

6

Análise e Interpretação dos Resultados

6.1.

Introdução

Foram executados ensaios do tipo SPT, CPT e PMT em duas células do aterro controlado de resíduos sólidos da Muribeca, conforme descrito no Capítulo 5. A análise e interpretação dos resultados obtidos é certamente uma fase bastante controversa desta pesquisa, pois envolve a adaptação e emprego de metodologias originalmente concebidas para solos. Sabe-se que atualmente não há metodologias específicas para interpretação destes ensaios particularmente para RSU. Muitas vezes, por meio destas adaptações, têm-se apenas análises qualitativas, em outras, têm-se correlações entre os parâmetros das diversas técnicas visando à busca de padrões que possam descrever o comportamento dos resíduos e produzir metodologias de análise. Entretanto, devido à variabilidade nos resultados dos parâmetros normalmente encontrados, este tipo de associação é difícil.

A questão inicial aqui é “Qual metodologia de interpretação de ensaios *in situ* se adapta melhor para o contexto de RSU?”. No caso de ensaios com o cone e o pressiômetro, as metodologias de interpretação disponíveis na literatura distinguem-se para materiais coesivos e para friccionais, ou seja, foram desenvolvidas para areias ou para argilas. Há ainda possibilidade de interpretação de ensaios em meios não saturados, porém falar-se em determinação de sucção em lixo não parece ser muito coerente. Sabe-se, ainda, que o RSU pode ser modelado como um material constituído de duas parcelas: uma matriz básica, com partículas finas, e outra matriz de reforço, constituída de plásticos, têxteis, madeira, borracha, etc... (Jessberger *et al.*, 1995). A matriz básica é responsável pela parcela de resistência por atrito, enquanto que a matriz de reforço confere o aspecto coesivo ao material (e.g. Kölsch, 1995; Jessberger *et al.*, 1995; Manassero *et al.*, 1996; Mahler & Lamare Neto, 2000; Fucale, 2000). Para níveis de deformação elevados a resistência coesiva é bastante mobilizada por conta da

matriz de reforço. Para deformações menores a resistência é governada pelo atrito interno.

Empregou-se o ábaco proposto por Schmertmann (1978) para tentar situar o resíduo investigado dentro de uma classificação convencional da Mecânica dos Solos de tal forma que se possa ter mais segurança sobre qual metodologia de interpretação utilizar. Nele os dados de resistência de ponta (q_c) e razão de atrito ($R_a = f_s/q_c$) dos ensaios CPT são traçados para avaliação qualitativa da classificação. Similar procedimento já foi adotado por outros autores em investigações com RSU (e.g. Carvalho, 1999; Oliveira, 2002) apresentando resultados consistentes entre si.

Ao analisar os resultados dos CPTs apresentados anteriormente nas Figuras 110 e 111 percebe-se que há significativa variação na resistência de ponta com a profundidade nos três primeiros ensaios. Sendo assim, traçar diretamente estes pontos no ábaco implicaria em uma nuvem com distribuição muito grande, tornando inconclusiva qualquer análise. Por outro lado, selecionar apenas os valores médios de cada CPT para emprego no referido ábaco certamente não seria representativo da heterogeneidade do meio. Então, a opção intermediária escolhida entre estes dois extremos foi avaliar a distribuição de classes de valores de q_c e R_a por meio dos histogramas de variação (Figura 114 e 115), onde foram agrupados todos os resultados das sondagens CPT nas duas células investigadas, excluindo-se os pontos de picos extremos que representam apenas resistências pontuais de materiais mais sólidos e os valores nulos da superfície. Com isto, foi possível determinar de maneira aproximada o limite inferior e o superior de cada distribuição por meio da inspeção visual dos histogramas, fornecendo os limites de 3MPa a 11MPa para q_c e 2% a 4% para R .

Conduto, dada a subjetividade da análise realizada acima, outra avaliação estatística foi conduzida. Determinou-se a média aritmética geral para a variação de q_c e R_a . Em seguida, calculou-se o desvio padrão do espaço amostral de q_c e R_a . Então, os valores medianos foram somados e subtraídos do desvio padrão, fornecendo os seguintes novos limites: 3MPa a 13MPa e 1% e 5% para q_c e R_a , respectivamente.

Os resultados máximos e mínimos determinados, bem como os valores médios de cada ensaio, foram traçados no ábaco de Schmertmann produzindo o resultado ilustrado na Figura 116.

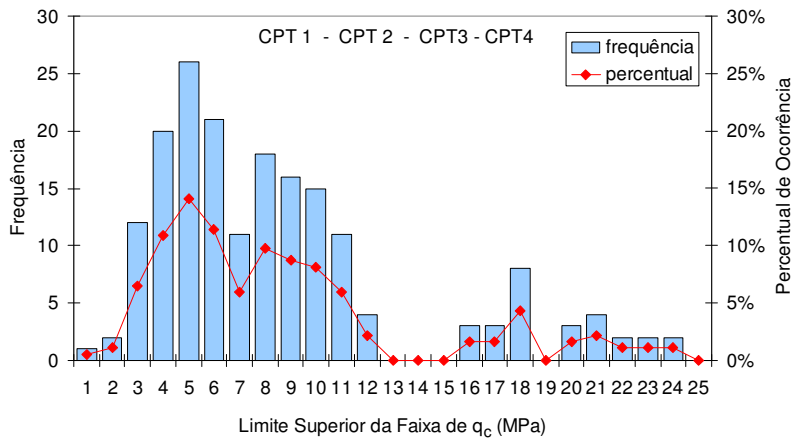
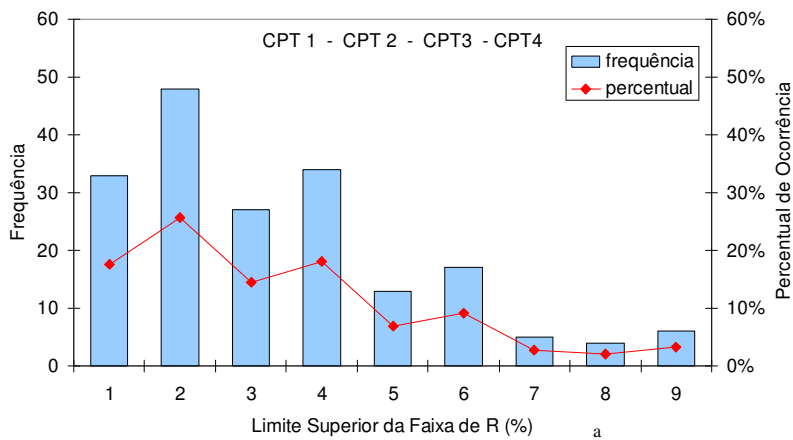
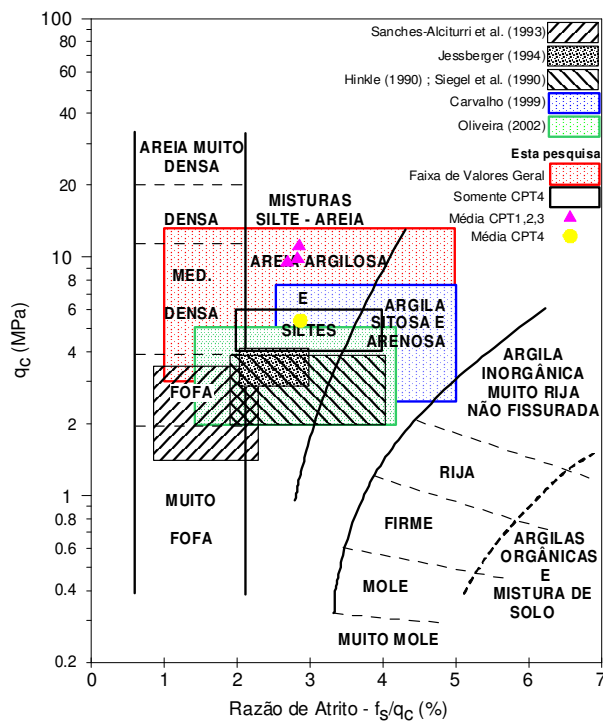
Figura 114 – Histograma de distribuição de q_c nas células C4 e C5.Figura 115 Histograma de distribuição de R_a nas células C4 e C5.

Figura 116 – Classificação do RSU do aterro da Muribeca com ábaco de Schmertmann (1978)

Por intermédio das duas avaliações conduzidas foi possível reduzir a nuvem de pontos de resultados de campo, porém a variabilidade ainda foi grande, situando o RSU investigado como um material que vai desde uma areia mediamente densa, passando por uma areia argilo-siltosa, até uma argila silto-arenosa. Acredita-se que, dada a variabilidade observada, poder-se-ia justificar o emprego de metodologias de interpretações usadas tanto para areias quanto para argilas na interpretação dos ensaios PMT.

6.2. Ensaio Pressiométrico

6.2.1. Correção das Curvas Pressiométricas

O procedimento nesta etapa envolveu a correção das curvas pressiométricas brutas apresentadas nas Figuras 105 a 108 considerando a rigidez da membrana durante expansão ao ar obtida anteriormente em laboratório, e levado em conta a redução de espessura destas durante o ensaio segundo metodologia apresentada por Clarke (1995) e descrita anteriormente no item 4.6.5.2. Além disto, o eixo das abscissas foi devidamente transformado para a representação convencional em ensaios deste gênero que é feita em termos da deformação da cavidade (ϵ_c) definida anteriormente na Equação 04. Com isto, as novas curvas obtidas foram reapresentadas nas Figuras 117 a 131 de maneira individual para cada Het quando disponível (identificadas com as letras *a*, *b*, *c* ou *d*) e como a média aritmética dos Hets (identificadas com a letra *e*), representando a expansão de uma cavidade única. Além disto, nos gráficos das referidas figuras estão traçados apenas os pontos ao final do intervalo de tempo (60s) após cada acréscimo ou decréscimo de pressão e somente o trecho onde não houve ruptura da membrana.

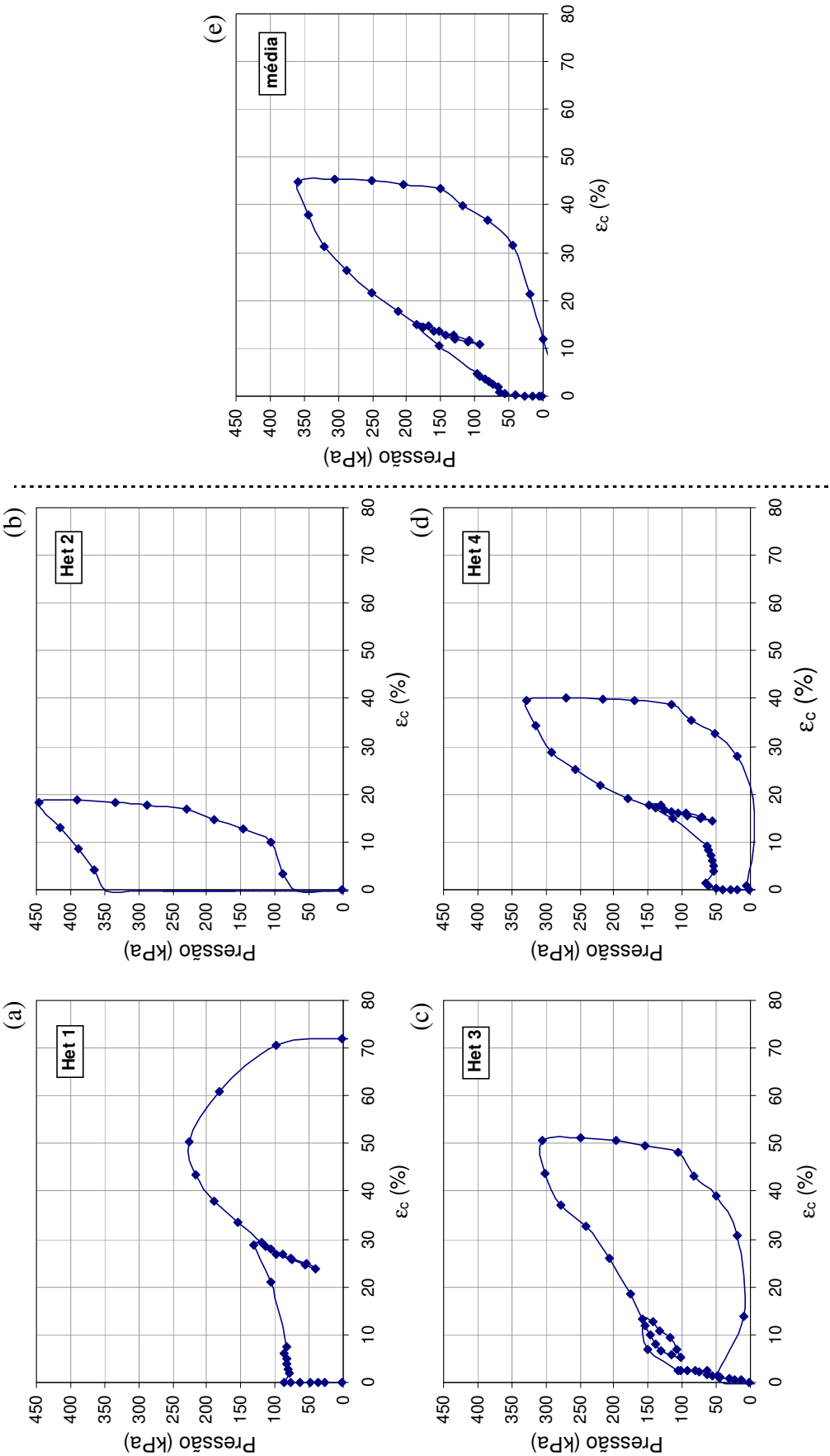


Figura 117 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 2m – SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

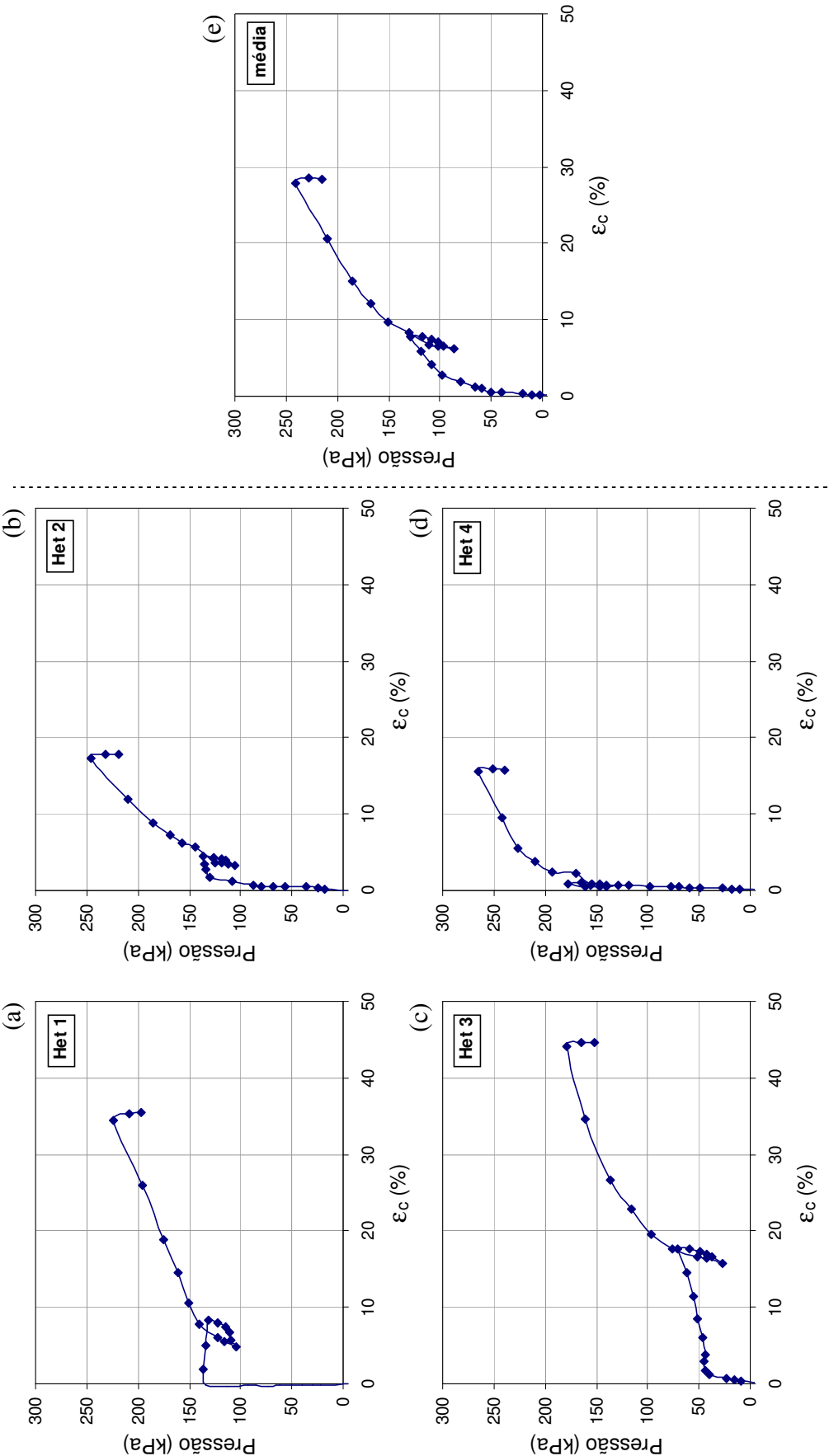


Figura 118 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 4m – SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

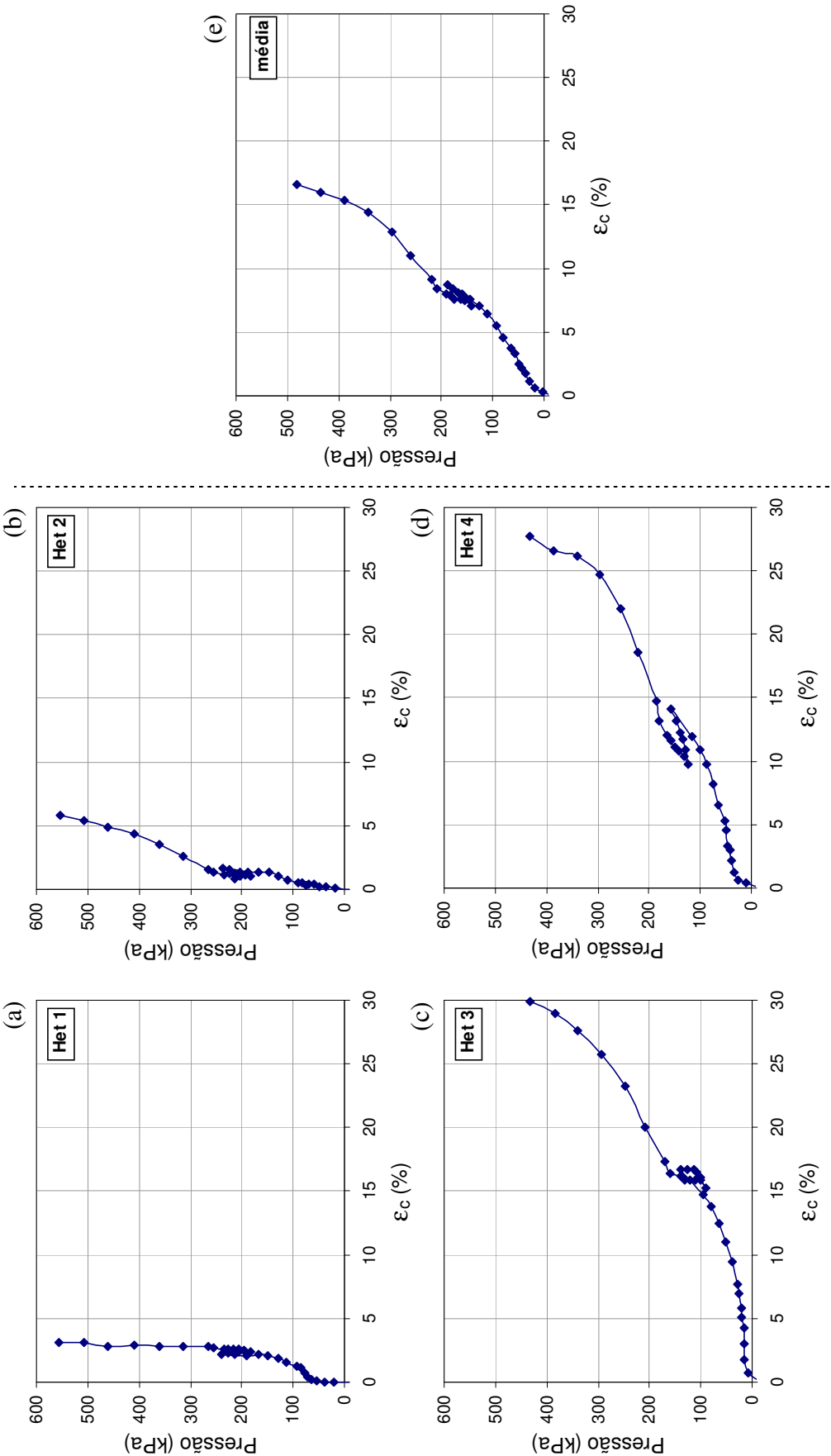


Figura 119 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 6m – SPI: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

