

4. Desenvolvimento do Equipamento

4.1. Considerações Iniciais

Os ensaios normalmente utilizados no estudo da interação solo-geossintético são os ensaios de cisalhamento direto (e seus derivados) e de arrancamento. A escolha do ensaio mais adequado vai depender do tipo de geossintético ensaiado e do movimento relativo entre ele e a massa de solo, sendo este responsável pela mobilização da resistência de interface.

Nos Capítulos 2 e 3 foram feitas revisões sobre os ensaios de laboratório normalmente utilizados para a avaliação da resistência de interface solo-geossintético. O objetivo desta revisão foi agrupar as informações necessárias para o dimensionamento do equipamento a ser desenvolvido nesta tese. Ela inclui, além dos ensaios propriamente ditos, as referências normativas, equipamentos reportados na bibliografia e fatores que podem influenciar nos resultados, tanto os associados aos equipamentos quanto aos materiais de ensaio.

Foi dada ênfase às diversas configurações de ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado e de rampa. Estas informações subsidiaram o desenvolvimento do equipamento de ensaio de cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado, rampa e arrancamento.

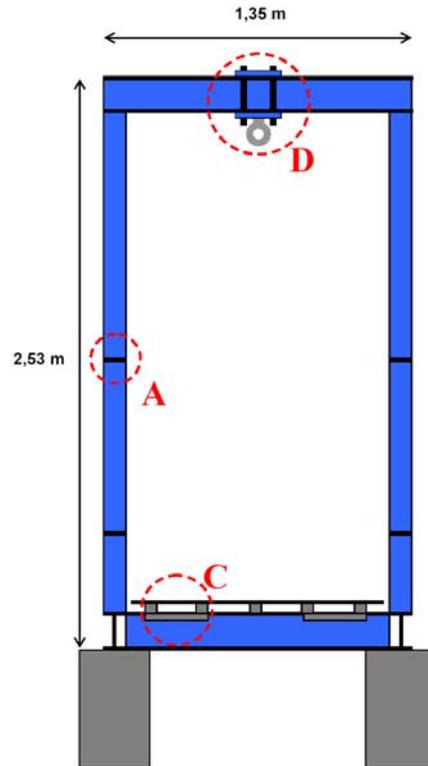
Desta forma este Capítulo apresenta o equipamento desenvolvido, os testes preliminares e as limitações de uso.

4.2. Estrutura Principal

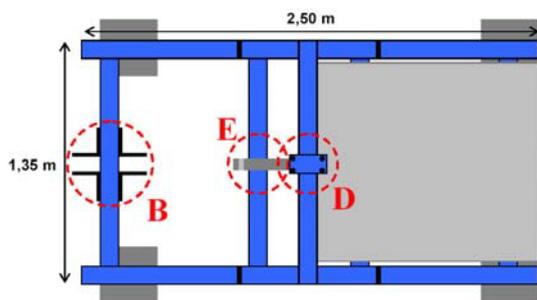
A estrutura é composta por uma série de perfis de aço soldados, formando um sistema único, dimensionado de forma a resistir aos esforços solicitantes dos ensaios propostos. A base é constituída por perfis I de 6" (15,24 cm), com dimensões iguais a 2,50m de comprimento e 1,35m de largura (Figura 72).



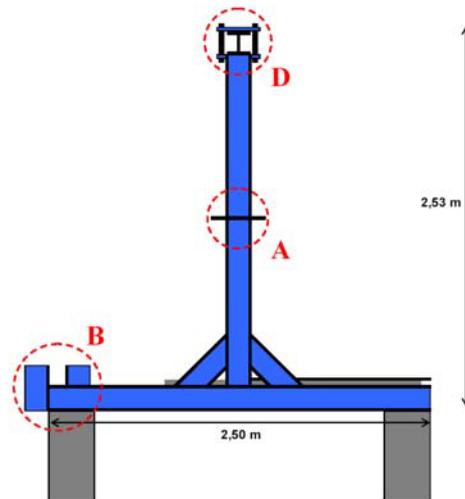
(a) vista geral



(b) vista frontal



(c) vista superior



(d) vista lateral

Figura 72 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido.

O pórtico também foi construído com perfis de 6" e tem altura de 2,53m e a mesma largura da base. Ele é dividido em duas partes, detalhe A da Figura 72, para facilitar a movimentação da estrutura (Figura 73). Na extremidade oposta à plataforma de ensaios existe uma estrutura para a ancoragem do sistema de aplicação de força cisalhante (Figura 74) destinadas aos ensaios de cisalhamento, arrancamento e fluência confinada (detalhe B da Figura 72). São quatro cantoneira

com 25cm de comprimento, espessura de 1,27cm e abas de 10cm soldadas a estrutura da base.



Figura 73 - Ligação do pórtico.



Figura 74 - Vista geral do ponto de apoio do sistema de aplicação de força cisalhante dos ensaios de cisalhamento, arrancamento e fluência.

A plataforma de ensaio (Figura 75) é uma placa de aço de 0,64cm de espessura com dimensões de 1,1m de largura por 1,3m de comprimento. Ela foi enrijecida com perfis U de 2' (5,08cm x 2,54cm x 0,64cm) e barras chatas de 2' (5,08cm x 0,32 cm) soldados em sua face inferior. Sua área útil é de 1,0m largura

x 1,2m comprimento, sendo as extremidades destinadas à fixação das caixas de ensaio.



Figura 75 - Plataforma de ensaios.

Ela é ligada à estrutura por meio de duas dobradiças compostas de três tubos de 1,5' (3,81cm) de diâmetro externo, através dos quais se passa um pino de 1' (2,54cm) de diâmetro. Sua porção central é fixada na estrutura e as duas partes menores são fixadas nos perfis U que enrijecem a rampa (Figura 76).



Figura 76 - Dobradiça.

Além disso, a longarina central da plataforma de ensaio prolonga-se por 70cm (Figura 77). A função deste prolongamento é servir de ponto de ancoragem para a corrente do sistema de içamento do ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado.



Figura 77 - Local de fixação do sistema de basculamento.

Esta estrutura foi construída previamente por Aguiar (2003) e corresponde a base para o novo equipamento.

4.3. Componentes do Equipamento

De uma forma geral, cada uma das configurações do equipamento, é composta pelas seguintes partes, ou acessórios:

- (i) caixas de ensaio e garras;
- (ii) sistema de basculamento;
- (iii) sistema de aplicação de cargas (normais e cisalhantes);
- (iv) instrumentação.

4.3.1. Caixas de Ensaio e Garras

As caixas de ensaio e garras foram dimensionadas com base nas recomendações de outros autores e normas disponíveis, seguindo métodos correntes de dimensionamento estrutural.

O primeiro conjunto de caixas de ensaio foi projetado por Aguiar (2003), que seguiu as recomendações de Melo *et al.* (2003) e da norma europeia ISO 12957-2. Esta facultava o uso de uma ou duas caixas de ensaio. Optou-se por utilizar duas caixas de ensaio, por tornar o equipamento mais versátil. Elas apresentam dimensões internas de 1,0m de largura por 1,0m de comprimento (superior) e 1,0m de largura por 1,2m de comprimento (inferior). O uso de uma caixa inferior maior se justifica pelo fato de se manter sempre uma área de contato de 1m² em qualquer momento do ensaio. Além disto, evitam-se perdas de materiais, principalmente solos arenosos, com o movimento da caixa. A diferença de 20cm entre os comprimentos das caixas corresponde ao deslocamento cisalhante máximo permitido pelo sistema. Ambas as caixas têm altura de 5cm. A Figura 78 apresenta o conjunto 1.



Figura 78 - Conjunto de caixas de ensaio 1 - Versão original.

A caixa superior movimentava-se sobre roldanas que correm sobre cantoneiras com aba de 2cm que funcionam como trilhos (Figura 79). Esta solução oferece

algumas vantagens. A primeira é a garantia de que a caixa superior não sofre nenhum tipo de deslocamento lateral que possa comprometer o resultado do ensaio. A segunda é a redução do atrito entre as caixas superior e inferior. Ensaios de calibração mostraram que a caixa superior entra em movimento para inclinações inferiores a $0,5^\circ$. O espaçamento entre as caixas é constante e igual a 3mm.



Figura 79 - Detalhe da roldana da caixa superior sobre o trilho da caixa inferior.

Este conjunto de caixas possui uma garra (Figura 80) que é fixada à base da plataforma através de dois parafusos. Ela é constituída por duas placas de aço com espessura de $\frac{1}{4}$ " (0,64cm) e dimensões de 1,0m de comprimento e 0,10m de largura. Elas são unidas por oito parafusos passantes de $\frac{1}{2}$ " (1,27cm).



Figura 80 - Garra do conjunto 1 de caixas - Versão original.

Embora este conjunto tenha se mostrado satisfatório, foram observadas as seguintes limitações:

- (i) Altura reduzida das caixas de ensaio. A razão $h/D_{\text{máx}}$ (altura da caixa de ensaio/tamanho da maior partícula de solo) sugerida por norma é de 7,0 para o ensaio de rampa e de 5,0 para o ensaio de cisalhamento direto. Isto impede o uso de solos com tamanho maior de grão;
- (ii) Espaçamento fixo das caixas. Não permite o emprego de geossintéticos com mais de 3mm de espessura;
- (iii) Quantidade de solo necessário para se realizar um ensaio elevada;
- (iv) Utilização restrita a ensaios de rampa

Para eliminar estas restrições e estudar novas variáveis, como influência da razão comprimento/altura das caixas de ensaio e tamanho da área de contato, foram projetadas e construídas novas caixas de ensaio.

Os novos conjuntos de caixas de ensaio mantêm algumas características do conjunto antigo, tais como o uso de duas caixas com comprimentos diferentes com o objetivo de manter a área de contato constante e evitar perda de material.

Porém, na sua construção, foram utilizados perfis I de 4 polegadas (10cm), conforme ilustrado na Figura 81, possibilitando o desejável aumento de altura em relação à caixa antiga, e, por conseqüência, o aumento da razão $h/D_{\text{máx}}$.



Figura 81 - Caixas de ensaio com altura de 10 cm.

De forma análoga as caixas da versão original, a caixa superior dos novos conjuntos movimenta-se sobre roldanas que correm sobre cantoneiras com aba de 2cm que funcionam como trilhos (Figura 82). Elas fornecem os mesmos benefícios tais como redução de atrito caixa-caixa e restrição do deslocamento lateral da caixa. Entretanto, um aprimoramento foi implementado para possibilitar o controle do espaçamento entre caixas.



Figura 82 - Novo sistema trilho roldana.

O sistema de regulagem de espaçamento é simples (Figura 83). Consiste de uma barra de $\frac{1}{2}$ polegada que passa por uma luva metálica, de mesmo diâmetro interno, e que tem fixo, em uma de suas extremidades, uma roldana com rolamento blindado. A outra extremidade, que passa por dentro da luva, é rosqueada. A regulagem da altura é feita através de duas porcas que giram sobre esta parte rosqueada, sendo que a porca situada na parte inferior da luva ajusta o espaçamento, enquanto a porca superior mantém este espaçamento constante.

Outro melhoramento foi à introdução de um dispositivo que limita o deslocamento da caixa de ensaio (Figura 84). Ele substituiu os pinos de aço usados no primeiro conjunto de caixas. São dois dispositivos, um de cada lado das caixas de ensaio.

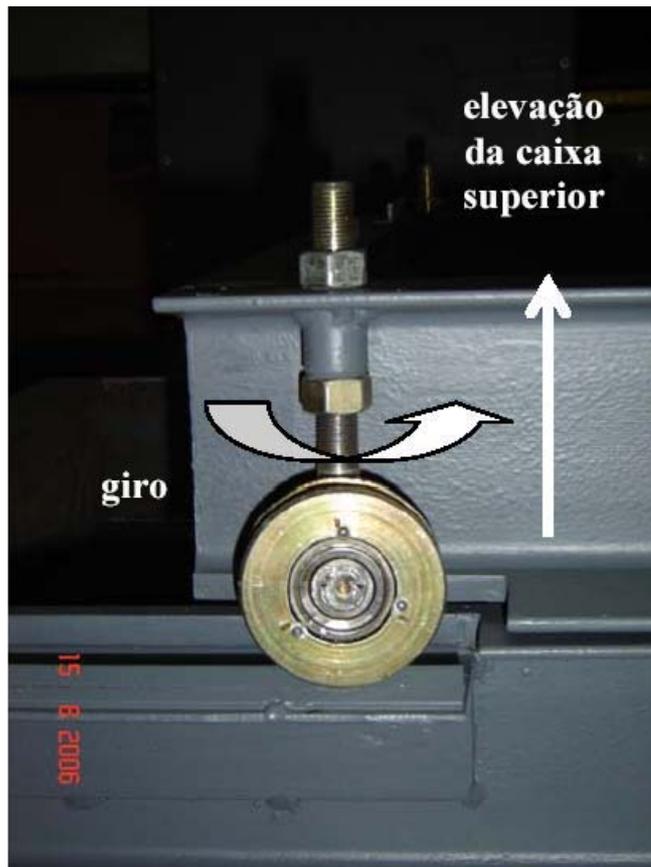


Figura 83 - Sistema de regulagem do espaçamento das caixas de ensaio.



Figura 84 - Limitador de deslocamento (esticado).

Assim, para esta pesquisa, foram desenvolvidos cinco conjuntos de caixas de ensaio. A Tabela 17 apresenta suas características.

Tabela 17 - Características das caixas de ensaio

Conjunto	Caixa de Ensaio	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
1	caixa superior(1)	100	100	5
	caixa inferior(1)	120	100	5
2	caixa superior	50	50	10
	caixa inferior (2)	120	50	10
3	caixa superior	70	70	10
	caixa inferior	80	70	10
4	caixa superior	100	50	10
	caixa inferior	120	50	10
5	caixa superior	100	100	10
	caixa inferior	120	100	10
6	caixa superior	120	100	30
	caixa inferior	120	100	30

(1) conjunto de caixas de ensaio projetado por Aguiar (2003);

(2) conjunto de caixas número 2 utiliza à mesma caixa inferior do conjunto número 4 com um redutor de comprimento acoplado.

O novo conjunto 2 apresenta uma área de contato constante de $0,25\text{m}^2$ (Figura 76). Conforme a Tabela 17, ele apresenta dimensões nominais de 50 x 50cm, caixa superior, e 70 x 50cm, caixa inferior. A altura das caixas é a altura do próprio perfil I, ou seja, 4 polegadas (aproximadamente 10cm de altura). É importante salientar que a caixa inferior deste conjunto é a mesma do conjunto 4. Porém, para se obter um tamanho compatível, ou seja, 50cm da caixa superior mais 20cm de curso, utilizou-se um redutor de comprimento (Figura 85).

O conjunto 3 tem uma área de contato constante de $0,5\text{m}^2$ (Figura 86), assim como o conjunto 4 (Figura 87). As dimensões das duas configurações estão apresentadas na Tabela 17. A diferença entre elas é que o conjunto 3 tem uma caixa superior quadrada e o conjunto 4 uma caixa retangular. A intenção de se construir caixas de formas diferentes foi a de comparar e estudar uma possível influência da forma da caixa nos resultados dos ensaios.

