

### 3 Propriedades Mecânicas dos RSU

#### 3.1. Introdução

A avaliação das propriedades mecânicas de RSU está correlacionada a um problema de grande interesse do meio geo-ambiental, que é o recalque das células de ADRSU associado a processos mecânicos e de degradação biológica. A estimativa dos recalques é relevante no dimensionamento da capacidade máxima de estocagem de resíduo e no desenvolvimento de projetos de recuperação ambiental da área de disposição e é usualmente realizada utilizando-se adaptações da teoria de adensamento unidimensional de solos de Terzaghi (e.g. Simões & de Campos, 1998). Neste caso, os parâmetros de compressibilidade / deformabilidade empregados nos modelos matemáticos são geralmente obtidos em ensaios especiais de compressão confinada (e.g. Landva & Clark, 1990; Grisólia *et al.*, 1992; Jessberger & Kockel, 1995, Gabr & Valero, 1995; Chen & Chou, 1998; Carvalho *et al.*, 2000), por meio de provas de carga instrumentadas (e.g. Cartier & Baldit, 1983; Dunplancic, 1990; Jucá & Melo, 1999) ou por intermédio de retroanálises envolvendo longas campanhas de monitoramento no campo (e.g. Coduto & Huitric, 1990; Watts & Charles, 1990; Cepollina *et al.*, 1994; Sanchez-Alciturri *et al.*, 1995; Gasparini *et al.*, 1995; Stultgis *et al.*, 1995; Jucá *et al.*, 1997, 1999; Mariano & Jucá, 1998). Todavia, em virtude das características de cada metodologia de obtenção empregada, esses parâmetros podem apresentar limitações, seja por representarem condições unidimensionais (ensaios edométricos) ou por envolverem massas limitadas de material (provas de carga).

Em contrapartida, investigações voltadas para determinar as características peculiares do comportamento tensão-deformação do RSU por meio da obtenção de parâmetros de deformabilidade como o módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson* e módulo cisalhante, não tem sido o alvo principal do interesse geotécnico quando se trata de RSU. A dificuldade de obtenção *in situ* de tais parâmetros é compreensível ou justificável considerando as condições

operacionais da aplicação em RSU de técnicas consagradas para solos ou, ainda, pela própria heterogeneidade de materiais constituintes do lixo. Além disto, certamente alguns destes parâmetros têm seu valor modificado segundo as características físicas de cada aterro e por fatores associados à decomposição, o que dificulta ainda mais a sua determinação em campo.

Além das questões sobre compressibilidade e recalques em células de ADRSU, existem os problemas de rupturas e deslizamentos dos taludes das células que também detêm interesse geotécnico. Este, por sua vez, tem levado à intensa busca por parâmetros de resistência como coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), obtidos por meio de técnicas de campo e laboratoriais, para subsidiar análises de estabilidade.

A seguir, serão abordados resultados práticos de algumas metodologias para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade de resíduos sólidos urbanos disponíveis na literatura.

### **3.2. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**

De acordo com Jessberger & Kockel (1991), algumas propriedades mecânicas dos RSU, como resistência, compressibilidade e deformabilidade, dependem da composição do resíduo, das propriedades mecânicas de seus constituintes e da influência da decomposição e teor de umidade nestas propriedades, o que contribui para aumentar a variabilidade de resultados reportados. Em particular com relação à resistência ao cisalhamento destes materiais, a sua determinação tem sido realizada por diversos autores por meio de ensaios de campo, de laboratório e por retroanálises de performances de campo. Bons exemplos de compilações do estado-da-arte sobre o assunto foram apresentados por Singh & Murphy (1990), Jessberger (1994), Gabr & Valero (1995), Edinçliler *et al.* (1996), Koda (1998), Van Impe (1998), Eid *et al.* (2000) e, mais recentemente, por Pelkey *et al.* (2001) e Vilar & Carvalho (2002). Apesar do avanço atingido, o estudo do comportamento tensão-deformação-resistência de RSU ainda é um tema complexo, principalmente devido aos efeitos da heterogeneidade de seus constituintes, onde materiais inertes coexistem com matrizes altamente deformáveis e/ou biodegradáveis. Além do efeito da

heterogeneidade nos resultados de campo, é possível que os resultados de investigações laboratoriais também tragam consigo efeitos da escala reduzida das amostras, associados às dificuldades de amostragem e reprodução das condições *in situ* e temporais. Por isto, Edinçliler *et al.* (1996) postulam que a melhor metodologia para estudar propriedades mecânicas de resíduos sólidos é conduzir uma série de ensaios laboratoriais de grandes dimensões em conjunto com alguns ensaios de campo em grande escala. Os laboratoriais são usados para caracterizar propriedades básicas que afetam a resistência do resíduo, e os *in situ* são utilizados para compreender como o efeito da escala na resistência medida.

Dados de resistência de RSU são tipicamente apresentados em função de parâmetros de Mohr-Coulomb, isto é, em termos de intercepto coesivo ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). Porém, dada a característica peculiar da relação tensão-deformação do RSU, cujo comportamento marcante é a inobservância de um padrão de ruptura definido, até mesmo para valores altos de tensões, leva-se a crer que se a teoria de Mohr-Coulomb é satisfatória para descrever o comportamento do RSU, então os parâmetros de resistência ao cisalhamento devem ser definidos ou considerados como dependentes da deformação (*strain dependent*).

Valores de resistência de RSU disponíveis na literatura apresentam grande dispersão devido aos fatores mencionados. Além destes, outros como a idade, composição e teor de umidade podem ter grande influência nos resultados. Faixas de valores e metodologias disponíveis na literatura serão abordados nos itens subseqüentes.

### **3.2.1. Investigações de Laboratório**

#### **3.2.1.1. Resultados de Ensaio de Cisalhamento Direto e Simples**

Diversos pesquisadores têm reportado valores de resistência ao cisalhamento em RSU obtidos pelo emprego de ensaios de cisalhamento direto em laboratório. Aqui serão abordados somente alguns mais importantes e de forma pormenorizada, apresentando apenas os parâmetros de resistência relevantes

obtidos nas investigações e algumas características peculiares dos equipamentos utilizados.

Landva & Clark (1986) empregaram um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões (43,4cm x 28,7cm) na determinação da resistência de RSU de amostras de resíduos considerados velhos (não é fornecida a idade), obtendo  $\phi = 38^\circ$  a  $42^\circ$  e  $c = 14\text{kPa}$  a  $19\text{kPa}$ . Posteriormente, as amostras foram armazenadas por um ano em barris plásticos onde sofreram um processo de decomposição, sendo posteriormente ensaiadas fornecendo um ângulo de atrito decrescido para  $33^\circ$ , porém a coesão manteve-se em um patamar de  $16\text{kPa}$ . Landva & Clark (1986) acreditam que a perda de resistência tenha sido justificada pela decomposição, mas indicam necessidade de mais investigações para confirmação. Além deste teste, os mesmos autores conduziram ensaios com um resíduo novo triturado, constituído por uma grande porcentagem de material plástico, e encontraram  $\phi = 24^\circ$  e  $c = 23\text{kPa}$ . O baixo ângulo de atrito foi atribuído à pequena fricção entre folhas plásticas alinhadas. Finalmente, aqueles autores investigaram a resistência de um aterro constituído basicamente de resíduos provenientes da extração e processamento de madeira, obtendo  $\phi = 33^\circ$  e  $c = 10\text{kPa}$ .

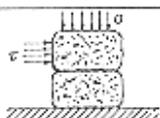
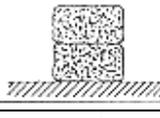
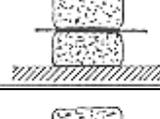
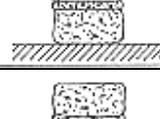
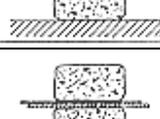
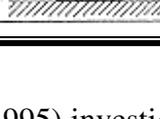
Siegel *et al.* (1990) conduziram ensaios de cisalhamento direto sob condições consolidadas e drenadas em amostras de resíduos com 13cm de diâmetro e 7,6 a 10,2cm de altura, obtidas em profundidades de 4,6 a 25m. Os espécimes para os ensaios foram preparados a partir de cinco diferentes amostragens, possuindo, portanto, diferentes constituições e resistências. O pico de máxima resistência ao cisalhamento foi obtido para deslocamentos cisalhantes variando de 16% a 39% do diâmetro da amostra. Os autores apresentaram os seus resultados com dois limites inferiores de envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb, um representando a interpretação de todos os ensaios e outro negligenciando amostras que continham partículas maiores de solo. Em ambos os casos eles admitiram coesão nula e os ângulos de atrito reportados foram  $53^\circ$  e  $39^\circ$ , respectivamente.

Howland & Landva (1992) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto em laboratório em uma diversidade de materiais. Os ensaios foram executados em uma caixa de grandes dimensões (43,2cm x 27,9cm) com resíduos com idades entre 10 a 15 anos, amostrados com trados helicoidais de

eixo sólido com 15,2cm e 27,9cm de diâmetro. Durante os ensaios, as amostras foram submetidas a tensões normais da ordem de 574kPa e cisalhadas até um máximo de deslocamento de 10,2cm, sob condições drenadas. Em seguida, os dados de ângulo de atrito e coesão foram reportados com valores de 33° e 17kPa, respectivamente.

