

Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS do Programa de Estudos de Mestrado no Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infra-Estrutura de Aeroportuária.

FRANK CABRAL DE FREITAS AMARAL

Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados



Prof. Dr. EUGENIO VERTAMATTI
Orientador

Prof. Dr. HOMERO SANTIAGO MACIEL
Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA

Amaral, Frank Cabral de Freitas

Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP / Frank Cabral de Freitas Amaral. São José dos Campos, 2005. 135f.

Tese de mestrado – Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. Orientador: Prof. Dr. Eugênio Vertamatti.

1. Tecnologia de Solos Tropicais. 2. Areia. 3. Penetrômetro Dinâmico. I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMARAL, Frank Cabral de Freitas. **Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP**. 2005. 135 folhas. Tese de Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – Área de Infra-Estrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Frank Cabral de Freitas Amaral

TÍTULO DO TRABALHO: Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese de Mestrado / 2005

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Frank Cabral de Freitas Amaral
frankcabral99@yahoo.com.br

Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP

FRANK CABRAL DE FREITAS AMARAL

Composição da Banca Examinadora:

Prof.º Anderson Ribeiro Correia, Ph.D. – Presidente - ITA

Prof.º Eugênio Vertamatti, D.C. – Orientador - ITA

Prof.º Flávio Massayuki Kuwagima, Ph.D. – ITA

Prof.º Paulo Ivo Braga de Queiroz, D.C. – ITA

Prof.º Glicério Trichês, D.C. – UFSC

ITA

Dedico este trabalho a Deus, fonte de todo o saber,
a meus familiares, apoio incondicional e constante, mesmo à distância,
e a minha esposa, eterna namorada, refúgio de compreensão e carinho sempre!

Agradecimentos

Registro minha sincera gratidão a todos que, direta ou indiretamente, apoiaram a realização deste trabalho, particularmente:

- Ao professor *Vertamatti*, orientador, pela direção e incentivo contínuo;
- Aos amigos *Reinaldo*, *Guilherme* e *Haroldo*, pela contribuição valiosa nos ensaios de laboratório e de campo;
- Aos professores *Massayuki*, *Paulo Ivo* e *Rodrigo*, pelas explicações elucidativas;
- Aos amigos de pós-graduação *Ronaldo*, *Álvaro* e *Carlos*, pelas trocas de informação para o crescimento mútuo;
- Aos amigos *Rocha*, *Rodrigo*, *Ayres* e *Aldaléia* que, mesmo à distância, contribuíram para a elaboração deste;
- À professora *Maryangela* e à *Comissão de Aeroportos da Região Amazônica*, por terem acreditado e viabilizado o estudo de campo;
- A todos que fazem parte da Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica; e
- A todos os amigos e familiares que tanto oraram e torceram para o sucesso desta empreitada.

Resumo

Dadas as características físicas e operacionais vantajosas do ensaio DCP, tem-se verificado sua aplicabilidade em estudos geotécnicos que precedem à execução de uma obra viária, tais como avaliar a capacidade de suporte de solos “in situ”, analisar solos colapsíveis, etc., bem como no controle de qualidade de compactação no campo através do acompanhamento da espessura de camadas, da homogeneidade de compactação, da avaliação da capacidade de suporte e do levantamento de perfis de resistência, entre outros.

O ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – adaptou e construiu a sua própria versão do penetrômetro dinâmico, nomeada DCP-ITA, com a qual trabalhos têm sido desenvolvidos para o estabelecimento de correlações CBR x DCP para diversos tipos de solos, tais como solos lateríticos, solos saprolíticos e areias, solo este abordado no presente estudo.

Diferentemente de solos coesivos, as areias exigiram a definição de uma metodologia própria de ensaio. Foram selecionadas três amostras considerando a variabilidade granulométrica e genética (residual e sedimentar) e, para cada uma delas, foram obtidas correlações CBR x DCP.

Os resultados obtidos através dos ensaios CBR e DCP permitiram analisar a influência de fatores intervenientes no processo, tais como a pressão de confinamento e a variabilidade granulométrica. Buscou-se, também, relacionar os resultados obtidos com outros parâmetros, tais como a compactação relativa, o coeficiente de curvatura e o coeficiente de uniformidade dos grãos, obtendo-se resultados satisfatórios.

O estudo envolveu, ainda, a realização de ensaios DCP no campo, em um dos locais de origem das amostras selecionadas para o trabalho: o aeroporto de Oiapoque, no estado do Amapá. Os resultados mostraram-se promissores para o uso do DCP em obras viárias com a presença de areias compondo subleitos e mesmo em camadas drenantes.

Abstract

Due to advantageous physical and operational characteristics from DCP procedure, its applicability has been reported in geotechnical studies that take place before a pavement construction, such as evaluating “in situ” soil bearing capacity, analyzing collapsible soils, etc, as well in quality control of field compaction through controlling layer thickness, compaction homogeneity, evaluation of soil bearing capacity and strength profile, among others.

The ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – has adapted and built its own version of dynamic penetrometer, named DCP-ITA, with which some works have been developed in order to establish CBR x DCP correlations to several soils, such as lateritic soils, saprolitic soils and sands, this last one used in this study.

Different from cohesive soils, sand demanded the definition of specific test procedure. Three samples were selected considering grading and genetic (residual and sedimentary) variability and CBR x DCP correlations were obtained for each one.

The results obtained from CBR and DCP tests allowed to analyze the influence of some factors, such as confining pressure and grading variability. It was also intended to connect the obtained results with other parameters, such as relative compactness, coefficient of uniformity and coefficient of grading, with satisfactory results.

This study also involved DCP tests in Oiapoque Airport, in the state of Amapá, one of the origin places of the selected samples used in this work. These field tests showed promising results of DCP use in constructions involving sands as subgrade of pavements and drainage layers.

Sumário

Lista de Figuras	9
Lista de Gráficos.....	10
Lista de Quadros	12
Lista de Tabelas	13
1 Introdução.....	15
2 Contexto técnico-científico	17
3 Metodologia de ensaio	22
3.1 Amostras.....	22
3.1.1 Dados geográficos	25
3.1.2 Visualização dos grãos	26
3.1.3 Granulometria.....	30
3.1.4 Massa específica dos grãos	31
3.2 Equipamentos	32
3.3 Preparação dos corpos de prova	33
3.3.1 Corpos de prova com mesmo índice de vazios	33
3.3.2 Associação de correlações	38
3.4 Campo de variação do índice de vazios.....	38
3.4.1 Determinação de $e_{MÁX}$	38
3.4.2 Determinação de $e_{MÍN}$	39
3.5 Confinamento	40
4 Apresentação de resultados	43
4.1 Ensaio DCP	43
4.1.1 Amostra Jambeiro.....	44
4.1.2 Amostra Oiapoque.....	48
4.1.3 Amostra Breves	52
4.2 Ensaio CBR	56
4.2.1 Amostra Jambeiro.....	57
4.2.2 Amostra Oiapoque.....	60
4.2.3 Amostra Breves	63

5	Análise de resultados	66
5.1	Correlação CBR x DCP baseada no índice de vazios.....	66
5.1.1	Amostra Jambeiro.....	67
5.1.2	Amostra Oiapoque.....	68
5.1.3	Amostra Breves	69
5.1.4	Todas as amostras.....	70
5.2	Compacidade relativa	71
5.3	Correlação CBR x DCP baseada na compacidade relativa	75
5.3.1	Amostra Jambeiro.....	76
5.3.2	Amostra Oiapoque.....	77
5.3.3	Amostra Breves	78
5.3.4	Todas as amostras.....	79
6	Discussão de resultados	80
6.1	Correlações CBR x DCP	80
6.1.1	Correlação geral.....	82
6.1.2	Elasticidade.....	85
6.1.3	Tratamento estatístico.....	86
6.1.4	Comparativo entre correlações CBR x DCP	92
6.2	Ensaio CBR	95
6.3	Ensaio DCP	98
6.3.1	Influência da sobrecarga de confinamento	98
6.3.2	Influência da variabilidade granulométrica	101
7	Estudo de caso	105
7.1	Características.....	106
7.1.1	Município	106
7.1.2	Obra do aeroporto.....	107
7.2	Ensaio DCP	107
7.2.1	Areia compondo o subleito.....	108
7.2.2	Areia em condição natural.....	117
7.3	Perfis de resistência – CBR	125
7.3.1	Impacto financeiro da avaliação do CBR do subleito	128
8	Conclusão	130
8.1	Sugestão de trabalhos futuros	131
	Referências	132

Lista de Figuras

Figura 1: Amostras de areia (Esquerda para a direita: Breves, Oiapoque e Jambeiro)	22
Figura 2: Local de implantação da pista de pouso de Breves.....	23
Figura 3: Bordo da pista de pouso de Oiapoque.....	24
Figura 4: Jazida de Jambeiro	25
Figura 5: Locais de origem das amostras	26
Figura 6: Visualização dos grãos da amostra Jambeiro.....	27
Figura 7: Visualização dos grãos da amostra Oiapoque.....	28
Figura 8: Visualização dos grãos da amostra Breves	29
Figura 9: Equipamentos utilizados nos estudos.....	32
Figura 10: Placas de alumínio dos ensaios DCP (à esquerda) e CBR (à direita)	41
Figura 11: Suporte com sobrecarga sobre cilindro Proctor Modificado	41
Figura 12: Sobrecarga padrão CBR.....	42
Figura 13: Curva CBR típica de areias compactas	95
Figura 14: Curva CBR típica de areias fofas	96
Figura 15: Terminal de passageiros do aeroporto de Oiapoque	105
Figura 16: Canteiro de obras da COMARA em Oiapoque.....	105
Figura 17: Localização de Oiapoque	106
Figura 18: Croquis dos locais de cravação do DCP	108
Figura 19: Cravação do DCP – Pavimento intacto.....	109
Figura 20: Cravação do DCP – Areia desconfinada parcialmente	109
Figura 21: Cravação do DCP – Faixa de pista	117
Figura 22: Cravação do DCP – Jazida, superfície seca	119
Figura 23: Cravação do DCP – Jazida, submersa.....	119
Figura 24: Cravação do DCP – Jazida submersa (Furo 1)	121
Figura 25: Cravação do DCP – Jazida submersa (Furos 2,3 e 4)	121
Figura 26: Cravação do DCP – Sob a trilha de roda	123

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Curvas granulométricas das amostras	30
Gráfico 2: Influência do tempo de vibração	35
Gráfico 3: Influência do número de camadas nos ensaios DCP.....	37
Gráfico 4: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 10 kg	44
Gráfico 5: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 20 kg	45
Gráfico 6: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 30 kg	46
Gráfico 7: DCP x e – Amostra Jambeiro.....	47
Gráfico 8: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 10 kg	48
Gráfico 9: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 20 kg	49
Gráfico 10: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 30 kg	50
Gráfico 11: DCP x e – Amostra Oiapoque.....	51
Gráfico 12: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 10 kg.....	52
Gráfico 13: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 20 kg.....	53
Gráfico 14: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg.....	54
Gráfico 15: DCP x e – Amostra Breves	55
Gráfico 16: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 10 kg	57
Gráfico 17: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 20 kg	57
Gráfico 18: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 30 kg	58
Gráfico 19: CBR x e – Amostra Jambeiro.....	59
Gráfico 20: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 10kg	60
Gráfico 21: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 20kg	60
Gráfico 22: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 30 kg	61
Gráfico 23: CBR x e – Amostra Oiapoque.....	62
Gráfico 24: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 10 kg.....	63
Gráfico 25: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 20 kg.....	63
Gráfico 26: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg.....	64
Gráfico 27: CBR x e – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg.....	65
Gráfico 28: Correlação CBR x DCP – Amostra Jambeiro	67
Gráfico 29: Correlação CBR x DCP – Amostra Oiapoque	68
Gráfico 30: Correlação CBR x DCP – Amostra Breves.....	69
Gráfico 31: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras.....	70
Gráfico 32: DCP x CR – Amostra Jambeiro	72
Gráfico 33: DCP x CR – Amostra Oiapoque	73
Gráfico 34: DCP x CR – Amostra Breves.....	74
Gráfico 35: Correlação CBR x DCP – Amostra Jambeiro	76
Gráfico 36: Correlação CBR x DCP – Amostra Oiapoque	77
Gráfico 37: Correlação CBR x DCP – Amostra Breves.....	78
Gráfico 38: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras.....	79
Gráfico 39: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras.....	81

Gráfico 40: Coeficiente angular x C_u / C_c	83
Gráfico 41: Coeficiente linear x C_u / C_c^2	83
Gráfico 42: CBR x DCP – Amostra Jambeiro.....	88
Gráfico 43: CBR x DCP – Amostra Jambeiro, após eliminação de pontos	88
Gráfico 44: CBR x DCP – Amostra Oiapoque.....	89
Gráfico 45: CBR x DCP – Amostra Oiapoque, após eliminação de pontos	89
Gráfico 46: CBR x DCP – Amostra Breves	90
Gráfico 47: CBR x DCP – Amostra Breves, após eliminação de pontos.....	90
Gráfico 48: Correlações CBR x DCP, antes do tratamento.....	91
Gráfico 49: Correlações CBR x DCP, após o tratamento.....	91
Gráfico 50: Comparativo de correlações CBR x DCP	93
Gráfico 51: DCP x CR – Amostra Jambeiro, todas as sobrecargas.....	99
Gráfico 52: DCP x CR – Amostra Oiapoque, todas as sobrecargas.....	99
Gráfico 53: DCP x CR – Amostra Breves, todas as sobrecargas	100
Gráfico 54: DCP x CR – Sobrecarga 10 kg, todas as amostras.....	103
Gráfico 55: DCP x CR – Sobrecarga 20 kg, todas as amostras.....	103
Gráfico 56: DCP x CR – Sobrecarga 30 kg, todas as amostras.....	104
Gráfico 57: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -07+00 BD).....	110
Gráfico 58: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -08+00 BE)	111
Gráfico 59: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -10+00 BD).....	112
Gráfico 60: DCP e Perfil de resistência – Acostamento (E 19+00 BE)	113
Gráfico 61: DCP e Perfil de resistência – <i>Stopway</i> cabeceira 03	114
Gráfico 62: DCP e Perfil de resistência – <i>Stopway</i> cabeceira 21	115
Gráfico 63: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Faixa de pista).....	118
Gráfico 64: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Jazida)	120
Gráfico 65: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Jazida submersa)	122
Gráfico 66: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Sob trilha de roda).....	124
Gráfico 67: Perfis de resistência CBR – Subleito do pavimento.....	126
Gráfico 68: Perfis de resistência CBR – Areia a partir da superfície	127

Lista de Quadros

Quadro 1: Coordenadas geodésicas e altitude das jazidas.....	25
Quadro 2: Uniformidade e distribuição granulométrica.....	31
Quadro 3: Correlações CBR x DCP - Resumo.....	80
Quadro 4: Correlações CBR x DCP - Final.....	81
Quadro 5: Panorama – CBR x DCP e Parâmetros granulométricos	82
Quadro 6: Correlações CBR x DCP – Outros trabalhos.....	92
Quadro 7: Exemplo – Ensaio CBR, amostra Breves, sobrecarga 20kg.....	97
Quadro 8: Dados de Oiapoque (IBGE, 2004)	106
Quadro 9: Estimativa da economia com a avaliação do CBR do subleito	129

Lista de Tabelas

Tabela 1: Coeficientes de uniformidade e de curvatura	31
Tabela 2: Massa específica dos grãos de areia	31
Tabela 3: Percentual de densificação da areia durante a vibração	35
Tabela 4: Massa específica aparente seca em corpos moldados com 1 ou 3 camadas.....	36
Tabela 5: Índices de vazios máximos	39
Tabela 6: Índices de vazios mínimos.....	40
Tabela 7: Pressões de confinamento.....	42
Tabela 8: DCP x e – Amostra Jambeiro	47
Tabela 9: DCP x e – Amostra Oiapoque	51
Tabela 10: DCP x e – Amostra Breves.....	55
Tabela 11: CBR x e – Amostra Jambeiro	58
Tabela 12: CBR x e – Amostra Oiapoque	61
Tabela 13: CBR x e – Amostra Breves	64
Tabela 14: Compacidade relativa – Amostra Jambeiro.....	72
Tabela 15: Compacidade relativa – Amostra Oiapoque.....	73
Tabela 16: Compacidade relativa – Amostra Breves	74
Tabela 17: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Jambeiro	94
Tabela 18: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Oiapoque	94
Tabela 19: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Breves.....	94
Tabela 20: Correlação de DCP obtido no campo com CBR – Subleito do pavimento	125
Tabela 21: Correlação de DCP obtido no campo com CBR – Areia a partir da superfície ...	127

1 Introdução

As soluções propostas aos diversos problemas de engenharia usualmente caracterizam-se pela busca da otimização de processos que minimizem o custo e atendam às necessidades, através da escolha de condições, equipamentos e métodos de execução, bem como do material a ser utilizado.

Particularmente no setor de construção rodoviária e aeroportuária, em regiões onde há escassez de materiais de boa qualidade, o problema torna-se extremamente mais restrito, pois a disponibilidade de diferentes tipos de solos deixa de ser uma variável para se tornar condição de contorno do problema, dificultando sobremaneira a tarefa de se propor uma solução economicamente adequada.

Em regiões de bacia sedimentar, como por exemplo, a Bacia Amazônica, que apresenta abundância de areia e solos podzólicos de baixa capacidade de suporte, tem sido comum a adoção de soluções técnicas envolvendo o uso de materiais essencialmente granulares, mais especificamente, o uso de areia, material que tem tido aplicação corrente em camadas drenantes do pavimento, mas que também tem servido de subleito a inúmeros pavimentos aeroportuários implantados naquela região.

A constatação desse fato pode ser observada nas estruturas dos pavimentos executados pela COMARA – Comissão de Aeroportos da Região Amazônica – em diversas obras de infra-estrutura aeroportuária, tais como: Ipiranga/AM, Eirunepé/AM, Tabatinga/AM, São Gabriel da Cachoeira/AM, Iauaretê/AM, Maturacá/AM, Palmeiras do Javari/AM, Estirão do Equador/AM, Vila Bittencourt/AM, Cachimbo/MT, Oiapoque/AP e Breves/PA, entre muitas outras localidades de características semelhantes naquela região singular do país.

Em face dessa singularidade da realidade tropical, ou sendo ainda mais restritivo, considerando em especial a pedologia da Região Amazônica, assunto principal do estudo de Vertamatti (1988), é imperioso o desenvolvimento de pesquisas que apontem para a disseminação do uso de tecnologias mais adequadas ao ambiente tropical, dentre as quais está inserido o uso do equipamento DCP – *Dynamic Cone Penetrometer*.

Obviamente os materiais granulares e, mais especificamente as areias, não são materiais presentes exclusivamente em ambiente tropical, muito pelo contrário, são encontrados e utilizados ao longo de toda a crosta terrestre. A questão aqui considerada é que em um cenário de ausência de solos de boa capacidade de suporte e de abundância de areia, esta última tende a tornar-se a alternativa preferencial, senão a única para a concepção da estrutura de um pavimento, empregando-a quer na condição natural ou estabilizada quimicamente.

É dentro desse cenário, portanto, que se insere o presente trabalho, o qual tem por objetivo principal estudar a capacidade de suporte de areias médias e finas que compõem o subleito de obras viárias, através de ensaios empregando o equipamento DCP.

2 Contexto técnico-científico

Caracterizando-se o conjunto das realizações humanas ao longo do tempo, pode-se facilmente identificar que as conquistas e descobertas mais marcantes da humanidade desenvolveram-se em meio aos obstáculos considerados mais intransponíveis, à época.

É o caso da invenção da roda, da descoberta da energia elétrica, da invenção do avião, da construção de embarcações capazes de cruzar os oceanos e, mais recentemente, da construção de estradas, aeroportos ou até grandes centros urbanos sobre ilhas artificiais, entre muitos outros feitos humanos que tiveram origem a partir de um problema que precisava ser solucionado.

Seguindo essa linha de raciocínio, é fácil entender por que a grande maioria do conjunto do conhecimento humano descende de experimentos, estudos e observações diversas levadas a cabo no Velho Continente. Considerando que ali as dificuldades inerentes ao desenvolvimento surgiram primeiramente, é bastante claro entender por que ali também surgiram diversas teorias, métodos, ensaios, equipamentos e outros objetos do conhecimento difundidos pelo mundo afora, incluindo-se o setor de Geotecnia.

Na contramão da história, estão os países em desenvolvimento que, se por um lado não podem se isolar e acabam por fazer uso de tecnologias importadas, vivem se defrontando com a tão perceptível inadequação da tecnologia importada à sua realidade.

Tal constatação, especificamente em se tratando da Mecânica dos Solos, é que tem gerado a motivação necessária ao desenvolvimento de diversos estudos que visam o estabelecimento da Tecnologia de Solos Tropicais, fato este que no Brasil iniciou-se a partir da década de 60, numa iniciativa de autores como Medina (1961), Tulchinski (1965), Santana (1976) e Nogami e Villibor (1981).

A realidade da geologia e pedologia do território brasileiro é marcada por grandes heterogeneidades e tem sua complexidade explicada, em parte, por ter sido “palco de múltiplos processos geológicos que deram origem a uma grande variedade de rochas, cuja distribuição geográfica é complexa e determinante na história de ocupação e desenvolvimento do país” (BARTORELLI, A.; HARALYI, N., 1998, p. 57).

Essa grande variabilidade de solos e demais características geológicas dentro do território brasileiro torna a tarefa de se estabelecer uma tecnologia adaptada aos solos tropicais, aqui no Brasil, mais difícil ainda.

No entanto, apesar das dificuldades encontradas, alguns trabalhos seqüenciais já têm sido desenvolvidos a respeito do tema, com grande contribuição ao conhecimento a que se propõe chegar, tais como os de Nogami e Villibor (1995), Vertamatti e Oliveira (1997), Oliveira (1998), Rezende (1998), Lima (2000) , Luís Marson (2004) e Michele Marson (2004).

Conforme abordado no capítulo introdutório, o presente estudo compõe um conjunto de trabalhos sobre o uso do equipamento DCP – *Dynamic Cone Penetrometer* para diferentes tipos de solos, equipamento este que está inserido dentro do contexto da Tecnologia de Solos Tropicais.

O desenvolvimento do DCP surgiu da necessidade de avaliar, de forma simples e rápida, as condições do subleito de um determinado pavimento. O uso deste equipamento tem ganho cada vez mais adeptos nos últimos anos em escala nacional e internacional e, conseqüentemente, a necessidade de se dispor de análises e resultados que gerem correlações mais confiáveis torna-se cada vez maior.

A configuração básica do DCP tem sofrido alterações pouco significativas desde sua concepção na década de 50. Lima (2000) faz um relato bastante completo de toda a evolução deste equipamento, desde a sua concepção, e apresenta a versão desenvolvida no ITA, utilizada pelo presente trabalho.

Recentemente, foi apresentado à comunidade científica um procedimento padrão de ensaio DCP – a norma D-6951 (ASTM, 2003), de responsabilidade de um dos órgãos de regulamentação e padronização de procedimentos experimentais mais conceituados mundialmente, a ASTM Internacional.

Desde a criação do equipamento até os dias atuais, vários trabalhos têm sido realizados em diversas partes do globo, objetivando a descoberta de correlações empíricas entre o valor de CBR e a resistência à penetração do DCP, tais como: Kleyn (1975 apud AMINI, 2003, p.3), Harison (1987), Livneh (1987), Livneh et al. (1992), Webster et al. (1992), Webster et al. (1994), Coonse (1999 apud AMINI, 2003, p.5), Oliveira (1998), Trichês e Cardoso (1998), Lima(2000) e Karunaprema e Edirisinghe (2002).

Em relação às correlações introduzidas pelos autores acima citados, mais especificamente, com base nas correlações desenvolvidas pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (WEBSTER ET AL, 1992; WEBSTER ET AL, 1994), foi desenvolvida uma metodologia de análise de pavimentos baseada no equipamento DCP. Tal órgão militar dispõe para “download” na rede mundial de computadores, um “software” denominado PCASE – “Pavement-Transport Computer Assisted Structural Engineering” (U. S. ARMY, 1999), o qual permite, por exemplo, a avaliação do PCN – “Pavement Condition Number” de uma determinada pista de pouso a partir dos resultados obtidos pela cravação do DCP e respectiva correlação com o CBR.

Tem-se observado, no entanto, que considerações generalizadas neste campo de estudo não têm gerado homogeneidade de resultados. O uso de correlações distintas para um mesmo material, pode apresentar valores de CBR com diferenças percentuais significativas, conforme já observado por Lima (2000), entre outros.

Constatações, como as que também fazem parte do presente estudo, têm revelado que a correlação entre CBR e DCP não é única para qualquer tipo de solo. Ao contrário, sua definição deriva de aspectos ligados à natureza do material. No caso de areias, por exemplo, foi observada a influência direta da granulometria e gênese nas correlações CBR x DCP.

As areias, por sinal, têm mostrado ser um vasto campo de estudo a ser explorado. O comportamento das areias difere, e muito, do que se tem constatado para materiais coesivos. Cordeiro (2004) faz uma abordagem ampla sobre a obtenção de parâmetros geotécnicos através de ensaios de campo e de laboratório, destacando inclusive as dificuldades inerentes aos métodos e processos utilizados.

Uma análise mais específica sobre a capacidade de suporte de areias, sob altos níveis de tensão (função da profundidade), foi objeto de estudo de alguns autores, tais como De Beer (1965), Lee e Seed (1967), Vesic e Clough (1968), entre outros. Na linha desses estudos, Baligh (1976) fez um estudo sobre a envoltória de tensões das areias em fundações.

Bicalho e Azevedo (1994) analisaram as vantagens e limitações de dois modelos constitutivos elasto-plásticos em simular as características de deformabilidade e resistência de um solo arenoso, obtidas em laboratório.

Livneh et al. (1995) apresentaram um estudo de grande relevância sobre o efeito do confinamento vertical sobre os valores da resistência à penetração do DCP, na avaliação de

pavimentos e subleitos. Segundo este estudo, é evidente o aumento da resistência quando do confinamento vertical sobre material granular.

O presente estudo vem confirmar alguns dos resultados já verificados por outros trabalhos e traz novas considerações a respeito da utilização do DCP na previsão do comportamento de areias. Situa-se, portanto, dentro do contexto de crescimento do interesse sobre resultados para utilização dessa já estabelecida tecnologia, mas ainda possível de análises e validações.

Buscou-se chegar a resultados que complementem o ciclo de pesquisas iniciado no ITA a respeito do uso desse equipamento. Resumidamente, pode-se dividir em três grupos, o espaço amostral de solos cujas correlações CBR x DCP são objetos de interesse: solos lateríticos, solos saprolíticos e areias.

Os solos lateríticos têm aplicabilidade em camadas estruturais do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito), os saprolíticos podem ser eventualmente ser aproveitados como reforço de subleito, mas são encontrados usualmente constituindo os subleitos de alguns pavimentos, enquanto as areias têm aplicabilidade como camadas drenantes ou constituindo o subleito do pavimento.

Em conjunto com os resultados de outros estudos, como o de Lima (2000), e outros, como o de Carvalho (em fase de elaboração)¹ e o de Rezende (em fase de elaboração)², esta dissertação permitirá o uso da tecnologia DCP de forma prática e uniforme, dentro do âmbito do Sistema de Engenharia da Aeronáutica, abrangendo diferentes tipos de solos aplicáveis em camadas de aterro ou como subleitos.

¹ Dissertação de Mestrado de Ronaldo Gonçalves de Carvalho, que versa sobre o uso do DCP para avaliação do comportamento de solos saprolíticos.

² Tese de Doutorado de Álvaro Andrade de Rezende, que versa sobre a avaliação do comportamento de solos lateríticos concrecionados, com base na metodologia MCT e ensaio DCP.

3 Metodologia de ensaio

Este capítulo visa estabelecer os critérios para utilização de materiais, equipamentos e condições de ensaio, apresentando uma metodologia sistemática de laboratório adotada no decorrer do estudo.

3.1 Amostras

Foram selecionadas três amostras, sendo duas delas próprias de deposição sedimentar (Breves-PA e Oiapoque-AP) e uma corresponde a uma alteração de quartzito, fortemente intemperizado no ambiente tropical (Jambeiro-SP). Pequenas quantidades de cada uma das amostras, podem ser visualizadas na Figura 1.



Figura 1: Amostras de areia (Esquerda para a direita: Breves, Oiapoque e Jambeiro)

A amostra de Breves corresponde a uma deposição sedimentar e constituiu o subleito dos pavimentos do aeroporto daquele sítio, por ocasião de sua implantação. A amostra fora

encaminhada pela COMARA, responsável pela execução da obra de implantação da pista, que constitui alternativa de pouso para o aeroporto internacional de Belém, capital do Pará. A Figura 2 apresenta uma fotografia do local de implantação da pista de pouso de Breves, antes do início da obra.



Figura 2: Local de implantação da pista de pouso de Breves

A amostra de Oiapoque, também formada por deposição sedimentar, foi utilizada na obra de ampliação do aeroporto daquele sítio, também sob responsabilidade da COMARA. Esta pista constitui alternativa de pouso para o aeroporto de Macapá, capital do Amapá. A Figura 3 apresenta a fotografia do bordo da pista, denotando o entorno em areia, abundante em toda a faixa de pista.



Figura 3: Bordo da pista de pouso de Oiapoque

Como referencial aos estudos, buscou-se selecionar um areia de granulometria similar às anteriores, mas de formação residual. Esta amostra foi encontrada nas proximidades do município de Jambeiro. A amostra de Jambeiro corresponde à jazida de alteração de quartzito e localiza-se a 4km do centro do município, na região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo. A área foi explorada por empresas de capital privado, por ocasião das obras de terraplenagem de loteamentos residenciais próximos à Rodovia dos Tamoios. A Figura 4 ilustra o perfil da jazida de Jambeiro em exploração.



Figura 4: Jazida de Jambeiro

3.1.1 Dados geográficos

As coordenadas geodésicas e a altitude das jazidas de origem das três amostras são apresentadas na Quadro 1.

	JAMBEIRO	OIAPOQUE	BREVES
Latitude	S 23°15'36"	N 03°51'01"	S 01°38'13"
Longitude	W 45°42'36"	W 51°47'53"	W 50°26'44"
Altitude (m)	772	13	10

Quadro 1: Coordenadas geodésicas e altitude das jazidas

Para facilitar a compreensão quanto à distribuição geográfica das três amostras em questão, as localizações das jazidas foram representadas em um mapa do Brasil, incluindo alguns de seus países limítrofes, conforme apresentado na Figura 5. A posse dos dados de coordenadas geodésicas correspondentes permitiu a localização precisa dos locais desejados, a partir de imagens de satélite disponíveis através do software de distribuição gratuita Google Earth® (GOOGLE, 2005).



Figura 5: Locais de origem das amostras

3.1.2 Visualização dos grãos

Para cada uma das três amostras, são apresentadas imagens obtidas com câmera digital microscópica, com aumento aproximado de 60 vezes e 80 vezes. Para facilitar a observação e comparação entre tamanhos de grãos, as amostras foram visualizadas sobre malha da peneira #200 ASTM, que corresponde a uma abertura de 0,074 mm.

A amostra de Jambeiro apresenta os grãos maiores e mais irregulares (ver Figura 6), em decorrência de sua formação residual, sujeita a um grau de intemperismo inferior ao de amostras de deposição sedimentar, que é o caso das outras amostras do estudo.



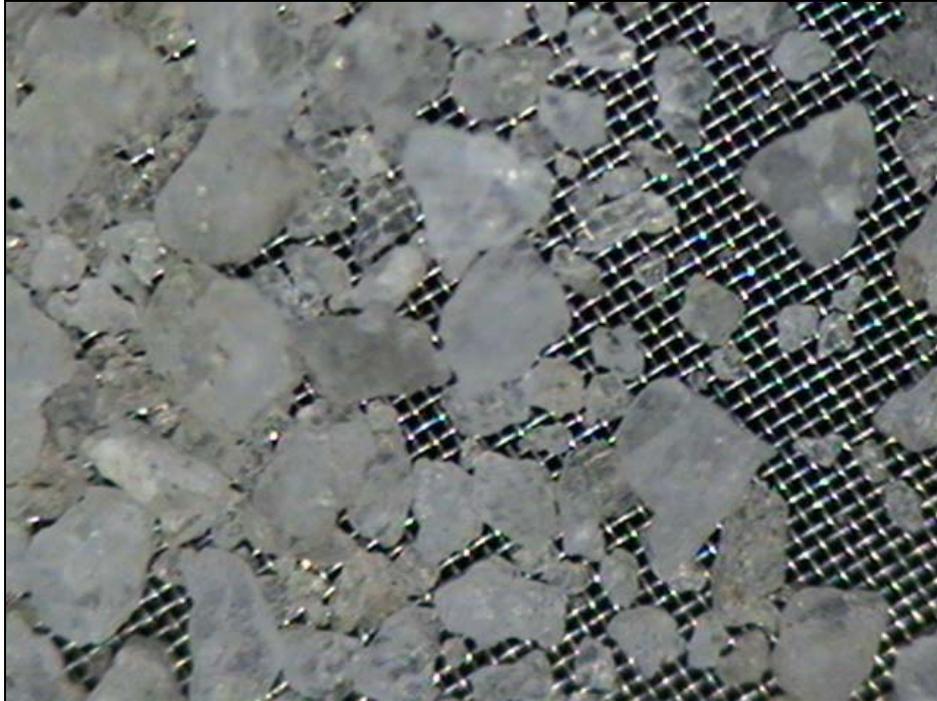
a) Aumento 60X, sobre malha #200



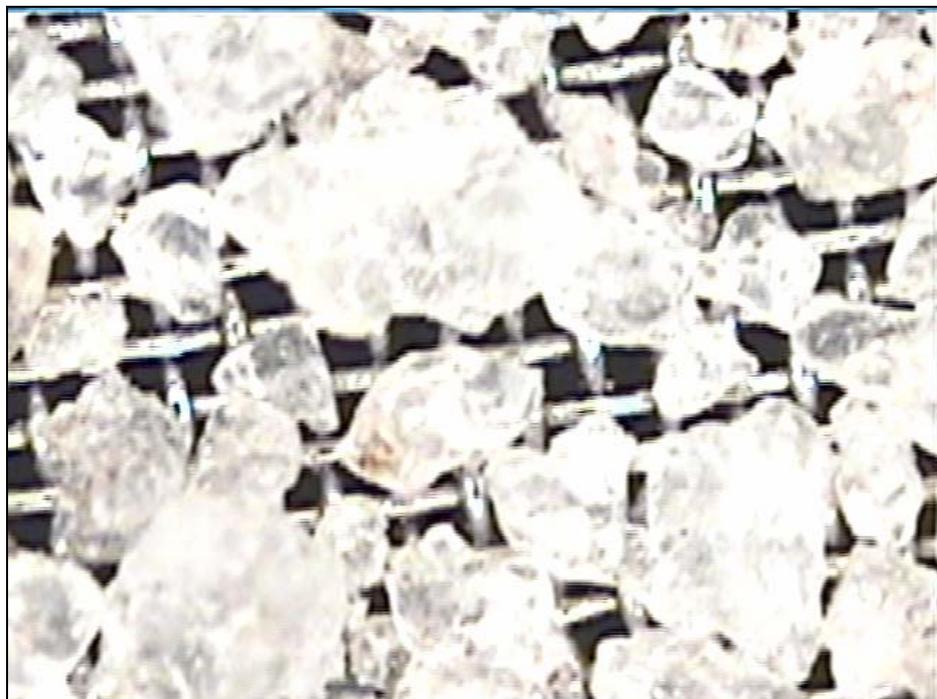
b) Aumento 80X, sobre malha #200

Figura 6: Visualização dos grãos da amostra Jambeiro

A amostra de Oiapoque (ver Figura 7), fruto de deposição sedimentar, apresenta grãos menores e pontas mais arredondadas que os da amostra de Jambeiro (ver Figura 6).



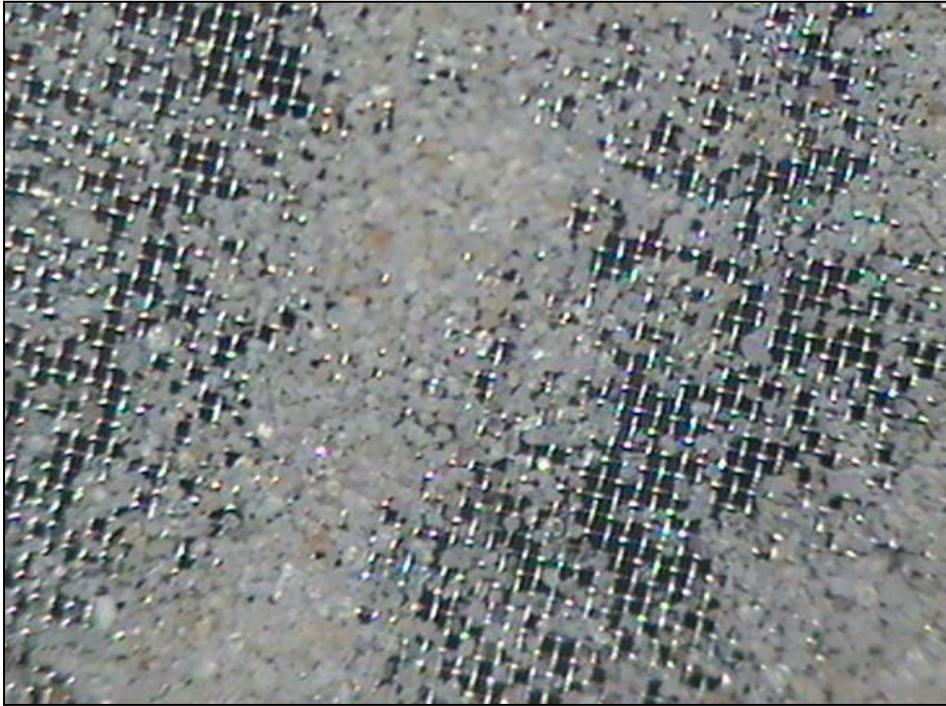
a) Aumento 60X, sobre malha #200



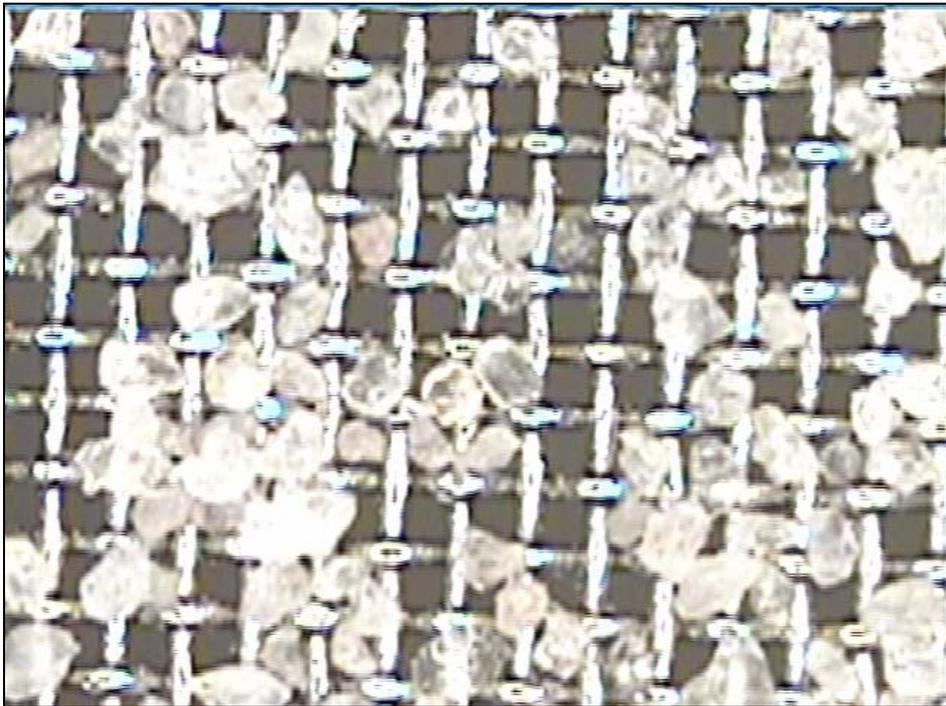
b) Aumento 80X, sobre malha #200

Figura 7: Visualização dos grãos da amostra Oiapoque

A amostra de Breves, também de deposição sedimentar, apresenta grãos ainda menores e mais arredondados que os das duas outras amostras, o que denota o maior grau de intemperismo dentre as amostras do estudo (ver Figura 8).



a) Aumento 60X, sobre malha #200



b) Aumento 80X, sobre malha #200

Figura 8: Visualização dos grãos da amostra Breves

3.1.3 Granulometria

Para uma melhor visualização da variabilidade granulométrica presente no estudo, apresenta-se no Gráfico 1 as curvas granulométricas das três amostras. A amostra Jambeiro é representada antes e depois da separação na peneira #4 (pedregulhos).

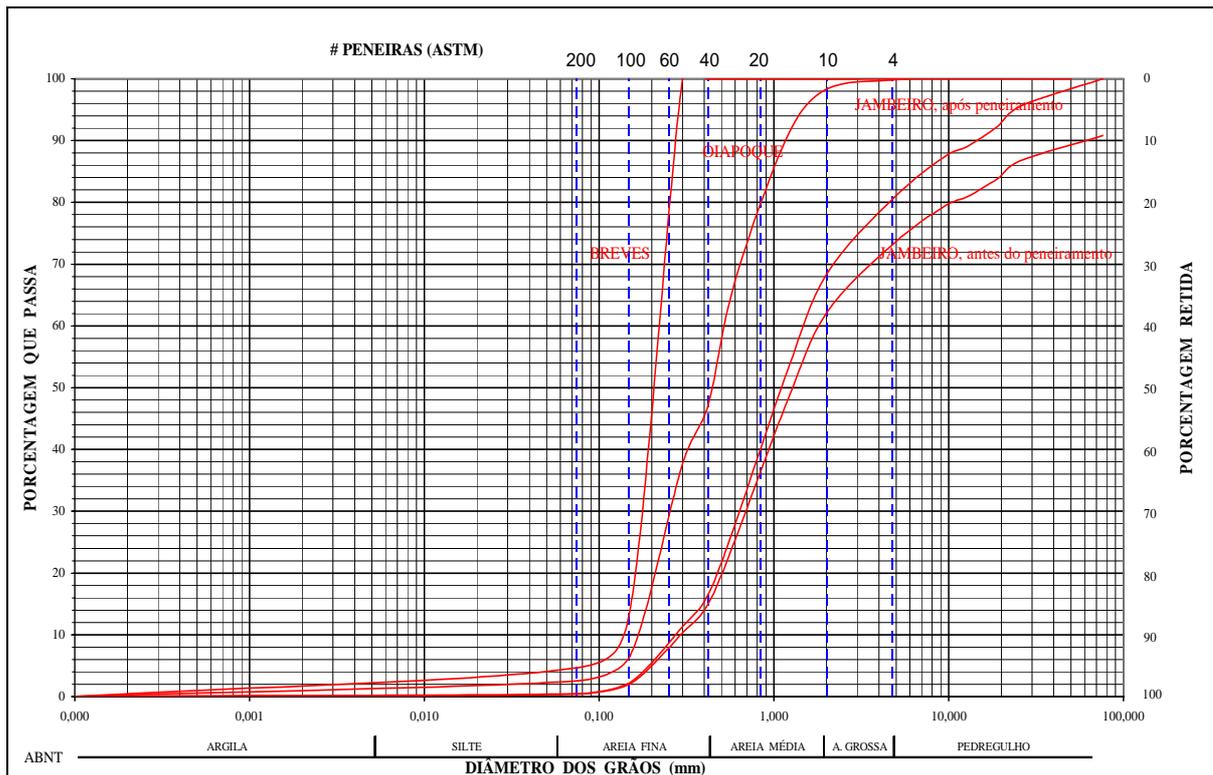


Gráfico 1: Curvas granulométricas das amostras

Com base nas curvas granulométricas das amostras, foram calculados o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c), pelas expressões:

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad \text{e} \quad C_c = (d_{30})^2 / (d_{60} \times d_{10})$$

Onde, d_{60} = diâmetro correspondente a 60% de porcentagem passante

d_{30} = diâmetro correspondente a 30% de porcentagem passante

d_{10} = diâmetro correspondente a 10% de porcentagem passante

A Tabela 1 apresenta os valores de coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c) para cada uma das curvas granulométricas plotadas no Gráfico 1.