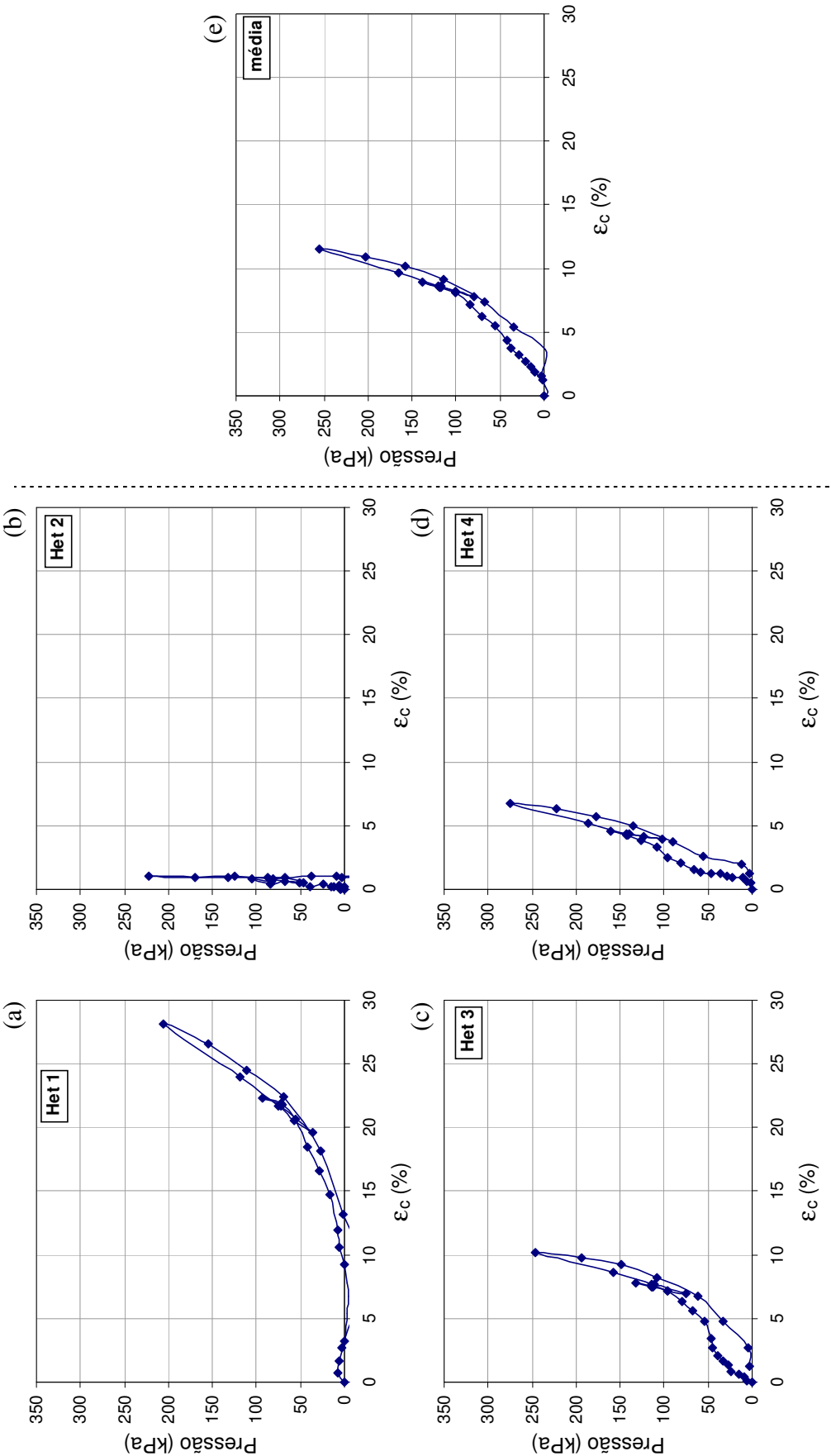


Figura 120 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT1 – 8m – SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

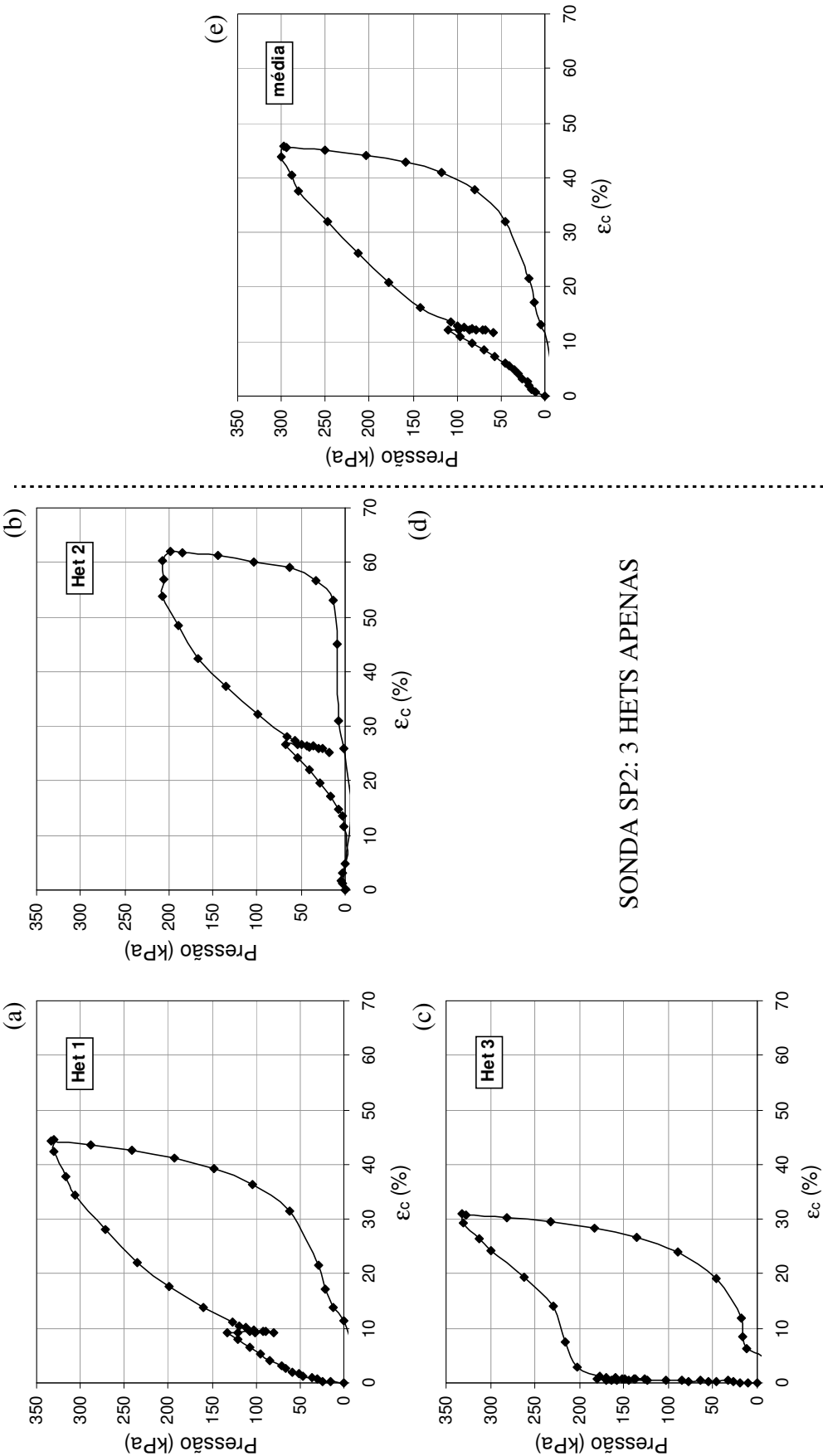


Figura 121 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT2 – 2m – SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e).

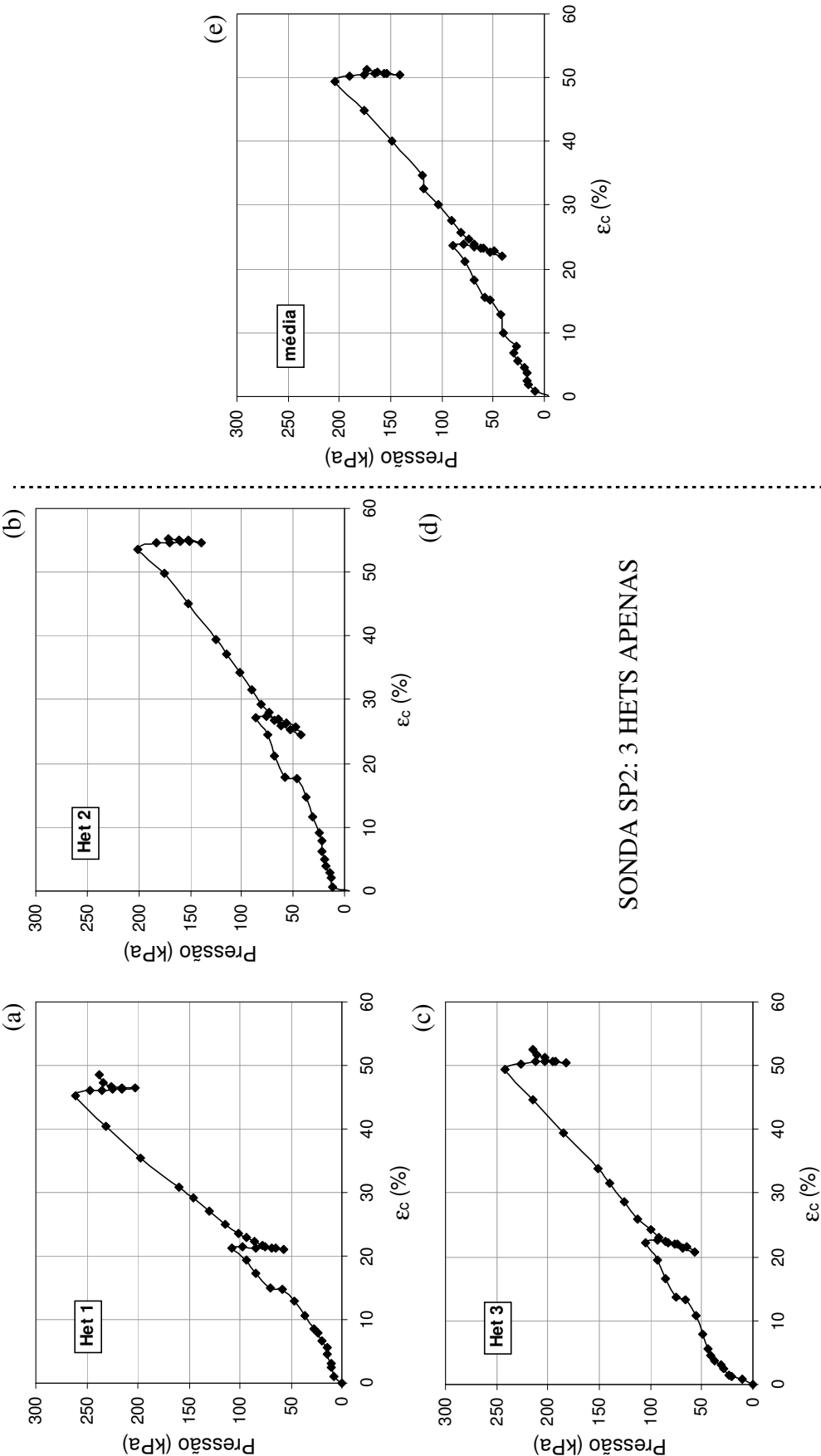


Figura 122 - Curvas pressiométricas corrigidas ensaio PMT2 – 4m -SP2: Hets independentes (a,b,c); média dos Hets (d)

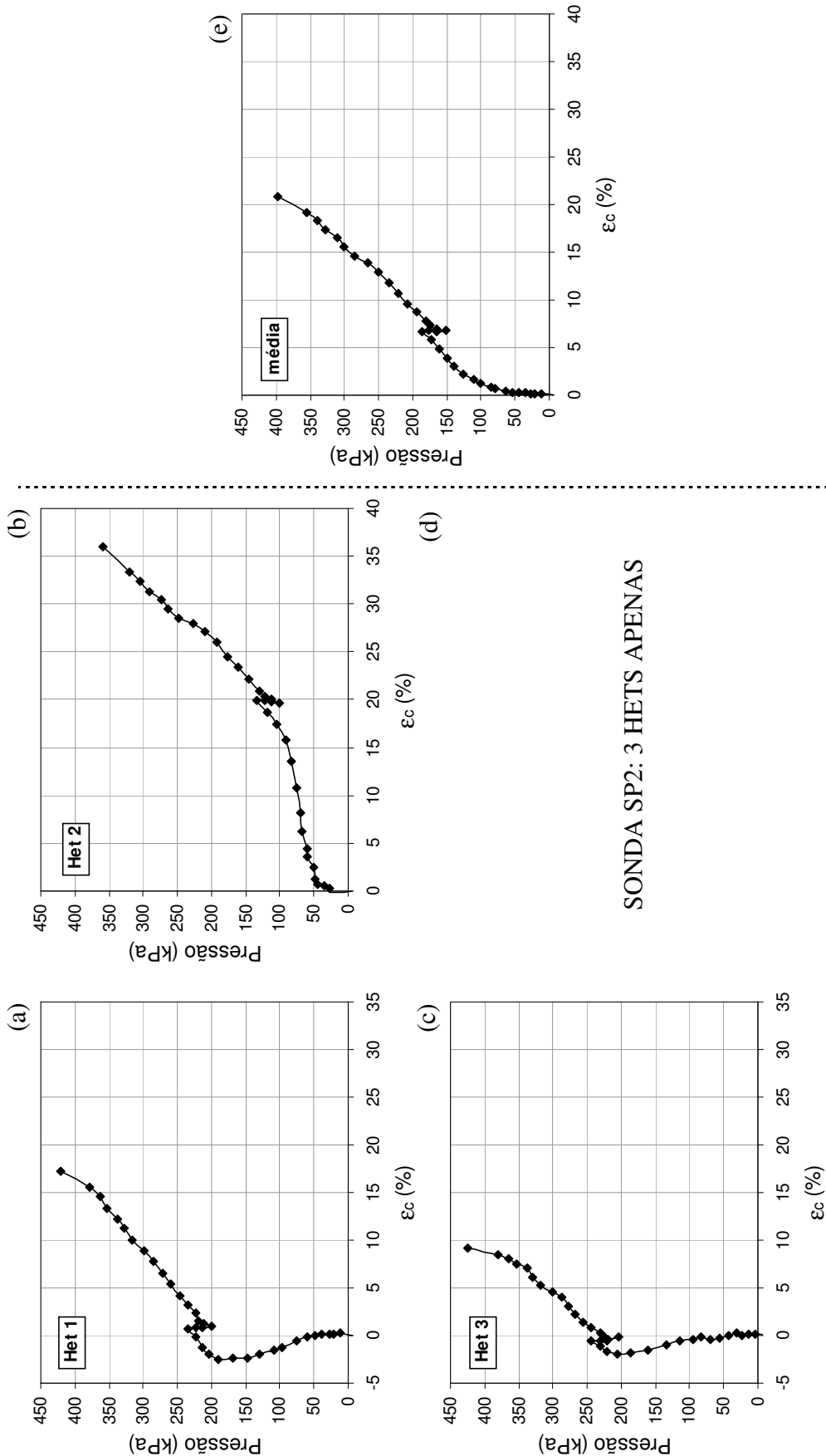


Figura 123 - Curvas pressiométricas corrigidas ensaio PMT2 – 6m -SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

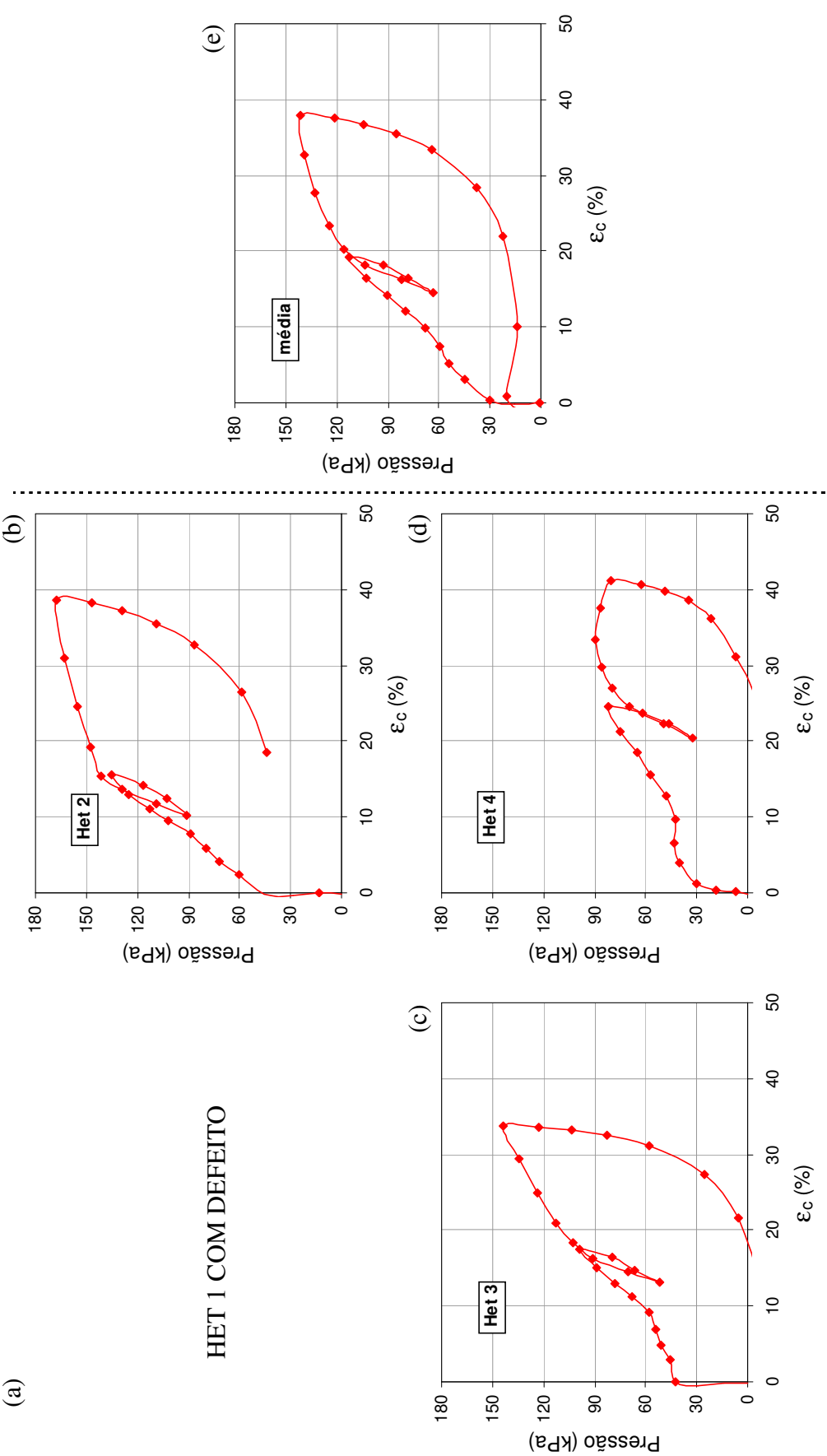


Figura 124 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 4m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

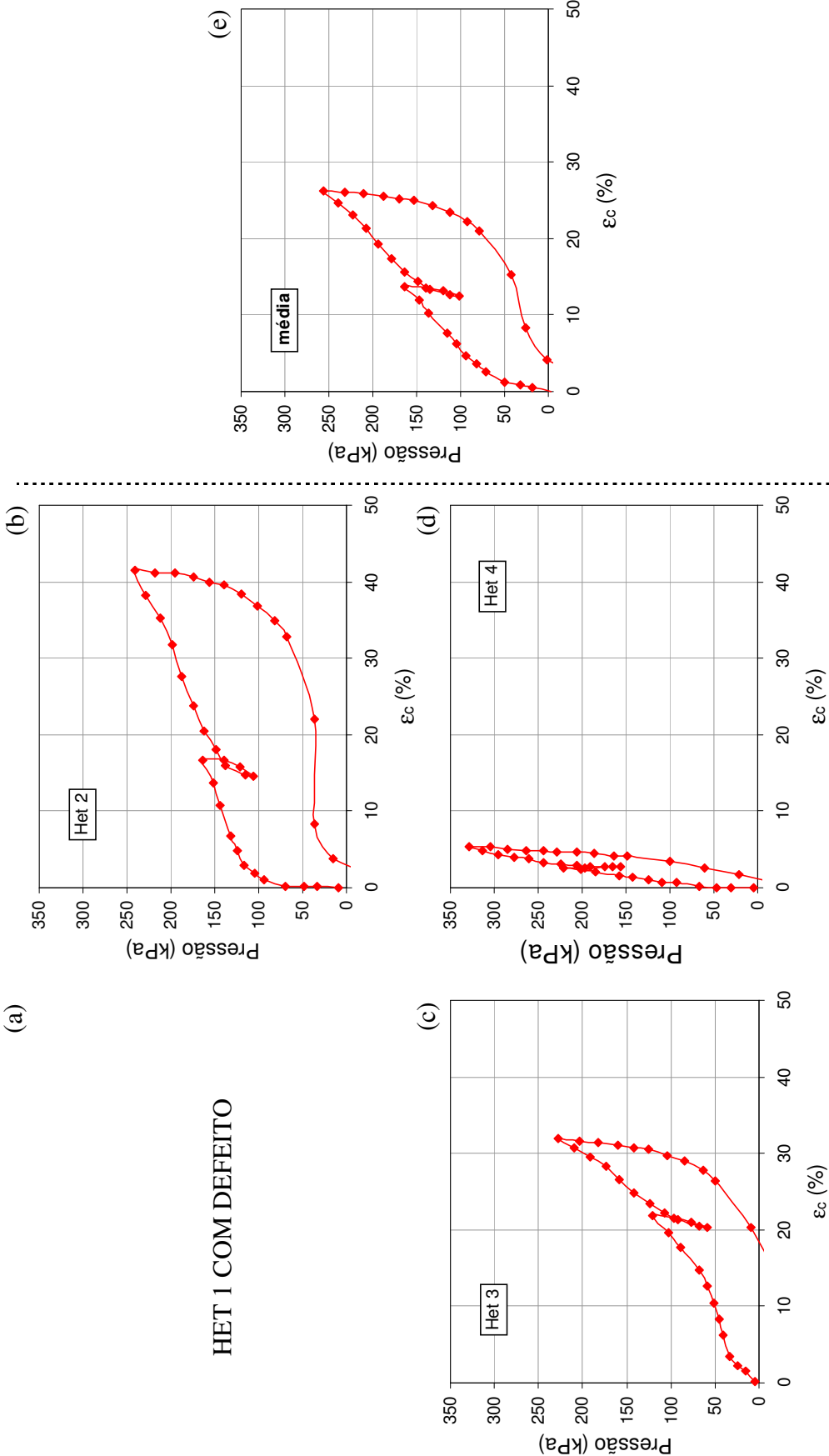


Figura 125 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 5m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