Del Greco & Oggeri (1994) estudaram o problema empregando fardos de lixo de 40cm x 50cm x 60cm, compactados com macacos hidráulicos (densidades variando de 400 a 600kg/m<sup>3</sup>), alternando o tipo de material de interface entre eles (RSU-RSU, geomembrana-RSU, RSU-areia, etc). Nos ensaios, as amostras foram cisalhadas sob tensões normais de 20 a 80kPa, porém os autores não mencionam a porcentagem de deformação referente aos valores obtidos, estando os mesmos sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência de fardos de RSU compactados e *liners* (Del Greco & Oggeri,1994).

<b>Tipo de Interface</b>	<b>Configuração</b>	<b><i>c</i> (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>
RSU x RSU ( $\gamma= 500\text{kg/m}^3$ )		16	21°
Lixo x Lixo ( $\gamma= 700\text{kg/m}^3$ )		24	22°
geomembrana (PDAD) x RSU		0	17°
Areia grossa x RSU		15	38°
geomembrana (PDAD) x argila		8	26°
geomembrana (PDAD) x geotextil		0	14°

Valero (1994) e Gabr & Valero (1995) investigaram RSU com 10 a 15 anos de idade usando uma caixa de cisalhamento direto circular com diâmetro de 6,4cm e espessura de 2,3cm, com amostras preparadas contendo somente partículas

menores do que 6,3mm. Para o caso em questão, três amostras de diferentes origens foram ensaiadas com tensões normais de 69 a 276kPa e os resultados avaliados. Com eles, Valero (1994) verificou que cada amostra continuava a exibir acréscimo de resistência para deslocamentos superiores a 10% do diâmetro e obteve  $\phi$  na faixa de 20° a 39° e  $c$  entre 0 e 28kPa, enquanto que Gabr & Valero (1995) sugeriram que as variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento podiam ser devidas a variações na idade dos espécimes, composição, granulometria e densidade.

Em seqüência, ensaios de cisalhamento direto foram realizados por Edinliler *et al.* (1996) com uma máquina equipada com uma caixa circular de cisalhamento de 0,30m de diâmetro, capaz de conduzir testes sob várias taxas de carregamento e pressões confinantes. Detalhes do equipamento empregado são descritos por Foose (1993). Adicionalmente, Edinliler *et al.* (1996) também construíram outra prensa de cisalhamento direto de grande escala, com 1,2m x 1,2m x 0,9m de altura, servo-controlada e monitorada por LVDT's, porém a apresentação dos resultados de sua aplicação prática não foi o objeto do referido artigo. Todavia, Edinliler *et al.* (1996), através do emprego de sua caixa de cisalhamento de 0,30m, obtiveram curvas de tensão *cisalhante x deslocamento* típicas mostradas na Figura 17 que mostram que na maioria dos casos a resistência de pico não foi alcançada para deslocamentos de até 6cm, ocorrendo um contínuo aumento de tensão com aumento de deslocamento horizontal. Além destes resultados, amostras coletadas em diferentes momentos e locais no aterro, e posteriormente preparadas com energias de compactação e grau de saturação diferentes, forneceram a envoltória de resistência da Figura 18. Através dela, Edinliler *et al.* (1996) obtiveram os parâmetros de resistência  $\phi$  e  $c$  com os valores médios de 42° e 27kPa.

Em março de 1996, ocorreu uma grande ruptura de talude em aterros de RSU nos Estados Unidos, envolvendo cerca de 1,2 milhões de m<sup>3</sup> de resíduo. Por conta disto, Eid *et al.* (2000) revisaram e analisaram parâmetros de resistência provenientes principalmente de cisalhamento direto, tanto em campo quanto em laboratório, disponíveis da literatura, para seleção de parâmetros geotécnicos e posterior emprego em uma análise de estabilidade do aterro da cidade de Cincinnati, USA, descrita por Stark *et al.* (2000). Em seu trabalho, Eid *et al.* (2000) compilam resultados de cisalhamento direto de grandes dimensões e

algumas retro-análises de ruptura e acreditam que a interpretação dos resultados sugere que a resistência de RSU pode ser definida por uma faixa estreita de valores, com  $\phi'$  de aproximadamente  $35^\circ$  e  $c'$  na faixa de 0 a 50kPa. Todavia, baseado em informações adicionais da literatura, Eid *et al.* (2000) acreditam que os valores médios mais apropriados para  $c'$  e  $\phi'$  são 25kPa e  $35^\circ$ , respectivamente.

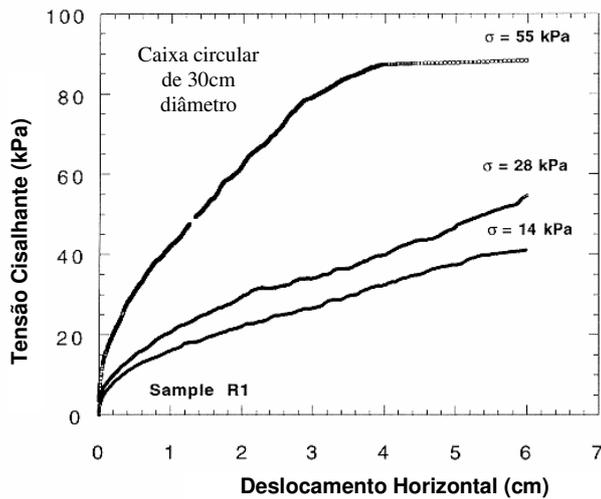


Figura 17 - Curvas típicas de *tensão cisalhante x desl. horizontal* obtidas em ensaios de cisalhamento direto (Edinçliler *et al.* 1996).

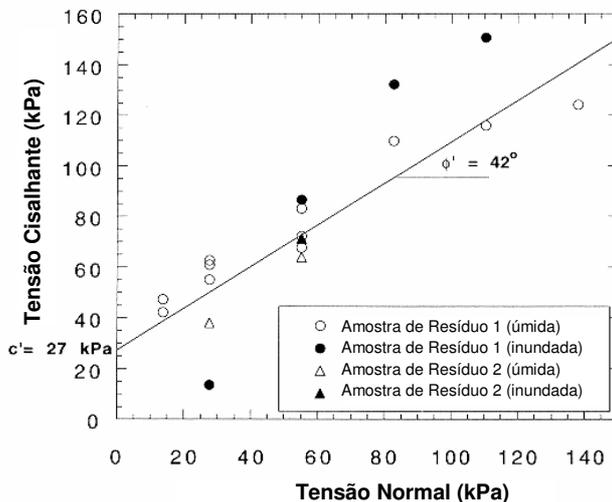


Figura 18 - Envoltória de resistência obtida por cisalhamento direto (Edinçliler *et al.* 1996).

Alguns dos principais aterros sanitários do Canadá já foram alvos de ensaios de cisalhamento direto (e.g. Landva & Clark, 1990), fornecendo amostras para investigações. Pelkey *et al.* (2001) rerepresentaram dados sobre resistência ao

cisalhamento, provenientes de investigações realizadas em alguns destes principais aterros do Canadá, e que foram originalmente publicadas como intercepto coesivo e ângulo de atrito para a tensão cisalhante mobilizada de pico (e.g. Landva & Clark, 1986; Landva & Clark, 1990). Porém, em seu trabalho Pelkey *et al.* (2001) reapresentam os resultados como coesão ou ângulo de atrito mobilizado em função de deslocamentos cisalhantes. Além disto, Pelkey *et al.* (2001) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras de papel laminado e formulários contínuos, empilhados horizontalmente na caixa cisalhante; e com amostras de papel de computador trituradas, tanto em condições úmidas quanto secas. Adicionalmente, ensaios cisalhamento direto foram executados em amostras fabricadas com os constituintes típicos de resíduos domésticos, incluindo: lascas de pneu, papel picado, lascas de madeira, pedaços de plástico, ração canina para substituir materiais perecíveis, etc... Com os seus resultados, Pelkey *et al.* (2001) concluíram que há uma grande dependência dos parâmetros de resistência mobilizados em função dos deslocamentos cisalhantes. Esta dependência foi maior nas amostras úmidas de papel, sendo mais sensíveis do que as secas. Nos ensaios de cisalhamento simples a resistência de pico somente foi mobilizada em deformações cisalhantes da ordem de 40%. Os parâmetros de resistência mobilizados para 25mm de deslocamento cisalhante foram de  $c = 0 - 50\text{kPa}$  e  $\phi = 11^\circ - 31^\circ$ ,  $c = 0\text{kPa}$  e  $\phi = 21^\circ - 26^\circ$  para as amostras de lixo e papel, nesta ordem, enquanto que a resistência de pico foi de  $c = 0 - 50\text{kPa}$  e  $\phi = 26^\circ - 35^\circ$ ,  $c = 0$  e  $\phi = 21^\circ - 33^\circ$  para as amostras de lixo e papel, respectivamente.

