**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**ANDRÉA BATISTA DE FARIAS**

# ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO APLICADOS EM PAVIMENTAÇÃO

Recife, PE
2013

**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**ANDRÉA BATISTA DE FARIAS**

# ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO APLICADOS EM PAVIMENTAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Stela Fucale Sukar.
Co-orientador: Prof.º Dr. Alexandre Duarte Gusmão.

Recife, PE
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

F224a

Farias, Andréa Batista de
Análise técnica e econômica de resíduos da construção e demolição aplicados em pavimentação / Andréa Batista de Farias. – Recife : UPE, Escola Politécnica, 2013.
183 f.

Orientadora: Dra. Stela Fucale Sukar
Co-Orientador: Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

1. Resíduo da Construção e Demolição 2. Estaca Tipo Hélice Contínua 3. Reciclagem de Resíduo da Construção e Demolição 4. Pavimentação. - Dissertação I. Sukar, Stela Fucale (orient.) II. Gusmão, Alexandre Duarte (Co-orient.) III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 624.01

ANDRÉA BATISTA DE FARIAS

# ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO APLICADOS EM PAVIMENTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

**Orientador:**

_____
Profª Drª Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

**Co-orientador:**

_____
Profº Drº Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

**Examinador externo:**

_____
Profª Dra. Laura Maria Goretti da Motta
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Examinador interno:**

_____
Profa Dra. Kalinny Patrícia V.Lafayette
Universidade de Pernambuco

Recife, PE
2013

*Às minhas avós (Maria e Ceci),*
*aos meus pais (Eloisa e Luís Henrique)*
*e ao meu noivo (Rafael).*

# AGRADECIMENTOS

À Professora Stela Fucale e ao Professor Alexandre Gusmão, pela orientação desta dissertação, pela serenidade transmitida, pela confiança em mim depositada e, acima de tudo, por todos os ensinamentos repassados ao longo de quase cinco anos de parceria.

A todos os professores do PEC, permanentes e colaboradores, que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional. Em especial, ao Professor Silvio Romero e à Professora Kalinny Lafayette, pela leitura atenciosa, correção, críticas construtivas e sugestões no seminário de qualificação e ao Professor Cézar Cerqueira pela contribuição estatística dada a esta dissertação na reta final.

À querida Lúcia Rosani, secretária do PEC, pela paciência e carinho demostrados desde os tempos de Iniciação Científica.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Facepe) pela bolsa de mestrado e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado, em substituição a bolsa disponibilizada pela Facepe.

Ao Grupo JCPM pela confiança demonstrada ao longo de todo o desenvolvimento do estudo, em especial ao Dr. Francisco Bacelar.

À Gusmão Engenheiros Associado que contribuiu significativamente para a realização deste trabalho.

Os meus sinceros agradecimentos às empresas Tecomat – Tecnologia da Construção e Materiais e Lidermac Construções por fornecer informações essenciais para este estudo.

A todos os pesquisadores envolvidos no Grupo Ambitec, Politech, NSHT e ACVPC, em especial aos meus colegas de mestrado José Flavio, Marcos, Mario, Maurício, Suenne, Tatiana, Thaísa, Camilla, Carla, Fábio e Roberto por compartilharem conhecimentos, experiências, inseguranças e dúvidas.

As amigas engenheiras, Viviane e Raíssa pelos frequentes estudos e ensinamentos na época de graduação da POLI, que contribuíram bastante para o meu desenvolvimento profissional, além da ótima companhia.

Não poderia deixar de citar também os amigos do RioMar Recife, Gustavo Barbosa, Silvana Calistrato e Otaviano Albuquerque que foram importantes na última etapa deste trabalho, uma vez que me incentivaram.

Aos meus sogros, Zildo e Jordânia, por comemorarem cada pequena conquista minha como se fossem suas.

Agradeço a minha família, tios e primos, que sempre torceram pelo meu sucesso. Em especial, ao querido tio Demóstenes e Silvana, que me apoiaram nos últimos meses desta longa jornada.

Às minhas irmãs, Débora e Luciana, por me mostrarem sempre que há algo a aprender na vida e à minha maninha mais nova, Sara pela emoção, carinho e torcida transmitidos.

Ao Rafael Macedo, pelo amor e cumplicidade ao longo de toda a nossa história, por me incentivar tanto e, principalmente, por ser corresponsável nas minhas maiores conquistas profissionais.

Ao meu pai, Luís Henrique, agradeço por repassar sua experiência e tranquilidade e me fazer enxergar o melhor caminho a seguir. À minha mãe, Eloisa, amor maior, exemplo de força e dedicação, agradeço por estar sempre ao meu lado, por me apoiar e me incentivar, por segurar firme na minha mão sempre que preciso.

As minhas avós, Maria e Ceci, pela força que serve de exemplo a todos.

A Deus, por ter me dado força nos momentos mais difíceis da minha vida e coragem para seguir em frente.

A todos, muito obrigada.

