

34ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO

Comparação da Incerteza de Medição entre Ensaios CBR e Mini CBR.

Mirella Pennacchi Assali

Rita Moura Fortes

Raquel Cymrot

34º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO

Campinas, SP.

24 a 29 de agosto de 2003.

COMPARAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO ENTRE ENSAIOS CBR E MINI CBR

Mirella Pennacchi Assali

Rita Moura Fortes

Raquel Cymrot

Resumo

Este trabalho foi idealizado com a finalidade de contribuir para a validação dos resultados de ensaio do Mini CBR (California Bearing Ratio), utilizado pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) que foi desenvolvida para atender as peculiaridades dos solos de clima tropical. Este ensaio tem substituído com vantagem o ensaio do CBR, desenvolvido em países de climas frios e temperados, cujos parâmetros são utilizados para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. É apresentada uma comparação entre os dois ensaios (CBR e Mini CBR) e o desenvolvimento do cálculo de incerteza de medição para os dois métodos.

M.P.Assali Rua Conceição de Monte Alegre, nº 480, Bairro Brooklin novo, São Paulo, Brasil, cep 04563-061 email mirella@lenc.com.br

R.M.Fortes Rua Maranhão, 101 - apto 72, CEP 01240-001, São Paulo, Brasil.
rita@lenc.com.br mfortes@terra.com.br

R. Cymrot Rua Conselheiro Brotero, nº1182, apto 71, São Paulo, Brasil
email cym@uol.com.br

Palavras chave:

Solos Tropicais, Ensaio Mini CBR, Ensaio CBR, Incerteza de Medição, metodologia MCT, validação de ensaios.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de estudo de solos para rodovias utilizados nos países em desenvolvimento são geralmente os originados em países já desenvolvidos, principalmente de climas frios e temperados. Estes métodos baseiam-se na determinação de propriedades-índice de solos (limite de liquidez, índice de plasticidade, granulometria). Geralmente, essa determinação é completada pela obtenção das características de compactação dos solos (Ensaio de Proctor) e de capacidade de suporte (ISC- Índice Suporte Califórnia ou CBR- *California Bearing Ratio*) dos solos. (NOGAMI, VILLIBOR, 1983; VILLIBOR, 1981)

Uma das limitações desses métodos deve-se ao fato de que eles não levam em consideração as peculiaridades dos solos que ocorrem nas regiões tropicais, tais como os solos lateríticos e saprolíticos. (NOGAMI, VILLIBOR, 1995)

Isso faz com que, freqüentemente, utilize-se inadequadamente os solos das regiões tropicais e se adote critérios de projeto, construção e de conservação incompatíveis com o desempenho desses solos devido às peculiaridades climáticas inerentes das regiões tropicais.

Como os procedimentos tradicionais de construção de rodovias não levam em consideração tais peculiaridades, foi necessário o desenvolvimento de uma nova metodologia de estudos de solos, que foi designada de MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), pelo fato de se basear nas propriedades determinadas em amostras de dimensões reduzidas (corpos de prova de 50mm de diâmetro (miniatura), ou de 26mm de diâmetro (sub-miniatura)), compactados e adequados ao estudo de solos tropicais. (NOGAMI, VILLIBOR, 1983; VILLIBOR, 1981)

A metodologia MCT envolve um conjunto de ensaios e determinações geotécnicas de solos (compactação, perda de massa por imersão, permeabilidade, infiltrabilidade, contração, Mini CBR e o ensaio da pastilha).

O estudo da incerteza de medição desses dois ensaios, o CBR, que foi desenvolvido em país de clima frio e temperado e o ensaio Mini CBR, que pertence à metodologia desenvolvida para países de climas tropicais, onde são utilizadas frações de solos que passam na peneira de abertura 2mm (DER M191,1988), será realizado neste trabalho.

2. ENSAIO CBR E MINI CBR

Para o dimensionamento da estrutura de um pavimento até a escolha dos materiais constituintes de suas camadas, prevalece entre nós o uso de critérios tradicionais (metodologia), para meio rodoviário, desenvolvidos em países de climas frios e temperados.

Esses critérios baseiam-se na determinação dos índices classificatórios de solos (limite de liquidez, índice de plasticidade, granulometria). Geralmente essa determinação é completada pela obtenção das características de compactação, da capacidade de suporte CBR e expansão dos solos. (ZUPPOLINI NETO, 1994; NOGAMI; VILLIBOR, 1983)

Essa metodologia é adotada oficialmente por quase todos os órgãos rodoviários, o que não é recomendável em certas regiões do Brasil, que possuem clima tropical, fazendo com que, freqüentemente, se utilize inadequadamente os solos dessas regiões.

Como conseqüência da utilização inadequada de solos tropicais, foi desenvolvida uma metodologia designada MCT a qual é apropriada para solos tropicais e envolve um conjunto de ensaios e determinações geotécnicas de solos (compactação, sorção, perda de massa por imersão, permeabilidade, contração, Mini CBR e pastilha). (NOGAMI; VILLIBOR, 1995)

O ensaio Mini CBR, que permite a avaliação da capacidade de suporte na metodologia MCT, também exige uma menor porção de solo, pois o ensaio é realizado com corpos de prova de dimensões reduzidas (50mm de diâmetro), conforme ilustrado na Figura 2.1 que mostra uma comparação dimensional entre os moldes cilíndricos e a figura 2.2 que apresenta algumas características dos ensaios.