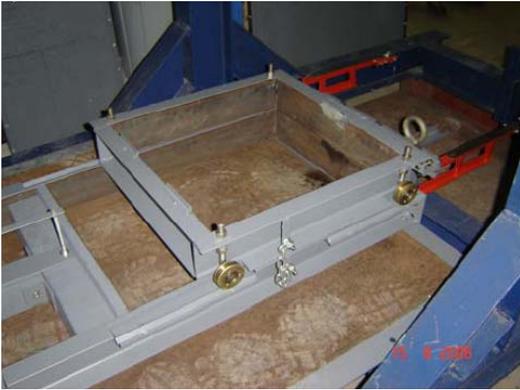


Figura 85 - Conjunto 2 de caixas de ensaio.

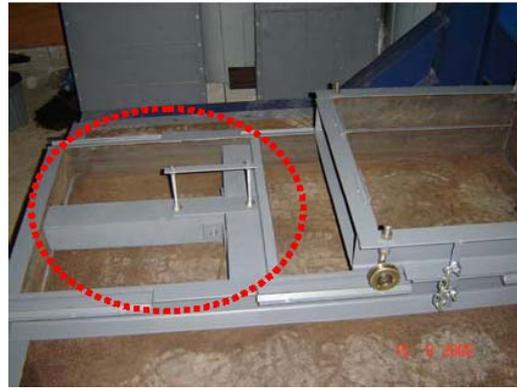


Figura 86 - Detalhe do redutor de comprimento da caixa inferior.



Figura 87 - Conjunto 3 de caixas de ensaio.



Figura 88 - Conjunto 4 de caixas de ensaio.

O conjunto 5 é o maior conjunto de caixas de ensaio de pequena altura (Figura 89). Apresenta uma área de contato constante de 1m^2 , exatamente a mesma do conjunto 1, porém com o dobro da altura e, por consequência, uma maior razão $h/D_{\text{máx}}$.

O conjunto 6 é o maior conjunto de todas as caixas de ensaio (Figura 90) e apresenta uma área de contato constante de $1,2\text{m}^2$.



Figura 89 - Conjunto de caixas de ensaio número 5.



Figura 90 - Conjunto de caixas de ensaio número 6.

Além das caixas, foram construídas novas garras para a fixação de geossintéticos. Elas têm larguras iguais a 10cm e comprimento, compatível com a largura das caixas inferiores de cada um dos conjuntos. A Figura 91 apresenta as garras construídas para a pesquisa.

O conjunto 6 de caixas de ensaio, entretanto, ainda pode usar uma garra móvel (Figura 92). Este garra foi utilizada por Becker (2006) nos seus ensaios de arrancamento de campo.

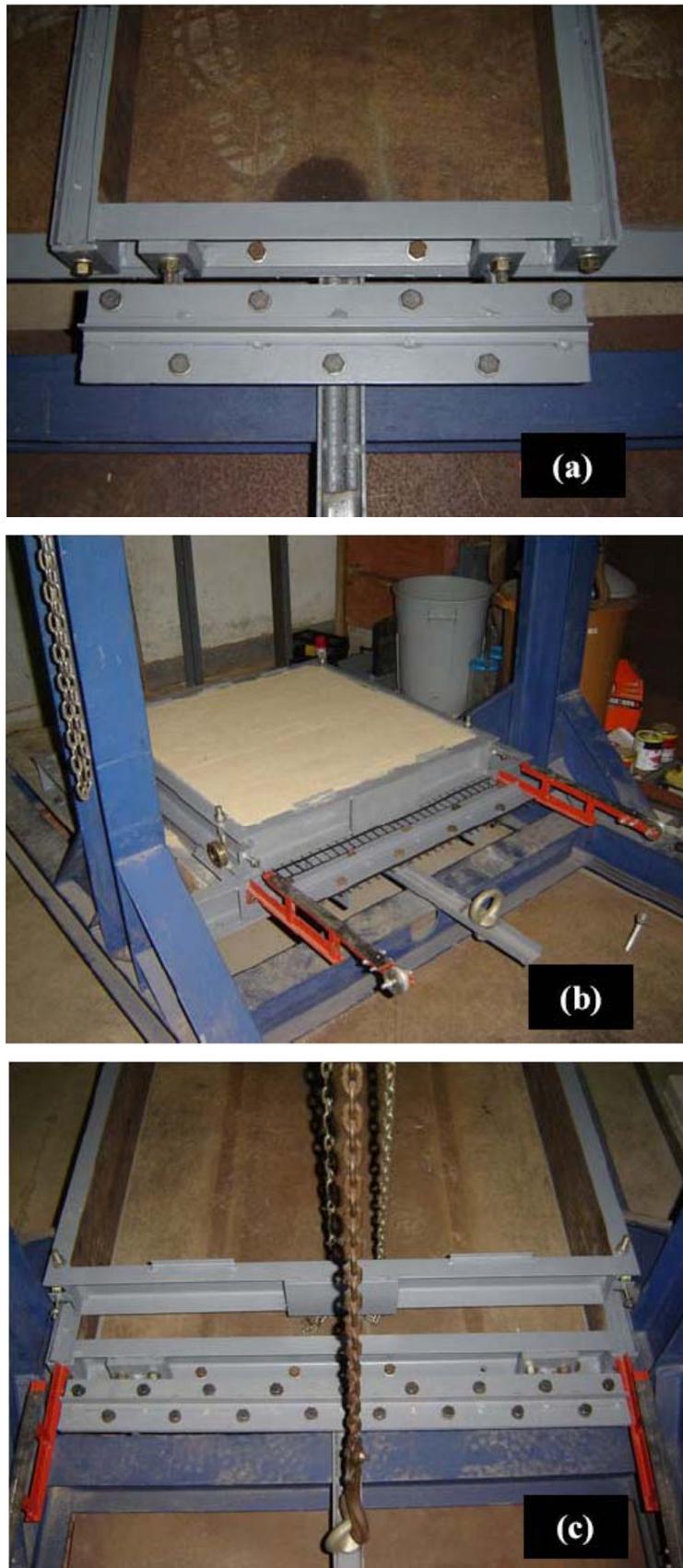


Figura 91 - Garras das caixas de ensaio: (a) garra dos conjuntos de caixas de ensaio 2 e 4, (b) garra do conjunto de ensaio 3 e (c) garra dos conjuntos de caixas ensaio 5 e 6.



Figura 92 - Garra móvel do conjunto 6 de caixas de ensaio (Becker, 2006).

4.3.2. Sistema de Basculamento

As configurações de ensaio de rampa e ensaio de cisalhamento direto inclinado utilizam dispositivo que permite a inclinação da plataforma de ensaio. Denominou-se a esse dispositivo de sistema de basculamento.

O mecanismo de basculamento é simples, sendo composto por um sistema de polias e correntes (talha), fixado no centro do pórtico (Figura 93a). A corrente é ancorada na base da rampa, sobre um dos perfis U que enrijece a base e prolonga-se por 70cm na parte inferior (Figura 93b). A capacidade máxima de içamento do sistema é de 10kN.

4.3.3. Sistema de Aplicação de Força Normal

O sistema de confinamento que será empregado nos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, para baixas tensões confinantes, é composto por uma tampa mista de madeira e aço com dimensões compatíveis com as caixas superiores de cada uma dos conjuntos de caixas de ensaios (Figura 94). Este sistema é denominado de sistema de aplicação direta.

Sobre estas tampas são assentadas placas de aço com dimensões de 30 x 30cm com altura de 2,54cm, 35 x 35cm com altura de 5,08cm ou 40 x 40cm com 2,54cm de altura. Elas pesam individualmente 18, 35 e 28kg, ou seja, 0,18, 0,35 e 0,28kN, respectivamente. (Figuras 95a e b). Estas placas são presas à tampa por meio de dois parafusos passantes que unem todo o conjunto.

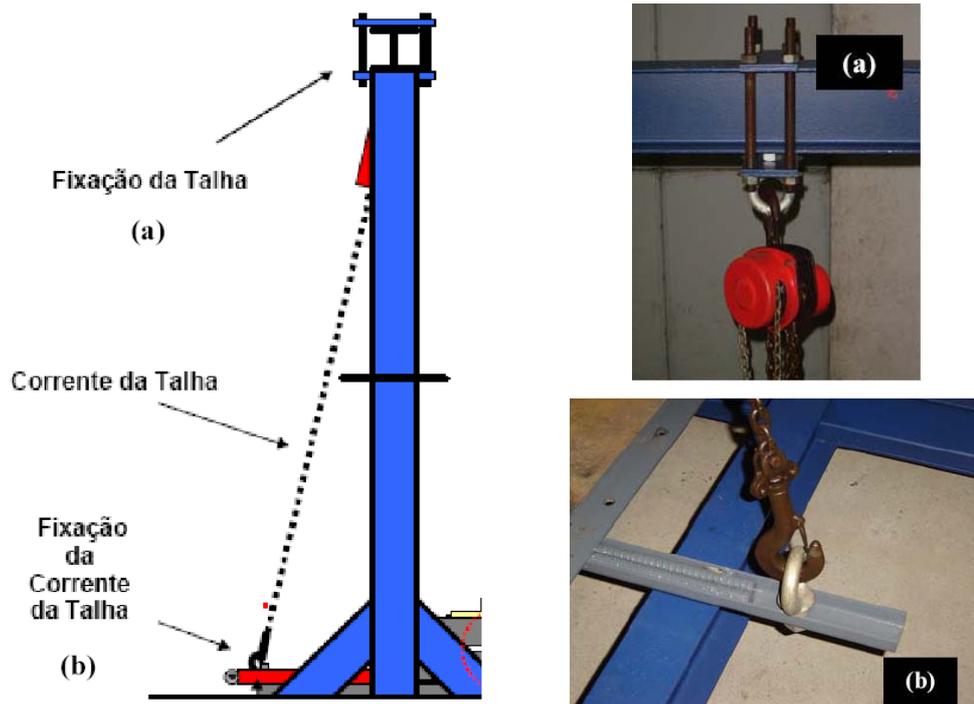


Figura 93 - Sistema de Basculamento: (a) Detalhe da fixação da talha e (b) Detalhe da fixação da corrente da talha.

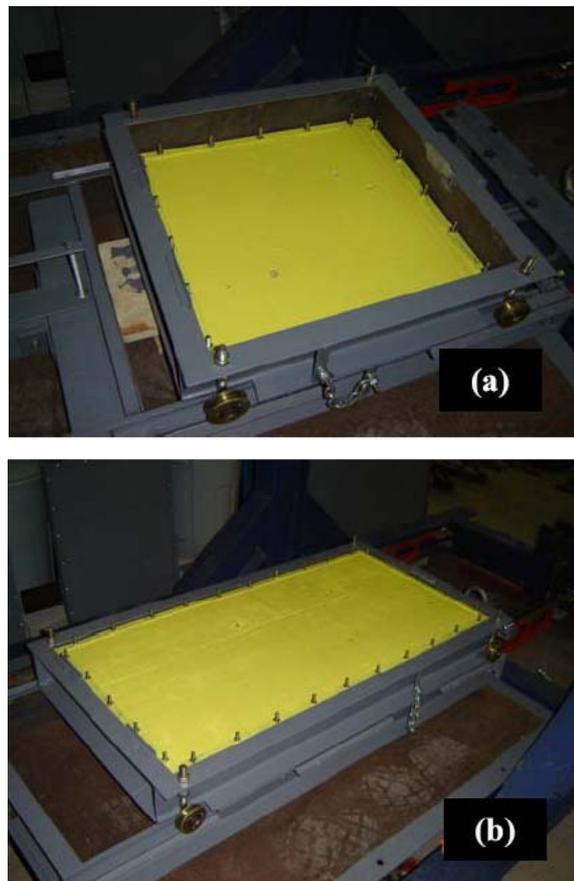


Figura 94 - Tampas do sistema de confinamento. (a) caixa superior do conjunto 2 e (b) caixa superior do conjunto 4.

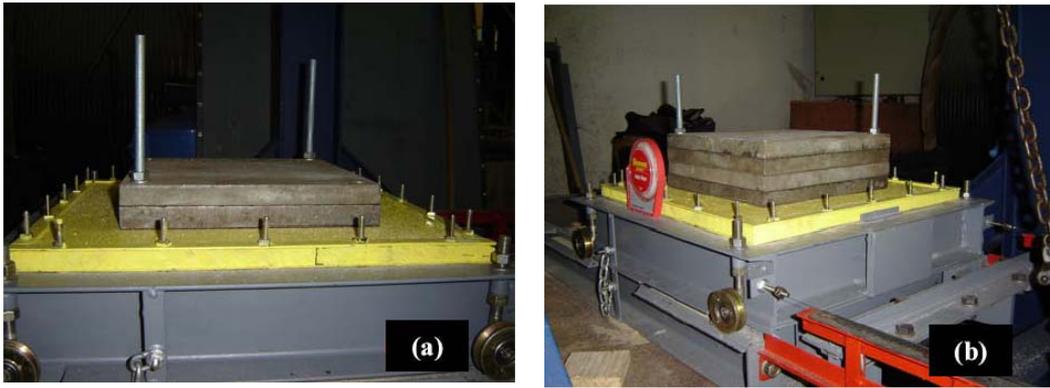


Figura 95 - Sistema de confinamento dos ensaios de Rampa e Cisalhamento Direto Inclinado. (a) Ensaio de rampa com tensão confinante de 3,3kPa e (b) Ensaio de rampa com tensão confinante de 4,7kPa.

A distribuição e a quantidade de placas sobre as tampas fornece a tensão normal do ensaio, calculada da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{(w + p_{\text{tampa}} + p_{\text{placa}})}{A} \quad (10)$$

onde:

A = área da tampa (m^2);

p_{tampa} = peso da tampa de confinamento (kN);

p_{placa} = somatório dos pesos das placas de ensaio (kN);

w = peso do solo.

σ = tensão normal (kPa);

A configuração de caixas de ensaio do conjunto 2 tem uma única pilha de placas sobre a tampa de confinamento (Figuras 95a e b). Porém, para as demais configurações, o número de pilhas aumenta com a área. Por exemplo, a configuração de caixas do conjunto 4 utiliza duas pilhas de placas (Figura 96) para se conseguir a mesma tensão normal de 3,3kPa da configuração do conjunto 2, pois tem o dobro da área. Para as demais configurações, tem-se 4 pilhas de placas de aço manutenção da mesma relação.



Figura 96 - Ensaio de rampa sob tensão confinante de 3,3kPa.

Este sistema é eficiente, porém apresenta algumas restrições operacionais. Conforme a rampa de ensaio vai sendo basculada o centro de gravidade do conjunto de confinamento se desloca em relação ao seu centro geométrico. No limite, ocorre a perda de confinamento na extremidade traseira da caixa superior, devido à tendência de tombamento das placas de aço.

Desta forma, o Item 4.6 (Limitações de Uso) apresenta uma análise para determinação do limite de inclinação da rampa sem a ocorrência de tombamento. Esta análise se aplica aos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado.