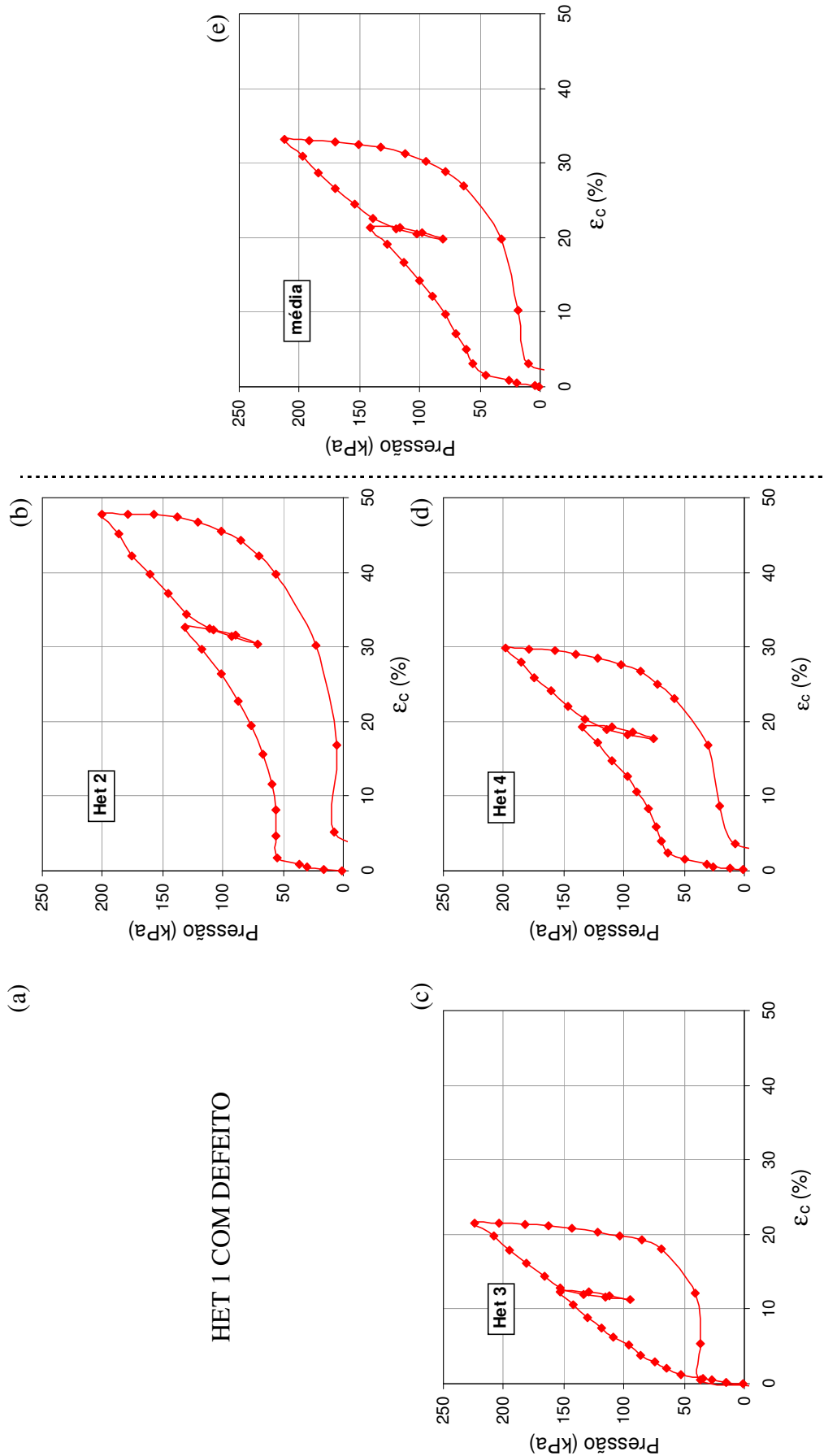


Figura 126 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 6m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

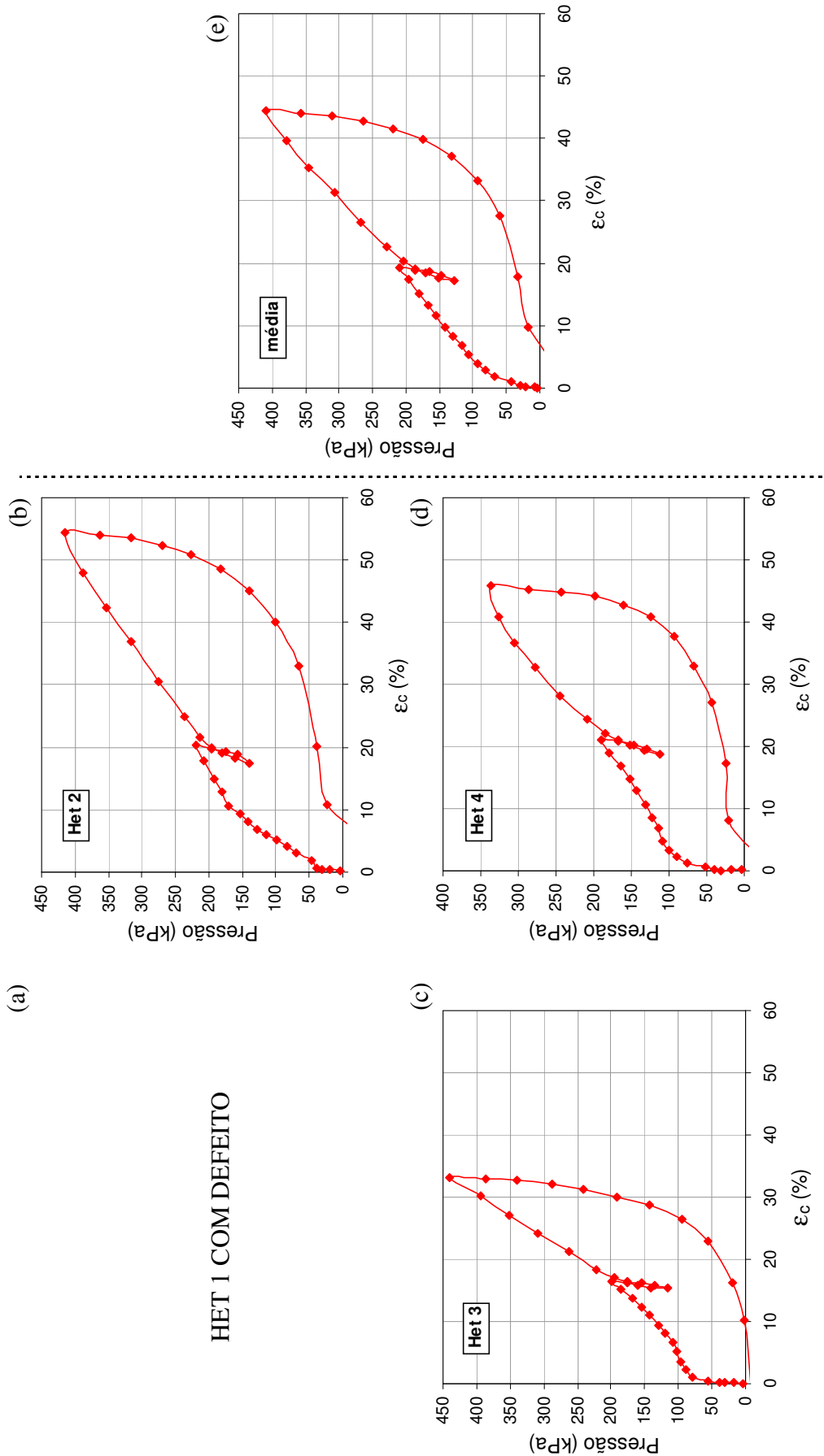


Figura 127 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT3 – 7m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

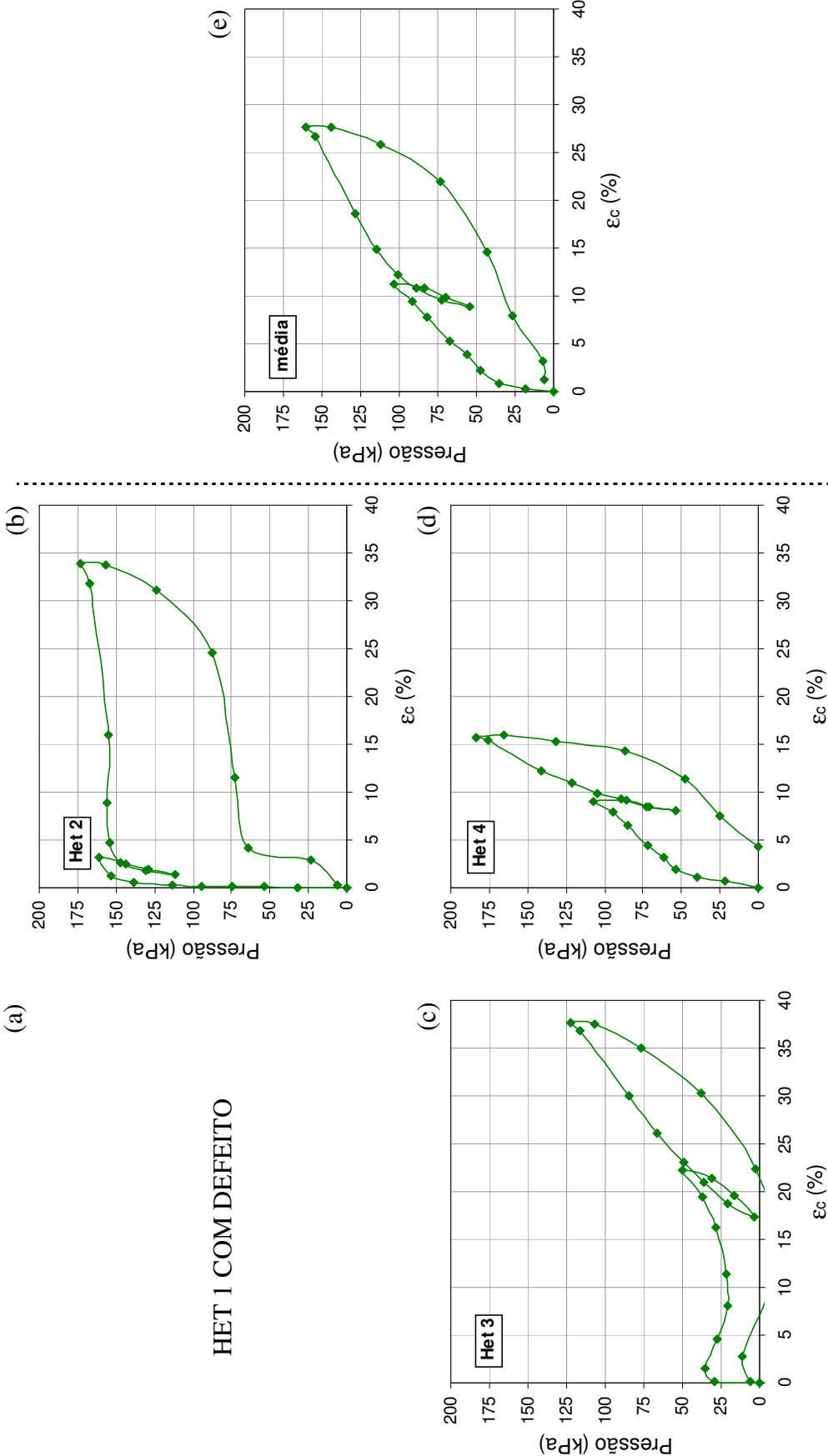


Figura 128 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 2m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

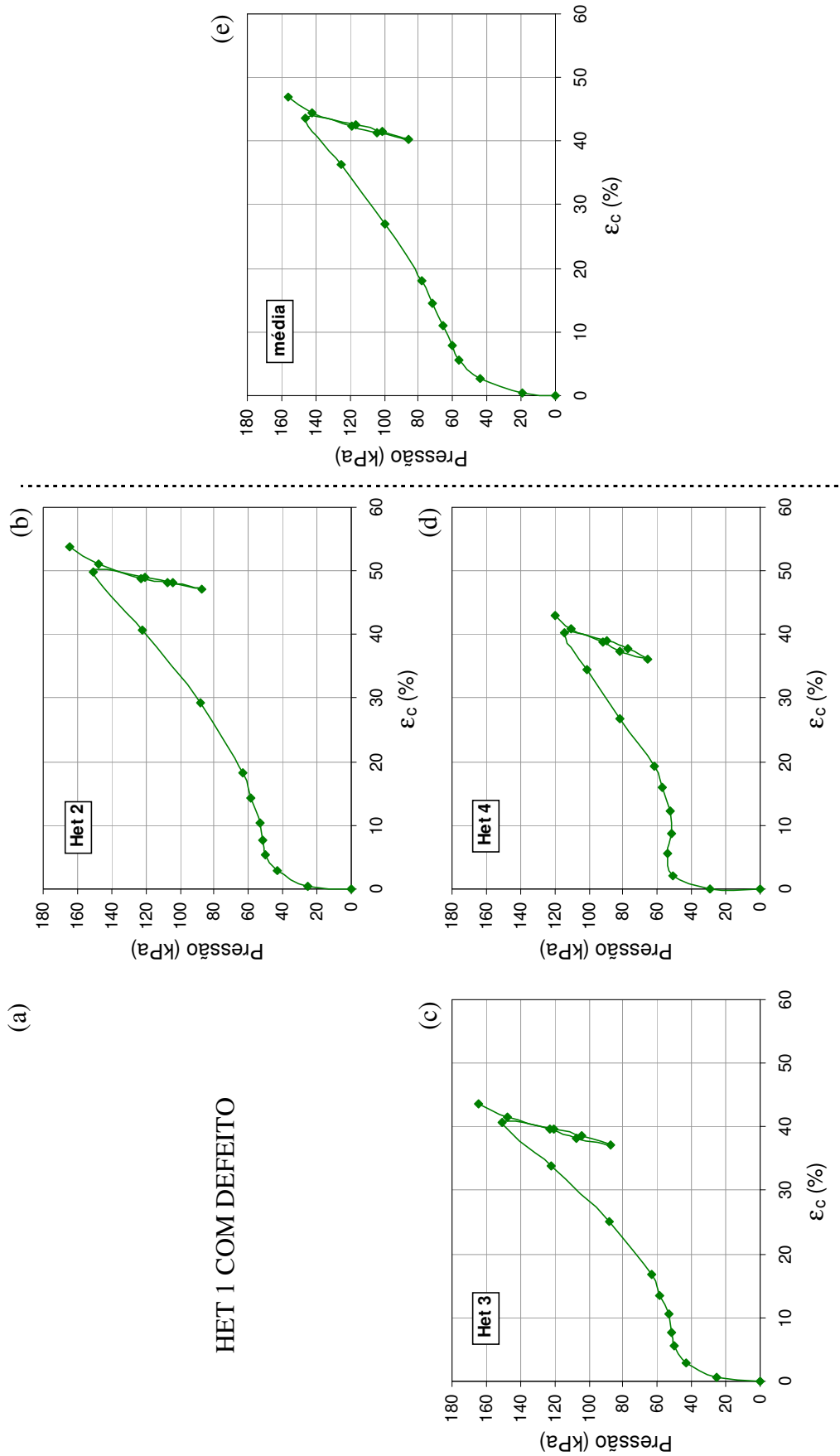


Figura 129 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 4m –SP1: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

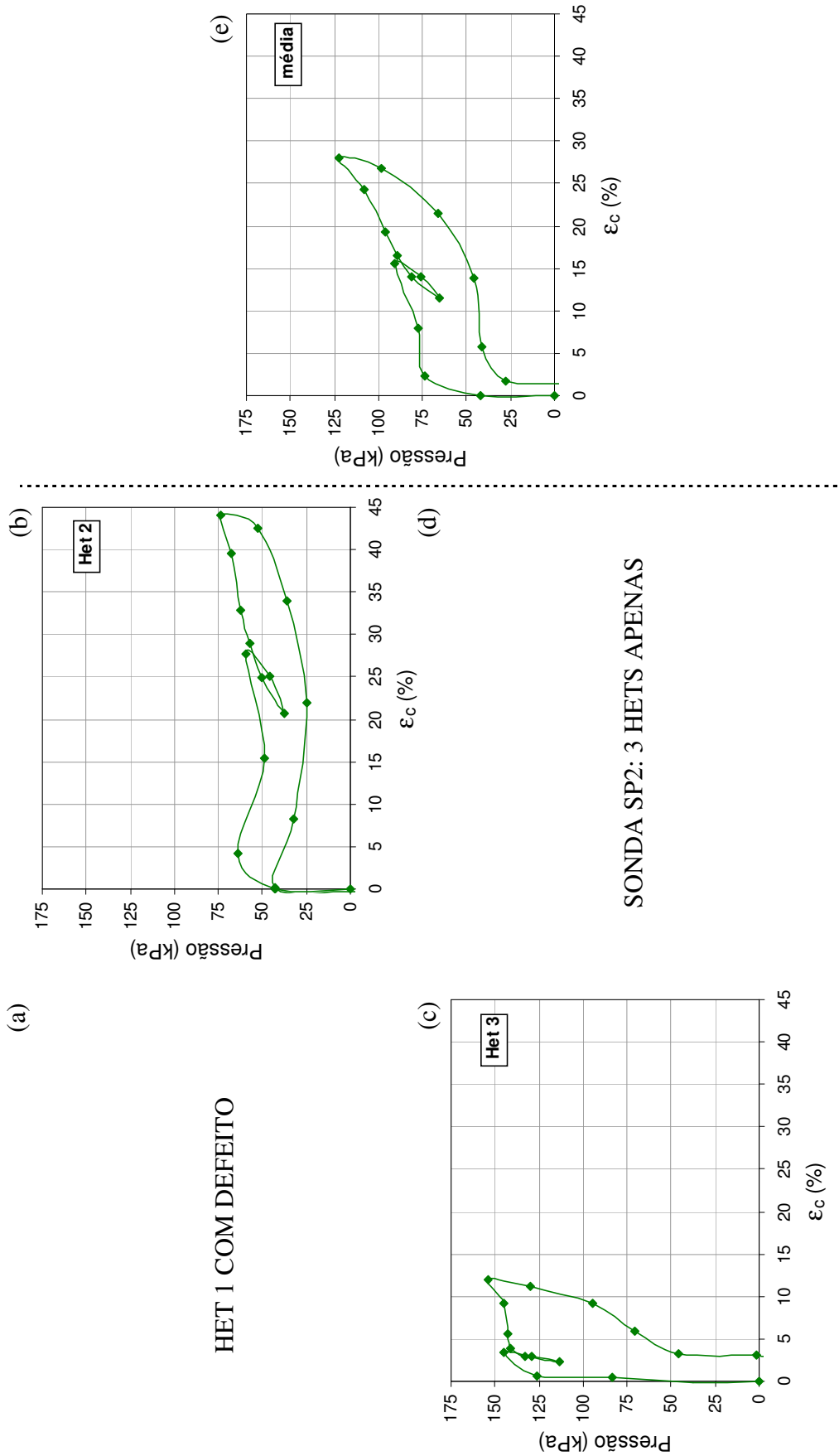


Figura 130 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 6m –SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

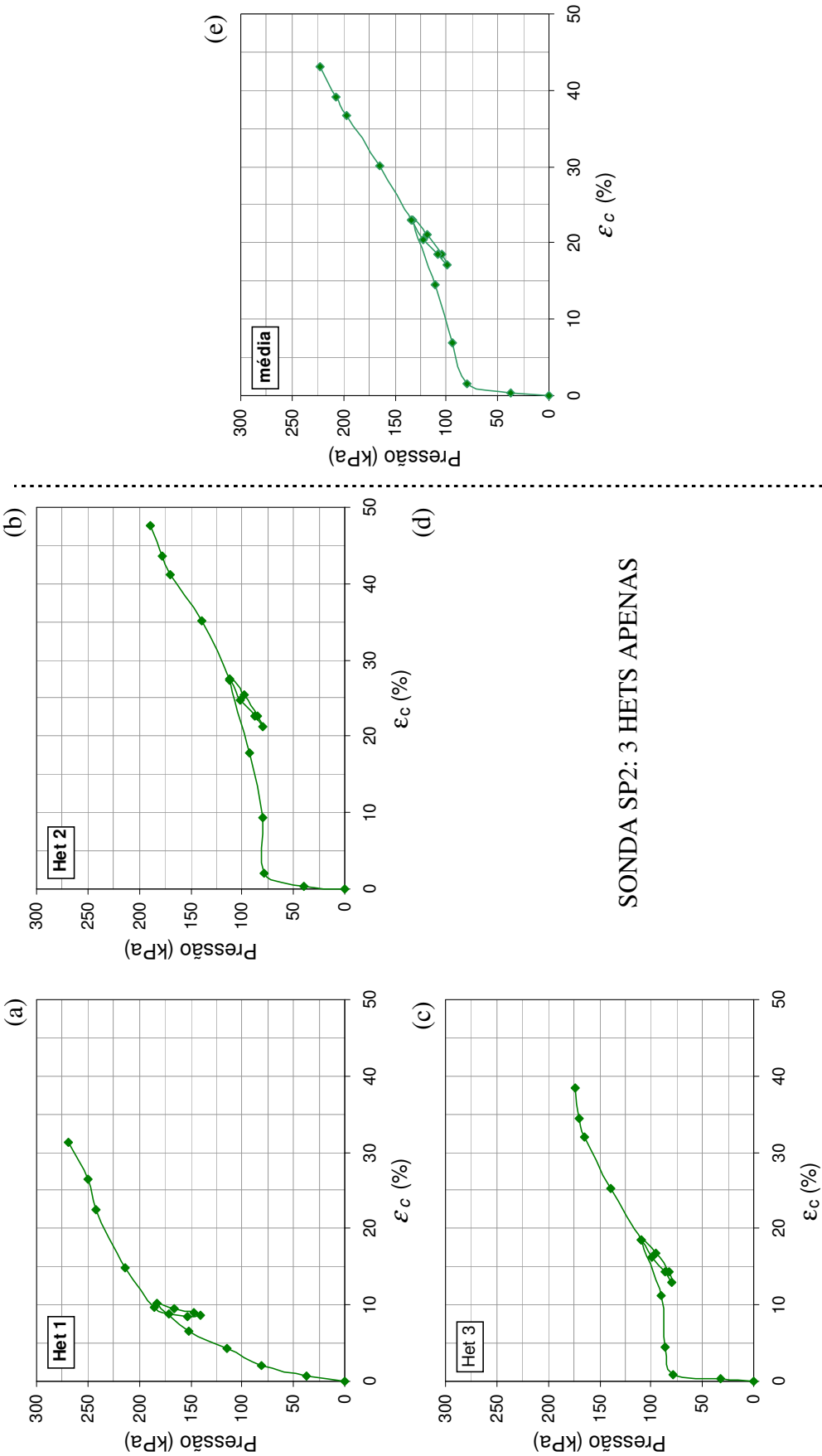


Figura 131 - Curvas pressiométricas corrigidas PMT4 – 8m –SP2: Hets independentes (a,b,c,d); média dos Hets (e)

6.2.2.