FARIAS, Andréa Batista. **Análise técnica e econômica de resíduos de construção e demolição aplicados em pavimentação.** Recife: UPE, 2013. 183 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

## RESUMO

O setor construtivo é responsável por movimentações financeiras e pela geração de empregos no Brasil, entretanto o grande volume de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) gerado tem provocado preocupação ambiental, social e econômica, por vários aspectos: exploração desnecessária de recursos naturais, surgimento de descartes clandestinos, proliferação de vetores de doenças e gasto no transporte e deposição em aterros legalizados. A fim de identificar alternativas para uso de resíduo no próprio processo construtivo, foi analisada a viabilidade técnica de uso de resíduos originados pela atividade de fundações profundas (estacas tipo hélice contínua) e pela demolição de antigas construções para aplicação em camada de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentação, por meio de ensaios laboratoriais e de campo. Para tanto, foram realizados ensaios de granulometria, densidade real, limites de liquidez, limite de plasticidade, compactação com energia intermediária, Índice de Suporte Califórnia (ISC) em três fases diferentes do programa de investigação. Na execução da pista experimental, fez-se o acompanhamento das atividades e dos ensaios "*in situ*", método Speedy e frasco de areia, que definiram o comportamento do material no campo. Fez-se ainda uma análise da economia obtida no trecho experimental e possíveis reduções de gastos a partir de 06 (seis) cenários hipotéticos. Dos dados obtidos em laboratório, identificou-se a melhoria nas propriedades físicas e mecânicas após a mistura realizada entre os materiais investigados, destacando-se as dosagens com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado nas Fases 1 e 2, com ISC's máximos de 125% e 138%, respectivamente, e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado na Fase 3, o qual obteve um ISC máximo de 124%. Já os dados obtidos em campo, mostraram que apenas um trecho (local 6) não atingiu o grau de compactação de 100%, entretanto recebeu o tratamento específico, sendo liberado para o tráfego, posteriormente. Da verificação econômica, percebeu-se que a utilização de solo proveniente do estaqueamento e resíduo beneficiado proporcionou uma redução de 87% (cerca de R$ 752 mil) dos custos na execução do trecho experimental. Já a análise por meio de cenários permitiu identificar a possibilidade de minimização de mais de R$ 4,6 milhões de reais dos custos ao se utilizar todo o resíduo beneficiado e o solo proveniente do estaqueamento gerado na obra. Desta forma, os resultados confirmaram a viabilidade técnica do resíduo beneficiado de demolição misturado com o solo proveniente da execução do estaqueamento, bem como a sua viabilidade econômica.

**Palavras-chave:** Resíduo da Construção e Demolição. Estaca Tipo Hélice Contínua. Reciclagem. Pavimentação.

FARIAS, Andréa Batista. **Technical and economic analysis of construction waste applied in paving.** Recife: UPE, 2013. 183 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife.

## ABSTRACT

The construction sector is responsible for financial operations and the creation of jobs in Brazil, however the large volume of Civil Construction Waste (CCW) has provoked environmental, social and economic concern, caused by the unnecessary exploitation of natural resources, by the emergence of illegal discharges, by the proliferation of disease vectors and by the spent in the transport and deposition of same in legalized landfills. In order to identify alternatives to use of residue in the constructive process itself was considered the technical feasibility of using waste originated by the activity of deep Foundations (Continuous Helix Type Piles) and demolition of old buildings to application in layers of reinforcement of the subgrade, sub-base and base in pavement, through laboratory tests and field. For this, laboratory tests were made to verify particle size, actual density, liquid limit, plastic limit, compaction with intermediate energy, California Bearing Ratio (CBR) in three different phases. In the implementation of the experimental track, was the follow-up of activities and tests "in situ", which were Speedy and sand bottle method, which defined the behavior of material in the field. There was also an analysis of savings in trial and possible spending cuts from 6 (six) hypothetical scenarios. From the data obtained in the laboratory, identified an improvement in physical and mechanical properties after mixing the materials investigated, including dosages with 40% of soil from the staking and 60% of waste received in phases 1 and 2, with CBR's maximum 125% and 138%, respectively, and 60% of soil from the staking and 40% of waste received in phase 3, which has a maximum CBR of 124%. The data obtained in the field showed that only an excerpt (local 6) has not reached the level of 100% compression, however received specific treatment, being released for traffic later. Economic scan, it was realized that the use of the soil from the staking and CCW benefited provided 87% (approximately R$ 752 mil) reduction of costs in the implementation of the experimental section. The analysis by means of scenarios identified the possibility of minimization of more than R$ 4.6 million of the costs when you use any residue from the soil and staking generated in construction. In this way, the laboratory results have confirmed the technical feasibility of the waste processed demolition waste mixed with the soil from the execution of staking, as well as economic viability.