Mais recentemente, Caicedo *et al.* (2002b) investigaram  $c$  e  $\phi$  com uma caixa de cisalhamento de 30cm x 30cm x 20cm e apresentaram dois pares de valores obtidos: 24kPa e 26°; e 59kPa e 17°, respectivamente.

### 3.2.1.2.

#### **Resultados de Ensaios Triaxiais e de Compressão não Confinada**

Jessberger & Kockel (1991) conduziram ensaios triaxiais em RSU com 3 e 7,5 anos de idade, assumindo que o volume da amostra permaneceu constante durante o teste. Nos ensaios, a resistência de pico não foi alcançada em nenhuma das amostras, mesmo para deformações axiais maiores que 20%. Em seguida,

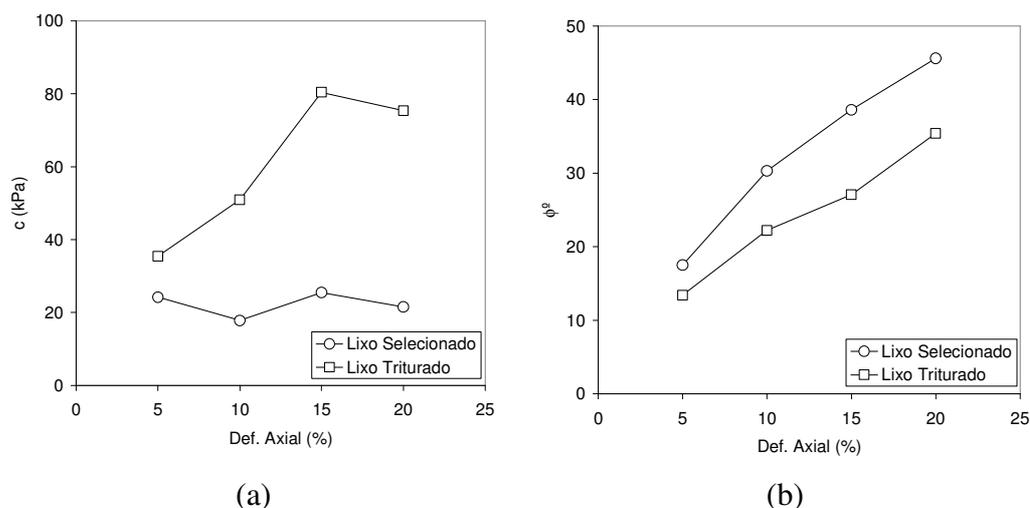
Jessberger & Kockel (1991) realizaram ensaios variando a idade e estado de decomposição do lixo (idades do resíduo entre nove meses e 15 anos). Todavia, os ensaios foram insuficientes para produzir interpretações conclusivas dos resultados.

Jessberger & Kockel (1991) também reportam resultados de ensaios de compressão não confinada em amostras fabricadas de maiores dimensões ( $d=30\text{cm}$ ,  $h=60\text{cm}$ ), com RSU selecionado, moído e tratado. O primeiro tipo de amostra possuía constituintes capazes de suportar tensão (i.e., plástico, têxteis, etc...), enquanto que o segundo tipo era uma mistura heterogênea de materiais com diâmetro máximo de partículas de 15mm. Uma compilação dos resultados reportados está apresentada na Tabela 8, onde há indicação de que a resistência do lixo moído e não moído é diferente, além de mostrar que os dois tipos apresentaram aumento de ângulo de atrito com aumento de deformação axial, contudo o  $\phi$  do resíduo selecionado foi maior para todas as deformações. Adicionalmente, a coesão do resíduo selecionado variou pouco para todos os níveis de deformação, apresentando-se entre 18 e 26kN/m<sup>2</sup>. Por sua vez, a coesão do resíduo moído aumentou em função do nível de deformação até o patamar de 80kN/m<sup>2</sup>. Jessberger & Kockel (1991) também postulam que os parâmetros correspondentes a deformações axiais de 20% para lixo não tratado ( $\phi = 46^\circ$  e  $c = 22\text{kPa}$ ) são similares aos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados na literatura. A Figura 19 representa graficamente os parâmetros reportados.

Gabr & Valero (1995) realizaram ensaios triaxiais consolidados não drenados em RSU, com e sem medição de poropressões, em amostras preparadas a partir de tradagens, portanto não sendo representativas de uma certa profundidade, com peso específico seco das mesmas variando entre 7,4 a 8,2kN/m<sup>3</sup>. Os autores observaram que a coesão diminuía à medida que o teor de umidade aumentava. Eles reportam que  $c$  diminuiu em cerca de 100kPa (teor umidade de 55%) para 40kPa (teor de umidade de 70%). Gabr & Valero (1995) também citam que o ângulo de atrito efetivo médio obtido foi de 34° e a coesão efetiva foi de 17kPa, para deformações axiais de 20%.

Tabela 8- Parâmetros de resistência de ensaios triaxiais em resíduo selecionado e moído (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).

Parâmetro	Deformação Axial							
	5 %		10 %		15 %		20 %	
	Selec.	Moído	Selec.	Moído	Selec.	Moído	Selec.	Moído
$\phi^\circ$	17,5	13,4	30,3	22,2	38,6	27,1	45,6	35,4
c (kPa)	24,2	35,4	17,8	50,9	25,5	80,4	21,5	75,4

Figura 19 - Parâmetros  $c$  e  $\phi$  de ensaios triaxiais com dois diferentes tipos de resíduo (adaptado de Jessberger e Kockel, 1991).

Em seguida, Jessberger e Kockel (1995) realizaram simultaneamente ensaios de compressão não confinada em amostras de grandes dimensões ( $d=30\text{cm}$ ,  $h=60\text{cm}$ ) e ensaios triaxiais em amostras menores ( $d=10\text{cm}$ ,  $h=20\text{cm}$ ), usando RSU *in natura* e moído, com idades de 1 a 3 anos. Eles observaram apenas pequenas diferenças na resistência entre os dois tipos de amostras empregadas, não sendo possível obter resistência de pico, mesmo em grandes deformações axiais ( $\geq 20\%$ ), como notado na Figura 20.

No mesmo ano, Kockel & Jessberger (1995) conduziram ensaios triaxiais em uma matriz de RSU misturado com quantidades de plástico variadas e idades entre 1 e 3 anos. A matriz para as análises foi obtida pela remoção de elementos de reforço com maiores dimensões da amostra inicial de resíduo, formando uma matriz parecida com um solo, com partículas inferiores a 12cm. A matriz foi, então, triturada em máquina de corte com espessura de lâmina de 15mm. Kockel

& Jessberger (1995) observaram que a resistência ao cisalhamento da matriz foi primordialmente friccional, com  $\phi$  máximo variando entre 42° a 49°, mobilizados a grandes deformações ( $\geq 20\%$ ). Eles também sugerem que a componente coesiva da resistência (41 a 51kPa) foi oriunda dos esforços de tração desenvolvidos nos componentes de reforço, como se o resíduo fosse um solo reforçado.

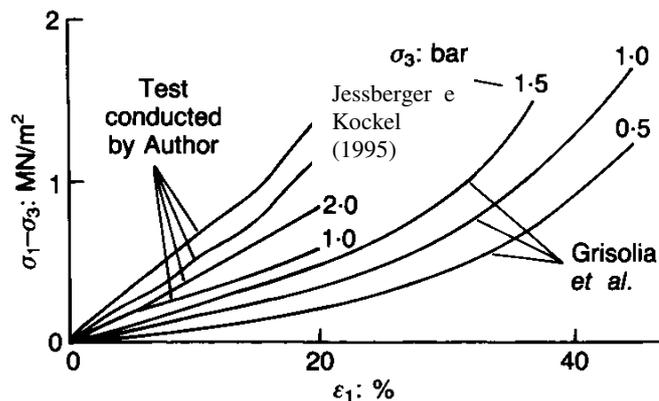


Figura 20 - Comportamento tensão deformação com endurecimento observado em ensaios triaxiais (Jessberger e Kockel, 1995).

Em seqüência, Edincliler *et al.* (1996) projetaram e desenvolveram câmaras triaxiais grandes, para emprego com amostras de lixo com 0,30m e 0,46m de diâmetros e relação  $h/d = 2$  e com possibilidade de aplicação até 280kPa na célula. Todos os detalhes do equipamento estão contidos no trabalho de Edincliler *et al.* (1996). Todavia, a apresentação dos resultados da aplicação prática deste equipamento não foi o objeto do referido trabalho.

Mais recentemente, Caicedo *et al.* (2002b) empregaram uma célula triaxial com 0,30m de diâmetro e 0,6m de altura para investigar as características mecânicas do aterro Doña Juana, na Colômbia. Foi possível observar que a relação *tensão desviadora – deformação* confirma resultados prévios da literatura, ou seja, o material não experimenta ruptura em níveis de até 15% de deformação, apresentando efeito de endurecimento como observado por Jessberger *et al.* (1995) e Grisolia *et al.* (1995), por exemplo.

