtidas da razão F_{CTM} / Área CP (0,01 m²).

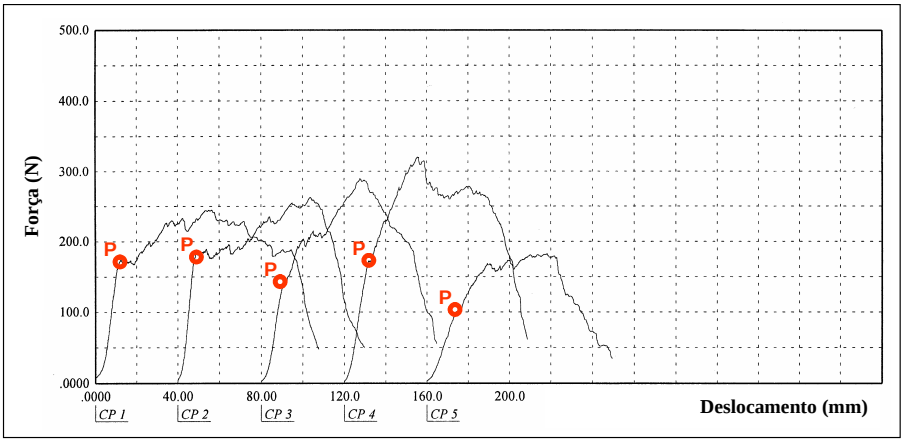
Tabela 6.1- Resultados dos ensaios CTM A e CTM B – Fase II

Amostra	MÉTODO								F
	CTM A				CTM B				
	$F_{CTMmáx}$ (N)	$\tau_{CTMmáx}$ (kPa)	CV(%)	$\Delta F_{máx}$ (mm)	$F_{CTMmáx}$ (N)	$\tau_{CTMmáx}$ (kPa)	CV (%)	$\Delta F_{máx}$ (mm)	CTM A/CTM B
Tipo A	300.00	30.00	23.83	44.35	260.60	26.06	19.93	52.08	1.15
Tipo B	246.60	24.66	22.21	29.45	231.10	23.11	16.74	48.67	1.07

Observa-se que, para ambas as amostras analisadas, $F_{CTM\ A}$ supera o valor $F_{CTM\ B}$. Tal diferença pode ser atribuída à eliminação do processo de extração (Processo B), identificado na fase I de ensaios. As Figura 6.1 a e b apresentam curvas força-deslocamento dos ensaios CTM A e CTM B, respectivamente, realizados para as amostras do tipo A.



(a)



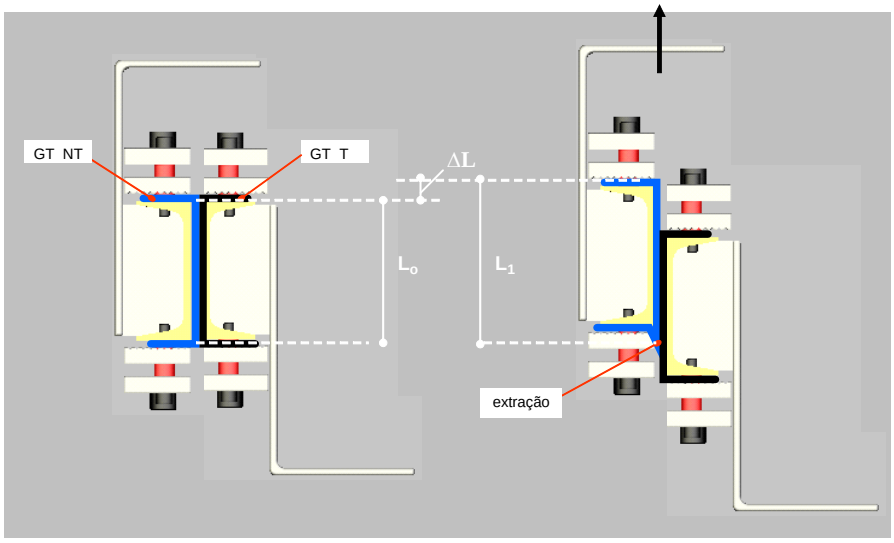
(b)

Figura 6.1 – Curvas força-deslocamento ensaios CTM – amostras tipo A; (a) CTM A, (b) CTM B