Avaliação Qualitativa das Curvas Pressiométricas

De uma forma geral, a qualidade dos ensaios pode ser julgada inspecionando-se as curvas pressiométricas corrigidas, pois o comportamento destas pode ser indicativo, por exemplo, de pré-furos com diâmetros superiores ou inferiores ao da sonda, de desalinhamento do eixo da sonda, de ocorrência de materiais de diferente rigidez ou, ainda, da tipologia de solo. A inspeção da característica da curva durante a execução dos ensaios é importante para o operador realizar uma estimativa preliminar da qualidade dos dados e da metodologia de instalação, bem como, para ganhar informações válidas sobre o tipo de subsolo antecipadamente.

A Figura 132 apresenta algumas considerações sobre o comportamento de curvas pressiométricas e como estas podem ser indicativas da qualidade dos ensaios no que se referem às técnicas de instalação e tipologia de solo (Clarke, 1995). Estas informações qualitativas servem de base comparativa para as análises realizadas a seguir a respeito dos ensaios executados na Muribeca.

A avaliação global das curvas obtidas foi algo entre regular e bom, sendo que o pior conjunto foi o PMT1 e o melhor o PMT3. O comportamento de cada curva pressiométrica, por furo PMT, será avaliada a seguir.

Furo PMT1 - metodologia (i)

As curvas correspondentes as profundidades de 2m e 4m (Figuras 117 e 118) parecem ter boa qualidade e possuem um comportamento similar ao esperado em PC do tipo FDPM, onde valores iniciais de ε_c ocorrem em níveis de pressão da cavidade elevados devido ao efeito da cravação. Na profundidade de 2m foi observada uma ligeira tendência de escoamento a partir dos 30% de deformação (curva de materiais argilosos) enquanto que na profundidade de 4m não ocorreu o mesmo. Em ambas as profundidades os braços indicaram diferentes níveis de deformação sugerindo a ocorrência de materiais com rigidez variável.

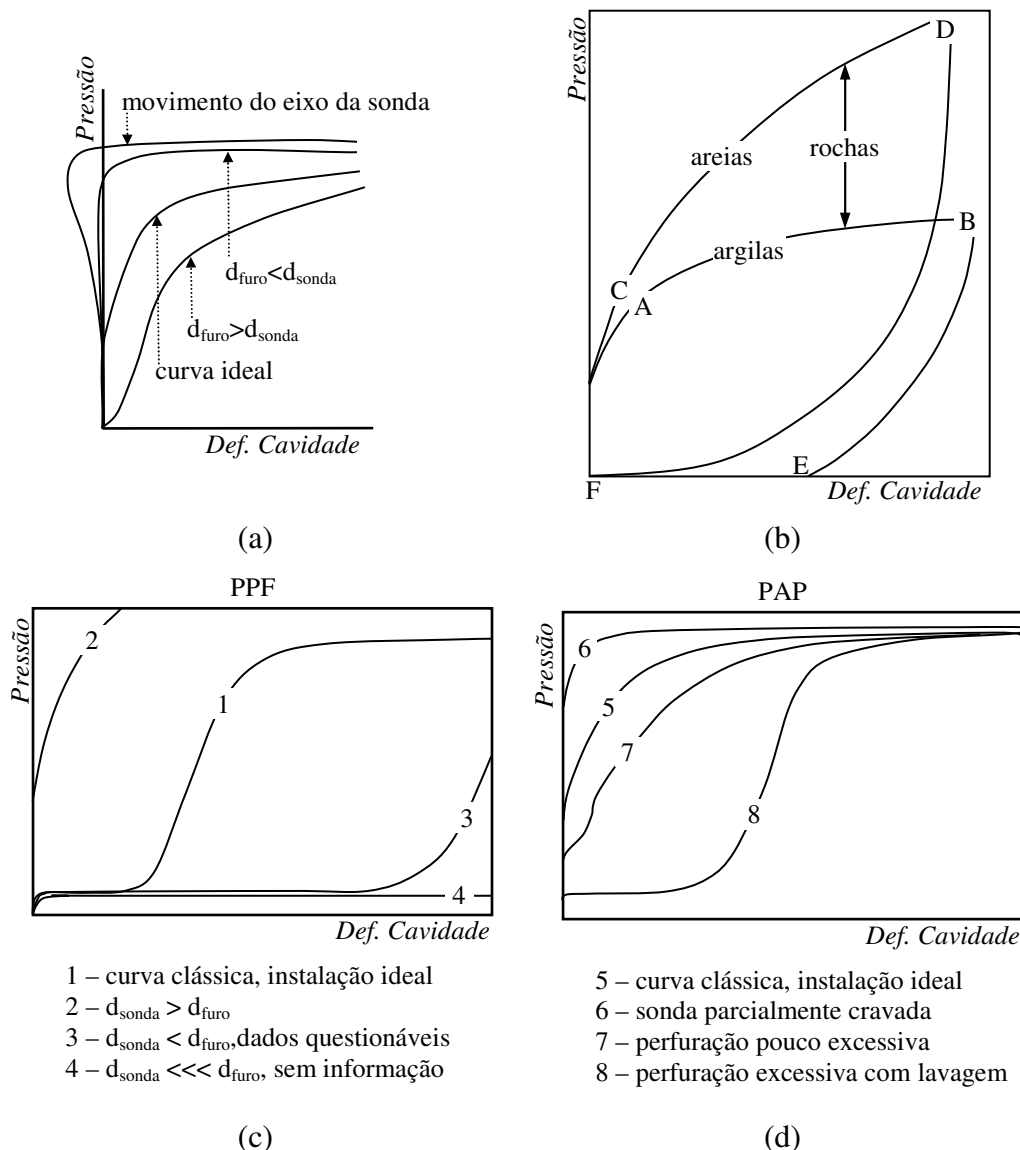


Figura 132 – Considerações sobre qualidade de ensaios pressiométricos segundo Clarke (1995): (a) efeito da instalação no trecho inicial de curvas com PAP; (b) efeito do tipo de solo nas curvas com PAP; (c) e (d) efeito da instalação no formato geral.

Por sua vez, os ensaios realizados nas profundidades de 6m e 8m (Figuras 119 e 120) parecem ter qualidade inferior, não apresentando o mesmo comportamento típico descrito acima bem como ciclos de descarregamento/recarregamento e trechos de descarregamentos finais pouco convencionais. Acredita-se que isto se deve aos furos na membrana causados durante a cravação nestas profundidades. Além disto, dois resultados extremos chamam a atenção nestes dois ensaios: pequenas deformações para elevadas pressões e grandes deformações para baixas pressões. O primeiro caso (Figuras 119(a), (b) e 120(b)), está relacionado com a existência de materiais de elevada

rigidez (metais, pedregulhos, madeira, etc.) que limitam a expansão ou, ainda, ao arraste durante a cravação de grande quantidade de materiais plásticos e têxteis, abundantes naquele furo, e acúmulo em um ponto ao longo do corpo ou ponteira da sonda, aumentando a rigidez localizada. Acredita-se que a primeira hipótese seja mais plausível, pois a ocorrência de zonas como estas eram esperadas no aterro e até procuradas pela sonda para análise da variação do módulo de rigidez que será discutida posteriormente. O segundo caso, pode ser explicado pela existência de grandes vazios dentro da célula, ou pela ocorrência de materiais extremamente deformáveis ou, ainda, devido ao furo feito pela ponteira ser cerca de 7% maior que o diâmetro da sonda. O fato do furo se manter com o diâmetro igual ao da ponteira cônica após sua passagem explicaria o que ocorre na Figura 120(a) onde somente após cerca de 7% de deformações o meio oferece alguma resistência à expansão da cavidade, configurando um comportamento típico de ensaios em pré-furos de diâmetros maiores do que a sonda (*overdrilling*), o que de certa forma, justificaria a curva atípica, distinta do que se esperava obter com ensaios cravados.

Furo PMT2 – metodologias (ii) e (iii)

Os ensaios no furo PMT2 (Figuras 121 a 123) foram executados em “pré-furo” de SPT conforme explicado anteriormente e as curvas produzidas parecem ter boa qualidade. O comportamento das curvas em profundidade foi variado e os resultados dos Hets em um mesmo ensaio foram diferentes entre si, com exceção da profundidade de 4m onde foram obtidos mais ou menos os mesmos valores de pressão e deformação para os três braços da sonda. Como exemplo desta variação e de acordo com as considerações apresentadas na Figura 132 tem-se que os comportamentos das curvas podem ser descritos da seguinte maneira:

- i. Figura 121(a) - PAP ou PPF bem justo;
- ii. Figura 121(b) - PPF com furo muito largo ou PAP com lavagem;
- iii. Figura 121(c) - PC e/ou material de rigidez elevada próximo ao Het;
- iv. Figuras 123 (a) (b) - PAP com desalinhamento no eixo da sonda.

Foi observada uma certa tendência de escoamento (p_L) em algumas curvas da profundidade de 2m para níveis de ε_c superiores a 30% ou 40%, especialmente

na Figura 121(b) onde atingiu-se 60% de deformação da cavidade. Nos demais casos não houve a mesma tendência e sim um acréscimo de resistência com a deformação, típica de solos reforçados (Figuras 122(e) e 123(e)), e associada ao comportamento tensão-deformação em RSU. Segundo Clarke (1995), curvas pressiométricas com este comportamento, isto é, com inclinação mais acentuada no trecho final de carregamento em ensaios com PAP, são indicativas de materiais arenosos.

Furo PMT3 – metodologia (iii)

Este furo foi o de melhor produtividade no que diz respeito ao desempenho da membrana, pois não houve perdas nos ensaios. Nestes, chegou-se até a profundidade de 7m, produzindo curvas boas e bem consistentes entre si (Figuras 124 a 127). Em todos os ensaios, notou-se um claro aumento de pressão de expansão com a profundidade para uma mesma deformação (por exemplo, em 20% para as curvas médias (e)) o que configura um ganho de resistência e aumento de rigidez. Esta hipótese é comprovada posteriormente após a determinação de G em profundidade.

Uma leve tendência de escoamento (p_L) para deformações superiores a 30% foi notada em 4m (Figura 124) e 40% em 7m de profundidade (Figura 127(d)). Nos demais casos nota-se um ganho crescente de resistência com a deformação até valores superiores a 50% (Figura 127(d)), indicativo de solos reforçados com fibras ou arenosos. Cabe ressaltar que este ganho ocorre mais acentuadamente a partir de deformações próximas a 10%. Nestes casos se fossem traçadas as curvas com um limite das abscissas (ϵ_c) desta ordem poderia até levar a crer que o material estaria escoando. Isto de certa forma é verdade pois se entende que, em alguns casos, o material amolgado pelo processo de instalação é carregado em magnitudes de deformação desta ordem e daí então entra em cena o lixo intacto imprimindo o reforço com fibras, aumentando a inclinação do trecho final.

Pelas curvas produzidas percebe-se, também, que o resíduo no PMT3 ponto parece estar mais homogêneo em termos de rigidez do que nos pontos anteriores, pois apenas houve um caso onde um braço identificou uma zona com pequenas deformações iniciais para grandes pressões (Figura 125(b)). Além disto, não foram identificadas zonas de vazios ou de baixíssima rigidez.

De uma forma geral as curvas apresentaram um comportamento inicial similar às curvas clássicas de um PAP onde a sonda é instalada bastante justa no furo e a pressão de descolamento (*lift-off*) se aproxima da tensão horizontal (Figura 132d), ou, ainda, similar a PC.

Furo PMT4 – metodologia (iii)

Este furo foi realizado em uma célula diferente do que a anterior com lixo mais recente e, portanto, com um material menos resistente, o que pode ser notado ao comparar o nível de pressão de expansão exigido para mesmas profundidades.

As curvas obtidas (Figuras 128 a 131) parecem ter bom comportamento e similar ao notado anteriormente para um resíduo mais antigo no que diz respeito ao ganho de resistência com o nível de deformação, porém as inclinações são menores levando a crer que o efeito de reforço de fibras é menos acentuado no lixo novo. Por sua vez, estranhamente as pressões de expansão apresentam pequena variação com a profundidade, decaindo e aumentando (p.ex. $\varepsilon_c = 20\%$ para as curvas médias (e)) numa faixa bem próxima, possivelmente demonstrando que a rigidez naquele furo não tem um ganho em função das tensões confinantes sendo praticamente constante até a profundidade investigada.

Duas curvas identificaram zonas mais rígidas nas profundidades de 2m (Figura 128(b)), onde houve um escoamento acentuado após certo nível de pressão, e em 6m (Figura 130(c)), onde o material resistiu mais. Em contrapartida, deformações da cavidade mais elevadas ($>40\%$) ocorreram em diferentes profundidades para níveis de tensões baixos, o que ratifica a baixa resistência do resíduo ainda novo.

6.2.3.

Influência do Procedimento de Instalação nas Curvas $p \times \varepsilon_c$

Em ensaios convencionais com PC do tipo FDPM (p.ex. Akbar, 2001) as curvas típicas apresentam um comportamento similar ao que está descrito na Figura 133(a) para o caso de solos argilosos, onde normalmente existe um trecho inicial de inclinação bastante elevada, isto é, com grandes pressões e pequenas

deformações, seguido de outro com certa curvatura até a pressão máxima do equipamento ou até a pressão limite e posterior descarregamento final.

Para tentar compreender melhor o que acontece na fase inicial dos ensaios descritos acima, seja a Figura 133(b) que representa as fases de um ensaio típico. Nestes casos, durante a cravação a ponteira cônica do pressiômetro cria uma cavidade que é maior que o diâmetro da sonda. Em seguida, ao início do ensaio, a membrana deixa o corpo da sonda no ponto B, cuja pressão (já descontada a rigidez da membrana) é requerida para vencer a pressão causada pela existência de água ou lama no furo ao redor da sonda, que é denominado p_0 e cujo valor é inferior à pressão horizontal, pois houve um certo alívio de tensão no solo na profundidade central da sonda após a passagem do cone. Então, a membrana é expandida do ponto B até o ponto C, quando esta se encosta à parede do furo, ocorrendo em níveis de deformação pequenos correspondentes a diferença entre os diâmetros do cone e da sonda. Posteriormente, a pressão aplicada entre C e D é insuficiente para causar deformações significantes no solo e entre os pontos D e E os elementos de solo próximos a sonda são carregados elasticamente enquanto que no ponto E o solo adjacente à membrana começa a escoar e se comporta segundo um regime plástico. Durante esta fase, os elementos de solo localizados em diferentes distâncias radiais da sonda estão submetidos a diferentes estágios de carregamento. Aqueles perto da sonda estão na ruptura, enquanto que outros localizados a uma certa distância da sonda encontram-se na condição *in situ*. A pressão no início do regime elástico é denotada por p_h e o ponto E indica o instante do início do escoamento plástico que é dado pelo ponto de inflexão da reta virgem DE, correspondendo a uma pressão denominada p_y . Esta pressão é obtida pela interceptação das tangentes traçadas sobre a inclinação do regime elástico (DE) e sobre o ponto pós-escoamento (faixa de plastificação imediata). Akbar (2001) sugere como procedimento mais representativo da obtenção da pressão de escoamento tomar-se um tangente que cubra mais pontos da curva inicial de escoamento (ao invés de um único ponto como para p_y) e traçar a previsão desta tangente de maneira retrospectiva até o eixo de pressão, fornecendo o valor da pressão de escoamento que é denominada p_F .

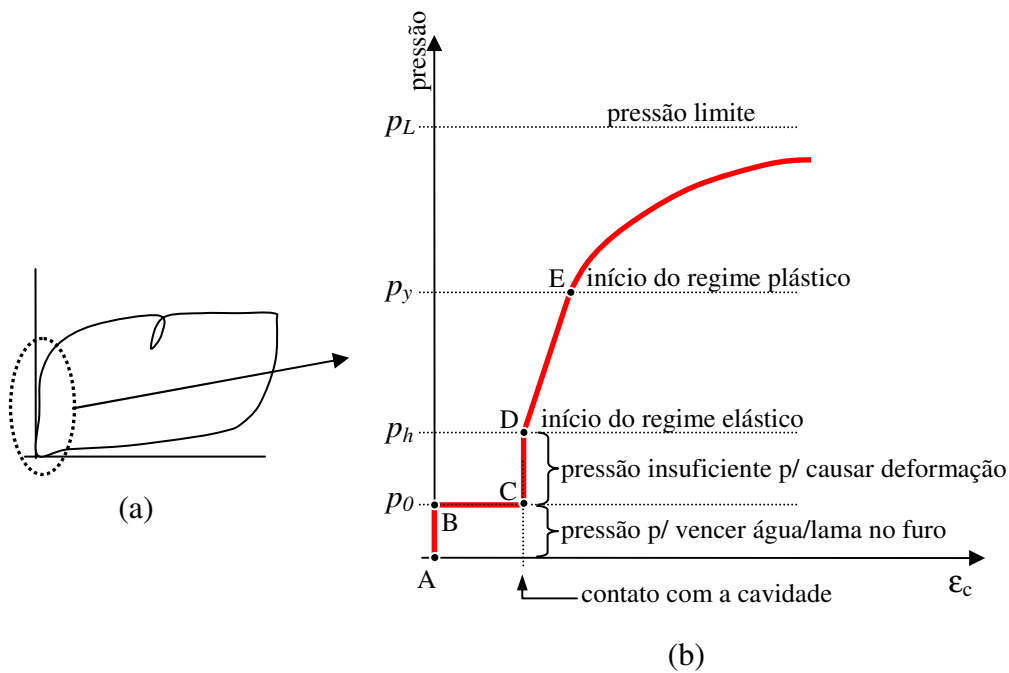


Figura 133 – Curva $p \times \varepsilon_c$ ideal de pressiômetros de cravação do tipo FDPM.

Como dito anteriormente, na campanha do aterro da Muribeca a cravação direta foi empregada somente no primeiro furo PMT, enquanto que nos demais casos utilizaram-se os furos da sondagem SPT para facilitar a instalação do pressiômetro e preservar as membranas. Em especial nestes últimos casos, após a execução do SPT, uma faixa cilíndrica de material, de raio desconhecido, havia sido amolgada pela passagem do amostrador ($d_0=2''$), sendo representada pela região I da Figura 134(a). Findo o SPT, havia um intervalo de tempo, muitas vezes considerável, até a efetiva execução do ensaio PMT. Durante este tempo as paredes do furo sofriam um alívio de tensões o que possivelmente causava expansão do material no sentido do interior do furo, diminuindo o seu diâmetro. Esta faixa de expansão está representada pela região II da Figura 134(b). A magnitude dessa expansão é difícil de precisar, contudo acredita-se que os furos não fecharam devido ao comportamento de reforço por fibras intrínseco ao resíduo. Além disto, a resistência a penetração do pressiômetro foi monitorada com o manômetro acoplado ao cravador durante a instalação e em nenhum momento o valor das pressões foi expressivo, sendo o maior valor observado cerca de 50kg/cm^2 .

Contudo, considerando que houve alívio, então o diâmetro do furo tornou-se ainda menor do que o inicial ($<2''$). Portanto, levando-se em conta que o diâmetro

da ponteira cônica é de 58mm e da sonda 54mm, logo maior do que d_0 (50,8mm), então a cravação do pressiômetro (Figura 134(c)) tende a carregar o material das regiões I e II da parede do furo, ou seja, antes do início do ensaio a região em contato com a membrana representa um resíduo que possui uma história de carregamento (SPT), descarregamento (alívio) e recarregamento (cravação), em resumo, um material altamente amolgado e possivelmente de pouca resistência.