Tabela 1: Coeficientes de uniformidade e de curvatura

Coeficiente	Amostras		
	Jambeiro	Oiapoque	Breves
d_{60} (mm)	1,60	0,52	0,23
d_{30} (mm)	0,65	0,25	0,17
d_{10} (mm)	0,27	0,17	0,14
C_u	5,9	3,1	1,6
C_c	1,0	0,7	0,9

Sobre os resultados acima expostos, considera-se o seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_u < 5: & \text{granulometria muito uniforme} \\ 5 < C_u < 15: & \text{uniformidade média} \\ C_u > 15: & \text{granulometria desuniforme} \\ 1 < C_c < 3: & \text{materiais bem graduados} \end{array} \right.$$

Com base nos critérios acima e dados apresentados, pode-se classificar as areais conforme Quadro 2.

Aspecto	Amostra		
	Jambeiro	Oiapoque	Breves
Uniformidade dos grãos	média	muito uniforme	muito uniforme
Distribuição Granulométrica	bem graduada	mal graduada	mal graduada

Quadro 2: Uniformidade e distribuição granulométrica

3.1.4 Massa específica dos grãos

A norma NBR 6508 (ABNT, 1984) apresenta a metodologia para determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de #4,8mm por meio de picnômetro. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Massa específica dos grãos de areia

Amostra	Breves		Oiapoque		Jambeiro	
	1	2	1	2	1	2
Picnômetro						
δ (g/cm ³)	2,61	2,59	2,63	2,64	2,64	2,67
$\delta_{\text{MÉDIO}}$ (g/cm ³)	2,60		2,64		2,65	

A amostra de Breves apresentou resultado coerente com ensaios realizados por ocasião da implantação da obra, conforme verificado em fichas de ensaios em arquivo presente no laboratório de Mecânica dos Solos do ITA.

3.2 Equipamentos

Foram utilizados equipamentos usualmente disponíveis em um laboratório de mecânica dos solos, tais como: balanças, cilindros Proctor, sobrecargas, jogo de peneiras, bandejas, espátulas, paquímetros, entre outros. Também foram utilizados equipamentos mais específicos, tais como: prensa CBR, DCP de bancada, mesa vibratória³ e câmera digital microscópica. Tais equipamentos são apresentados na Figura 9.



Figura 9: Equipamentos utilizados nos estudos

³ Foi utilizada neste estudo uma Mesa Vibratória de dimensões 100x50cm, com motor elétrico 220V / 3,8A / trifásico / 1 CV / 60Hz / 1730 rpm, amplitude média $0,33 \pm 0,05$ mm para frequência de 60Hz.

3.3 Preparação dos corpos de prova

Os procedimentos envolvidos na moldagem de corpos de prova nas condições de estudo dos demais trabalhos que compõem o conjunto do qual este trabalho faz parte, conforme citado no capítulo introdutório deste documento, não poderiam ser aqui seguidos. E tal situação se devia principalmente ao fato dos demais trabalhos, diferentemente deste, tratarem de solos coesivos com maior ou menor grau de coesão (argilas a areias argilosas).

Para os materiais não coesivos, o procedimento não pode ser o mesmo, já que não se estabelece curvas de compactação Proctor para areias puras, além de ser muito difícil moldar um corpo de prova, levá-lo à prensa para o ensaio CBR e, em seguida, invertê-lo para a cravação do DCP.

Foi necessário então definir-se uma metodologia própria para os trabalhos de laboratório. Os equipamentos e as análises sobre os aspectos intervenientes no processo de densificação das areias, bem como, os resultados dessas análises constam dos subitens que seguem.

3.3.1 Corpos de prova com mesmo índice de vazios

Considerando a dificuldade de se obter resultados de DCP e CBR a partir de um mesmo corpo de prova de areia e, aliado ao fato de não haver padrões previstos em norma a respeito, procurou-se estabelecer uma rotina própria para a moldagem dos mesmos, em cilindros Proctor Modificado.

Tal procedimento seria seguido para que pudessem ser obtidos resultados correspondentes de DCP e CBR para as areias (na condição seca ao ar) e assim permitir a obtenção da correlação desejada. Desejava-se definir uma rotina de ensaio padrão para

obtenção de corpos de provas com o mesmo índice de vazios, dado pela equação: $e = (\delta / \gamma_s) - 1$, onde: δ = massa específica do grão e γ_s = massa específica aparente seca.

Uma vez definida tal grandeza de análise, buscou-se estabelecer os aspectos relacionados à moldagem que levariam à obtenção de corpos de prova similares: intensidade e tempo de vibração e número de camadas.

3.3.1.1 Intensidade de vibração

Pequenas quantidades (~50g) de cada amostra foram colocadas em peneiras de malha #200 ASTM e submetidas à vibração no agitador de peneiras. O objetivo do teste era o de analisar a intensidade de vibração que levava à maior quantidade de material passante no menor espaço de tempo, cujo controle e observação foram visuais.

Nos níveis mais baixos de vibração, observou-se pouco movimento entre as partículas dos materiais analisados e, conseqüentemente, ter-se-ia uma demora na densificação da areia. Nos níveis mais altos de vibração, porém, houve agitação excessiva e movimento errático das partículas, de forma que o rearranjo das mesmas tornava-se difícil e também demorado.

Dentre as diferentes situações observadas, visualizou-se comportamento mais adequado para uma intensidade média de vibração, quando havia uma agitação mínima que permitia a movimentação inter-granular mas que, por sua vez, não era grande o suficiente para promover a movimentação excessiva dos grãos, o que dificultaria o processo de densificação.

3.3.1.2 Tempo de vibração

Quantidades suficientes para a moldagem de corpos de prova de cada uma das três amostras foram colocadas em cilindros Proctor, submetidas à vibração conforme definido no subitem anterior e, a cada minuto de vibração, apontada a redução da altura da coluna de areia no molde.

O objetivo do teste era o de determinar o tempo limite a partir do qual a densificação não mais ocorria ou era desprezível, para a intensidade de vibração adotada. Para permitir a análise adimensional e comparativa entre as três amostras, o valor do recalque era dividido pelo valor da altura inicial da coluna de areia dentro do cilindro.

Os dados assim calculados e expressos em percentuais são apresentados na Tabela 3 e podem ser melhor interpretados conforme ilustrado no Gráfico 2.

Tabela 3: Percentual de densificação da areia durante a vibração

Tempo (min)	Densificação da areia no cilindro (%)		
	Jambeiro	Oiapoque	Breves
1	0,0	0,0	0,0
2	2,0	2,3	3,7
3	2,2	2,9	4,1
4	2,3	3,3	4,3
5	2,5	3,6	4,4
6	2,7	3,9	4,4
7	2,7	4,0	4,5
8	2,8	4,1	4,6
9	3,0	4,2	4,7
10	3,0	4,2	4,8
11	3,1	4,3	4,9
12	3,1	4,3	4,9

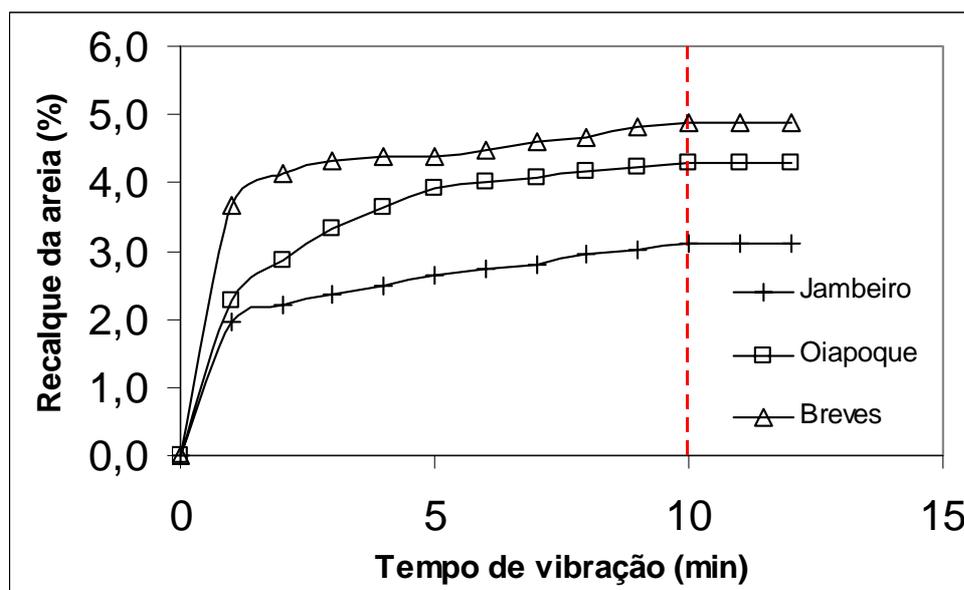


Gráfico 2: Influência do tempo de vibração

Com base nos resultados apresentados, pôde-se observar que, a partir de 10 min de vibração, na intensidade média selecionada, não havia mais densificação considerável.

3.3.1.3 Número de camadas

Uma vez definida a intensidade e o tempo de vibração, partiu-se para a determinação do número de camadas a ser adotado na moldagem dos corpos de prova.

Em um primeiro momento, foram testadas as situações de moldagem com 1, 3 camadas e, caso houvesse variações significativas, seriam verificadas as situações envolvendo número superior de camadas. Os resultados apontaram para variações desprezíveis da massa específica aparente seca calculada para os corpos moldados com 1 e 3 camadas, conforme dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Massa específica aparente seca em corpos moldados com 1 ou 3 camadas

Amostra	JAMBEIRO	OIAPOQUE	BREVES
Cilindro	F1	F2	F1
Intensidade de Vibração	Média	Média	Média
Tempo de Vibração	10 min	10 min	10 min
Sobrecarga Padrão	Sim	Sim	Sim
Massa do Cilindro (kg)	14,44	14,52	14,44
Altura Interna (mm)	114,2	114,2	114,2
Diâmetro Interno (mm)	152,3	152,4	152,3
Volume do Cilindro (cm ³)	2.081,2	2.081,8	2.081,2
Massa total de areia (kg)			
1 CAMADA	17,42	17,99	17,67
3 CAMADAS	17,43	18,00	17,64
Massa específica aparente seca (g/cm³)			
1 CAMADA	1,43	1,67	1,55
3 CAMADAS	1,42	1,67	1,54

No entanto, foi constatado posteriormente que, apesar de não haver variação significativa na massa específica aparente seca do corpo de prova, o mesmo não se apresentava homogêneo quando moldado com mais de uma camada. Tal fato foi observado durante a realização dos ensaios com o DCP em corpos moldados com mais de uma camada, denotando-se uma variação do DCP ao longo da penetração, entre as camadas, já que o referido equipamento é bastante sensível a mudanças de resistência ao longo de um perfil.

Tal constatação pode ser melhor visualizada através do exemplo apresentado no Gráfico 3.

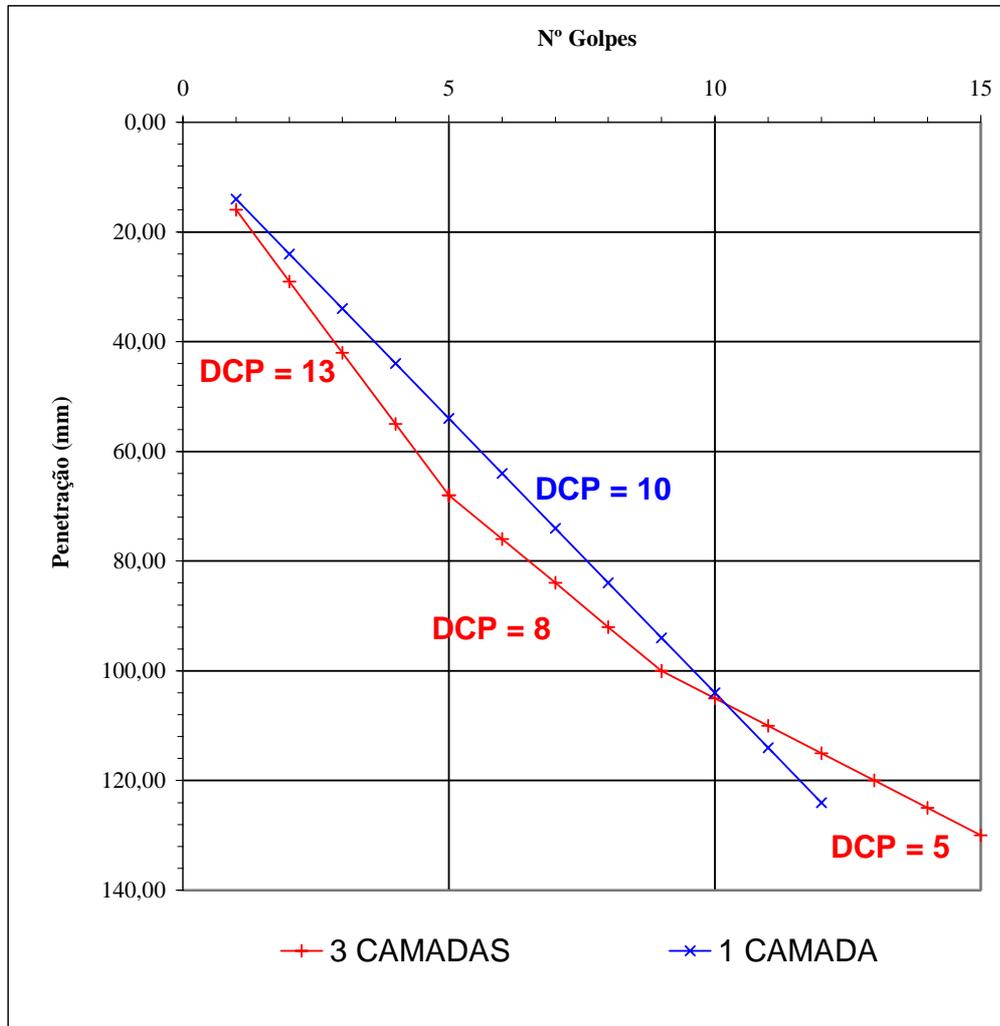


Gráfico 3: Influência do número de camadas nos ensaios DCP

Com base nessas considerações, ficou então estabelecido que os corpos de prova destinados ao presente estudo deveriam ser moldados com apenas 1 camada, durante 10 minutos de vibração média no peneirador.

3.3.2 Associação de correlações

No decorrer dos ensaios que compõem o presente estudo, observou-se a dificuldade em reproduzir corpos de prova com mesmo índices de vazios, mesmo considerando a moldagem em 1 única camada, sob condições conhecidas de intensidade e tempo de vibração.

Corpos de provas, moldados nas mesmas condições, apresentavam índices de vazios diferentes e a principal razão dessa constatação está no fato de que o processo de vibração apresentava variações de frequência e amplitude que estavam além do controle do operador.

Dada a dificuldade de se moldar corpos de prova diferentes com índices de vazios similares para obtenção de pares correspondentes de CBR e DCP, decidiu-se por desenvolver duas correlações em paralelo, uma para cada um dos ensaios, mas relacionadas ao mesmo parâmetro: o índice de vazios, para permitir a comparação posterior entre as duas.

Dessa forma, o procedimento de laboratório contemplou a moldagem a diferentes intensidades e tempos de vibração de forma a se obter, para cada uma das amostras de areias no estado seco, uma variabilidade de índice de vazios.

Foram moldados diversos corpos de prova para a cravação do DCP e para o rompimento do CBR sem imersão, medindo-se sempre o índice de vazios apresentado depois da vibração e antes do rompimento na prensa CBR ou da cravação do DCP.

3.4 Campo de variação do índice de vazios

3.4.1 Determinação de $e_{MÁX}$

A determinação dos índices de vazios máximos das três amostras seguiu as diretrizes do procedimento de ensaio NBR 12004 (ABNT, 1990). Segundo tal documento, devem ser realizados os três procedimentos descritos a seguir:

Processo do Funil: Preenche-se o cilindro Proctor Normal com areia seca, utilizando-se um funil, em movimentos suaves e em espiral, mantendo sempre uma altura de queda de cerca de 2 cm, alimentando continuamente o funil e evitando perturbações. Após rasar o molde, sem o colarinho, obtém-se o índice de vazios, a partir da massa medida.

Processo da Proveta: Enche-se uma proveta com areia seca até 3 cm acima da marca de 1 litro e vira-se rapidamente a mesma dentro do cilindro Proctor Normal. Após tirar o colarinho do cilindro sem perturbações e rasar o conteúdo, calcula-se o índice de vazios.

Processo da Decantação: Enche-se, com água, um cilindro de 5cm de diâmetro e 10cm de altura. Lança-se lentamente areia saturada no cilindro esperando a decantação. Depois de cheio, rasa-se o cilindro e pesa-se antes e após secagem em estufa. Por fim, calcula-se o índice de vazios.

Realizados, os três procedimentos acima, assumem-se como índices de vazios máximos, os maiores valores encontrados. Tais valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Índices de vazios máximos

Processo	Amostra	Jambeiro	Oiapoque	Breves
Funil	$e_{MÁX}$	0,846	0,654	0,933
Proveta	$e_{MÁX}$	0,824	0,628	0,845
Decantação	$e_{MÁX}$	0,774	0,665	0,724
Valores adotados	$e_{MÁX}$	0,846	0,665	0,933

3.4.2 Determinação de $e_{MÍN}$

A determinação dos índices de vazios mínimos das três amostras seguiu as diretrizes do procedimento de ensaio NBR12051 (ABNT, 1991). Segundo tal documento, devem ser realizados os dois procedimentos descritos a seguir:

Mesa vibratória: Trata-se da moldagem do corpo de prova, nas condições seca e saturada, utilizando o cilindro Proctor Modificado e uma sobrecarga de 15kg durante a vibração por 8 minutos.

Soquete de madeira: A norma também prevê a verificação do índice de vazios obtido, nas condições seca e saturada, com densificação promovida por golpes com um soquete de madeira.

Realizados os procedimentos citados, assumem-se como índices de vazios mínimos, os menores valores encontrados. Tais valores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Índices de vazios mínimos

Processo	Amostra	Jambeiro	Oiapoque	Breves
Mesa vibratória	e _{MÍN}	0,446	0,385	0,476
Soquete	e _{MÍN}	0,475	0,459	0,551
Valores adotados	e_{MÍN}	0,446	0,385	0,476

3.5 Confinamento

Logo no início das tentativas de cravação do DCP e rompimento do CBR denotou-se a necessidade de confinamento, inclusive em corpos de prova com os menores índices de vazios, face à inexistência de coesão nas areias.

Sem a utilização de um aparato mínimo adequado para garantir o confinamento da amostra granular, o DCP penetrava toda a espessura da camada de areia contida no cilindro somente com o peso próprio do martelo do equipamento, isto é, passava todo o corpo de prova antes mesmo de conferido o primeiro golpe. Por sua vez, por se tratar de um ensaio de penetração quase estática, o ensaio CBR fornecia leituras, mas com valores de CBR inferiores a 1 para todos os corpos de prova testados.

Para contornar o problema, foram confeccionadas inicialmente duas placas circulares de alumínio para serem utilizadas sobre o corpo de prova quando da realização dos ensaios

CBR e DCP. As placas tinham diâmetro externo ligeiramente inferior ao diâmetro interno do cilindro Proctor Modificado e ambas continham no centro um orifício de diâmetro ligeiramente superior à ponteira do DCP e ao pistão da prensa CBR, respectivamente, para permitir a penetração dos mesmos (folga de 0,1mm em ambos os casos). Tais recursos podem ser visualizados na Figura 10.



Figura 10: Placas de alumínio dos ensaios DCP (à esquerda) e CBR (à direita)

Sobre a placa, era utilizado um anel de massa conhecida e, sobre este, um suporte de ferro que suportava discos de ferro de 5 e 10kg de cada lado (ver Figura 11). Colocados de cada lado do suporte, a massa total sobre o suporte era de 10kg (dois discos de 5kg), 20kg (dois discos de 10kg) ou 30kg (dois discos de 5kg e dois de 10kg).

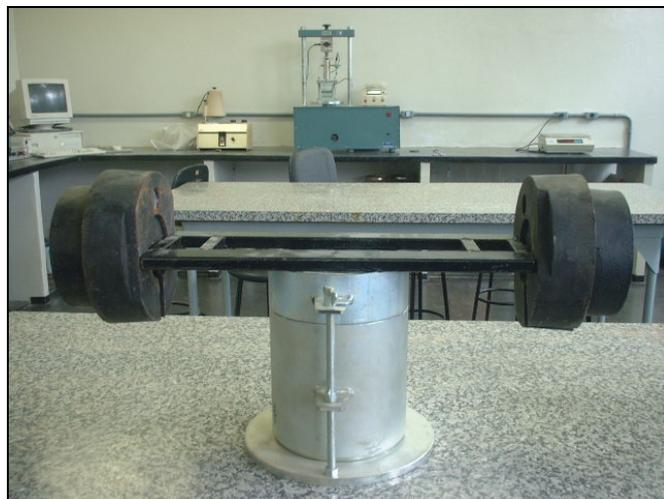


Figura 11: Suporte com sobrecarga sobre cilindro Proctor Modificado

A sobrecarga padrão do ensaio CBR (2,283kg – ver Figura 12) era utilizada com a função de transmitir a carga de confinamento vertical para a camada de areia contida no cilindro, após ser coberta pela placa de alumínio citada.



Figura 12: Sobrecarga padrão CBR

Considerando a área da seção transversal interna do cilindro Proctor, a massa do anel de sobrecarga padrão, a massa do suporte de ferro e as massas dos discos de ferro, pôde-se calcular a pressão de sobrecarga em cada situação, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Pressões de confinamento

Sobrecarga	ϕ (m)	Área (m ²)	Massa Anel (kg)	Masa Suporte (kg)	Pressão (kPa)
10 kg	0,1524	0,0182	2,283	4,888	9,2
20 kg	0,1524	0,0182	2,283	4,888	14,6
30 kg	0,1524	0,0182	2,283	4,888	20,0

Dentre as razões para a seleção dessas três configurações de sobrecarga, estão:

- O ensaio DCP não apresentava leitura para sobrecargas inferiores à de 10kg, especialmente em corpos de prova com índices de vazios próximos ao máximo de cada areia; e
- As sobrecargas que as camadas superiores dos pavimentos dos aeródromos de Oiapoque e Breves exercem sobre as camadas de subleito daqueles sítios são inferiores a 20kPa (correspondente à sobrecarga de 30kg).

4 Apresentação de resultados

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos através das práticas de laboratório abordadas.

4.1 Ensaio DCP

A realização dos ensaios gerou gráficos de penetração versus número de golpes, nos quais o valor de DCP, expresso em milímetros por golpe, é dado pela inclinação do segmento retilíneo formado pelos pontos do ensaio, descartando-se a origem. Tal segmento corresponde à melhor reta, obtida por regressão linear através do método dos mínimos quadrados.

Cada corpo de prova moldado tinha seu índice de vazios calculado a partir da sua massa específica aparente seca e a massa específica dos grãos de cada amostra. Cabe a ressalva de que os ensaios foram realizados com corpos-de-prova moldados em cilindros Proctor sem o espaçador inferior, assim poder-se-ia ter leituras de DCP até a penetração de 17cm. Uma vez obtido o valor de DCP, tinham-se então os dados necessários à confecção de gráficos de DCP versus índice de vazios para cada uma das três amostras e em cada uma das três situações de sobrecarga. Os resultados são apresentados sequencialmente.

Para cada amostra apresenta-se o gráfico correspondente ao ensaio DCP (penetração x n° de golpes) e, em seguida, o gráfico que correlaciona os valores de DCP com os índices de vazios dos corpos de prova (DCP x e). Neste gráfico, apresenta-se a correlação obtida com regressão do tipo potência, através do software Microsoft® Office Excel 2003 (MICROSOFT, 2003). Este tipo de regressão apresentou maior valor de R^2 dentre as possibilidades testadas, para as 3 amostras e condições de sobrecarga.

4.1.1 Amostra Jambeiro

Os resultados obtidos para a amostra Jambeiro estão apresentados nos Gráficos 4 a 7.

Índice de Vazios	0,486	0,490	0,524	0,567	0,601
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	16,11	20,38	21,88	21,26	33,11
2	28,10	35,11	41,86	40,64	75,23
3	39,71	47,49	62,52	63,11	127,50
4	49,48	59,23	84,74	90,35	
5	60,23	70,78		121,84	
6	70,93	82,07		153,24	
7	81,42	93,15			
8	91,49				

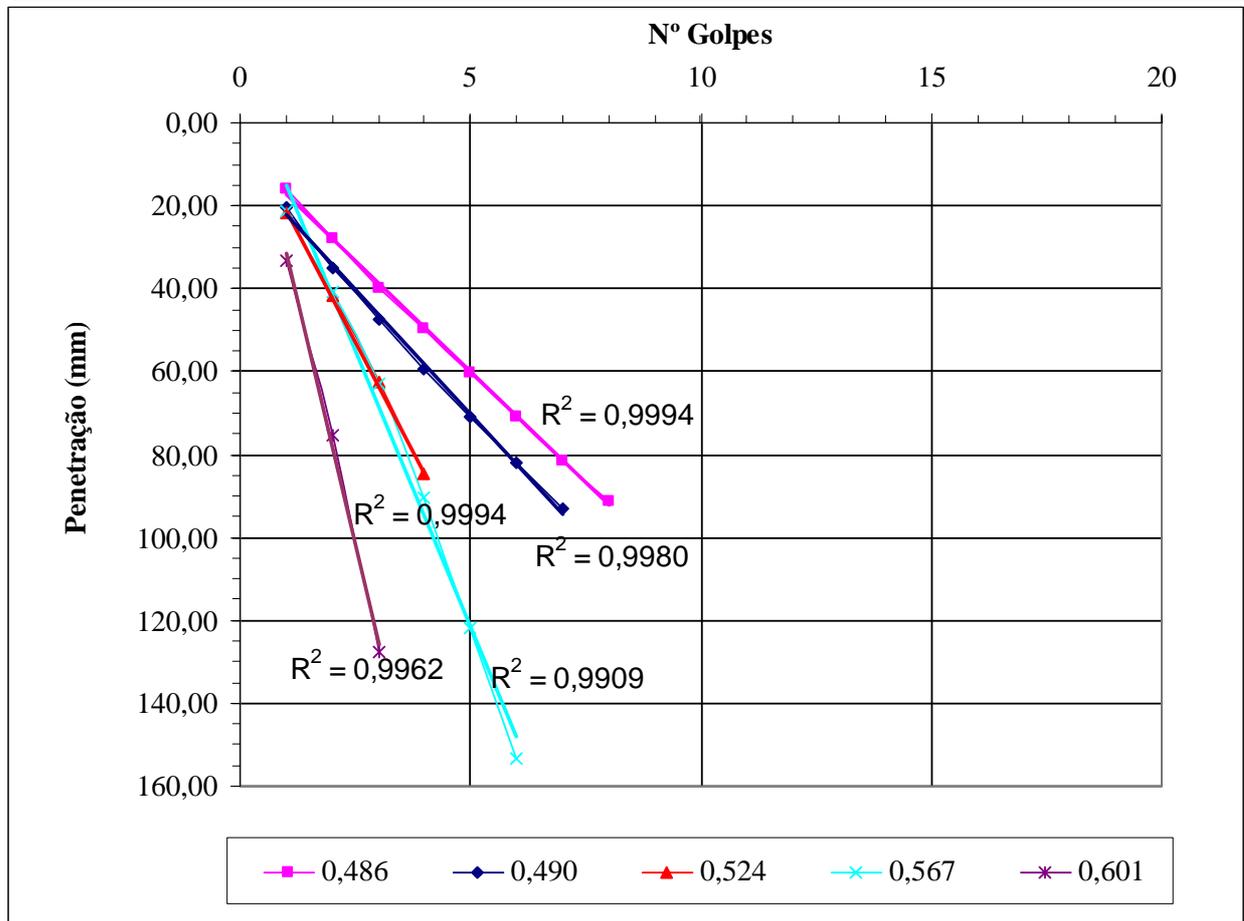


Gráfico 4: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 10 kg

Índice de Vazios	0,482	0,501	0,584	0,613
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	16,24	19,02	31,74	29,22
2	28,66	30,98	64,03	59,62
3	39,39	42,95	95,76	102,68
4	49,04	55,03	123,11	
5	58,11	67,10	146,50	
6	66,78	79,25		
7	76,05	90,51		
8	85,17			
9	94,39			

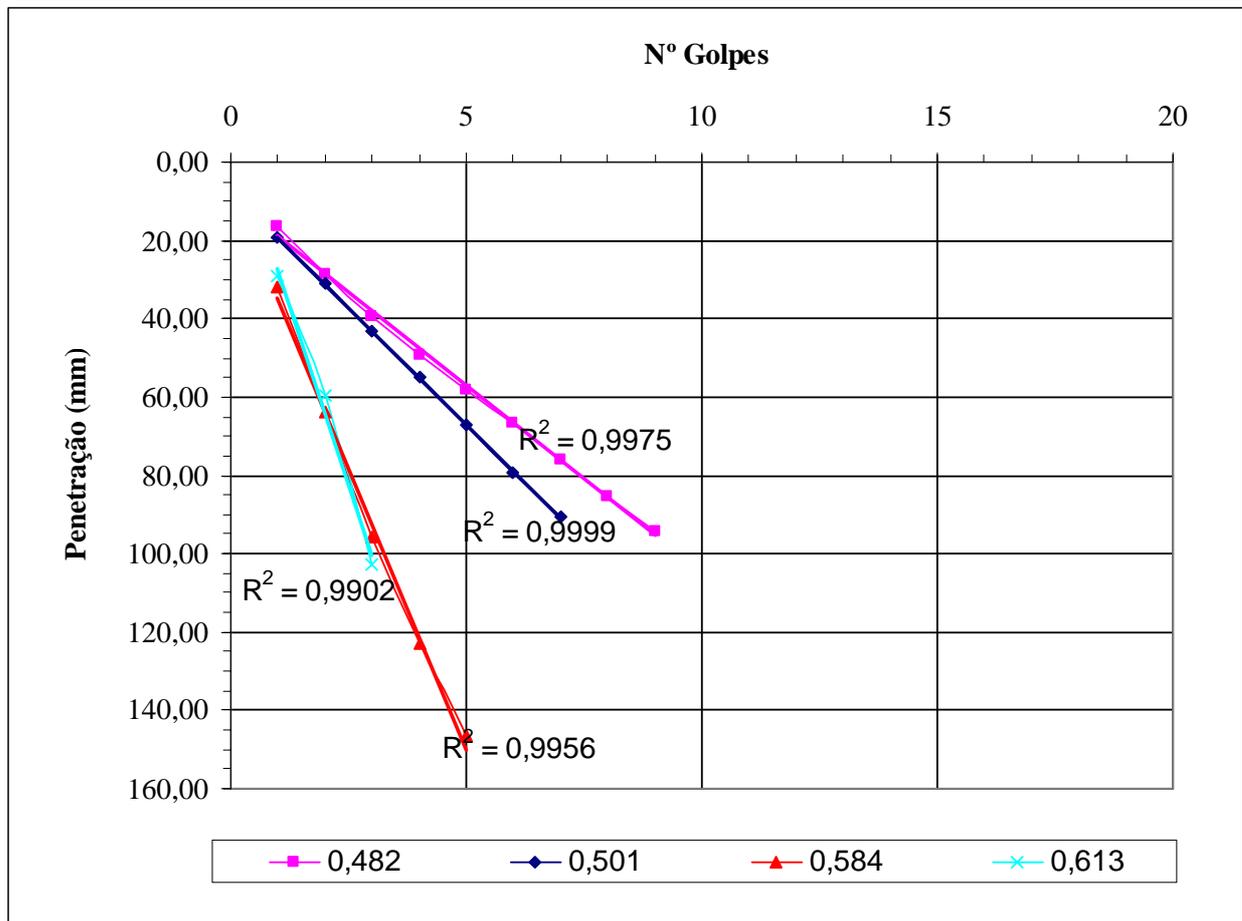


Gráfico 5: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 20 kg

Índice de Vazios	0,475	0,477	0,483	0,502	0,504	0,615	0,650	0,655
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	14,43	15,61	14,34	12,45	12,71	28,15	46,10	50,82
2	26,02	25,45	22,49	20,59	21,32	57,61	112,79	130,25
3	34,56	34,19	30,37	28,61	29,34	97,22		
4	42,20	42,12	38,09	36,59	36,97	138,98		
5	49,30	49,91	45,66	44,45	44,68			
6	55,84	57,62	53,39	52,54	52,55			
7	62,30	65,28	61,29	60,93	60,34			
8	68,99	72,76	69,85	69,53	68,82			
9	75,38	80,00	77,97	78,39	77,78			
10	81,83	87,32	86,53	87,59	86,67			
11	88,16	94,85	94,67	97,43	95,83			
12	94,28	101,33		107,27	104,68			
13	100,14			116,69	113,41			
14				126,15	122,29			
15				134,85	130,87			
16				143,54	139,17			
17				151,80	147,11			
18				159,62	154,76			

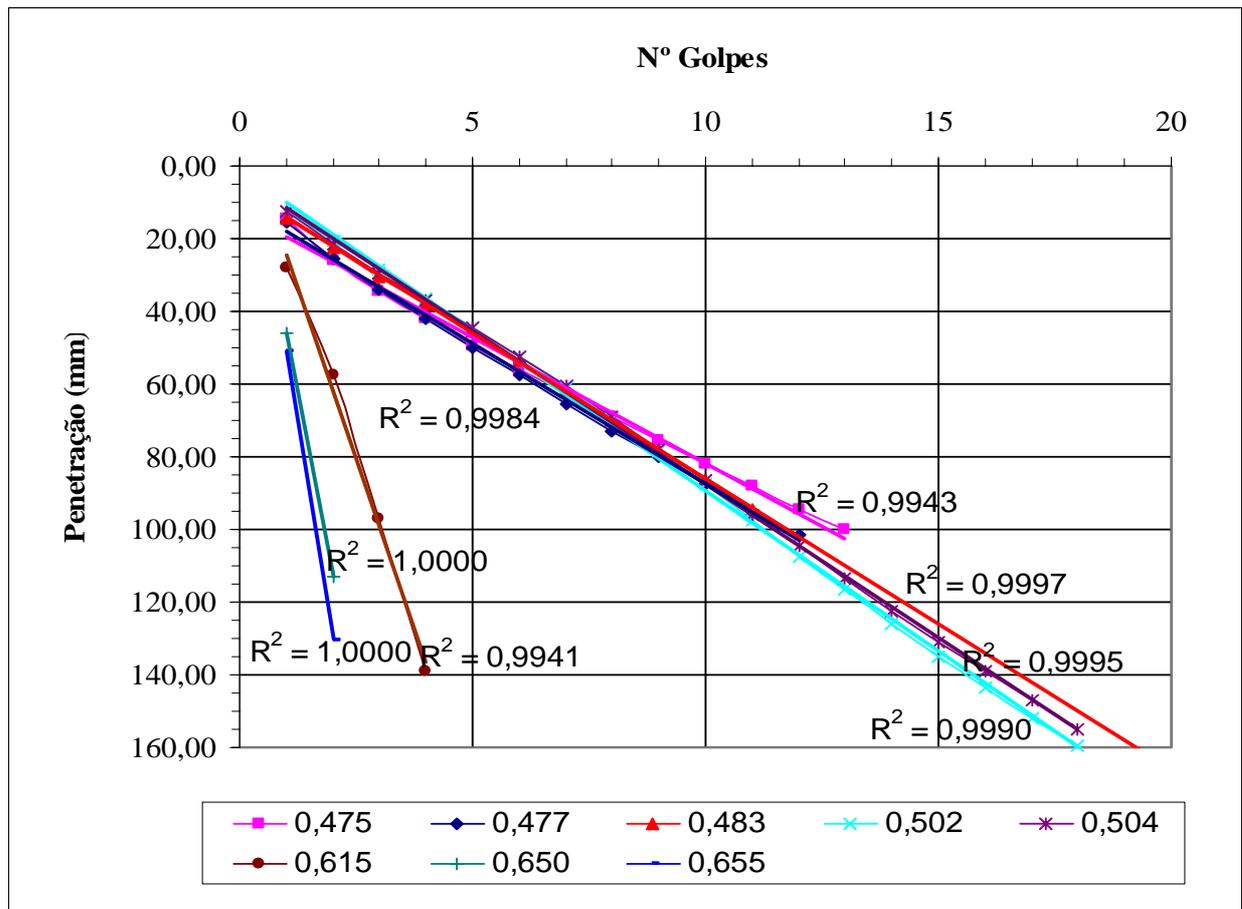
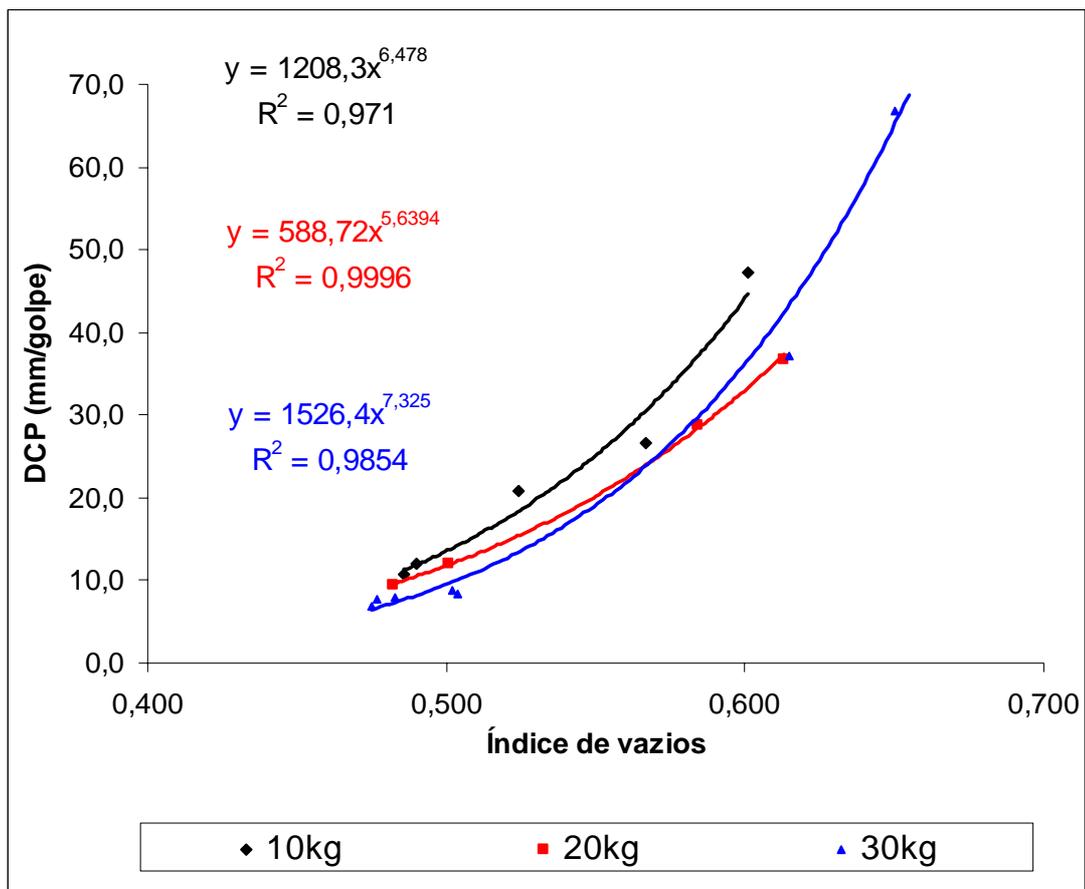


Gráfico 6: DCP – Amostra Jambeiro, sobrecarga 30 kg

Tabela 8: DCP x e – Amostra Jambeiro

JAMBEIRO		Sobrecarga	Índice de Vazios	DCP (mm/golpe)
e máx = 0,846	e mín = 0,446	10kg	0,486	10,7
			0,489	12,0
			0,524	20,9
			0,567	26,6
			0,601	47,2
		20kg	0,482	9,6
			0,500	12,0
			0,583	28,9
			0,613	36,7
		30kg	0,475	6,9
			0,477	7,7
			0,482	8,0
			0,502	8,8
			0,504	8,5
			0,614	37,2
			0,649	66,7
			0,655	79,4

**Gráfico 7: DCP x e – Amostra Jambeiro**

4.1.2 Amostra Oiapoque

Os resultados obtidos para a amostra Oiapoque estão apresentados nos Gráficos 8 a 11.