No Brasil, Vilar e Carvalho (2002) realizaram investigações no ADRSU Bandeirantes em São Paulo, de onde foram retiradas amostras deformadas com cerca de 15 anos de idade para ensaios triaxiais de grandes dimensões. Os espécimes foram moldados posteriormente em laboratório com diferentes energias

de compactação gerando amostras com peso específico de 10, 12 e 14kN/m<sup>3</sup>, e dimensões de 150 e 200mm de diâmetro e 300 e 400mm de altura. Os ensaios triaxiais drenados foram executados com pressões confinantes de 100, 200 e 400kPa.

Mais uma vez, similar a resultados apresentados na literatura, Vilar e Carvalho (2002) obtiveram curvas típicas comportamento *tensão desviadora – deformação axial* como as das Figuras 21(a e b), onde não se atinge resistência de pico e acontece o efeito de endurecimento, possivelmente devido ao efeito de reforço com fibras.

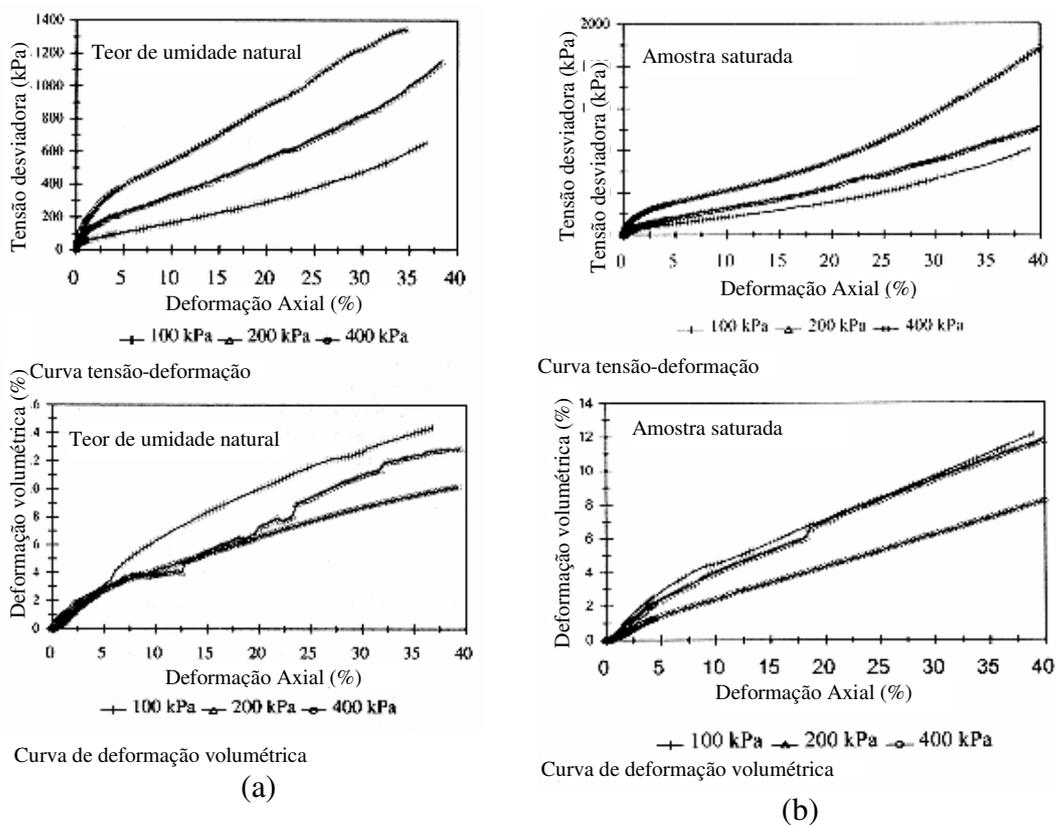


Figura 21- Comportamento tensão-deformação em ensaios triaxiais com RSU (Vilar & Carvalho, 2002).

Ainda, a partir de seus ensaios triaxiais, Vilar e Carvalho (2002) notaram que a diferença entre os pesos específicos utilizados não apresentou grande efeito nos resultados de *c* e  $\phi$  obtidos. A Tabela 9 traz o valor destes parâmetros relativos a deformações de 10%, 20% e 30%, obtidos pelo ajuste dos resultados das três diferentes densidades.

Tabela 9 - Parâmetros de resistência ajustados a diferentes densidades (adaptado de Vilar e Carvalho, 2002).

Deformação (%)	c (kPa)	$\phi$ (°)
10	20,1	21
20	49,4	26,3
30	86,3	30,6

### 3.2.2. Ensaio de Campo em RSU

#### 3.2.2.1. Resultados de Cisalhamento Direto

Gerber (1991) construiu uma caixa de cisalhamento direto com 1,5m x 1,5m de dimensões transversais para emprego em um aterro em *Maine*, US, onde havia ocorrido uma ruptura de talude em RSU, descrita por Richardson & Reynolds (1991). Durante os seis ensaios de grandes dimensões realizados em diferentes pontos, onde as tensões normais foram aplicadas por meio de grandes blocos de concreto e cisalhadas por mecanismos hidráulicos, os valores médios obtidos foram: coesão de 25kPa e ângulo de atrito de 27°. Gerber (1991) observou que grandes deformações são necessárias para mobilizar a resistência do material, bem como, declara ser importante reduzir o valor da resistência ao cisalhamento do resíduo empregado em análises de estabilidade de taludes, para evitar problemas de incompatibilidade de deformações.

Posteriormente, Withiam *et al.* (1995) realizaram ensaios com uma caixa de cisalhamento direto bi partida de aço, com dimensões de 1,5m x 1,5m x 1,5m. A caixa foi colocada sobre um bloco de RSU livre, pouco amolgado, escavado a partir da superfície até a profundidade de 1,5m. As forças horizontais foram aplicadas por meio de cabos e guincho mecânico e as normais através de um sistema de pesos com blocos de madeira e concreto. Os testes foram realizados em três diferentes níveis de tensões normais, variando entre 0 e 21kPa. Os parâmetros reportados foram  $c = 10\text{kPa}$  e  $\phi = 30^\circ$ .

Mais recentemente, após um grande escorregamento no aterro sanitário *Doña Juana* em Bogotá, Colômbia, ocorrido em 1997 (Rodríguez & Velandia, 2002; Caicedo *et al.* 2002a), inúmeras investigações foram realizadas para compreender e caracterizar os fatores condicionantes envolvidos e determinar as

propriedades dos RSU locais. Para este fim, Caicedo *et al.* (2002b) desenvolveram uma caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões ( $0,62\text{m}^2$ ) para uso com amostras circulares com 90cm de diâmetro. Nos testes, por meio da aplicação de tensões normais da ordem de 6 até 117kPa, aqueles autores observaram que a resistência de pico foi atingida em deslocamentos da ordem de 60mm (Figura 22a). Com isto, puderam determinar os parâmetros  $c$  e  $\phi$  com valores médios na ordem de 78kPa e  $23^\circ$ , respectivamente (Figura 22b).

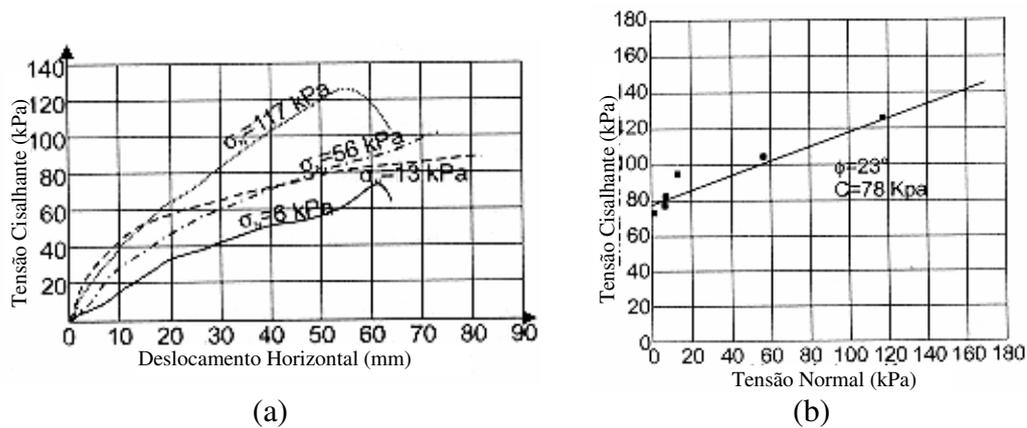


Figura 22 - Resultados de cisalhamento direto no aterro de *Doña Juana* (Caicedo *et al.*, 2002b).

### 3.2.2.2. Outras Metodologias

Siegel *et al.* (1990) realizaram com sucesso nove ensaios de penetração com um cone convencional em um aterro na cidade de Califórnia, EUA, em profundidades que variaram de 4,8 até 37,5m. Os autores descrevem grandes dificuldades operacionais em aterros sanitários, com impossibilidade de penetrações até profundidades pré-definidas (18 casos), quebra de três cones e esmagamento do elemento poroso do cone durante a cravação devido ao contato com elementos mais rígidos dentro do ADRSU. Siegel *et al.* (1990) reportam que, durante a cravação, o cone geralmente encontrava elementos rígidos que produziam picos nas curvas de resistência de ponta medidas, resultando em grande variação nas leituras. Apesar do perfil errático de resistência obtido, foi observada uma tendência de aumento da resistência de ponta com a profundidade de cerca de  $0,8\text{kg/cm}^2/\text{m}$ , na maioria dos casos.