Figura 2.1- Diferença de dimensões dos cilindros de CBR e Mini CBR;

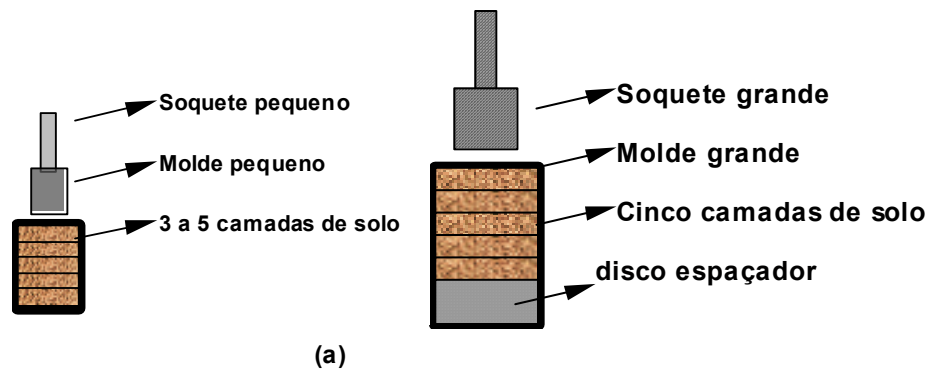


Figura 2.2- Comparação entre corpos de prova dos ensaios Mini CBR e CBR respectivamente. (FORTES, 2002)

2.1 Ensaio CBR

Este ensaio pertencente à metodologia proposta por Porter e introduzida no Brasil pelo engenheiro T. D. S. Brandão (1967). Tem por objetivo determinar o Índice Suporte Califórnia, onde é medida a resistência à penetração (pistão de aproximadamente $19,35 \text{ cm}^2$ ou 3 pol^2 penetra com a velocidade de $1,27 \text{ mm/min}$ ou $0,85 \text{ pol/min}$) de uma amostra saturada compactada segundo o método Proctor. O valor da resistência é dado em porcentagem sendo que 100% é o valor correspondente à penetração em uma amostra de brita (tomada como padrão) de alta qualidade. São utilizadas no ensaio CBR, amostras deformadas, não reusadas, de material que passa pela peneira 19mm, com um mínimo de 5 corpos de prova de aproximadamente 153mm de diâmetro. (ABNT NBR 9895,1987; FORTES, 2002)

2.2 Ensaio Mini CBR

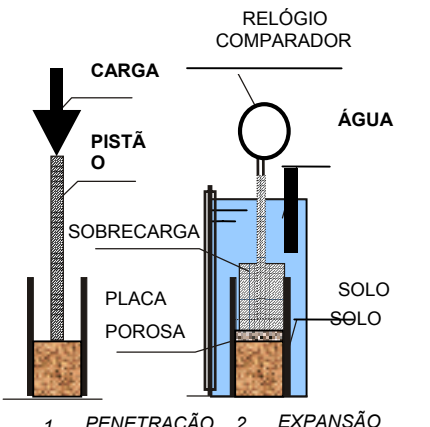
O conjunto de ensaios Mini CBR e associados foram desenvolvidos pelo professor Nogami na década de 80, com a finalidade de simplificar os procedimentos de compactação e determinação dos índices de capacidade de suporte e expansão, reduzindo a quantidade de material necessário, exigido menor esforço na execução, além de complementar a metodologia MCT.

Neste ensaio são utilizadas energia normal, com 5 golpes de soquete pequeno por face do corpo de prova e energia intermediária, com 6 golpes de soquete grande por face do corpo de prova. (DER M192,1989)

O procedimento adotado no caso do ensaio Mini CBR é similar ao tradicional, menos o tempo de imersão que é reduzido para 24 horas e outras adaptações decorrentes do uso de corpos de prova de pequenas dimensões. (FORTES, 2002)

No quadro 2.1 são apresentadas as principais características desse ensaio.

Quadro 2.1 - Ensaio de Capacidade de Suporte – Mini CBR

APARELHAGEM	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES DOS RESULTADOS
 <p>1 PENETRAÇÃO 2 EXPANSÃO</p>	<p>COMPACTADOR:</p> <ul style="list-style-type: none"> - PISTÃO: Mini (Ø 16 mm); Sub Mini (Ø 8 mm) - CARGA: <ul style="list-style-type: none"> - Estática, penetr. de 1,25 mm/min. - Dinâmica, 1 golpe soquete compactador. - IMERSÃO: 24 horas ou sem imersão. - SOBRECARGA: padrão, sem ou especial. - EXPANSÃO: determinada de maneira similar ao procedimento tradicional. - MINI CBR DE CAMPO: Determinação facilitada pelo uso de aparelhagem leve de fácil movimentação (penetrômetro dinâmico – PD). 	<ul style="list-style-type: none"> - Método de Ensaio DNER – ME 254/89 DER/SP – M 192 - Dimensionamento de pavimentos. - Escolha de solos para reforço do subleito, bases e acostamentos.

3. CONFIABILIDADE METROLÓGICA E CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O desenvolvimento da cultura metrológica, que resulta em ganhos de produtividade, qualidade dos produtos e serviços, redução de custos e eliminação de desperdícios, vem sendo utilizada como estratégia permanente dos laboratórios. Dentro desta cultura metrológica, a metrologia que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições qualquer que seja a incerteza, em qualquer campo da ciência e tecnologia; conduz a uma maior confiabilidade das medições. (OLIVIERI, 2000; INMETRO, 2000)

Os resultados obtidos em medições empíricas estabelecidas por um dado equipamento ou metodologia podem ser úteis em algumas situações, porém, estes dados devem ser utilizados com devidas considerações e limitações. (OLIVIERI, 2000; INMETRO, 2000)

Em geral uma medição tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado desta. Os dois componentes dos erros são, o aleatório e o sistemático. Os erros sistemáticos significativos ocorrem devido a condições adversas do laboratório, e erros devido ao operador, podendo ter origem em modificações não permitidas na metodologia e/ou equipamento não calibrado e os erros aleatórios significativos que ocorrem devido a variabilidade dentro do laboratório, podendo ter origem em erros ocasionais (erro de leitura, erro de cálculo, erro de conversão de valores, erro de transcrição de resultados etc). (BIPM, IEC, ISO et al. 1998; Fortes et al., 2001)