**Keywords:** Civil Construction Waste. Continuous Helix Type Piles. Recycling. Road.

## LISTA DE FIGURAS


Figura 2.1 – Estruturação linear do ciclo de vida de um produto da construção ..... 30
Figura 2.2 – Composição gravimétrica nas quatro fases ..... 33
Figura 2.3 – Corte longitudinal típico de pavimento rígido ..... 37
Figura 2.4 – Corte transversal típico de pavimento flexível ..... 37
Figura 2.5 – Camadas de pavimento flexível ..... 38
Figura 2.6 – Percentual de consumo setorial de rocha britada no ano de 2007 ..... 38
Figura 2.7 – Percentual de consumo setorial de rocha bruta no ano de 2007 ..... 39
Figura 2.8 – Esquema do pavimento da Rua Gervásio da Costa ..... 40
Figura 2.9 - Quatro seções-tipo de pavimentos no sistema viário da USP Leste ..... 43
Figura 2.10 – Distribuição granulométrica de agregado reciclado estudado por Motta (2005) ..... 48
Figura 2.11 - Granulometria do agregado da usina de Santo André/SP ..... 49
Figura 2.12 – Granulometria nos materiais estudados e na mistura proposta pelos autores ..... 50
Figura 2.13 – Valores de ISC das dosagens de RCD misto e de concreto com solo de Goiânia ..... 60
Figura 3.1 – Programa de investigação dos materiais (RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento) ..... 64
Figura 3.2 – Empreendimento que forneceu os materiais para a presente investigação ..... 65
Figura 3.3 – Esquema de execução da estaca hélice contínua ..... 68
Figura 3.4 – Materiais investigados na Fase 2 da presente pesquisa ..... 82
Figura 4.1 – Composição gravimétrica do RCD em estudo ..... 98
Figura 4.2 – Percentual de cada tipo de solo presente no subleito ..... 100
Figura 4.3 – Curvas granulométricas obtidas dos solos provenientes do estaqueamento, do RCD beneficiado e das misturas analisadas neste estudo ..... 101
Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras constituídas por solo proveniente do estaqueamento ..... 102
Figura 4.5 – Curvas granulométricas das amostras constituídas por RCD beneficiado ..... 103

Figura 4.6 – Curva granulométrica da mistura com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado ..... 103
Figura 4.7 – Curvas granulométricas das misturas com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado ..... 104
Figura 4.8 – Curvas granulométricas das misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado ..... 104
Figura 4.9 – Curvas de compactação das amostras desta pesquisa ..... 110
Figura 4.10 – Massas específicas secas máximas das amostras deste estudo em função da proporção de RCD beneficiado ..... 111
Figura 4.11 – Dispersão da mediana das massas específicas dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado ..... 112
Figura 4.12 – Curvas Penetração *x* Pressão no ensaio de ISC das amostras desta pesquisa ..... 114
Figura 4.13 – Curvas Penetração *x* Pressão das amostras constituídas por solo proveniente do estaqueamento ..... 114
Figura 4.14 – Curvas Penetração *x* Pressão das amostras constituídas por RCD beneficiado ..... 114
Figura 4.15 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado ..... 115
Figura 4.16 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado ..... 115
Figura 4.17 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado ..... 115
Figura 4.18 - Índice de Suporte Califórnia em função da proporção de RCD beneficiado nas amostras desta pesquisa ..... 118
Figura 4.19 – Dispersão da mediana dos ISC’s dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado ..... 119
Figura 4.20 – Economia gerada por uso de cada material ao se comparar os Cenários 1 e 5 nesta pesquisa ..... 135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição dos RCD em alguns países ..... 31
Tabela 2.2 - Composição do RCD de algumas cidades brasileiras, em porcentagem 32
Tabela 2.3 – Britadores de RCD ..... 35
Tabela 2.4 – Percentual dos materiais nas camadas de pavimento de um trecho em Goiânia ..... 42
Tabela 2.5 – Misturas analisadas para uso em camadas de pavimentos da Índia ..... 45
Tabela 2.6 – Composição das misturas obtidas em São Luís ..... 45
Tabela 2.7 – Composição granulométrica dos agregados investigados no Rio de Janeiro ..... 48
Tabela 2.8 – Percentual passante do RCD em cada peneira – João Pessoa ..... 51
Tabela 2.9 – Distribuição das frações (%) da curva granulométrica original das amostras de RCD em Recife ..... 53
Tabela 2.10 – Compilação dos resultados de índice de forma quanto à NBR 7809/08, NBR 6954/89 e ME 086/94 do DNER ..... 54
Tabela 2.11 – Resultados de desgaste ..... 55
Tabela 2.12 – Compilação dos resultados de compactação de RCD de vários tipos e locais ..... 56
Tabela 2.13 – Valores limites de ISC e de expansão para uso de RCD em pavimentação ..... 57
Tabela 2.14 – Dados do Índice de Suporte Califórnia do RCD de São Paulo com várias idades de cura úmida ..... 58
Tabela 2.15 – Compilação dos valores de ISC de duas usinas de São Paulo para dois níveis de energia ..... 59
Tabela 2.16 – Resultados de ISC de mistura de RCD e de agregado natural da Índia 60
Tabela 2.17 – Resultados do ensaio de ISC e expansão do RCD de João Pessoa ..... 61
Tabela 2.18 – Compilação dos dados de ISC de mistura de solos e RCD de cidades de Santa Catarina ..... 62
Tabela 2.19 – Valores de ISC e expansão do RCD com aplicação de energias intermediária e modificada de Recife ..... 63
Tabela 3.1 – Quantidade de material selecionado para o ensaio de forma pela NBR