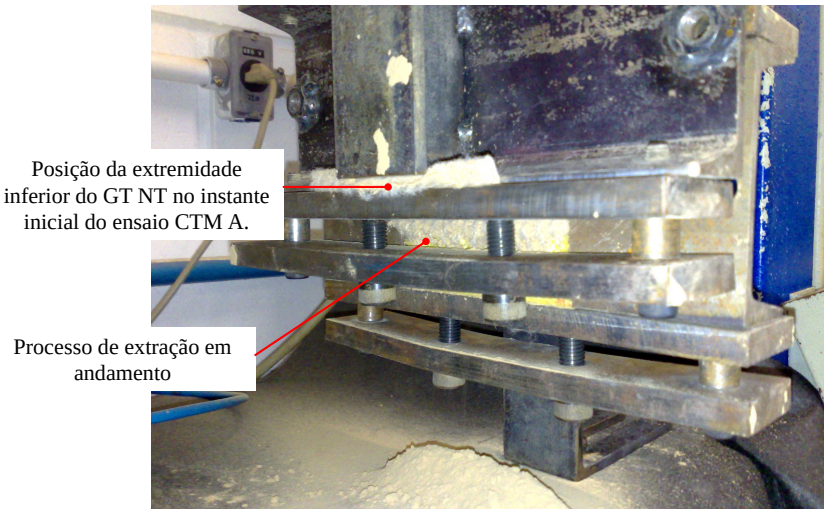
Nota-se que as curvas apresentadas possuem uma sensível diferença de formato, o que pode levar a algumas conclusões. Na fase inicial do ensaio, o comportamento de ambos os métodos é similar até a ocorrência do ponto P, indicado nas Figura 6.1 a e b. O ponto P representa a primeira mudança da inclinação da curva força-deslocamento. Em ambos os métodos, tal ponto ocorre para um deslocamento próximo de 10 mm, no entanto, a força correspondente, $F_{CTM,P}$, sempre se apresenta maior no método CTM A. Ressalta-se também que, a partir do ponto P, os valores Δ registrados no método CTM B são sensivelmente maiores que em CTM A. Para entender o provável motivo do ocorrido, algumas observações são importantes;

- Pelo fato do CP não estar confinado, a solicitação no mesmo ocorre por tração pela extremidade superior do GT NT;
- A transmissão da força de cisalhamento ocorre de forma gradual ao longo do CP sendo a extremidade superior do GT NT solicitada com mais intensidade no instante inicial do ensaio.
- O GT NT é um material extensível, portanto, com o crescimento da força transmitida e aumento do afastamento da extremidade superior do CP em relação ao limite superior da área cisalhada, o alongamento do GT NT aumenta a sua representatividade nos deslocamentos registrados.
- No ensaio CTM B, o comprimento do GT NT efetivamente solicitado por tração durante o ensaio (L_1) é maior que no ensaio CTM A. O efeito de extração verificado no ensaio CTM A, diminui o comprimento tracionado do GT NT (Figura 6.2 e Figura 6.3).

- Fisicamente, o ponto P parece representar o instante em que ocorre máxima solicitação simultânea dos reforços de uma área parcial do CP, sem que ainda fossem registrados deslocamentos decorrentes do alongamento do GT NT.

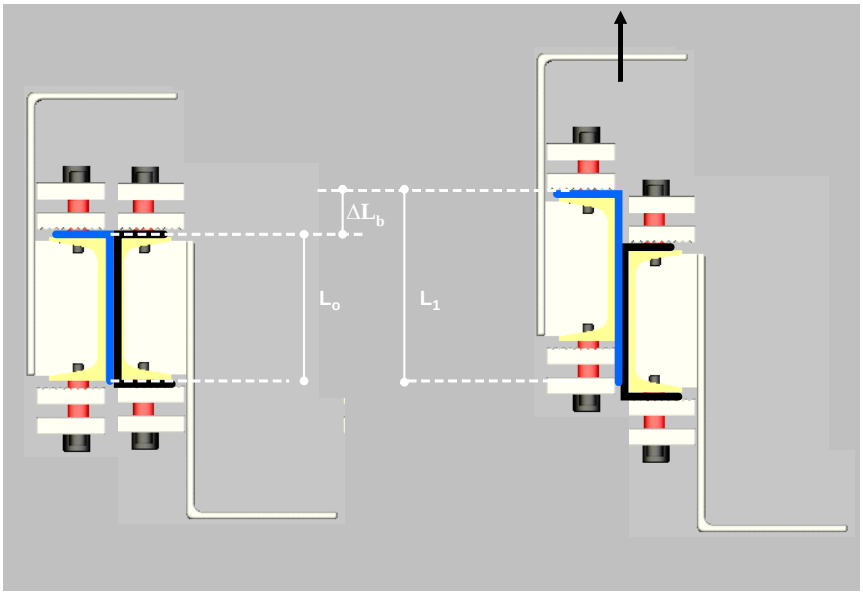


(a)