O segundo sistema de aplicação de tensão normal é o sistema de confinamento por pendural e destina-se aos ensaios de cisalhamento direto convencional. Ele se assemelha ao do ensaio de cisalhamento direto convencional de pequenas dimensões, como pode ser observado nas Figuras 97 e 98.

Ele é composto por uma placa de reação de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27cm) de espessura e dimensões compatíveis com as caixas superiores de ensaio (Figura 99). Ela é reforçada por barras chatas de 2 polegadas (5,08cm) em forma de dupla

cruz, sobre as quais é soldada uma nova placa de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27cm) de espessura com dimensões de 20 x 20cm.

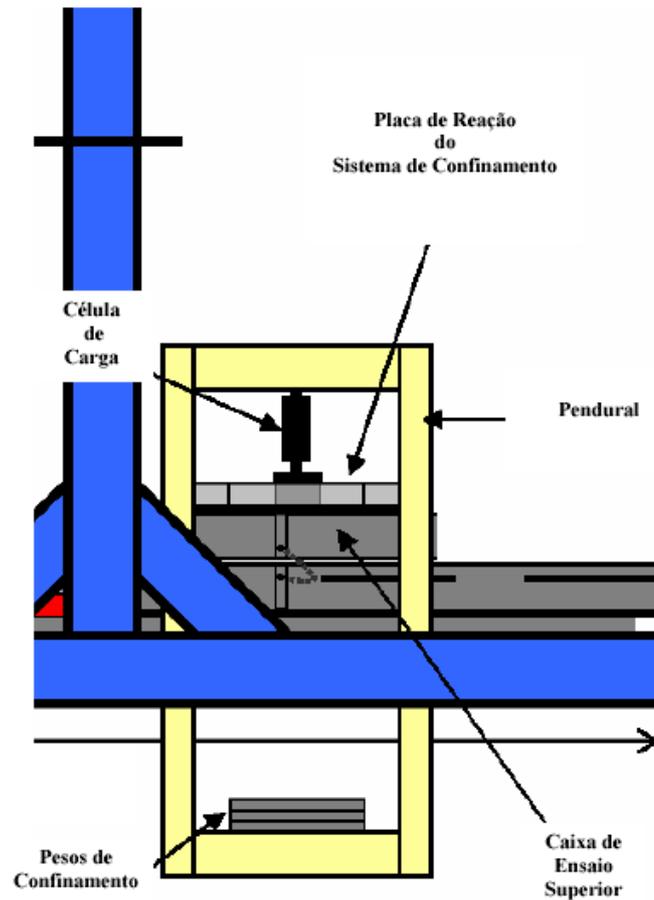


Figura 97 - Vista lateral do sistema de confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional.

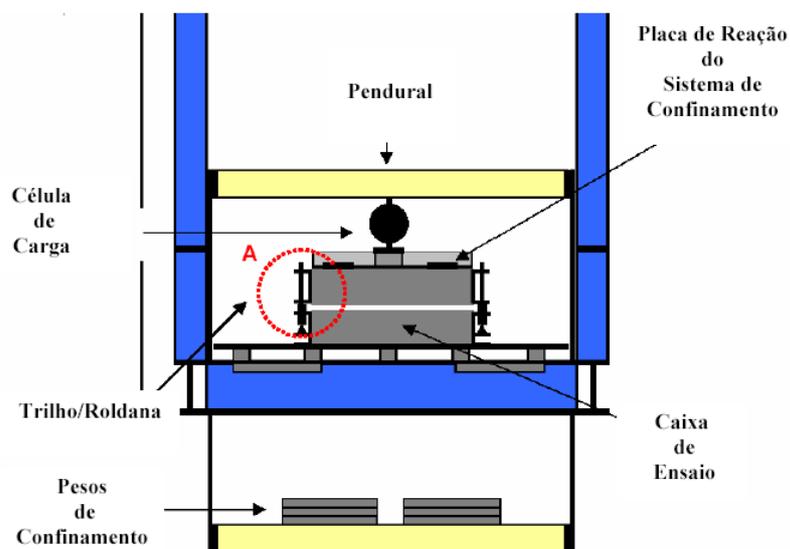


Figura 98 - Vista frontal do sistema de confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional

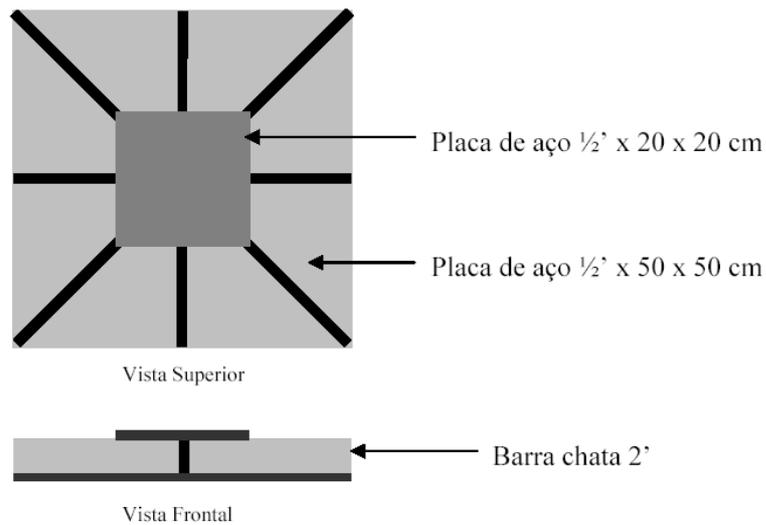


Figura 99 - Placa de reação para a o conjunto de caixa superior do conjunto 2.

Sobre esta placa superior situa-se o ponto de reação da célula de carga do sistema de confinamento (Figura 100). É importante salientar que, da mesma forma que no ensaio de cisalhamento convencional de pequenas dimensões, este ponto é uma rótula e não um ponto rígido.

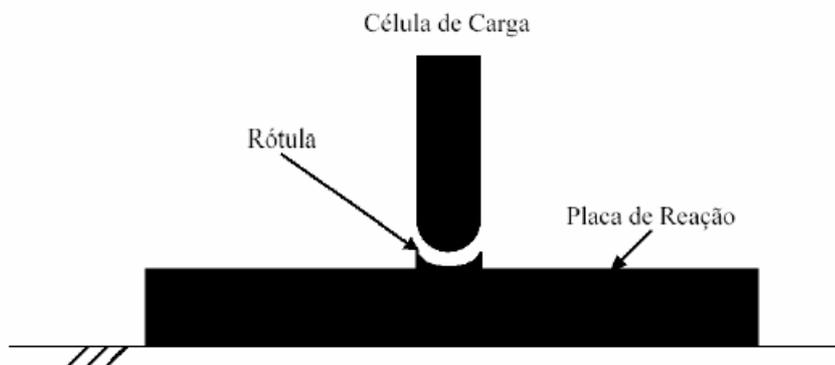


Figura 100 - Detalhe da rótula do ponto de reação.

Sobre este ponto é colocado um conjunto que contém a célula de carga e o pendural (Figuras 97 e 98). O pendural é uma estrutura de aço composta por perfis I de 4" (10cm) soldados. Nesta estrutura são fixadas quatro barras, locadas no espaço entre a plataforma e a base do equipamento, até a parte inferior da estrutura (Figura 98).

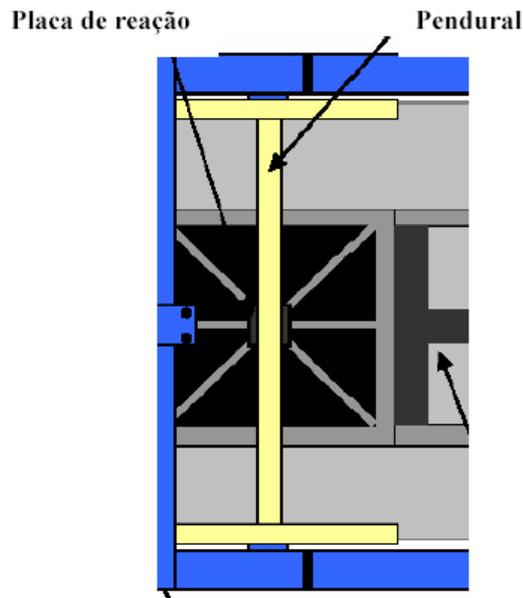


Figura 101 - Vista superior do pendural de carga.

As barras se ligam a uma base de carga sobre a qual são depositados os pesos de confinamento (Figura 98). O limite de carga sobre esta plataforma é de 19,6kN, ou seja, uma tensão confinante de máxima de 80kPa, para configuração de caixas do conjunto 2, e de 40kPa para a configuração de caixas conjunto 3.

O terceiro sistema proposto é o de bolsa de ar, destinado aos ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e cisalhamento direto com reforço inclinado. A bolsa proposta seria baseada na experiência da COPPE com este tipo de material. Elas seriam construídas em PVC cinza, conhecidas como “*manton*” e teriam dimensões internas compatíveis com o conjunto 6 de caixas de ensaio. A carga nominal seria em torno de 100kPa. Maiores detalhes deste sistema consultar são apresentados por Saramago (2002).

4.3.4. Sistema de Aplicação de Força Cisalhante

Denomina-se de sistema de aplicação de tensões cisalhante ao conjunto de equipamentos e estruturas associadas que impõe força cisalhante aos conjuntos de caixas de ensaio. O primeiro sistema destina-se aos ensaios de cisalhamento direto inclinado.

Ele consiste de dois cabos de aço de $\frac{1}{4}$ de polegada (0,64cm) que tem uma de suas extremidades fixa na caixa de ensaio superior e a outra presa a uma

plataforma de madeira revestida com aço, formando um conjunto único. Os cabos passam sobre duas roldanas que tem por função transmitir os esforços dos pesos até a extremidade posterior da caixa superior em qualquer inclinação da plataforma de ensaio. Estes pesos têm seus valores conhecidos, sendo os mesmos do ensaio de cisalhamento convencional de pequenas dimensões (Figuras 102a e b).



(a)



(b)

Figura 102 - Detalhe do sistema de aplicação de tensões cisalhantes do ensaio de cisalhamento direto e inclinado: (a) ligação na caixa superior e (b) plataforma de carga.

O valor da tensão cisalhante aplicada vai ser o somatório dos pesos acumulados sobre a plataforma de madeira, em kN, dividida pela área de contato solo-geossintético. No Item 4.5 (Testes Preliminares) é apresentado o limite de utilização deste sistema.

O segundo se destina aos ensaios de cisalhamento direto convencional e cisalhamento com reforço inclinado. É constituído por um conjunto marca hidráulico Enerpac (Figura 103), composto por um macaco hidráulico com capacidade de 12 ou 25ton, bomba, manômetro e mangueiras, associado a uma célula de carga.



(a)



(b)

Figura 103 - Conjunto hidráulico Enerpac.

Todo este conjunto é fixo em um pórtico de carga conforme Figura 104. Este pórtico é constituído de perfis I (4' ou 10cm) soldados e dimensionado para resistir aos esforços solicitantes. Ele apresenta duas posições para fixação do sistema de aplicação de tensão cisalhante. A primeira se destina às caixas de ensaio com 10cm de altura e a segunda às caixas de ensaio com 30cm de altura.

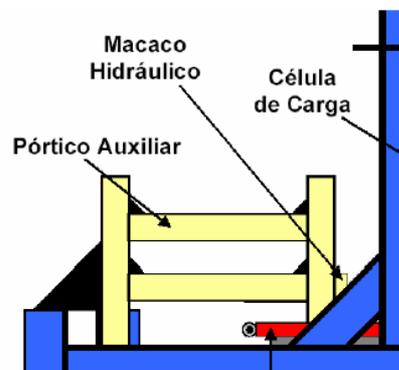


Figura 104 - Detalhe do sistema de aplicação de tensão cisalhante.

O terceiro sistema é utilizado nos ensaios de arrancamento. Ele é composto por um pórtico de carga constituído de perfis I (4' ou 10cm) soldados e dimensionado para resistir aos esforços solicitantes. Nele é fixo o macaco hidráulico que aplica as tensões de arrancamento (Figura 105). Ele emprega os mesmos macacos Enerpac citados anteriormente.

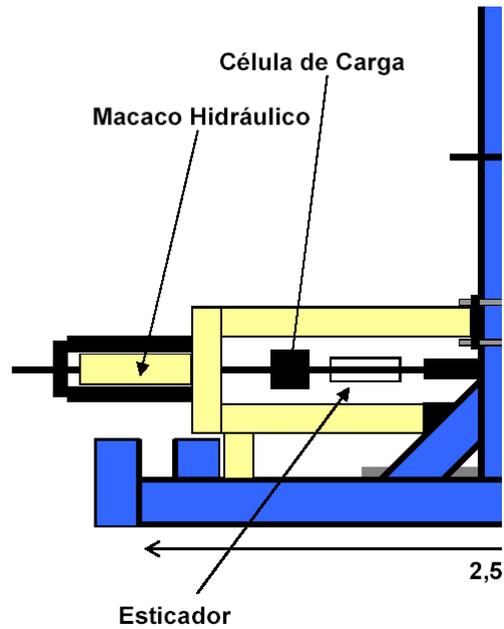


Figura 105 - Detalhe do sistema de arrancamento.

4.3.5. Instrumentação

As grandezas mensuradas durante os ensaios são deslocamentos horizontais, ângulo de inclinação de rampa, força normal e força cisalhante.

Os ângulos de rampa foram monitorados por um medidor de ângulo mecânico com base magnética marca Starrett com precisão de $0,5^\circ$ (106). Este dispositivo é fixado na lateral da caixa, mais precisamente, na borda da caixa de ensaio (Figura 107).



Figura 106 - Medidor de ângulo de rampa com base magnética.



Figura 107 - Posição do medidor na borda da caixa.

Os deslocamentos horizontais podem ser monitorados através de dois tipos de dispositivos: medidor de deslocamento mecânico tipo *tell-tale* ou LVDT.

O primeiro dispositivo foi empregado nos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado. Este instrumento, simples e eficiente, é composto por uma linha metálica, com uma extremidade presa na caixa superior (Figura 108). Na outra extremidade é pendurado um peso de 100g. A linha metálica é suportada por uma roldana fixa na extremidade de uma pequena estrutura de aço, sobre a qual é ajustada uma régua metálica de 30cm (Figura 109). Um pequeno amassador dobrado é fixado na linha metálica para servir como referência para fazer as leituras. A precisão do *tell-tale* é de 0,5mm. São empregados dois dispositivos nos ensaios, um em cada extremidade da caixa superior .



Figura 108 - Fixação do *tell-tale* na caixa superior.



Figura 109 - Dispositivo do tipo *tell-tale*.

Os LVDT's são da marca Gefran, modelo LT-M-0100-S, com 90mm de curso (Figura 110). Eles são fixados sobre a estrutura dos *tell-tales*.



Figura 110 - Medidor de deslocamento horizontal marca Gefran.

Para medir as cargas atuantes foram propostos dois tipos de instrumentos: manômetros e /ou células de carga. O manômetro é da marca Enerpac, modelo G2535L, com capacidade de 700Bar ilustrado na Figura 111a. As células de carga da marca Kratos, tipo KCL, têm capacidade de 50kN (Figura 111b).