Índice de Vazios	0,415	0,439	0,455	0,492
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	28,82	41,70	49,10	68,38
2	48,58	65,45	81,07	121,67
3	67,30	85,53	109,89	
4	84,75	104,20	136,74	
5	100,70	121,48		
6	115,86	137,72		
7	129,84			
8	143,44			

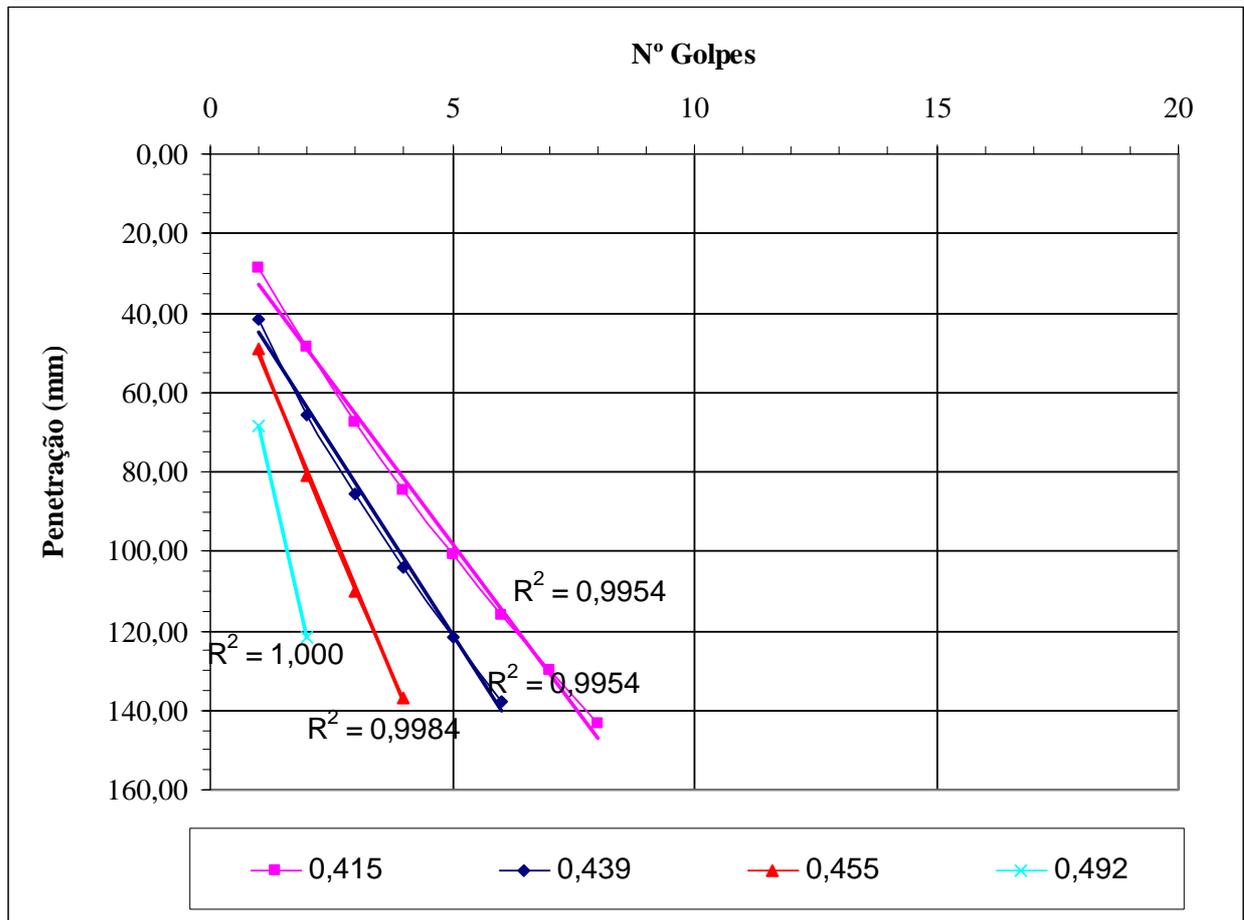


Gráfico 8: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 10 kg

Índice de Vazios	0,426	0,431	0,442	0,480
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	19,49	16,54	41,49	36,39
2	37,85	31,73	68,14	68,55
3	54,03	46,58	91,59	104,16
4	69,25	60,36	111,83	137,62
5	83,86	74,14	128,71	
6	97,31	88,77	144,48	
7	109,57	101,75		
8	121,05	113,90		
9	131,59	124,73		
10	141,21	134,81		
11	150,04	144,66		
12		154,17		

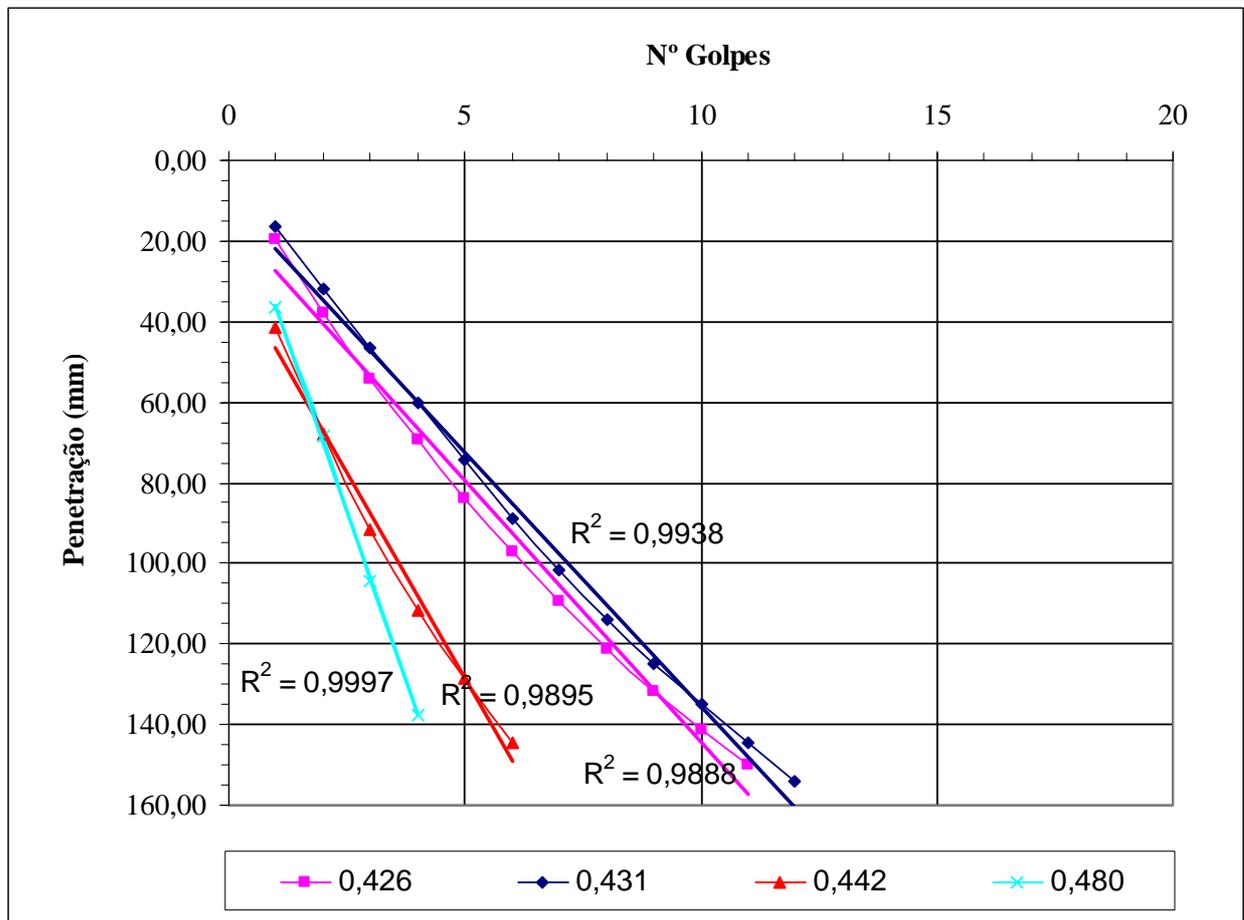


Gráfico 9: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 20 kg

Índice de Vazios	0,410	0,416	0,430	0,473	0,498
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	12,54	13,39	16,47	21,77	34,20
2	23,04	25,68	28,84	44,14	66,45
3	33,36	36,88	40,43	65,40	98,05
4	43,19	48,09	51,73	88,90	133,53
5	52,86	59,71	62,96	114,04	
6	62,55	71,14	74,76	138,61	
7	72,54	82,33	86,78		
8	82,44	93,55	98,86		
9	92,13	105,11	110,87		
10	101,42	116,54	122,55		
11	110,25	127,88	132,70		
12	118,57	138,83	142,53		
13	126,27	149,16	151,23		
14	132,75				
15	139,47				
16	145,73				
17	151,50				

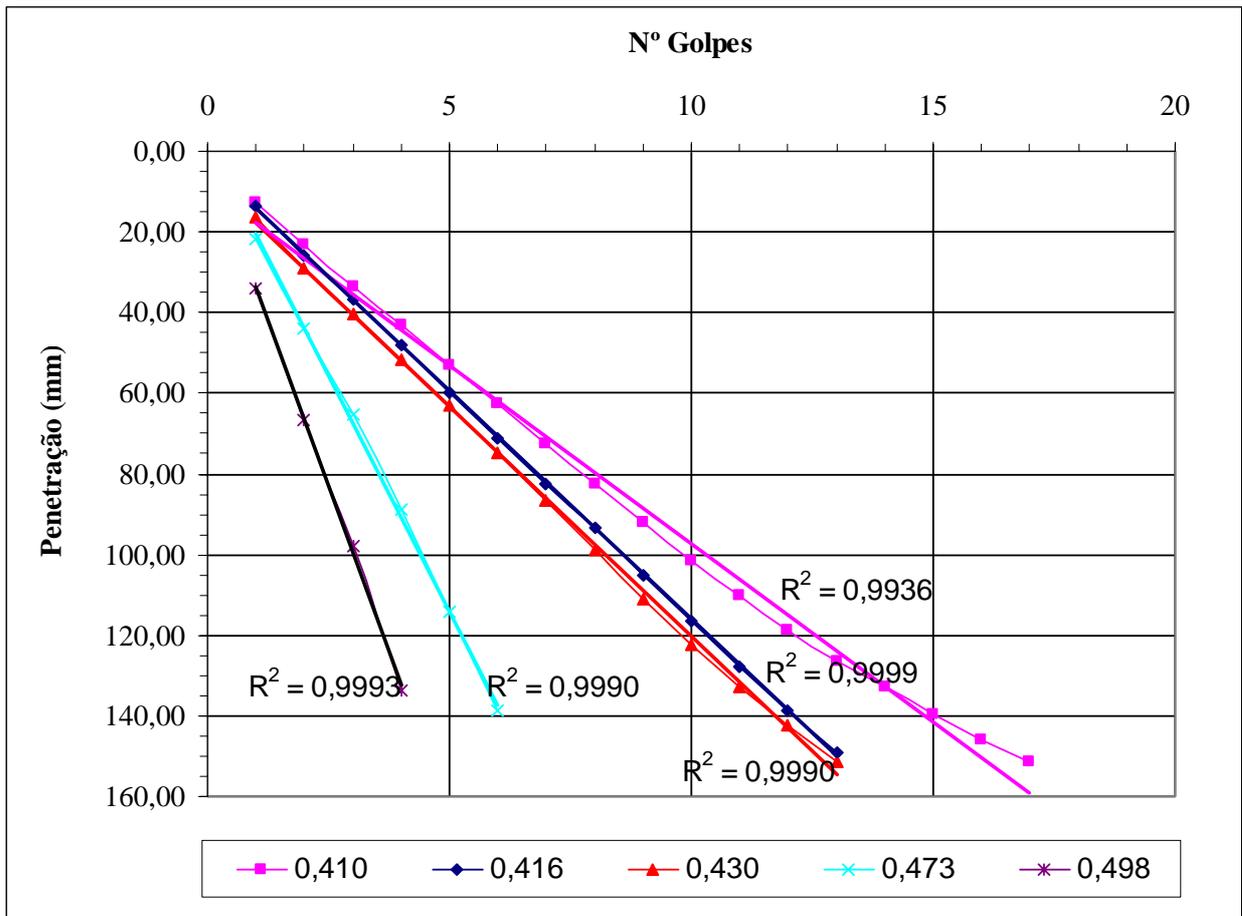
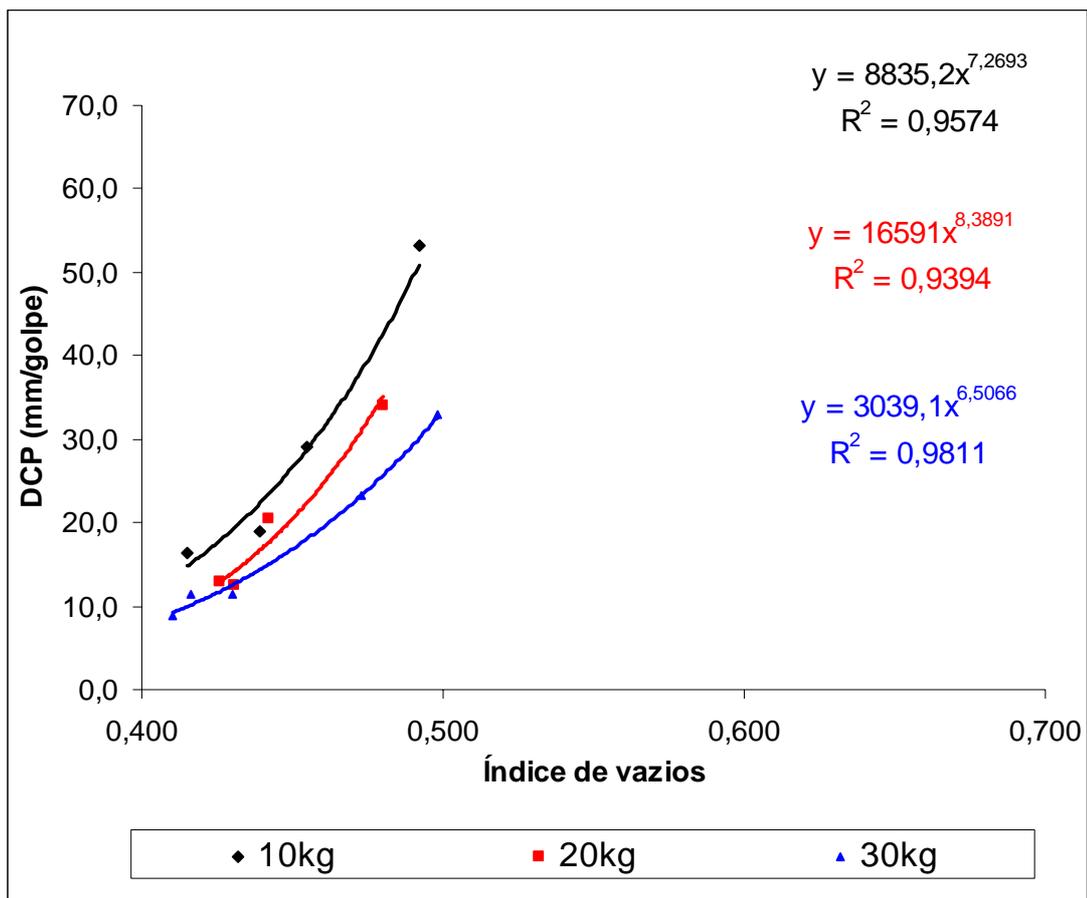


Gráfico 10: DCP – Amostra Oiapoque, sobrecarga 30 kg

Tabela 9: DCP x e – Amostra Oiapoque

OIAPOQUE		Sobrecarga	Índice de Vazios	DCP (mm/golpe)
e máx = 0,671	e mín = 0,390	10kg	0,420	16,3
			0,444	19,1
			0,460	29,2
			0,497	53,3
		20kg	0,431	13,0
			0,436	12,6
			0,447	20,5
			0,485	33,9
		30kg	0,415	8,9
			0,421	11,3
			0,435	11,4
			0,478	23,4
			0,503	33,0

**Gráfico 11: DCP x e – Amostra Oiapoque**

4.1.3 Amostra Breves

Os resultados obtidos para a amostra Breves estão apresentados nos Gráficos 12 a 15.

Índice de Vazios	0,502	0,558	0,587
Nº. de Golpes	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00
1	26,19	47,68	66,63
2	48,23	88,88	132,79
3	68,59	125,93	
4	89,74	154,89	
5	109,64		
6	126,68		
7	140,37		
8	153,77		

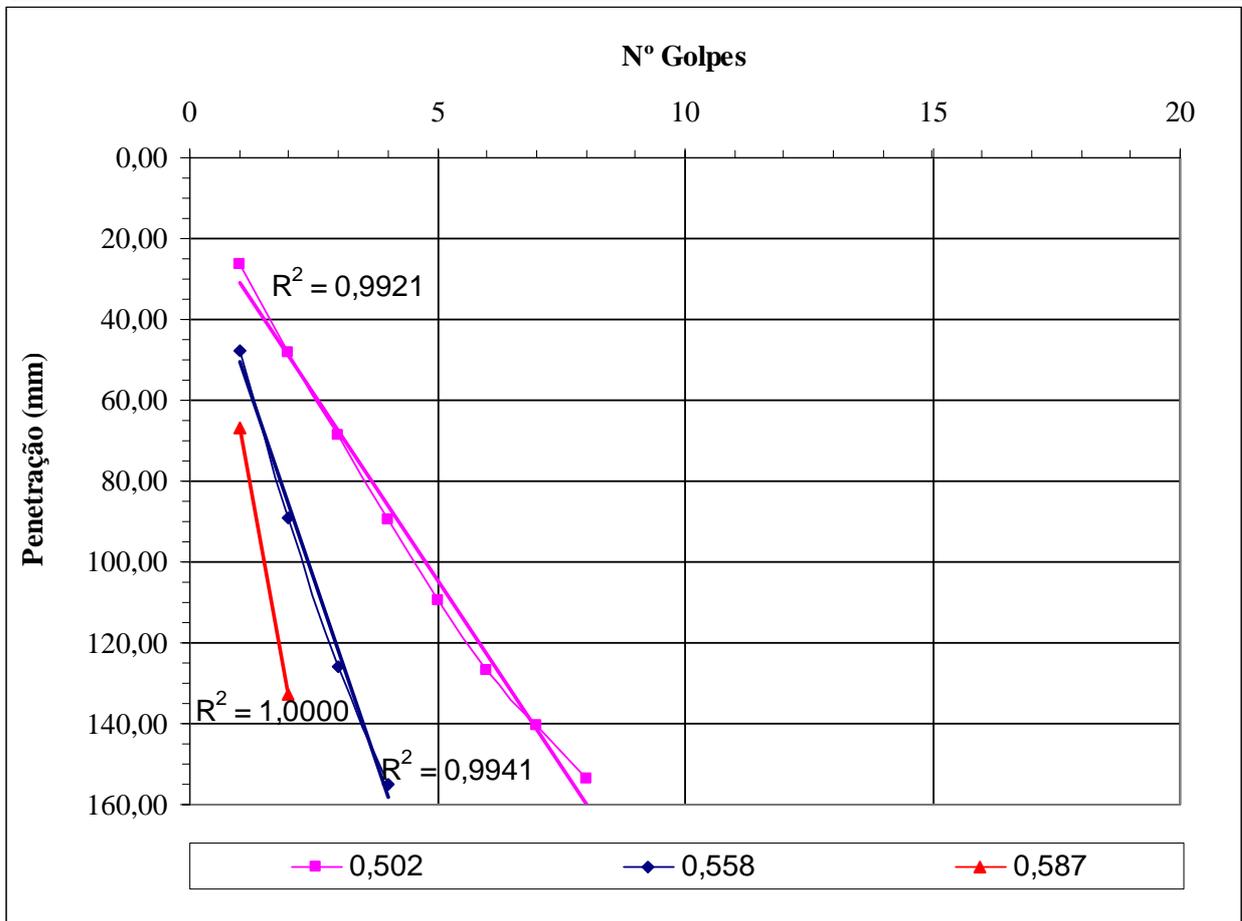


Gráfico 12: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 10 kg

Índice de Vazios	0,513	0,538	0,554	0,601
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	20,42	29,65	31,67	56,86
2	39,37	53,00	58,74	121,97
3	57,03	78,43	85,92	
4	72,73	101,04	110,23	
5	88,36	119,93	131,92	
6	102,45	137,21	150,95	
7	114,63			
8	125,21			

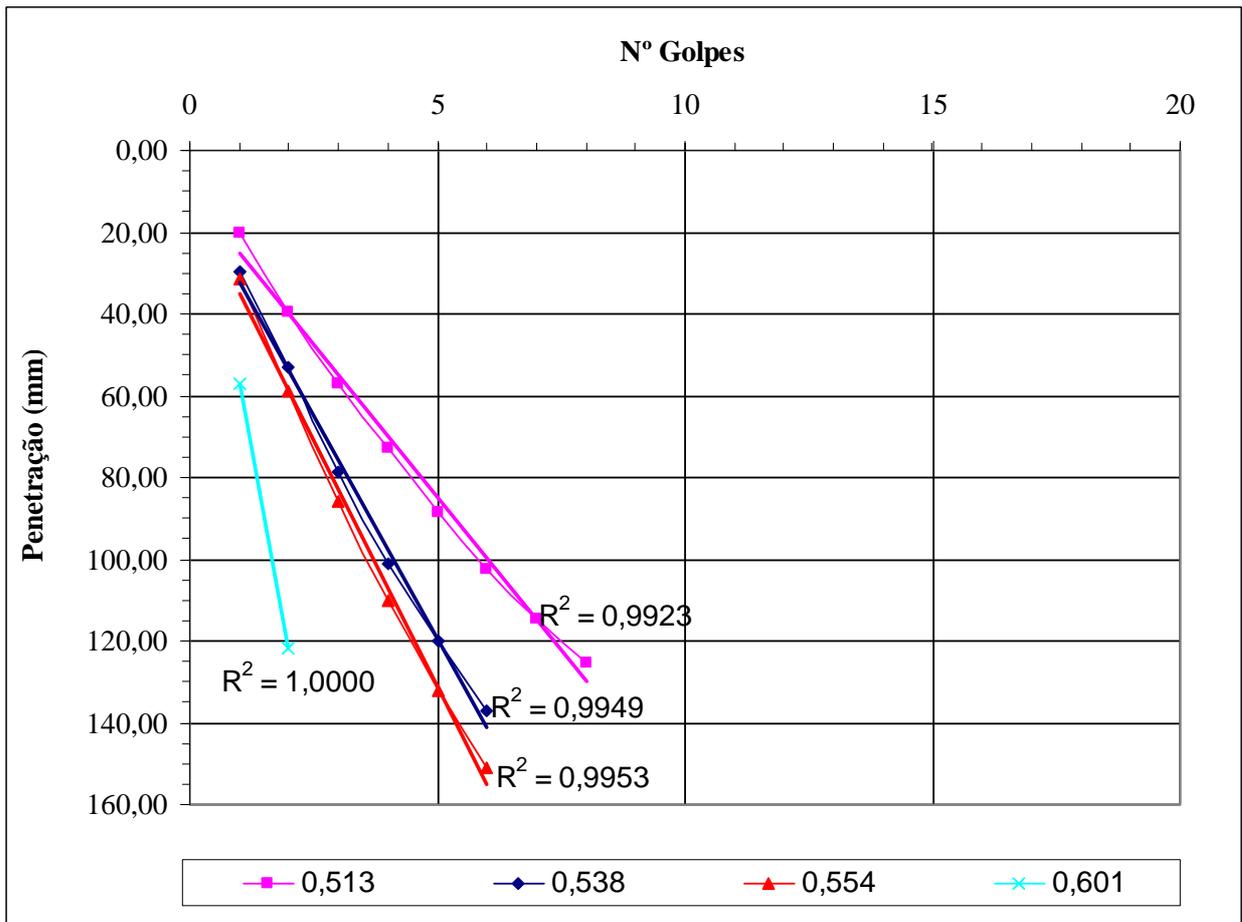


Gráfico 13: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 20 kg

Índice de Vazios	0,516	0,561	0,593	0,628	0,647
Nº. de Golpes	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	16,37	20,32	40,26	34,09	49,93
2	28,83	39,58	70,20	74,31	119,83
3	39,19	57,65	92,46	131,37	
4	48,65	75,45	111,47		
5	57,70	91,80	127,13		
6	66,54	106,24			
7	75,23	120,05			
8	83,86	132,36			
9	92,51				
10	100,95				
11	109,68				
12	118,55				
13	127,25				
14	135,50				
15	143,73				

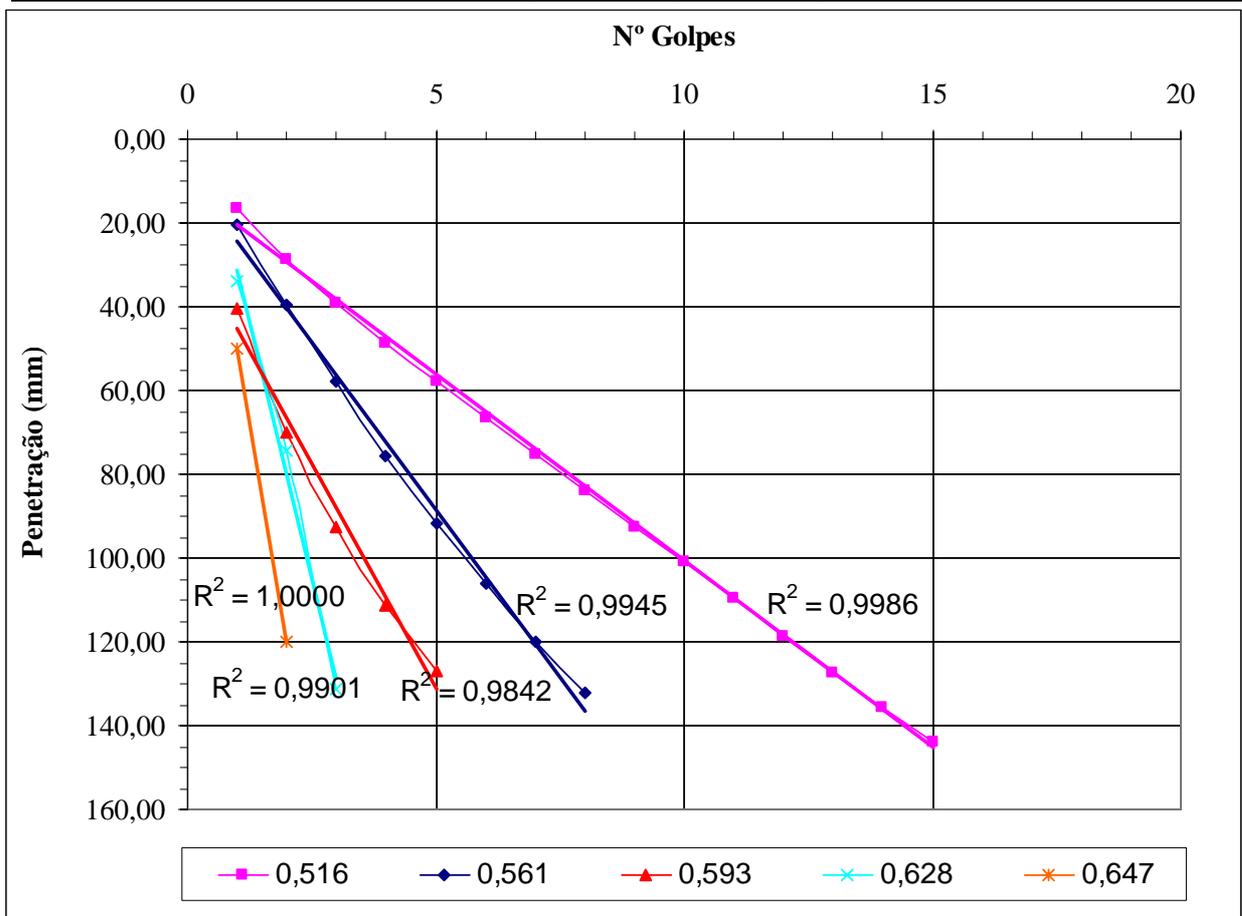


Gráfico 14: DCP – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg

Tabela 10: DCP x e – Amostra Breves

BREVES	Sobrecarga	Índice de Vazios	DCP (mm/golpe)
e máx = 0,971 e mín = 0,504	10kg	0,530	18,4
		0,587	35,9
		0,617	66,2
	20kg	0,541	15,0
		0,567	21,7
		0,584	24,0
	30kg	0,631	65,1
		0,544	8,9
		0,591	16,1
		0,623	21,5
		0,659	48,6
		0,678	69,9

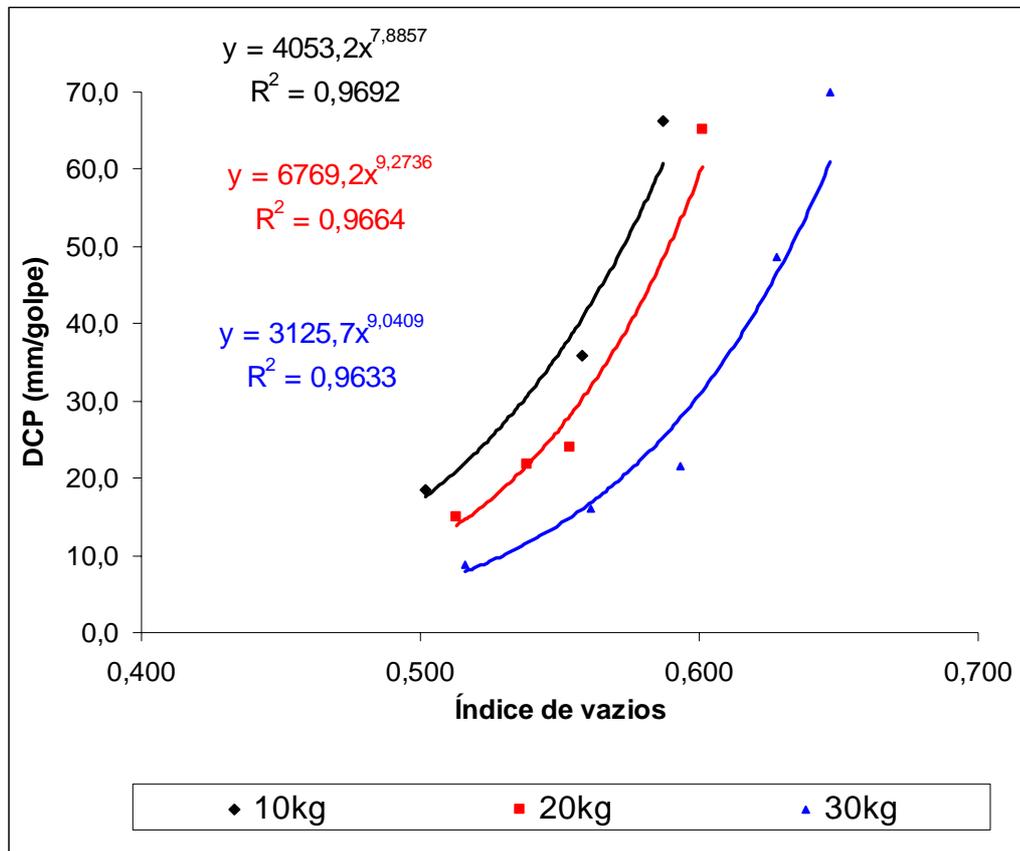


Gráfico 15: DCP x e – Amostra Breves

4.2 Ensaio CBR

Na maioria dos corpos de prova das amostras de Oiapoque e Breves, mais especificamente, observou-se que o CBR_1 (correspondente à penetração de 2,56mm) era superior ao CBR_2 (correspondente à penetração de 5,12mm) e, nestes casos, a norma NBR 9895 (ABNT, 1987) prevê a adoção do CBR_1 como valor a ser adotado no ensaio. Como faz parte dos objetivos do presente estudo a comparação entre as amostras, o valor de CBR adotado em todos os casos, independente da amostra, foi o correspondente à penetração de 2,56mm.

Semelhantemente ao estudo com o DCP, cada corpo de prova moldado teve seu índice de vazios calculado a partir da massa específica aparente seca que apresentava e a respectiva massa específica dos grãos e, uma vez obtido o valor de CBR através do ensaio, tinham-se então os dados necessários à confecção de gráficos de CBR versus índice de vazios para cada uma das três amostras, em cada uma das três situações de sobrecarga, num total de nove resultados.

Os resultados são apresentados sequencialmente para as três amostras do estudo, considerando as três diferentes condições de sobrecarga em cada uma delas. Em cada caso, apresenta-se o gráfico correspondente ao ensaio CBR (já com correção de eixos, conforme procedimento previsto em norma) e, em seguida, o gráfico que correlaciona os valores de CBR com os índices de vazios dos moldes ensaiados, contendo a reta de correlação, encontrada por regressão linear (método de mínimos quadrados) e respectivo coeficiente de determinação.

4.2.1 Amostra Jambeiro

Os resultados obtidos estão apresentados nos Gráficos 16 a 19.

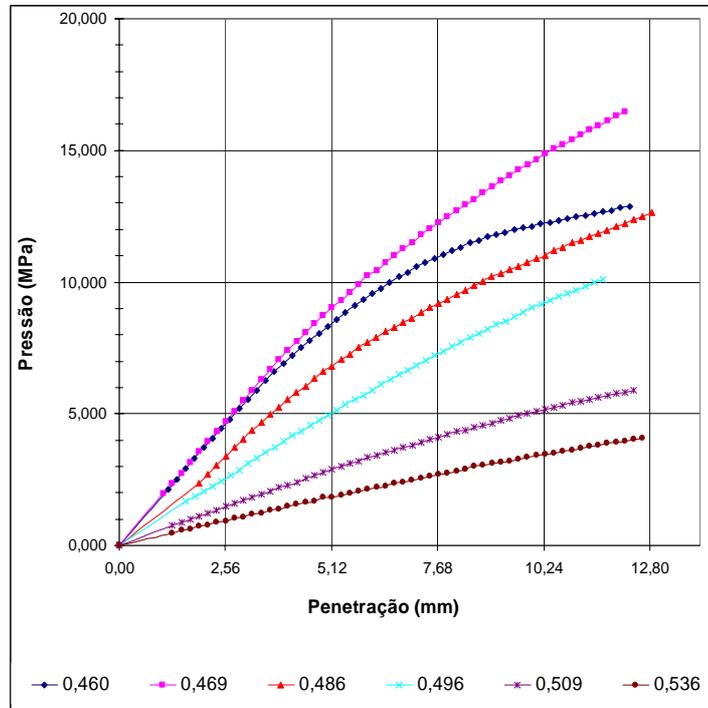


Gráfico 16: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 10 kg

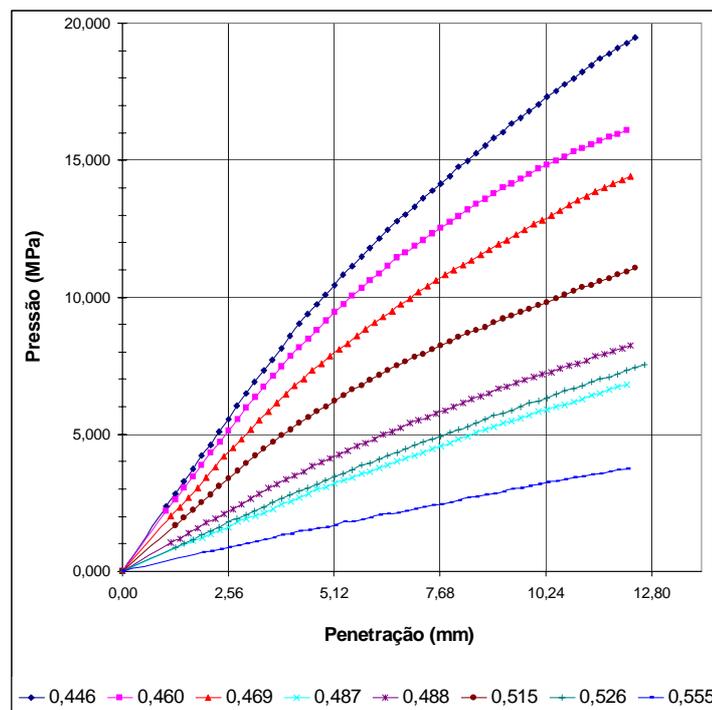


Gráfico 17: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 20 kg

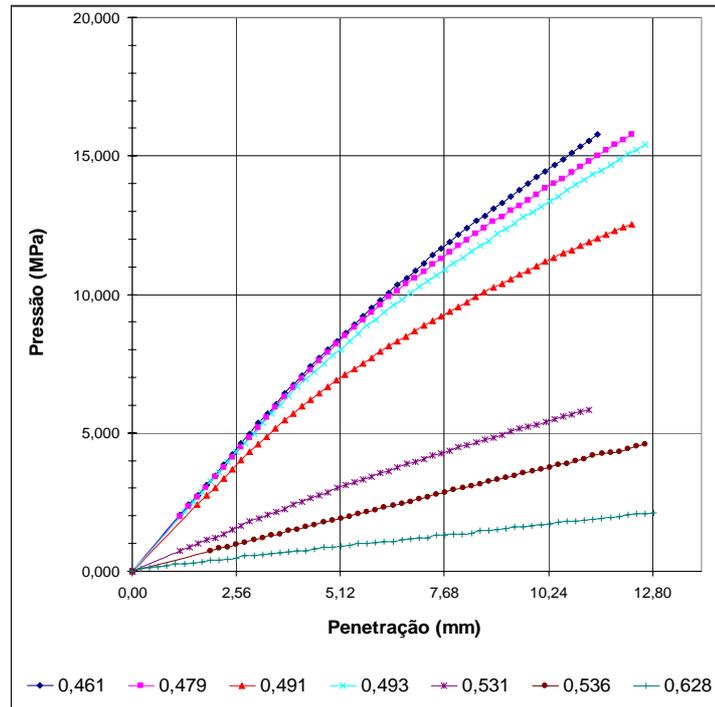


Gráfico 18: CBR – Amostra Jambeiro, sobrecarga 30 kg

Tabela 11: CBR x e – Amostra Jambeiro

JAMBEIRO	Sobrecarga	Índice de Vazios	CBR
e máx = 0,846 e mín = 0,446	10kg	0,460	67
		0,469	68
		0,486	49
		0,496	37
		0,509	21
		0,536	13
	20kg	0,446	80
		0,460	74
		0,469	63
		0,487	23
		0,488	32
		0,515	49
	30kg	0,526	26
		0,555	13
		0,461	64
		0,479	62
		0,491	56
		0,493	63
	0,531	23	
	0,536	14	
	0,628	7	

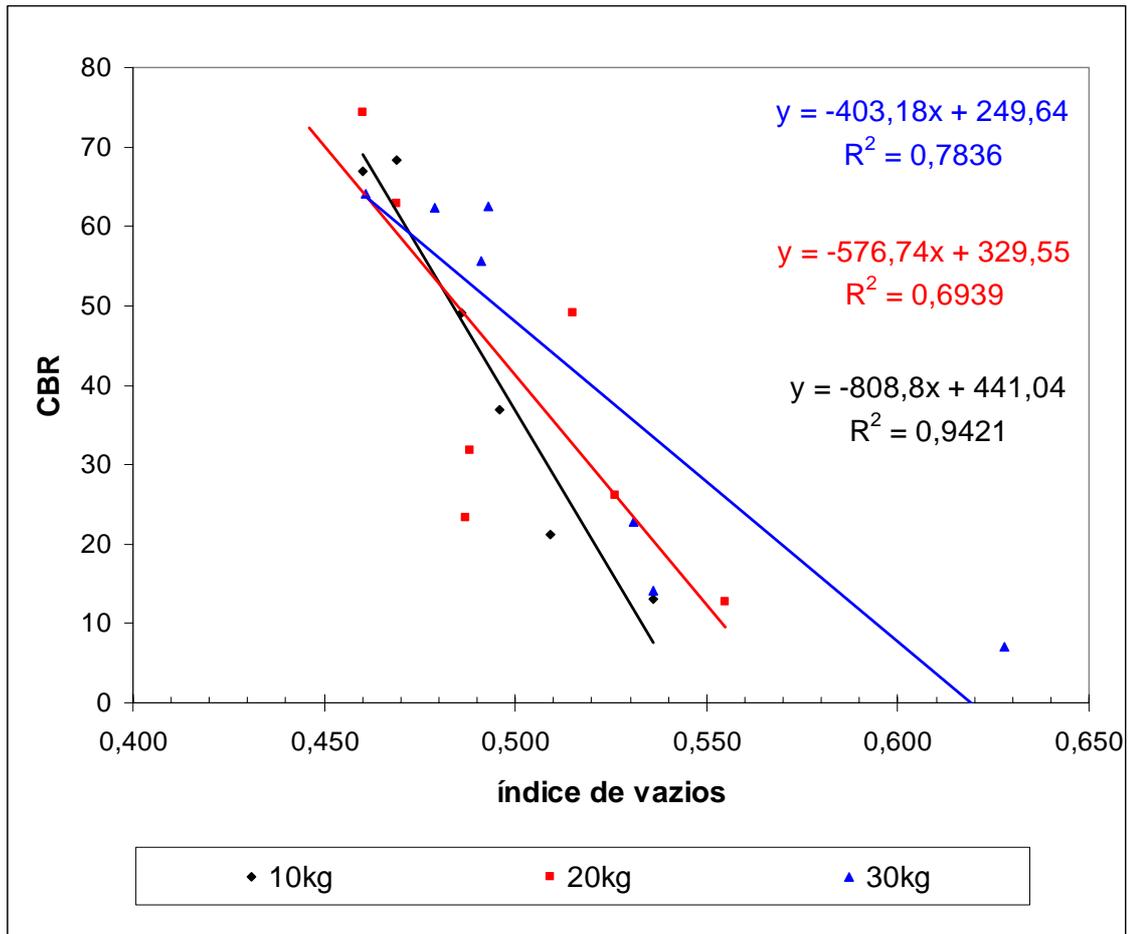


Gráfico 19: CBR x e – Amostra Jambeiro

4.2.2 Amostra Oiapoque

Os resultados obtidos estão apresentados nos Gráficos 20 e 23.