Mitchell & Mitchell (1992) reapresentam resultados de  $c$  e  $\phi$  provenientes de sondagens do tipo SPT ( $c=96\text{kPa}$ ;  $\phi=0^\circ$ ) e palheta ( $c=76\text{kPa}$ ;  $\phi=0^\circ$ ) realizados por Earth Technology Corporation (1988) em um ADRSU na cidade de *Los Angeles*, EUA. Porém, dadas as pequenas dimensões da palheta ( $d=6,35\text{cm}$ ) e a falta de padronização do SPT em RSU, eles indicam que estes resultados não devem ser representativos das condições reais.

Koda (1997) executou uma campanha de ensaios de campo em dois aterros sanitários na Polônia, que incluíram CPT, ensaios similares ao SPT que o autor denominou de WST (*waste sounding test*) e provas de carga em talude com ruptura para retro-análises. Em especial, as sondagens com CPT atingiram profundidades de até 25m e foram realizadas em dois tipos distintos de resíduos: RSU in natura, sem separação prévia; e RSU considerado inerte. As resistências ao cisalhamento oriundas da interpretação destas investigações foram de  $\tau_{fu} = 80\text{kPa}$  e  $\tau_{fu} = 90\text{kPa}$  para o RSU in natura e inerte, respectivamente. Koda (1997) apresenta na Tabela 10 parâmetros de resistência  $c$  e  $\phi$  obtidos em suas investigações.

Tabela 10 - Parâmetros de resistência de aterros na Polônia por investigação direta (Koda, 1997).

<b>Categoria do Lixo</b>	<b>Aterro</b>	<b><math>\gamma</math> (<math>\text{kN/m}^3</math>)</b>	<b><math>\phi</math> (<math>^\circ</math>)</b>	<b>C (<math>\text{kPa}</math>)</b>	<b>Método</b>
Inerte	Radiowo	9,0	20	25	CPT, WST e ensaio de ruptura de talude
Inerte com camadas de areia	Radiowo	12,0	25	23	CPT, WST e ensaio de ruptura de talude
Municipal, velho	Radiowo	14,0	26	20	CPT, WST e retro-análises de escorregamentos
Municipal, novo	Lubna	11,0	21	15	WST e retro-análises de escorregamentos

### 3.2.3. Retro-análises de Ensaios com RSU

Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por meio de retro-análises de ensaios de carga e de análises de rupturas assumindo-se valores unitários para o fator de segurança, são apresentados por Howland & Landva (1992) na Figura 23, juntamente com resultados de medições diretas realizadas por Landva & Clark (1990). Naquela figura, o Caso 3 corresponde aos dados de Landva & Clark (1990), o Caso 4 refere-se aos dados de Gerber (1991) e o Caso 1 refere-se à ruptura de um aterro em Nova Jersey, EUA, descrita por Oweis (1985) e Dvirhoff & Munion (1986). A resistência foi retro-analisada por meio de um método de fatias não especificado e os resultados fornecidos como combinações de  $c$  e  $\phi$  correspondentes a um fator de segurança unitário. Por sua vez, o Caso 2 diz respeito a dados de ensaios de carregamento em um aterro na Califórnia descrito por Oweis (1985). A ruptura foi induzida pela colocação de aterro no topo do resíduo e a resposta ao acréscimo de carga monitorada, possibilitando a retro-análise. Pares de  $c$  e  $\phi$  mobilizados, correspondentes ao fator de segurança unitário, foram determinados por um método das fatias não especificado. Finalmente, o Caso 5 concerne ensaios de placas de carregamento conduzidos por Eliasson (1942) em um aterro próximo a cidade Nova York no início da década de 40.

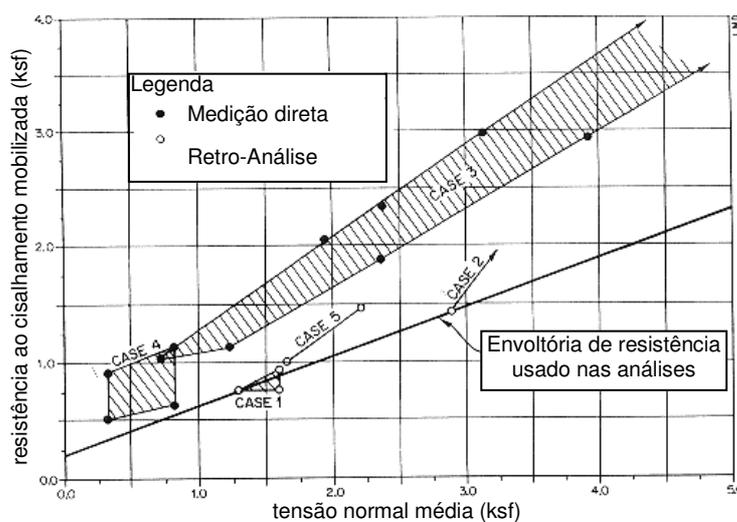


Figura 23 - Parâmetros oriundos de retro-análises em RSU (Howland & Landva, 1992).

Pela análise da Figura 23, Howland & Landva (1992) puderam abstrair duas conclusões importantes. Primeiro, que a resistência ao cisalhamento de RSU é prioritariamente de natureza friccional, isto é, a resistência ao cisalhamento aumenta com a tensão normal. Segundo, que os valores de resistências obtidos por retro-análises são menores do que os determinados por medições diretas. Howland & Landva (1992) acreditam que esta diferença pode ser causada pelos materiais fibroso constituintes que geram um grande impacto na resistência de amostras pequenas ou pela influência de uma fundação pouco resistente. Outras possíveis explicações, segundo os autores, são que as deformações no campo não foram suficientemente grandes para mobilizar a total resistência do resíduo ou, mesmo, que a ruptura progressiva influenciou a resistência ao cisalhamento média obtida pela retro-análise.

Pagotto & Rimoldi (1987) reportam ensaios de capacidade de carga com placas em um ADRSU em Modena, Itália, onde encontraram coesão de 29kPa e ângulo de atrito de 22°.

Kavazanjian *et al.* (1995) apresentam ângulos de atrito referentes à quatro aterros nos Estados Unidos, calculados por meio do método das fatias modificado de Bishop, assumindo coesão de 5kPa, que variaram entre 25° a 38°. Os taludes destes aterros permaneceram sem ruptura por cerca de 15 anos, sem deformações excessivas ou outros sinais de instabilidade, o que levou a crer que possuíam fatores de segurança (FS) superior a unidade. Portanto, nas suas retro-análises Kavazanjian *et al.* (1995) assumiram FS = 1,2.

Kavazanjian *et al.* (1995), baseados em observações nos resultados de Howland & Landva (1992) e em outros diversos dados, sugeriram que a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb apropriada para RSU consistia de  $\phi = 0^\circ$  com  $c = 24\text{kPa}$  para tensões normais inferiores a 30kPa, e  $\phi = 33^\circ$  com  $c = 0$  para tensões normais superiores a 30kPa.

### 3.3. Resistência a Deformabilidade de RSU

As referências encontradas a respeito de parâmetros de deformabilidade são escassas e algumas delas baseadas em técnicas de investigações geofísicas que

fornecem parâmetros dinâmicos que, por sua própria natureza de obtenção, devem servir de comparação cautelosa com esta pesquisa. Outras referências fornecem informações sobre investigações estáticas para determinação dos parâmetros, como é o exemplo do emprego de pressiômetros. Estas referências parecem fornecer uma base comparativa mais aceitável para este Tese.

### 3.3.1.

#### Parâmetros de Deformação em RSU por ensaios dinâmicos.

Faz-se uso do módulo cisalhante, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dinâmicos quando se quer compreender o comportamento do RSU frente a cargas dinâmicas como as oriundas de maquinário vibrante, explosões e terremotos. Para a obtenção destes parâmetros, empregam-se ensaios de laboratório, como compressão triaxial cíclico, cisalhamento simples cíclico e de coluna ressonante, ou ensaios de campo, como os métodos de propagação de onda (cross-hole, up ou down-hole) e refração de onda (Sharma *et al.*, 1990).