O erro aleatório se origina de variações em observações repetidas da grandeza a ser medida (mensurando). Embora não seja possível compensar este erro de um resultado de medição, ele pode ser reduzido, aumentando-se o número de observações. Já o sistemático, como o aleatório, também não pode ser eliminado, mas sim reduzido, principalmente se esse erro se origina de um efeito reconhecido (efeito sistemático), então, por um fator de correção, este efeito será compensado. E supõe-se que, após esta correção, o valor esperado do erro provocado por tal efeito sistemático seja zero (figura 3.1). (BIPM, IEC, ISO et al. 1998)

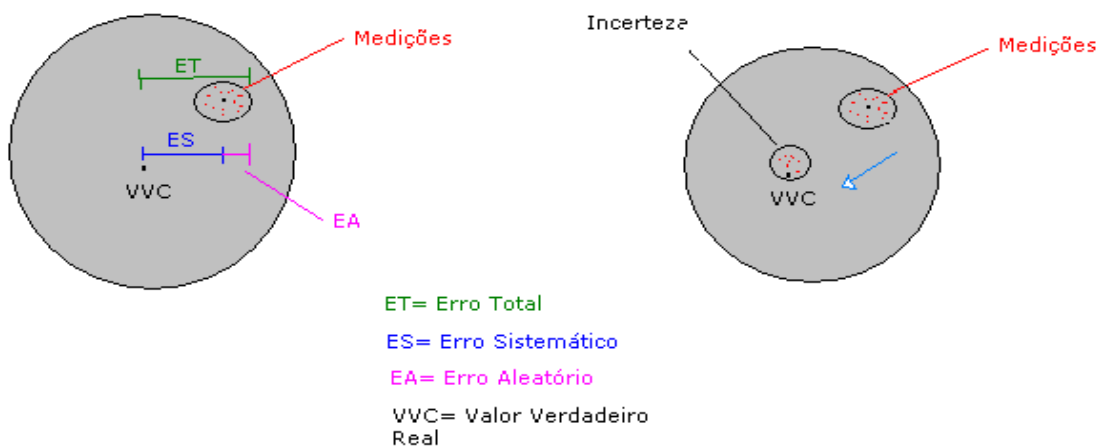


Figura 3.1- Circunferências para definição de incerteza.

Obtêm-se então o resultado de uma medição após as correções dos efeitos sistemáticos reconhecidos. Mas este resultado é ainda uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos, então, podemos observar e relatar que a incerteza de uma medição não é um erro. (BIPM, IEC, ISO et al. 1998)

Então medições quantitativas são sempre estimativas do valor da medida, e não o valor verdadeiro real. Esta estimativa envolve certo nível de incerteza, a qual caracteriza a dispersão dos valores que poderão ser atribuídos razoavelmente ao valor estimado. As medições devem ser realizadas de modo que os limites de incerteza possam ser encontrados dentro das probabilidades pré-estabelecidas. Sem a utilização desta incerteza, não poderá ser tomada nenhuma decisão. Pode-se determinar a incerteza, através de cálculo, efetuado por programas para garantia da qualidade bem desenvolvidos e implementados. (OLIVIERI, 2000; COUTO,2001)

A garantia da qualidade (confiabilidade metrológica) está diretamente ligada a incerteza de medição, pois a qualidade consiste nas características dos produtos (resultados) com ausência de falhas, que atendem as necessidades dos clientes. (OLIVIERI, 2000)

Para haver um Controle de Qualidade, necessita-se de um controle de equipamentos de inspeção (calibração e manutenção), medição e ensaios.

Quando são feitas medições, estas podem ser realizadas por diferentes laboratoristas, e equipamentos, sendo que estes apesar de serem calibrados possuem uma margem de incerteza. (OLIVIERI, 2000)

Para se ter uma maior confiabilidade nos resultados de medições, deve-se incluir as incertezas dos equipamentos e do método de ensaio. Estas “somadas” de dispersões de valores advindas de várias causas serão demonstradas na incerteza que, nada mais é que um desvio padrão o qual acompanha os resultados de medições. (COUTO, 2001)

Uma vez atingida a precisão destes resultados, qualquer erro sistemático pode ser realmente identificado e eliminado ou compensado, de modo que os requisitos da qualidade dos resultados sejam alcançados. (OLIVIERI, 2000)

A confiabilidade de um resultado é avaliada com base em sua incerteza quando comparada com os requisitos estabelecidos para o estudo final. Os resultados são considerados de qualidade adequada, quando estes tem consistência e sua incerteza for pequena. São ditos de qualidade inadequada, aqueles que variam excessivamente, ou o nível de incerteza excede as necessidades, ou seja, a avaliação da qualidade de resultados é considerada como qualidade adequada em uma determinada situação, podendo ser considerada como de qualidade inadequada em outra. (OLIVIERI, 2000)

Para que se possa analisar e comparar as medições realizadas em ensaios pertencentes à metodologias diferentes de classificação de solos, será necessário analisar suas incertezas. Existem três tipos de métodos para o cálculo da incerteza de medição: Clássico, Simulação Numérica e Relativo. O mais utilizado e complexo é o método Clássico. O da Simulação Numérica apresenta um cálculo mais simplificado e o seu resultado se aproxima do Clássico. Já o método Relativo, apresenta valores de resultados diferentes e menos confiáveis que dos outros dois.