(a)

(b)

Figura 111 - Instrumentos para a medição de cargas: (a) manômetro Enerpac e (b) célula de carga Kratos.

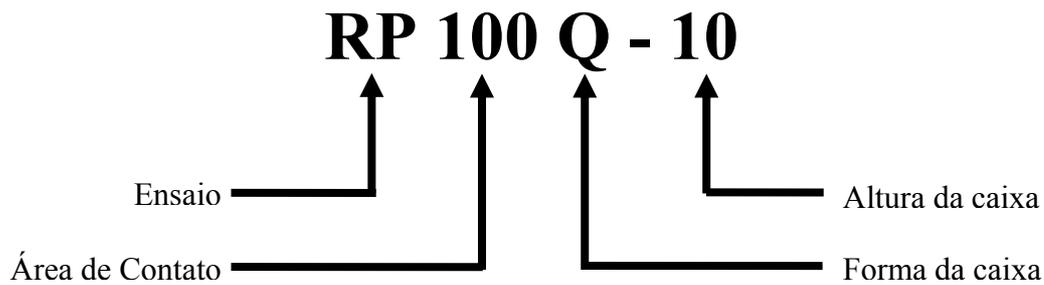
As medidas de todos os instrumentos eletrônicos são registradas através de sistema de aquisição de dados acoplado a um computador.

4.4. Configurações de Ensaio

A combinação dos diferentes acessórios dá origem às configurações de ensaio propriamente ditas. No caso desta pesquisa serão utilizadas 5 configurações de ensaio de rampa e 3 configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado. É importante ressaltar que ensaios de cisalhamento direto convencionais poderão ser realizados utilizando as configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado com a plataforma de ensaio na horizontal (zero graus).

Entretanto foram projetadas, também, configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional e arrancamento.

De modo a facilitar a identificação de cada uma das configurações de ensaio, foi adotada a seguinte convenção:



onde:

<i>ensaio:</i>	RP	Ensaio de rampa
	CC	Ensaio de cisalhamento direto convencional
	CI	Ensaio de cisalhamento direto inclinado
	AR	Ensaio de arrancamento

<i>área de contato:</i>	25	Área de contato de 0,25m ²
	50	Área de contato de 0,50m ²
	100	Área de contato de 1,00m ²

<i>forma da caixa:</i>	Q	Caixas de ensaio quadradas
	R	Caixas de ensaio retangulares

<i>altura da caixa:</i>	5	5cm de altura máxima da caixa de ensaio
	10	10cm de altura máxima da caixa de ensaio
	30	30cm de altura máxima da caixa de ensaio

4.4.1. Ensaio de Rampa

Foram construídas quatro configurações de ensaio de rampa. Elas diferenciam-se pelo tamanho, forma da área de contato e altura das caixas. Estas configurações são obtidas através da combinação dos diferentes acessórios descritos anteriormente. A Tabela 18 resume as características de cada uma das configurações de ensaio de rampa. Para facilitar a compreensão elas serão denominadas: RP25Q-10, RP50Q-10, RP50R-10, RP100Q-5 e RP100Q-10. A

configuração RP100Q-5 foi desenvolvida por Aguiar (2003) e é apresentada para fins de comparação.

Tabela 18 - Resumo das características das configurações de ensaio de Rampa

Características		Configuração de Ensaio				
		RP25Q-10 (Fig. 112)	RP50Q-10 (Fig. 113)	RP50R-10 (Fig. 114)	RP100Q-5 (Fig. 115)	RP100Q-10 (Fig. 116)
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
Inclinação das faces frontal e de fundo da caixa de ensaio superior	V (0°)	sim	sim	sim	sim	sim
	I (30°)	sim	não	sim	não	não



Figura 112 - Configuração RP25Q-10.



Figura 113 - Configuração RP50Q-10.



Figura 114 - Configuração RP50R-10.



Figura 115 - Configuração RP100Q-5.



Figura 116 - Configuração RP100Q-10.

Cada uma das configurações de ensaio desenvolvidas apresenta suas particularidades, entretanto, de uma forma geral, elas têm sempre a mesma disposição (Figuras 117, 118 e 119).

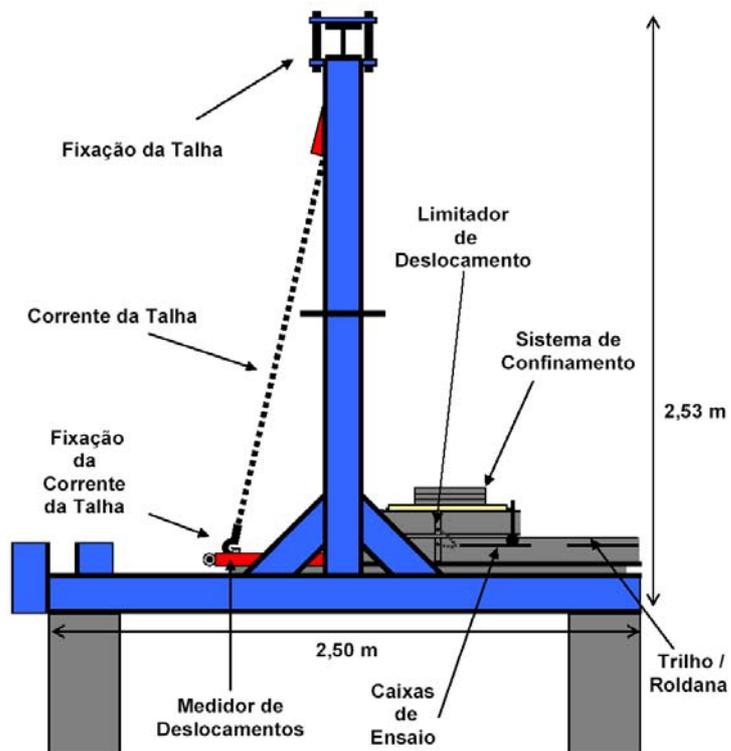


Figura 117 - Vista lateral da configuração de ensaio de rampa.

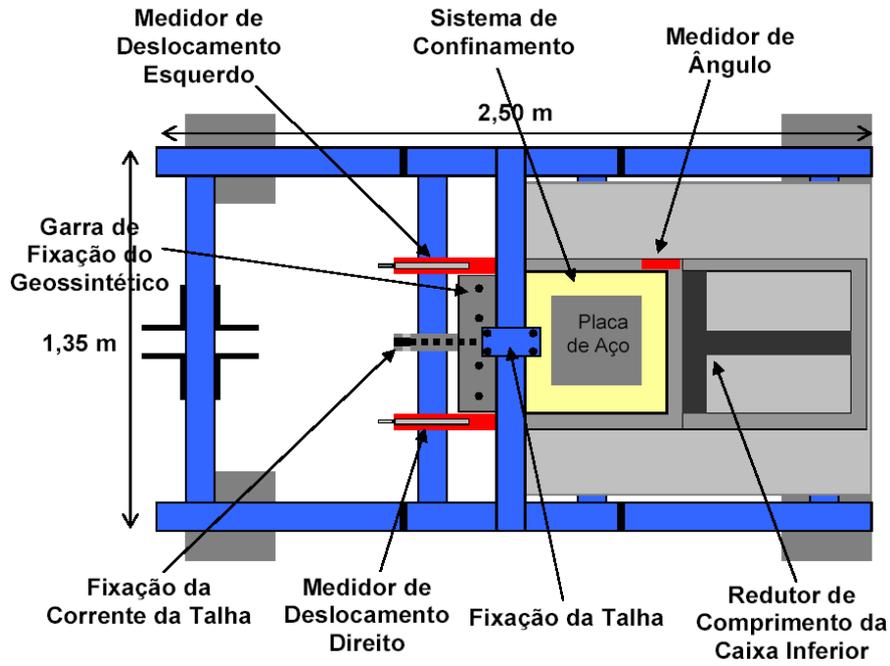


Figura 118 - Vista superior da configuração de ensaio de rampa.

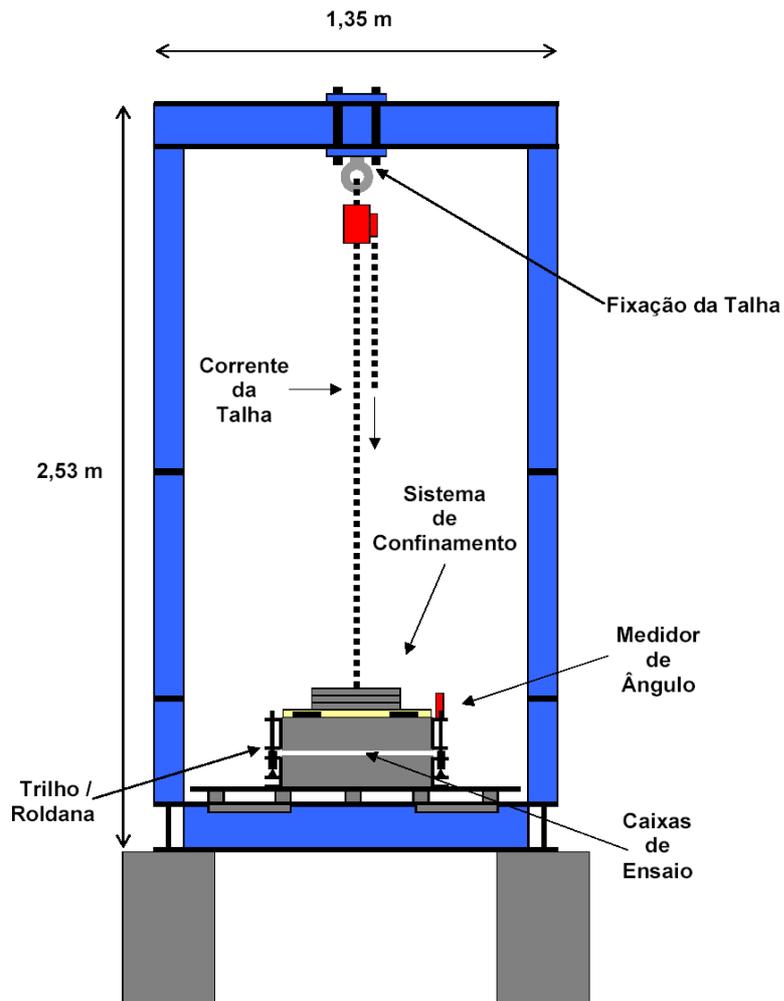


Figura 119 - Vista frontal da configuração de ensaio de rampa.

Observar-se que, independente da configuração de ensaio, existem sempre dois medidores de deslocamento horizontal posicionados nas extremidades das caixas superiores de ensaio e um medidor de ângulo situado em uma das bordas da extremidade anterior da caixa. O sistema de confinamento é sempre por gravidade e de aplicação direta, composto por placas de aço que ficam sobre uma tampa mista de madeira e aço.

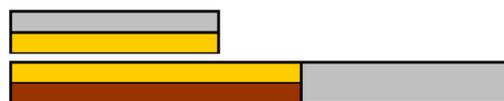
São sempre duas caixas de ensaio com alturas iguais a 5 ou 10cm, dependendo da configuração. Nas configurações de ensaio RP25Q-10 e RP50R-10 é possível variar a altura útil das caixas utilizando-se um fundo falso (Figura 120). Desta forma, para estas configurações, estão disponíveis alturas internas de 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 cm.



(a) Configuração RP25Q-10 com altura reduzida para 5cm.



(b) Detalhe da caixa



Caixa Superior

Caixa Inferior

(c) Esquema lateral da RP25Q-10 com altura interna das caixas reduzida para 5cm. A cor clara representa o solo, a cor escura o calço utilizado para reduzir a altura e a cor cinza representa os vazios.



Caixa Superior

Caixa Inferior

(d) Esquema lateral da RP50R-10 com altura interna das caixas reduzida para 5cm. A cor clara representa o solo, a cor escura o calço utilizado para reduzir a altura e a cor cinza representa os vazios.

Figura 120 - Configurações de ensaio com caixas com altura reduzida.

Os ensaios de rampa podem ser realizados com as faces, frontal e traseira, da caixa superior de ensaio na vertical ou com as faces inclinadas de 30° com a

vertical, conforme recomendação da norma ISO 12957-2. Esta possibilidade é disponível para as configurações RP25Q-10 e RP50R-10 (Figura 121).

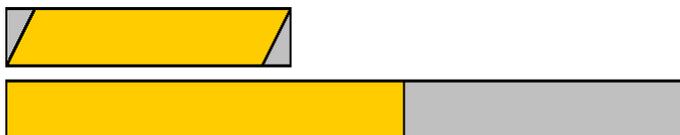


Figura 121 - Vista lateral da configuração RP25Q-10 com faces inclinadas a 30 graus.

No Apêndice I estão às três vistas (frontal, lateral e superior) de cada uma das configurações de ensaio de rampa e suas características.

4.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

O ensaio de cisalhamento direto inclinado é uma derivação do ensaio de rampa e dele foram habilitadas três configurações de ensaio. Assim como no ensaio de rampa, as configurações de ensaio de cisalhamento inclinado são diferenciadas pela área de contato. A Tabela 19 resume as características. Para facilitar a compreensão elas serão denominadas: CI25Q-10, CI50Q-10 e CI100Q-10.

Tabela 19 - Resumo das características das configurações de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

Características		Configuração de Ensaio		
		CI25Q-10 (Fig. 122)	CI50R-10 (Fig. 123)	CI100Q-10 (Fig. 124)
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00
Inclinação das faces frontal e de fundo da caixa de ensaio superior	V (0°)	sim	sim	sim
	I (30°)	sim	sim	não



Figura 122 - Configuração CI25Q-10.



Figura 123 - Configuração CI50R-10.



Figura 124 - Configuração CI100Q-10.

De uma forma geral as configurações de cisalhamento direto inclinado apresentam a seguinte disposição (Figuras 125 a 127).

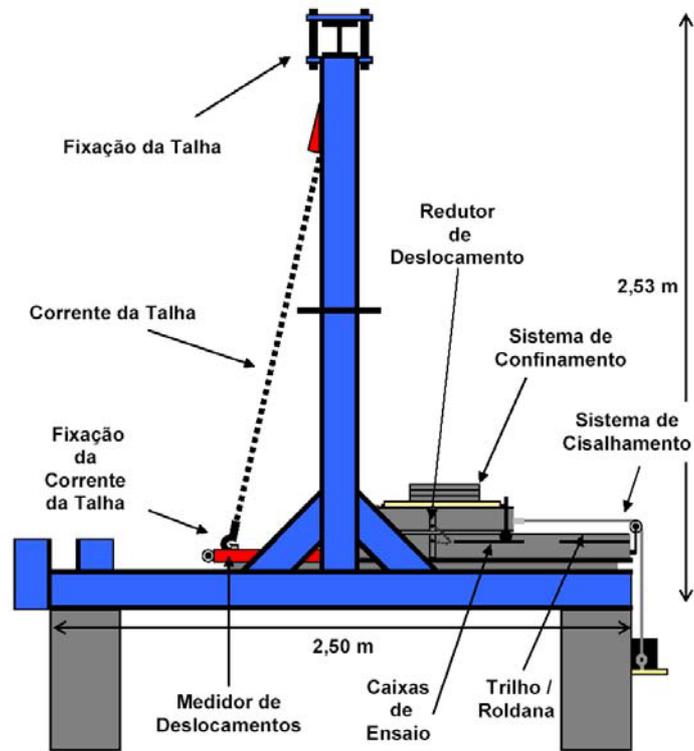


Figura 125 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto inclinado.