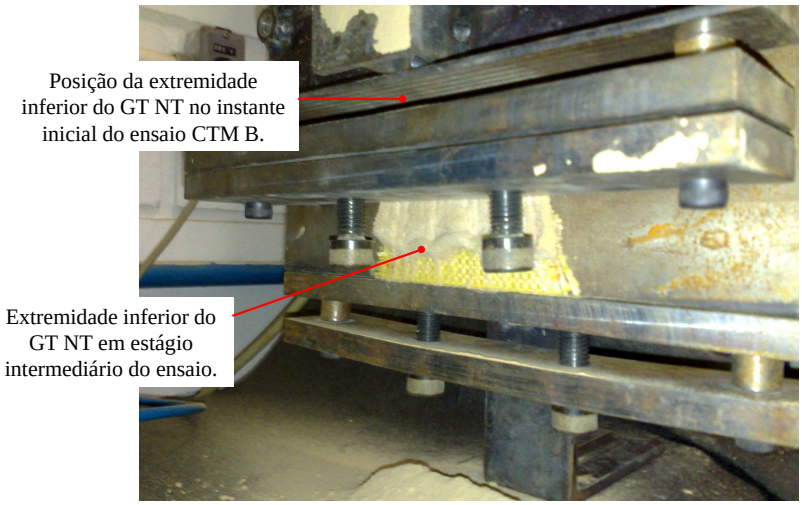


(b)

Figura 6.2 – (a) representação gráfica do instante inicial do ensaio CTM A (c) Processo de extração no ensaio CTM A



(a)



(b)

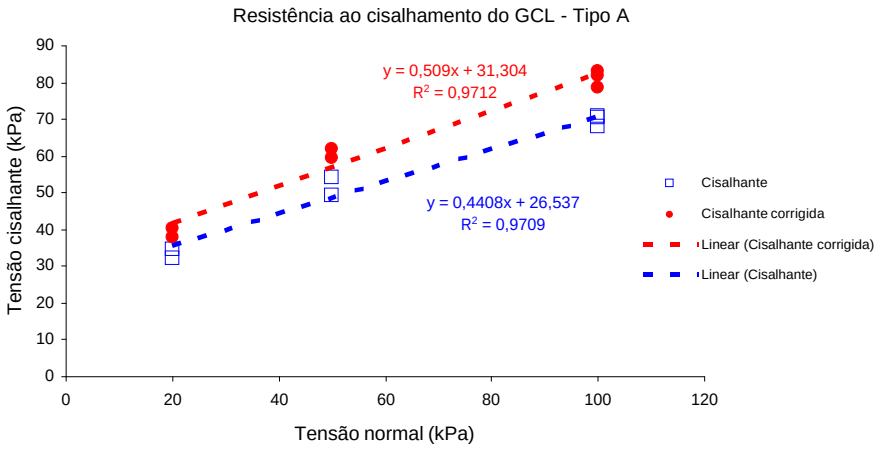
Figura 6.3 – (a) representação gráfica do processo de alongamento do CP no método CTM B; (b) alongamento do CP- CTM B