Para o cálculo de incerteza de medição pelo método Clássico, o qual será utilizado neste trabalho, é necessário realizar as seguintes etapas:

a) Definir o mensurando (y): A partir dele, é possível introduzir na incerteza do resultado de uma medição, um componente de incerteza que pode ou não ser significativo para exatidão requerida da medição. Este mensurando é determinado por "n" outras grandezas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n , através de uma relação funcional. O mensurando não é especificado por um valor, mas por uma descrição de grandeza. Entretanto, a princípio, um mensurando não pode ser completamente descrito sem um número infinito de informações. (BIPM, IEC, ISO et al. 1998; COUTO, 2001)

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

b) Estimar as incertezas das grandezas de entrada ($u(x_i)$): o mensurando na maioria dos casos não é medido diretamente, mas é determinado por outras grandezas de entrada, através de uma relação funcional. Essas grandezas, durante as suas medições, possuem um certo número de incertezas padronizadas como: incerteza da calibração do equipamento da medição e da repetibilidade (grau de concordância entre o resultado de medições sucessivas de uma mesma grandeza efetuadas com o mesmo

método, o mesmo operador, a mesma peça e as mesmas condições de utilização) Estas podem ser estimadas de duas maneiras; pela avaliação Tipo A (equação 2) que é baseada num conjunto de observações (repetições) através de um tratamento estatístico (desvio padrão) e pela avaliação Tipo B (equação 3) a qual se baseia através de outros meios que não dependam de um conjunto de observações (calibrações e certificados). Unindo-se com a incerteza de cada grandeza possuirá um Coeficiente de Sensibilidade, o qual depende do quanto o mensurando sente em relação a cada grandeza de entrada. (COUTO, 2001)

$$\text{Tipo A: } u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$\text{Tipo B: } u(x_i) = \frac{U(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Sendo U: incerteza expandida do certificado.

c) Cálculo da incerteza combinada $u_c(y)$: uma somatória quadrática das incertezas de cada grandeza de entrada multiplicadas pela derivada (coeficiente de sensibilidade) da grandeza em relação ao mensurando (equação 4).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

Onde $u(x_i)$ - incerteza padrão estimada de x_i , do Tipo A ou Tipo B.

d) Definir graus de liberdade (v_{eff}): definido o grau de liberdade (equação 5), entrar na tabela T-student com nível de confiança de 95,45%, então obtêm-se o valor do coeficiente de abrangência (k), necessário para o cálculo da incerteza expandida. O nível 95,45% é o mais utilizado, que resulta que o resultado obtido através da estimativa mais ou menos a incerteza expandida contém o verdadeiro valor com probabilidade de 95,45% e o k será obtido em função desta confiabilidade escolhida.

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(C_i * u(x_i))^4}{v_i}} \quad (5)$$

Onde: N é o número de grandezas de entrada , v_i é o grau de liberdade da grandeza x_i e C_i é o coeficiente de sensibilidade.

e) Cálculo da incerteza expandida (U): o respectivo coeficiente de abrangência (k) multiplicado pela incerteza combinada (equação 6). (COUTO, 2001)

$$U = k * u_c(y) \quad (6)$$

f) Resultado da medição: o valor da incerteza deverá ser declarado no máximo com dois algarismos significativos e se for arredondado deverá ser para cima (equação 7).

$$y \pm U \quad (7)$$

4. CÁLCULO DA INCERTEZA DO ENSAIO DE CBR E MINI CBR.

Este cálculo será realizado com base nas etapas e equações apresentadas no item 3.

4.1 Incerteza do Ensaio CBR

Nas tabelas 4.1 a 4.9 estão apresentadas as incertezas de medição dos equipamentos utilizados no ensaio de CBR.

Tabela 4.1 Equipamentos Utilizados no ensaio CBR e suas incertezas. (Assali & Fortes,2003)

Equipamentos utilizados no ensaio	Incerteza do Certificado utilizada nos cálculos	K
ENSAIO CBR		
Cilindros 24, 25, 27, 48 e 94	Calibração Interna	-
Estufa 95	Calibração Interna	-
Termômetro 386	-	-
Soquete Proctor 94	Calibração Interna	-
Relógio Comparador (Prensa) 202	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Expansão) 152	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Expansão) 249	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Expansão) 267	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Expansão) 438	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Expansão) 440	0,002mm	2,00
Paquímetro 296	0,032mm	2,02
Paquímetro 555	Função da Medida	Função da Medida
Anel Dinamométrico 200	Função da Força	4,90
Balança 581	Função do Peso	Função do Peso
Balança 304	Função do Peso	Função do Peso

Tabela 4.2 Incertezas dos volumes (cálculos das massas específicas) dos solos. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento Utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Paquímetro 296	Tipo A	$(2085,5 \pm 2,2) \text{ cm}^3$ com 95,45% de confiança e $k=2,09$
25	Paquímetro 555	Tipo A	$(2085,2 \pm 2,4) \text{ cm}^3$ com 95,45% de confiança e $k=2,15$
94	Paquímetro 296	Tipo A	$(2077,1 \pm 2,6) \text{ cm}^3$ com 95,45% de confiança e $k=2,13$
48	Paquímetro 555	Tipo A	$(2080,9 \pm 4,7) \text{ cm}^3$ com 95,45% de confiança e $k=2,20$
27	Paquímetro 296	Tipo A	$(2084,5 \pm 4,0) \text{ cm}^3$ com 95,45% de confiança e $k=2,17$