O comportamento descrito acima pode explicar o fato de algumas curvas obtidas apresentarem o seu trecho inicial (Figura 133) com inclinação inferior ao que é observado em pressiômetro de cravação do tipo FDPM, fazendo com que haja uma pequena deformação logo ao início do ensaio. As consequências diretas deste fato, no que se refere aos procedimentos de interpretação, são duas: primeiro que o trecho linear do regime elástico (DE – Figura 133) torna-se difícil de identificar visto que o material já está perturbado, ou seja, a identificação visual da pressão p_h pode ser bastante subjetiva; segundo que o ponto de inflexão do início do regime plástico (*onset of yielding*) também pode ficar obscurecido e, portanto, a indicação de p_y pode ser igualmente bastante subjetiva. Além disto, como as curvas obtidas sugerem um material com um comportamento de endurecimento (reforço de fibras), empregar uma tangente com inclinação correta que cubra mais pontos na curva de escoamento para obtenção de p_f pode, da mesma forma, ser dificultada. A consequência final do comportamento observado está na determinação subjetiva de parâmetros que são obtidos com base no trecho inicial da curva, como por exemplo, a tensão horizontal.

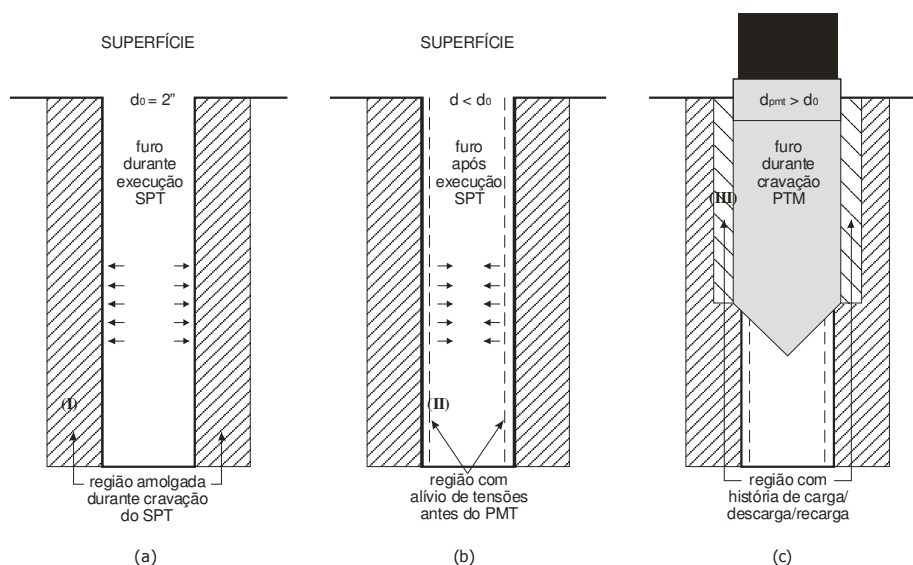


Figura 134 – Evolução do estado de tensão na parede do pré-furo do PMT.

6.2.4. Determinação do Módulo Cisalhante - G

6.2.4.1. Metodologia de Análise

O estudo da variação da rigidez nas células investigadas foi feito pela determinação do módulo cisalhante (G) a partir das curvas pressiométricas. O módulo inicial não foi determinado, pois se considerou que este não representou a condição inicial do material, seja pela formação do furo (SPT) ou pela cravação direta da sonda. Portanto, foram determinados módulos de descarregamento – recarregamento (G_{ur}) e módulos secantes de recarregamento (G_r) para diferentes níveis de deformação. Além disto, a determinação de G_{ur} foi feita individualmente para cada curva pressiométrica por Het e para a curva pressiométrica traçada a partir de deformação média da cavidade na profundidade estudada, denominado de G_{urm} . Nestes casos, os módulos G_{ur} foram obtidos por meio do ajuste de todos os pontos do ciclo conforme o exemplo ilustrativo da Figura 135, enquanto que os módulos secantes $G_{r\%}$ foram determinados tomando-se como origem o menor valor de deformação do ciclo e como pontos secundários, acréscimos de deformação até o valor máximo do ciclo (Figura 135). Em ambos os casos, o módulo foi calculado segundo a Equação 17 desconsiderando-se a relação r/r_0 . A faixa média de $\Delta\epsilon_c$ dos ciclos de descarregamento foi da ordem de 2,68%, com máximo de 6%, enquanto que a Δp no descarregamento foi de 47,50kPa, com o máximo de 85kPa.

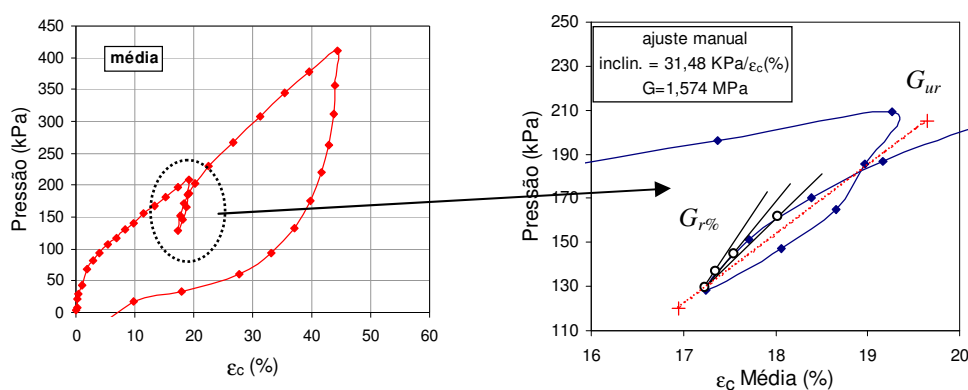


Figura 135 – Exemplo do procedimento para obtenção de G_{ur} e G_r .

6.2.4.2.

Variação de G em Profundidade

Para avaliar a variação do módulo cisalhante com a profundidade das células investigadas foram determinados nas curvas $p \times \varepsilon_c$ das Figuras 117 a 131 os seguintes módulos: (i) G_{ur} individualmente para cada Het (gráficos (a), (b), (c) e (d) das referidas figuras); (ii) G_{ur} pela curva média (gráfico (d) das respectivas figuras); (iii) G_{ur} pela média aritmética do item (i); e os módulos secantes $G_{r0.1\%}$, e $G_{r1\%}$ das curvas médias. Os resultados encontrados estão apresentados na Figura 136, onde os gráficos (a), (b) e (c) são da célula C4 e o gráfico (d) da célula C5.

Nota-se, inicialmente, que os resultados da metodologia (ii) (linha vermelha) diferem da metodologia (iii) (linha azul), fornecendo valores menores e, portanto, mais conservadores. Além disto, apesar da dispersão pontual de resultados para uma mesma profundidade, especialmente no PMT1, pode-se observar uma tendência de aumento de rigidez a partir dos 4m de profundidade na célula C4 (lixo mais antigo). O mesmo não ocorre na célula C5 com lixo novo.

No furo PMT1 (Figura 136(a)) há uma grande dispersão nos resultados dos módulos pontuais para uma mesma profundidade teste, especialmente em 4m e 6m, refletindo a heterogeneidade do resíduo naquele local como identificado anteriormente. Estes picos nos módulos podem ser endossados também pelos valores elevados de resistência à cravação do pressiómetro (Figura 92) nas mesmas profundidades. Além disto, os resultados do SPT1 (Figura 109(a)) mostram um aumento de resistência à penetração até 4m, quando o seu valor é reduzido e torna-se errático.

A observação dos perfis erráticos da resistência de ponta durante a cravação do PC-RSU e da resistência à penetração do SPT, associados à identificação de materiais constituintes de maior rigidez durante a fixação dos trados de reação, leva à crer que o aparelho foi eficiente na identificação de zonas pontuais bastante rígidas, pois os valores máximos e mínimos do módulo foram respectivamente de $Het4 = 4,11\text{MPa}$ e $Het2 = 1,18\text{MPa}$ em 4m ; $Het2 = 5,97\text{MPa}$ e $Het4 = 0,57$ em 6m de profundidade, demonstrando a heterogeneidade e anisotropia do meio.

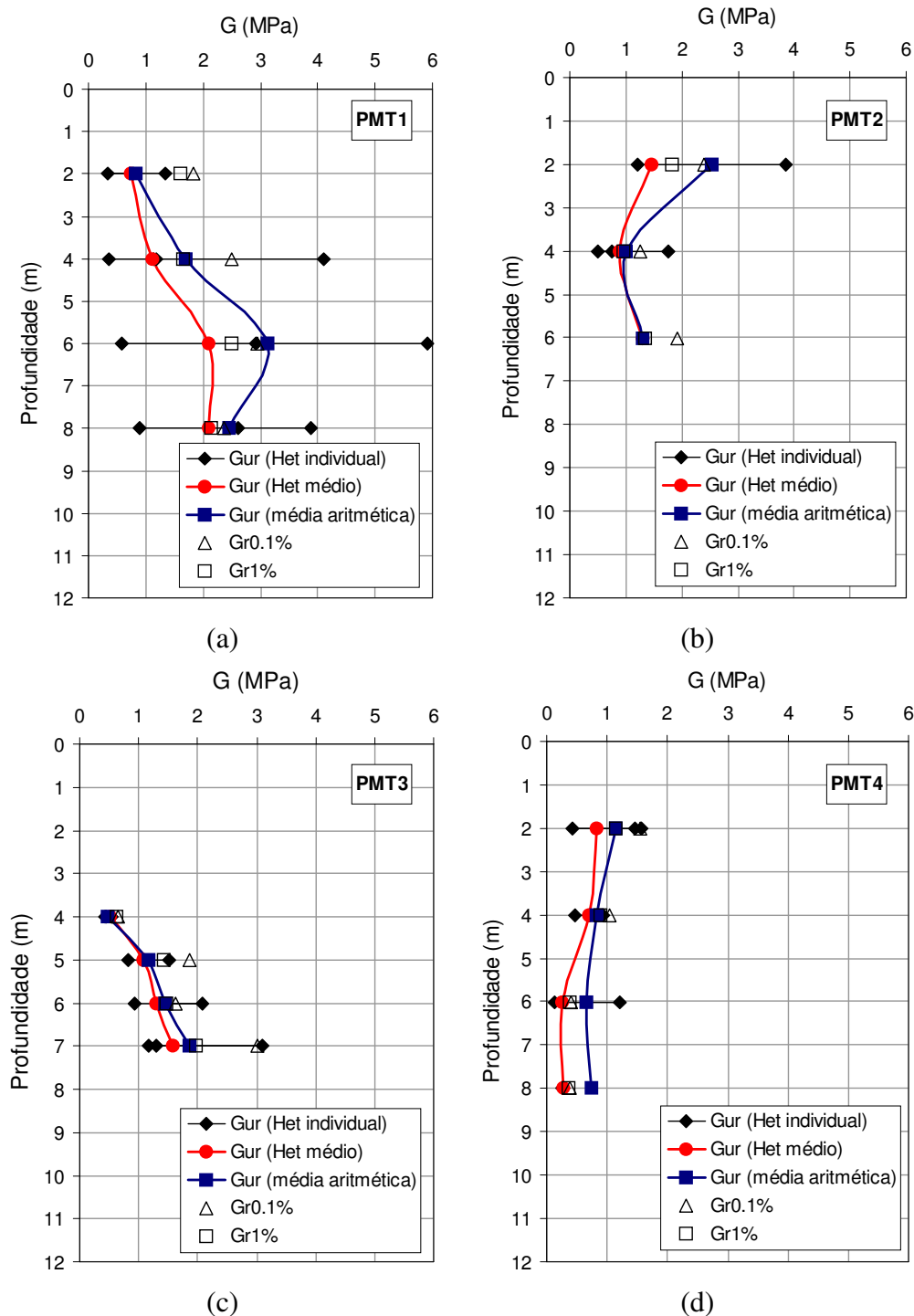


Figura 136 – Variação do módulo cisalhante com profundidade nas células investigadas.

O furo PMT2 (Figura 136(b)) apresentou menor dispersão nos módulos calculados individualmente por Het, porém possuiu menos pontos do que o anterior. Entretanto, a rigidez parece ser maior na profundidade inicial de ensaio (2m) possivelmente pelo efeito de camadas de cobertura. Esta rigidez mais acentuada na camada superficial pode ser notada pela análise dos resultados do CPT2 (Figura 110), onde ocorre um pico elevado logo próximo aos 2m. Em

seguida, o valor de G decresce até a profundidade de 4m onde há pouquíssima dispersão e posteriormente segue um padrão de crescimento similar ao observado no furo PMT1. Por sua vez, o SPT2 (Figura 109(a)) também apresenta um aumento de N_{spt} a partir da profundidade de 4m, contudo os dados limitados de G em profundidade foram insuficientes para endossar um padrão de comparação mais concreto.

O furo PMT3 (Figura 136(c)) apresentou também pouca dispersão entre os resultados dos módulos pontuais e uma tendência clara de aumento de rigidez com a profundidade, similar aos anteriores. Por sua vez, o ensaio de cone naquele local também indica um maior aumento de resistência à cravação a partir de 4m de profundidade (Figura 110). No caso do SPT3 (Figura 109(a)), há apenas uma singela tendência de aumento de N_{spt} naquela profundidade, porém nada conclusiva. Notou-se também que devido a menor dispersão de resultados calculados houve certa tendência de G_{urm} em igualar-se a média aritmética dos módulos.

O resíduo do furo PMT4 (Figura 136(d)) apresentou baixo módulo cisalhante e pequena variação até a profundidade investigada possivelmente devido a idade e nível de degradação do lixo naquele local, conforme o percentual de sólidos voláteis encontrados até a profundidade de 8m. Por sua vez, o ensaio do cone (Figura 111) indicou um aumento de resistência de ponta antagônico ao decréscimo de G para o trecho investigado, enquanto que o SPT4 (Figura 109(b)), desprezando-se um pico logo abaixo dos 2m, mostra claramente valores praticamente constantes de N_{spt} .

Levando-se em conta que nos três furos testes executados na célula C5 houve uma tendência visual de acréscimo no valor do módulo cisalhante determinado com a profundidade, obteve-se uma equação de ajuste linear para esta variação que está discriminada na Figura 137, tomando-se como referência os valores de G_{urm} . O ajuste não foi muito bom (R^2) considerando o espalhamento dos resultados, porém fornece a possibilidade de estimar G em profundidade para um lixo com idade de cerca de 4 anos (idade estimada até 8m), segundo a Equação 41. Além disto, no gráfico da Figura 137 está traçada também a variação do módulo cisalhante de *Ménard* (G_M) com a profundidade segundo Cartier & Baldit (1983), oriunda de uma investigação com PPF em um aterro controlado de RSU na França com teor de matéria orgânica da ordem de 32%, cuja operação

envolvia lançamento de camadas com 0,50m de espessura, com compactação mecânica por meio de rolo pé de carneiro e cobertura com solo. O valor de G_M foi obtido a partir do módulo de elasticidade de Ménard (E_M) dos ensaios, segundo a Equação 42, considerando que a própria concepção de G_M envolve o emprego do coeficiente de *Poisson* (ν) com um valor de 0,33 (Baguelin *et al.*, 1978).

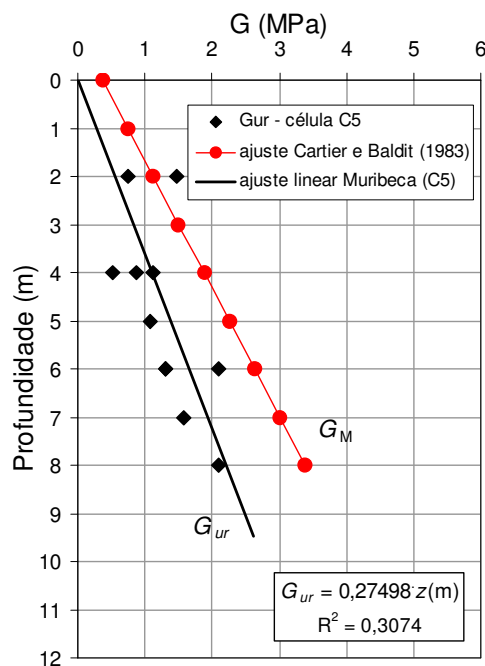


Figura 137 – Avaliação da variação de G com a profundidade na célula C5.

$$G_{ur} = 0,27496 \cdot z(m) \quad \dots(41)$$

$$E_M = 2(1 + \nu) \cdot G_M = 2,66 \cdot G_M \quad \dots(42)$$

A análise da Figura 137 mostra que há uma crescente diferença entre os dois ajustes, que pode ser explicada pelas características operacionais e pelos seus materiais constituintes, ambos distintos nos dois aterros. Sabe-se que no aterro da Muribeca não há compactação mecânica, a cobertura de solo é somente final e o percentual de matéria orgânica é de cerca de 60%, portanto, condições mais favoráveis para que o módulo cisalhante seja realmente inferior àqueles determinados no aterro da França. Além disto, a comparação emprega um valor de ν de 0,33 e sabe-se que este valor pode ser maior para RSU, o que diminuiria a

diferença entre as tendências. Conseqüentemente, a comparação direta ilustrada na Figura 137 é bastante subjetiva.

O efeito do nível de tensões em G pode ser estudado na Figura 138(a) que mostra os módulos calculados na célula C5 contra o valor de pressão média do ciclo de descarregamento e recarregamento. Nela pode-se notar uma certa tendência de aumento da rigidez com a tensão que é consistente com o que normalmente é observado em materiais granulares (condições drenadas) como areias. Este comportamento já tem sido ressaltado tanto em laboratório (e.g. Jessberger & Kockel, 1993; Carvalho 1999) quanto em campo (Dixon & Jones, 1998) e é coerente com o aumento de rigidez com a profundidade, pois com o acréscimo da tensão efetiva oriunda da sobrecarga tem-se o acréscimo do módulo cisalhante. A análise da Figura 138(a) endossa qualitativamente o comportamento de endurecimento ou reforço por fibras notado anteriormente nas curvas pressiométricas de alguns ensaios.

Em contrapartida, o resíduo da célula C4 não apresentou um claro acréscimo de rigidez até a profundidade de 8m, possivelmente associado ao fato de ainda não ter ocorrido decomposição nem recalques expressivos. Contudo, pode-se tentar visualizar na Figura 138(b) um padrão de acréscimo de G com o nível de tensão similar à célula C5, apesar do número reduzido de ensaios. Neste caso, a associação com o comportamento de materiais granulares não é tão evidente.

A rigidez média do resíduo da célula C5 até a profundidade de 8m (aproximadamente 4 anos) foi muito baixa, na ordem de 1,30MPa para o nível de tensões e deformações dos ciclos, ou seja, cerca de 10 vezes menor do que a média esperada para uma argila pré-adensada. Por sua vez, na célula C4, com lixo novo (< 1ano), a rigidez média foi ainda menor, na ordem de 0,51MPa.

Para fins de análise comparativa entre os resultados da variação de G com a profundidade, bem como, da sua variação com o nível de tensões, as curvas da Figuras 137 e 138 foram re-traçadas na Figura 139, comparando-as com alguns resultados apresentados por Cartier & Baldit (1993) e Dixon & Jones (1998). No gráfico (a) da Figura 139 estão traçados os módulos $G_{r1\%}$ da campanha da Muribeca nas células C4 e C5, os módulos cisalhantes de Ménard (G_M) calculados segundo a equação 42 a partir dos dados obtidos por Cartier & Baldit (1993) com um PPF, além dos módulos $G_{1\%}$ descritos por Dixon & Jones (1998) obtidos com um PAP. Nesse último caso, o módulo é um pouco diferente do $G_{r1\%}$ e foi obtido,

para cada ensaio a partir do traçado de G_{ur} , proveniente de diferentes ciclos da curva pressiométrica, contra o nível de deformação dos mesmos. Com isto, uma relação linear foi obtida e o valor de $G_{1\%}$ inferido. Por sua vez, o gráfico (b) da Figura 139 traz, além dos dados da Muribeca, G_{ur} obtidos por Dixon & Jones (1998) com o pressiômetro autoperfurante de Cambridge (*Camkometer*) em RSU, e uma compilação dos limites sugeridos pelos mesmos autores de valores de G oriundos de ensaios triaxiais e de compressão simples.

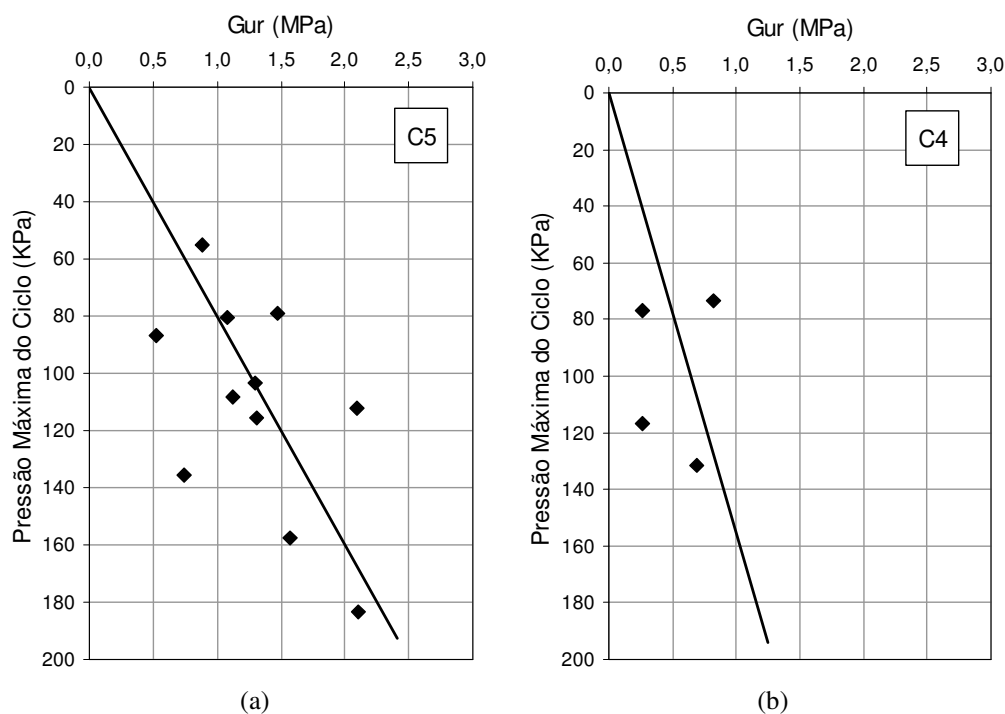


Figura 138 – Aumento da rigidez cisalhante do resíduo com o nível de tensões.