6.2 Ensaio de cisalhamento direto

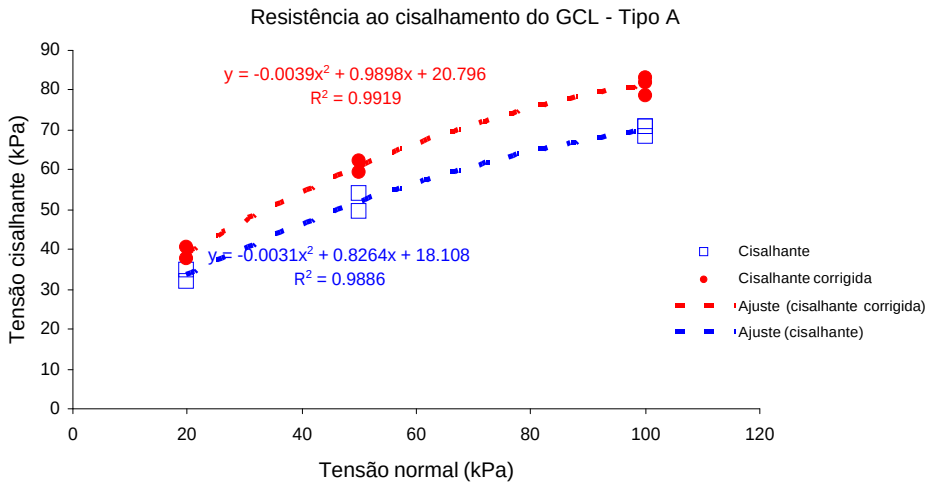
Foram realizados 2 ensaios de cisalhamento direto, obtendo-se para cada um deles, uma envoltória de ruptura. A Tabela 6.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos. Os valores τ_p e Δ_p se referem à média dos valores de pico obtidos para cada CP ensaiado. As Figura 6.4 e Figura 6.5 apresentam as envoltórias de ruptura resultantes do ensaios realizados com amostras tipo A e B, respectivamente.

Tabela 6.2- Resultados dos ensaios de cisalhamento direto – Fase II

Amostra	$\sigma_{n,h}$	$\sigma_{n,c}$	τ corrigido				τ medido			
			τ_p	Δ_p	ϕ	c	τ_p	Δ_p	ϕ	c
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(mm)	(º)	(kPa)	(kPa)	(mm)	(º)	(kPa)
Tipo A	20.00	20.00	39.05	14.00			33.40	14.00		
	50.00	50.00	60.65	14.00	27.00	31.04	51.70	14.00	23.8	26.54
	100.00	100.00	81.23	14.50			69.83	14.50		
Tipo B	20.00	20.00	33.75	12.50			30.00	12.50		
	50.00	50.00	63.50	13.70	26.00	29.78	54.50	13.70	22.5	26.33
	100.00	100.00	76.33	15.30			66.00	15.30		

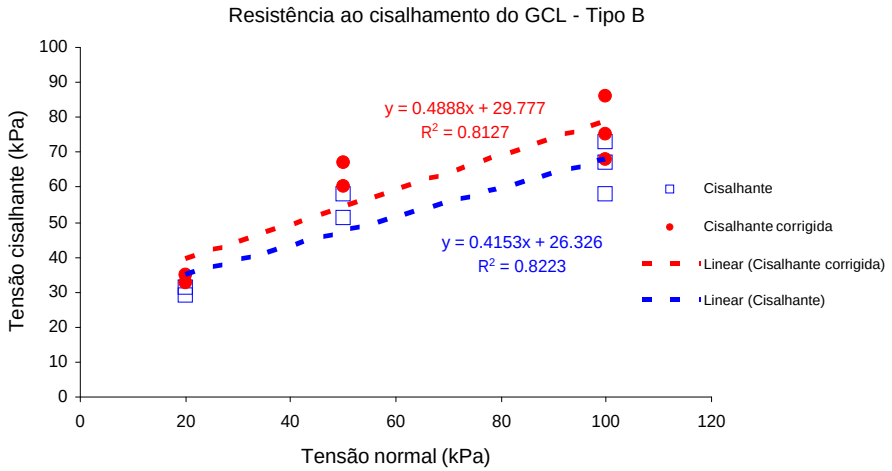


(a)

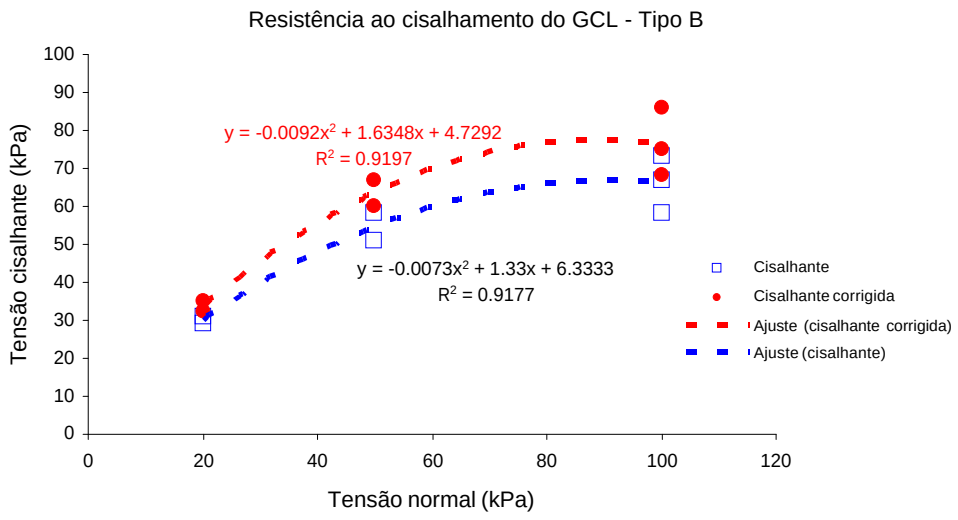


(b)