Tabela 4.3 Incertezas das massas úmidas (cálculo das massas específicas) (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Balança 304	Tipo B	(3715,0 ± 1,5) g com 95,45% de confiança e k=2,00
25	Balança 304	Tipo B	(3881,0 ± 1,5) g com 95,45% de confiança e k=2,00
94	Balança 304	Tipo B	(4006,0 ± 1,5) g com 95,45% de confiança e k=2,00
48	Balança 304	Tipo B	(4025,0 ± 1,5) g com 95,45% de confiança e k=2,00
27	Balança 304	Tipo B	(3939,0 ± 1,5) g com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.4 Incertezas das massas úmidas (cálculo das umidades). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Balança 581	Tipo B	(131,470 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
25	Balança 581	Tipo B	(101,100 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
94	Balança 581	Tipo B	(176,980 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
48	Balança 581	Tipo B	(158,700 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
27	Balança 581	Tipo B	(149,350 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.5 Incertezas das massas secas (cálculo das umidades). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Balança 581	Tipo B	(110,140 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
25	Balança 581	Tipo B	(83,450 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
94	Balança 581	Tipo B	(142,960 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
48	Balança 581	Tipo B	(126,020 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00
27	Balança 581	Tipo B	(116,680 ± 0,014) g com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.6 Incertezas das umidades do ensaio CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Balança 581	Tipo B	(19,366 ± 0,020) % com 95,45% de confiança e k=2,00
25	Balança 581	Tipo B	(21,150 ± 0,027) % com 95,45% de confiança e k=2,00
94	Balança 581	Tipo B	(23,797 ± 0,016) % com 95,45% de confiança e k=2,00
48	Balança 581	Tipo B	(25,932 ± 0,019) % com 95,45% de confiança e k=2,00
27	Balança 581	Tipo B	(28,000 ± 0,020) % com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.7 Incertezas das massas específicas do ensaio CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	paquímetro 296, balança 304 e balança 581	Tipo A	(1,4924 ± 0,0018) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,23
25	paquímetro 555, balança 304 e balança 581	Tipo A	(1,5363 ± 0,0020) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,23
94	paquímetro 296, balança 304 e balança 581	Tipo A	(1,5579 ± 0,0021) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,25
48	paquímetro 555, balança 304 e balança 581	Tipo A	(1,5360 ± 0,0036) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,28
27	paquímetro 296, balança 304 e balança 581	Tipo A	(1,4763 ± 0,0031) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,28

Tabela 4.8 Incertezas das Expansões do ensaio CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	paquímetro 296 e relógio comparador 152	Tipo A	(3,8522 ± 0,0034) % com 95,45% de confiança e k=2,03
25	paquímetro 555 e relógio comparador 249	Tipo A	(3,6927 ± 0,0041) % com 95,45% de confiança e k=2,09
94	paquímetro 296 e relógio comparador 267	Tipo A	(3,1321 ± 0,0030) % com 95,45% de confiança e k=2,00
48	paquímetro 555 e relógio comparador 438	Tipo A	(1,1861 ± 0,0028) % com 95,45% de confiança e k=2,00
27	paquímetro 296 e relógio comparador 440	Tipo A	(0,6225 ± 0,0026) % com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.9 Incertezas do índice suporte Califórnia (CBR). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
24	Anel dinamométrico 200	Tipo B	(2,68 ± 0,11) % com 95,45% de confiança e k=4,50
25	Anel dinamométrico 200	Tipo B	(4,23 ± 0,11) % com 95,45% de confiança e k=4,50
94	Anel dinamométrico 200	Tipo B	(5,87 ± 0,17) % com 95,45% de confiança e k=4,50
48	Anel dinamométrico 200	Tipo B	(5,02 ± 0,12) % com 95,45% de confiança e k=4,50
27	Anel dinamométrico 200	Tipo B	(2,51 ± 0,16) % com 95,45% de confiança e k=4,50

4.2 Incerteza do Ensaio Mini CBR

Nas tabelas 4.10 a 4.20 estão apresentadas as incertezas dos equipamentos utilizados no ensaio de mini CBR.

Tabela 4.10 Equipamentos Utilizados no ensaio Mini CBR e suas incertezas. (Assali & Fortes,2003)

Equipamentos utilizados no ensaio	Incerteza do Certificado utilizada nos cálculos	K
ENSAIO Mini CBR		
Cilindros 19, 20, 07, 11 e 14	Calibração Interna	-
Estufa 95	Calibração Interna	-
Termômetro 386	-	-
Soquete Proctor 585	Calibração Interna	-
Relógio Comparador (Compactação) 233	0,005mm	3,31
Relógio Comparador (Expansão) 442	0,002mm	2,00
Relógio Comparador (Prensa) 155	-	-
Paquímetro 555	Função da Medida	Função da Medida
Anel Dinamométrico 201	Função da Força	4,90
Balança 588	Função do Peso	Função do Peso
Cilindro Padrão	Interna	-