Sharma *et al.* (1990) reportam o emprego da técnica sísmica de cross-hole em um aterro de resíduos da cidade de *Richmond*, Califórnia, para determinação de parâmetros de deformabilidade. A técnica sísmica usada está ilustrada no esquema apresentado na Figura 24 onde as velocidades de propagação de ondas cisalhantes e compressivas são medidas em função do tempo requerido para um pulso sísmico percorrer a distância da superfície (origem) até o um geofone posicionado em profundidade, em um furo de sondagem. Desta maneira, o módulo cisalhante dinâmico ( $G_d$ ,  $G_0$  ou  $G_{max}$ ) do material investigado (p.ex. solo, rocha ou RSU) pode ser obtido por meio de sua densidade e velocidade de propagação de onda cisalhante no ambiente pela Equação 23.

$$G_d = V_s^2 \cdot \rho \quad \dots(23)$$

em que,

$G_d$ – módulo cisalhante análise dinâmica	(F/L <sup>2</sup> )
$V_s$ – velocidade da onda cisalhante	(L/T)
$\rho = \gamma / g$ – densidade	(M/L <sup>3</sup> )
$\gamma$ – peso específico	(F/L <sup>3</sup> )
$g$ – aceleração da gravidade	(L/T <sup>2</sup> )

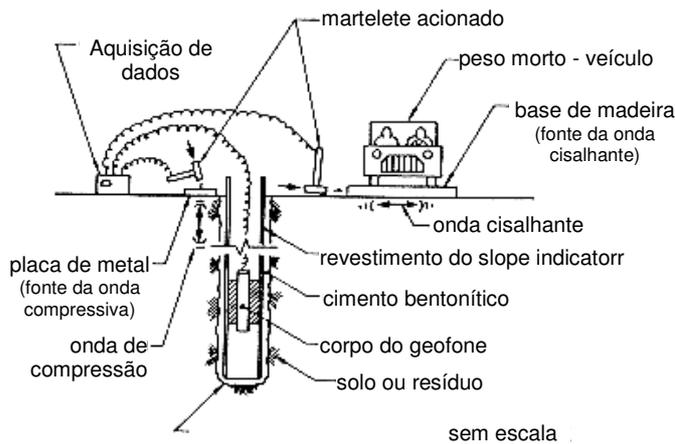


Figura 24– Esquema simplificado da técnica de cross-hole.

Através das relações entre  $G$  e  $E$  advindas da Teoria da Elasticidade, pode-se obter o módulo de elasticidade dinâmico do material por:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} = V_s^2 \cdot \rho \quad \dots(24)$$

em que:

$E_d$  – módulo elasticidade análise dinâmica  $(F/L^2)$

$\nu_d$  – coeficiente de Poisson análise dinâmica  $(L/T)$

Pode-se, ainda, relacionar o módulo de elasticidade do material com sua densidade, velocidade de propagação de onda de compressão e coeficiente de Poisson, com:

$$E_d = V_c^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu_d) \cdot \frac{(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \quad \dots(25)$$

em que,

$V_c$  – velocidade da onda de compressão  $(L/T)$

Combinando-se as Equações 24 e 25, tem-se a expressão para obtenção do coeficiente de Poisson em função das velocidades de propagações advindas do ensaio geofísico (Equação 26):

$$v_d = \frac{(V_c^2 - 2V_s^2)}{2(V_c^2 - V_s^2)} \quad \dots(26)$$

As velocidades observadas por Sharma *et al.* (1990) nos ensaios de campo do tipo *cross-hole*, bem como os parâmetros calculados, estão descritos na Tabela 11. O peso específico médio do resíduo nos cálculos foi estimado em 737kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 11– Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de *cross-hole* (Sharma *et al.* 1990).

Prof. m	$V_s$ m/s	$V_c$ m/s	$G_0$ MPa	$E$ MPa	$\nu$ -
0 – 15,3	198,3	716,8	28,9	84,4	0,45

Similarmente, Singh & Murphy (1990) reportam resultados de investigações nos aterros *Puente Hill* (Earth Technology, 1988), *Richmond* e *Redwood* (EMCON, 1989), cujas velocidades cisalhantes foram as seguintes: 287m/s e 213m/s (camadas com 6 a 23m) e 91m/s (camada inicial de 0 a 6m).

Kavazanjian *et al.* (1994) citam perfis de velocidade de propagação de ondas cisalhantes derivados de medições de onda Rayleigh (onda de superfície) realizados em oito aterros de resíduos na Califórnia. As campanhas produziram variações de  $V_s$  da ordem de 80m/s próximo da superfície e 300m/s na profundidade de 30m.

Kavazanjian *et al.* (1995) descrevem resultados de campanhas de investigações de onda cisalhante pela técnica de *cross-hole* realizados em Los Angeles (aterro de *Puente Hill*) por Earth Technology (1988) e em Nova York (aterro de *Brookhaven*) por Carey *et al.* (1993). No primeiro trabalho, as velocidades cisalhantes obtidas variaram de 240m/s a 270m/s nas profundidades respectivas de 6m e 14m, enquanto que no segundo a variação foi de 185 a 478m/s. Todavia, as profundidades deste último trabalho não são reportadas.

Igualmente, Houston *et al.* (1995) realizaram ensaios do tipo *down-hole* em um aterro de RSU, que também recebe entulhos de construção e de poda, e obtiveram os resultados médios apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Velocidades de propagação e respectivos parâmetros obtidos pela técnica de down-hole (Houston *et al.* 1995).

Prof. (m)	Vc (m/s)	Vs (m/s)	Vc/Vs	$\nu$	$G_0$ (MPa)	E (MPa)
1,52	235	124	1.89	0,30	16,1	42,0
3,05	255	143	1.78	0,27	21,4	54,2
4,47	273	161	1.70	0,23	27,0	66,5
6,10	300	184	1.63	0,20	35,0	84,1
7,62	311	198	1.57	0,16	40,8	94,8
10	346	229	1.51	0,11	54,7	121,3

Mais recentemente, Pereira *et al.* (2002) reportam ensaios sísmicos no aterro de *Valdemingómez*, na Espanha, onde a velocidade de onda cisalhante foi medida até a profundidade de 35m, tendo o seu valor variando entre 210m/s a 100m/s, até o primeiro metro de profundidade, e de 100m/s a 250m/s, à profundidade de 1 a 31m. Empregando a Equação 22, Pereira *et al.* (2002) obtiveram uma variação de 7,2MPa a 31MPa para o módulo cisalhante máximo ( $G_0$ ), utilizando uma densidade de 500kg/m<sup>3</sup>.

A partir dos dados sobre velocidades cisalhantes da literatura e apresentados anteriormente, determinaram-se os módulos cisalhantes  $G_0$  por meio da aplicação da Equação 23, desde que se tenha conhecimento da densidade ou peso específico do lixo. O resultados encontrados, ilustrados em termos de  $G_0$  x *profundidade*, estão apresentados na Figura 25. Nos cálculos, quando não se tinha conhecimento sobre  $\gamma$ , empregou-se valores entre 700 e 1000kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2.

#### Parâmetros de Deformabilidade de RSU por ensaios estáticos.

Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) postulam que o ensaio de placa pode ser usado como metodologia de análise da deformabilidade em aterros. Porém, em alguns casos este teste é realizado na camada de solo de cobertura sobrejacente ao lixo. No caso do ensaio ser executado diretamente sobre a camada final, cuja espessura é da ordem de 0,5 a 1,0m, o uso de uma placa de maiores dimensões se justifica. Por outro lado, se o ensaio for realizado sobre a camada de proteção diária, com cerca de 0,10 a 0,40m, placas de menores dimensões podem ser

empregadas. De uma forma ou de outra, a pressão aplicada deve vencer a pressão de punção do solo para, então, atingir o resíduo e produzir os resultados procurados. O processo envolve um estágio inicial elástico até o punção da camada de cobertura, seguido de outro trecho linear, representativo da deformação somente do resíduo para o acréscimo de pressão. Segundo Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) a pressão de punção de uma camada de solo como a da Figura 26 pode ser dada pela Equação 27.

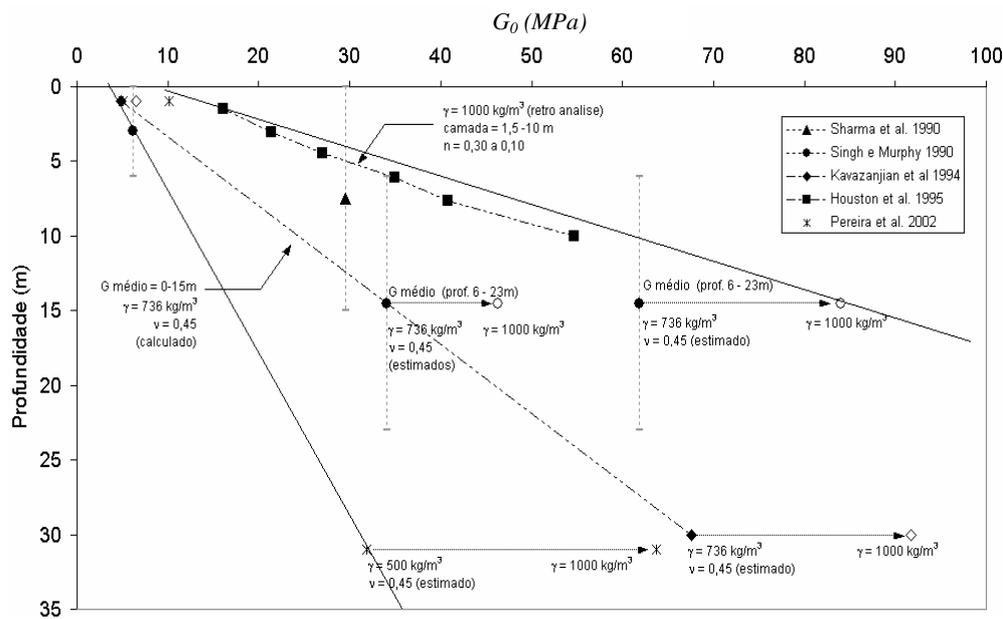


Figura 25 – Faixa de valores de \$G\_0\$ obtidos a partir de ensaios geofísicos

$$P_p = s_u \cdot \frac{\left(1 + 2 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{D}{B}\right)^2}{\tan \alpha \cdot \left(1 + \tan \alpha \cdot \frac{D}{B}\right)} \quad \dots(27)$$

em que \$S\_u\$ é a resistência da camada de argila de cobertura e \$D\$, \$B\$ e \$\alpha\$ são a espessura da camada, o diâmetro da placa e a inclinação de uma cunha até o limite de influencia da carga.