Figura 6.4 –Envoltórias de ruptura- Tipo A (a) ajuste linear; (b) ajuste polinomial



(a)



(b)

Figura 6.5 –Envoltórias de ruptura- Tipo B (a) ajuste linear; (b) ajuste polinomial

Analisando-se os resultados, percebe-se uma leve superioridade nos valores τ_p obtidos para a amostra Tipo A. São apresentados ajustes lineares e polinomiais das envoltórias e, em ambos os casos, a última mostrou maior aderência aos valores experimentais. A amostra tipo A mostrou melhores resultados, apresentando fator R^2 entre 0,97 e 0,99, para ambas as formas de ajuste.

Em termos de deslocamento para atingir a condição de pico, Δ_p, os valores obtidos condizem com os normalmente encontrados da literatura para GCLs AG. Nota-se que, para ambas as amostras, os valores Δ_p apresentam leve tendência de crescimento com o aumento de $\sigma_{n,c}$. É provável que ocorra, na fase de hidratação, uma mobilização maior dos reforços dos CPs confinados sob menores $\sigma_{n,h}$, por conta da maior expansão. Isso que pode levar o CP, na fase de cisalhamento, a atingir a condição de pico com menores deslocamentos.

A envoltória de ruptura linear apresenta um ângulo de atrito, ϕ, muito parecido para ambas as amostras e intercepto de coesão, c, levemente superior para a amostra tipo A.

A taxa de deslocamento empregada no ensaio (0,5 mm/min) e os níveis de confinamento aplicados aos CPs (menores que a tensão de expansão da bentonita), podem ter induzido a geração de pressões neutras positivas na fase de cisalhamento, segundo hipótese apresentada por Zornberg et al. (2005). Entretanto, verificou-se que a superfície de ruptura (Figura 5.19) sempre se localizava muito próxima de uma superfície drenante (GTT), tornando menos provável, a ocorrência de pressões neutras significativas durante o ensaio.

6.3 Comparação método CTM A x cisalhamento direto

A Tabela 6.3 apresenta a comparação numérica dos ensaios CTM A e cisalhamento direto realizados na fase II de ensaios. Nota-se que, por existir uma similaridade entre os métodos CT e CTM, adotou-se para essa comparação, o mesmo procedimento aplicado por Eichenauer e Reither (2002), exposto em 2.3.3.3.

Tabela 6.3- Comparação de resultados dos métodos CTM A e cisalhamento direto – Fase II

Amostra	MÉTODOS			CTM A / C.D.	
	CTM A	C. Direto			
	$\tau_{CTMmáx}$	$c_{corrigido}$	c_{medido}		
	(kPa)	(kPa)		corrigido	medido
Tipo A	30.00	31.04	26.54	0.97	1.13
Tipo B	24.66	28.78	26.33	0.86	0.94

Verifica-se uma boa proximidade entre os valores de resistência de ambos os métodos. Como não se aplicou uma correção aos valores registrados no ensaio CTM A, supõe-se que a comparação mais adequada seja entre os valores **medidos** das duas metodologias. Sendo assim, observa-se uma relação τ_{CTMmax}/c_{medido} de 1,13 e 0,94 para

amostras tipo A e B, respectivamente. Nas duas metodologias foram encontrados valores de resistência de pico mais elevados para amostra do tipo A.

A Figura 6.6 apresenta o aspecto das curvas tensão cisalhante versus deslocamento para as duas metodologias; cisalhamento direto e CTM. Observa-se até o estabelecimento do ponto P, um comportamento análogo entre os métodos. A partir de então, por conta do alongamento do GT NT, descrito no item 6.1, as curvas assumem formatos muito distintos. Com a implantação de dispositivo de aplicação de tensão normal, em fase futura de desenvolvimento do ensaio CTM, espera-se que a distribuição de esforços sobre o CP seja mais uniforme e, por conseqüência disso, os deslocamentos observados sejam compatíveis com aqueles do ensaio de cisalhamento direto.