Tabela 4.11 Incerteza da altura do conjunto (cálculo dos volumes do solo) do ensaio do Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(91,790 ± 0,019) mm com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.12 Incertezas das alturas do solo (cálculo dos volumes do solo). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(49,040 ± 0,026) mm com 95,45% de confiança e k=2,00
20	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(50,720 ± 0,026) mm com 95,45% de confiança e k=2,00
07	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(50,850 ± 0,026) mm com 95,45% de confiança e k=2,00
11	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(49,940 ± 0,026) mm com 95,45% de confiança e k=2,00
14	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(49,360 ± 0,026) mm com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.13 Incertezas das áreas dos cilindros (cálculo dos volumes do solo) do ensaio Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	Paquímetro 555	Tipo A	(1973,7 ± 2,2) mm ² com 95,45% de confiança e k=2,16
20	Paquímetro 555	Tipo B	(1968,7 ± 1,5) mm ² com 95,45% de confiança e k=2,00
07	Paquímetro 555	Tipo A	(1982,1 ± 2,4) mm ² com 95,45% de confiança e k=2,20
11	Paquímetro 555	Tipo B	(1966,3 ± 1,3) mm ² com 95,45% de confiança e k=2,00
14	Paquímetro 555	Tipo B	(1974,8 ± 1,6) mm ² com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.14 Incertezas dos volumes dos solos (cálculo das massas específicas) do ensaio Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo A	(95,37 ± 0,13) cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,28
20	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(98,430 ± 0,092) cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00
07	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo A	(99,37 ± 0,14) cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,32
11	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(96,778 ± 0,082) cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00
14	soquete 585, cilindro padrão e paquímetro 555	Tipo B	(96,058 ± 0,092) cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.15 Incerteza das massas úmidas (cálculo das umidades). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	Balança 588	Tipo B	(77,320 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
20	Balança 588	Tipo B	(82,860 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
07	Balança 588	Tipo B	(78,990 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
11	Balança 588	Tipo B	(60,860 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
14	Balança 588	Tipo B	(91,280 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.16 Incertezas das massas secas (cálculo das umidades). (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	Balança 588	Tipo B	(64,620 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
20	Balança 588	Tipo B	(67,810 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
07	Balança 588	Tipo B	(63,280 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
11	Balança 588	Tipo B	(47,630 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00
14	Balança 588	Tipo B	(70,110 ± 0,015) g com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.17 Incertezas das umidades do ensaio Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	Balança 588	Tipo B	(19,653 ± 0,035) % com 95,45% de confiança e k=2,00
20	Balança 588	Tipo B	(22,194 ± 0,033) % com 95,45% de confiança e k=2,00
07	Balança 588	Tipo B	(24,826 ± 0,036) % com 95,45% de confiança e k=2,00
11	Balança 588	Tipo B	(27,777 ± 0,049) % com 95,45% de confiança e k=2,00
14	Balança 588	Tipo B	(30,195 ± 0,034) % com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.18 Incertezas das massas específicas do ensaio Mini CBR (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	paquímetro 555 e balança 588	Tipo A	(1,5342 ± 0,0023) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,43
20	paquímetro 555 e balança 588	Tipo B	(1,5387 ± 0,0015) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00
07	paquímetro 555 e balança 588	Tipo A	(1,5741 ± 0,0024) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,43
11	paquímetro 555 e balança 588	Tipo B	(1,5446 ± 0,0015) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00
14	paquímetro 555 e balança 588	Tipo B	(1,5144 ± 0,0015) g/cm ³ com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.19 Incertezas das expansões do ensaio Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	paquímetro 555 e relógio comparador 442	Tipo B	(3,4258 ± 0,0061) % com 95,45% de confiança e k=2,00
20	paquímetro 555 e relógio comparador 442	Tipo B	(2,7997 ± 0,0058) % com 95,45% de confiança e k=2,00
07	paquímetro 555 e relógio comparador 442	Tipo B	(1,7896 ± 0,0057) % com 95,45% de confiança e k=2,00
11	paquímetro 555 e relógio comparador 442	Tipo B	(1,7421 ± 0,0058) % com 95,45% de confiança e k=2,00
14	paquímetro 555 e relógio comparador 442	Tipo B	(1,2358 ± 0,0058) % com 95,45% de confiança e k=2,00

Tabela 4.20 Incerteza do Mini CBR. (Assali & Fortes,2003)

Número do Cilindro	Equipamento utilizado	Incerteza Predominante	Resultados Calculados
19	Anel dinamométrico 201	Tipo B	(3,63 ± 0,30) % com 95,45% de confiança e k=2,90
20	Anel dinamométrico 201	Tipo B	(4,10 ± 0,30) % com 95,45% de confiança e k=2,90
07	Anel dinamométrico 201	Tipo B	(5,57 ± 0,36) % com 95,45% de confiança e k=2,90
11	Anel dinamométrico 201	Tipo B	(6,11 ± 0,40) % com 95,45% de confiança e k=2,90
14	Anel dinamométrico 201	Tipo B	(4,10 ± 0,30) % com 95,45% de confiança e k=2,90

5. CONCLUSÃO.

Dos resultados apresentados nos cálculos da incerteza de medição explicitar-se-á (figura 5.1) somente os valores necessários para um resultado total de ensaios CBR e Mini CBR. Os demais resultados são para o cálculo dos resultados apresentados nos gráficos, e para se poder verificar qual incerteza (equipamento) tem mais ou menos influência no resultado final.