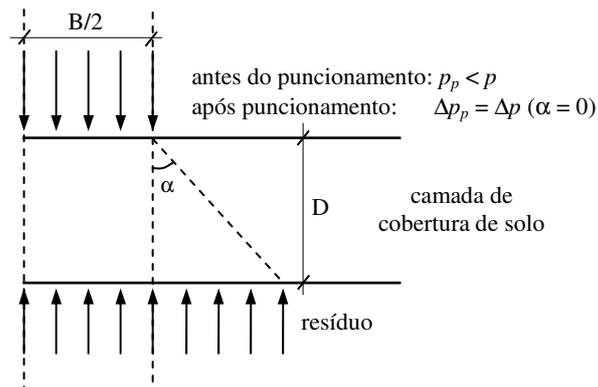


Figura 26- Definições para determinação da pressão de puncionamento

Após atingir-se a resistência do solo, todo o carregamento é transmitido ao resíduo. Nestas condições, a lei governante é dada por:

$$\Delta p = \frac{E_w}{1 - \nu_w^2} \cdot \frac{\Delta s}{B} \quad \dots(28)$$

em que  $E_w$  – módulo de *Young* do lixo;  $\nu_w$  – coeficiente de *Poisson* do lixo;  $\Delta s$  – recalque;  $B$  – diâmetro da placa.

O módulo de *Young* ( $E_w$ ) obtido por Sánchez-Alciturri *et al.* (1995) no aterro de *Meruelo*, na Espanha, empregando ensaios de placa de carga em resíduo sem cobertura, esteve na faixa de 1 a 2MPa. Contudo, o coeficiente de *Poisson* empregado nos cálculos não foi discriminado.

Por sua vez, no mesmo ano Jessberger & Kockel (1995) apresentaram resultados de módulos de rigidez ( $E_s = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ ) derivados de diferentes testes da literatura, bem como, alguns advindos de seus ensaios com células de compressão de 1000mm, onde  $E_s$  foi determinado para cada passo de carga e sua respectiva deformação. A Figura 27 transcreve as informações descritas por Jessberger & Kockel (1995).

Koda (1997) reporta valores médios de módulo de rigidez, obtidos a partir de retro-análises de rupturas induzidas de taludes no aterro de *Radiowo*, Polônia, da ordem de 0,8 a 1,2MPa para resíduos sólidos com materiais inertes na faixa de 1,1MPa para RSU inertes, com camadas de areia.

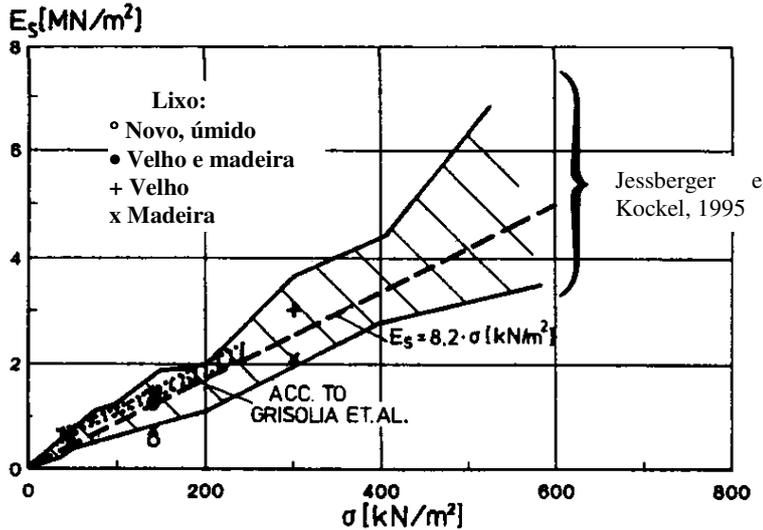


Figura 27- Análise comparativa entre alguns módulos de rigidez disponíveis na literatura (Jessberger & Kockel, 1995).

### 3.3.2.1. Investigações com Pressiômetros em RSU

A experiência relatada na literatura sobre a utilização de pressiômetros para investigar RSU é escassa. Cartier & Baldit (1993) reportam uma campanha de ensaios de campo em um aterro de RSU na França, onde foi empregado um pressiômetro de Ménard até a profundidade de 20m para determinar o módulo de elasticidade de Ménard ( $E_m$ ). Os pré-furos eram executados com lavagem e revestidos, empregando-se um tubo ranhurado longitudinalmente na profundidade teste para proteção da membrana. Pelo ajuste dos valores de módulo Cartier & Baldit (1993) indicam uma variação de  $E_m(\text{kPa}) = 1000 + 1000 a 1500 \cdot z(\text{m})$ .

Posteriormente, Dixon & Jones (1998) e Dixon *et al.* (1999) justificam o emprego de um pressiômetro comercialmente disponível pela empresa Inglesa *Cambridge Insitu* na investigação de RSU, pois:

- O equipamento mede tensões médias atuantes na membrana e, portanto, qualquer grande variação em tensão devido à natureza heterogênea do resíduo representará um valor médio;
- Deformações relativamente grandes podem ser alcançadas, tipicamente da ordem de 10 – 15% com o equipamento padrão. Medição do comportamento em grandes deformações é importante devido à alta

compressibilidade do material e do comportamento de pré-ruptura com endurecimento que tem sido observado em laboratório (Jessberger & Kockel, 1995);

- Ensaios pressiométricos envolvem um volume relativamente grande de material em cada teste, o que é desejável devido à natureza variável do meio estudado. Ensaios em solos têm indicado que materiais distantes até 40 vezes o diâmetro do pressiômetro podem vir a influenciar o ensaio (Clarke, 1995).

No caso de RSU, dadas as suas características peculiares, ainda há incertezas quanto à melhor técnica de instalação do pressiômetro, que produza o mínimo de amolgamento. Por isso, Dixon & Jones (1998) e Dixon *et al.* (1999) indicam quatro procedimentos em potencial para a instalação da sonda em aterros de RSU:

- i. Um PAP pode ser empregado, formando um furo desde a superfície até a profundidade requerida. O furo não é revestido valendo-se da natureza “reforçada” do resíduo para a prevenção do colapso acima da sonda. Este método deve produzir o menor distúrbio e não requer outro tipo de equipamento no local (p.ex. sonda rotativa);
- ii. Caso o método com PAP funcione sob taxas muito pequenas de avanço, então, é preferível formar o furo com uma sonda rotativa e, então, instalar o pressiômetro por autoperfuração a partir da base do furo escavado;
- iii. Se a técnica autoperfurante não funcionar satisfatoriamente para certos resíduos, então, um método alternativo é formar o furo como descrito no item (ii) e, subseqüentemente, formar uma cavidade por meio de trado de mesmo diâmetro que a sonda. Um PPF é então inserido nesta cavidade e o teste executado;
- iv. Uma metodologia alternativa é a cravação do pressiômetro no resíduo, a partir da superfície ou da base de um pré-furo. Instrumentos do gênero, que resultam no completo deslocamento do material, são conhecidos como pressiômetros de deslocamento total (*full displacement pressuremeter*), sendo atualmente o mais comumente disponível o Cone Pressiômetro. Devido ao fato do material ao redor do instrumento ser amolgado pelo

processo de inserção, é comum aos PC's a capacidade de grandes deformações, isto é, a membrana pode ser expandida até grandes diâmetros, deformando um volume maior de material e incluindo o solo não amolgado.

Apesar das propostas, Dixon & Jones (1998) ressaltam que mesmo através do emprego de um dos quatro métodos descritos, pode ser, ainda, necessário abandonar algumas locações teste devido à presença de obstruções, i.e. materiais impenetráveis.

O sítio reportado por Dixon & Jones (1998) para realizar investigação com um pressiômetro autopercussor foi o aterro *Calvert*, próximo a Londres, cuja operação teve início em 1980, recebendo somente resíduos urbanos. A profundidade máxima das células é de 20m, com cada célula levando de um a dois anos para fechamento. O RSU é tipicamente disposto em camadas de 1m (máximo duas) e compactado estaticamente, possuindo camadas de proteção de argila com 0,3 a 0,5m de espessura e camada de cobertura final de argila com 1 a 2m de espessura.