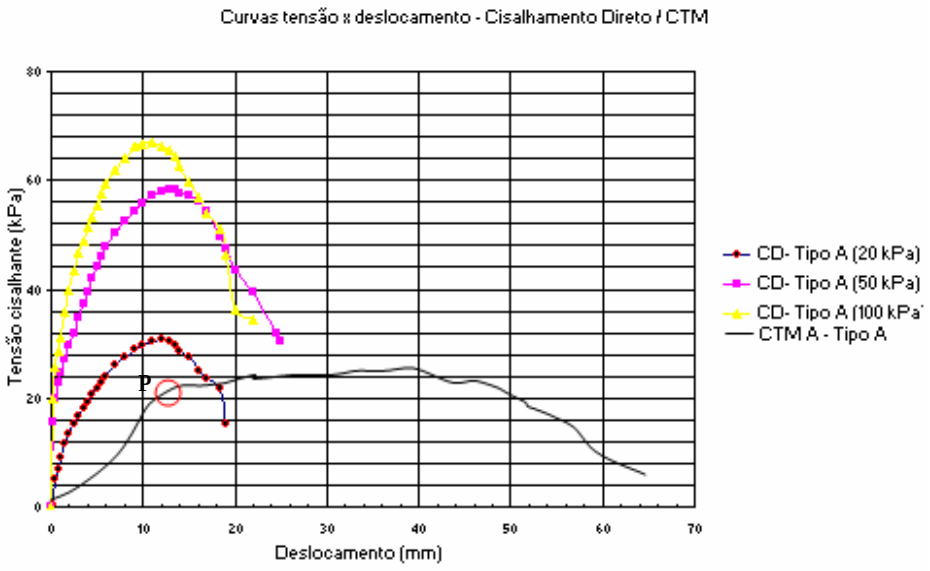


Figura 6.6 –Comparação das curvas tensão x deslocamento- cisalhamento direto / CTM

Em termos práticos pode-se afirmar que o método CTM se mostrou extremamente prático e rápido. A série de ensaios de cisalhamento direto foi desenvolvida durante dois meses, enquanto que em apenas uma hora, uma amostra (5 CPs) do ensaio CTM era ensaiada.

Capítulo 7 – Conclusões

Esta dissertação apresenta uma nova metodologia de ensaio para avaliação da resistência ao cisalhamento interno de GCLs. O método denominado **cisalhamento por tração confinado (CTM)**, foi comparado a ensaios existentes por meio de um programa experimental composto de duas fases. Foram adotados critérios rigorosos de seleção de amostras e preparação dos CPs a fim de minimizar o efeito da variabilidade inerente à fabricação dos GCLs.

A primeira série de ensaios visou avaliar aspectos práticos do ensaio CTM, além de buscar sua correlação com ensaios de adesão (P) e cisalhamento por tração (CT). Foram realizados 32 testes cujos resultados permitiram concluir que:

- A metodologia empregada de seleção de amostras e preparo dos CPs, tornou a comparação entre os métodos bastante confiável;
- O ensaio CTM apresentou muito bom comportamento, uma vez que se correlacionou bem com os ensaios P e CT;

- O ensaio P apresentou o mais alto coeficiente de variabilidade entre os métodos, CV=35%.
- A influência da largura dos CPs nos resultados do ensaio CTM, se mostrou desprezível.
- A estricção do CP, observada no ensaio CT, é minimizada no CTM;
- A constatação de processos simultâneos de cisalhamento e extração (Processos A e B) ao longo do ensaio CTM, levou ao estudo de uma montagem alternativa (CTM B) na seguinte fase de testes.

Na segunda fase foram realizados ensaios de cisalhamento direto, CTM A e CTM B, com CPs de mesmas dimensões (100 x 100 mm) retirados de duas amostras de um mesmo fabricante, especialmente preparadas para fins de pesquisa. Os resultados obtidos permitem concluir que:

- A montagem alternativa CTM B não apresentou resultados melhores que a montagem original (CTM A). Os deslocamentos registrados por conta da extensibilidade do GT NT foram muito representativos nos resultados.
- A comparação numérica entre os métodos de cisalhamento direto e CTM A mostrou bons resultados. Analisou-se como ocorria a correlação entre valores de tensão cisalhante de pico no ensaio CTM A (τ_{CTMmax}) e o intercepto de coesão das envoltórias de resistência do ensaio de cisalhamento direto (c). A relação τ_{CTMmax}/ c_{medido}, no ajuste linear, assumiu valores de 1,13 e 0,94 para amostras tipo A e B, respectivamente.