A análise da Figura 139(a) mostra que o módulo cisalhante do resíduo no aterro da Muribeca apresenta um aumento menor, porém mais constante, com a profundidade em relação aos dois outros aterros. No aterro da França há uma tendência de aumento de rigidez com posterior decréscimo em várias profundidades, possivelmente devido ao efeito da compactação mecânica e das camadas de solo. Acredita-se que os picos de resistência representem estas camadas. Este comportamento também é observado no aterro estudado por Dixon e Jones (1998), porém em outra escala. Acredita-se que os módulos determinados no aterro da Muribeca aproximam-se dos valores inferiores da variação de rigidez dos outros aterros, possivelmente representando materiais de mesma característica, isto é, sem compactação.

A Figura 139(b) mostra que o resíduo investigado na Muribeca situa-se próximo do limite inferior apresentado por Dixon e Jones (1998) a partir de ensaios de laboratório. Porém o espalhamento de resultados é bem menor para diversos níveis de pressão média.

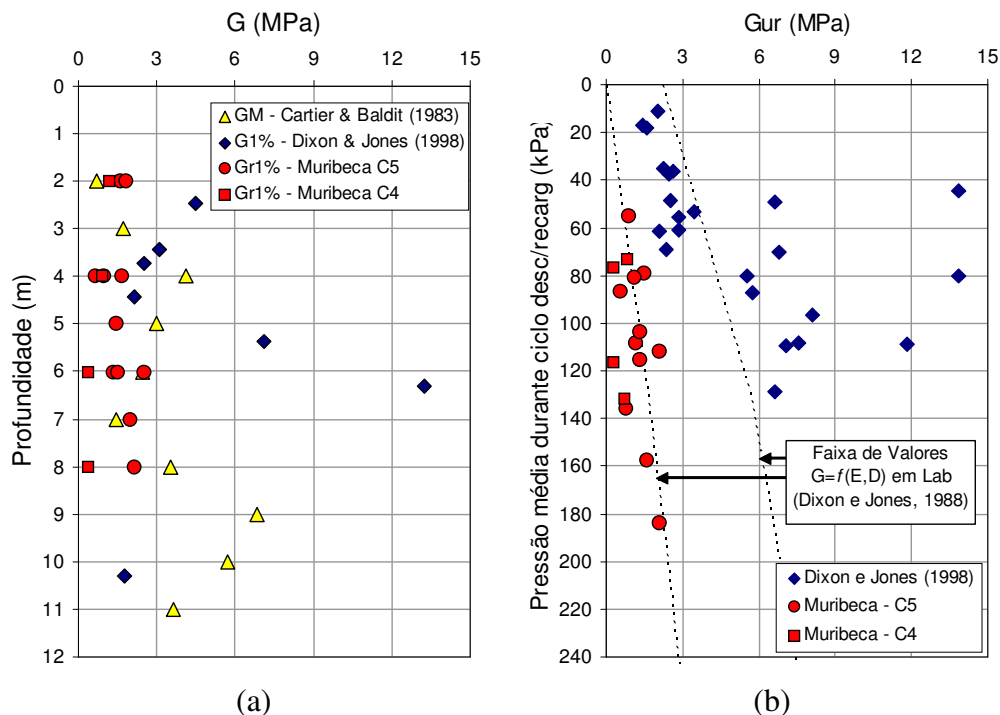


Figura 139 – Análise comparativa da variação G com profundidade e nível de tensões.

6.2.4.3.

Perfil de variação de G com deformação

O estudo a seguir visa a avaliar se os valores G para RSU, similar aos solos, são dependentes do nível de deformação. Para tanto, os gráficos (a) e (c) da Figura 140 apresentam o estudo da variação de G_r , normalizado para o valor de G_{ur} , em relação ao intervalo de deformação da cavidade no ciclo de descarregamento e recarregamento ($\Delta\epsilon_c$) em escala logarítmica, para as células C5 e C4. Cada curva representa um ensaio para uma determinada profundidade. Pode-se observar que há a tendência natural de G_r em igualar-se ao valor de G_{ur} para valores próximos da amplitude máxima de deformação do ciclo. Além disto, em ambas as células, para uma mesma profundidade, a relação G_r/G_{ur} varia pouco para intervalos de deformação pequenos ($<0.1\%$), todavia, a comparação entre os resultados em diferentes profundidades mostra que mesmo para $\Delta\epsilon_c < 0.1\%$ a diferença relativa

pode ser grande. Por outro lado, a relação G_r/G_{ur} somente apresenta pouca variação para diferentes profundidades de ensaio quando $\Delta\epsilon_c$ é maior que 1%.

Por sua vez, os gráficos (b) e (d) da Figura 140 apresentam a variação do módulo cisalhante secante, normalizado em função do módulo para 0,1%, contra $\Delta\epsilon_c$ do ciclo, para as duas células investigadas. Em todos os casos, curvas hiperbólicas foram empregadas para melhor ajustar os comportamentos observados, estando as mesmas reescritas nas Equações 43 a 46 a seguir.

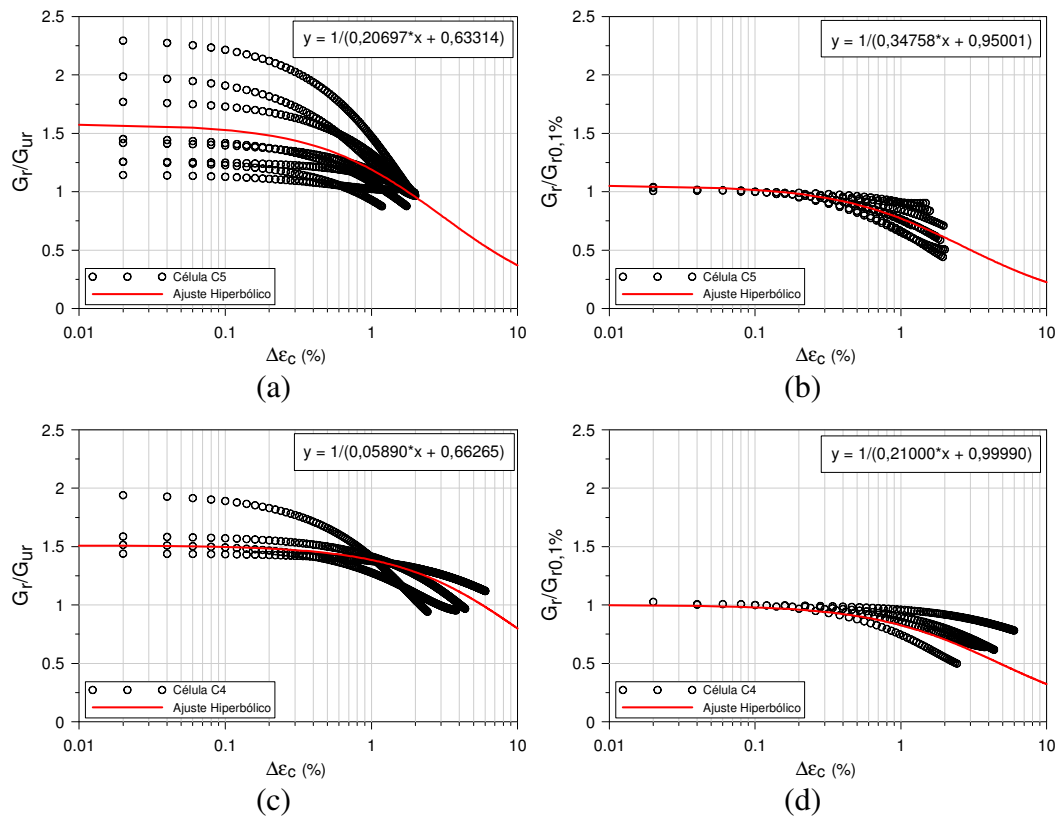


Figura 140 – Avaliação da variação do módulo cisalhante do resíduo com o nível de deformação do ciclo: C5 (a) e (b); C4 (c) e (d).

$$\frac{G_r}{G_{ur}} = \frac{1}{0,20697 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,63314} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(43)$$

$$\frac{G_r}{G_{r0,1\%}} = \frac{1}{0,34758 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,95001} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(44)$$

$$\frac{G_r}{G_{ur}} = \frac{1}{0,05890 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,66256} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(45)$$

$$\frac{G_r}{G_{r0,1\%}} = \frac{1}{0,21000 \cdot \Delta\epsilon_c + 0,99990} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(46)$$

De acordo com as Equações 43 e 45, a relação G_r/G_{ur} assume um valor unitário quando $\Delta\epsilon_c$ é igual a 1,77% e 5,73%, nas células C5 e C4, respectivamente. Estes valores quando substituídos nas Equações 44 e 46 e considerando que $G_{r1,77\%} = G_{ur}$ na C5 e $G_{r5,73\%} = G_{ur}$ na C4, fornecem os seguintes resultados:

$$G_{ur} = 0,639G_{r0,1\%} \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(47)$$

$$G_{ur} = 0,454G_{r0,1\%} \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(48)$$

O valor de $G_{r0,1\%}$ é normalmente empregado como referência nas análises de variação de G com deformação em ensaios pressiométricos quando não se dispõe do módulo dinâmico (G_0 ou G_{max}). Segundo Pinto & Abramento (1998), os módulos pressiométricos, obtidos com PAP para 0,1% de deformação, correspondem à cerca de 40% do módulo dinâmico determinado em ensaios de propagação de onda (e.g. cross-hole e piezocone sísmico) em um solo residual. Igualmente, Sampaio Junior *et al.* (2002), por meio do emprego de metodologia alternativa de instalação do PAP no mesmo local, indicaram diferenças entre G_0 e $G_{r0,1\%}$ da ordem de 20% a 25% em um caso, e 30% a 40% em outro caso. Porém, como não existe informação na literatura a respeito de correlações do gênero em se tratando de RSU, tomar-se-á como base uma faixa intermediária de variação desta diferença para as análises subseqüentes, isto é, um valor de 30%. Assim, pode-se tentar relacionar G_{ur} com G_0 , alterando as Equações 47 e 48 para:

$$G_{ur} = 0,192 \cdot G_0 \quad (\text{célula C5}) \quad \dots(49)$$

$$G_{ur} = 0,136 \cdot G_0 \quad (\text{célula C4}) \quad \dots(50)$$

Com isto tem-se que o módulo G_{ur} é cerca de 19% do módulo máximo na célula C5 e 13% na célula C4. A relação G_{ur}/G_0 , como foi determinada, representa um valor médio de uma camada de certa idade. A profundidade máxima teste nas células foi de 8m e considerando as premissas apresentadas na Figura 141, esta profundidade representa idades estimadas de 4,4 anos e 0,8 ano para as células C5 e C4, respectivamente.

Há de se aferir, ainda, a proporção sugerida entre os dois módulos através de ensaios de campo do tipo *cross-hole*, porém não há dados sobre ensaios deste tipo realizados no aterro da Muribeca. Sabe-se que a determinação das velocidades de propagação de onda em RSU é muito influenciada pelas características do resíduo como idade e densidade, portanto a comparação com dados da literatura deve ser criteriosa.

6.2.4.4.

Influencia da Idade do Resíduo em G

Segundo informações da administração do aterro, a idade do resíduo nos pontos onde foram executados os ensaios pressiométricos segue o padrão discriminado na Figura 141. Pode-se, portanto, tentar estimar as taxas de enchimento das células considerando uma progressão de avanço linear. Os valores estimados encontram-se na Figura 141. Assim, é possível estimar a idade em profundidade do resíduo segundo a Equação 51.

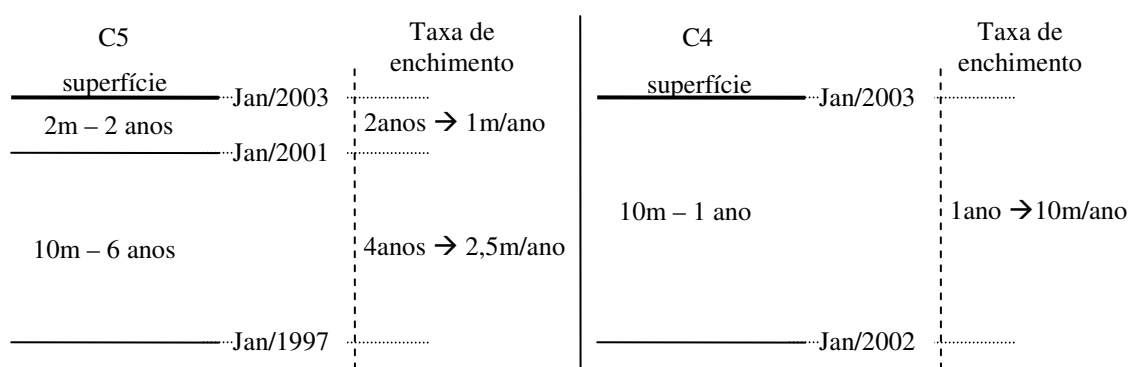


Figura 141 – Estimativa da taxa de enchimento das células investigadas.

$$I_{RSU}(z) = (e_{cs}/te_{cs}) + (z - e_{cs})/te_c \quad \dots(51)$$

em que,

$I_{RSU}(z)$ – idade do resíduo/m (ano); e – espessura da camada (m);
 cs – camada superior; te – taxa de enchimento (m/ano);
 c – camada em estudo; z – profundidade de estudo (m)

Por meio da Equação 40 e dos valores de G_{ur} de ambas as células estudadas, obtiveram-se os pontos do gráfico da Figura 142 onde também foi traçado um ajuste linear para o comportamento.

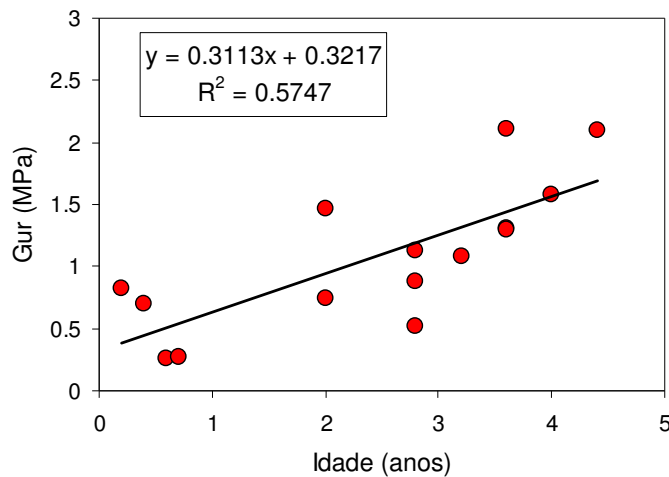


Figura 142 – Efeito da idade do resíduo no módulo cisalhante do ciclo nas células C4 e C5 através de ajuste linear.

A Equação 52 reescreve o ajuste proposto na Figura 142, sendo I_r a idade do resíduo em anos o que possibilita projetar a evolução de G_{ur} com a idade e avaliar as Equações 49 e 50.

$$G_{ur} = 0,3113 \cdot I_{RSU} + 0,3217 \quad \dots(52)$$

Sejam, por exemplo, os módulos máximos (G_0) apresentados por Carvalho (1999), obtidos em ensaios *cross-hole* no aterro de RSU Bandeirantes (SP) em uma célula cuja idade do resíduo era de 15anos. Tomando-se a curva de variação de G_0 , com peso específico de 8kN/m^3 e profundidade máxima de 10m, pode-se determinar o valor médio de G_0 da ordem de 9,86MPa.. Este valor representa o módulo médio de uma célula com 10m e 15anos de idade, ou seja, $G_{0(15\text{anos})}$.

Por outro lado, determinando-se o valor de $G_{ur(15anos)}$ pela Equação 52 para um resíduo com 15 anos de idade, obtém-se cerca de 4,99MPa. Conseqüentemente, pode-se obter a relação G_{ur}/G_0 para 15 anos, que está representada pela Equação 53.

$$G_{ur} = 0,5060 \cdot G_0 \quad \dots(53)$$

Ora, pode-se, então, obter uma correlação mais precisa entre G_{ur}/G_0 e a idade do resíduo empregando os coeficientes das Equações 49, 50 e 53, sendo representada pelo ajuste exponencial da Figura 143 e reescrita na Equação 54.

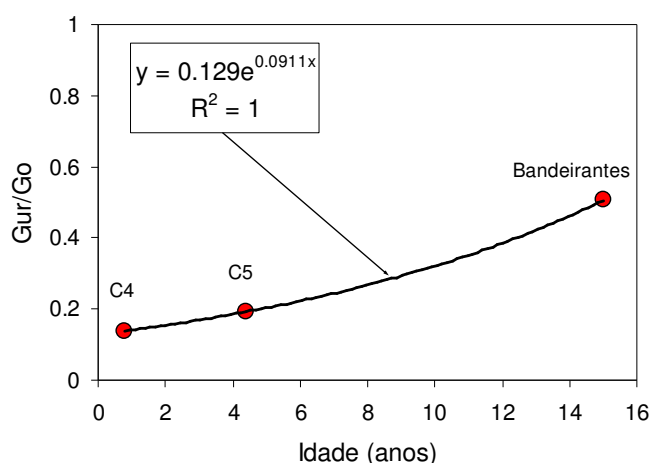


Figura 143 – Variação de G_{ur}/G_0 em função da idade do RSU.

$$G_{ur}/G_0 = 0,129 \cdot e^{0,0911 \cdot I_{RSU}(anos)} \quad \dots(54)$$

A comparação direta da variação de módulos de cisalhamento em profundidade obtidos em campanhas de campo em diferentes aterros de RSU (p.ex. Muribeca x Bandeirantes) não é correta, pois para uma mesma profundidade têm-se diferentes idades de resíduo. Para uniformizar os valores G determinados nos dois aterros, considerou-se uma taxa de enchimento de 1m/ano para o aterro Bandeirantes. Então, com a variação de idade em profundidade e G_0 , do ensaio de cross-hole (Carvalho, 1999), pode-se obter uma estimativa G_{ur} para o aterro Bandeirantes, por meio da equação 54. Finalmente, a Figura 144 apresenta os resultados comparativos entre os módulos obtidos nos dois aterros,

devidamente uniformizados considerando a idade do resíduo, bem como, a projeção do ajuste proposto com a Equação 41.

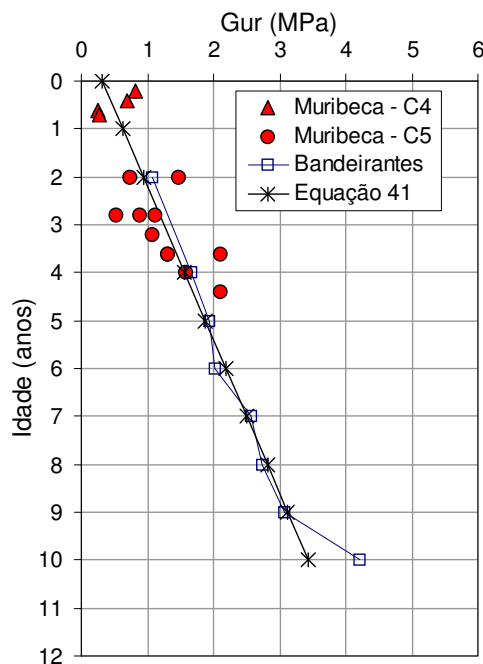


Figura 144 – Comparação entre valores de G_{ur} obtidos com pressiômetro no aterro da Muribeca e adaptado de ensaios de cross-hole no aterro Bandeirantes.

Nota-se que os resultados parecem estar coerentes entre si mostrando uma relação de aumento com a idade, inclusive se ajustando bem com a Equação 41. Melhor comparação se daria caso tivessem sido realizados ensaios pressiométricos em resíduo com idades mais elevadas. Além disto, cabe ressaltar novamente, que há a necessidade de realização de ensaios geofísicos para determinar o módulo dinâmico nas células investigas do aterro da Muribeca. Entretanto, as correlações propostas parecem estar coerentes e o valor intermediário de 30% usado para deduzir as correlações das Equações 38 e 39 parece, também, ter produzido resultados aceitáveis.

6.2.5.

Tensão Horizontal (σ_h) e Coeficiente de Empuxo Lateral (K_r)

6.2.5.1.

Metodologia de Análise

Segundo Clarke (1995) a estimativa da tensão horizontal por ensaios pressiométricos em solos é, na melhor das hipóteses, subjetiva pois depende da escolha de um único ponto da curva pressiométrica como referência. Esta, por sua vez, é extremamente suscetível a distúrbios causados pela técnica de instalação da sonda o que faz com que as diversas técnicas empregadas na identificação deste ponto possam se tornar inválidas. Clarke (1997) indica que o PAP é o único tipo de ensaio pressiométrico que pode fornecer diretamente σ_h , enquanto que os PPF e PC devem fazer uso de alguma ferramenta matemática computacional para análise, fornecendo resultados geralmente pouco conclusivos e por isso mesmo este parâmetro não é muitas vezes solicitado em ensaios com estes dois últimos tipos de pressômetro.