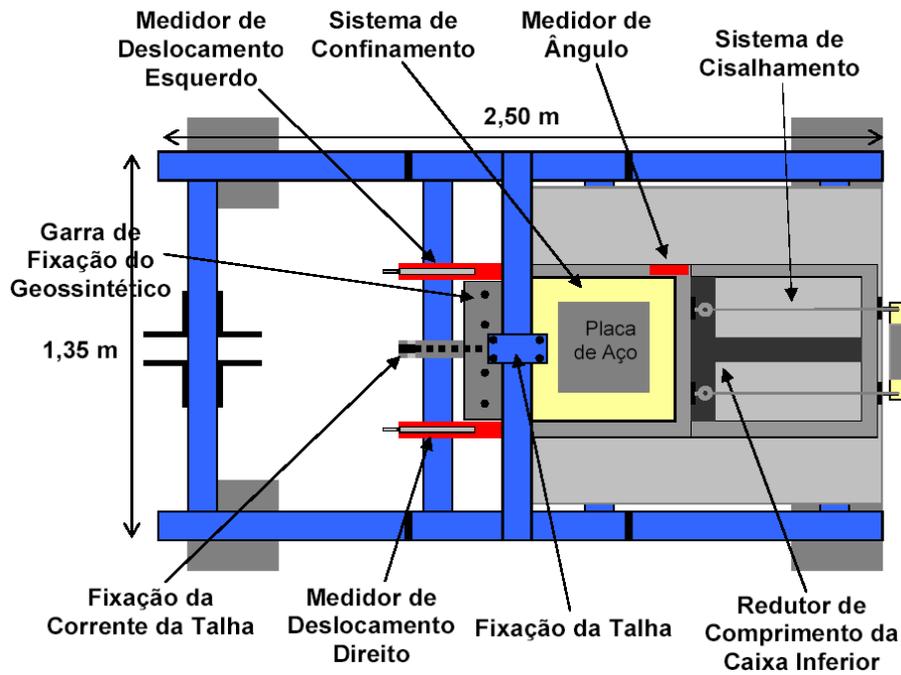


Figura 126 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto inclinado.

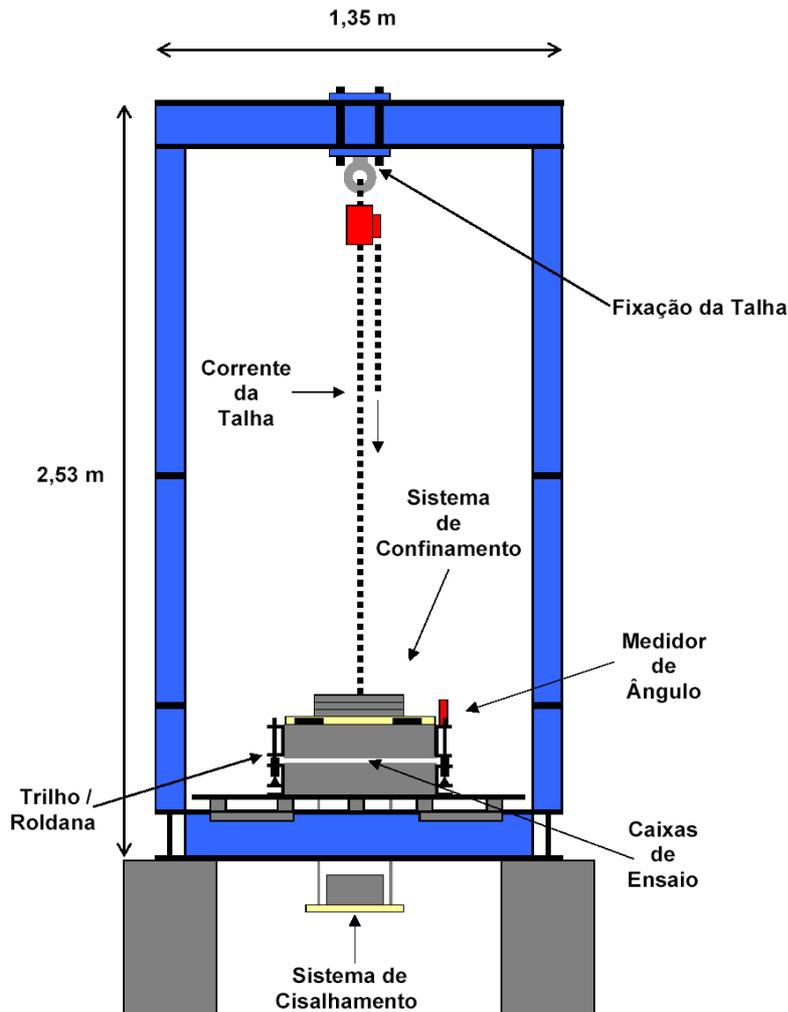


Figura 127 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto inclinado.

O sistema para ensaio de cisalhamento inclinado, assim o ensaio de rampa, apresenta as mesmas características, tais como dois medidores de deslocamento horizontal, medidor de ângulo, caixas de ensaio com altura de 10cm, regulagem da altura útil das caixas utilizando-se fundo falso e inclinação ou não das faces de frente e fundo da caixa superior de ensaio.

A diferença entre os ensaios de rampa e de cisalhamento inclinado reside na incorporação de um sistema de aplicação de força cisalhante no último. Este sistema simples consiste de um conjunto de cabos de aço, roldanas, plataforma de cargas e pesos que induz uma força cisalhante na caixa de ensaio superior (Item 4.3.4).

O Apêndice II apresenta as vistas frontal, lateral e superior de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento inclinado e as suas características.

4.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Foram projetadas e parcialmente construídas quatro configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional. Estas configurações diferenciam-se, pelo tamanho da área de contato, forma da área de contato, altura das caixas de ensaio e sistema de aplicação de tensão confinante. Tabela 20 resume as características de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 20 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional

Características		Configuração de Ensaio			
		CC25Q-10	CC50Q-10	CC100Q-10	CC120R-30
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,70	0,10	0,30
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00	1,20
Sistema de Aplicação de Carga Confinante	Direta	sim	sim	sim	sim
	Pendural	sim	sim	não	não
	Bolsa de Ar	não	não	não	sim

As Figuras 128 a 130 apresentam as configurações CC25Q-10 e CC50Q-10, que apresentam a mesma disposição. A configuração CC100Q-10 é apresentada nas Figuras 131 a 133 e a configuração CC120R-30 nas Figuras de 134 a 136.

Independente da configuração de ensaio existe sempre dois medidores de deslocamento horizontal posicionados nas extremidades da caixa superior. A aplicação de força cisalhante é sempre por macaco hidráulico e seu valor é mensurado através de uma célula de carga. A velocidade de cisalhamento vai depender do tipo de solo ensaiado. A configuração CC25Q-10 pode ter a altura útil das caixas reguladas utilizando o mesmo fundo falso empregado nos ensaios de rampa.

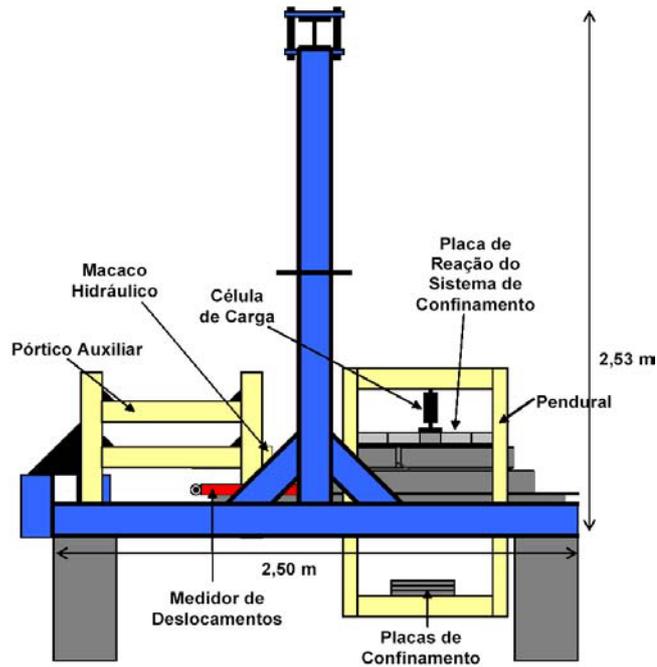


Figura 128 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

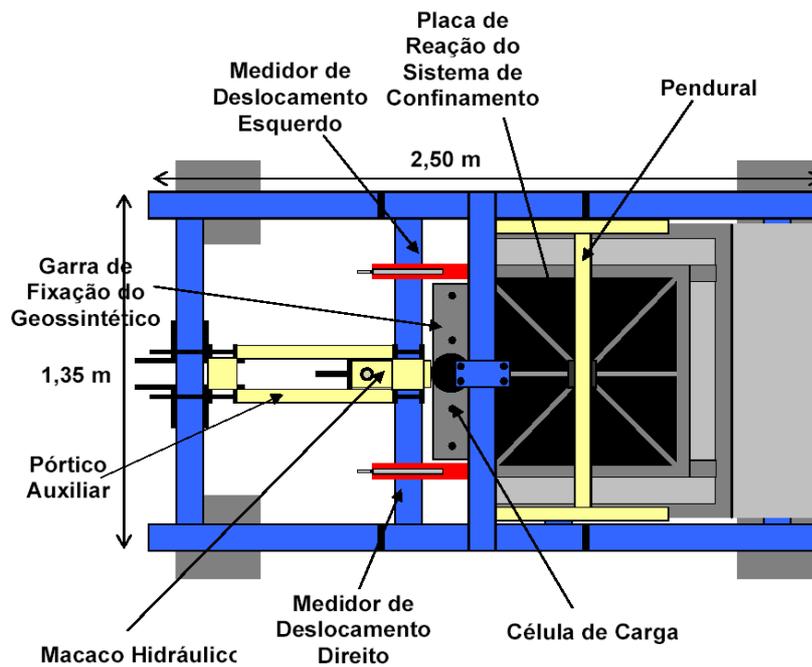


Figura 129 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

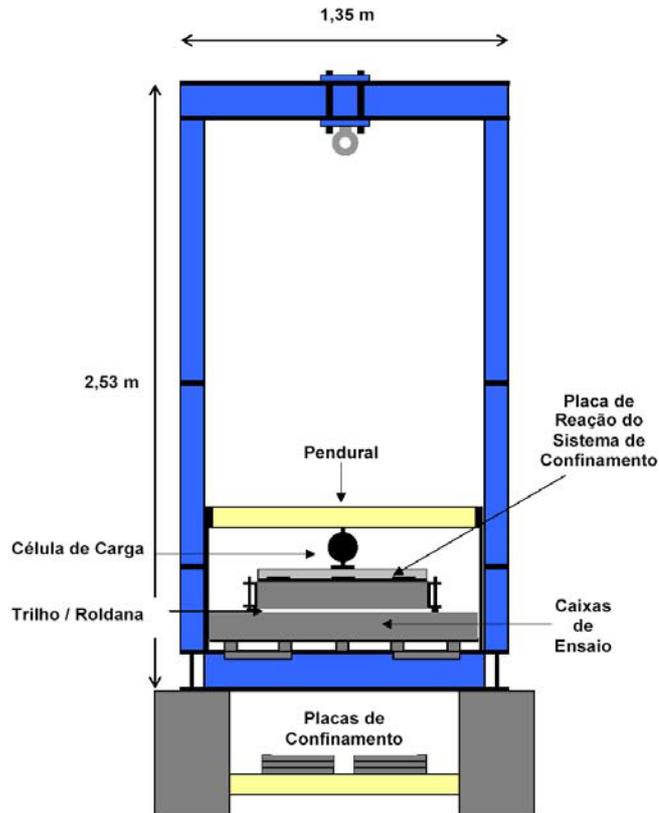


Figura 130 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

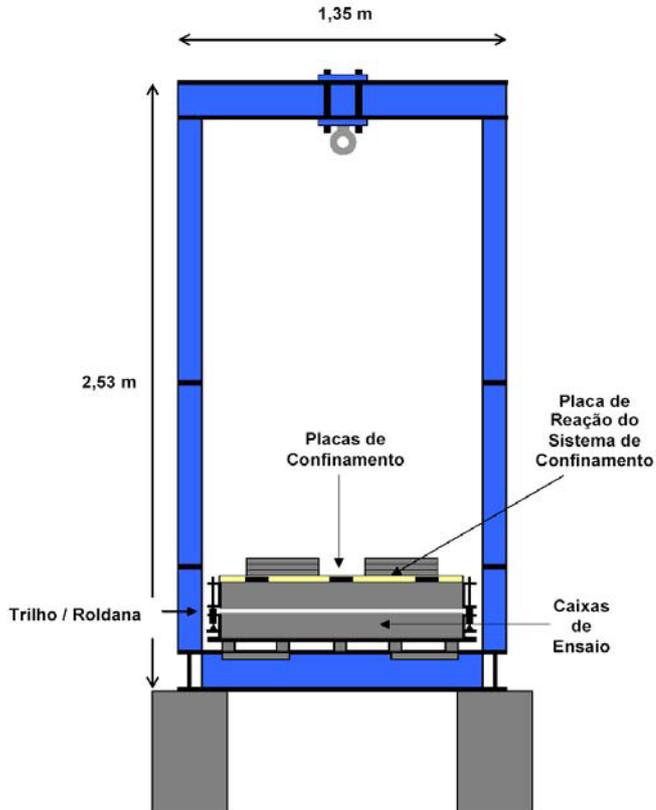


Figura 131 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC100Q-10.