Os ensaios foram realizados empregando-se a metodologia (ii) descrita anteriormente, tanto em resíduo recente (1 – 3 anos), em profundidades de 3,5 a 10,7m abaixo da superfície, quanto em um resíduo parcialmente degradado (11 anos) em profundidade de 11,7m. Posteriormente, o método (i) foi utilizado usando um PAP, operado desde a superfície, em resíduo com 2 anos de idade e profundidade 1,7 a 3,5m. A curva pressiométrica de um dos ensaios está reproduzida na Figura 28.

Como não há atualmente metodologias de interpretação de ensaios pressiométricos específicas para RSU, Dixon & Jones (1998) empregaram a metodologia corrente para solos e rochas na obtenção do parâmetro de rigidez  $G$ , através de ciclos de descarregamento e re-carregamento da curva *pressão x deformação*. Além disto, para avaliar a tendência de variação de  $G$  com a profundidade, utilizaram os resultados dos ciclos que foram gerados em diferentes níveis de deformação e tomaram como referência um valor de deformação específico (p.ex. 1%). Para tanto, em um dado ensaio uma relação aproximadamente linear foi encontrada entre  $G$  (ciclos) e deformação. Esta linha foi, então, empregada para obter o módulo cisalhante referente a 1% de

deformação da cavidade. A Figura 29 mostra a variação de  $G$  obtido a 1% de deformação em função da profundidade.

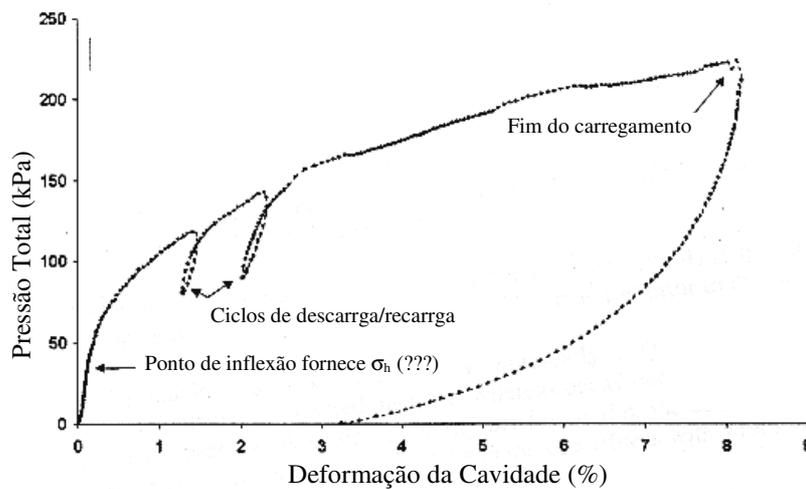


Figura 28 - Curva pressiométrica de um PAP em RSU (Dixon *et al*, 1999).

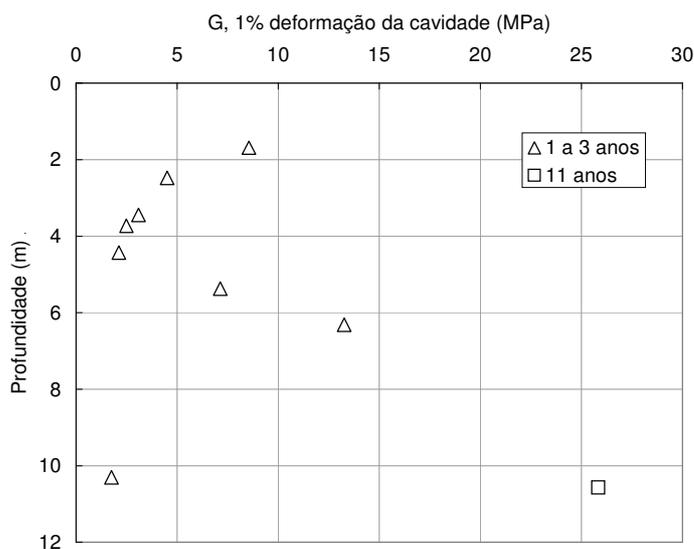


Figura 29 – Módulo cisalhante de RSU através de PAP, a 1% de deformação da cavidade (Dixon e Jones, 1998)

Os autores ressaltam que houve um decréscimo do módulo até a profundidade de 4,5m e posterior acréscimo do mesmo, com exceção do ponto referente à profundidade de 10,7m (talvez por erros operacionais). Dixon & Jones (1998) justificam o comportamento inicial pelo efeito de formação da camada de cobertura. A compactação durante a disposição e operação do aterro é mais branda do que a empregada durante a formação da camada superior final, com 1 a 2m de

espessura, que deve ser bastante impermeável. Desta forma, tende-se a ter camadas superficiais dos aterros mais compactas, camadas intermediárias ainda sofrendo o efeito da degradação e recalque e camadas mais profundas, com decomposição avançada e baixo índice de vazios, influenciando, desta forma, no valor de módulo cisalhante obtido.

Dixon & Jones (1998) apresentam, também, uma análise comparativa entre os módulos de deformação obtidos de sua campanha com o PAP e outros disponíveis na literatura (Figura 30). Estes englobam informações de módulos de *Young* ( $E$ ) obtidos por meio de ensaios laboratoriais triaxiais, bem como, módulos de compressão volumétrica ou edométricos ( $D$ ) provenientes tanto de ensaios laboratoriais de pequena escala quanto de grande escala, além de investigações de campo, e geram uma faixa limite de valores de módulo x tensão.

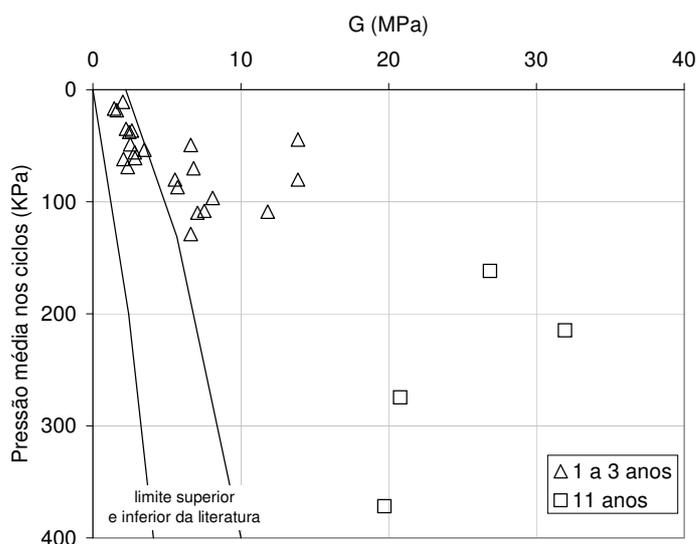


Figura 30 – Análise comparativa entre G disponíveis na literatura (Dixon e Jones, 1998).

Posteriormente, Dixon *et al.* (2000) deram prosseguimento às investigações no aterro de Calvert com o PAP e reportaram adicional uso de um PPF. Para o caso descrito, foi utilizado o *High Pressure Dilatometer* (HPD) da *Cambridge Insitu* (<http://www.cambridge-insitu.com>). Além destes pressiômetros, Dixon *et al.* (2000) empregaram PC nas investigações, porém reportam apenas uma análise crítica qualitativa sobre o emprego de PC em RSU, pois os dados ainda estavam em fase de interpretação. Uma curva *pressão-deformação da cavidade*,

representativa do ensaio com o cone pressiômetro usado está apresentada na Figura 31 para fins de comparação com o resultado da Figura 30.

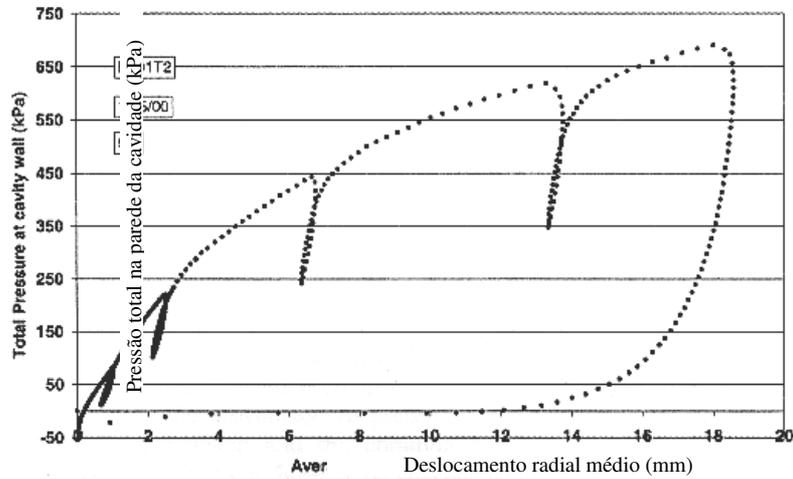


Figura 31 - Curva pressiométrica de um PC em RSU (Dixon *et al.*, 2000).