Já foi discutido anteriormente que o tipo de metodologia de instalação da sonda utilizada nas investigações aqui apresentadas produziu uma região altamente amolgada de resíduo (Figura 134), portanto acredita-se que o efeito na identificação do ponto de referência seja ainda maior neste caso, levando a valores de σ_h pouco confiáveis. Todavia, para fins de avaliação do equipamento desenvolvido será empregada a metodologia proposta por Marsland & Randolph (1977) que foi desenvolvida com base no trecho inicial de carregamento de ensaios com PPF em argilas rijas e tomando como base a resistência ao cisalhamento de pico e pressão de escoamento. Segundo Clarke (1995), este método também pode ser empregado com PAP e, considerando que nos ensaios realizados no aterro da Muribeca obtiveram-se curvas similares a PAP, tentar-se-á adaptar esta metodologia para interpretação dos mesmos.

A proposta é um método interativo que se apóia na premissa amplamente apresentada na literatura técnica de que o ponto de início do escoamento (p_y – *onset of yielding*) em argilas rijas é igual à soma de σ_h e S_u , sendo identificado por uma acentuada mudança na inclinação da curva. Segundo Marsland & Randolph (1977) a resistência ao cisalhamento de pico pode ser obtidas conforme a Equação 55 calculada para a inclinação máxima da curva pressiométrica retraçada em

escala $p \times \ln(\Delta V/V)$. Contudo, dado o acréscimo de resistência devido ao efeito de reforço por fibras observados nas curvas pressiométricas, a determinação da resistência segundo a maior inclinação da curva provê valores superestimados. Por outro lado, Hawkins *et al.* (1990) recomendam que as curvas pressiométricas e as de resistência ao cisalhamento sejam mutuamente consistentes antes do início do escoamento. Na prática isto é alcançado quando se emprega simplesmente o ponto de escoamento como referência na determinação da correspondente resistência ao cisalhamento na curva $p \times \ln(\Delta V/V)$, igualando-se a diferença $p_y - \sigma_h$ neste ponto.

$$\tau = \frac{dp}{d[\ln \Delta V/V]} \quad \dots(55)$$

O procedimento iterativo segue os seguintes passos:

- i. Estima-se um valor inicial de σ_h , por exemplo a partir de um valor de K_0 conhecido;
- ii. Com este valor, determina-se a respectiva deformação de cavidade de referência (ε_{c0}) na curva teste;
- iii. As novas deformações corrigidas (ε_{corr}) são calculadas para o novo diâmetro da cavidade segundo a Equação 56, onde ε_{c0} é a deformação de cavidade de referência no valor selecionado de σ_h e ε_{c0} é a deformação de cavidade medida no ensaio;

$$\varepsilon_{corr} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{c0}}{1 + \varepsilon_{c0}} \quad \dots(56)$$

- iv. A resistência ao cisalhamento correspondente a p_y é obtida da inclinação da curva $p \times \ln(\Delta V/V)$, onde a correlação entre ε_c e $\Delta V/V$ é dada pela Equação 57 (Clarke, 1995);

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon_c)^2} \quad \dots(57)$$

- v. Um novo valor de σ_h é obtido segundo a Equação 58;

$$\sigma_{h2} = p_y - \frac{dp}{d[\ln(\Delta V/V)]} \quad \dots(58)$$

- vi. Se este valor coincidir com a estimativa inicial, então a tensão horizontal foi escolhida corretamente;
- vii. Caso contrário repetem-se as etapas a partir do item (ii) até haver convergência para a equação 58.

A metodologia para o caso de materiais e puramente friccionais (análises drenadas) é similar porém empregada a correlação $p_y = \sigma_h(1+\text{sen}(\phi))$ deduzida com base na teoria da plasticidade. Neste caso estima-se o ângulo de atrito de pico conforme proposta de Hughes *et al.* (1977), referente à inclinação máxima da curva $\ln p' \times \ln(\varepsilon_c)$. Similar ao anterior, dadas as características peculiares das curvas observadas o ângulo pode ser superestimado ou de impossível obtenção.

As limitações desta metodologia associada aos ensaios realizados estão relacionadas às considerações feitas no item 6.2.3 anteriormente, especialmente no que se refere à identificação do ponto p_y . Na prática, elas podem implicar em valores subestimados deste ponto e, portanto, de valores igualmente inferiores de resistência ao cisalhamento e de tensão horizontal.

Além disto, resíduo não é solo. Portanto, qualquer metodologia de interpretação de ensaios de campo originalmente concebida para solos deve ser empregada com restrição em análises com RSU e extrema cautela em aplicações práticas.

Nesta pesquisa estas metodologias serão empregadas a seguir meramente como exercícios teóricos, cabendo ainda mais estudos a respeito do assunto.

6.2.5.2.

Variação de σ_h em Profundidade

A variação de σ_h com a profundidade, determinada para cada ponto estudado, está apresentada na Figura 145 onde é possível perceber que, com exceção de dois pontos do furo PMT1 nas profundidades de 6m e 8m onde se suspeitava haver ocorrido danos na membrana durante o ensaio, os valores de σ_h tendem a aumentar em profundidade segundo o ajuste linear sugerido no mesmo gráfico, o que demonstra que a estimativa da magnitude de σ_h pode ser relevante no projeto de estruturas construídas dentro do aterro e submetidas a esforços laterais como drenos verticais ou muros de contenção.

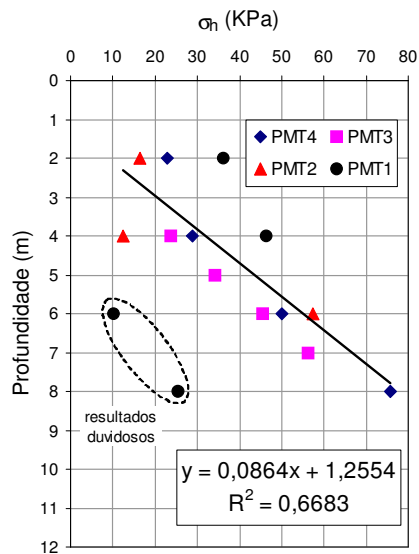


Figura 145 – Tensão horizontal obtida nos ensaios pressiométricos.

6.2.5.3. Coeficiente de Empuxo Lateral

A tensão vertical no interior das células é, dentre outros fatores, função do peso específico (γ_r) das camadas sobrejacentes que, por sua vez, pode variar com a idade do resíduo. Para considerar este efeito propôs-se a estimativa de γ_r segundo a equação apresentada por Azevedo *et al.* (2003), que está transcrita na Equação 54, e que fornece a variação do peso específico de um resíduo em função do tempo (decomposição). Então, com esta equação, com a estimativa da idade do resíduo em profundidade obtida segundo os pressupostos apresentados na Figura 141 e com a espessura da camada acima do ponto investigado foi possível calcular a respectiva tensão vertical e conseqüentemente calcular o coeficiente de empuxo lateral do resíduo. Foi considerada, também, uma camada de cobertura com 0.5m com peso específico de 20kN/m³. Cabe ressaltar que a Equação 59 produz resultados de γ_r para resíduos antigos bastante elevados e, portanto, pode superestimar σ_v .

$$\gamma_r (kN / m^3) = 0,069 \cdot t(meses) + 8,17 \quad \dots(59)$$

O gráfico (a) da Figura 146 ilustra a comparação dos valores das tensões verticais e tensões horizontais obtidas com as duas metodologias. Com isto é

possível inferir que em quase todas as profundidades investigadas o resíduo estava submetido a um estado de tensões cujos valores de tensão vertical eram maiores do que os de tensão horizontal, similar ao que ocorre com solos normalmente adensados. Pode-se apenas especular que a origem destes valores para o resíduo esteja associada à falta de compactação mecânica durante a disposição nas células ou ainda devido ao processo de perda de massa durante a decomposição.

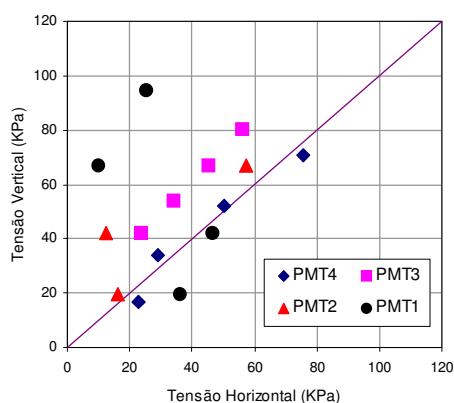


Figura 146 – Tensões verticais e horizontais nas células investigadas.

Com a estimativa de σ_v e σ_h pôde-se determinar o coeficiente de empuxo lateral do resíduo (K_R) que certamente não representa mais a condição inicial devido às trajetórias de tensões impostas durante a instalação da sonda. Os resultados estão ilustrados na Figura 147 juntamente com os dados apresentados por Dixon & Jones (1998) obtidos com um PAP (*Camkometer*) em RSU. Nesta figura percebe-se que, similar aos resultados de Dixon & Jones (1998), ocorre dispersão nos valores de K_R o que dificulta o estabelecimento de um padrão de comportamento generalizado. Entretanto, analisando-se os dados individualmente por furo é factível observar uma leve tendência de acréscimo de K_R em profundidade a partir dos 4m nos ensaios PMT4, PMT3 e PMT2.

Acredita-se que o aumento de K_R em profundidade, mesmo que em pequena magnitude, esteja correlacionado com perda de massa nas células provocado pelo envelhecimento do resíduo. O efeito da variação de idade do resíduo das células em profundidade está representada nos gráficos da Figura 148, onde estão mostradas as variações de K_r e σ_h com a idade (em profundidade) das células investigadas. Este comportamento pode ser associado à diminuição do percentual

de alguns materiais fibrosos compostáveis como fibras de coco, tecidos, piaçava, madeira, dentre outros. A influência da diminuição dos materiais fibrosos degradáveis no aumento dos valores de K_r já tem sido reportado por Landva *et al.* (2000) por meio de estudo laboratorial em resíduo preparado submetido à compressão unidimensional, com medida de tensão lateral. A faixa de K_r proposta por Landva *et al.* (2000) para um resíduo com percentual baixo de fibras degradáveis (8% - 14%) foi de 0,47 a 0,49. Os valores máximos e mínimos obtidos nesta pesquisa foram de 0,14 e 1,46 respectivamente, enquanto que os apresentados por Dixon & Jones (1998) foram de 0,13 e 0,91. A variação média de K_r em profundidade nesta pesquisa (Figura 147) foi da ordem de 0,60

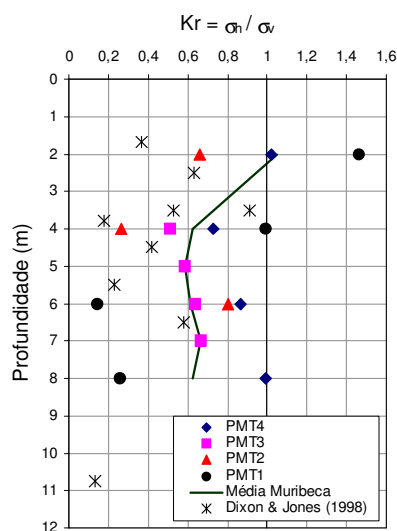


Figura 147 – Variação do coeficiente de empuxo do resíduo (K_r) com a profundidade.

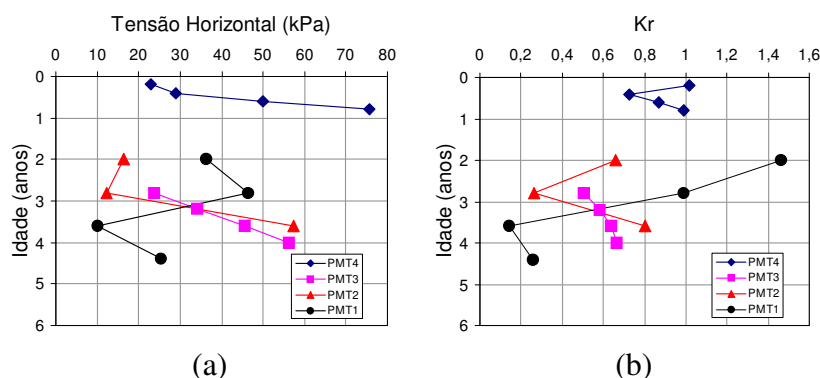


Figura 148 – Efeito da idade do resíduo na variação de K_r calculado.

6.3. Ensaio SPT

As sondagens SPT na célula C5 (Figura 109(a)) mostram que os resultados obtidos apresentam certo comportamento similar entre si quando se excluem alguns picos de elevada resistência à penetração ($N > 17$) oriundos da ocorrência de elementos com rigidez mais elevada (pedras, madeiras, pneus, etc.). Na C5 a quantidade de golpes esteve em uma faixa de 4 a 18, porém não foi possível produzir um padrão geral de aumento da resistência à penetração com a profundidade. Por sua vez, na célula C4 (Figura 109(b)) os resultados de N foram bem mais consistentes e quase constantes com a profundidade salvo os casos de pico excludentes.

A faixa observada de valores de N está de acordo com o que é geralmente reportada na literatura (e.g. Sowers, 1968, Singh & Murphy, 1990; Sanchez-Alciturri, 1993, Carvalho 1999) e especialmente coerente com o que já foi determinado em outras campanhas do gênero no aterro da Muribeca (e.g. Jucá *et al.*, 1999; Jucá, 2003; Monteiro, 2003).

Os valores médios de resistência à penetração (N_{med}) em cada furo de sondagem, desconsiderando picos de resistência elevada, foram determinados e estão descritos na Figura 149. Na célula C5 (< 6 anos) N_{med} esteve na faixa entre 7 e 10, enquanto que na célula C4 (< 1 ano) o valor médio foi de 6.

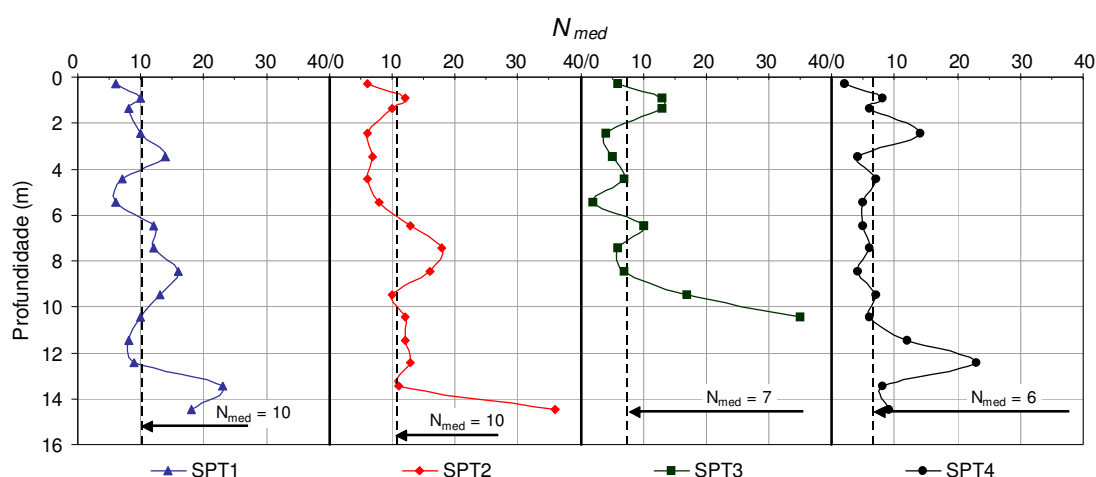


Figura 149 – Valores médios de N_{spt} nas células investigadas.

Sabe-se que a determinação de parâmetros de resistência de RSU a partir de resultados de SPT não é o procedimento usual dada a grande incerteza associada ao número de golpes (Manassero *et al.*, 1996), não existindo ainda propostas de correlações específicas para o caso. Todavia, pode-se tentar obter uma estimativa qualitativa do ângulo de atrito (ϕ) do RSU por meio do emprego de correlações originalmente produzidas para solos como por exemplo a apresentada por Décourt (1989, 1991) relativa a SPT com 60% de eficiência (Figura 150). Os valores de ϕ foram obtidos segundo a curva proposta fornecendo valores médios (Figura 151) de $\phi=31,5^\circ$ a $35,9^\circ$ para a C5 e $\phi=30,4^\circ$ para a C4.

Apesar da adaptação, os valores de ângulo de atrito parecem ter boa concordância com o que se tem observado na literatura para RSU com idades similares e descritos anteriormente no Capítulo 3 desta pesquisa.

Além disto, notou-se que o ângulo de atrito da célula C4 (com lixo novo) apresentou um valor médio ligeiramente inferior ao obtido na célula C5, onde o processo de degradação é mais acentuado.

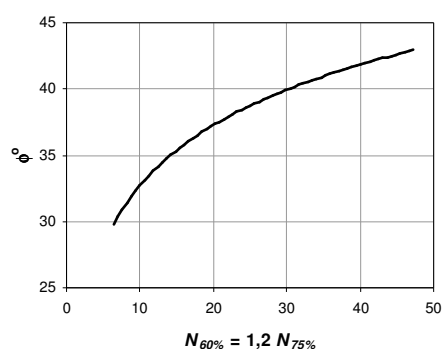


Figura 150 – Correlação entre $N_{spt(60\%)}$ e ϕ segundo Décourt (1991) para solos.

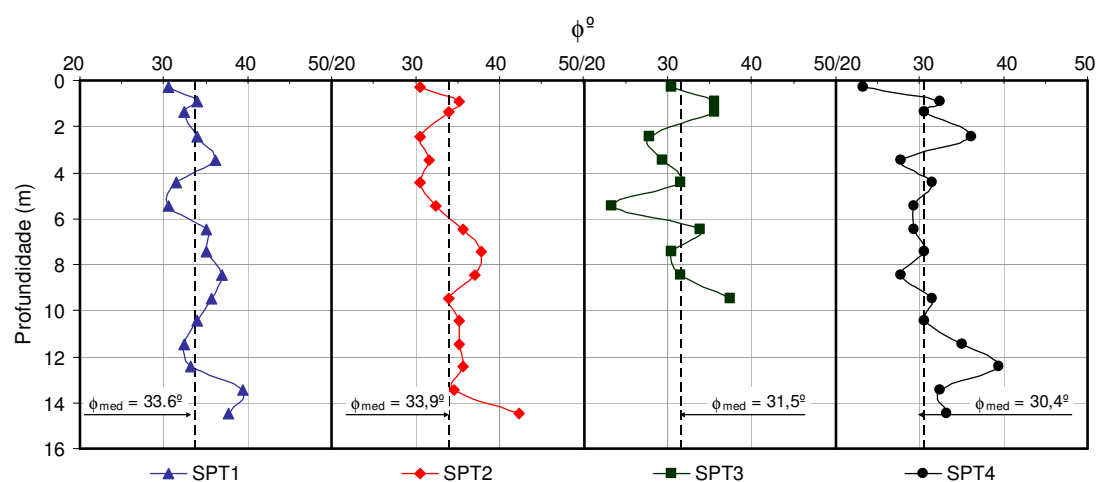


Figura 151 – Ângulo de atrito do RSU calculado segundo correlação proposta para N_{spt} de solos.

6.4. Ensaio CPT

Todos os três ensaios de CPT realizados na célula C5 (Figura 110 (a)) mostraram picos elevados de resistência de ponta e quedas bruscas (CPT1) indicando a heterogeneidade do meio. Por sua vez os valores de q_c na célula C4 (Figura 110 (b)) foram inferiores aos observados na C5 e com menos picos, indicando uma possível correlação entre degradação e resistência. Em ambas as células um comportamento de acréscimo de q_c em profundidade foi observado, sendo mais expressivo na célula mais antiga. Para avaliar este comportamento, curvas de ajuste exponenciais foram traçadas considerando individualmente o furo, cada célula e ambas, e os resultados estão ilustrados na Figura 152.

No caso de solos granulares, uma análise da variação do ângulo de atrito com a profundidade a partir da resistência de ponta do cone pode ser feita de acordo com correlações obtidas em ensaios com areais em câmaras de calibração (Robertson & Campanella, 1993; Jamiolkowski *et al.*, 1985; Baldi *et al.*, 1986). Na maioria destes casos, tem-se uma correlação para a determinação da densidade relativa (D_r) como a proposta por Lancellotta (1985) e transcrita na Equação 60. Em seguida, a transformação de D_r em ϕ pode ser feita segundo propostas de interpretação de SPT como a apresentada por de Mello (1971) e reescrita na Equação 61.

$$D_r = -98 + 66 \log \frac{q_c}{(\sigma'_v)^{0.5}} \quad \dots(60)$$

$$(1,49 - D_r \cdot \tan(\phi)) = 0,712 \quad \dots(61)$$

As equações acima descritas foram empregadas no contexto de RSU meramente com um estudo qualitativo, cabendo ressaltar as diferenças conceituais entre os dois materiais. Como os ensaios de cone mecânico não fornecem o valor de poropressão em profundidade, empregou-se o valor da tensão vertical total na Equação 60 obtida com o peso específico calculado segundo Azevedo *et al.* (2003). Os resultados obtidos com esta adaptação estão ilustrados na Figura 153 juntamente com o valor médio de ângulo de atrito por furo.