7809/08 ..... 86
Tabela 3.2 – Energia de compactação definida pela NBR 15.116/04 ..... 86
Tabela 3.3 – Determinação da carga abrasiva para o ensaio abrasão “Los Angeles” em função da faixa granulométrica ..... 88
Tabela 3.4 – Características das amostras coletadas para o ensaio de compactação ... 93
Tabela 4.1 – Características das estacas tipo hélice contínua ..... 99
Tabela 4.2 – Coeficiente de não uniformidade e curvatura, diâmetro efetivo e teor de material passante na peneira de 0,42 mm das amostras deste estudo ..... 105
Tabela 4.3 – Classificação das amostras segundo SUCS e TRB ..... 107
Tabela 4.4 – Compilação dos resultados de densidade real dos materiais desta pesquisa ..... 108
Tabela 4.5 – Resultados da compactação dos materiais desta pesquisa ..... 110
Tabela 4.6 – Correlação entre as medianas das massas específicas dos materiais em função da proporção de RCD beneficiado ..... 112
Tabela 4.7 – Valores de ISC e expansão ..... 116
Tabela 4.8 – Correlação entre as medianas dos ISC’s dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado ..... 119
Tabela 4.9 – Percentual de Contaminante – Sulfato nas amostras deste estudo ..... 120
Tabela 4.10 – Comparação dos resultados obtidos na Fase 1 desta pesquisa e a NBR 15.116/04 ..... 121
Tabela 4.11 – Comparação dos resultados obtidos na Fase 2 desta pesquisa e a NBR 15.116/04 ..... 123
Tabela 4.12 – Comparação dos resultados obtidos na Fase 3 deste estudo e a NBR 15.116/04 ..... 125
Tabela 4.13 – Análises de campo ..... 126
Tabela 4.14 – Comparação entre os resultados de campo e de laboratório ..... 128
Tabela 4.15 – Discriminação dos materiais empregados no trecho experimental desta pesquisa ..... 129
Tabela 4.16 – Custos de aquisição dos materiais para a pavimentação na Região de Recife ..... 130
Tabela 4.17 – Custo do trecho experimental desta pesquisa ..... 130

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Composição das dosagens das amostras estudadas em um trecho de Goiânia ..... 44
Quadro 2.2 – Composições da mistura de solo e material cerâmico e nomenclatura .. 46
Quadro 2.3 - Granulometria dos agregados reciclados investigados.- % passante ..... 50
Quadro 2.4 – Distribuição granulométrica das misturas e solo-agregado ..... 52
Quadro 2.5 – Granulometria dos agregados de RCD ensaiados em Córdoba, na Espanha ..... 52
Quadro 3.1 – Discriminação das áreas, do tipo de pavimentação e camadas do local da presente pesquisa ..... 66
Quadro 3.2 – Quadro resumo dos ensaios realizados por fase laboratorial ..... 79
Quadro 4.1 – Cenários considerados e custos totais ..... 132

## LISTA DE FOTOS


Foto 2.1 – Av. Mário Werneck, com trecho executado com agregado reciclado ..... 41
Foto 3.1 – Galpões da antiga fábrica no local do empreendimento ..... 67
Foto 3.2 – Instalações provisórias no canteiro de obras do empreendimento ..... 67
Foto 3.3 – Acondicionamento do RCD bruto no local da presente pesquisa ..... 68
Foto 3.4 – Execução da estaca hélice no local da presente pesquisa ..... 69
Foto 3.5 – Execução da estaca no canteiro de obra da presente pesquisa ..... 69
Foto 3.6 – Identificação do local de armazenamento do solo proveniente do estaqueamento ..... 69
Foto 3.7 – Local de acondicionamento de solo proveniente do estaqueamento da obra desta pesquisa ..... 69
Foto 3.8 – Britador A utilizado na obra da presente pesquisa ..... 71
Foto 3.9 – Britador B utilizado na obra da presente pesquisa ..... 71
Foto 3.10 - Agregado reciclado com diâmetro inferior a 25 mm – Britador A ..... 72
Foto 3.11 – Agregado reciclado com diâmetro inferior a 38 mm – Britador B ..... 72
Foto 3.12 – Impurezas segregadas junto ao britador A ..... 72
Foto 3.13 – Impurezas segregadas junto ao britador B ..... 72
Foto 3.14 – Coleta de solo proveniente do estaqueamento - Fase 1 ..... 73
Foto 3.15 – Coleta de agregado reciclado de RCD - Fase 1 ..... 73
Foto 3.16 – Coleta de solo proveniente do estaqueamento - Fase 2 ..... 74
Foto 3.17 – Coleta de agregado reciclado de RCD - Fase 2 ..... 74
Foto 3.18 – Camada de sub-base executada com solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado ..... 74
Foto 3.19 – Coleta de material aplicado na sub-base – Fase 3 ..... 74
Foto 3.20 – Armazenamento das amostras no laboratório de solos (empresa privada) 75
Foto 3.21 – Acondicionamento dos materiais no LACC – POLI/UPE ..... 75
Foto 3.22 – Variada dimensão do RCD bruto ..... 76
Foto 3.23 – Variada dimensão do RCD bruto ..... 76
Foto 3.24 – Coleta do RCD beneficiado no meio da pilha ..... 76
Foto 3.25 – Coleta do RCD beneficiado no topo da pilha ..... 76
Foto 3.26 – Segregação tátil-visual do RCD deste estudo ..... 77