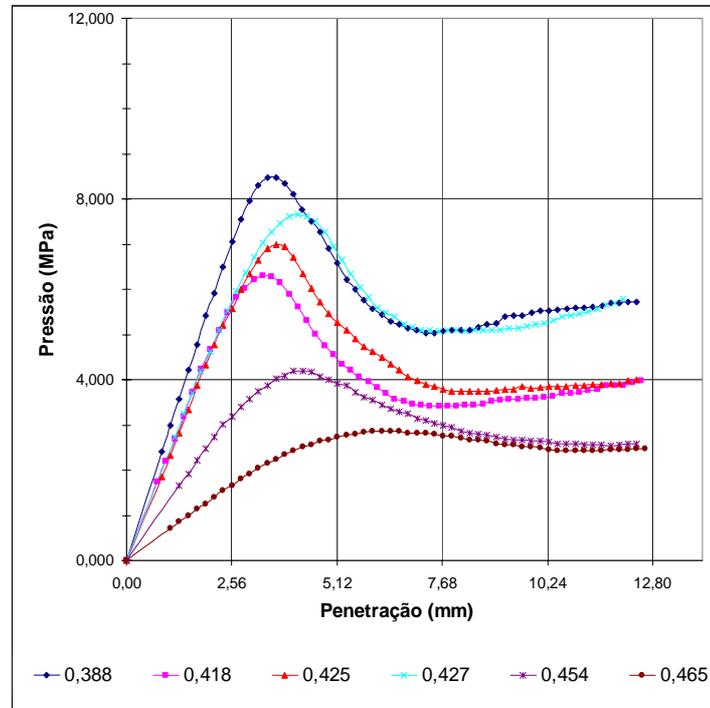


Gráfico 20: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 10kg

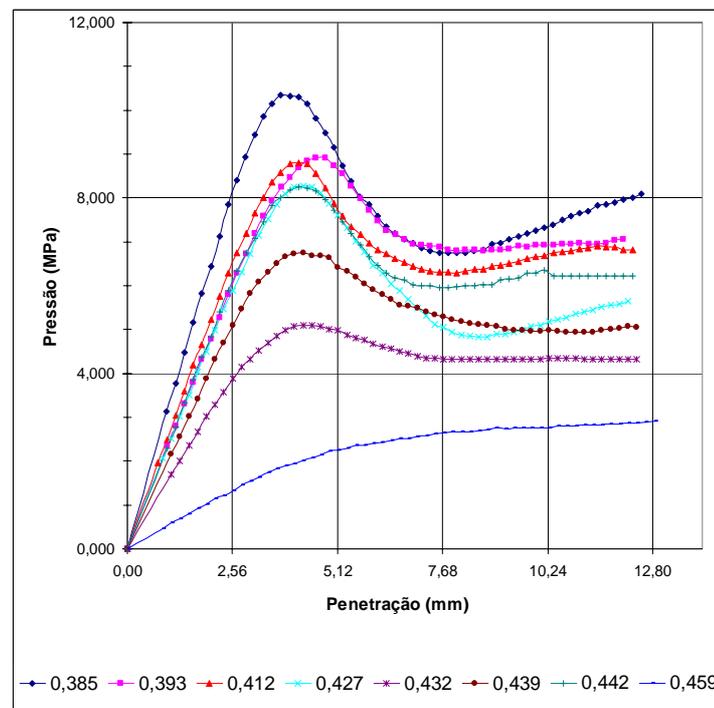


Gráfico 21: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 20kg

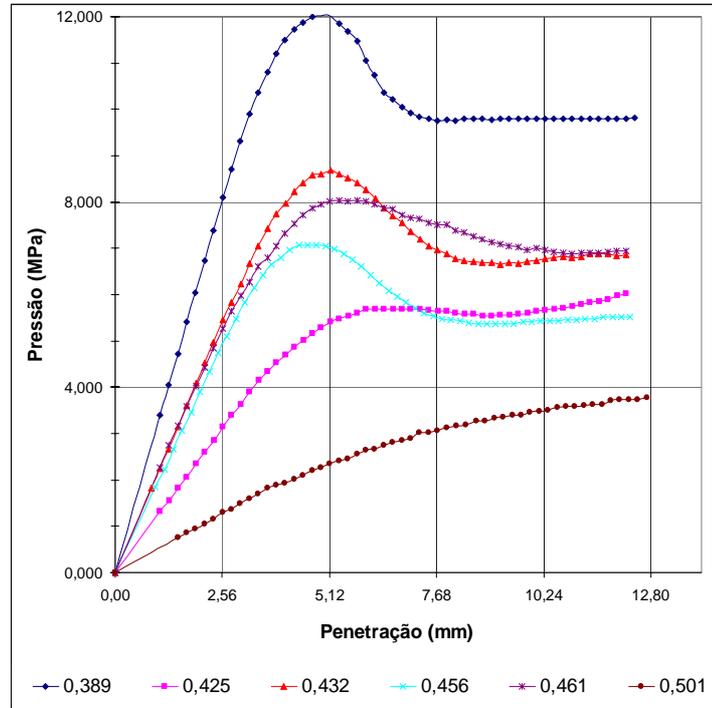


Gráfico 22: CBR – Amostra Oiapoque, sobrecarga 30 kg

Tabela 12: CBR x e – Amostra Oiapoque

OIAPOQUE		Sobrecarga	Índice de Vazios	CBR
e máx = 0,665	e mín = 0,385	10kg	0,388	10
			0,418	82
			0,425	81
			0,427	83
			0,454	46
			0,465	24
		20kg	0,385	118
			0,393	88
			0,412	94
			0,427	85
			0,432	56
			0,439	74
		30kg	0,442	89
			0,459	19
			0,389	118
			0,425	46
			0,432	79
			0,456	71
	0,461	76		
	0,501	19		

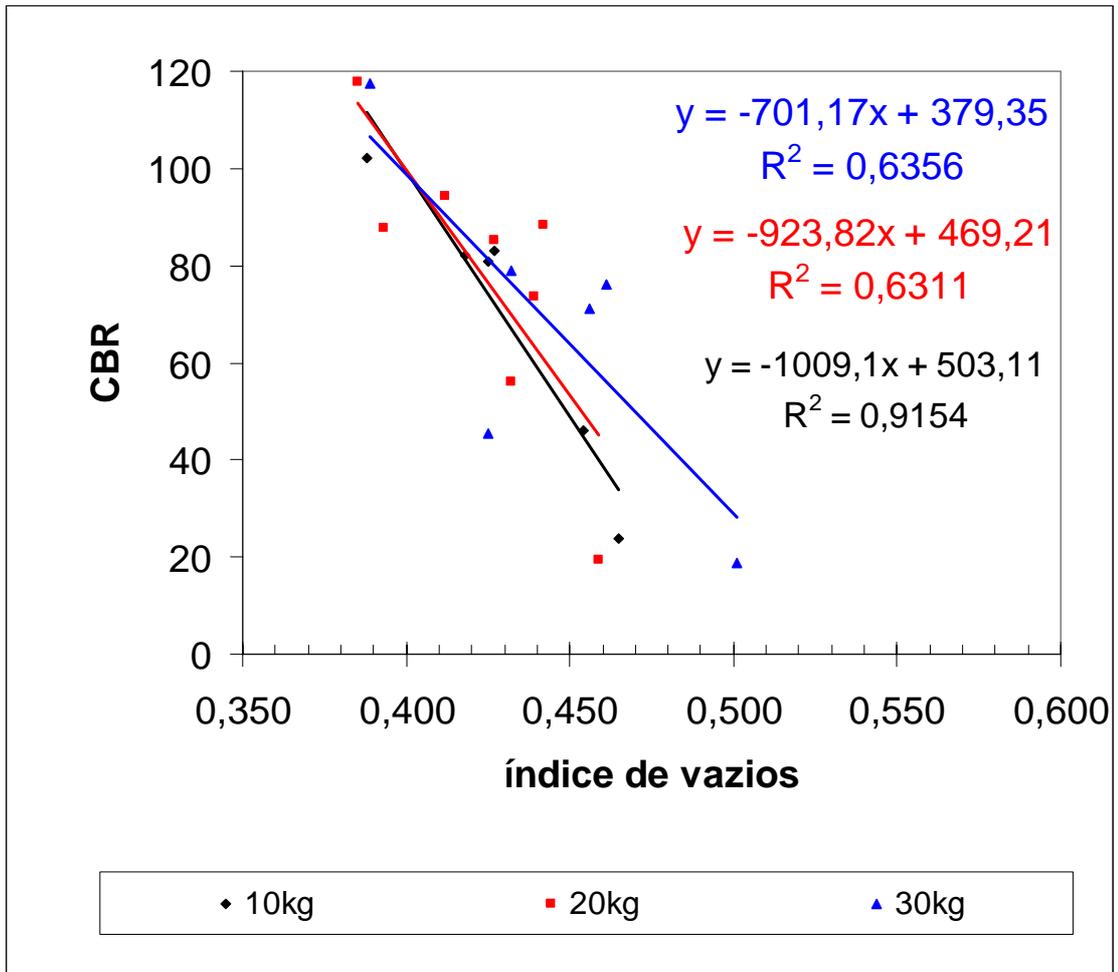


Gráfico 23: CBR x e – Amostra Oiapoque

4.2.3 Amostra Breves

Os resultados obtidos estão apresentados nos Gráficos 24 a 27.

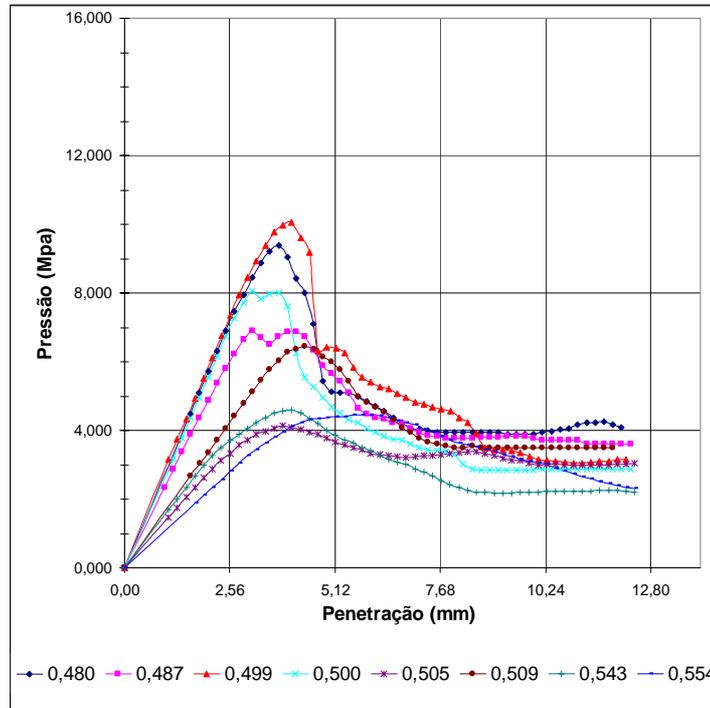


Gráfico 24: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 10 kg

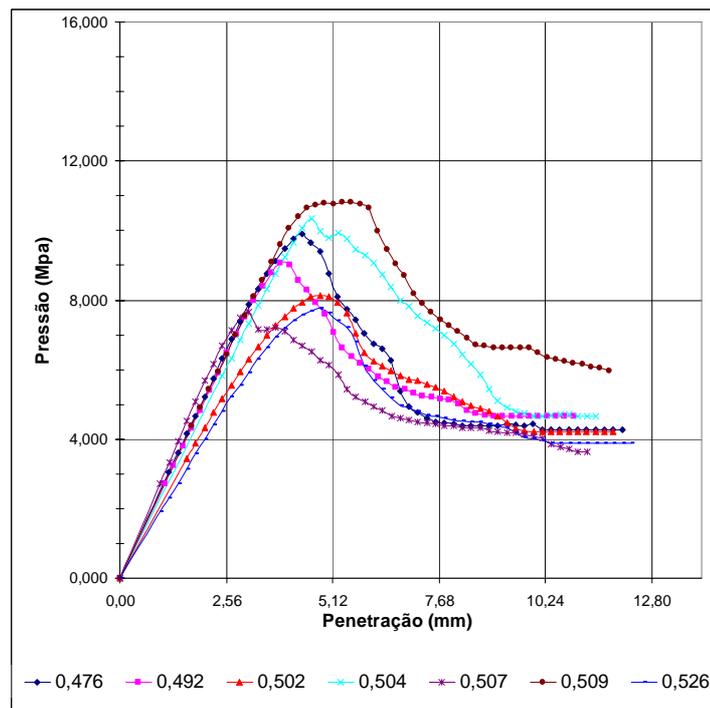


Gráfico 25: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 20 kg

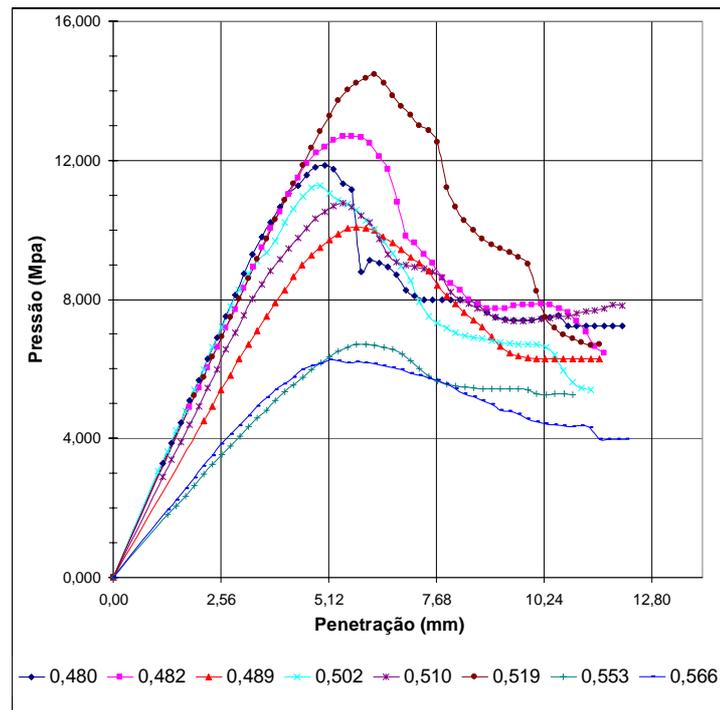


Gráfico 26: CBR – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg

Tabela 13: CBR x e – Amostra Breves

BREVES	Sobrecarga	Índice de Vazios	CBR
e máx = 0,933 e mín = 0,476	10kg	0,480	104
		0,487	87
		0,499	107
		0,500	101
		0,505	48
		0,509	61
		0,543	54
	20kg	0,554	41
		0,476	96
		0,492	94
		0,502	77
		0,504	88
		0,507	100
	30kg	0,509	93
		0,526	73
		0,480	104
		0,482	100
		0,489	78
		0,502	104
		0,510	91
		0,519	100
0,553	51		
0,566	56		

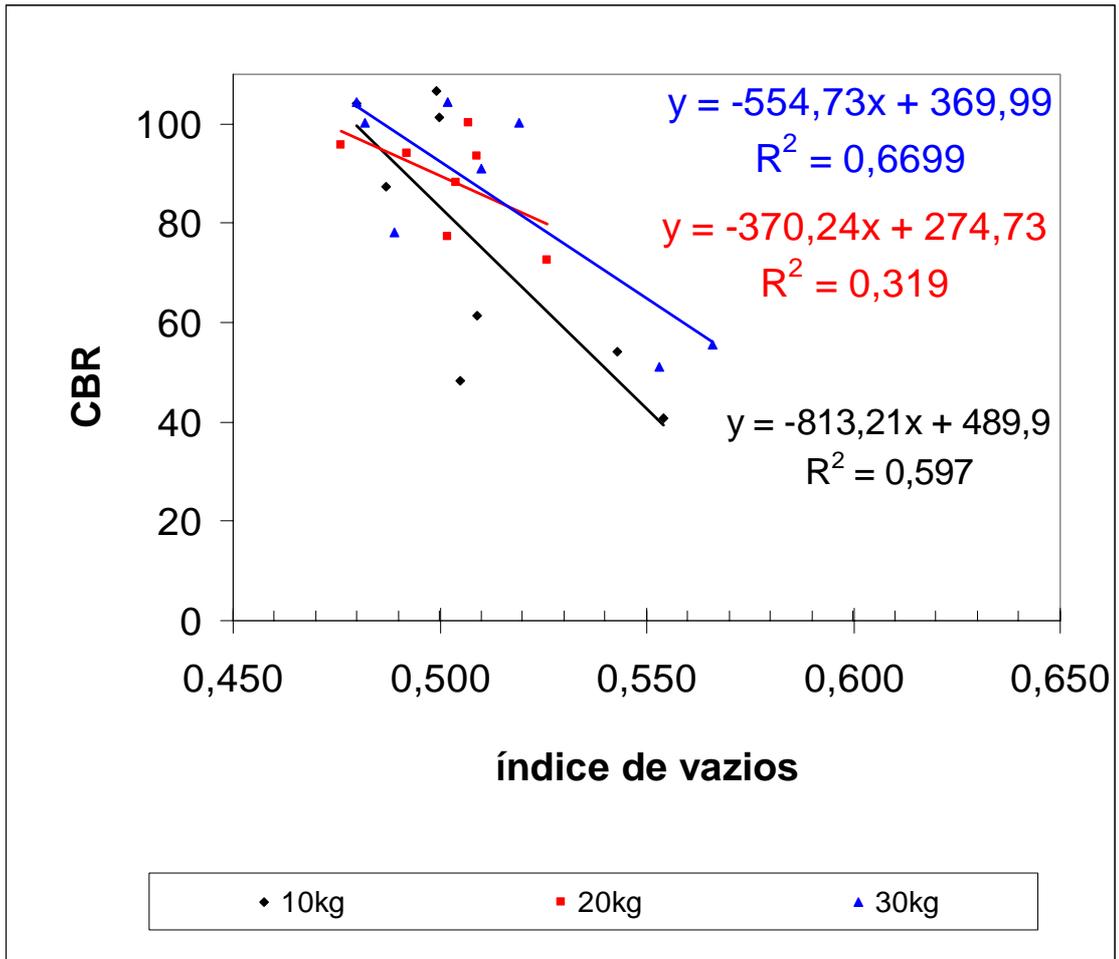


Gráfico 27: CBR x e – Amostra Breves, sobrecarga 30 kg

5 Análise de resultados

5.1 Correlação CBR x DCP baseada no índice de vazios

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos através do cruzamento de dados entre os dois ensaios em pauta, para cada uma das três amostras.

Pondera-se inicialmente que, a partir dos resultados apresentados nos itens 4.1 e 4.2, para todas as situações de análise, observa-se que os gráficos de CBR versus índice de vazios apresentaram dispersão muito superior à dos gráficos de DCP versus índice de vazios, constatação esta que pode ser interpretada a partir dos valores de R^2 das equações dos gráficos apresentados nos itens citados.

O cruzamento de dados pretendido foi realizado, então, tomando-se primeiramente os valores de CBR e índice de vazios constantes dos ensaios CBR.

Em seguida, foram calculados os valores de DCP correspondentes a cada índice de vazios do ensaio CBR, através das correlações entre DCP e índice de vazios apresentadas no item 4.1.

Por fim, de posse de valores de CBR (obtidos direto do ensaio CBR) e DCP (obtidos através das correlações empíricas extraídas do ensaio DCP), ambos correspondentes a um mesmo índice de vazios, foram confeccionados gráficos de CBR versus DCP para cada uma das amostras (ver Gráficos 28 a 30).

5.1.1 Amostra Jambeiro

Amostra	Sobrecarga	ensaios CBR		Correlação DCP x e:			DCP = a . e ^b
		e	CBR	a	b	R ²	DCP (mm/golpe)
JAMBEIRO	10 kg	0,460	67	1197,0	6,4661	0,9706	7,9
		0,469	68				9,0
		0,486	49				11,3
		0,496	37				12,9
		0,509	21				15,2
		0,536	13				21,2
	20 kg	0,446	80	594,0	5,6548	0,9993	6,2
		0,460	74				7,4
		0,469	63				8,2
		0,487	23				10,2
		0,488	32				10,3
		0,515	49				13,9
		0,526	26				15,7
	30 kg	0,555	13	1531,7	7,3334	0,9854	21,3
		0,461	64				5,2
		0,479	62				6,9
		0,491	56				8,3
		0,493	63				8,6
		0,531	23				14,8
		0,536	14				15,8
	0,628	7	50,5				

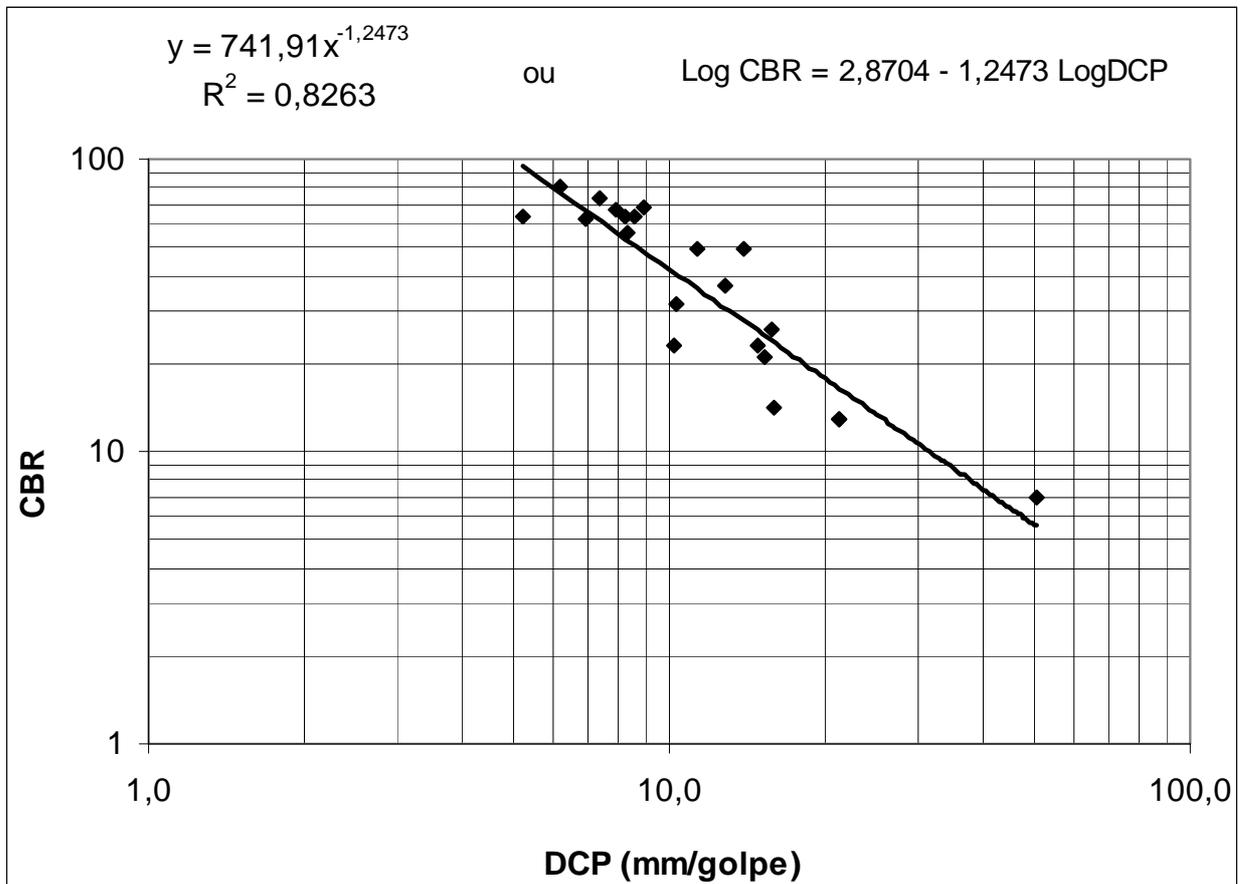


Gráfico 28: Correlação CBR x DCP – Amostra Jambeiro

5.1.2 Amostra Oiapoque

Amostra	Sobrecarga	ensaios CBR		Correlação DCP x e:			DCP = a . e ^b
		e	CBR	a	b	R ²	DCP (mm/golpe)
OIAPOQUE	10 kg	0,388	102	9034,3	7,2992	0,9609	9,0
		0,418	82				15,5
		0,425	81				17,5
		0,427	83				18,1
		0,454	46				28,4
		0,465	24				33,8
	20 kg	0,385	118	16396,0	8,3770	0,9383	5,5
		0,393	88				6,6
		0,412	94				9,7
		0,427	85				13,1
		0,432	56				14,5
		0,439	74				16,6
		0,442	89				17,6
	30 kg	0,459	19	3049,7	6,5121	0,9826	24,1
		0,389	118				6,5
		0,425	46				11,6
		0,432	79				12,9
		0,456	71				18,3
		0,461	76				19,7
		0,501	19				33,9

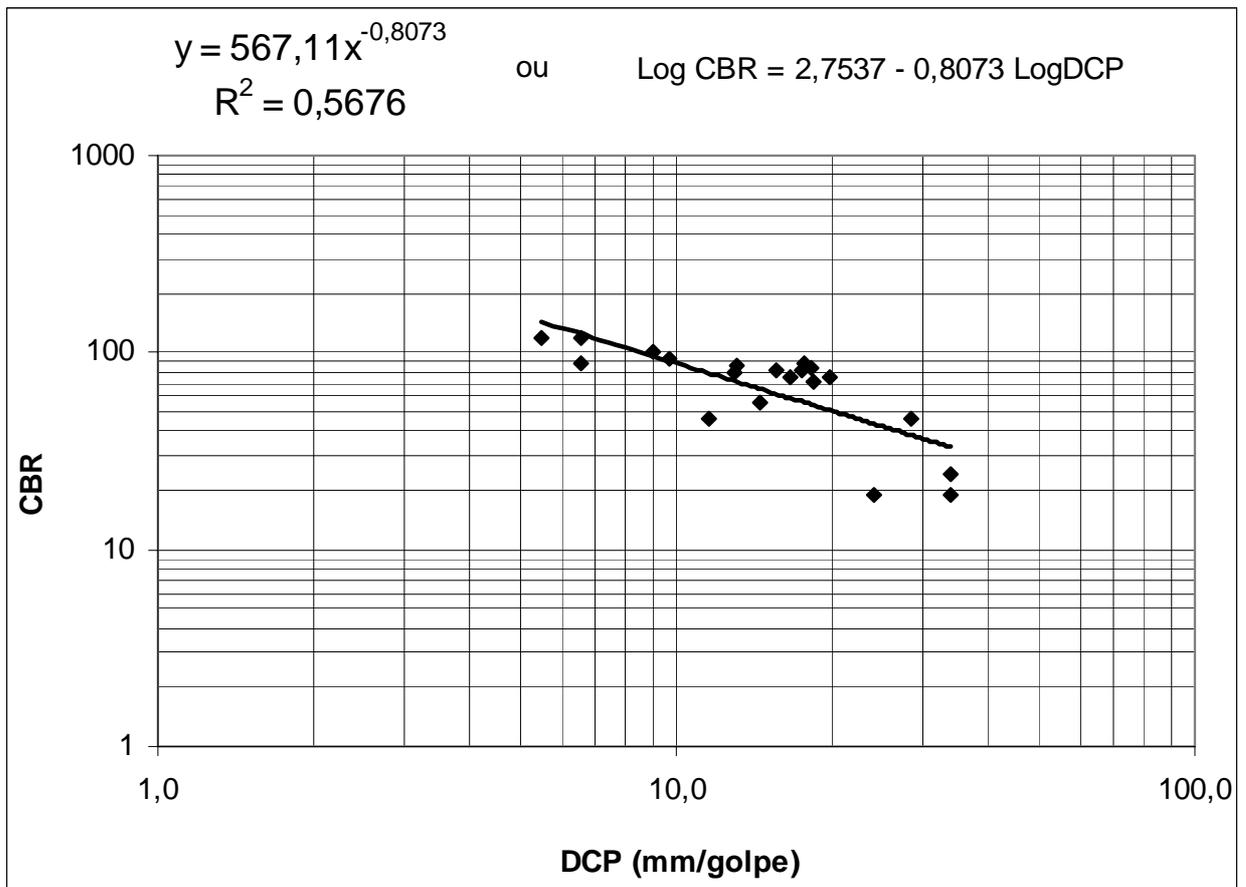


Gráfico 29: Correlação CBR x DCP – Amostra Oiapoque

5.1.3 Amostra Breves

Amostra	Sobrecarga	ensaios CBR		Correlação DCP x e:			DCP = a . e ^b
		e	CBR	a	b	R ²	DCP (mm/golpe)
BREVES	10	0,480	104	4053,2	7,8857	0,9692	12,4
		0,487	87				13,9
		0,499	107				16,9
		0,500	101				17,1
		0,505	48				18,5
		0,509	61				19,7
		0,543	54				32,8
		0,554	41				38,5
	20	0,476	96	6769,2	9,2736	0,9664	6,9
		0,492	94				9,4
		0,502	77				11,3
		0,504	88				11,8
		0,507	100				12,4
		0,509	93				12,9
		0,526	73				17,5
	30	0,480	104	3125,7	9,0409	0,9633	4,1
		0,482	100				4,3
		0,489	78				4,9
		0,502	104				6,2
		0,510	91				7,1
		0,519	100				8,3
		0,553	51				14,8
		0,566	56				18,2

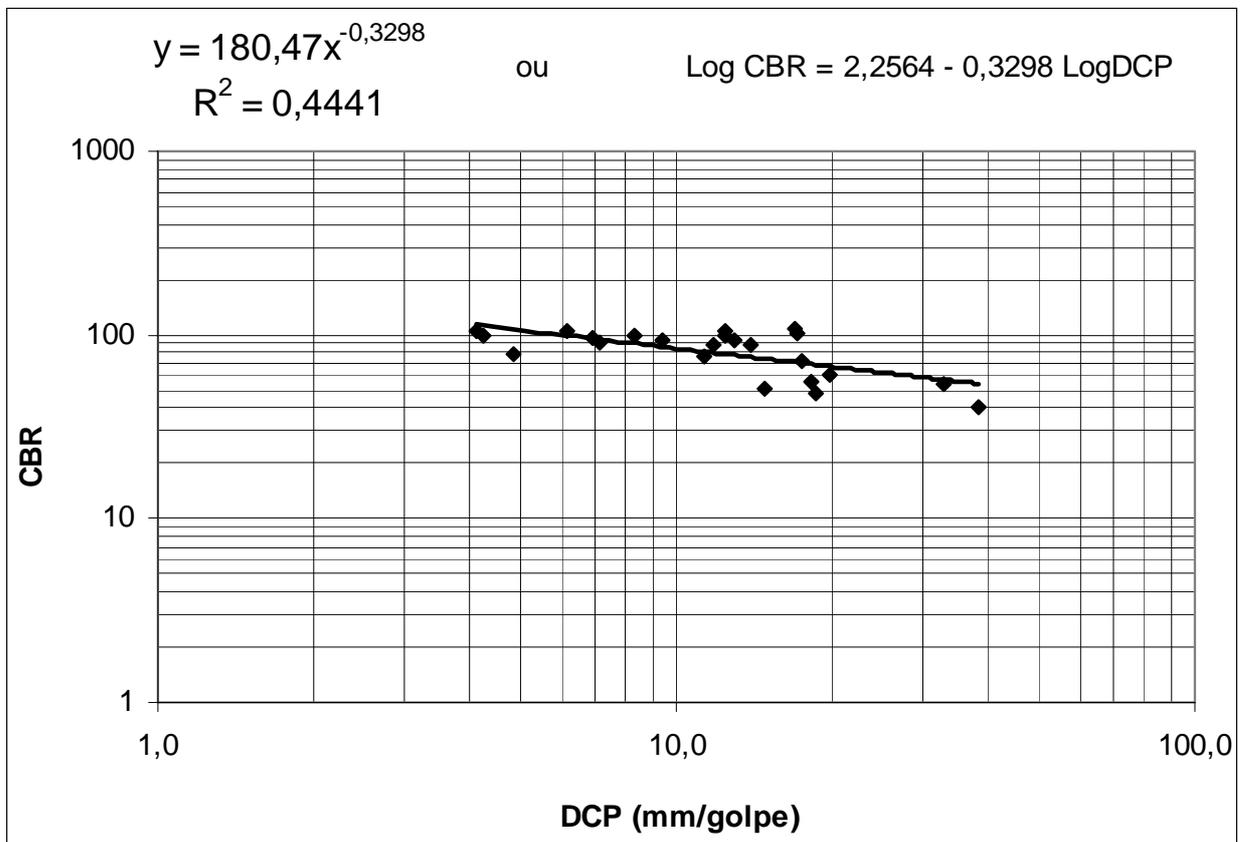


Gráfico 30: Correlação CBR x DCP – Amostra Breves

5.1.4 Todas as amostras

A título de comparação entre as correlações obtidas para as três amostras de areia, é apresentado o Gráfico 31 contendo as retas constantes dos três gráficos anteriores.

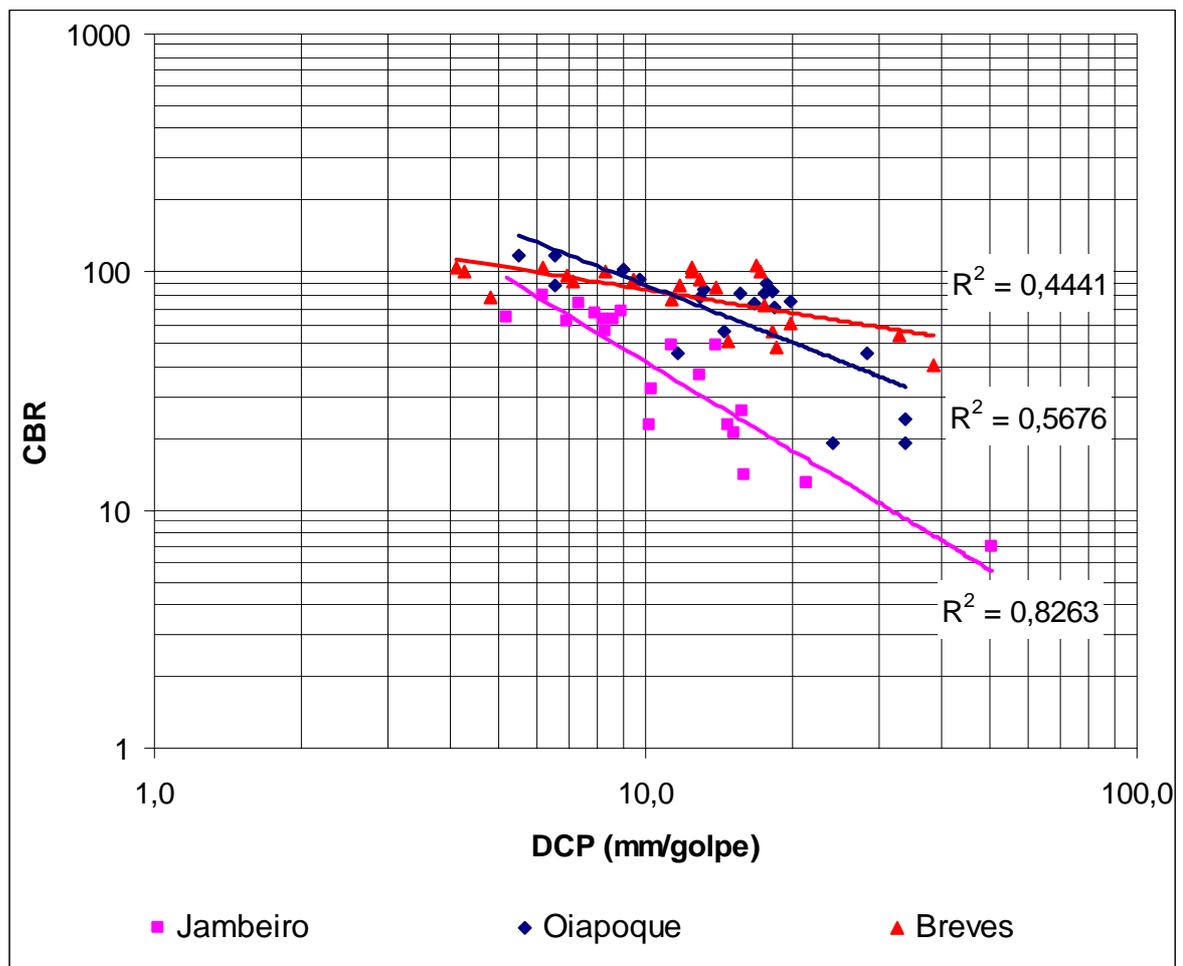


Gráfico 31: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras

5.2 Compacidade relativa

Considerando que o campo de variação do índice de vazios é diferente para cada areia, ou seja, os valores de índice de vazios mínimo e máximo são característicos para cada uma, tomou-se a idéia de que as correlações fossem baseadas em uma grandeza característica a ser definida para cada areia.

Para tanto, buscou-se achar relações que levassem em conta grandezas características do material, tais como os índices de vazios mínimo ($e_{MÍN}$) e máximo ($e_{MÁX}$). Foram testadas várias relações como $e/e_{MÍN}$, $e/e_{MÁX}$, $e/(e_{MÁX} - e_{MÍN})$, etc. Dentre elas, a que apresentou melhor resultado foi a que utiliza o conceito de compacidade relativa (CR), dada pela relação:

$$CR = (e_{MÁX} - e) / (e_{MÁX} - e_{MÍN})$$

Para a determinação da compacidade relativa correspondente a cada índice de vazios, utilizaram-se os índices de vazios máximo e mínimo de cada areia, já apresentados nos itens 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente.

Calculada a compacidade relativa correspondente a cada molde ensaiado no DCP de laboratório, foram avaliadas as correlações entre os resultados dos ensaios com o novo parâmetro.

Os resultados obtidos para a amostra de Jambeiro estão reunidos na Tabela 14 e podem ser melhor observados no Gráfico 32.

Tabela 14: Compacidade relativa – Amostra Jambeiro

JAMBEIRO		Sobrecarga	Índice de Vazios	Compacidade Relativa	DCP (mm/golpe)
e máx = 0,846	e mín = 0,446	10 kg	0,486	0,900	10,7
			0,490	0,890	12,0
			0,524	0,805	20,9
			0,567	0,698	26,6
			0,601	0,613	47,2
		20 kg	0,482	0,910	9,6
			0,501	0,863	12,0
			0,584	0,655	28,9
			0,613	0,583	36,7
		30 kg	0,475	0,928	6,9
			0,477	0,923	7,7
			0,483	0,908	8,0
			0,502	0,860	8,8
			0,504	0,855	8,5
			0,615	0,578	37,2
			0,650	0,490	66,7
			0,655	0,478	79,4

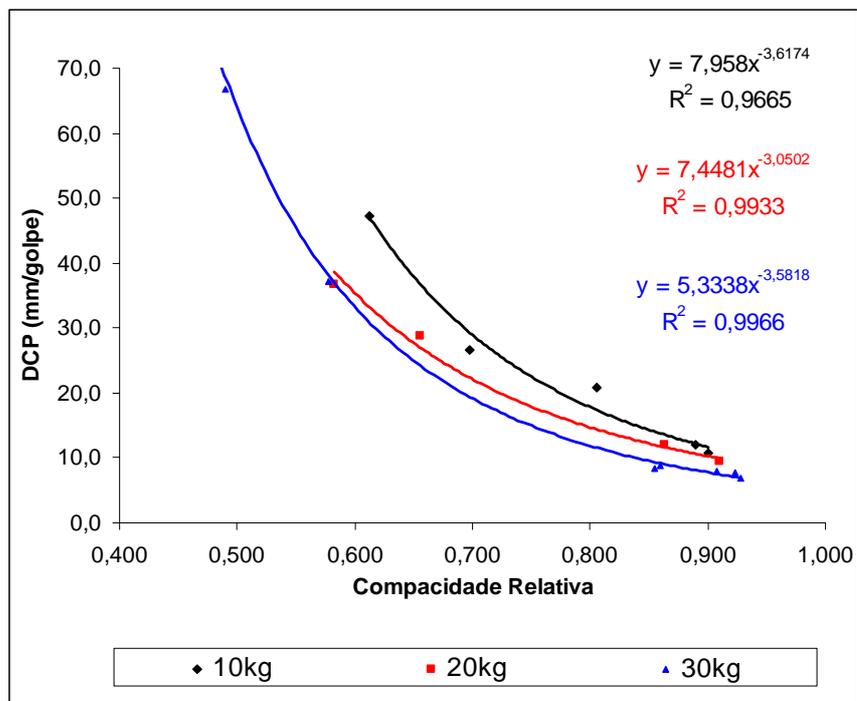


Gráfico 32: DCP x CR – Amostra Jambeiro

Os resultados obtidos para a amostra de Oiapoque estão reunidos na Tabela 15 e podem ser melhor observados no Gráfico 33.

Tabela 15: Compacidade relativa – Amostra Oiapoque

OIAPOQUE		Sobrecarga	Índice de Vazios	Compacidade Relativa	DCP (mm/golpe)
e máx = 0,665	e mín = 0,385	10 kg	0,415	0,893	16,3
			0,439	0,807	19,1
			0,455	0,750	29,2
			0,492	0,618	53,3
		20 kg	0,426	0,854	13,0
			0,431	0,836	12,6
			0,442	0,796	20,5
			0,480	0,661	33,9
		30 kg	0,410	0,911	8,9
			0,416	0,889	11,3
			0,430	0,839	11,4
			0,473	0,686	23,4
			0,498	0,596	33,0

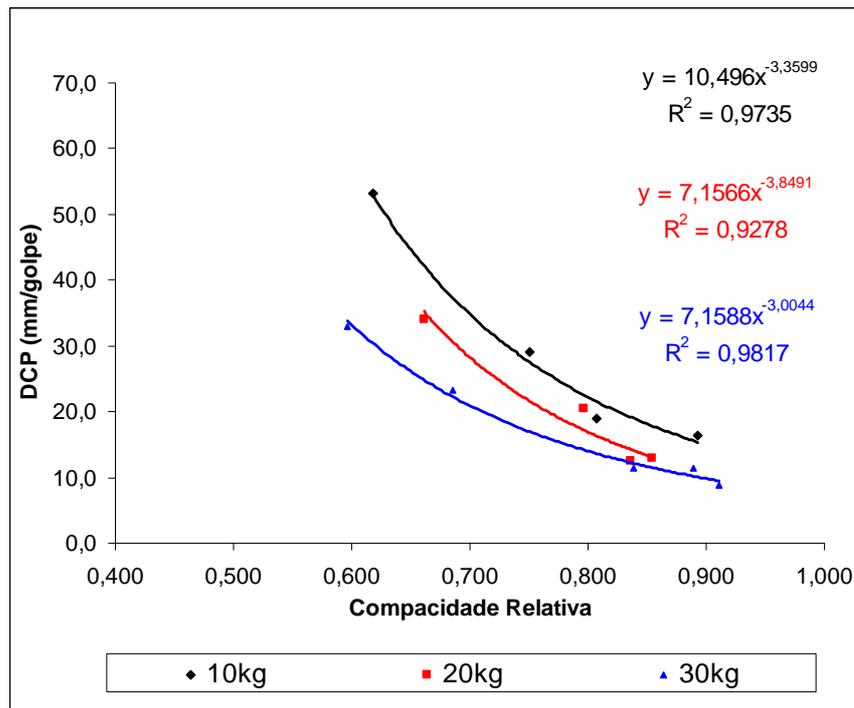


Gráfico 33: DCP x CR – Amostra Oiapoque

Os resultados obtidos para a amostra de Breves estão reunidos na Tabela 16 e podem ser melhor observados no Gráfico 34.