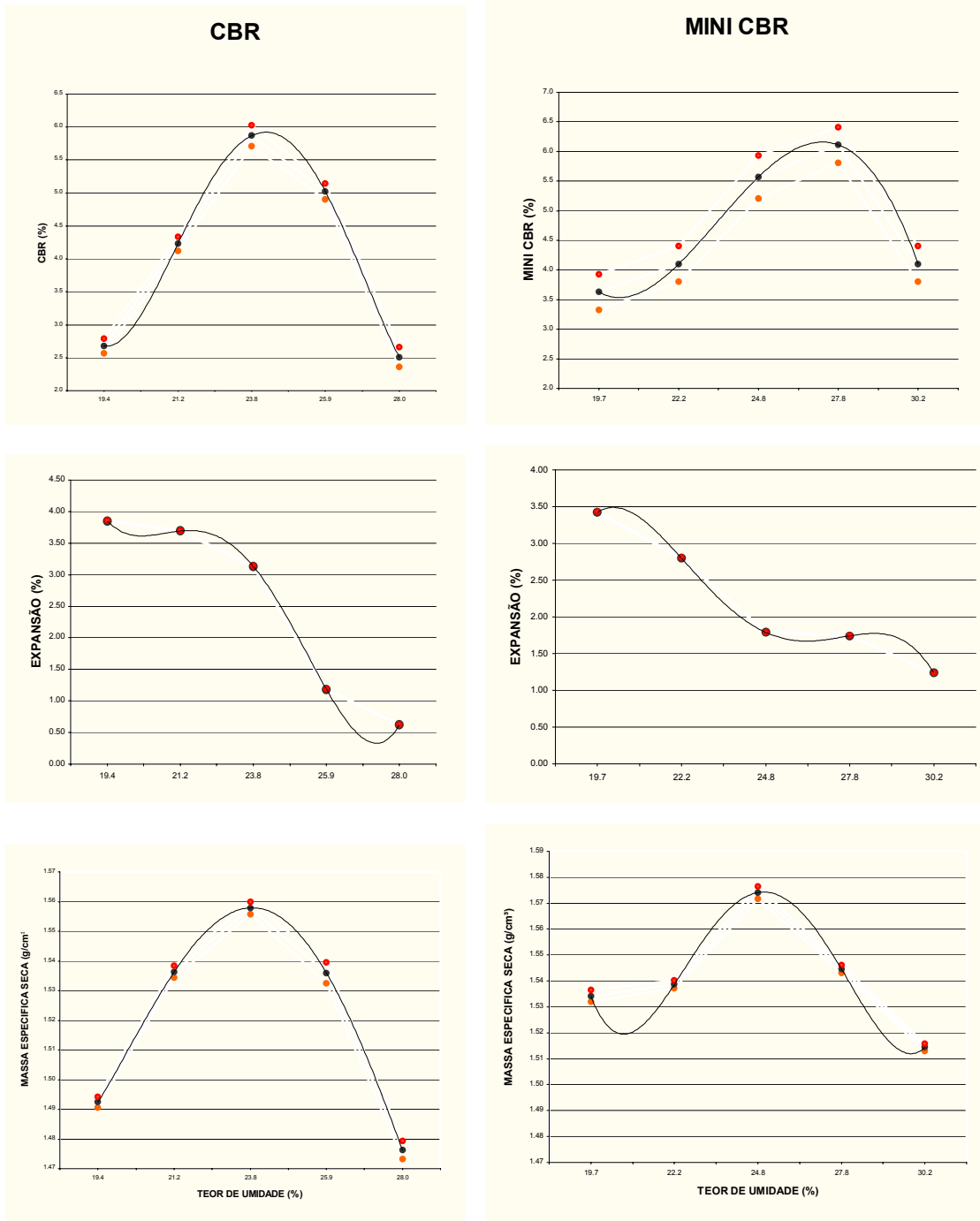


Figura 5.1 Gráficos finais dos ensaios CBR e Mini CBR.

Pode-se observar na figura 5.1 que as incertezas de todos os ensaios variam de cilindro para cilindro (os pontos dos gráficos são devido aos cinco cilindros usados nos ensaios) como veremos adiante, então não iremos analisar a resposta final deste ensaio, a qual é verificada entrando com o valor do teor de umidade ótima e retirando os valores da massa específica seca, da expansão e do Mini CBR ou CBR. Por este motivo deve-se analisar as incertezas dos resultados dos cinco cilindros de cada ensaio (CBR e Mini CBR) e fazer uma comparação. Percebe-se também que nos gráficos das expansões a incerteza não aparece por ser muito pequena e a diferença entre o valor mínimo da expansão e o máximo é muito grande.

a) Ensaio CBR

No ensaio CBR o cálculo da incerteza da massa específica seca, depende do cálculo da incerteza da massa úmida do solo (considerando a soma das incertezas da massa mais a tara), mas como foi utilizada uma só balança e seus coeficientes de sensibilidade são iguais a 1, os resultados foram iguais para cada pesagem (tabela 4.3). O cálculo da massa específica também depende da umidade e do volume do solo compactado, no primeiro a incerteza não varia por causa do equipamento (incerteza igual para todos), mas sim por causa dos coeficientes de sensibilidade o qual depende dos valores das próprias massas pesadas, por este motivo a incerteza do teor de umidade varia de cilindro para cilindro (tabela 4.6), já o volume dos solos compactados depende da incerteza dos cilindros, os quais variam muito e do coeficiente de sensibilidade que depende dos valores dos diâmetros e das alturas medidas. Com todas estas considerações, pode-se dizer que a incerteza das massas específicas variam mais por causa da incerteza de grandeza de entrada (incerteza dos equipamentos) maior, neste caso o volume, como pode-se perceber comparando os resultados das incertezas das massas específicas secas (tabela 4.7) com as do volume do solo compactado (tabela 4.2).

Neste ensaio também, no resultado final obtém-se o gráfico da expansão versus teor de umidade e CBR versus teor de umidade. No cálculo da incerteza da expansão, as suas incertezas de cilindro para cilindro variam mais com as incertezas das alturas dos cilindros pois esta é maior que as das leituras iniciais e finais por serem calculadas com relógios comparadores com mesmo valor de incerteza, e muito precisos (tabela 4.1). O cálculo da incerteza do Índice Suporte Califórnia (CBR -ensaio de penetração) depende da incerteza do anel dinamométrico e do coeficiente de sensibilidade então a incerteza varia dependendo da força aplicada em cada solo compactado de cada cilindro.

b) Ensaio Mini CBR

No ensaio Mini CBR, no cálculo da massa específica aparente seca, a massa úmida do solo é calculada diretamente, sem a tara, então a incerteza da massa úmida é menor que no ensaio CBR. Este cálculo da massa específica depende também do volume e do teor de umidade do solo compactado, como no ensaio CBR, mas o volume do solo

no Mini CBR depende somente da área do cilindro e a altura do solo é medida com relógio comparador (que é mais preciso que a do CBR o qual possui a incerteza do paquímetro (tipo A) e do desvio padrão (tipo B) somados) e do coeficiente de sensibilidade. Então pode-se observar que as incertezas dos volumes dos solos do ensaio Mini CBR (tabela 4.14) são menores que as do CBR (tabela 4.2), já as incertezas dos teores de umidades, são um pouco maiores no Mini CBR pois a balança utilizada é menos precisa que a do CBR.