Foto 3.27 – Exemplo de pesagem do material graúdo do RCD beneficiado deste estudo ..... 77
Foto 3.28 – Secagem realizada durante o inverno ..... 80
Foto 3.29 – Secagem do material realizada durante o verão ..... 80
Foto 3.30 – Limpeza do chão ..... 80
Foto 3.31 – Quarteamento do material ..... 80
Foto 3.32 – Controle dos finos ..... 80
Foto 3.33 – Homogeneização da amostra ..... 80
Foto 3.34 – Armazenamento das amostras em sacos plásticos ..... 80
Foto 3.35 – Solo proveniente do estaqueamento colocado no fundo da peneira ..... 81
Foto 3.36 – Solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado sendo misturado ..... 81
Foto 3.37 – Mistura volumétrica de RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento na segunda etapa ..... 82
Foto 3.38 – Solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado sendo aplicado na sub-base no local desta pesquisa ..... 83
Foto 3.39 – Série de peneiras do peneiramento grosso ..... 83
Foto 3.40 – Separação nas diversas frações do material peneirado neste estudo ..... 83
Foto 3.41 – Mistura separada para o ensaio de sedimentação ..... 84
Foto 3.42 – Uma das amostras desta pesquisa no aparelho Casagrande ..... 85
Foto 3.43 – Execução do limite de plasticidade numa das amostras desta pesquisa ... 85
Foto 3.44 – Preparação da amostra para o ensaio\ de compactação ..... 86
Foto 3.45 – Compactação da mistura na energia intermediária ..... 86
Foto 3.46 – Amostras submersas por 4 dias para o ensaio de expansão e ISC ..... 87
Foto 3.47 – Execução do ensaio de ISC ..... 87
Foto 3.48 – Execução da regularização do subleito no local desta pesquisa ..... 90
Foto 3.49 – Motoniveladora espalhando e misturando os materiais na camada de sub-base ..... 90
Foto 3.50 – Retirada das impurezas da sub-base feita visual e manualmente ..... 90
Foto 3.51 – Rolo compactador ..... 90
Foto 3.52 – Rolo pneumático ..... 90
Foto 3.53 – Execução da base com BGS no local do pavimento asfáltico ..... 91
Foto 3.54 – Imprimação da base nos locais com pavimento asfáltico da obra desta

pesquisa ..... 91
Foto 3.55 – Vibro-acabadora aplicando concreto asfáltico ..... 91
Foto 3.56 – Pavimentos flexível e semirrígido.finalizados ..... 91
Foto 3.57 – Pavimentos flexível e semirrígido concluídos no trecho experimental .... 91
Foto 3.58 – Trecho liberado e viaduto interno concluído ..... 91
Foto 3.59 – Colocação da bandeja com furo ..... 94
Foto 3.60 – Areia fluindo para dentro do furo feito na camada ..... 94
Foto 3.61 – Pesagem do frasco de areia ..... 95
Foto 3.62 – Aparelho “Speedy” ..... 95
Foto 3.63 – Execução do ensaio de controle de umidade ..... 95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANTT | Agência Nacional de Transporte Terrestre |
| ARC | Agregado Reciclado de Concreto |
| ARM | Agregado Reciclado Misto |
| CBIC | Câmara Brasileira da Indústria da Construção |
| CBR | *California Bearing Ratio* |
| CC | Coeficiente de Curvatura |
| CNU | Coeficiente de Não Uniformidade |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| $D_{10}$ | Diâmetro Efetivo |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas e Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte |
| DNPM | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| ISC | Índice de Suporte Califórnia |
| RCD | Resíduo de Construção e Demolição |
| RCDR | Resíduo da Construção e Demolição Reciclado |