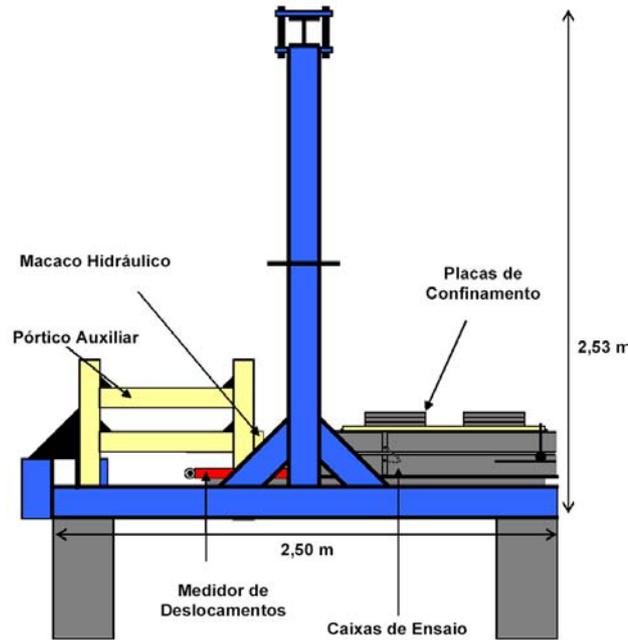


Figura 132 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

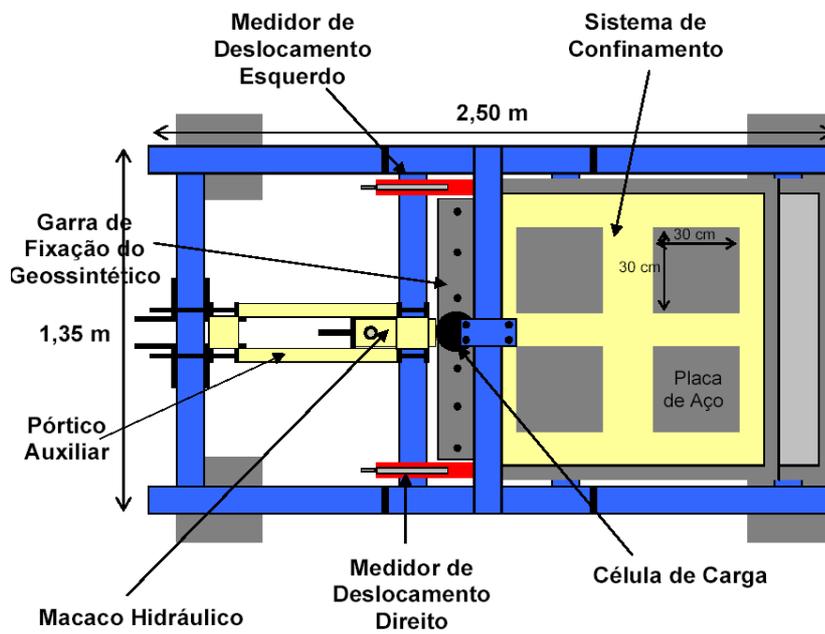


Figura 133 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

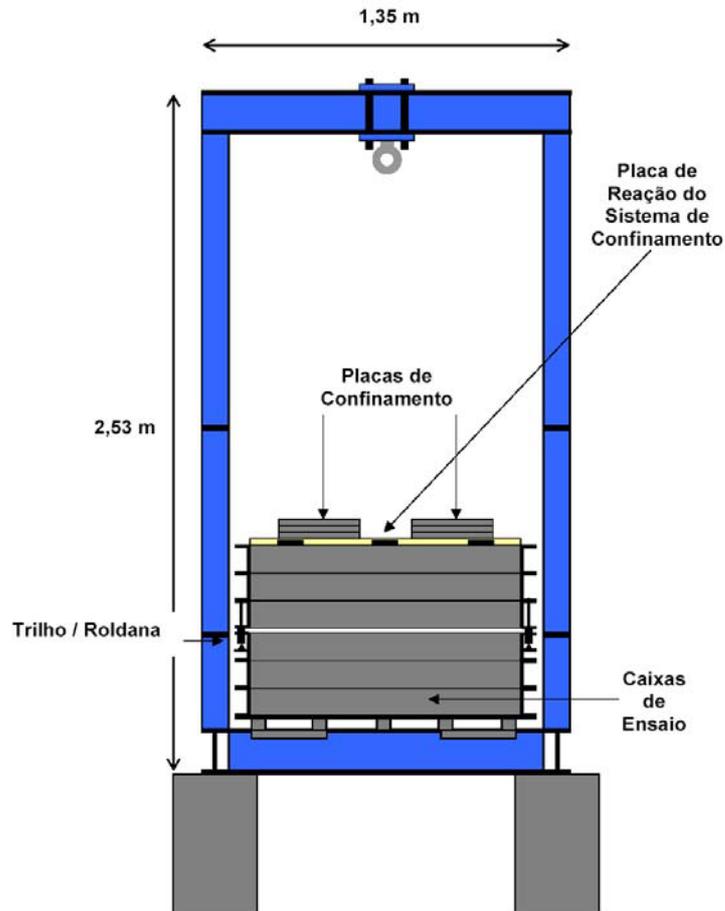


Figura 134 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

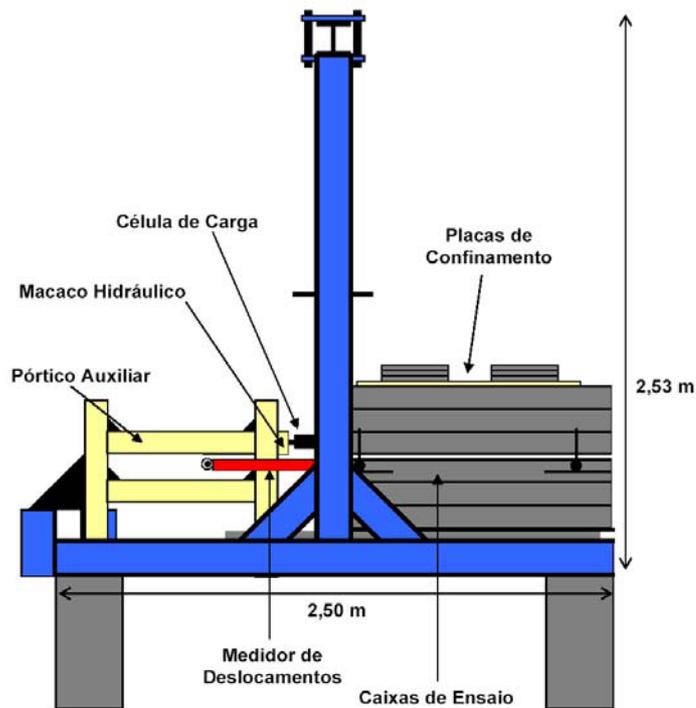


Figura 135 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30

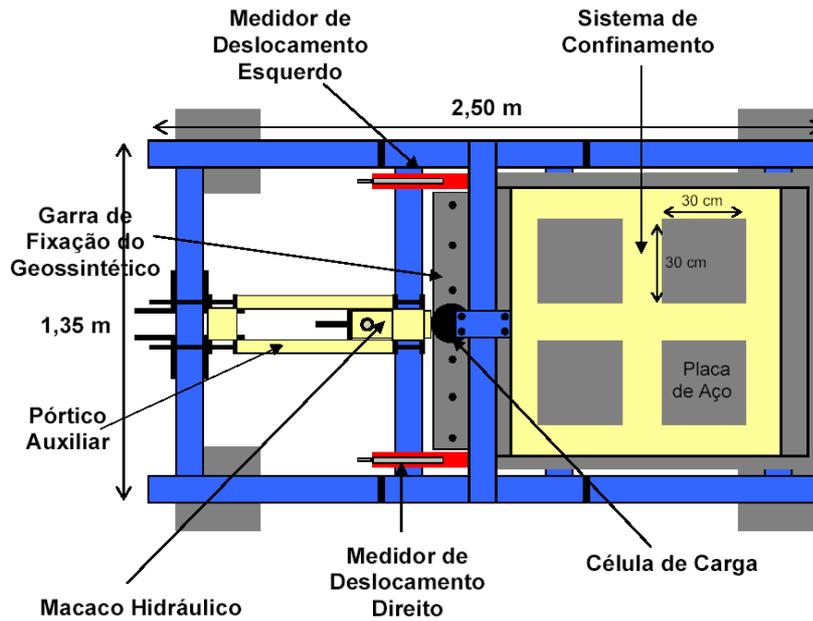


Figura 136 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

É importante salientar que a configuração de ensaio de cisalhamento direto CC120R-30 foi planejada para realizar ensaios de cisalhamento direto convencional e ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. As possibilidades de disposição dos geossintéticos e configurações das caixas são apresentadas na Figuras 137.

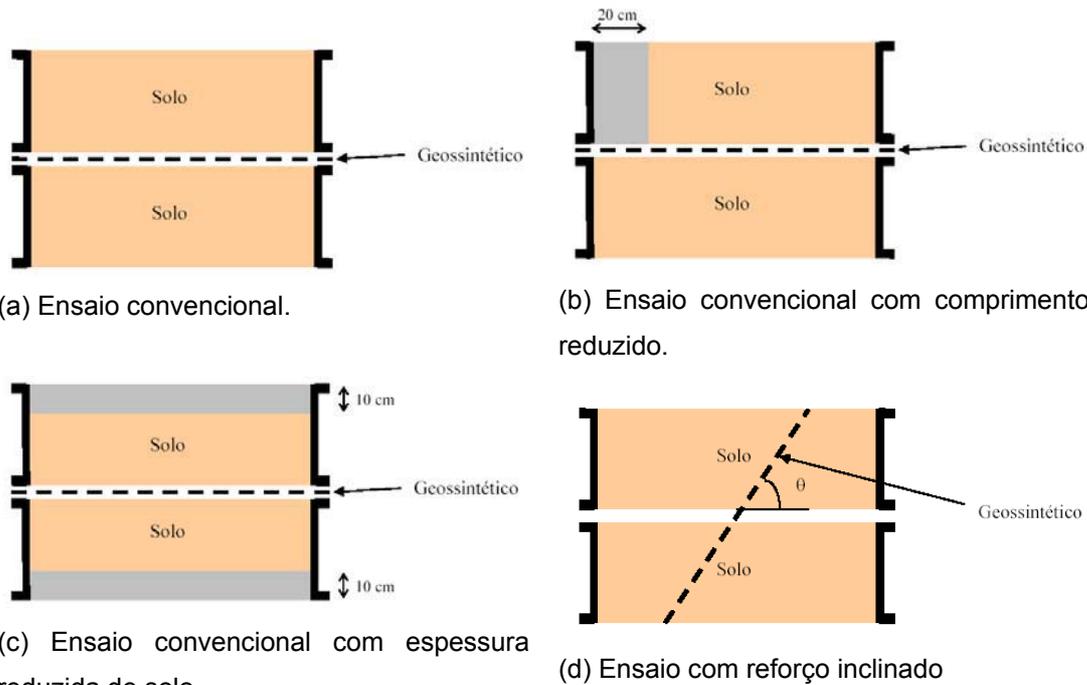


Figura 137 - Configurações das caixas e posicionamento do geossintético em ensaios de cisalhamento direto.

No Apêndice III estão às três vistas (frontal, lateral e superior) de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto propostas neste trabalho.

4.4.4. Ensaio de Arrancamento

Foi projetada e parcialmente construída uma configuração para ensaio de arrancamento. A Tabela 21 resume as características deste ensaio a ser executado em amostras de grandes dimensões com área de contato de 1,0m². Vale ressaltar que esta configuração é proposta para posterior habilitação do equipamento, a ser realizada por pesquisas posteriores.

Tabela 21 - Resumo das características das configurações de ensaio de arrancamento

Características	Configuração de Ensaio	
	AR120R-30	
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
	área de contato (m ²)	1,20

A configuração de ensaio apresenta dois medidores de deslocamento horizontal posicionados na frente da caixa de ensaio para medir o deslocamento da garra. Além disso, na extremidade posterior da caixa de ensaio, existe um quadro de medidores de deslocamento que tem por finalidade medir as deformações da manta de geossintético.

A aplicação de força cisalhante é sempre por macaco hidráulico e seu valor é mensurado através de uma célula de carga. A velocidade de arrancamento é sempre baixa, sendo sugerido o valor de 1mm/min. Pode ser utilizados os sistemas de aplicação de carga de confinante de aplicação direta (baixas tensões confinantes) e por bolsa de ar (médias tensões confinantes).

A configuração geral do ensaio de arrancamento é apresentada nas Figuras 138 a 140 detalhadas no Apêndice IV.

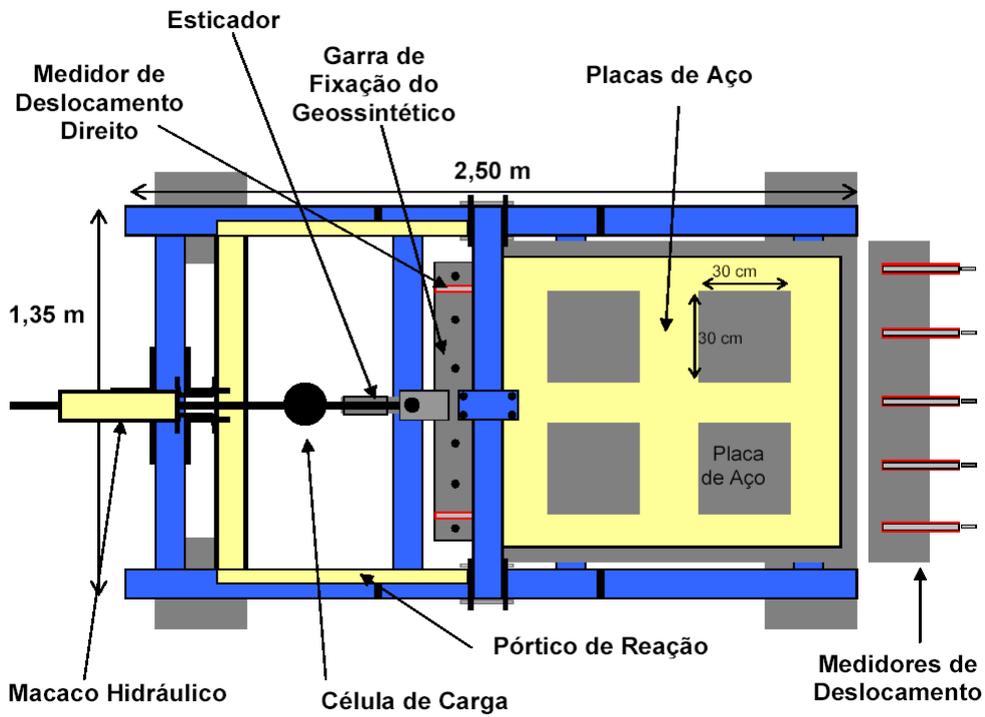


Figura 138 - Vista superior da configuração de arrancamento.

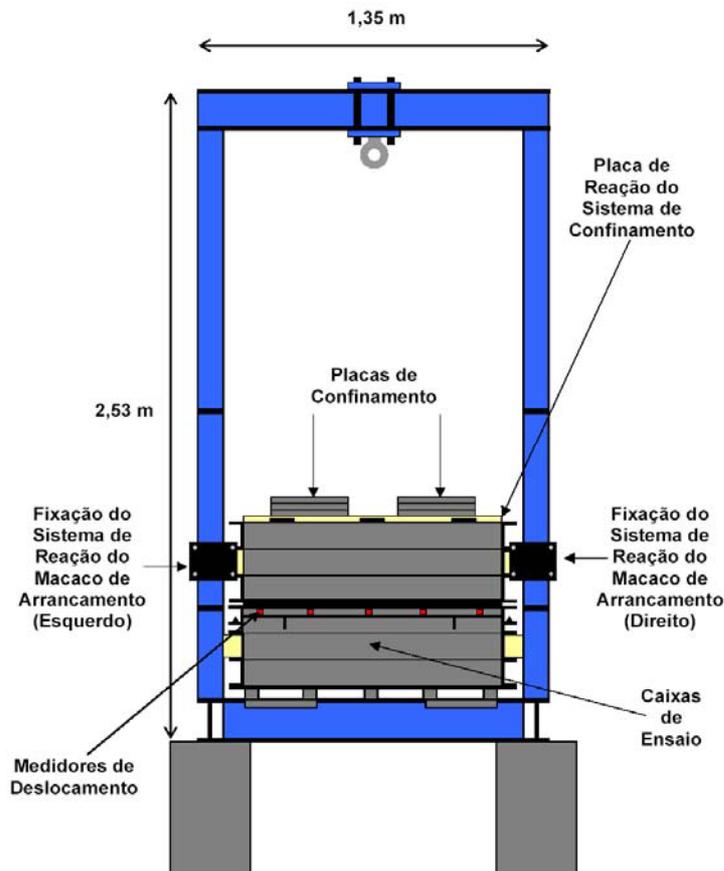


Figura 139 - Vista frontal da configuração de arrancamento.