Tabela 16: Compacidade relativa – Amostra Breves

BREVES		Sobrecarga	Índice de Vazios	Compacidade Relativa	DCP (mm/golpe)	
e máx = 0,933 e mín = 0,476	10 kg	10 kg	0,502	0,943	18,4	
			0,558	0,821	35,9	
			0,587	0,757	66,2	
		20 kg	0,513	0,919	15,0	
			0,538	0,864	21,7	
			0,554	0,829	24,0	
	30 kg	0,601	0,726	65,1		
		0,516	0,912	8,9		
		0,561	0,814	16,1		
		0,593	0,744	21,5		
				0,628	0,667	48,6
				0,647	0,626	69,9

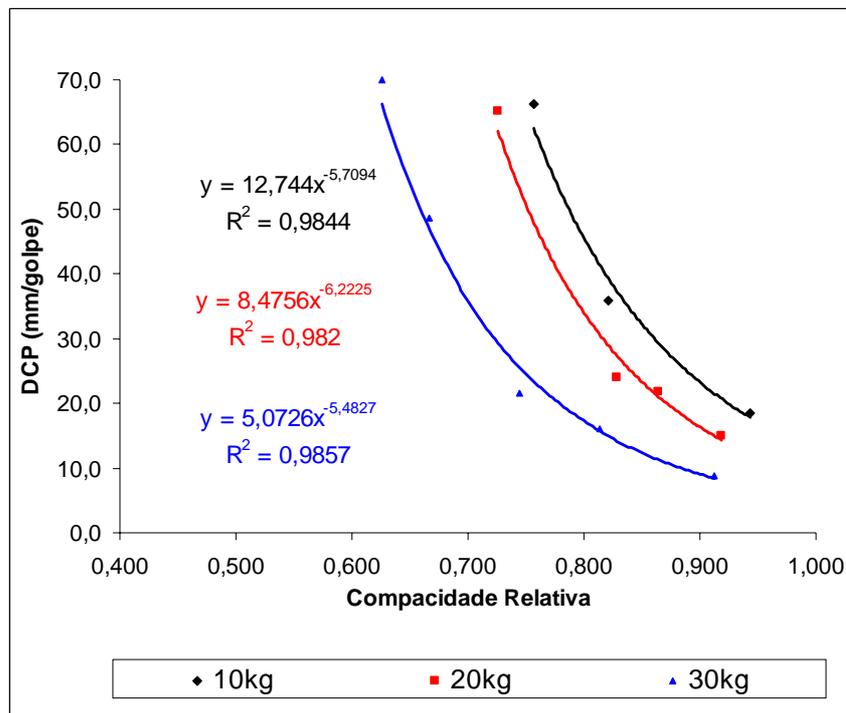


Gráfico 34: DCP x CR – Amostra Breves

O valor de R^2 para a correlação CBR versus compacidade relativa é o mesmo da correlação CBR versus índice de vazios, uma vez que uma correlação é linearmente dependente da outra. Ou seja, a determinação de correlações CBR x CR não interessa ao estudo.

5.3 Correlação CBR x DCP baseada na compacidade relativa

Semelhantemente ao procedimento adotado no item 5, foi realizado novo cruzamento de dados para tentar obterem-se correlações entre CBR e DCP que apresentassem valores de R^2 mais elevados.

Tomaram-se primeiramente os valores de CBR diretamente dos ensaios e foram calculados os valores de compacidade relativa correspondentes aos índices de vazios dos corpos de prova dos ensaios CBR.

Em seguida, foram obtidos os valores de DCP correspondentes a cada valor de CR, através das correlações entre DCP e compacidade relativa apresentadas no item 5.2, os quais apresentaram elevados valores de R^2 .

Por fim, de posse de valores de CBR e DCP, foram confeccionados gráficos de CBR versus DCP para cada uma das amostras (ver Gráficos 35 a 38).

5.3.1 Amostra Jambeiro

Amostra	Sobrecarga	Ensaio CBR		Compacidade Relativa	Correlação DCPxCR: $DCP = a.(CR)^b$			DCP (mm/golpe)
		e	CBR		a	b	R ²	
JAMBEIRO	10 kg	0,460	67	0,97	7,9580	-3,6174	0,9665	9,1
		0,469	68	0,94				9,9
		0,486	49	0,90				11,7
		0,496	37	0,88				12,9
		0,509	21	0,84				14,8
		0,536	13	0,78				20,0
	20 kg	0,446	80	1,00	7,4481	-3,0502	0,9933	7,4
		0,460	74	0,97				8,3
		0,469	63	0,94				8,9
		0,487	23	0,90				10,4
		0,488	32	0,90				10,4
		0,515	49	0,83				13,3
		0,526	26	0,80				14,7
	30 kg	0,555	13	0,73	5,3338	-3,5818	0,9966	19,7
		0,461	64	0,96				6,1
		0,479	62	0,92				7,3
		0,491	56	0,89				8,2
		0,493	63	0,88				8,3
		0,531	23	0,79				12,6
		0,536	14	0,78				13,3
	0,628	7	0,55	46,9				

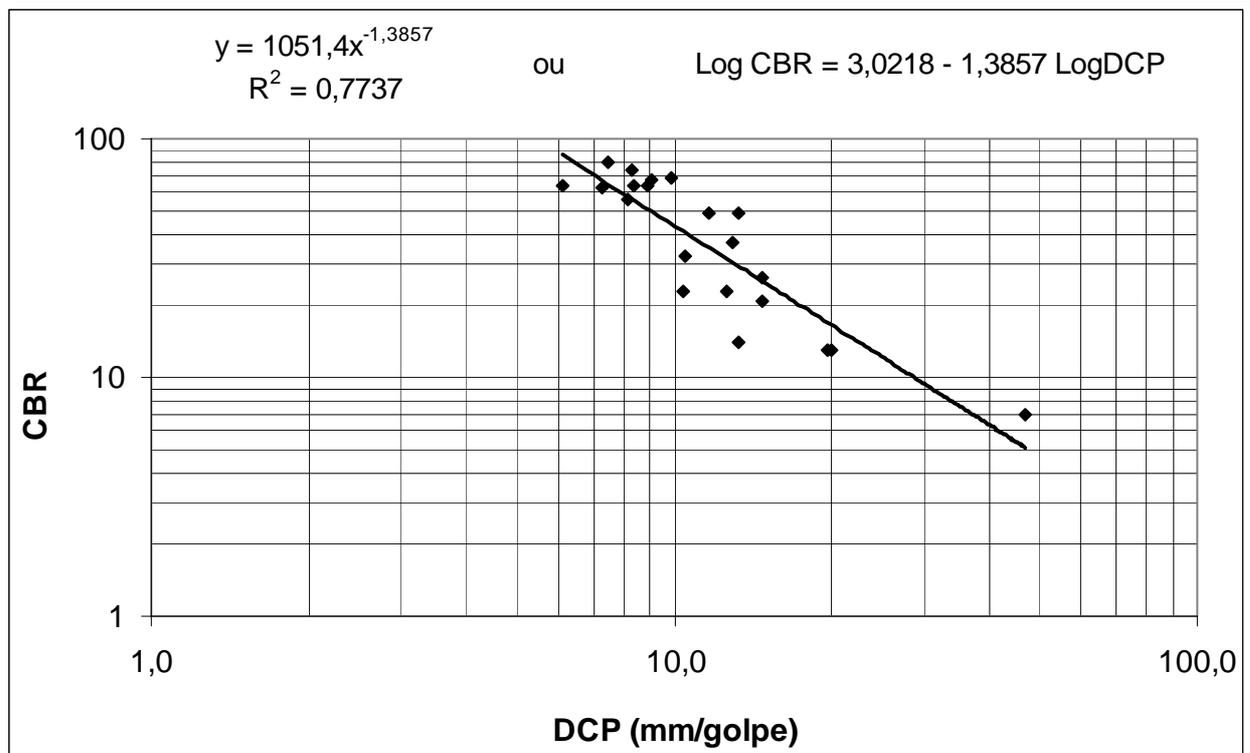


Gráfico 35: Correlação CBR x DCP – Amostra Jambeiro

5.3.2 Amostra Oiapoque

Amostra	Sobrecarga	Ensaio CBR		Compacidade Relativa	Correlação DCPxCR:			DCP = a . (CR) ^b DCP (mm/golpe)
		e	CBR		a	b	R ²	
OIAPOQUE	10 kg	0,388	102	0,99	10,4960	-3,3599	0,9735	10,9
		0,418	82	0,88				16,0
		0,425	81	0,86				17,6
		0,427	83	0,85				18,1
		0,454	46	0,75				27,2
		0,465	24	0,71				32,5
	20 kg	0,385	118	1,00	7,1566	-3,8491	0,9278	7,2
		0,393	88	0,97				8,0
		0,412	94	0,90				10,6
		0,427	85	0,85				13,4
		0,432	56	0,83				14,5
		0,439	74	0,81				16,3
		0,442	89	0,80				17,2
	30 kg	0,459	19	0,74	7,1588	-3,0044	0,9817	23,3
		0,389	118	0,99				7,5
		0,425	46	0,86				11,4
		0,432	79	0,83				12,4
		0,456	71	0,75				17,2
		0,461	76	0,73				18,5
			0,501	19	0,59			35,7

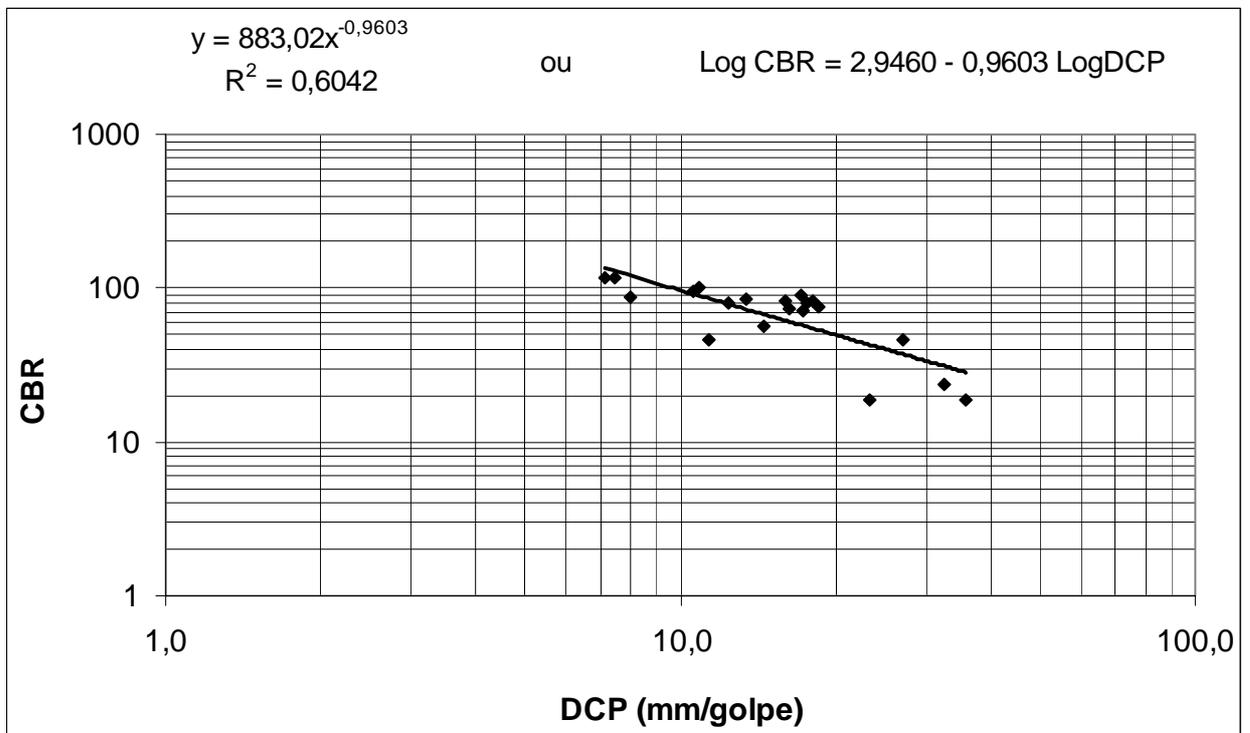


Gráfico 36: Correlação CBR x DCP – Amostra Oiapoque

5.3.3 Amostra Breves

Amostra	Sobrecarga	Ensaio CBR		Compacidade Relativa	Correlação DCPxCR:			DCP = a . (CR) ^b DCP (mm/golpe)
		e	CBR		a	b	R ²	
BREVES	10	0,480	104	0,99	12,7440	-5,7094	0,9844	13,4
		0,487	87	0,98				14,6
		0,499	107	0,95				17,1
		0,500	101	0,95				17,3
		0,505	48	0,94				18,5
		0,509	61	0,93				19,6
		0,543	54	0,85				31,5
		0,554	41	0,83				37,1
	20	0,476	96	1,00	8,4756	-6,2225	0,9820	8,5
		0,492	94	0,96				10,6
		0,502	77	0,94				12,2
		0,504	88	0,94				12,6
		0,507	100	0,93				13,1
		0,509	93	0,93				13,5
		0,526	73	0,89				17,4
	30	0,480	104	0,99	5,0726	-5,4827	0,9857	5,3
		0,482	100	0,99				5,5
		0,489	78	0,97				5,9
		0,502	104	0,94				7,0
		0,510	91	0,93				7,8
		0,519	100	0,91				8,7
		0,553	51	0,83				13,9
		0,566	56	0,80				16,9

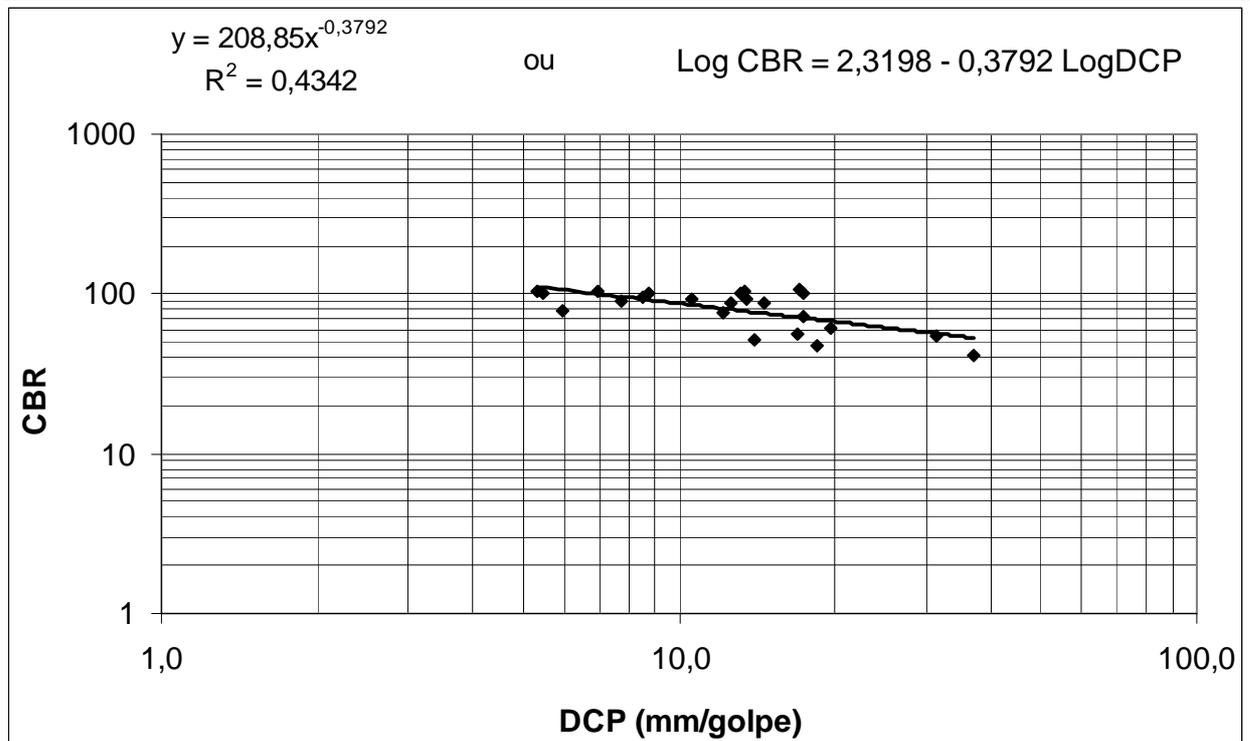


Gráfico 37: Correlação CBR x DCP – Amostra Breves

5.3.4 Todas as amostras

Apresentam-se no Gráfico 38 as três correlações nos subitens anteriores, a título de comparação entre as mesmas.

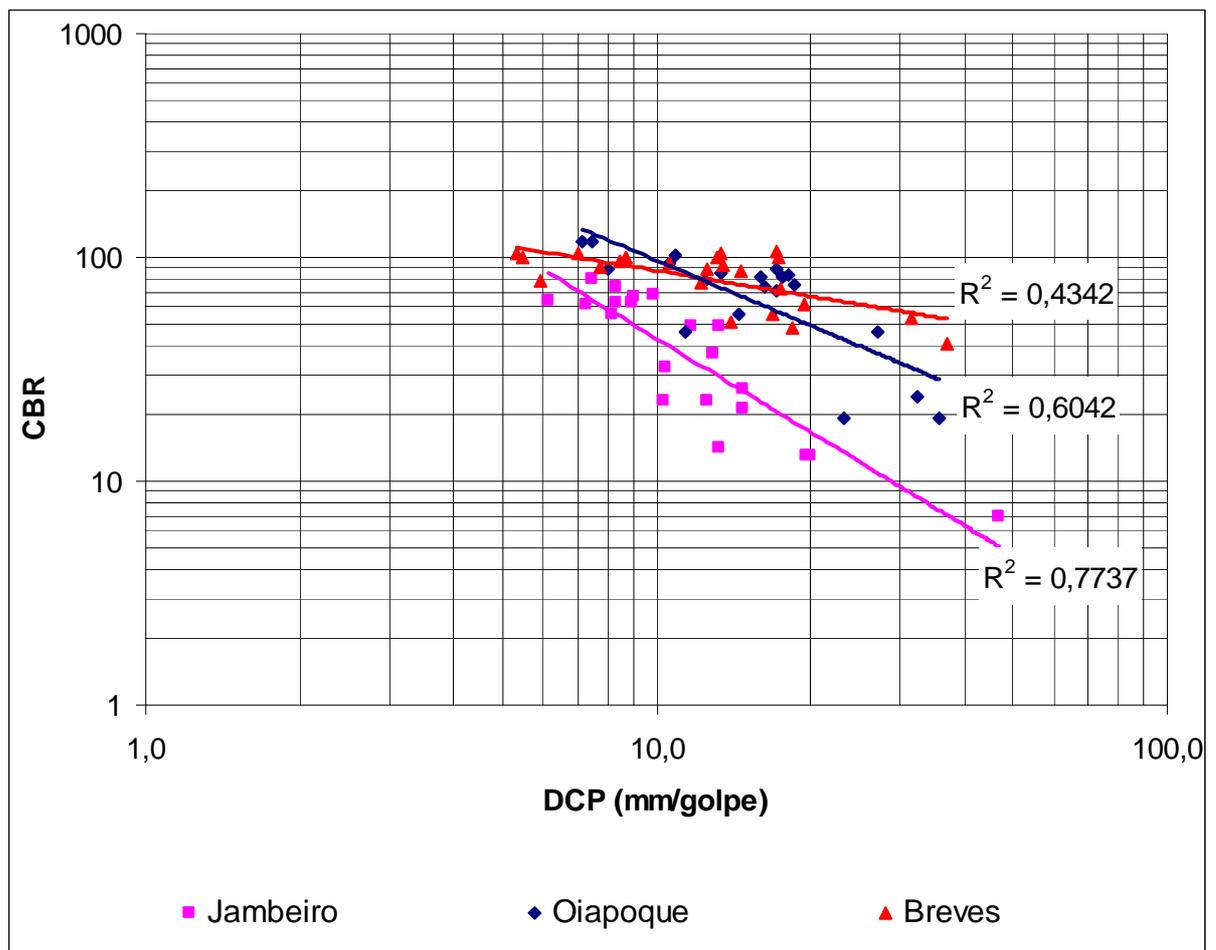


Gráfico 38: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras

6 Discussão de resultados

6.1 Correlações CBR x DCP

No item 5 foram apresentadas as correlações entre CBR e DCP obtidas através do cruzamento de dados a partir do índice de vazios e através do cruzamento de dados a partir da compactidade relativa.

Na junção dos resultados, tem-se o quadro resumo a seguir:

Amostra	Pelo índice de vazios	Pela compactidade relativa
Jambeiro	Log CBR = 2,8704 – 1,2473 Log DCP R² = 0,8263	Log CBR = 3,0218 – 1,3857 Log DCP R ² = 0,7737
Oiapoque	Log CBR = 2,7537 – 0,8073 Log DCP R ² = 0,5676	Log CBR = 2,9460 – 0,9603 Log DCP R² = 0,6042
Breves	Log CBR = 2,2564 – 0,3298 Log DCP R² = 0,4441	Log CBR = 2,3198 – 0,3792 Log DCP R ² = 0,4342

Quadro 3: Correlações CBR x DCP - Resumo

Como as correlações entre CBR e índice de vazios ou compactidade relativa apresentaram baixos valores de R², era de se esperar que as correlações CBR x DCP apresentassem baixos coeficientes de determinação, de igual forma.

Observa-se que os resultados obtidos nas duas situações distintas, para todas as amostras consideradas, não apresentaram diferenças tão significativas entre si em termos do coeficiente de determinação da reta (R²).

No entanto, já que se dispõe de dois resultados para cada caso, escolhe-se o que apresenta maior valor de R² (resultados em negrito na tabela acima) e, com isso, chega-se a um resultado final dado no Quadro 4 e representado graficamente no Gráfico 39.

Amostra	Correlação CBR x DCP
Jambeiro	$\text{Log CBR} = 2,8704 - 1,2473 \text{ Log DCP}$ $R^2 = 0,8263$
Oiapoque	$\text{Log CBR} = 2,9460 - 0,9603 \text{ Log DCP}$ $R^2 = 0,6042$
Breves	$\text{Log CBR} = 2,2564 - 0,3298 \text{ Log DCP}$ $R^2 = 0,4441$

Quadro 4: Correlações CBR x DCP - Final

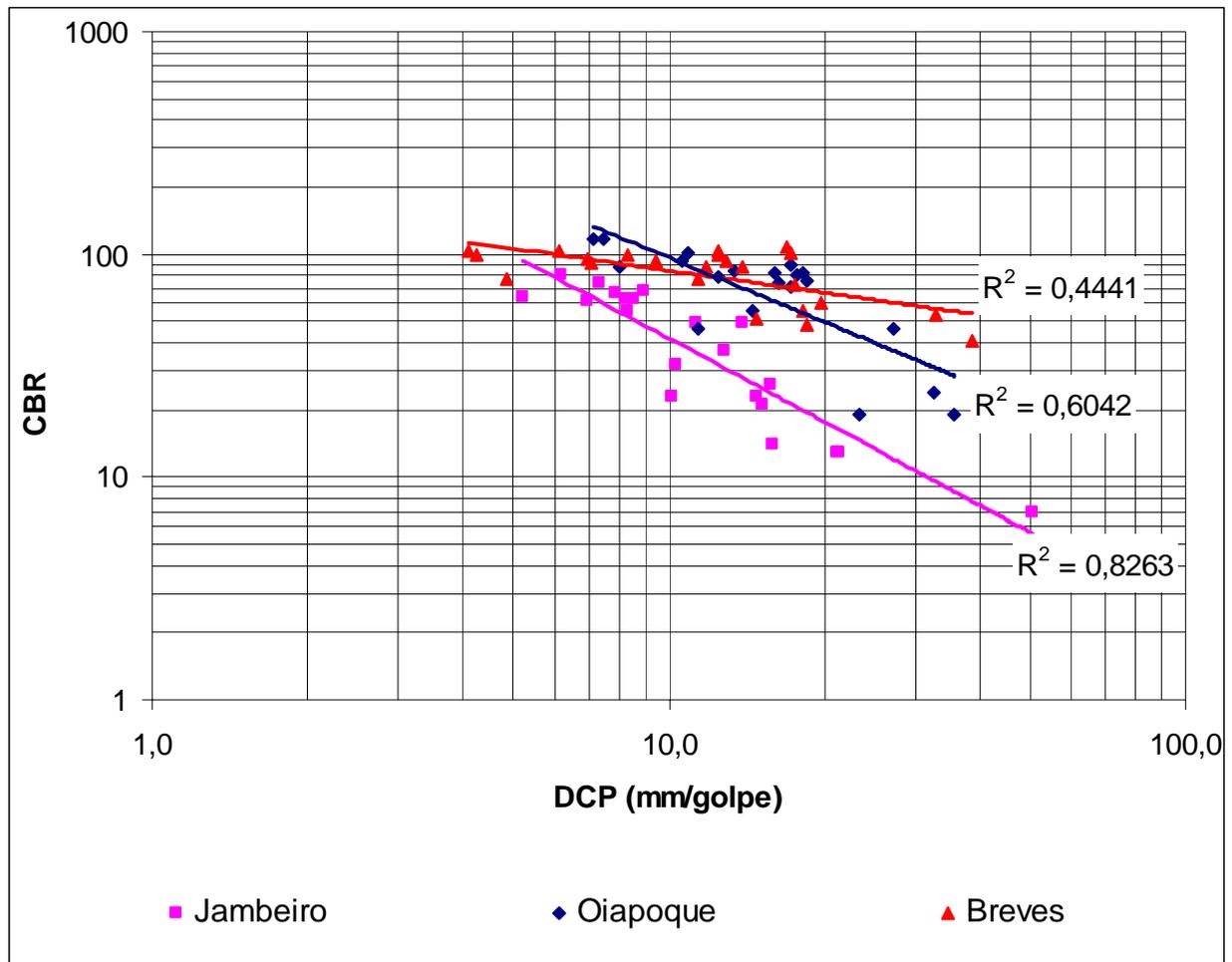


Gráfico 39: Correlações CBR x DCP – Todas as amostras

O Gráfico 39 mostra diferenças significativas entre as correlações obtidas para as amostras de areias constantes do presente estudo.

Obviamente uma eventual correlação única CBR x DCP, para qualquer areia, seria um resultado mais desejável por parte de futuros usuários do equipamento e da comunidade científica. No entanto, constata-se que a intenção de se definir uma correlação CBR x DCP única não pode ser levada a cabo.

6.1.1 Correlação geral

Mesmo com a impossibilidade de se definir uma correlação única, buscou-se identificar alguma ligação das correlações obtidas com parâmetros ligados à granulometria da amostra e, assim, permitir uma eventual extensão de resultados.

De posse das correlações finais CBR x DCP obtidas para as três amostras e, considerando o que foi apresentado no item 3.1.3, que versa sobre as diferenças granulométricas entre as amostras em estudo, tem-se o panorama apresentado na Quadro 5.

Amostra	Correlação Log CBR x Log DCP		Parâmetros Granulométricos	
	Coefficiente Angular	Coefficiente Linear	C _u	C _c
Jambeiro	-1,2473	2,8704	5,9	1,00
Oiapoque	-0,9603	2,9460	3,1	0,70
Breves	-0,3298	2,2564	1,6	0,90

Quadro 5: Panorama – CBR x DCP e Parâmetros granulométricos

Foram efetuadas várias tentativas de se obter correlação entre os coeficientes angular e linear da reta das correlações de Log CBR x Log DCP, com os parâmetros granulométricos C_u e C_c através de relações entre estes, do tipo C_u^m · C_cⁿ (m, n inteiros).

Dentre os resultados obtidos na análise de regressão, destacaram-se, pelo elevado valor de R^2 apresentado, as correlações do Coeficiente Angular versus a relação $C_u^{-1} \cdot C_c^{-1}$ e do Coeficiente Linear versus a relação $C_u^{-1} \cdot C_c^{-2}$, apresentadas no Gráfico 40 e Gráfico 41, respectivamente.

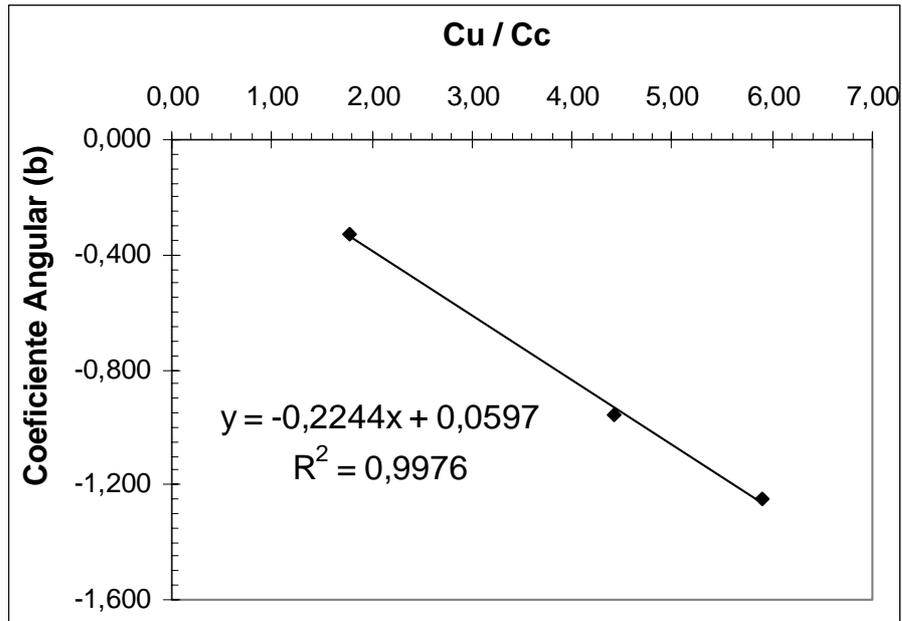


Gráfico 40: Coeficiente angular x C_u / C_c

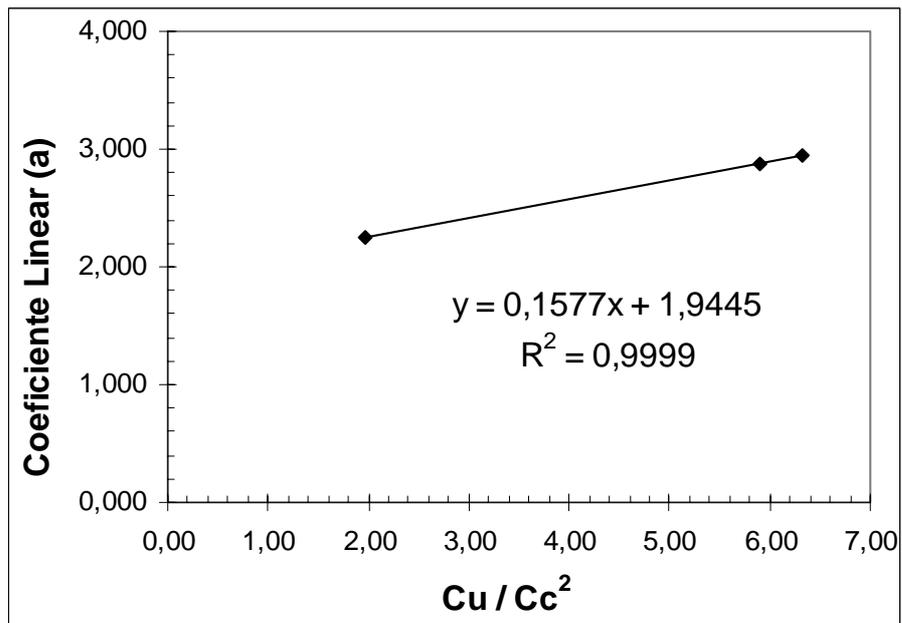


Gráfico 41: Coeficiente linear x C_u / C_c^2

Considerando que as correlações entre CBR e DCP são dadas por equações do tipo:

$$\text{Log CBR} = a + b \text{ Log DCP}$$

Onde: **a**, **b** = coeficientes linear e angular da reta, respectivamente.

Pode-se então obter graficamente a equação da correlação CBR x DCP para qualquer uma das três amostras aqui estudadas, determinando-se no Gráfico 40 o coeficiente angular da reta a partir do valor da relação C_u/C_c e, no Gráfico 41, o coeficiente linear da reta a partir do valor da relação C_u/C_c^2 .

Ou então, pode-se ainda definir uma correlação múltipla para as três areias constantes do estudo, a saber:

$$\text{Log CBR} = (1,9445 + 0,1577 \cdot C_u C_c^{-2}) + (0,0597 - 0,2244 \cdot C_u C_c^{-1}) \text{ Log DCP}$$

Observa-se já neste primeiro momento a ligação entre a inclinação (coeficiente angular) e a interceptação (coeficiente linear) da reta de correlação Log CBR x Log DCP com os parâmetros relacionados à distribuição granulométrica da areia.

6.1.2 Elasticidade

Para um melhor entendimento das diferenças apresentadas pelas correlações das três amostras do estudo, recorreu-se a um parâmetro estatístico: a elasticidade.

A elasticidade de uma curva é definida por Pindyck e Rubinfeld (1998), como:

Elasticidade = $Y' \cdot (X/Y)$, onde Y' = derivada parcial de Y em relação a X

As equações de correlação CBR x DCP são do tipo $Y = a \cdot X^b$ (a, b: reais). Fazendo uso da fórmula apresentada, para equações desse tipo, tem-se:

$$\text{Elasticidade} = (a \cdot b \cdot X^{b-1} \cdot X) / (a \cdot X^b) = b$$

Segundo Pindyck e Rubinfeld (1998), o aumento, em módulo, de 1 no valor de X, corresponde a uma variação percentual no valor de Y, numericamente igual à elasticidade. No caso deste estudo, isso significa dizer que o aumento de 1 no valor de DCP corresponde a uma diminuição de |b| no valor do CBR.

Lembrando da correlação geral encontrada no item 6.1.1, tem-se que a elasticidade de uma amostra pode ser encontrada diretamente da correlação com parâmetros de granulometria da amostra, a saber: $b = 0,0597 - 0,2244 \cdot C_u C_c^{-1}$.

Este dado auxilia na compreensão das diferenças entre as inclinações das retas de correlação encontradas para as diferentes amostras, uma vez que os valores de C_u e C_c são característicos de cada uma delas.

Considerando os valores de b apresentados no Quadro 4, conclui-se que as amostras de Jambeiro e Breves possuem, respectivamente, maior e menor elasticidade à variação do DCP para o cálculo do CBR.

6.1.3 Tratamento estatístico

Mesmo com a junção dos resultados descrita no início do item 6.1, observa-se que os valores de R^2 apresentados pelas correlações das amostras de Oiapoque e Breves são baixos, especialmente o valor apresentado pela correlação de Breves, que é inferior a 0,50.

Não é intenção do presente estudo apresentar uma solução que substitua o que foi encontrado e apresentado no Quadro 4. Tais resultados são importantes e derivam de experimentos realizados conforme apresentado no corpo deste documento.

Contudo, buscou-se efetuar uma rotina de tratamento estatístico dos dados ora obtidos que permitisse a obtenção de correlações CBR x DCP com valores de R^2 mais elevados. Para tanto, avaliaram-se as alterações decorrentes de eliminações de alguns dos pontos, que estivessem fora de um determinado intervalo de confiança.

Primeiramente, partindo-se de um conjunto de pontos (**DCP, CBR**) disponíveis para cada amostra, determinou-se a melhor reta através da regressão linear pelo método de mínimos quadrados, em que a reta adotada corresponde àquela que leva à mínima soma dos quadrados das distâncias da reta aos pontos experimentais (COSTA NETO, 2002). Vale ressaltar que tal procedimento foi adotado em todas as regressões apresentadas no presente estudo.

Conhecida a melhor reta, partiu-se para a determinação do intervalo de confiança, conforme definido por Costa Neto (2002) e resumidamente apresentado a seguir.

Para um determinado valor de x :

$$y = y_{\text{RETA}} \pm t_{n-2, \alpha/2} \cdot S_R \cdot [1 + 1/n + (x - x_{\text{MÉDIO}})^2/S_{xx}]^{1/2}$$

Onde:

y_{RETA} = ordenada calculada pela equação da reta de regressão;

y = ordenadas do intervalo de confiança;

n = número de pontos da amostra;

$t_{n-2, \alpha/2}$ = parâmetro da distribuição t de Student, com nível de confiança $1-\alpha$;

S_R^2 = variância residual;

S_{xx} = $(n-1) \cdot \sigma^2$; e

σ^2 = variância.

Foi adotado o nível de confiança de 80%, o menor dentre as opções disponíveis para a tabela de parâmetros da distribuição t de Student. Quanto maior o nível de confiança, maior o intervalo de confiança e, com isso, menos pontos a serem eliminados da análise, o que vai na contramão das expectativas desta tentativa.

Uma vez definidos os intervalos de confiança para as correlações CBR x DCP de cada uma das amostras, foram removidos os pontos constantes fora dos intervalos e obtidas novas equações de reta com os pontos restantes.

Tais resultados são apresentados nos gráficos que seguem, incluindo a representação dos intervalos de confiança de 80%. Para cada uma das três amostras, são apresentados o gráfico original, conforme item 6.1 e, em seguida, o gráfico obtido após a eliminação de pontos fora do intervalo considerado (ver Gráficos 42 a 47).