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO** ..... 22
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS ..... 22
1.2 JUSTIFICATIVA ..... 23
1.3 OBJETIVOS ..... 25
**1.3.1 Objetivo geral** ..... 25
**1.3.2 Objetivos específicos** ..... 25
1.4 METODOLOGIA ..... 26
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO ..... 27
**2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO** ..... 28
2.1 INTRODUÇÃO ..... 28
2.2 AÇÕES, LEGISLAÇÃO E NORMAS VIGENTES ..... 29
2.3 COMPOSIÇÃO DOS RCD ..... 31
2.4 RECICLAGEM DOS RCD ..... 33
2.5 PAVIMENTAÇÃO ..... 36
**2.5.1 Definição, classificação e características dos pavimentos** ..... 36
**2.5.2 Aplicação de agregado reciclado de RCD em pavimentação** ..... 39
**2.5.3 Principais propriedades do agregado reciclado de RCD** ..... 47
*2.5.3.1 Composição granulométrica* ..... 47
*2.5.3.2 Forma do material* ..... 53
*2.5.3.3 Abrasão Los Angeles* ..... 54
*2.5.3.4 Compactação* ..... 56
*2.5.3.5 Índice de Suporte Califórnia* ..... 57
3 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 64
3.1 INTRODUÇÃO ..... 64
3.2 CONTEXTUALIZAÇÃO ..... 65
**3.2.1 Caracterização da obra** ..... 65
**3.2.2 Geração de RCD** ..... 66
*3.2.2.1 Resíduo de demolição* ..... 66
*3.2.2.2 Resíduo proveniente da execução da fundação (tipo hélice contínua)*..... 68
3.3 PESQUISA DOCUMENTAL ..... 70

3.4 BENEFICIAMENTO DE RCD ..... 70
3.5 COLETA DE AMOSTRAS ..... 73
3.6 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA ..... 75
3.7 INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL ..... 77
**3.7.1 Caracterização física** ..... 83
*3.7.1.1 Granulometria* ..... 83
*3.7.1.2 Densidade real* ..... 84
*3.7.1.3 Limites de consistência* ..... 84
*3.7.1.4 Índice de forma* ..... 85
**3.7.2 Caracterização mecânica** ..... 86
*3.7.2.1 Compactação* ..... 86
*3.7.2.2 Índice de Suporte Califórnia* ..... 87
*3.7.2.3 Abrasão "Los Angeles"* ..... 88
**3.7.3 Caracterização química** ..... 88
*3.7.3.1 Teor de sulfatos* ..... 88
3.8 ACOMPANHAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL ..... 89
**3.8.1 Controle tecnológico em campo** ..... 92
*3.8.2.1 Controle da densidade de campo* ..... 94
*3.8.2.2 Controle da umidade* ..... 95
3.9 ANÁLISE ECONÔMICA ..... 96
**4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS** ..... 98
4.1 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RCD PROVENIENTE DA DEMOLIÇÃO E COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA ..... 98
4.2 ESTIMATIVA DO VOLUME E COMPOSIÇÃO DO SOLO PROVENIENTE DO ESTAQUEAMENTO ..... 99
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ..... 100
**4.3.1 Granulometria** ..... 100
*4.3.1.1 Classificação Segundo Transportation Research Board (TRB)* ..... 106
*4.3.1.2 Classificação Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)* ..... 107
**4.3.2 Densidade real** ..... 108
**4.3.3 Limites de consistência** ..... 108
**4.3.4 Índice de forma** ..... 108
4.4 ABRASÃO "LOS ANGELES" ..... 109

4.5 COMPACTAÇÃO ..... 109
4.6 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA ..... 113
4.7 TEOR DE SULFATOS ..... 120
4.8 COMPARAÇÃO ENTRE A NBR 15.116/04 E OS DADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO ..... 120
4.9 CONTROLES DE CAMPO ..... 126
4.10 ANÁLISE ECONÔMICA DO USO DE RCD EM PAVIMENTAÇÃO ..... 129
**5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS** .... 136
5.1 CONCLUSÕES ..... 136
5.2 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS ..... 138
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ..... 139
**APÊNDICE A – Coleta das amostras na Fase 1** ..... 149
**APÊNDICE B – Coleta das amostras na Fase 2** ..... 151
**APÊNDICE C – Coleta das amostras na Fase 3** ..... 153
**APÊNDICE D – Coleta das amostras na Fase 3** ..... 155
**APÊNDICE E – Mapeamento do RCD bruto** ..... 157
**APÊNDICE F – Mapeamento do RCD beneficiado** ..... 159
**APÊNDICE G – Material reciclado aplicado na pavimentação** ..... 161
**APÊNDICE H – Tipo de solo retirado no estaqueamento** ..... 163
**APÊNDICE I – Economia obtida no trecho experimental** ..... 167
**ANEXO A – Projeto de pavimentação** ..... 170
**ANEXO B – Programação da prospecção geotécnica** ..... 172
**ANEXO C – Rastreabilidade das estacas** ..... 174
**ANEXO D – Topografia e área dos galpões** ..... 180
**ANEXO E – Perfil do Terreno** ..... 182

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Construção Civil é uma das atividades mais importantes para um país em desenvolvimento. No Brasil, entre os anos de 2004 e 2010, este setor cresceu 42,41%, representando uma média anual de 5,18%. Em 2010, o Produto Interno Bruto (PIB) da Construção Civil foi cerca de R$ 165 bilhões, correspondendo a 5,3% do PIB nacional. Já no ano de 2011, entre os meses de janeiro e setembro, houve um incremento de 3,8% em relação à igual período do ano anterior, com a geração de 309.425 empregos formais durante os dez primeiros meses deste mesmo ano (CBIC, 2011).