- Apesar da boa correlação de resistência, aspectos relativos aos deslocamentos registrados merecem especial atenção devido a extensibilidade dos geotêxteis.

As conclusões de ambas as fases de pesquisa permitem a proposição de atividades futuras em torno do método CTM:

- Incorporação de um dispositivo na garra "U" que permita a aplicação de tensões normais à amostra
- Estudo da magnitude de tensões normais de interesse. Para uma fase inicial, talvez, a aplicação de tensões de baixa intensidade apenas para uniformizar os esforços sobre o CP, seja uma grande contribuição.
- Procedimento de hidratação do CP- estudo de uma metodologia rápida de hidratação para o ensaio CTM. As primeiras horas de hidratação, parecem ser suficientes para tornar desprezível a contribuição da resistência da bentonita, na **resistência de pico** de um GCL reforçado.
- Avaliação da geração de pressões neutras na realização de ensaios CTM com GCLs hidratados. A elevada taxa de deslocamento do ensaio, realizado com baixas tensões de confinamento, favorece a geração de pressões neutras negativas (ZORNBERG et al., 1995).
- Avaliação da eficácia do método CTM com amostras de GCLs CT e GCLs não-reforçados.

Na fase atual de desenvolvimento, o método CTM já pode ser considerado um avanço em relação aos métodos de ensaios-índice existentes. Além de apresentar boa correlação com tais métodos, admite a possibilidade de incorporar dispositivo de tensão

normal ao CP. Com a conclusão de seu desenvolvimento, o ensaio CTM pode se tornar uma ferramenta extremamente útil, tanto para determinação de índice de resistência no controle de qualidade fabricação de GCLs, como para a determinação de parâmetros de projeto.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2004). ASTM D 4439 - Standard Terminology for Geosynthetics.

2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (1998). ASTM D6243 - Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method.

3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2002). ASTM D6495- Guide Acceptance Testing Requirements for GCLs.

4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (1999). ASTM D6496 - Determining Average Bonding Peel Strength Between Top and Bottom Layer Needle-Punched Geosynthetic Clay Liner.

5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2002). ASTM D6072 - Obtaining Samples of Geosynthetic Clay Liners

6. BERARD, J.F. (1997). Evaluation of Needle Punched Geosynthetic Clay Liners' Internal Friction, Geosynthetics '97, NAGS, Long Beach, March 1997, p. 35 l-362.

7. BUENO, B.S.; BENVENUTO, C.; VILAR, O.M. (2004). Aplicações em barreiras impermeabilizantes. In: VERTEMATTI, J. C.. Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo: Edgard Blücher, 2004; cap 13, p.335-379.

8. DANIEL, D.E. (1991). Geosynthetic Clay Liners, Geotechnical News, vol. 9, No 4, p. 28-33.

9. DANIEL, D. E. (1993). Clay Liners, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, p. 137-163.

10. DANIEL, D. E.; SHAN, H. Y.; ANDERSON, J. D. (1993). Effects of Partial Wetting on the Performance of the Bentonite Component of GCL, Procedings Geosynthetics'93, NAGS, p. 1483-1496.

11. EICHENAUER, T.; REITHER, P. (2002). Comparison of different shear tests of GCLs and the use of these data in design, Procedings Clay Geosynthetic Barriers Symposium, Nuremberg, p.119-127.

12. FOX, P. J.; ROWLAND, M. G.; SCHEITHE, J. R. (1998). Internal Shear Strength of Three Geosynthetic Clay Liners, Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 124(10), p. 933-944.

13. FOX P.J.; OLSTA J.T.; CHIU P. (2002). Internal and Interface Shear Strengths of Needle-punched Geosynthetic Clay Liners, Procedings VII International Conference on Geosynthetics, IGS, Nice, p. 667-670.

14. FOX P.J.; STARK T.D. (2004). State of the art report: GCL shear strength and its measurement, Geosynthetics International.

15. GILBERT, R. B.; FERNANDEZ, F.; HORSFIELD, D. W. (1996). Shear Strength of Reinforced Geosynthetic Clay Liner, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, n° 4, p. 259-266.

16. GILBERT, R. B.; SCRANTON, H. B.; DANIEL, D. E. (1997). Shear Strength Testing for Geosynthetic Clay Liners, Symposium on Testing and Acceptance Criteria for CGLs, ASTM STP-1308, dir. L. Well, p. 121-138.