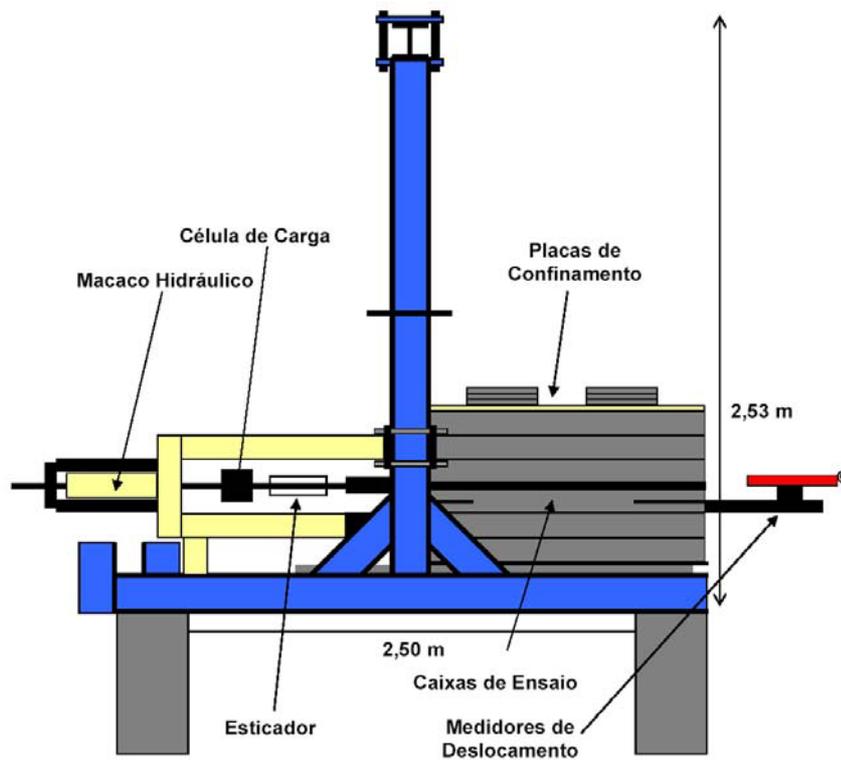


Figura 140 - Vista lateral da configuração de arrancamento.

De forma análoga ao ensaio de cisalhamento direto CC120R-30, a configuração de ensaio de arrancamento AR120R-30 foi planejada para ter variações no seu arranjo interno. As possibilidades de arranjo são apresentadas na Figura 141.

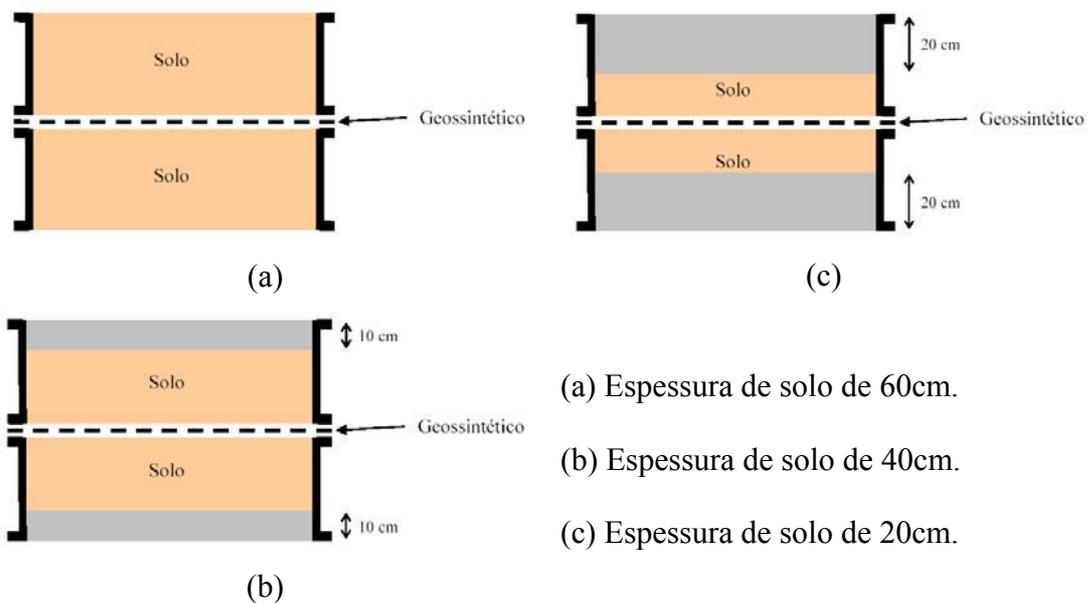


Figura 141 - Configuração das caixas de ensaio de arrancamento AR120R-30

4.5. Testes Preliminares

Uma série de testes preliminares foi realizada para verificar o desempenho do equipamento. Eles consistiram em avaliar o possível atrito entre o trilho da caixa de ensaio inferior e roldanas da caixa de ensaio superior e a resistência à tração dos cabos de aço do sistema de aplicação de força cisalhante.

Para a avaliação do atrito foram executados testes simples em cada um dos conjuntos de caixas de ensaio, excetuando-se o conjunto 6. O teste consistiu em montar os conjuntos de ensaio como se fosse realizar um ensaio de rampa, ou seja, colocar uma caixa sobre a outra, espaçar as caixas e bascular a rampa até o deslizamento da caixa superior em relação à inferior. Em todos os conjuntos testados, o movimento de uma caixa em relação à outra ocorreu para inclinações inferiores a $0,5^\circ$. Desta forma, pode-se afirmar que o atrito do sistema é desprezível. Porém, recomenda-se manter os conjuntos de roldanas lubrificados, mantendo-se as mesmas condições dos testes de verificação.

O segundo tipo de teste preliminar serviu para verificar o desempenho do sistema de aplicação de força cisalhante. O principal objetivo deste teste foi determinar a perda de carga de tração devido à deformação dos cabos de aço. Para isso foi realizado um procedimento que consistia em travar a caixa de ensaio superior (Figura 142), ajustar o sistema de medição e aplicar o carregamento (Figura 143).



(a) Ensaio na posição 0° .

Figura 142 - Avaliação do sistema de aplicação de força cisalhante.



(b) Ensaio na posição 45°.

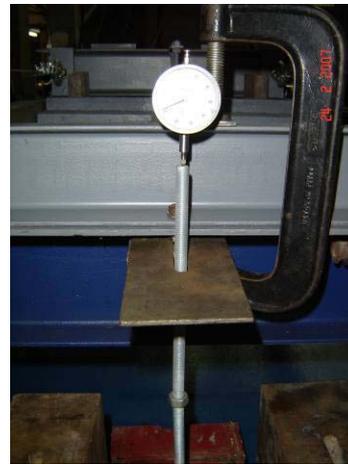


(c) Detalhe do travamento da caixa superior.

Figura 142 (cont.) - Avaliação do sistema de aplicação de força cisalhante.



(a) Conjunto no início do teste.



(b) Detalhe do Extensômetro.



(c) Teste em andamento.

Figura 143 - Ensaio do sistema de aplicação de força cisalhante.

Este procedimento foi realizado para a rampa nas posições 0, 15, 30 e 45 graus e para os conjuntos de caixa de ensaio 2 e 4. Os resultados obtidos são apresentados por meio de curvas deslocamento x peso aplicado (Figura 144).

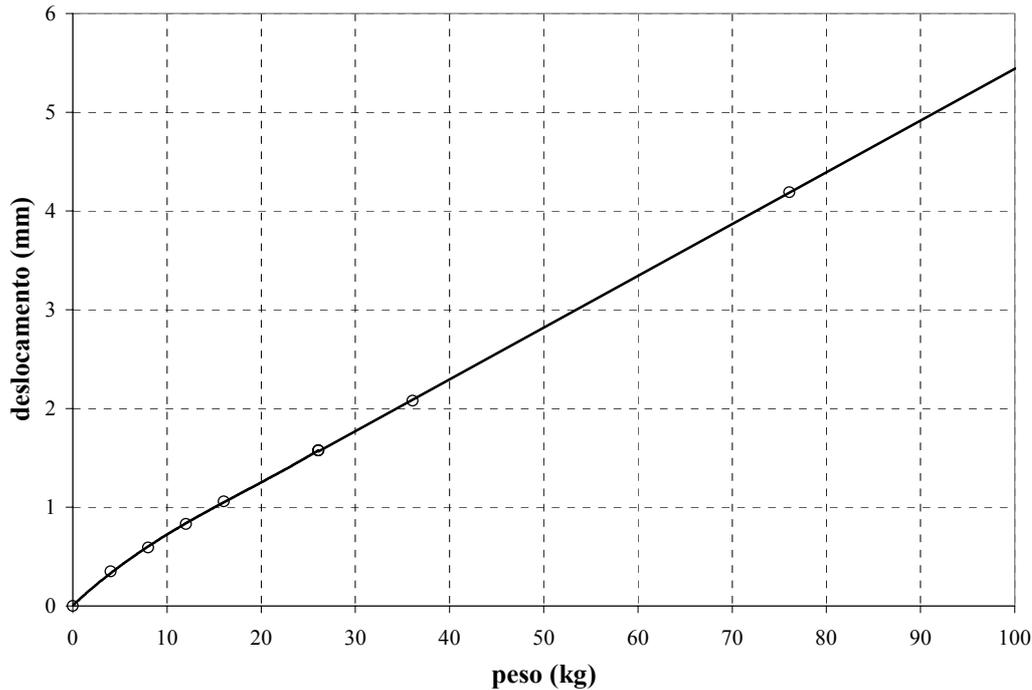


Figura 144 - Resultados típicos dos testes de avaliação de desempenho do sistema de aplicação de força cisalhante.

Independente da inclinação da rampa, os resultados forneceram curvas semelhantes. Observou-se que os valores de deslocamento medidos foram considerados elevados para as cargas aplicadas. Verificações posteriores revelaram que a junção da roldana com a coluna de fixação à plataforma (Figura 143) apresentava rigidez reduzida. Desta forma, procedeu-se à troca da mesma por outra de maior rigidez. Como limite de aplicação de carga na plataforma estabeleceu-se 150kg.

4.6. Limitações de Uso

Conforme exposto anteriormente o sistema de confinamento por pesos tem uma restrição de operação. Para os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, a medida que a plataforma de ensaio báscula, o centro de gravidade do conjunto de confinamento se desloca em relação ao seu centro geométrico. No limite, ocorre à perda de confinamento na extremidade traseira da caixa superior, devido à tendência de tombamento das placas de aço.

Desta forma, análises foram realizadas para determinação do limite de inclinação da rampa sem a ocorrência de tombamento. Sabe-se que a tensão de confinamento sobre uma determinada área pode ser expressa por:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{\frac{b \times h^2}{6}} \quad (11)$$

$$M = P \times x \quad (12)$$

$$A = b \times h \quad (13)$$

onde:

σ = tensão de confinamento;

P = peso aplicado;

A = área;

M = momento;

x = braço de alavanca;

b e h = arestas da base.

A situação limite ocorre para uma tensão nula em uma das extremidades do conjunto formado pela caixa superior e placas de aço. Desta forma, igualando-se a Equação 11 a zero, obtêm-se o parâmetro x igual a 1/6 da aresta. Portanto, para eliminar o tombamento, a projeção do centro de gravidade deve se situar no terço médio do conjunto formado pela caixa de ensaios mais placas.

A Figura 145 ilustra esquematicamente as condições ideal e de tombamento com a inclinação da rampa. Se a projeção do centro de gravidade (X_{CG}) do conjunto formado pela caixa de ensaio mais placas de aço não coincidir com a projeção do terço médio do conjunto, afastado de uma distância (X_2) da extremidade da rampa, ocorre o travamento da caixa superior devido à tendência ao tombamento da extremidade do conjunto.

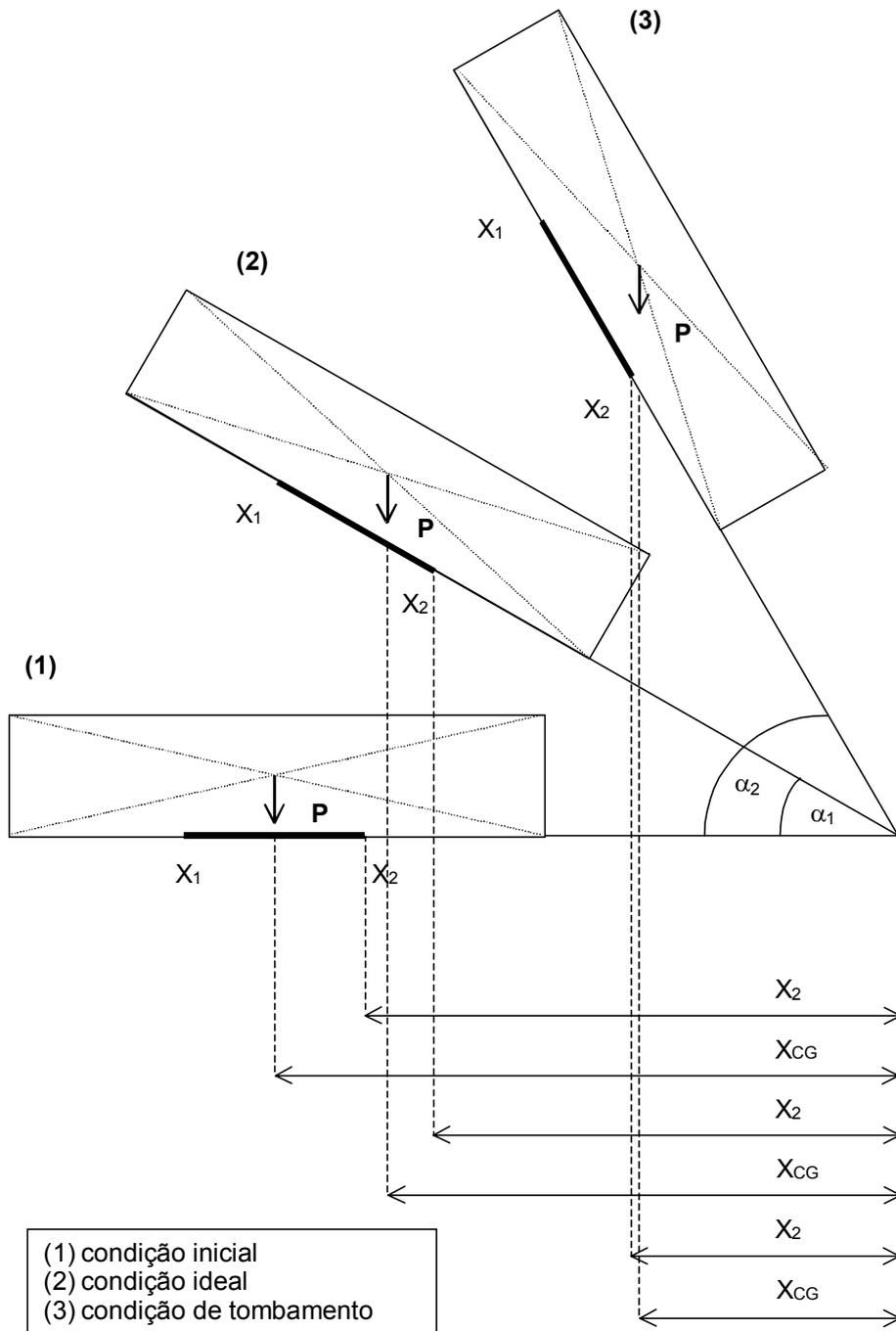


Figura 145 - Condição de tombamento do sistema de confinamento com a inclinação da plataforma de ensaios (Aguiar, 2003).