6.1.3.1 Amostra Jambeiro

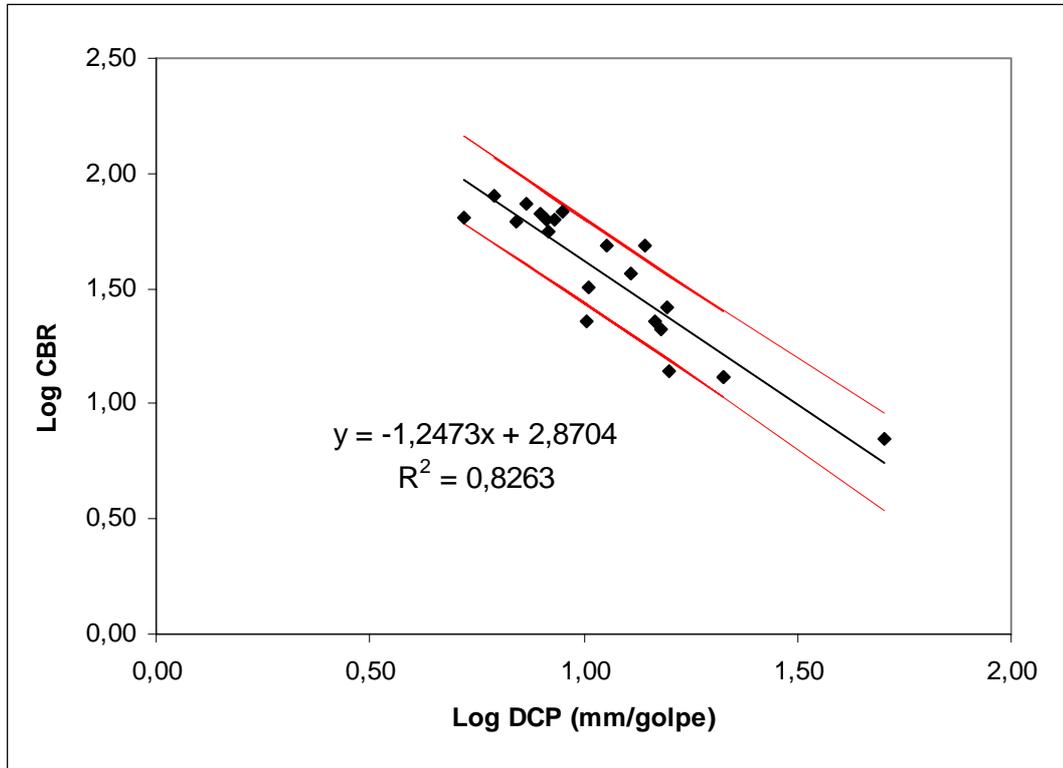


Gráfico 42: CBR x DCP – Amostra Jambeiro

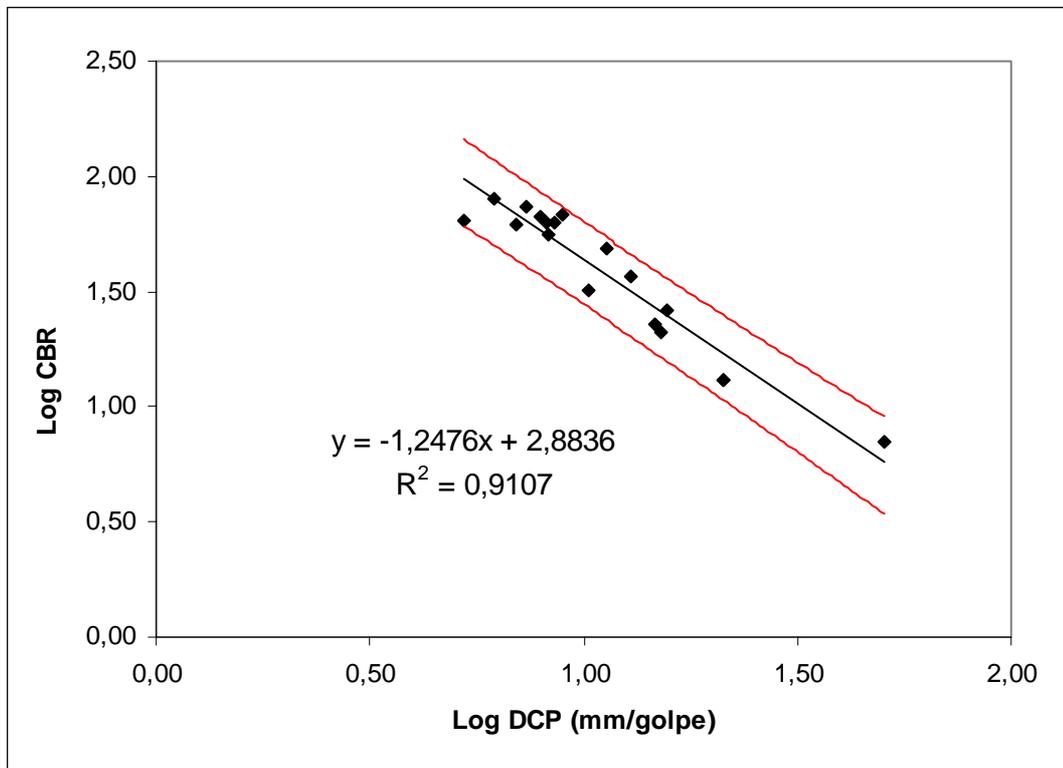


Gráfico 43: CBR x DCP – Amostra Jambeiro, após eliminação de pontos

6.1.3.2 Amostra Oiapoque

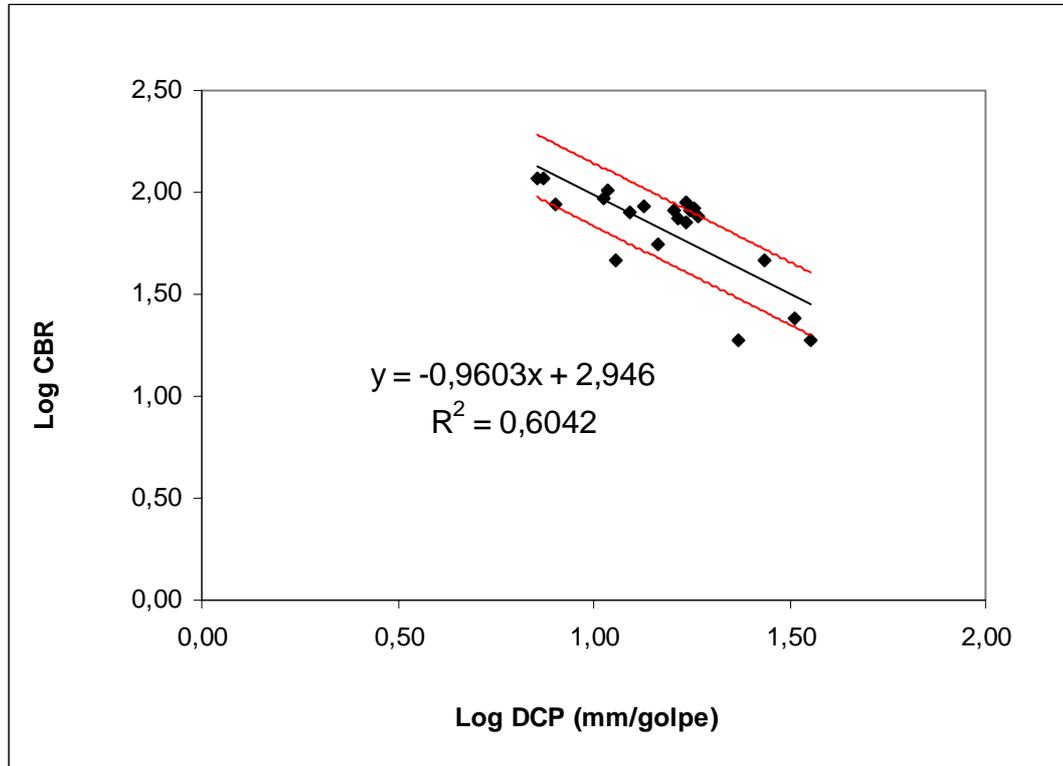


Gráfico 44: CBR x DCP – Amostra Oiapoque

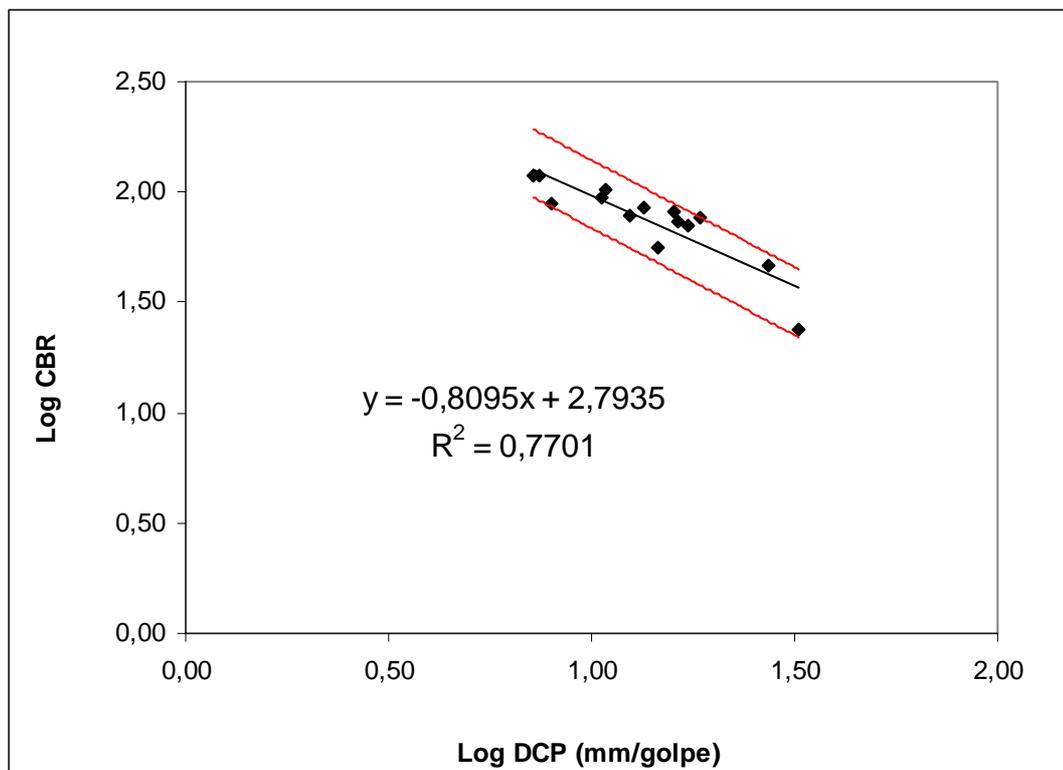


Gráfico 45: CBR x DCP – Amostra Oiapoque, após eliminação de pontos

6.1.3.3 Amostra Breves

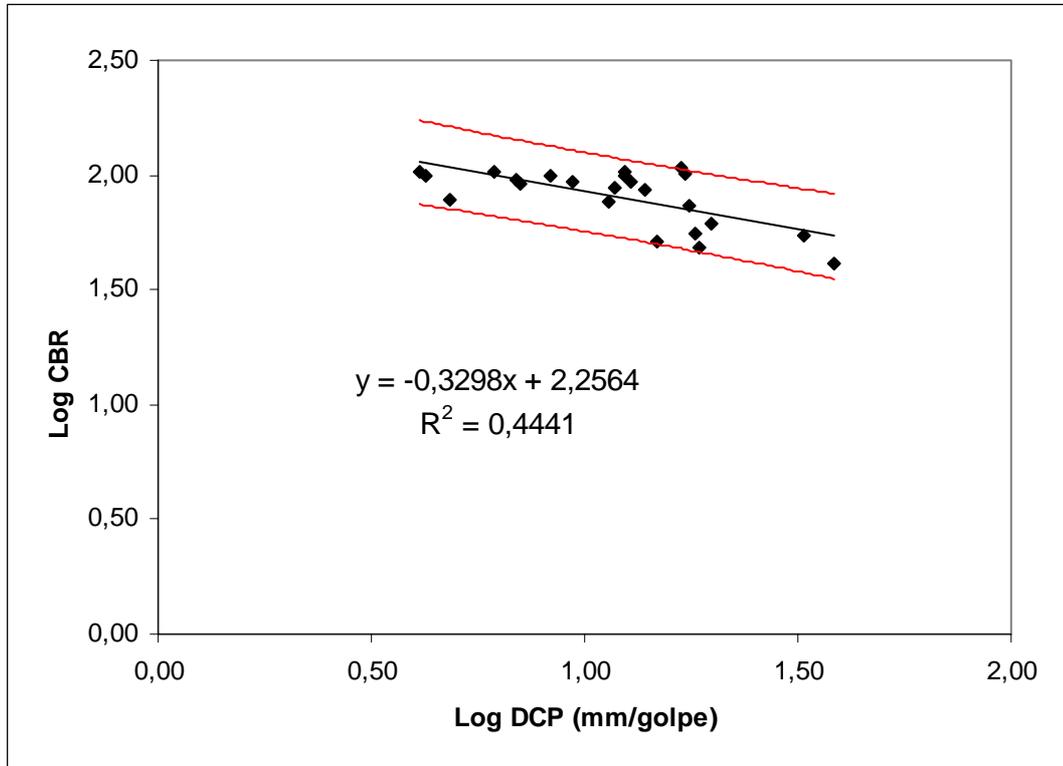


Gráfico 46: CBR x DCP – Amostra Breves

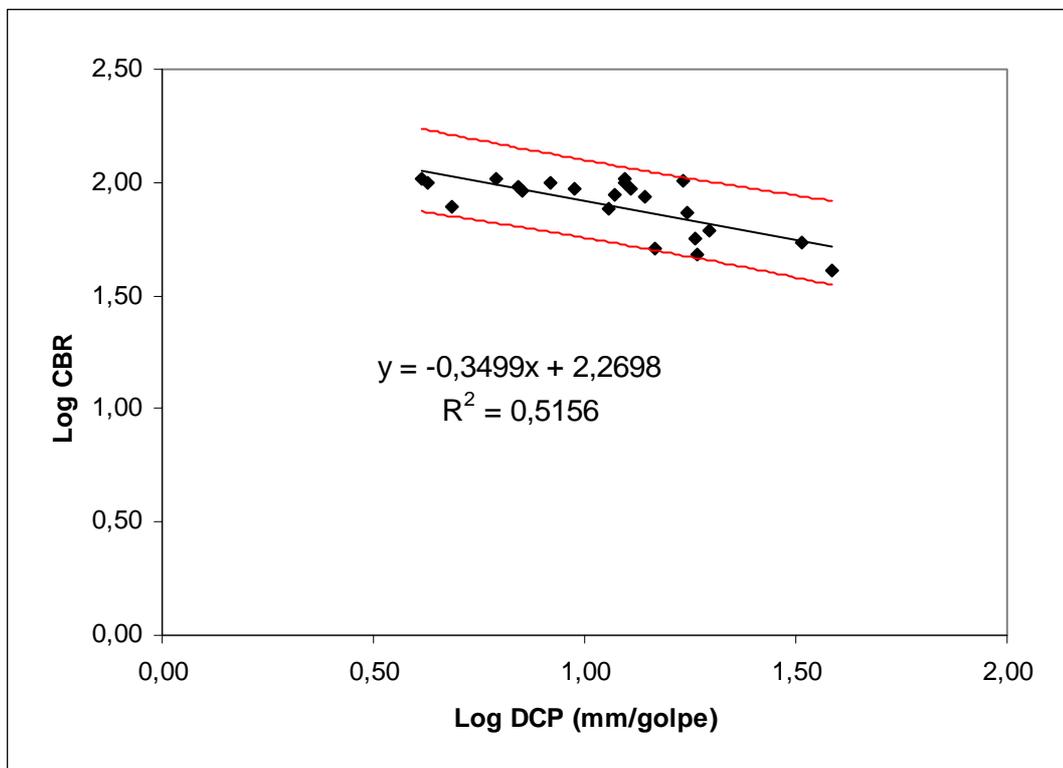


Gráfico 47: CBR x DCP – Amostra Breves, após eliminação de pontos

6.1.3.4 Todas as amostras

Resumindo as duas situações para todas as amostras em gráficos que contenham todas as amostras juntas, têm-se os Gráficos 48 e 49:

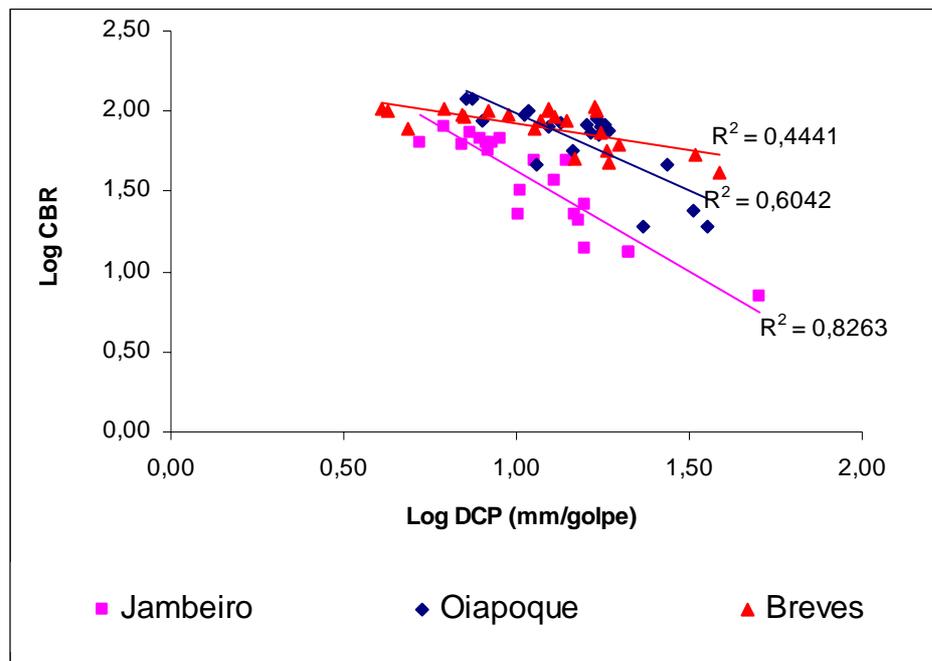


Gráfico 48: Correlações CBR x DCP, antes do tratamento

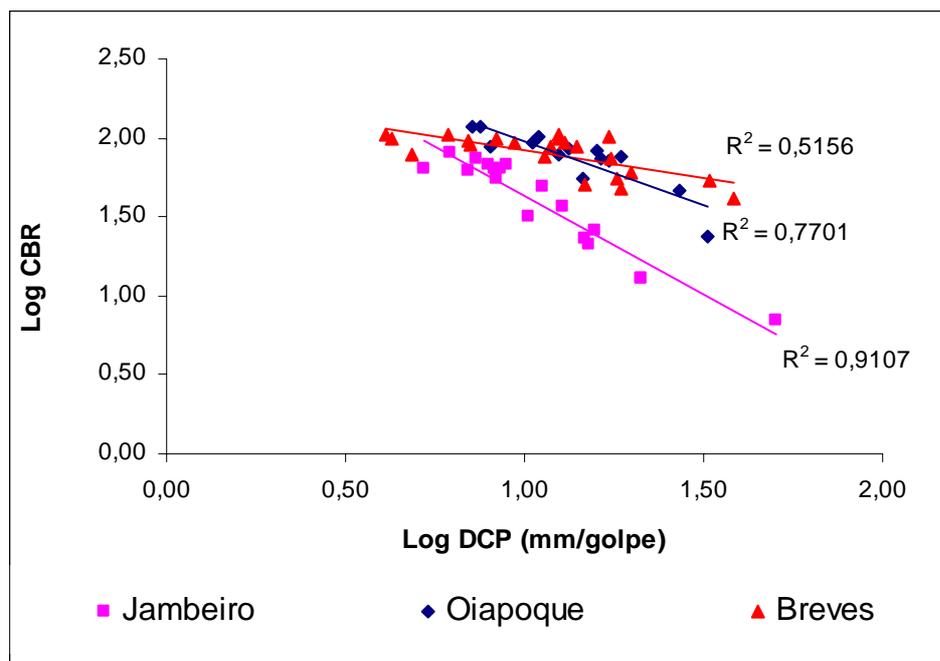


Gráfico 49: Correlações CBR x DCP, após o tratamento

Da observação do Gráfico 48 e Gráfico 49, conclui-se que o tratamento estatístico efetuado apresenta valores de R^2 mais elevados, mas não confere mudança significativa na posição relativa das retas representativas das três amostras, ou seja, o resultado das amostras não sofre alteração considerável.

Considerando que há divergências a serem discutidas quanto à aplicabilidade do tratamento estatístico proposto e que os resultados não apresentaram alterações significativas, o trabalho sugere que o usuário dos resultados dê preferência aos dados apresentados diretamente do ensaio. Ou seja, permanecem as correlações CBR x DCP apresentadas no Quadro 4.

6.1.4 Comparativo entre correlações CBR x DCP

A título de contextualização e comparação das correlações obtidas no presente estudo (Quadro 4), são apresentadas no Quadro 6 algumas correlações obtidas por outros autores para materiais granulares e a correlação utilizada pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano, citada no capítulo de Contexto Técnico-Científico.

Correlação	Material Considerado	Referência
$\text{Log CBR} = 2,46 - 1,12 \text{ LogDCP}$	Todos ⁴	Webster et. al. (1992)
$\text{Log CBR} = 2,44 - 1,07 \text{ LogDCP}$	Base granular	Ese et. al. (1994)
$\text{Log CBR} = 2,97 - 1,34 \text{ LogDCP}$	Solo Arenoso (TA [^])	Lima (2000)

Quadro 6: Correlações CBR x DCP – Outros trabalhos

Para facilitar a comparação dos resultados, as correlações acima apresentadas, foram traçadas em um único gráfico, juntamente com as correlações obtidas no presente trabalho, para as amostras Jambeiro, Oiapoque e Breves, conforme apresentado no Gráfico 50.

⁴ Exceto solos CH e solos CL com CBR inferior a 10% (WEBSTER ET. AL., 1992)

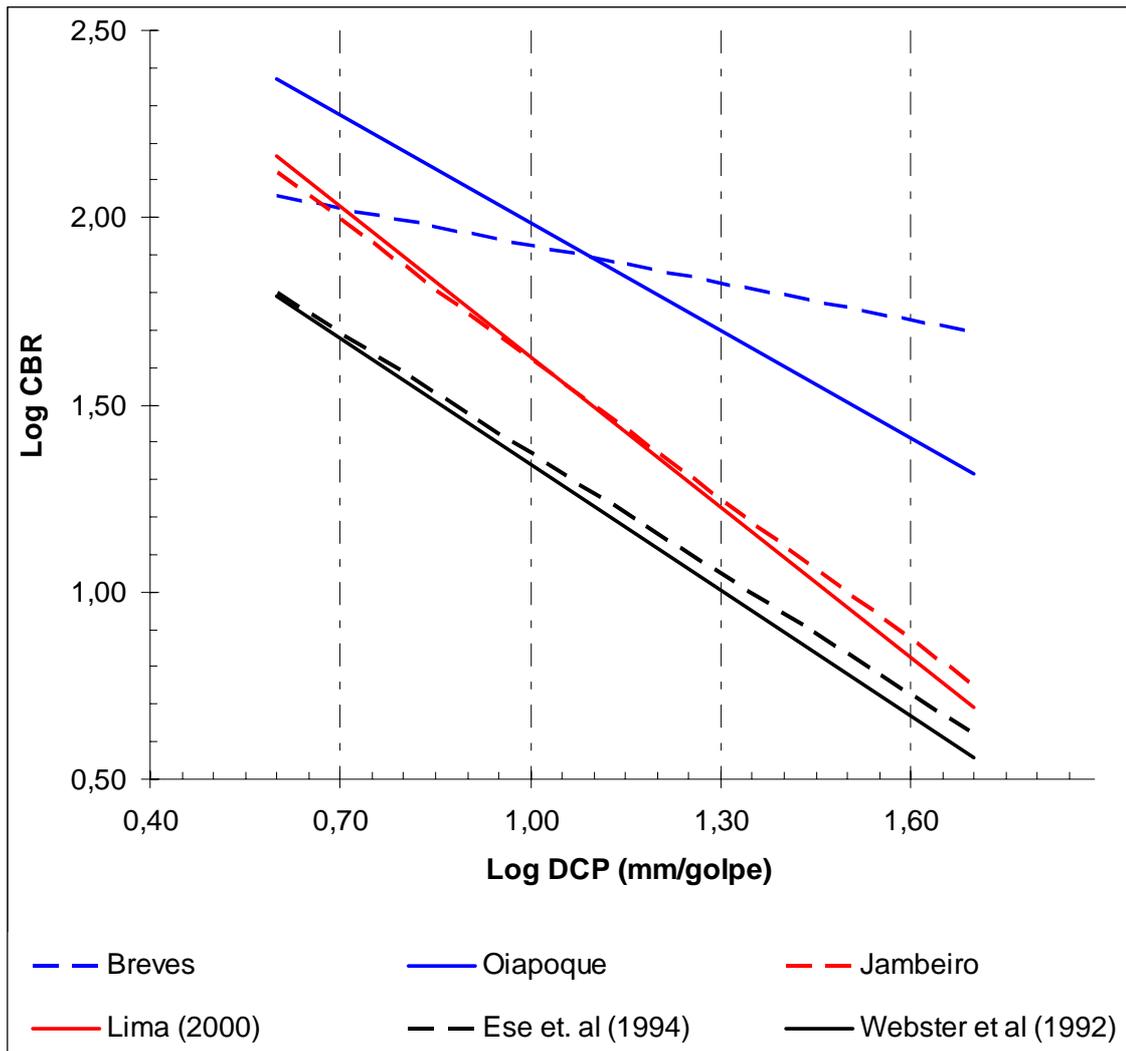


Gráfico 50: Comparativo de correlações CBR x DCP

Semelhantemente ao que foi constatado por Lima (2000), quando do estudo com solos lateríticos, o uso de correlações generalizadas pode levar a erros de grande magnitude.

Para exemplificar o que pode ser observado graficamente acima, são apresentadas as Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19, nas quais são comparados os valores de CBR estimados para cada uma das três amostras, através das correlações encontradas neste estudo, com os valores estimados pelas correlações de outros trabalhos, apresentadas no Quadro 6, para valores de DCP iguais a 5, 10, 20 e 40 mm/golpe (correspondentes às linhas verticais tracejadas no Gráfico 50).

Tabela 17: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Jambeiro

DCP (mm/golpe)	CBR			
	Jambeiro	Webster et. al (1992)	Ese et. al (1994)	Lima (2000)
5,0	100	48	49	108
10,0	42	22	23	43
20,0	18	10	11	17
40,0	7	5	5	7

Tabela 18: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Oiapoque

DCP (mm/golpe)	CBR			
	Oiapoque	Webster et. al (1992)	Ese et. al (1994)	Lima (2000)
5,0	188	48	49	108
10,0	97	22	23	43
20,0	50	10	11	17
40,0	26	5	5	7

Tabela 19: Comparativo com outros trabalhos – Amostra Breves

DCP (mm/golpe)	CBR			
	Breves	Webster et. al (1992)	Ese et. al (1994)	Lima (2000)
5,0	106	48	49	108
10,0	84	22	23	43
20,0	67	10	11	17
40,0	53	5	5	7

Conforme já se podia observar graficamente, os resultados mostram semelhança apenas entre as correlações da amostra de Jambeiro e a amostra de solo arenoso (TA´) estudada por Lima (2000).

Também há semelhança entre as correlações de Webster et. al. (1992) e Ese et. al. (1994), que são as mais conservadoras dentre todas observadas. Ou seja, estimam os menores valores de CBR a partir de um determinado valor de DCP.

Em uma situação de total desconhecimento sobre o material a ser trabalho, o usuário do equipamento pode até fazer uso de uma correlação mais conservadora, a favor da segurança, mas pode incorrer em um grande desperdício ao subestimar a real capacidade de suporte do material em questão.

6.2 Ensaio CBR

Os gráficos dos ensaios CBR apresentaram características bastante peculiares entre as três amostras consideradas no estudo.

Os gráficos que representam os ensaios de Oiapoque e Breves são típicos de areias compactas, ou seja, areias cujos índices de vazios estão abaixo do índice de vazios crítico das respectivas areias e, nestas, a ruptura se dá bruscamente (PINTO, 2000). Tal fato está ilustrado na Figura 13.

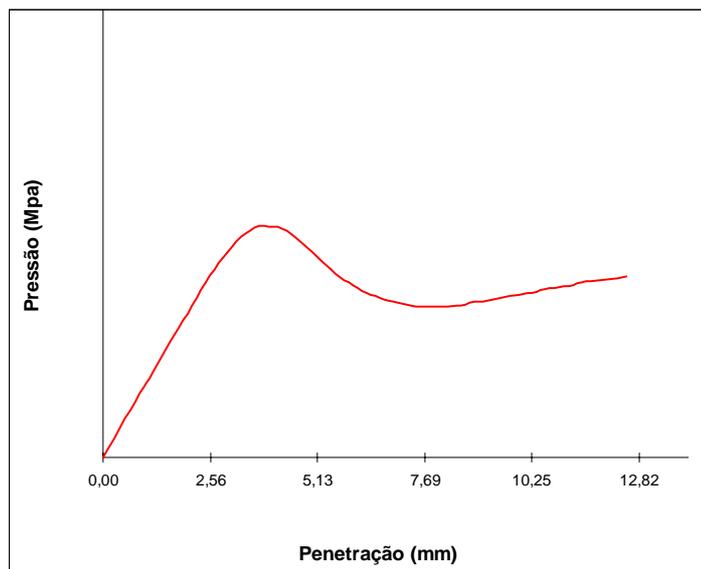


Figura 13: Curva CBR típica de areias compactas

Nas areias compactas, o aumento de tensão cisalhante promove dilatação (LAMBE e WHITMAN, 1969). Isso explica o porquê da perda de material pela face superior do cilindro Proctor Modificado observado durante os ensaios CBR com as amostras de Breves e Oiapoque.

Os gráficos apresentados pela amostra de Jambeiro, ao contrário, são típicos de areias fofas, em que os índices de vazios são superiores ao índice crítico correspondente. Neste caso, a ruptura não se dá bruscamente (PINTO, 2000), conforme ilustrado na Figura 14.

Nas areias fofas, o aumento da tensão de cisalhamento promove diminuição de volume (LAMBE e WHITMAN, 1969).

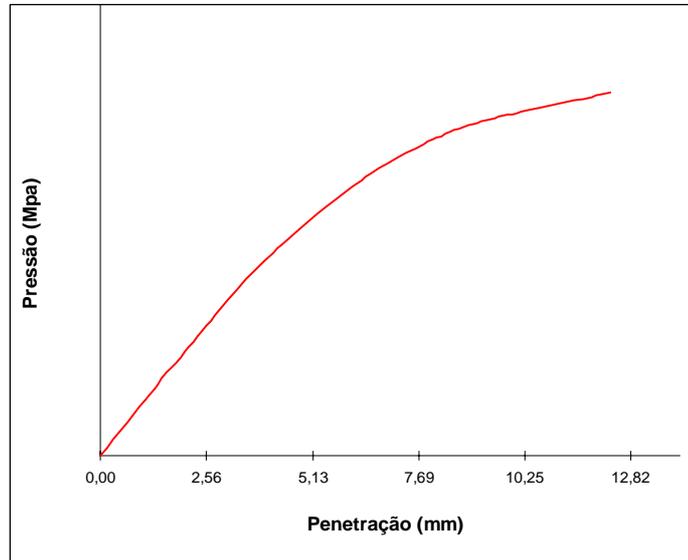


Figura 14: Curva CBR típica de areias fofas

Observou-se que, enquanto a amostra de Jambreiro apresentava curvas com derivada positiva em todo o espectro, as amostras de Oiapoque e Breves apresentavam curvas com queda brusca no valor da pressão (ruptura brusca), antes ainda de ocorrer a leitura correspondente à penetração de 5,13mm (correspondente ao CBR₂).

A constatação deste comportamento em quase todos os ensaios CBR com as amostras de Oiapoque e Breves, levou à adoção do cálculo de CBR exclusivamente com a leitura da pressão correspondente à penetração de 2,56mm (correspondente ao CBR₁). A norma NBR 9895 (ABNT, 1987) prevê que $CBR = \max(CBR_1 ; CBR_2)$.

Tal adoção incluiu os gráficos da amostra de Jambreiro, por fazer parte do presente trabalho a análise comparativa entre as amostras e daí, a necessidade de se dispor de dados obtidos nas mesmas condições.

Considerando os gráficos de CBR das amostras, apresentados no item 4.2, observou-se que todos os corpos de prova ensaiados da amostra Jambeiro não apresentaram ruptura brusca e todos os corpos de prova ensaiados da amostra Breves apresentaram ruptura brusca.

Já a amostra de Oiapoque apresentou ruptura brusca para praticamente todos os índices de vazios ensaiados, exceto para os corpos de prova com índice de vazios próximos ao índice de vazios máximo, nas três condições de sobrecarga do estudo. Tal constatação permite afirmar que esses índices de vazios ensaiados e que não apresentaram ruptura brusca, são superiores ao índice de vazios crítico da amostra em questão, nas respectivas condições de sobrecarga de cada ensaio.

Nesse aspecto, é importante ressaltar que o índice de vazios críticos não é fixo para cada areia, mas é função da pressão confinante. “Quanto maior a pressão confinante, menor o índice de vazios crítico” (PINTO, 2000, p.186).

Outra análise de relevante importância quanto aos ensaios CBR diz respeito à dispersão apresentada pelos pontos obtidos nos mesmos, que se fez notar pelos baixos valores de R^2 apresentados pelas correlações de CBR versus índice de vazios (ou compacidade relativa). Tal dispersão já foi estudada por outros autores, tal como Lima (2000).

Toma-se como exemplo o caso dos ensaios CBR realizados com corpos de prova da amostra de Breves, sujeitos à sobrecarga de 20 kg, cujos resultados são apresentados na Quadro 7.

Índice de Vazios	0,476	0,492	0,502	0,504	0,507	0,509	0,526
CBR	96	94	77	88	100	93	73

Quadro 7: Exemplo – Ensaio CBR, amostra Breves, sobrecarga 20kg

Observa-se que corpos de prova com índices de vazios bastante próximos apresentam valores de CBR que diferem bastante sensivelmente, inclusive valores de CBR maiores correspondendo a índices de vazios também maiores, quando deveria ocorrer o contrário. Prováveis fatores intervenientes associam-se a aspectos laboratoriais e formato e tamanho de grãos, entre outros.

6.3 Ensaio DCP

Os ensaios DCP forneceram, em todos os testes propostos, ótimos resultados em termos de R^2 , o que garante ótima confiabilidade às correlações de DCP com o índice de vazios e a compacidade relativa (equivalentes, conforme já apresentado).

Na busca de obter resultados mais amplos, o trabalho procurou estudar também alguns outros aspectos de relevância como a influência da sobrecarga de confinamento e da variabilidade granulométrica no estudo, através dos gráficos de DCP versus compacidade relativa.

6.3.1 Influência da sobrecarga de confinamento

Para analisar os aspectos relacionados às diferentes situações de sobrecarga de confinamento durante a cravação do DCP em todas as amostras do estudo, foram representadas num mesmo gráfico, para cada uma das amostras, as correlações DCP x CR apresentadas no item 5.2 relativas às três sobrecargas consideradas no estudo.

Considerando que as correlações em questão são representadas por equações do tipo $y = a \cdot x^b$, (a,b reais), os gráficos foram reconstruídos em escala log-log para permitir melhor observação das semelhanças e diferenças presentes, respectivamente para as amostras de Jambeiro, Oiapoque e Breves, conforme apresentado nos Gráficos 51 a 53.

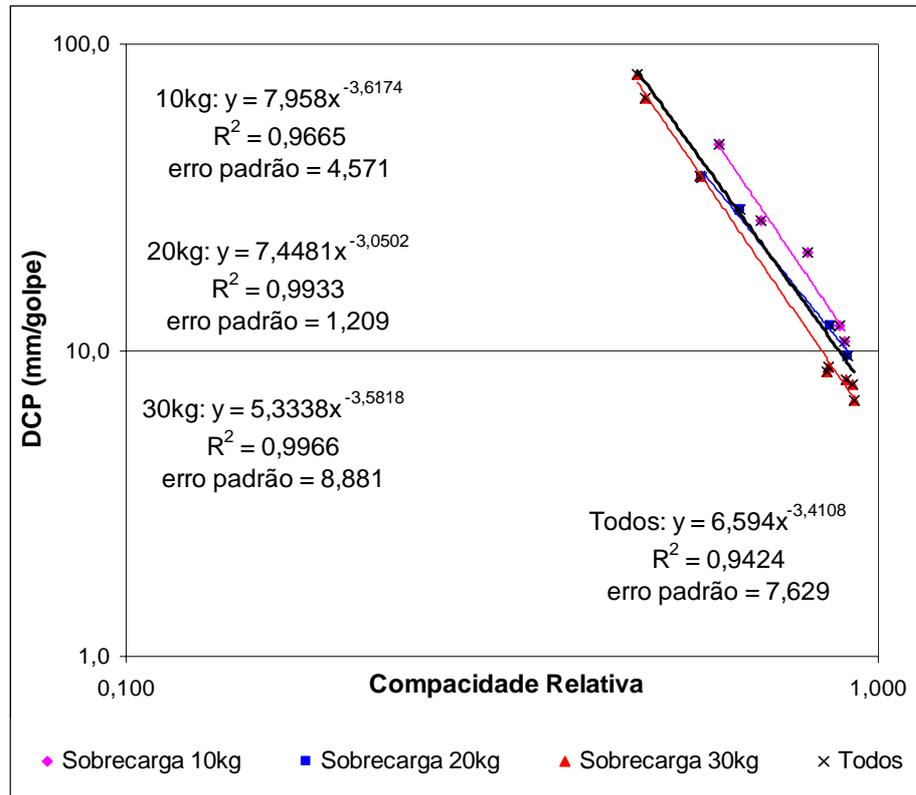


Gráfico 51: DCP x CR – Amostra Jambeiro, todas as sobrecargas

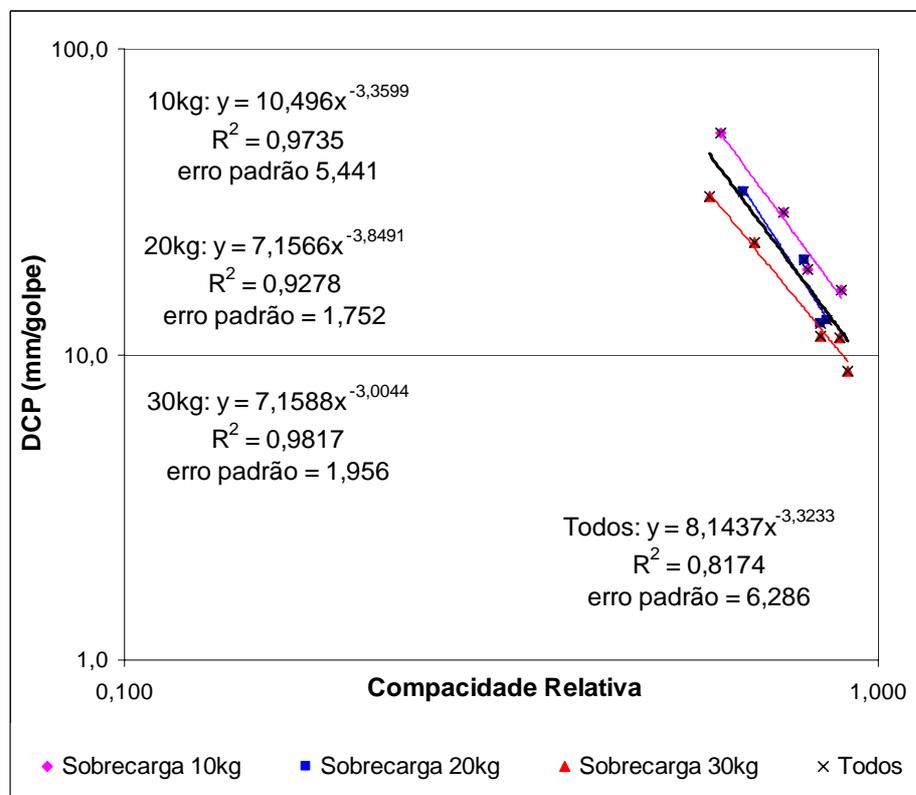


Gráfico 52: DCP x CR – Amostra Oiapoque, todas as sobrecargas

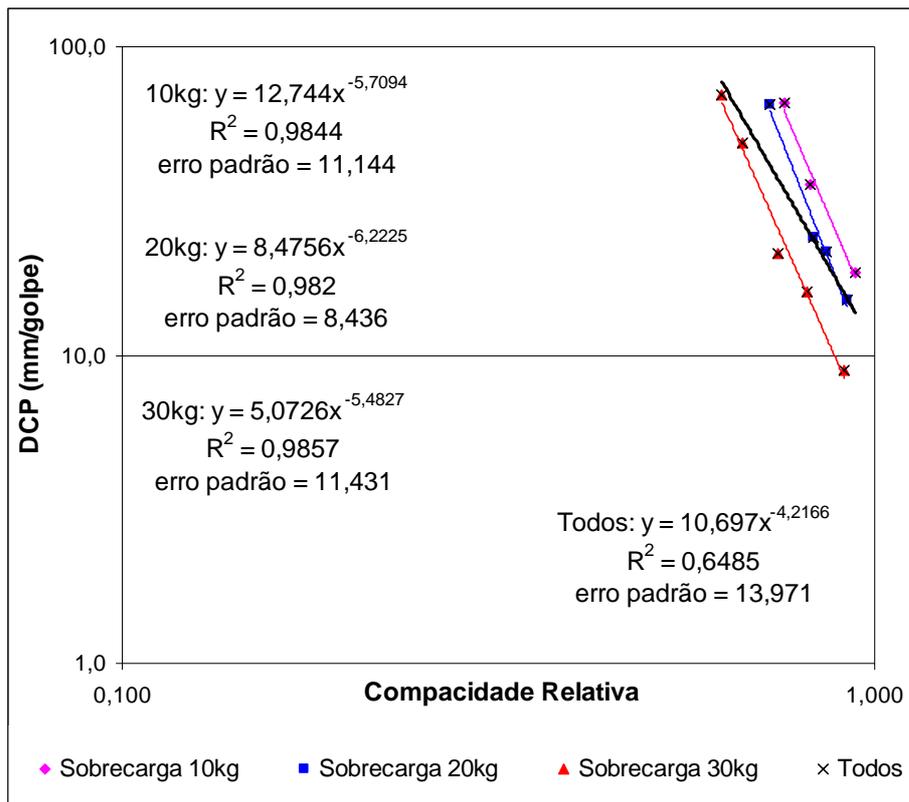


Gráfico 53: DCP x CR – Amostra Breves, todas as sobrecargas

Cabe aqui salientar que gráficos análogos aos acima apresentados podem ser obtidos para as correlações DCP x e . Foi dada preferência às correlações DCP x CR por estas apresentarem valores de R^2 pouco superiores àquelas e, também, porque o parâmetro compacidade relativa traz consigo a consideração sobre a característica de cada areia.

Com relação às observações sobre os três gráficos considerados, verifica-se inicialmente que em todos eles a reta relativa à sobrecarga de 30 kg posiciona-se abaixo da reta relativa à sobrecarga de 20 kg e esta, abaixo da reta relativa à sobrecarga de 10 kg. Deste fato, conclui-se que quanto maior a sobrecarga de confinamento aplicada sobre o corpo de prova durante a cravação, menores os valores de DCP encontrados para um mesmo valor de compacidade relativa, ou seja, maiores as resistências apresentadas.

Observa-se, ainda, que a influência da sobrecarga de confinamento acima discutida é mais significativa na amostra de Breves do que nas amostras de Jambeiro e Oiapoque,

respectivamente. Tal constatação vem do fato de que, reunindo-se numa única correlação todos os pontos, indistintamente da sobrecarga aplicada, os correspondentes valores de R^2 são elevados para as amostras de Jambeiro e Oiapoque.

Particularmente para a amostra de Jambeiro, dado o elevado valor de R^2 apresentado pela correlação correspondente a todos os pontos ($R^2 = 0,9424$), ou seja, considerando todas as sobrecargas ensaiadas, pode-se dizer que a correlação encontrada pode ser usada para a amostra em questão, para qualquer sobrecarga de confinamento entre a mínima e a máxima, aplicadas no presente estudo.

6.3.2 Influência da variabilidade granulométrica

Essa discussão inicia-se ainda baseada nos gráficos apresentados no item anterior, mais especificamente sobre a constatação de que a influência da sobrecarga de confinamento é mais significativa na amostra de Breves do que nas amostras de Jambeiro e Oiapoque, respectivamente. A explicação para este fato pode partir da compreensão sobre a variabilidade de tamanho e uniformidade dos grãos constituintes das amostras, cujas diferenças entre si foram apresentadas no item 3.1.

Conforme apresentado, a amostra de Breves possui os grãos menores, mais uniformes e mais arredondados, dentre as três amostras, isto é, há pouca variabilidade granulométrica na amostra de Breves. Isto dificulta a densificação e a formação de uma estrutura resistente. A amostra de Oiapoque apresenta grãos um pouco maiores, mas os grãos também são uniformes, com uma distribuição granulométrica um pouco melhor que a amostra de Breves. Ao contrário das anteriores, a amostra de Jambeiro apresenta uma curva granulométrica mais distribuída, com grãos maiores que permitem o encaixe de grãos menores quando da vibração, por exemplo.

Considerando mesmo nível de vibração, o rearranjo de partículas num determinado corpo de prova tende a ser melhor para uma amostra que apresente curva granulométrica mais distribuída, menos uniforme. Por isso, a influência da sobrecarga foi menor para a amostra de Jambeiro. Para esta amostra, o valor de DCP no ensaio apresenta menor dependência da sobrecarga de confinamento aplicada.

Na amostra de Breves, que apresentou a maior influência da sobrecarga de confinamento sobre o resultado de DCP no ensaio, observa-se que valores menores de DCP só são obtidos com os maiores valores de sobrecarga. Isso se deve ao fato de que os grãos dessa amostra são muito pequenos e bastante uniformes. Nessas condições, o rearranjo de partículas é muito mais difícil que no caso anterior.

Numa situação intermediária, encontra-se a amostra de Oiapoque que, conforme citado anteriormente, tem grãos pequenos, mas não tão pequenos como os da amostra de Breves e uma distribuição granulométrica também uniforme, porém menos uniforme que a amostra de Breves.

Mas esta análise não se restringe ao acima exposto. Buscando identificar mais aspectos relacionados à influência da variabilidade granulométrica entre os ensaios DCP constantes do estudo, seguiu-se uma outra linha de estudo. Para tanto, foram representadas num mesmo gráfico, para cada uma das sobrecargas de confinamento, as correlações DCP x CR apresentadas no item 5.2 relativas às três amostras consideradas no estudo.

Os gráficos foram reconstruídos em escala log-log para permitir melhor observação das semelhanças e diferenças presentes, respectivamente para as sobrecargas de 10, 20 e 30kg, conforme apresentado nos Gráficos 54 a 56.