A cadeia construtiva é responsável por movimentações financeiras e pela geração de empregos, seja de forma direta, indireta ou induzida, influenciando também na intensa industrialização e no surgimento de novas tecnologias.

Entretanto, este elevado índice de atividades construtivas acarreta alto consumo de matérias primas e volumosa geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), originando impactos ambientais, sociais e financeiros.

No que diz respeito aos impactos ambientais, estima-se que o setor construtivo consome entre 20 e 50% de todos os recursos naturais disponíveis, renováveis e não renováveis (LIMA, 2005), desperdiçando parte deste material, uma vez que, de acordo com ABRELPE (2011), foram coletados mais de 33 milhões de toneladas de RCD nas cidades brasileiras em 2011, decorrentes apenas de despejo clandestino.

Somado a isto, a falta de consciência ambiental por parte da sociedade, inexistência de política pública e a ausência de compromisso dos geradores são responsáveis pelo aparecimento de lixões e depósitos clandestinos, os quais ocasionam assoreamento de rios e córregos, obstrução de sistemas drenagem urbana, proliferação de vetores de doenças, dentre outros, os quais impactam o meio social.

Destaca-se ainda que diminuir os desperdícios no canteiro de obras resulta também na minimização de impactos econômicos, uma vez que os materiais adquiridos são realmente utilizados na obra e gastos como transporte e deposição de RCD em aterros legalizados são reduzidos. Isto é possível através de um bom gerenciamento e planejamento da obra, sendo fundamental documentar os procedimentos de execução e inspeção de cada serviço, que permitem o treinamento adequado de pessoal (SOUZA e MEKBEKIAN, 2002), evitando a perda ou o retrabalho e aumentando a produtividade.

Objetivando minimizar esses impactos e contribuir para a conscientização do setor construtivo, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de elaborar materiais e processos construtivos que reduzam danos ao homem e ao meio ambiente. Tem-se buscado, então, alternativas para a utilização de RCD como agregado com possíveis usos em produção de argamassa, blocos e artefatos de concreto, sistema de drenagem, estacas de compactação, entre outros, incentivando o reaproveitamento e a reciclagem destes materiais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Para qualquer país, a existência de um transporte é vital. No Brasil, o transporte por ônibus é responsável por quase 95% do total dos deslocamentos realizados (ANTT, 2009). De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT), apenas 26.827 km das estradas municipais brasileiras estavam pavimentadas em 2012, ou seja, 1.261.746 km da malha viária urbana ainda não tinham sido pavimentadas (CNT, 2012).

No Brasil, o primeiro registro de aplicação de agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição com acompanhamento tecnológico ocorreu em 1984, por meio da parceria entre a Prefeitura Municipal de São Paulo e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, na execução e no acompanhamento da obra, respectivamente. Este logradouro é caracterizado por um baixo volume de tráfego e apresentou um desempenho satisfatório na época, segundo Motta (2005).

Para auxiliar o uso de RCD beneficiado como material alternativo na pavimentação, foram elaboradas as NBR's 15.115 e 15.116 no ano de 2004, as quais expõem as diretrizes e os requisitos de desempenho que permitem a aplicação deste material, surgindo, em meio a isto, estudos que os caracterizaram. Há também pesquisas que avaliaram o comportamento deste material ao adicionar solo de jazida como em Redivo (2011) e cimento e cal em Motta (2005), entre outros.

A Cidade do Recife, localizada no Estado de Pernambuco, vem se destacando no que se refere aos temas de gestão, desempenho e inovação tecnológica dos RCD, em virtude dos resultados obtidos pelo Projeto Entulho Limpo/PE, iniciado em 2003, pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Pernambuco – SINDUSCON/PE. Este projeto tem a coordenação do Grupo de Pesquisa em Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente – AMBITEC da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco e o apoio do Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Pernambuco – SEBRAE/PE.

Desde que o Projeto Entulho Limpo/PE foi iniciado, têm sido desenvolvidas ações que visam contribuir para a tomada de decisões adequadas à realidade da cidade de Recife/PE, no âmbito do tema "Resíduos de Construção e Demolição".

Um dos temas estudados pelo Grupo AMBITEC consiste em analisar o reaproveitamento de RCD em obras de engenharia. Por exemplo, no final da década de 80, foi introduzida no Brasil a solução de fundação de estaca tipo hélice contínua, que apresenta como vantagem o baixo nível de vibrações e elevada produtividade, sendo responsável por uma grande aceitação no setor construtivo (VELLOSO e LOPES, 2010). Entretanto, por se tratar de estaca escavada, durante o processo de concretagem ocorre também a retirada de solo, caracterizando uma desvantagem neste tipo de estaqueamento. Por outro lado, este material possui potencial de aplicação em outros serviços do setor construtivo.