17. HERTEEN G. (1995). Groundwater Protection Using a GCL at the Franz-Joseph-Strauss Airport, Munich, Germany, Procedings International Symposium on GCLs, Koerner, Gartung and Zanzinfer, p. 161-174

18. HEERTEN, G.; VON MAUBERGE, K. P.; SIMPSON, M.; MILLS, C. (1993). Manufacturing Quality Control of Geosynthetic Clay Liners: A manufacturers Perspective, GRI-6 Conference on MQC/MQA and CQA/CQA on Geosynthetics, dir. Koerner et Hsuan, IFAI, p. 86-95.

19. HEERTEN, G., SAATHOFF, F., SCHEU, C. AND VON MAUBEUGE, K. P. (1994). On the Long Term Shear Behavior of GCL in Capping Sealing System, Procedings International Symposium on GCLs, Nurnberg, Rotterdam/Balkema, p. 141-150.

20. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR STANDARDIZATION (2005). ISO 13426-2 – Strength of internal structural junctions- part 2: Geocomposites.

21. KOERNER, R. M. (1994), Designing with Geosynthetics, 3rd edition, Prentice Hall Publ. Co., Englewood Cliffs, NJ.

22. KOERNER, R. M.; CARSON, D. A.; DANIEL, D. E.; BONAPARTE, R. (1996). Current Status of Cincinnati GCL Test Plots, Proc. 10th GRI Conference: field

performance of geosynthetics and geosynthetic related systems, Philadelphia, p. 153-182.

23. MCCARTNEY J.S.; ZORNBERG J.G.; SWAN R.H.; GILBERT R.B. (2004). Reliability-based stability analysis considering GCL Shear strength variability, Geosynthetics International, vol. 11, n.3, p. 212-232.

24. MACKEY R.E. (2002). Summary of clay geosynthetic barriers standards developed by the ASTM, Proc. Clay Geosynthetic Barriers Symposium, Nuremberg, p. 371-380.

25. MESRI, G.; OLSON, R.E. (1970). Mechanisms Controlling the Permeability of Clays, Clays and Clay Minerals, Vol.19, p. 151-158.

26. PIMENTEL, V.E.; PALMA, S.L. (2006). Aplicação de geocompostos bentoníticos em barreiras impermeabilizantes de aterros de resíduos, Proc. Geosul'2006.

27. SHAN H.Y.; DANIEL D.E. (1991). Results of Laboratory Tests on a Geotextile/Bentonite Liner Material, Proc. Geosynthetics'91, NAGS, p. 517-535.

28. STARK, T. D.; EID, H. T. (1996). Shear Behavior of Reinforced Geosynthetic Clay Liners, Geosyn. Int. 3(6), p. 771-786.

29. STARK, T. D.; EID, H. T. (1997). Shear Behavior of Geosynthetic Clay Liners, Geosynthetics International, vol. 3, n° 6, p. 771-786.

30. VON MAUBERGE, K. P.; HEERTEN, G. (1995). Needle Punched Geosynthetic Clay Liners, Proc. GRI-8 Conf. On Geosynthetic Resins, Formulations and Manufacturing, IFAI, St. Paul, p. 219-228.

31. VON MAUBEUGE K.P. (1997). Manufacturing Quality Control and Specifications Criteria for GCLs, ASTM STP 1308, Well L.W. Ed., p. 240-250.

32. VON MAUBEUGE K.P. (1996). GCLs, Part Three: Manufacturing Quality Control and Specification Criteria, GFR, Vol 14, No 6, p. 36-40.

33. VON MAUBEUGE, K.P.; EHRENBERG, H. (1996). Requirements and Design of Landfill Caps with Approved GCLs, Proc. EuroGeo, Masstrich.

34. VON MAUBERGE, K. P. ; EBERLE, M. A. (1997), The Use of Geosynthetic Clay Liners for Sealing Applications in the Waste Industry, Proc. 1st Australia-New Zealand Conf. On Env. Geotech., Melbourne.

35. VON MAUBEUGE, K.P.; LUCAS, S.N. (2002). Peel and shear test comparison and geosynthetic clay liner shear strength correlation, Proc. Clay Geosynthetic Barriers Symposium, Nuremberg, p.105-110.

36. ZORNBERG J.G.; MCCARTNEY J.S.; SWAN R.H. (2005). Analisys of a large database of GCL internal shear strength results, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, p. 367-380.