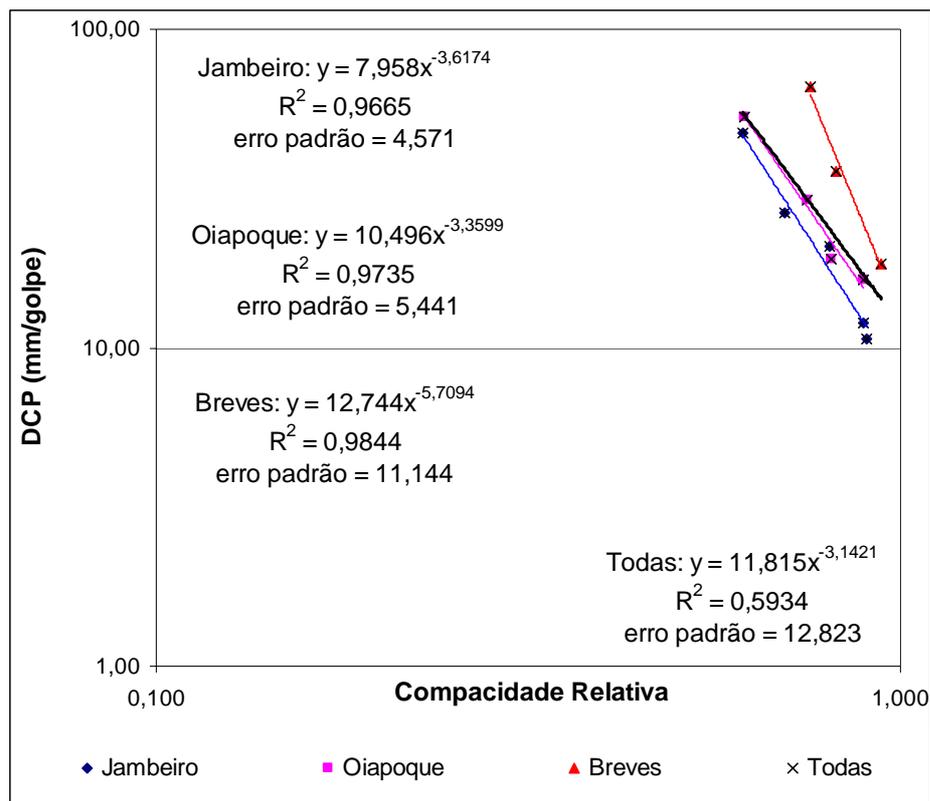


Gráfico 54: DCP x CR – Sobrecarga 10 kg, todas as amostras

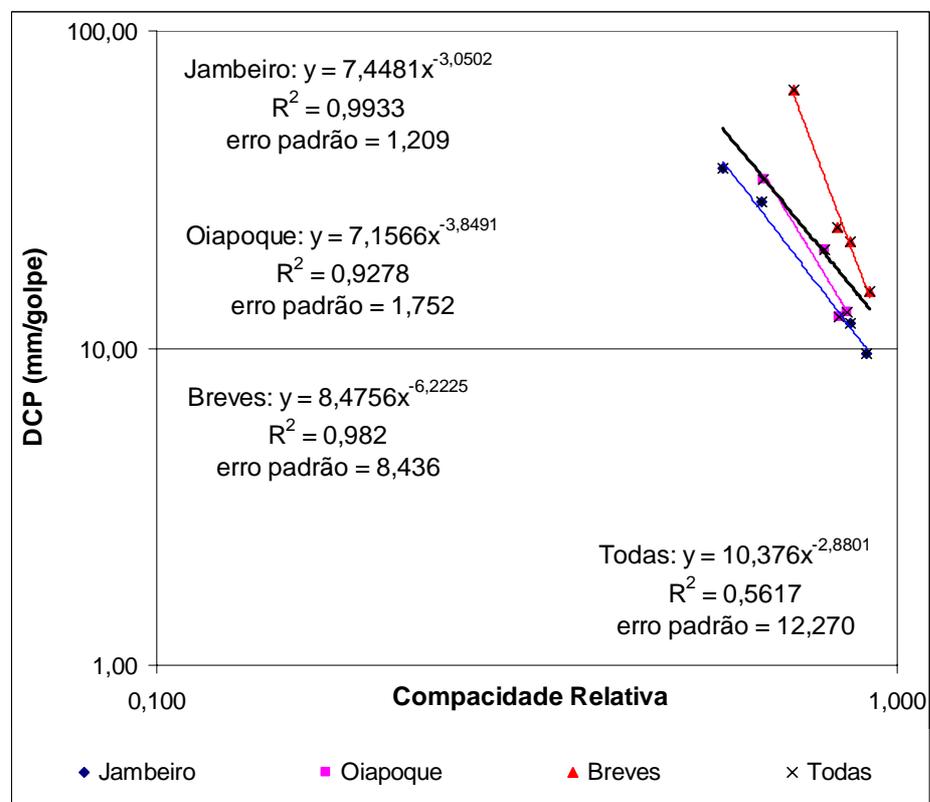


Gráfico 55: DCP x CR – Sobrecarga 20 kg, todas as amostras

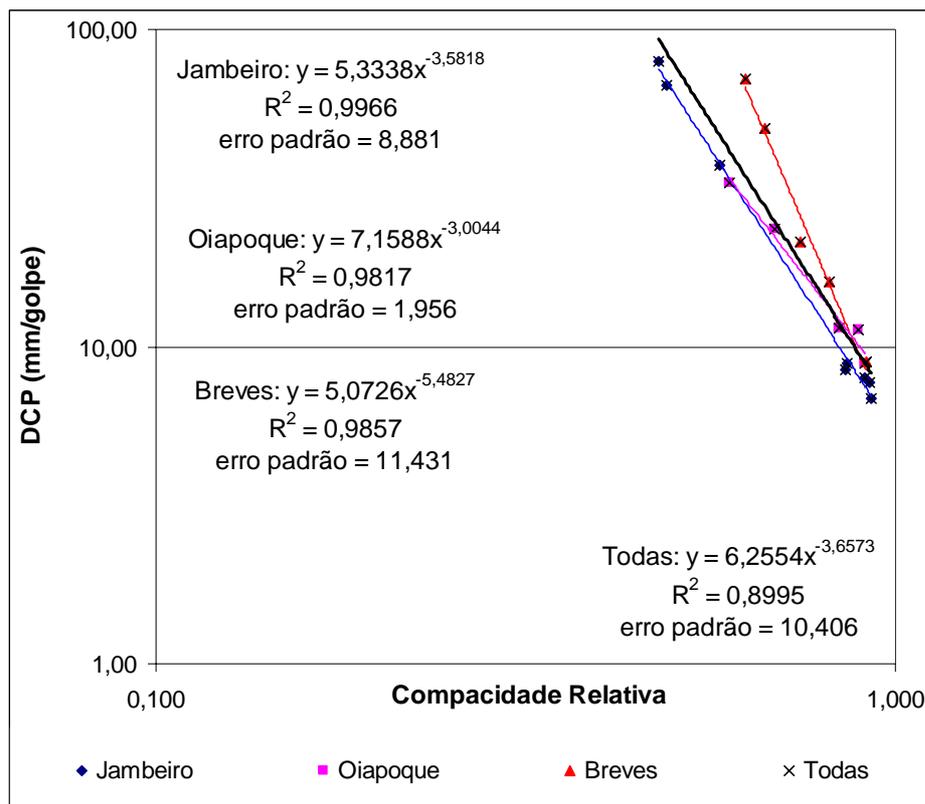


Gráfico 56: DCP x CR – Sobrecarga 30 kg, todas as amostras

Com relação às observações sobre os três gráficos considerados, verifica-se inicialmente que em todos eles a reta relativa à amostra de Jambeiro posiciona-se abaixo da reta relativa à amostra de Oiapoque e esta, abaixo da reta relativa à amostra de Breves.

Deste fato, conclui-se que quanto menos uniforme for a distribuição granulométrica, menores os valores de DCP encontrados para um mesmo valor de compacidade relativa, ou seja, maiores as resistências apresentadas.

Tal fato vem confirmar a seguinte afirmativa de Pinto (2000, p.188): “Quanto mais bem distribuída granulometricamente é uma areia, melhor o entrosamento entre as partículas e, conseqüentemente, maior o ângulo de atrito interno.”

7 Estudo de caso

Entre os dias 24 e 29 de agosto de 2005, foi realizada uma campanha de ensaios de campo na área patrimonial do Aeroporto de Oiapoque-AP, origem de uma das amostras da vasta pesquisa.

A Figura 15 apresenta a fotografia do terminal de passageiros do referido aeroporto e a Figura 16 apresenta a fotografia do canteiro de obras no local.



Figura 15: Terminal de passageiros do aeroporto de Oiapoque



Figura 16: Canteiro de obras da COMARA em Oiapoque

A experiência foi viabilizada através de apoio associado entre a coordenação da Divisão de Pós-Graduação do ITA e a COMARA, que é responsável atualmente pela obra de reforço e ampliação do aeroporto daquele sítio.

As informações sobre o local, as principais características da obra e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

7.1 Características

7.1.1 Município

O município de Oiapoque está localizado na parte mais setentrional do Estado do Amapá, fazendo fronteira ao norte do Brasil com a Guiana Francesa (ver Figura 17).



Figura 17: Localização de Oiapoque

O Quadro 8 apresenta alguns dados sobre o município:

População estimada (habitantes)	14.885
Área da Unidade Territorial (Km ²)	22.625

Quadro 8: Dados de Oiapoque (IBGE, 2004)

7.1.2 Obra do aeroporto

A obra do aeroporto de Oiapoque vem sendo realizada pela COMARA. Trata-se de uma obra de reforço do pavimento existente e de ampliação da pista, táxi e pátio do aeroporto em questão.

O interesse maior deste estudo reside no fato de que a areia, material abundante em toda a região, constitui o subleito do pavimento analisado. A estrutura do pavimento é simples e não envolve materiais incomuns em obras desenvolvidas especialmente na região amazônica.

A seção-tipo da estrutura do pavimento em questão é composta de 10cm de CBUQ de revestimento, 20cm de solo laterítico na base, 20cm de latossolo amarelo na sub-base, camadas essas construídas sobre subleito de areia natural (CBR considerado igual a 12).

7.2 Ensaios DCP

Foram realizados ensaios DCP em diversos pontos da área de ampliação da pista de pouso, acostamento, *stopways*, faixa de pista e jazida, envolvendo situações de confinamento e desconfinamento da areia, acima e abaixo do nível d'água presente.

Os resultados dos ensaios DCP de campo geraram gráficos de penetração versus número de golpes e, a partir desses dados, foram traçados gráficos correlatos de profundidade de penetração versus DCP, os quais estão apresentados na seqüência. Para facilitar a compreensão dos resultados, os mesmos foram segmentados em subitens correspondentes à aplicação da areia, objeto do estudo.

7.2.1 Areia compoendo o subleito

Correspondem a pontos em que a areia compõe o subleito do pavimento. Contemplam os resultados da pista de pouso, acostamento e *stopways*. Os pontos de cravação podem ser visualizados conforme esquematizado na Figura 18.

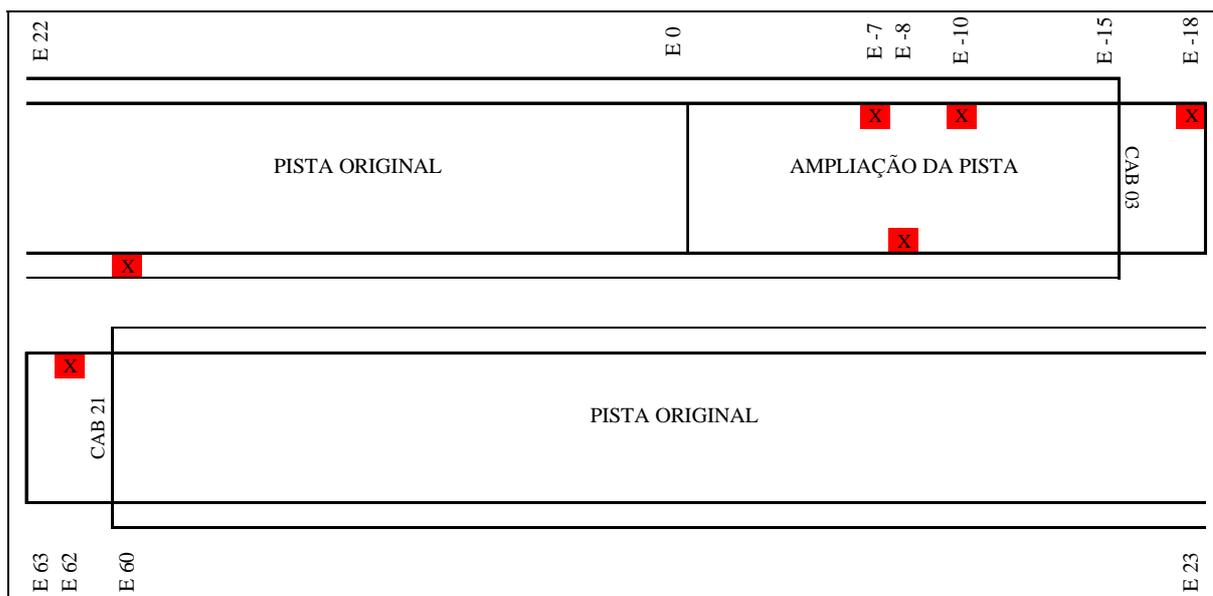


Figura 18: Croquis dos locais de cravação do DCP

7.2.1.1 Ampliação da pista

Constam deste item os ensaios realizados no corpo da pista, mais precisamente na área da ampliação longitudinal da pista de pouso.

A pesquisa sobre o histórico da obra, revelou que, durante o período construtivo naquele local, a camada de areia sob as camadas de base e sub-base não sofreu qualquer processo de densificação por máquinas. A compacidade relativa apresentada pela areia deve-se exclusivamente a sua condição natural.

As Figura 19 e Figura 20 ilustram a cravação no pavimento intacto (areia compõe o subleito) e após a retirada da camada de solo (base e sub-base) sobre a areia, ficando esta desconfinada parcialmente, através de um furo de aproximadamente 20cm de diâmetro.



Figura 19: Cravação do DCP – Pavimento intacto



Figura 20: Cravação do DCP – Areia desconfinada parcialmente

Os resultados de campo obtidos são apresentados nos Gráficos 57 a 59. Os mesmos apresentam as curvas obtidas com os ensaios DCP no campo e, ao lado, apresentam o perfil de resistência em termos dos valores encontrados de DCP em função da profundidade. Acima de cada gráfico é informada a profundidade do início da camada de areia, obtida através de sondagem a trado e, ainda, os números de golpes efetuados nas condições de pavimento intacto e após a retirada das camadas de base e sub-base sobre a areia.

Estaca -07+00 Bordo Direito

Profundidade do início da areia: 41 cm

Nº de golpes no pavimento: 461

Nº de golpes na areia desconfinada: 173

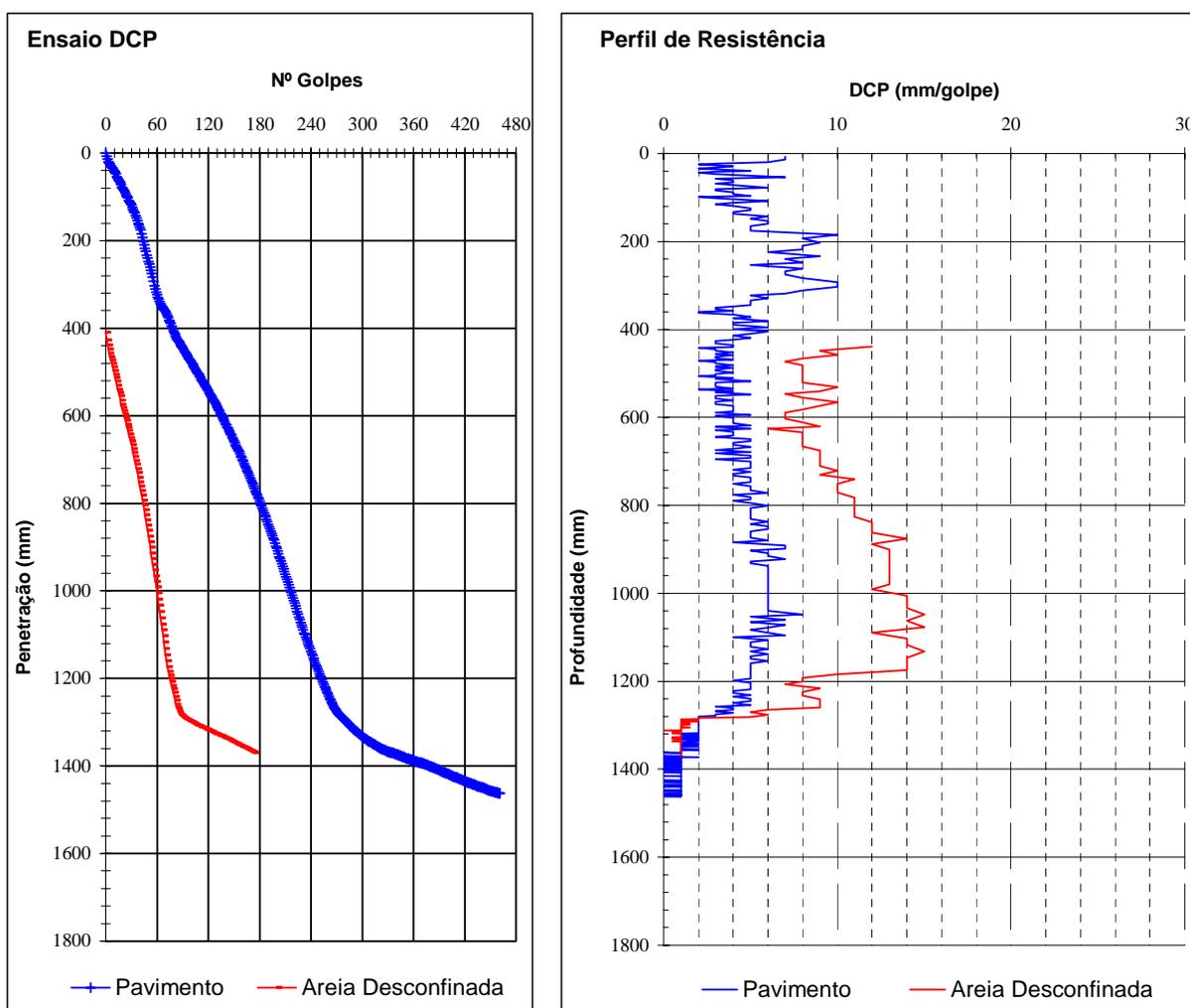


Gráfico 57: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -07+00 BD)

Estaca -08+00 Bordo Esquerdo

Profundidade do início da areia: 73 cm

Nº de golpes no pavimento: 160

Nº de golpes na areia desconfinada: 37

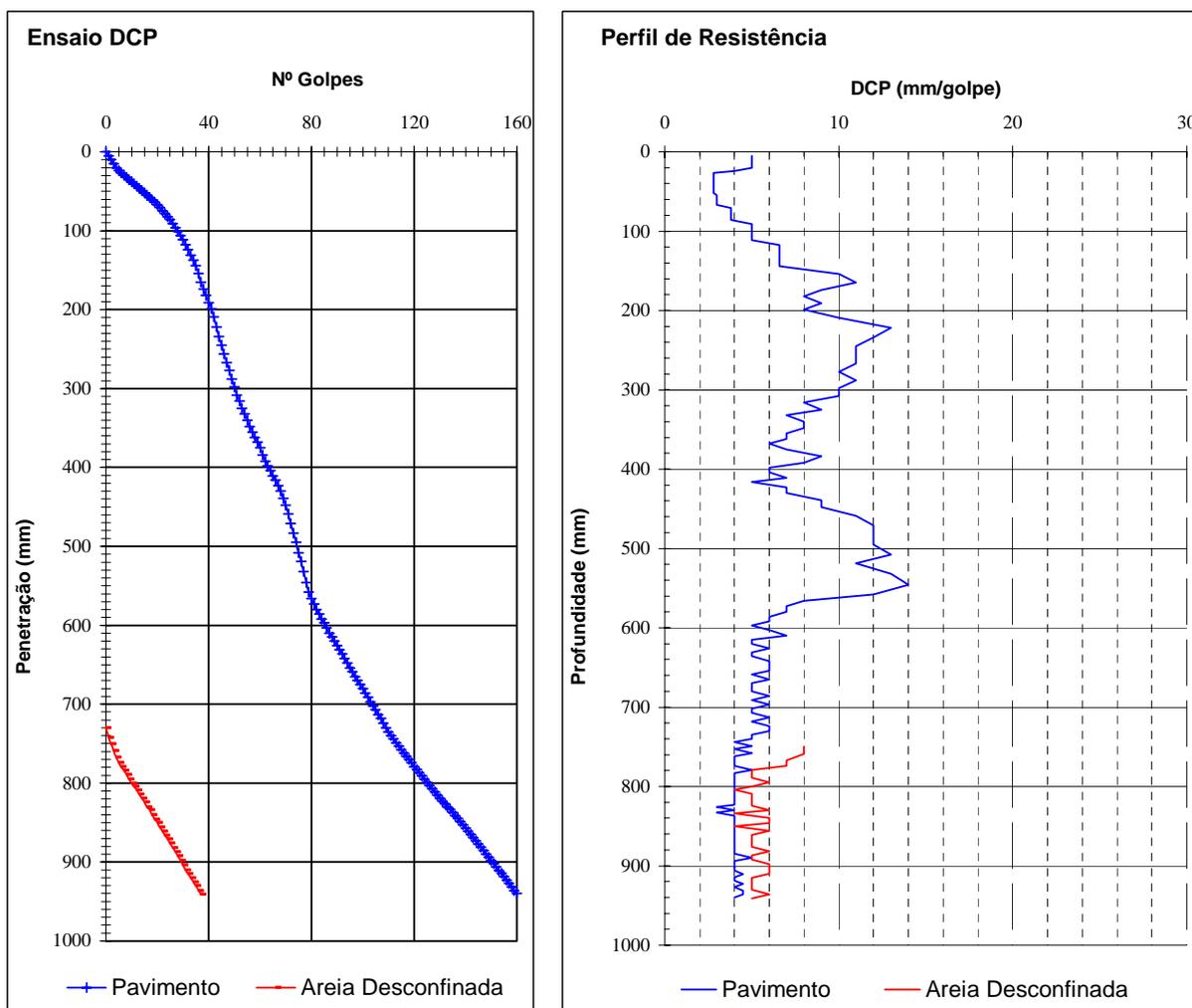


Gráfico 58: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -08+00 BE)

Estaca -10+00 Bordo Direito

Profundidade do início da areia: 82 cm

Nº de golpes no pavimento: 198

Nº de golpes na areia desconfinaada: 43

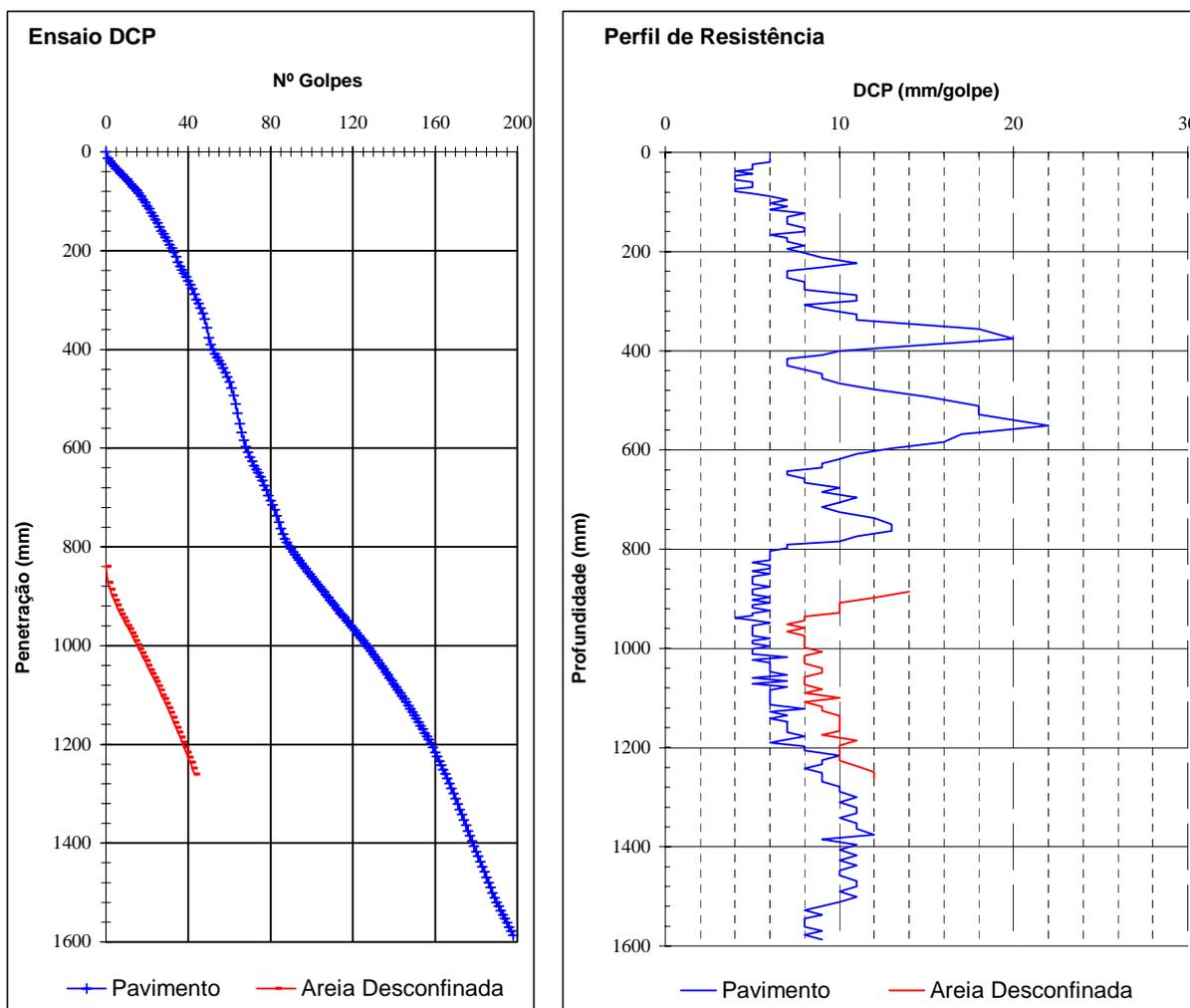


Gráfico 59: DCP e Perfil de resistência – Pista (E -10+00 BD)

7.2.1.2 Acostamento

Por não haver material disponível para recompor o pavimento da pista, à época do estudo de campo, não foi possível a realização do ensaio no pavimento existente, construído por ocasião da implantação do aeródromo.

O acostamento da pista foi executado naquele mesmo momento mas fica a consideração de que não possui o mesmo perfil das áreas de rolagem.

Profundidade do início da areia: 17 cm

Nº de golpes no pavimento: 65

Nº de golpes na areia desconfinada: 41

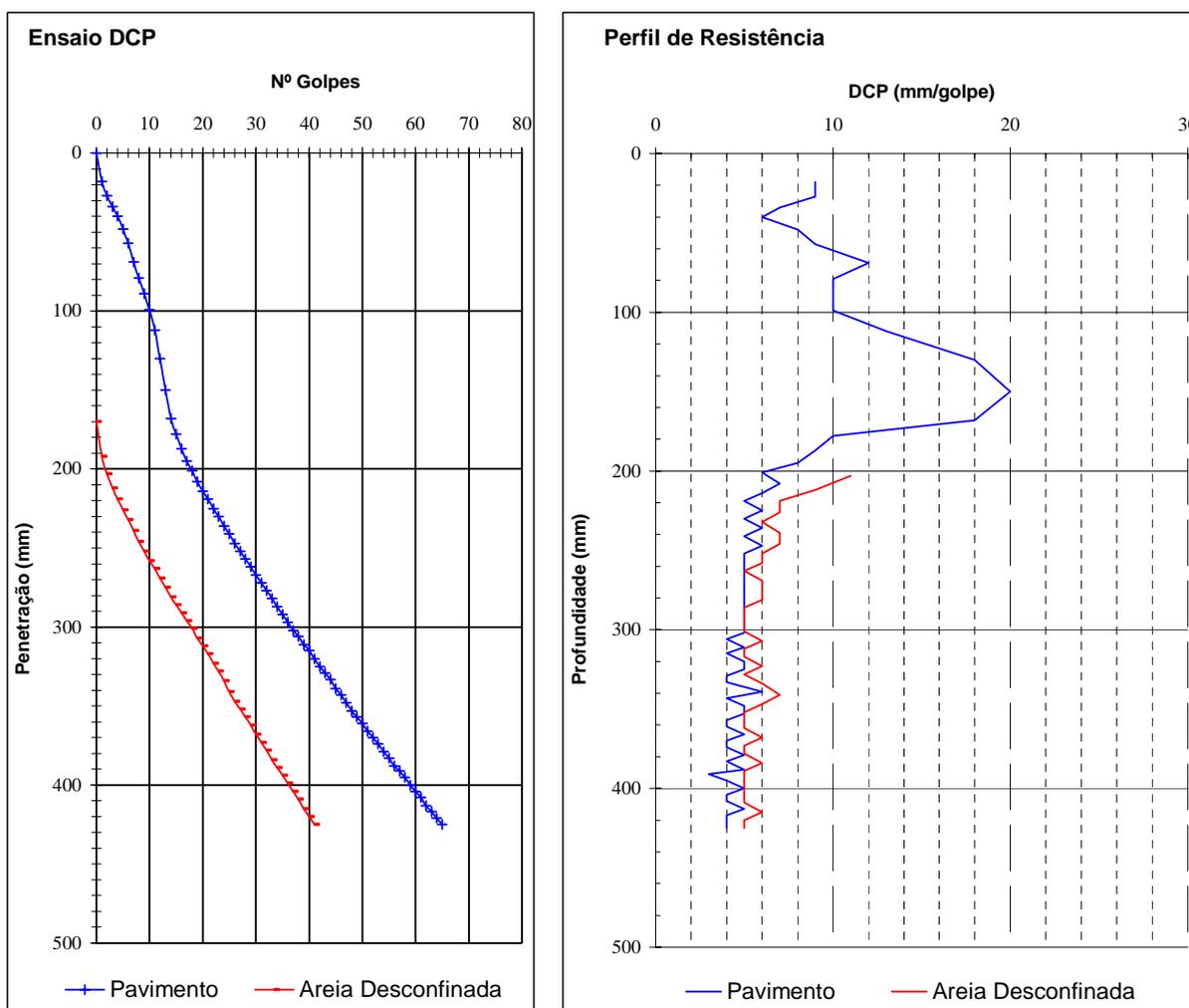


Gráfico 60: DCP e Perfil de resistência – Acostamento (E 19+00 BE)

7.2.1.3 Stopways

Também foram realizados ensaios nos *stopways* da pista, cujos resultados são apresentados a seguir (ver Gráfico 61 e 62).

Estaca -18+10 Bordo Direito (CAB-03)

Profundidade do início da areia:	48 cm
Nº de golpes no pavimento:	92
Nº de golpes na areia desconfinada:	50

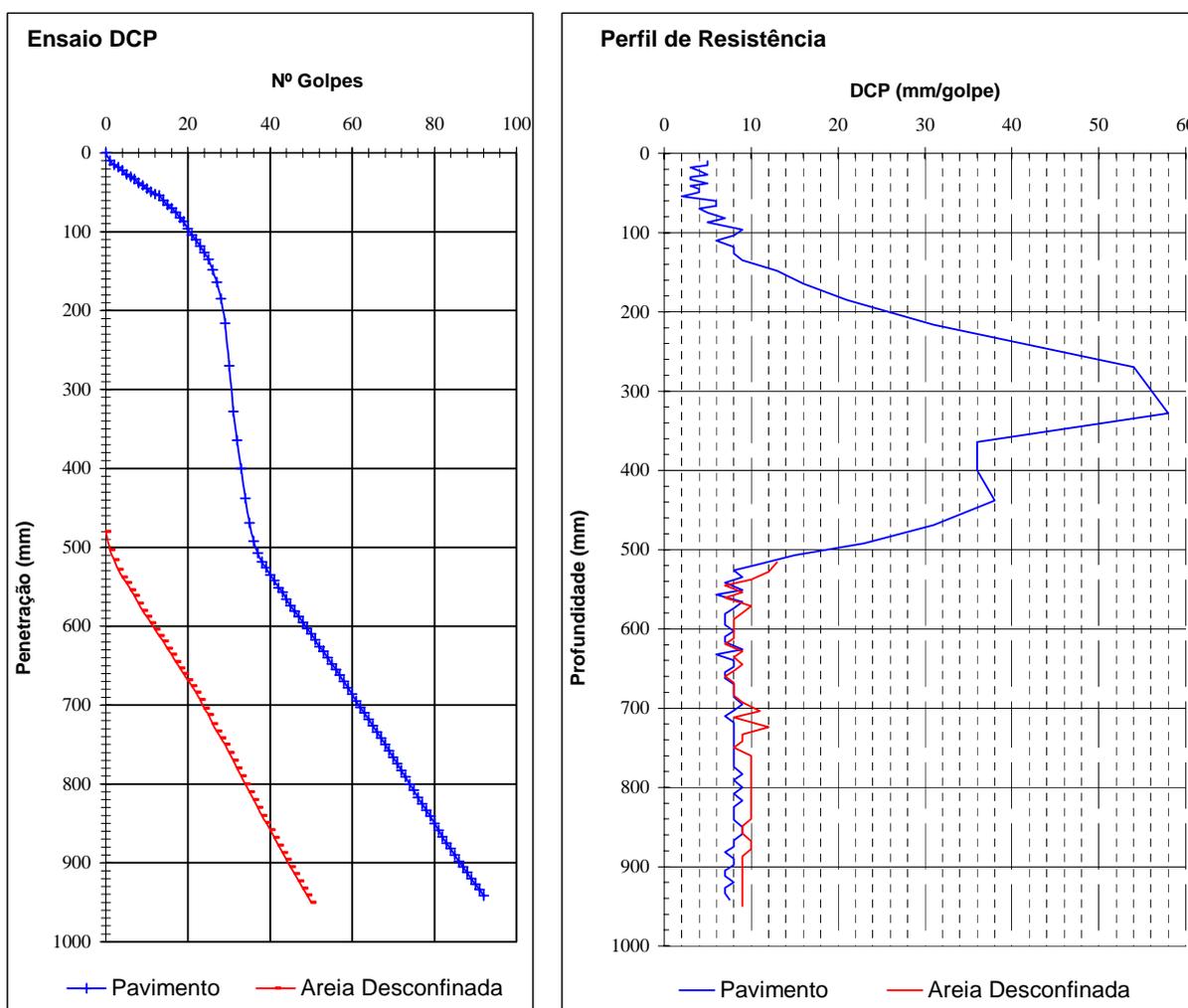


Gráfico 61: DCP e Perfil de resistência – Stopway cabeceira 03

Estaca 62+00 Bordo Direito (CAB-21)

Profundidade do início da areia: 38 cm

Nº de golpes no pavimento: 61

Nº de golpes na areia desconfinada: 22

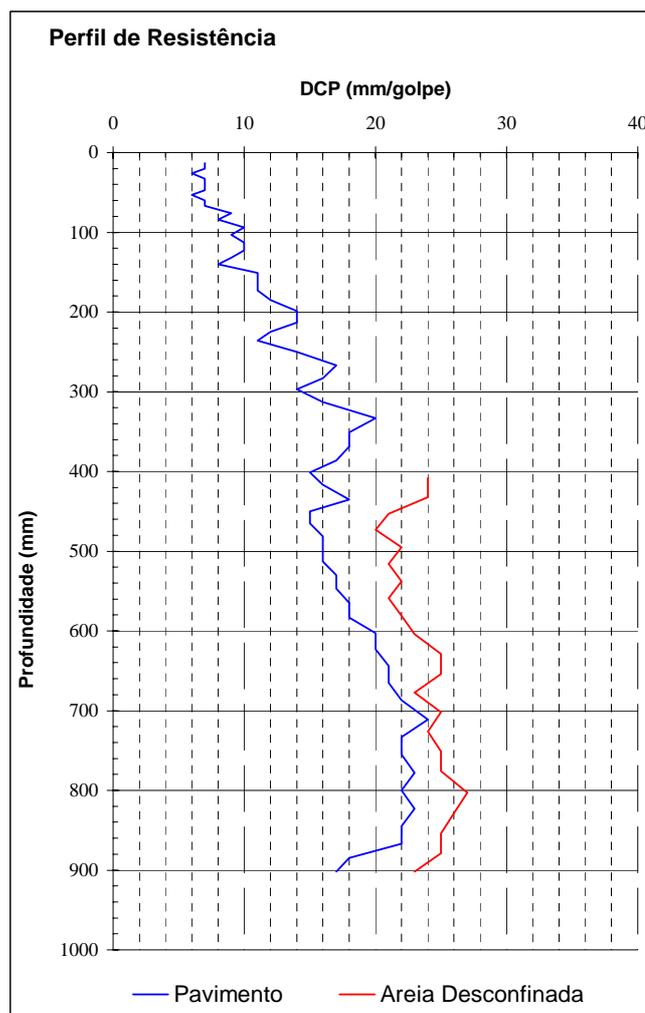
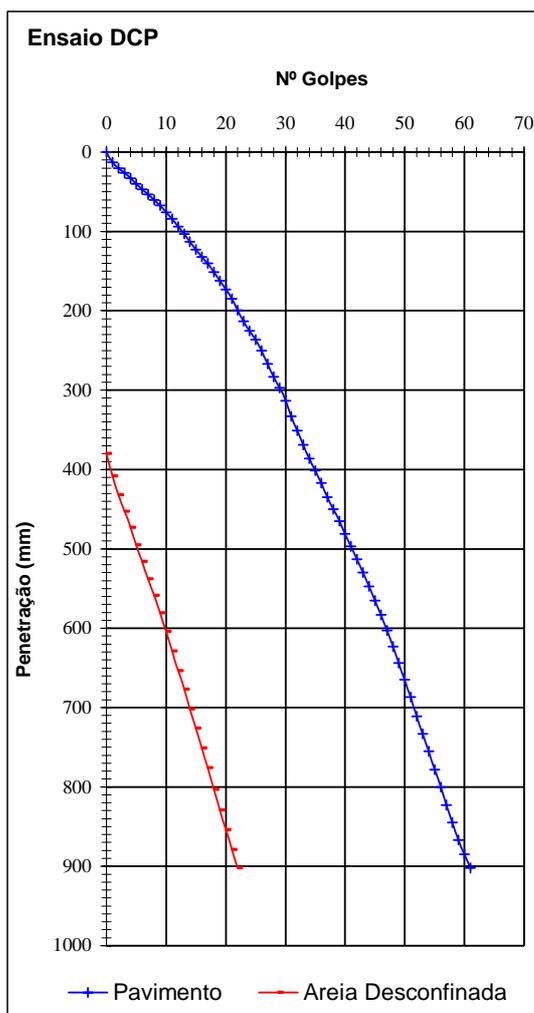


Gráfico 62: DCP e Perfil de resistência – Stopway cabeceira 21

7.2.1.4 Observações

Do conjunto de gráficos apresentados, observou-se primeiramente que o valor de DCP da areia sujeita ao confinamento superior, promovido pelas camadas de solo sobre ela, é sempre em torno de 25% inferior (mais resistente) à situação de desconfinamento parcial.

A variação entre os perfis de resistência dos diferentes furos decorre de fatores, tais como profundidade, compacidade relativa da areia, estado de saturação ou não, conforme o nível do lençol freático, entre outros.

Sobre os perfis de resistência, Baligh (1976, p.1131) afirma que “teorias clássicas que assumem que a capacidade de suporte da areia é proporcional à pressão de confinamento, equivalem a dizer que a resistência à penetração do cone em um depósito uniforme de areia aumentaria linearmente com a profundidade”. No entanto, constatou-se que a capacidade de suporte da areia tende a um valor mais ou menos constante, quando do aumento da profundidade.

Observou-se ainda o caso particular do furo na Estaca -07+00, em que houve um aumento expressivo da capacidade de suporte da areia a partir de aproximadamente 1,30m de profundidade. Foi feita sondagem a trado no local para descobrir a origem do comportamento e observou-se que aquela profundidade correspondia ao nível do lençol freático ali presente. Quando da cravação do DCP, por se tratar de solicitação dinâmica, sem possibilidade de drenagem, é gerada uma “sobre-pressão negativa (de sucção), do que resulta um aumento da tensão efetiva e, conseqüentemente, um aumento da resistência” (PINTO, 2000, p.186).

Fica evidente também, em todos os gráficos apresentados, que o perfil de resistência correspondente à areia, quer confinada ou não, apresenta uniformidade bem superior às camadas de solo sobre a mesma.

7.2.2 Areia em condição natural

Foram avaliadas as condições da areia em condição natural no entorno da pista (faixa de pista) e na jazida (área seca e submersa).

7.2.2.1 Faixa de pista

Foram realizadas cravações em 4 pontos no entorno da pista, a saber:

- E -07+15, do lado direito da pista de pouso
- E -15+00, do lado direito da pista de pouso
- E -20+00, no prolongamento do eixo da pista, cabeceira 03
- E -25+00, no prolongamento do eixo da pista, cabeceira 03



Figura 21: Cravação do DCP – Faixa de pista

Os resultados correspondentes são apresentados no Gráfico 63:

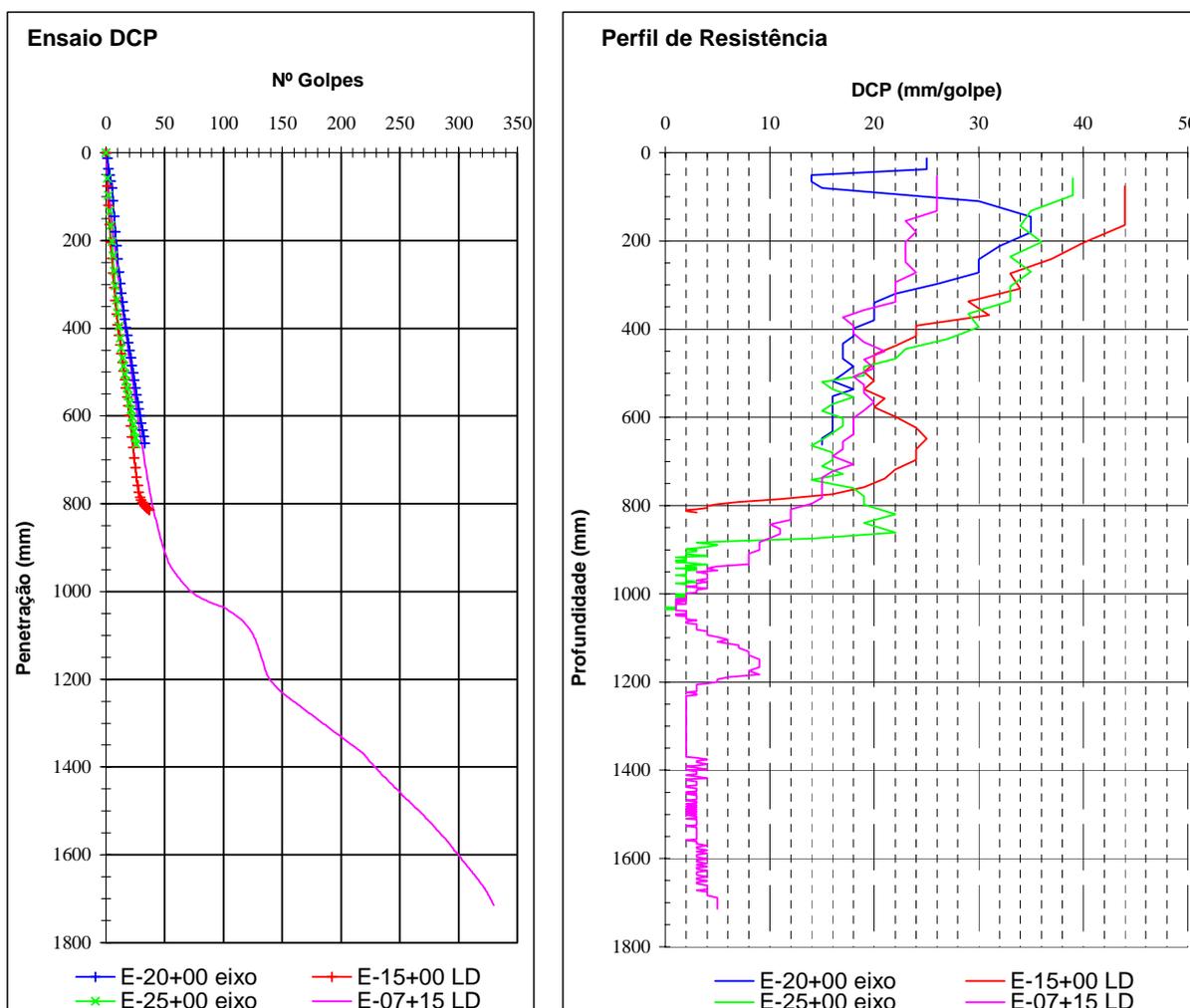


Gráfico 63: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Faixa de pista)

O Gráfico 63 mostrou semelhança considerável entre os perfis de resistência correspondentes aos furos realizados em areia na condição natural, sem qualquer sobrecarga de confinamento superior.