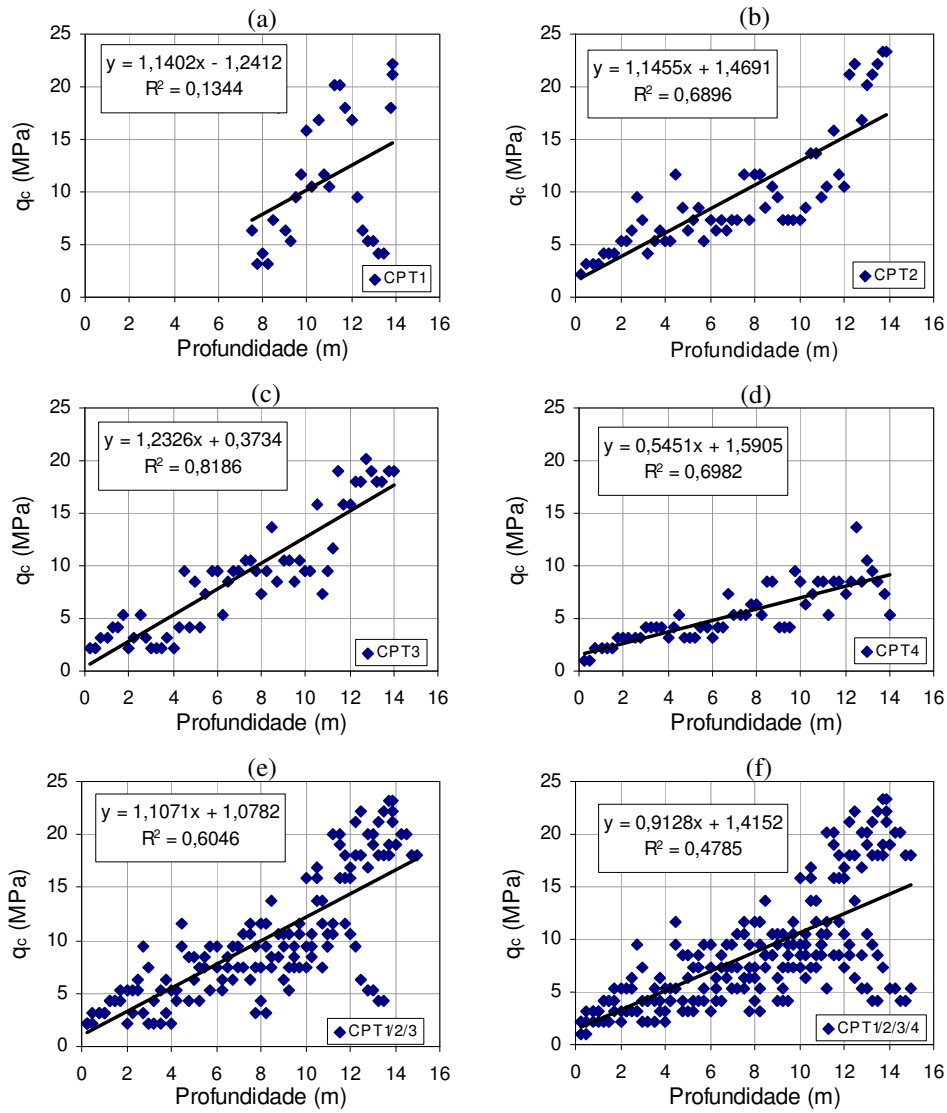


Figura 152 – Curvas de ajuste da variação de q_c com profundidade nos ensaios CPT.

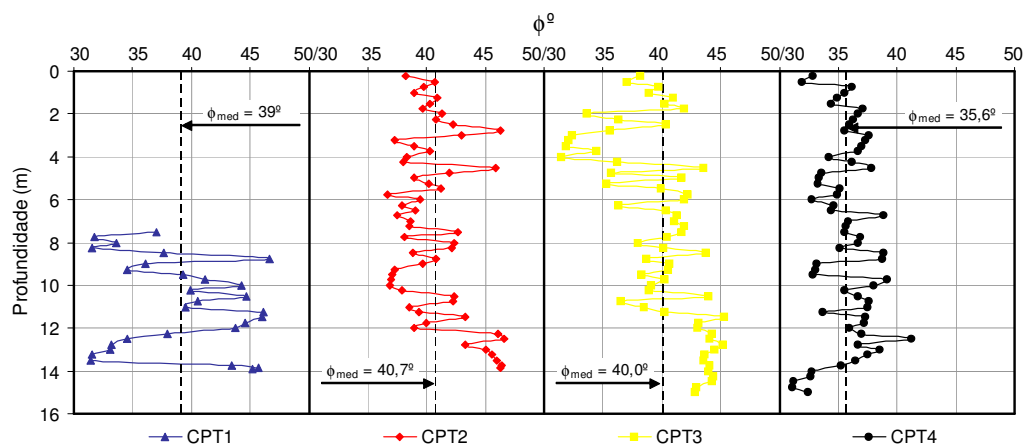


Figura 153 – Resultados na análise da variação de ϕ em profundidade nos ensaios CPT.

Os valores de ângulo de atrito determinados com os ensaios de CPT e com base nas equações originalmente concebidas para solos, foram ligeiramente superiores àqueles obtidos nas análises adaptadas empregando resultados do SPT, porém também de acordo com os valores reportados na literatura em análises com resíduo de idade similar e descritos no Capítulo 3. Similarmente, o resultado médio da célula C4 foi ligeiramente inferior ao da C5, sugerindo correlação entre degradação e ângulo de atrito.

6.5.

Ensaio Laboratoriais – Teor de Umidade e de Sólidos Voláteis

De acordo com Palmisano & Barlaz (1996) uma faixa de 20% a 40% de teor de umidade nas células de RSU é o percentual ótimo para a indução de processos anaeróbios de decomposição orgânica, podendo propiciar a proliferação de microorganismos e promover o transporte de nutrientes dentro da célula, aumentando a degradação. Teores de umidade inferiores ou superiores a estes patamares podem ser inibitórios dos processos anaeróbios de decomposição da matéria orgânica nas células, pois a maioria das reações bioquímicas nas células somente ocorre em presença de água (Monteiro, 2003).

A Figura 154 mostra que os teores de umidade das amostras coletadas na célula C5 apresentam-se dentro da faixa de percentual ideal para a decomposição anaeróbia sugerida por Palmisano & Barlaz (1996), isto, entre 20% e 40%. Os valores médios de %w nos furos SPT 1, 2 e 3 (células C5) até a profundidade investigada foram de 31,8%, 31,18% e 22,6%, respectivamente.

Por outro lado, os teores de sólidos voláteis encontrados na célula C5 foram baixos e praticamente inalterados com a profundidade, indicando que nesta célula a matéria orgânica (%MO≈60% in natura na Muribeca) já foi bastante degradada até a profundidade investigada. Os valores médios de %SV nos furos SPT 1, 2 e 3 (células C5) até a profundidade investigada foram de 9,5%, 8,68% e 5,3%, respectivamente.

A Figura 154 mostra, também, que os teores de umidade na célula C4 estiveram bastante elevados na camada superficial da célula (até 4m), decaindo em seguida até a profundidade de 6m e crescendo novamente a partir dos 9m. Na maioria dos casos, o teor de umidade esteve fora da faixa ideal dos processos de

decomposição, com valores superiores a 40%. Sabe-se que o teor de umidade pode ser função, dentre outros fatores, da história do aterro, da capacidade de campo e do balanço hídrico local. Entretanto, considerando o elevado e atípico índice pluviométrico ocorrido durante a campanha de ensaios, especula-se que o teor de umidade elevado pode ser justificado pela infiltração de água através do topo da célula, considerando que a C4 não possuía cobertura impermeável. O valor médio de %w no furo SPT4 (célula C4) até a profundidade investigada foi de 47,9%.

Por sua vez, os teores de sólidos voláteis determinados na célula C4 apresentaram uma tendência de variação similar ao descrito na curva de %w, mostrando valores elevados em camadas mais superficiais, indicando que a matéria orgânica de constituição ainda não foi totalmente degradada, especialmente até a profundidade de 4m. O valor médio de %SV no furo SPT4 (célula C5) até a profundidade investigada foi de 21,3%.

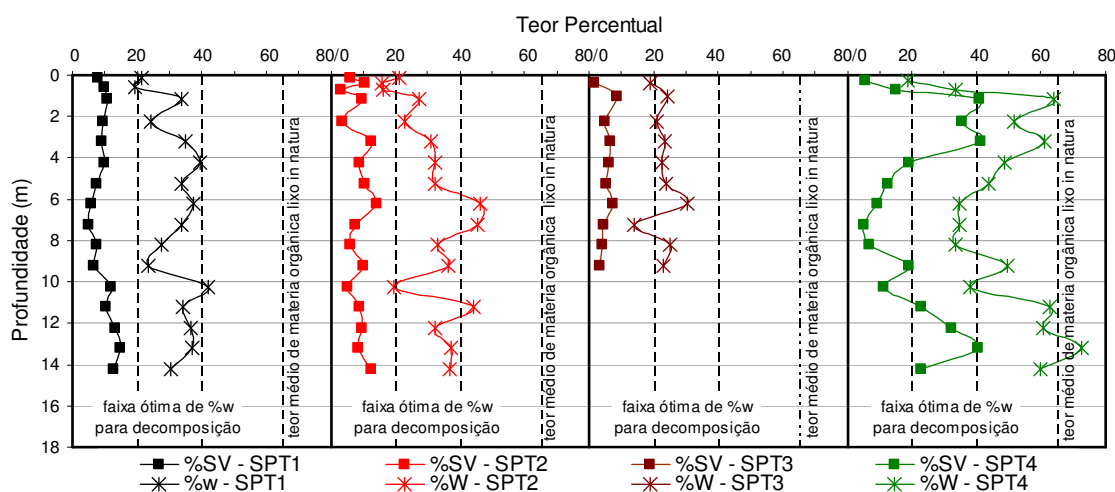


Figura 154 – Variação dos teores de umidade e de sólidos voláteis nas células C4 e C5

6.6.

Algumas Análises Comparativas entre Ensaios

6.6.1.

Correlações entre G_{ur} , q_c e N_{spt}

As relações entre os valores de módulo cisalhante dos ciclos (G_{ur}) e a resistência de ponta do cone (q_c) e a resistência à cravação do SPT dos resultados

encontrados nas células C4 e C5 estão ilustradas nas Figura 155 a 157. Os valores de G_{ur} e q_c são dados em MPa.

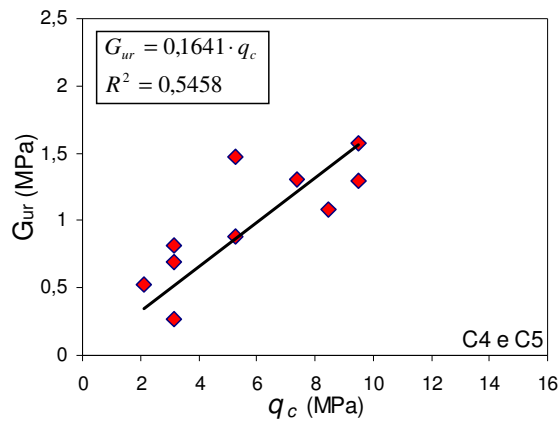


Figura 155 –Correlação entre G_{ur} x q_c nas células C4 e C5.

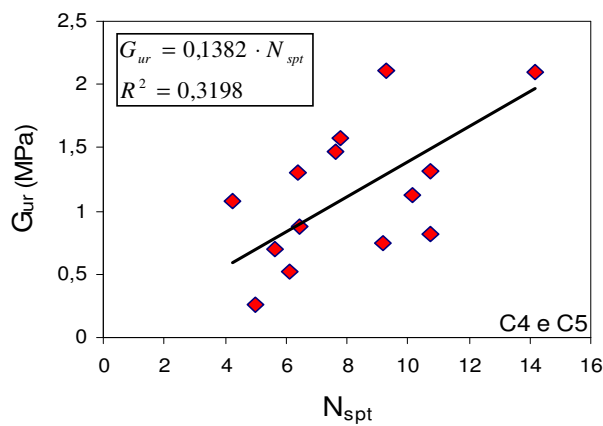


Figura 156 – Correlação entre G_{ur} x N_{spt} nas células C4 e C5.

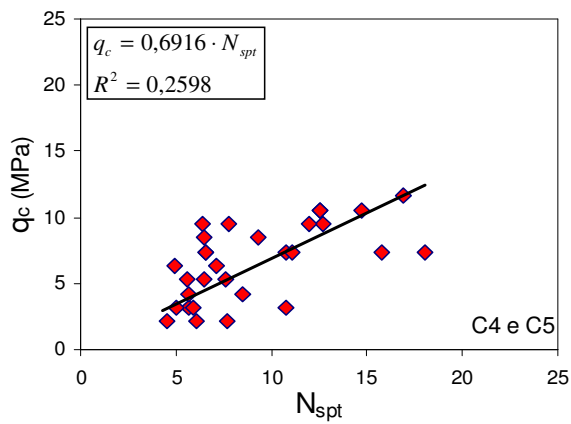


Figura 157 – Correlação entre q_c e N_{spt} nas células C4 e C5.

6.6.2.

Avaliação do efeito de %SV e %w_r em G_{ur}

A correlação entre teor de umidade e de sólidos voláteis nas células investigadas é clara e está representada por meio do ajuste exponencial da Figura 158, onde estão os dados das quatro sondagens.

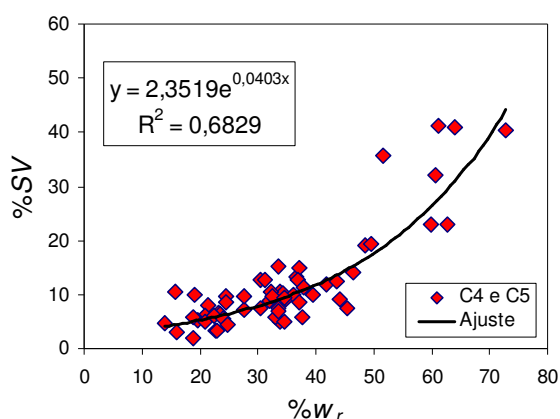


Figura 158 – Correlação entre %w e %SV em ambas células investigas.

Entretanto, a obtenção de uma correlação precisa entre os módulos cisalhantes e os teores de sólidos voláteis nas células investigadas não foi possível, considerando que a maioria dos dados amostrais de %SV representavam um resíduo já bastante degradado e com pequena variação (célula C5), e que a quantidade de informações na célula C4 foi pequena, portanto pouca representatividade. Mesmo assim, tentou-se representar os resultados obtidos por meio da Figura 159, onde estão traçados os módulos cisalhantes contra os teores de sólidos voláteis normalizados para a porcentagem de matéria orgânica no aterro da Muribeca (60%), individualmente e em ambas as células investigadas. Por meio da Figura 159(a), percebe-se que não há uma tendência clara de correlação entre G e %SV na célula C5. O ajuste obtido não foi bom, sendo representado pelo valor baixo de R^2 , porém indica o decréscimo de G_{ur} com o aumento do %SV. Por sua vez, o módulo cisalhante na C4 apresenta um aumento com acréscimo de %SV (Figura 159(b)), porém os dados são poucos para fornecer conclusões confiáveis. Por outro lado, quando se representam os resultados obtidos em ambas as células em um único gráfico (Figura 159(c)) até a profundidade investigada (8m), estes podem ser ajustados por uma equação logarítmica

mostrando uma tendência de aumento do módulo cisalhante para uma diminuição do teor de sólidos voláteis, isto é, o resíduo mais degradado apresenta maior rigidez.

Considerando a correlação entre %w e %SV descrita na Figura 158, é de se esperar que o comportamento $\%w_r \times G_{ur}$ seja similar ao descrito anteriormente com relação à %SV x G_{ur} . De fato, uma correlação clara entre os dois parâmetros também não foi viável como é possível notar através da Figura 160, onde estão apresentados as variações destes dois parâmetros nas células C5 (Figura 160 (a)), C4 (Figura 160 (b)) e considerando os resultados de ambas as células (Figura 160 (c)). A análise crítica leva à crer que dificilmente pode-se ter um ajuste confiável, contudo a Figura 160(c) pode levar a crer que G_{ur} decresce com o aumento do %w, similar ao sugerido pela Figura 159 (c).

As hipóteses levantadas sobre correlações entre G, $\%w_r$ e %SV demonstraram que o estudo não foi conclusivo. Portanto as correlações sugeridas não devem ser empregadas em aplicações praticas sem que se utilizem mais dados sobre diferentes teores de %w e %SV.

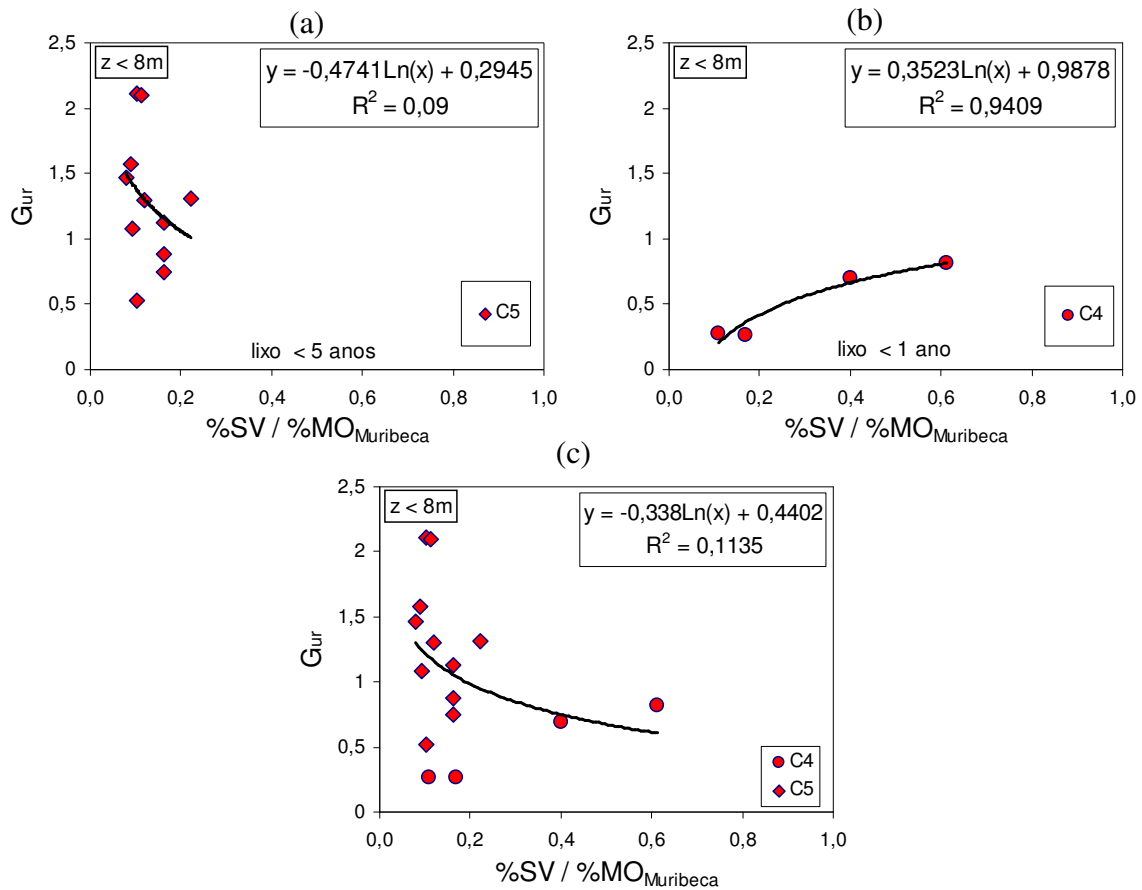


Figura 159 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.

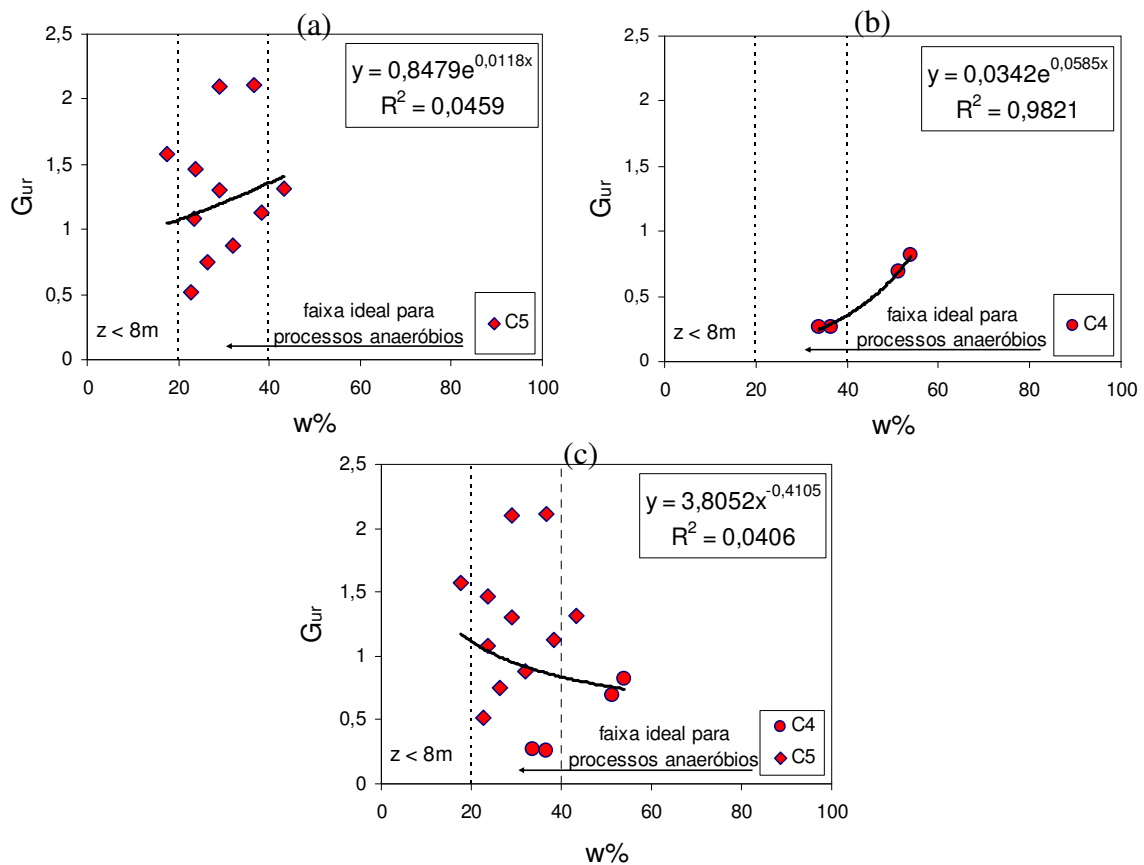


Figura 160 – Influência do %SV na variação dos módulos cisalhantes dos ciclo.