Considerando a Figura 145 e as Equações 11 a 13, foi realizada uma análise de estabilidade do sistema de confinamento ao tombamento variando-se os parâmetros X_2 e X_{CG} em função do ângulo de inclinação, para cada um dos conjuntos de caixas de ensaio. A Figura 146 apresenta os resultados desta análise para o conjunto 1 de caixas de ensaio. O limite para a não ocorrência do tombamento corresponde ao valor do ângulo onde as curvas se interceptam.

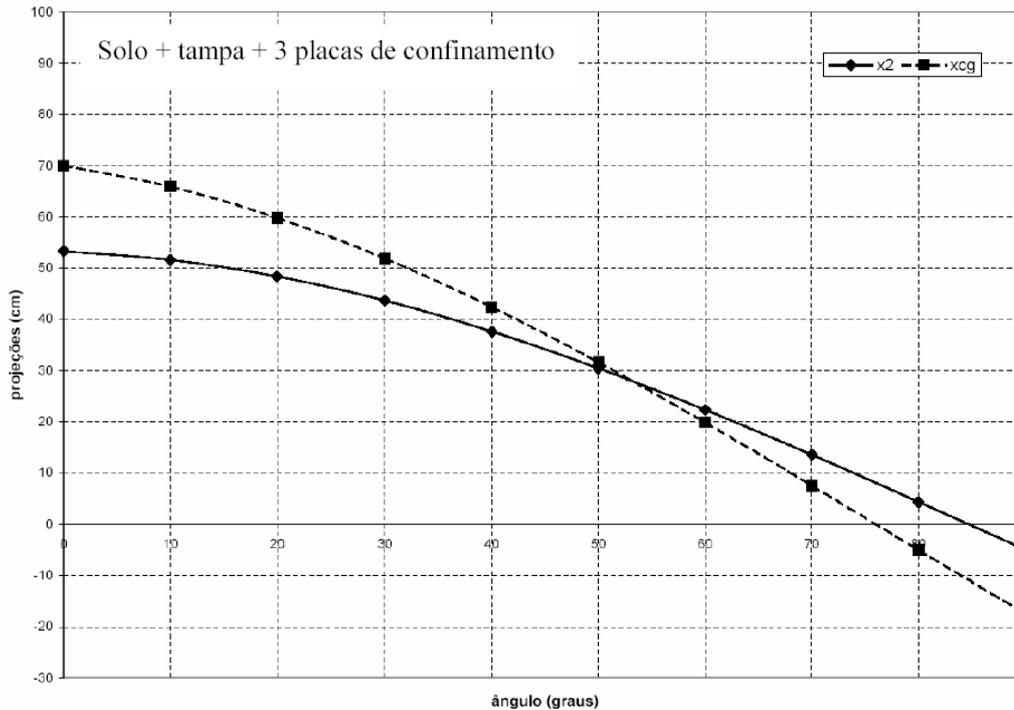


Figura 146 - Exemplo de análise de tombamento das caixas de ensaio do conjunto 1.

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise de tombamento para as condições possíveis de confinamento do conjunto 1 de caixas de ensaio. O valor do ângulo crítico ($\alpha_{\text{crít}}$) representa a inclinação crítica da rampa onde há tombamento.

Tabela 22 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 1 de caixas de ensaio.

Condição	solo/tampa 0 placa	solo/tampa 1 placa	solo/tampa 2 placa	solo/tampa 1 placa
$\alpha_{\text{crít}}$	62,4	59,1	56,0	53,2

Para os demais conjuntos de caixas, de 2 a 5, foi feita a mesma análise. Porém, diferentemente do conjunto de caixas 1 onde a espessura de solo é fixa, os novos conjuntos de caixas destinados aos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado permitem a variação da espessura de solo. Assim, para facilitar a consulta aos valores limites, gerou-se ábacos de ângulo crítico para o tombamento. Esses ábacos consideram a espessura de solo e a quantidade de placas usadas no sistema de confinamento. As Figuras 147 a 150 apresentam os referidos ábacos.

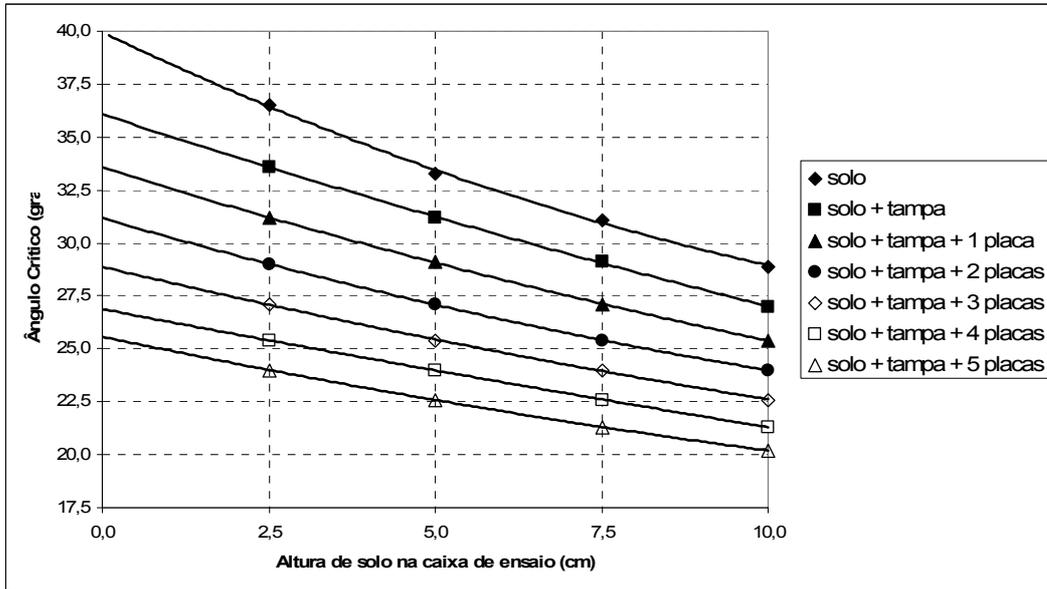


Figura 147 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 2 de caixas de ensaio.

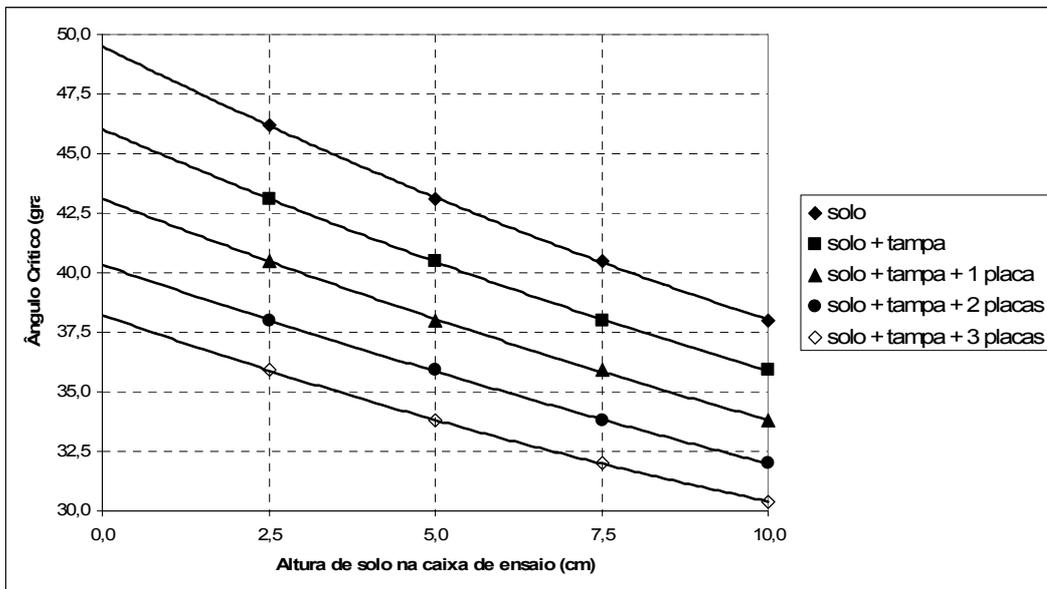


Figura 148 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 3 de caixas de ensaio.

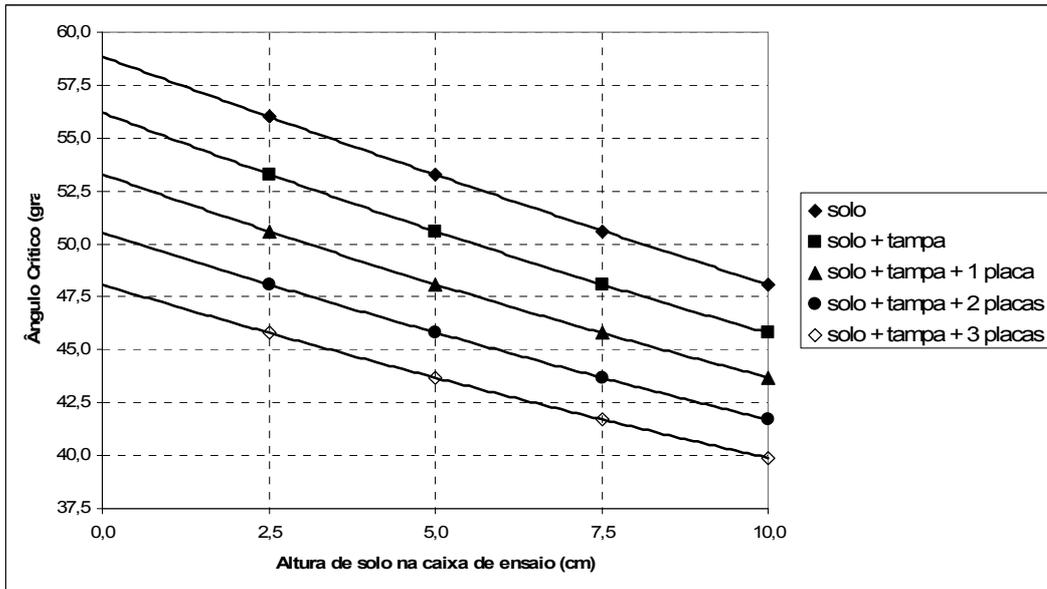


Figura 149 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 4 de caixas de ensaio.

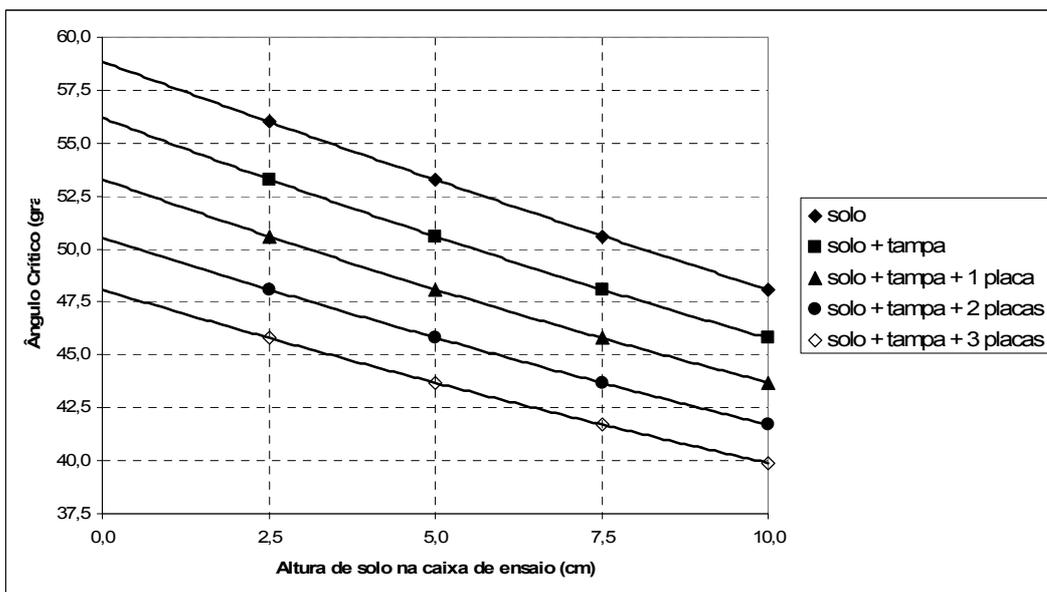


Figura 150 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 5 de caixas de ensaio.

Todos os resultados desses estudos de estabilidade ao tombamento estão apresentados no Apêndice V.

4.7. Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar o equipamento desenvolvido. Das configurações projetadas, foram construídas as de ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado. As de cisalhamento direto convencional e arrancamento tiveram alguns de seus componentes concluídos. Entretanto, a habilitação completa do equipamento para a execução destes ensaios será realizada por futuras pesquisas.

Foram propostas ou construídas 5 configurações de ensaio de rampa, 3 configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado, 4 de cisalhamento direto convencional e uma de arrancamento. Elas são resultantes da combinação da estrutura principal com os diferentes acessórios. É importante frisar, que sempre que possível, um acessório foi utilizado mais de uma vez.

Como todo novo equipamento, foi necessário realizar alguns testes preliminares para averiguar o seu correto funcionamento. Eles determinaram o atrito entre as roldanas da caixa superior e o trilho da caixa inferior e o limite de utilização do sistema de aplicação de força cisalhante. Em relação ao atrito concluiu-se que ele pode ser desprezado desde que se mantenham os conjuntos de roldanas lubrificadas. Em relação ao sistema de aplicação de força cisalhante, os testes realizados indicaram a necessidade de substituição por outro mais resistentes. O limite de utilização do novo sistema foi estabelecido como 150kg.

O equipamento tem um limite de operação no que concerne ao sistema de confinamento dos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado. Esta restrição é associada à tendência de tombamento das placas de confinamento. Para cada conjunto de caixas de ensaio foram estabelecidos ângulos críticos de funcionamento apresentados sob a forma de ábacos.