Observa-se uma tendência clara de diminuição do valor de DCP, que corresponde ao aumento da capacidade de suporte, à medida que há o aumento da profundidade. Conforme já exposto no item anterior, observa-se a tendência de que o valor de DCP permaneça constante a partir de determinada profundidade, que por sua vez corresponde a uma determinada pressão de confinamento.

7.2.2.2 Jazida

Parte da jazida, de cotas mais baixas, estava submersa por ocasião da realização da campanha de ensaios. Surgiu então a oportunidade de avaliar as diferenças entre um furo realizado na areia, acima e abaixo do nível d'água, cujas fotos ilustrativas estão apresentados nas Figura 22 e Figura 23 e, perfil de resistência, no Gráfico 64.



Figura 22: Cravação do DCP – Jazida, superfície seca



Figura 23: Cravação do DCP – Jazida, submersa

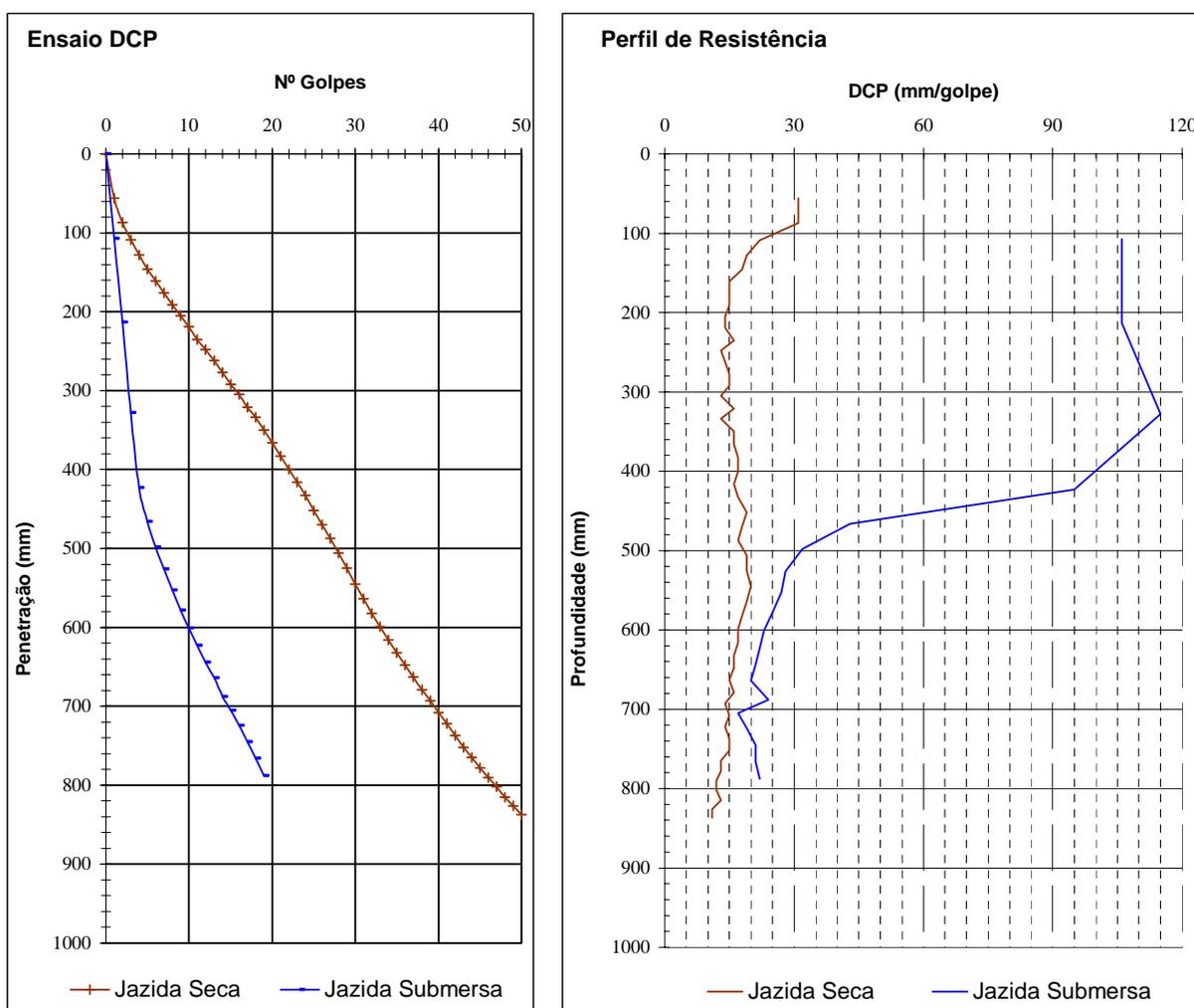


Gráfico 64: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Jazida)

O perfil de resistência mostra que a capacidade de suporte da areia na jazida submersa é nitidamente inferior à condição seca.

Diferentemente da situação descrita para o furo da Estaca -07+00, a areia na jazida submersa e próxima à superfície não dispõe de pressão de confinamento suficiente para garantir capacidade de suporte razoável.

Na condição de jazida submersa, verificaram-se valores de DCP bastante elevados nos pontos mais próximos à superfície. Para profundidades maiores, ou seja, com maior pressão de confinamento, os valores apresentados pelas condições seca e saturada ficaram bem mais próximos.

7.2.2.3 Jazida submersa

Foram realizados quatro furos na jazida submersa, conforme indicado nas Figura 24 e Figura 25.



Figura 24: Cravação do DCP – Jazida submersa (Furo 1)



Figura 25: Cravação do DCP – Jazida submersa (Furos 2,3 e 4)

Os resultados correspondentes constam do Gráfico 65.

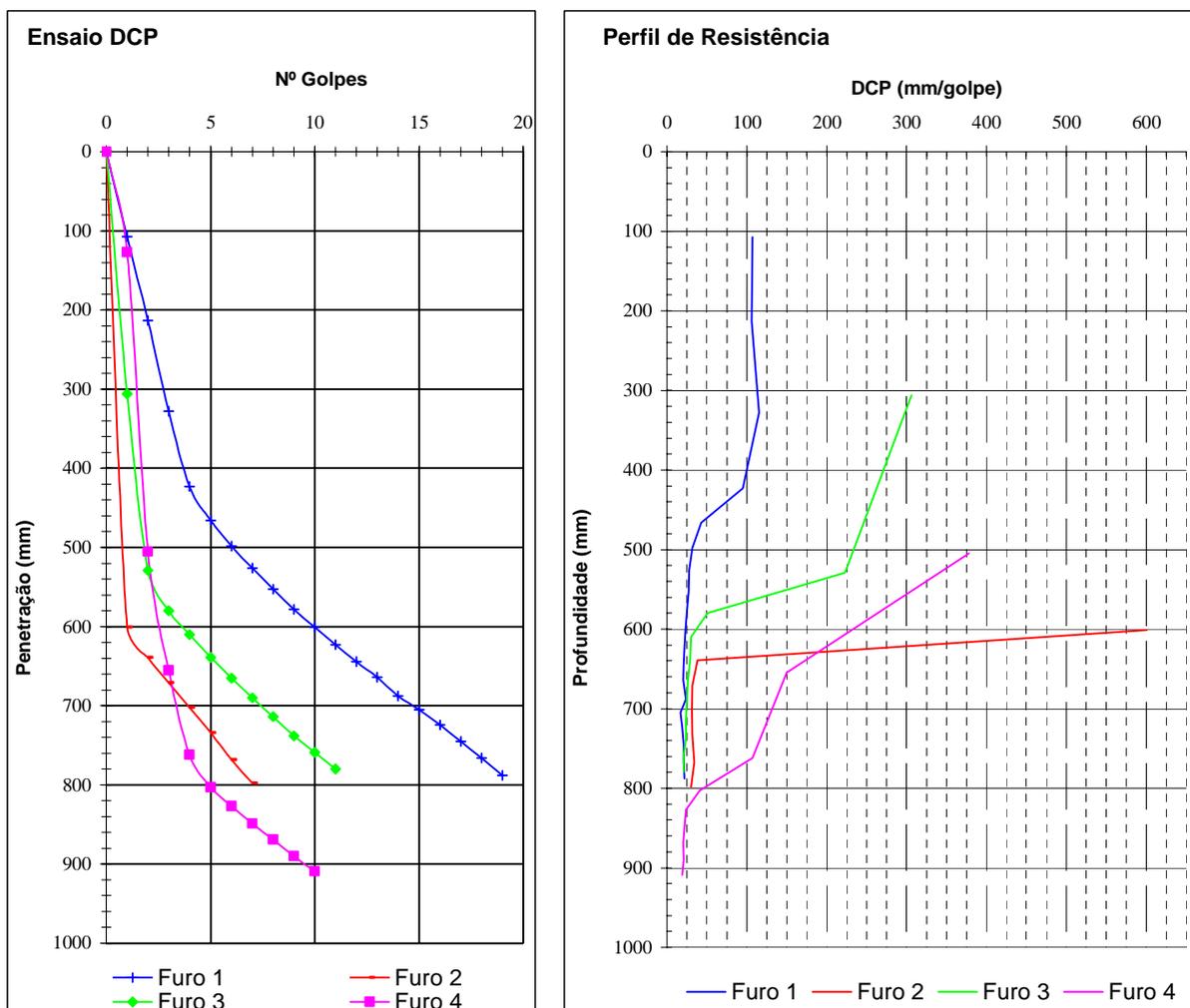


Gráfico 65: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Jazida submersa)

As cravações realizadas na jazida submersa apresentaram semelhanças facilmente perceptíveis. Em todas elas, os ensaios começaram com elevados valores de DCP e posterior redução até um DCP aproximadamente constante, a partir de mais ou menos 50 a 80 cm de profundidade. O que também gera indícios da importância da pressão de confinamento sobre o estabelecimento da capacidade de suporte da areia.

7.2.2.4 Sob trilha de roda

Foram verificadas as diferenças apresentadas pelas cravações do DCP em lugares adjacentes, sujeitos ou não à passagem de equipamentos.

A Figura 26 ilustra o local onde foi realizada a cravação sob a trilha de roda do trator de rodas em uso corrente naquela obra.



Figura 26: Cravação do DCP – Sob a trilha de roda

Os resultados constantes desse comparativo, são apresentados no Gráfico 66.

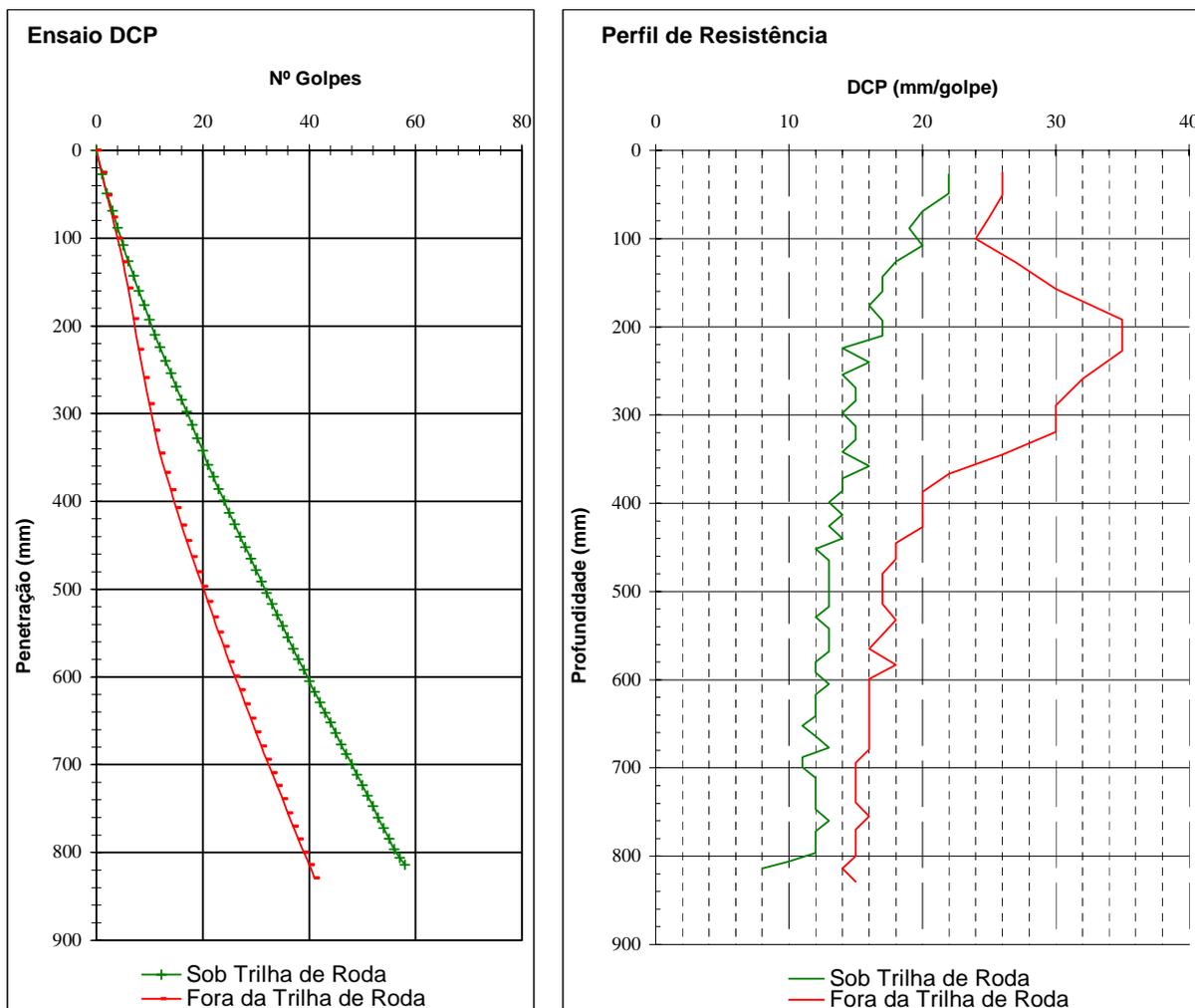


Gráfico 66: DCP e Perfil de resistência – Areia natural (Sob trilha de roda)

A conclusão é que a compactação pneumática gera resultados satisfatórios sobre a areia, uma vez que a capacidade de suporte da areia sob a trilha de roda, sujeita à densificação pela passagem de máquinas no local, é superior à condição natural.

O furo realizado na trilha de roda mostrou também um perfil de resistência mais uniforme que o realizado fora dela.

7.3 Perfis de resistência – CBR

Considerando a correlação CBR x DCP para a amostra de Oiapoque, apresentada pelo presente estudo, os resultados obtidos no campo podem gerar perfis de resistência em termos de CBR.

Para tanto, a partir das curvas dos ensaios DCP apresentadas, foram determinados os valores de DCP nas várias camadas analisadas através da melhor reta (método dos mínimos quadrados), sempre com coeficiente de determinação superior a 0,99, e os respectivos valores de CBR foram estimados a partir da correlação:

$$\text{Log CBR} = 2,9460 - 0,9603 \text{ Log DCP} \quad (\text{Quadro 4})$$

Os valores de DCP e os respectivos valores estimados de CBR para os pontos de análise da areia em que esta compunha o subleito do pavimento (ampliação da pista, acostamento e *stopways*) são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Correlação de DCP obtido no campo com CBR – Subleito do pavimento

Discriminação		Profundidade (mm)	Areia confinada*		Areia desconfinada**	
Área	Localização		DCP	CBR	DCP	CBR
Ampliação da pista	E -07+00 BD	450 - 750	3,8	245	8,2	117
		800 - 1200	5,8	163	13,3	74
		1200 - 1300	4,5	208	8,5	113
		1300 - 1460	0,8	1094	1,0	883
Ampliação da pista	E -08+00 BE	730 - 940	4,0	233	5,4	175
Ampliação da pista	E -10+00 BD	840 - 1260	5,9	161	8,9	108
Acostamento	E 19+00 LE	170 - 425	4,7	200	5,6	169
Stopway cab 03	E -18+10 BD	480 - 950	7,9	121	9,0	107
Stopway cab 21	E 62+00 BD	380 - 900	19,5	51	23,6	42

* Areia confinada corresponde ao subleito em areia sob o pavimento da pista

** Areia desconfinada corresponde ao subleito da pista, após a retirada das camadas de base e sub-base sobre o mesmo, através de sondagem a trado.

O Gráfico 67 apresenta os perfis de resistência dos pontos em questão. As linhas tracejadas indicam a areia confinada sob o pavimento e as linhas cheias indicam a areia sem o confinamento superior, após retirada da base e sub-base através de sondagem a trado.

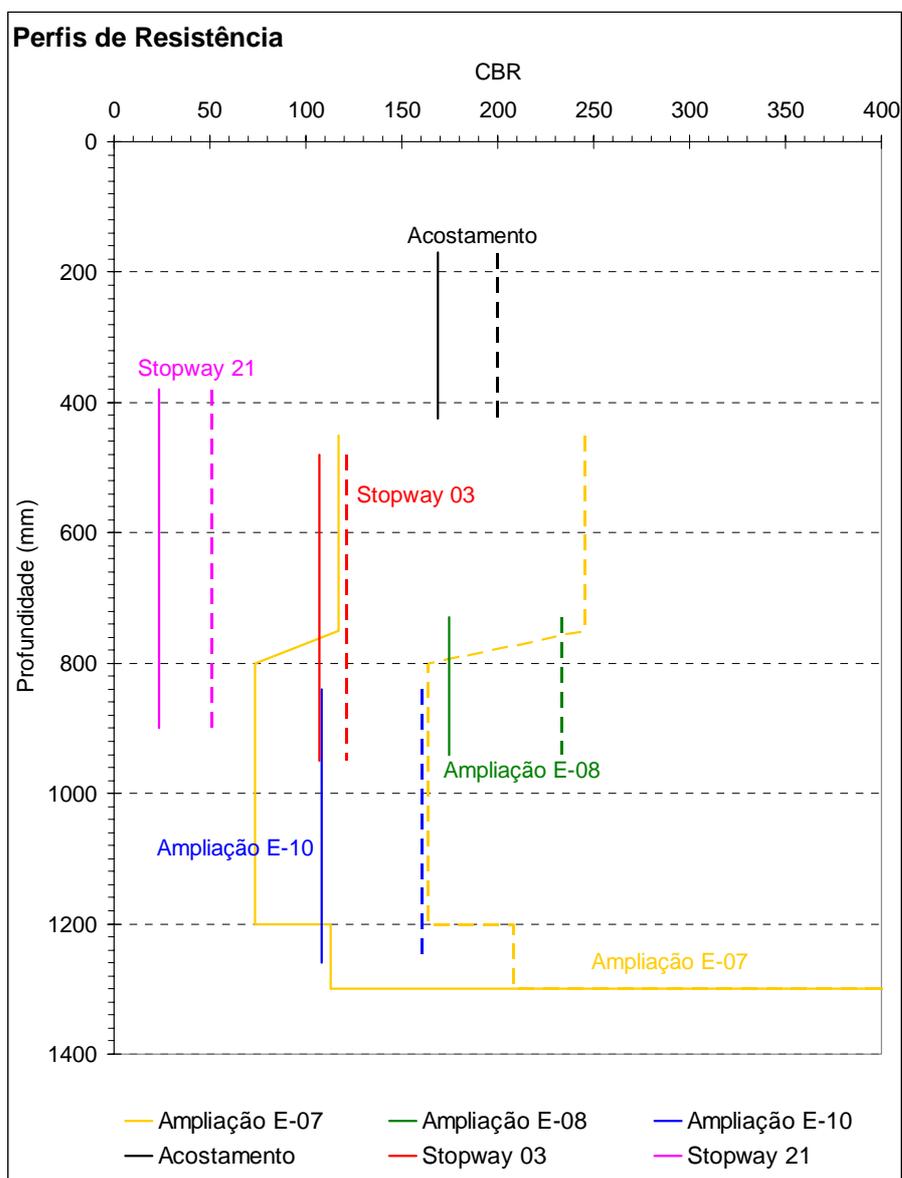
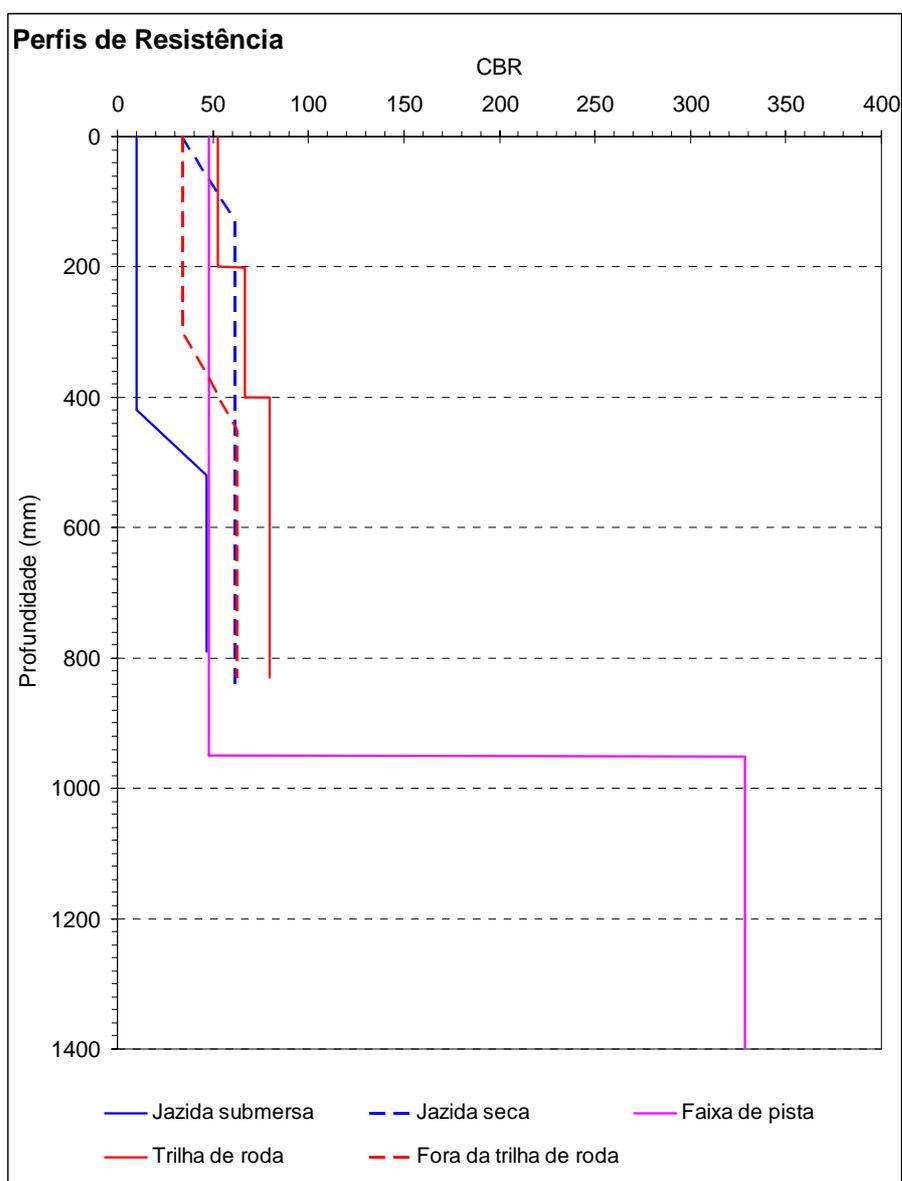


Gráfico 67: Perfis de resistência CBR – Subleito do pavimento

Com relação aos pontos correspondentes à areia ensaiada a partir da superfície, os valores de DCP foram igualmente determinados e os respectivos valores de CBR também estimados, conforme apresentado na Tabela 21 e representados no Gráfico 68.

Tabela 21: Correlação de DCP obtido no campo com CBR – Areia a partir da superfície

Discriminação		Profundidade (mm)	Desconfinada	
Área	Localização		DCP	CBR
Jazida seca	área patrimonial	0	30,0	34
		130 - 840	16,0	62
Jazida submersa	área patrimonial	0 - 420	106,7	10
		520 - 790	21,3	47
Faixa de pista, lado direito	E -07+15	0 - 950	20,9	48
		950 - 1400	2,8	329
Faixa de pista, próx. CAB-03	sob trilha de roda	0 - 200	18,9	53
		200 - 400	14,7	67
		400 - 830	12,2	80
Faixa de pista, próx. CAB-03	fora da trilha de roda	0 - 300	29,4	34
		450 - 830	15,8	62

**Gráfico 68: Perfis de resistência CBR – Areia a partir da superfície**

7.3.1 Impacto financeiro da avaliação do CBR do subleito

O memorial descritivo, constante do projeto de ampliação e reforço do aeroporto de Oiapoque-AP, descreve o dimensionamento previsto para o pavimento em questão (ROCHA FILHO; AMÂNCIO, 2003). Segundo tal documento a pista daquele aeroporto foi dimensionada para atender às operações da aeronave C-130 Hércules, considerando subleito em areia com CBR igual a 12.

Tais considerações levaram à adoção de um pavimento com espessura total de 50 cm, sendo 10 cm de revestimento asfáltico em CBUQ, 20 cm de camada de base em solo laterítico estabilizado com cimento e 20 cm de sub-base em solo laterítico.

A observação dos perfis de resistência em termos de CBR, ora apresentados, leva à conclusão de que o CBR do subleito foi subestimado no projeto, uma vez que em todos os perfis, mesmo aqueles em que ficou evidenciada falta de qualidade na execução do pavimento, verificou-se CBR maior ou igual a 50, em profundidades a partir de 500 mm, que corresponde à espessura do pavimento em questão.

Considerando CBR de subleito igual a 90% do CBR mínimo encontrado nos perfis, ou seja, CBR igual a 45, o dimensionamento previsto pela circular consultiva AC-150/5320-6D CHG 3 (FAA, 2004) levou a uma espessura total do pavimento de 16 cm.

Propõe-se aqui uma estimativa da economia decorrente dessa mudança e, para tanto, considera-se uma seção-tipo do pavimento com espessuras mínimas construtivas, a saber: 10 cm de revestimento asfáltico (ANV C-130), 12 cm de base e 12 cm de sub-base, totalizando 34 cm de espessura total.

Para profundidades a partir de 340 mm, dispõe-se de dados da areia compondo o subleito do acostamento (CBR do subleito superior a 100 – ver Gráfico 67) e dos testes

realizados a partir da superfície (CBR superior a 45 – ver Gráfico 68). Para efeito dessa análise, mantém-se a consideração de CBR do subleito igual a 45.

Considerando a nova seção-tipo proposta (34 cm de espessura), têm-se uma economia de 8 cm de camada de base e 8 cm de camada de sub-base, em relação à seção-tipo do projeto. De posse dos custos unitários dos serviços de execução de base e sub-base (ROCHA FILHO; AMÂNCIO, 2003), têm-se a situação apresentada no Quadro 9.

Serviços	Unid.	Custo Unitário (R\$)	Planilha da Obra		Nova Proposta		Economia		
			Qtde.	Custo Total (R\$)	Qtde.	Custo Total (R\$)	m ³	R\$	%
Sub-base em solo laterítico	m ³	10,40	4.058	42.207,36	2.435	25.324,42	1.623	16.882,94	40,0
ase estabilizada com cimento	m ³	55,73	3.146	175.348,87	1.888	105.209,32	1.259	70.139,55	40,0
Totais							2.882	87.022,49	40,0

Quadro 9: Estimativa da economia com a avaliação do CBR do subleito

A análise mostrou uma economia de 40% no orçamento referente aos serviços de base e sub-base da obra em questão.

8 Conclusão

O equipamento DCP apresentou resultados satisfatórios, mostrando tendências de comportamento importantes em todas as análises propostas, o que permite concluir que o mesmo apresenta-se como ferramenta adequada para o estudo e controle tecnológico de areias, em campo e no laboratório, sujeita à interpretação de dados.

Ao contrário, os ensaios CBR em areias apresentaram dispersão muito elevada e, com isso, sua utilização para a previsão da capacidade de suporte de areias não apresenta resultados seguros.

As correlações entre CBR e DCP para areias secas apresentadas são válidas para as amostras tratadas no presente trabalho e podem ser estendidas a amostras de areias de características similares quanto à granulometria e formato dos grãos em relação às aqui apresentadas.

A determinação de uma correlação geral, tal como descrita no item 6.1.1, evidenciou a ligação entre os coeficientes angular e linear da reta de correlação $\text{Log CBR} \times \text{Log DCP}$ com os parâmetros relacionados à distribuição granulométrica da areia e tal correlação serve como primeira aproximação para qualquer areia, conhecida sua curva granulométrica.

Por fim, o estudo de caso realizado no aeroporto de Oiapoque-AP foi extremamente positivo, à medida que permitiu observar as potencialidades do uso do DCP no campo. Dentre as considerações possíveis acerca das potencialidades do equipamento, pondera-se, primeiramente, que uma campanha de ensaios DCP promovida em toda a extensão de uma pista de pouso, por exemplo, permitiria uma caracterização completa quanto à homogeneidade ou heterogeneidade do subsolo ao longo da mesma.

Em segundo lugar, o uso da correlação CBR x DCP para o material constituinte do subsolo permitiria a estimativa de valores CBR correspondentes aos parâmetros de resistência obtidos através dos ensaios DCP realizados no campo, o que levaria à determinação dos perfis de resistência, em termos de CBR, para cada ponto analisado.

No caso do projeto de um aeroporto nessas condições, em que a homogeneidade ou heterogeneidade do subsolo e os perfis de resistência ao longo da pista a ser implantada fossem conhecidos, poder-se-ia avaliar com segurança o CBR de subleito a ser considerado.

8.1 Sugestão de trabalhos futuros

Quanto à continuação dos trabalhos acerca do assunto tratado no presente estudo, são sugeridos os seguintes temas:

- Verificação da influência de parâmetros da granulometria, apresentada no item 6.1.1, para um número maior de amostras granulares;
- Levantamento de perfis de umidade e de índice de vazios no campo, para análise em conjunto com perfis de resistência obtidos através de ensaios DCP, da forma que foram apresentados no capítulo de Estudo de Caso;
- Verificação e junção dos resultados dos trabalhos ora desenvolvidos sobre o uso do DCP, a fim de se estabelecer metodologias e correlações padronizadas para os diferentes materiais disponíveis, de preferência, no contexto nacional.
- Estudo de areias saturadas; e
- Estudo de areias bem graduadas e areias grossas.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508 – Solo – Determinação da massa específica**. ABNT, 1984. 14p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895 – Solo – Índice de Suporte Califórnia**. ABNT, 1987. 14p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12004 – Solo – Determinação do $e_{máx}$ de solo não coesivo**. ABNT, 1990.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12051 – Solo – Determinação do $e_{mín}$ de solo não coesivo**. ABNT, 1991.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023 – Informação e documentação – Referências – Elaboração**. ABNT, 2002. 24p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10520 – Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação**. ABNT, 2002. 7p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14724 – Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação**. ABNT, 2002. 6p.
- AMAPÁ.NET. **Portal do Estado do Amapá**. ©Copyright2005 Amapá.Net. Disponível em: <<http://www.amapa.net>>. Acesso em: 25 set. 2005.
- AMINI, F. **Potential Applications of Dynamic and Static Cone Penetrometer in MDOT Pavement Design and Construction**. Final Report. Jackson State University. Department of Civil Engineering. Jackson, Mississippi, 2003. 31p.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **D-6951 - Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications**. ASTM International. 2003. 7p.
- BALIGH, M. M. Cavity Expansion in Sands with Curved Envelopes. **Journal of The Geotechnical Engineering Division**. GT11, 1976. p.1131-1145.
- BARTORELLI, A.; HARALYI, N.; Geologia do Brasil. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. 1. ed. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. cap. 4, p.57.
- BICALHO, K. V.; AZEVEDO, R. F. Modelagem das Características de Deformabilidade e Resistência de uma Areia. **Solos e Rochas**. São Paulo/SP, Vol. 17, No. 2, 1994. p.111-121.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6.ed. . Ed. LTC. Rio de Janeiro/RJ:, 1988. p.21-36.
- COONSE, J. **Estimating California Bearing Ratio of Cohesive Piedmont Residual Soil Using the Scala Dynamic Cone Penetrometer**. MSCE. North Carolina State University, Raleigh, N.C.

CORDEIRO, D. D. **Obtenção de Parâmetros Geotécnicos de Areias por meio de Ensaios de Campo e de Laboratório**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2004. 198p.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2 ed. Ed. Edgar Blücher. São Paulo/SP, 2002. p.177-249.

DE BEER, E. E. The Scale Effect on the Phenomenon of Progressive Rupture in Cohesionless Soils. In: 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering **Proceedings**, Vol. 2, Montreal, Canada, 1965, p.13-17.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro/RJ, 1997. 296p. (IPR Publ. 700)

FAA. Federal Aviation Administration. **Advisory Circular AC-150/5320-6D: Airport Pavement Design and Evaluation**. U. S. Department of Transportation, 1995. Disponível em: <<http://www.faa.gov>>. Acesso em: 02 nov 2005.

GOOGLE. Google® Earth 2005. Disponível em: <<http://www.earth.google.com>>. Acesso em 25 set. 2005.

HARISON, J. R. **Correlation between California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils**. In: Proceeding Instructions of Civil Engineers. Part 2. London, 1987.p.83-87.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE – Cidades@: banco de dados. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidades>>. Acesso em: 25 set. 2005.

KARUNAPREMA, K. A. K.; EDIRISINGHE. A Laboratory Study to Establish Some Useful Relationships for the Use of Dynamic Cone Penetrometer. **EJGE Journal**. Sri Lanka, 2002. 15p.

KLEYN, E. G. **The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)**. Rep. No. 2/74. Transval Roads Department, South Africa.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. General Aspects of Stress-Strain Behavior. In: **Soil Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology, Wiley & Sons Inc., New York, 1969.

LEE, K. L.; SEED, H. B. Drained Strength Characteristics of Sands. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. ASCE, Vol. 93, No. SM6, Proc. Paper 5561, 1967. p.117-141.

LIMA, L. C. **O Ensaio DCP Aplicado no Controle de Qualidade de Compactação de Obras Viárias Executadas com Solos Lateríticos de Textura Fina**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 2000, 148 p.

LIVNEH, M. **Validation of Correlations between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests**. Transportation Research Record 1219. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1987, p.56-67.

LIVNEH, M.; ISHAI, I.; LIVNEH, N. A. **Automated DCP Device Versus Manual DCP Device**. Road and Transport Research, 1992. Vol. 1. No. 4.

LIVNEH, M.; ISHAI, I.; LIVNEH, N. A. **Effect of Vertical Confinement on Dynamic Cone Penetrometer Strength Values in Pavement and Subgrade Evaluations**. Transportation Research Record 1473. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1995, p.1-8.

MARSON, M. **Análise Crítica da Classificação MCT para Solos Tropicais**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 2004, 216p.

MARSON, L. A. **Correlações entre Ensaios CBR e Mini-CBR para Solos Lateríticos de Textura Fina**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004, 139p.

MEDINA, J. **As Lateritas e sua Aplicação na Pavimentação**. In: 2ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro/RJ, 1961. p. 20-52.

MICROSOFT. Microsoft® Office Excel 2003. Copyright© Microsoft Corporation 1985-2003. Todos os direitos reservados. 1 CD-ROM.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, ABMS, Rio de Janeiro/RJ, 1981, p. 30-41.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Ed. Vilibor. São Paulo/SP, 1995. 213p.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos – Ensaios de Laboratório**. EESC-USP. São Carlos/SP. 2001. p.143-152.

OLIVEIRA, L. E. **Contribuição à Implantação de Obras Viárias Urbanas de Baixo Volume de Tráfego com o Uso de Solos Transicionais**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1988, 153p.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric Models and Economic Forecasts**. 4.ed. Ed. McGraw-Hill International. 1998. ISBN 0-07-050208-0. p.99

PINTO, C. S. Resistência das Areias. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Ed. Oficina de Textos. São Paulo/SP, 2000. p.181-192.

PORTER, O. J. **Foundations for Flexible Pavements**. 1942. 143p.

REZENDE, A. A. **O Ensaio MCV-ITA como Suporte à Extensão da Metodologia MCT aos Solos Lateríticos Concrecionados**. Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 1998. 136p.

ROCHA FILHO, N. R.; AMÂNCIO, H. B. **Projeto de Ampliação e Reforço do Aeroporto de Oiapoque-AP**. Comissão de Aeroportos da Região Amazônica. Comando da Aeronáutica. Belém/PA, 2003.

SANTANA, H. **Os Solos Lateríticos e a Pavimentação**. IPR, Publ. nº 543, Rio de Janeiro/RJ, 1976.

TULCHINSKI, A. **A Deterioração Prematura das Rodovias Pavimentadas no Brasil: suas prováveis causas – programação de pesquisas**. In: I Simpósio de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro/RJ, 1965.

TRICHÊS, G.; CARDOSO, A. B. **Avaliação da Capacidade de Suporte de Aterros e Subleitos de Rodovias Utilizando o Penetrômetro Dinâmico de Cone**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília/DF, p.649-656.

U. S. ARMY. Construction Engineering Research Laboratory. **PCASE – Pavement-Transport Computer Assisted Structural Engineering**. Version 2.08. 1999. Disponível em: <<http://www.pcase.com>>. Acesso em: 6 out. 2005.

VANAGS, C. **The Dynamic Penetrometer for Assessment of Soil Mechanical Resistance**. In: Supersoil 2004 3rd Australian New Zealand Soils Conference. Sidney, 2004. 8p.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, 1988, 276 p.

VERTAMATTI, E.; OLIVEIRA, L. E. **Análise de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Executados com Solos Transicionais**. In: Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego, Rio de Janeiro/RJ, 1997. p.326-344.

VESIC, A. S.; CLOUGH, G. W. Behavior of Granular Materials Under High Stresses. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. ASCE, Vol. 94, No. SM3, Proc. Paper 5954, 1968. p.661-688.

WEBSTER, S. L.; GRAU, R. H.; WILLIAMS, T. P. Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer. **Report GL-92-3**, Department of the Army, Washington, D.C., 1992. p.19.

WEBSTER, S. L.; BROWN, R. W.; PORTER, J. R. Force Projection Site Evaluation Using the Electric Cone Penetrometer (ECP) and the Dynamic Cone Penetrometer (DCP). **Technical Report No. GL-94-17**. Air Force Civil Engineering Support Agency, U. S. Air Force, Tyndall Air Force Base, FL, 1994.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

^{1.} CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TM</p>	^{2.} DATA <p style="text-align: center;">13 de fevereiro de 2006</p>	^{3.} DOCUMENTO N° <p style="text-align: center;">CTA/ITA-IEI/TM-015/2005</p>	^{4.} N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">135</p>				
^{5.} TÍTULO E SUBTÍTULO: Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP							
^{6.} AUTOR(ES): Frank Cabral de Freitas Amaral							
^{7.} INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI							
^{8.} PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Tecnologia de solos tropicais, DCP, Penetrômetro dinâmico de cone, CBR, areias, capacidade de suporte							
^{9.} PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Compactação (solos); Solos tropicais; Controle de qualidade; Rodovias; Aeroportos; Mecânica dos solos; Ensaio de materiais; Engenharia geotécnica; Engenharia de transportes; Engenharia civil							
^{10.} APRESENTAÇÃO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="text-align: center;">X Nacional</td> <td style="text-align: center;">Internacional</td> </tr> </table> ITA, São José dos Campos, 2005 135 páginas					X Nacional	Internacional	
	X Nacional	Internacional					
^{11.} RESUMO: Dadas as características físicas e operacionais vantajosas do ensaio DCP, tem-se verificado sua aplicabilidade em estudos geotécnicos que precedem à execução de uma obra viária, tais como avaliar a capacidade de suporte de solos “in situ”, analisar solos colapsíveis, etc., bem como no controle de qualidade de compactação no campo através do acompanhamento da espessura de camadas, da homogeneidade de compactação, da avaliação da capacidade de suporte e do levantamento de perfis de resistência, entre outros. O ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – adaptou e construiu a sua própria versão do penetrômetro dinâmico, nomeada DCP-ITA, com a qual trabalhos têm sido desenvolvidos para o estabelecimento de correlações CBR x DCP para diversos tipos de solos, tais como solos lateríticos, solos saprolíticos e areias, solo este abordado no presente estudo. Diferentemente de solos coesivos, as areias exigiram a definição de uma metodologia própria de ensaio. Foram selecionadas três amostras considerando a variabilidade granulométrica e genética (residual e sedimentar) e, para cada uma delas, foram obtidas correlações CBR x DCP. Os resultados obtidos através dos ensaios CBR e DCP permitiram analisar a influência de fatores intervinientes no processo, tais como a pressão de confinamento e a variabilidade granulométrica. Buscou-se, também, relacionar os resultados obtidos com outros parâmetros, tais como a compacidade relativa, o coeficiente de curvatura e o coeficiente de uniformidade dos grãos, obtendo-se resultados satisfatórios. O estudo envolveu, ainda, a realização de ensaios DCP no campo, em um dos locais de origem das amostras selecionadas para o trabalho: o aeroporto de Oiapoque, no estado do Amapá. Os resultados mostraram-se promissores para o uso do DCP em obras viárias com a presença de areias compondo subleitos e mesmo em camadas drenantes.							
^{12.} GRAU DE SIGILO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 25%;">(X) OSTENSIVO</td> <td style="width: 25%;">() RESERVADO</td> <td style="width: 25%;">() CONFIDENCIAL</td> <td style="width: 25%;">() SECRETO</td> </tr> </table>				(X) OSTENSIVO	() RESERVADO	() CONFIDENCIAL	() SECRETO
(X) OSTENSIVO	() RESERVADO	() CONFIDENCIAL	() SECRETO				

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)