Neste ensaio também são obtidos os gráficos de expansão versus teor de umidade e Mini CBR (ensaio de penetração) versus teor de umidade. No cálculo da expansão, os resultados de suas incertezas não variam tanto de cilindro para cilindro pois as alturas são as que mais influenciam neste cálculo, porque as leituras finais e iniciais são medidas com relógio comparador mais preciso que no ensaio CBR, mas também não se pode deixar de considerar os coeficientes de sensibilidade que são muito importantes.

No cálculo do Mini CBR (ensaio de penetração) a incerteza depende da incerteza do anel dinamométrico mais preciso que o do outro ensaio e do coeficiente de sensibilidade, e então a incerteza final varia com a força aplicada.

Pode-se observar após estas análises que o cálculo de incerteza de medição não servirá só para a validação de um ensaio, mas também para a melhoria deste considerando que quando se calcula a sua incerteza sabe-se, como descrito anteriormente, qual grandeza (aparelho) que influencia mais no resultado e é possível substituí-lo por outro mais preciso, e isto fará com que diminua a incerteza do ensaio.

c) Mini CBR e CBR

Observando todas as considerações finais, os resultados dos cálculos e as comparações entre os ensaios, conclui-se fazendo uma análise descritiva, que:

Nos ensaios (cada cilindro) para o cálculo das incertezas das massas específicas aparentes secas as grandezas dos valores apresentados nas tabelas 4.7 e 4.18 não variam muito entre CBR e Mini CBR.

Nos ensaios (cada cilindro) para cálculo das expansões, embora o ensaio Mini CBR possua maior precisão nos aparelhos, os coeficientes de sensibilidade são maiores, então o valor da incerteza de sua expansão é maior mais não um valor muito maior que o do outro ensaio. Por outro lado, analisando as variações dos valores entre cilindros do mesmo ensaio, as do Mini CBR são menores.

Analisando o último item destes conjuntos de respostas da comparação entre o CBR e o Mini CBR na determinação da penetração, pode-se perceber que o aparelho (anel dinamométrico) do ensaio Mini é mais preciso que o outro, mas se compararmos os coeficientes de sensibilidade destes ensaios o do Mini é maior. Então verifica-se que os

resultados de incerteza do Mini são um pouco maiores que o do CBR (tabela 4.9 e 4.20).

Após analisar-se todas as informações possíveis, pode-se dizer que, comparando todos os resultados de incertezas dos ensaios CBR e Mini CBR, eles não possuem uma diferença significativa, levando-se em conta os valores absolutos das grandezas envolvidas, isto indica que pelo fato do ensaio Mini CBR ser mais fácil de ser realizado, do seu custo ser cerca de 45% (baseado preços da LENC Laboratório de Engenharia e Consultoria Ltda) menor que o do CBR, por demandar um tempo bem menor na sua determinação (1 dia enquanto o CBR ocupa aproximadamente 1 semana), com uma diferença de incertezas com o CBR, pequena, por ser necessária uma menor quantidade de solos (30kg enquanto no CBR são 70kg) e principalmente considerando-se que o ensaio do Mini CBR foi desenvolvido atendendo-se as peculiaridades dos solos tropicais, onde o Brasil se insere, este ensaio é mais vantajoso.

Cabe salientar que a incerteza de medição deve ser calculada para cada ensaio, conforme exposto, foi desenvolvido um programa no Microsoft Excel com a finalidade de dinamizar as rotinas de cálculo.

Os autores se colocam a disposição para mais esclarecimentos e esperam ter contribuído para a validação dos resultados desses ensaios referente às suas incertezas de medição.

6. BIBLIOGRAFIA

Assali, M.P. & Fortes, R.M. – *Comparação da incerteza de medição entre ensaios CBR e mini CBR*. Trabalho de Graduação Interdisciplinar. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil, 2003.

COUTO, Paulo Roberto Guimarães. *Curso de Incerteza de Medição em Ensaios*. 05 e 06, dez. 2001.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Determinação do índice de suporte mini-CBR e da expansão de solos compactados com equipamento miniatura*: DER M192.1989.

_____, *Ensaio de compactação de solos com equipamentos miniatura*: DER M191.1989.

FORTES, R.M. - Capacidade de Suporte CBR, http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/4_CAPACIDADE_DE_SUPORTE_CBR.pdf, 2002

FORTES, R.M. - Capacidade de Suporte CBR, http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/4_NOÇÕES_DE_SOLOS.pdf, 2002

FORTES, R.M. - Capacidade de Suporte CBR,
[http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLO S.pdf](http://meusite.mackenzie.com.br/rmfortes/estradas2/4_CLASSIFICAÇÃO_DOS_SOLO_S.pdf), 2002

FORTES, R.M. et al..“*Avaliação de dois anos de programa interlaboratorial de asfalto*”
33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv - Associação Brasileira de Pavimentação,
Florianópolis - SC, Brasil, 2001.

INMETRO. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*.
2000

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. *Solos tropicais lateríticos e saprolíticos e pavimentação*. 18ª reunião anual de pavimentação. Porto Alegre, set. 1983.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. *Pavimentação de baixo custo em solos lateríticos*. 1995

OLIVIERI, José Carlos. *Confiabilidade metrológica e cálculos de incertezas*: JCO Consultoria em Qualidade e Confiabilidade Metrológica para Laboratórios. 2000.

Organizações Internacionais de Metrologia - BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPA, IUPAC, IUPAP, OIMC – *Guia para expressão de incerteza de medição*. ago. de 1998

ZUPPOLINI NETO, Alexandre. *Pavimentação urbana no estado de São Paulo – Novas considerações*. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Carlos, São Carlos. 1997.