A presente pesquisa expõe um estudo de caso de construção de um shopping na Região Metropolitana do Recife (RMR), cuja solução do projeto de fundação foram estacas tipo hélice contínua e, dentre as demais atividades da obra, foi planejada a demolição de

galpões que já existiam no terreno. Unindo estas situações, os responsáveis pela obra identificaram a possibilidade de uso destes dois materiais em regularização de subleito, sub-base e base no estacionamento.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica e econômica de solo proveniente do processo executivo da estaca hélice contínua de fundações de uma obra específica e de resíduos originados das atividades de demolição no local, para produção de material reciclado a ser empregado nas camadas de pavimento do estacionamento de um empreendimento.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos selecionados para desenvolvimento da pesquisa foram:

• avaliar as características de uma obra com potencial para utilização de agregado reciclado de RCD em pavimentação;

• avaliar as propriedades físicas e mecânicas de agregados provenientes de RCD, por meio de ensaios laboratoriais, confrontando os resultados com os dados da literatura e comparando com os requisitos da norma brasileira de agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil utilizados em pavimentações;

• identificar as misturas de solo (resíduo proveniente do estaqueamento) e agregado reciclado de resíduos de demolição que apresentam melhor comportamento físico e mecânico para aplicação em uma pista experimental;

• acompanhar e avaliar a execução de uma pista experimental, constituída de agregado de proveniente do RCD em suas camadas;

• verificar os possíveis ganhos econômicos a partir de cenários com as principais formas de utilização destes resíduos.

## 1.4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos descritos anteriormente foi necessária a realização de uma série de atividades, conforme descritas a seguir:

i) coleta de materiais oriundos de atividades de Construção Civil em um canteiro de obra localizado na cidade de Recife-PE, onde foram executadas fundações profundas, do tipo hélice contínua, e atividade de demolição de antigos galpões;

ii) beneficiamento dos RCD gerados pela demolição, para fins de redução do tamanho das partículas e consequentemente obtenção de agregados reciclados, realizado na própria obra, a partir de equipamentos de grande escala (britadores móveis);

iii) caracterização de amostra de RCD, por meio de separação tátil-visual dos seus constituintes;

iv) execução de ensaios laboratoriais, tais como granulometria, massa específica, índice de forma, absorção, Índice de Suporte Califórnia, abrasão “Los Angeles”, teor de sulfatos, para conhecer as propriedades do material investigado, todos de acordo com as normas da ABNT;

v) acompanhamento de ensaios de campo em uma pista experimental composta por solo proveniente do estaqueamento e agregado beneficiado de RCD em camada de sub-base de pavimento;

vi) verificação dos custos unitários dos agregados que poderiam ser utilizados em campo e simulação na destinação dos resíduos e por meio de cenários.

vii) análise e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório e em campo, e comparação com dados da literatura.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, incluindo este primeiro com uma breve introdução, objetivos, metodologia e estrutura.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os aspectos da legislação e normas, as características de agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição com aplicação em pavimentação, além de uma abordagem sobre a reciclagem de RCD e os tipos de pavimentos existentes.

No Capítulo 3 é descrito o materiais e métodos da pesquisa, onde são apresentados os critérios e os métodos utilizados para a realização do estudo.

No Capítulo 4 são expostos os resultados, por meio dos dados obtidos nos ensaios e comparações feitas.

O Capítulo 5 expõe as considerações finais a respeito dos resultados encontrados ao longo da pesquisa e sugestões de continuidade.

# 2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

## 2.1 INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços tecnológicos alcançados, o setor construtivo ainda apresenta traços artesanais, responsáveis por uma significativa geração de RCD, a qual ocorre desde o recebimento do produto até a sua aplicação na obra.

A Construção Civil originou cerca de 3,4 milhões de toneladas de RCD na Dinamarca no ano de 1997 (HUSUM *et*. al, 1999); na Alemanha, foram 188,6 milhões de toneladas, incluindo resíduos de construção de estradas, no ano de 2004 (JARON; ROTHKIRCH e SCHULZ, 2006); nos Estados Unidos são descartados cerca de 130 milhões de toneladas por ano (LENNON, 2005); em Hong Kong o total de RCD recebido em aterros foi em torno de 8,6 milhões de toneladas no ano de 2006 (HAO; HILLS e TAM, 2008); na Espanha foram produzidos 34,8 milhões de toneladas de RCD em 2007 (THOMAS *et*. al, 2009); em Portugal são produzidos a cada ano cerca de 7,5 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (APAMBIENTE, 2010 *apud* MÁLIA, 2010); e em 27 países da União Europeia, os setores de mineração, pedreiras e construção, representaram aproximadamente 1,6 bilhões toneladas de RCD no ano de 2008, de acordo com o EC (2011).

Segundo ABRELPE (2011), foram coletados cerca de 33 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição nos logradouros públicos em 2011 no Brasil, entretanto destaca-se que este valor não representa o total produzido, já que esta estatística se refere somente ao que foi coletado pelos municípios.

Com base em estimativas realizadas em 10 (dez) municípios brasileiros, dentre eles Guarulhos/SP, Uberlândia/MG e Vitória da Conquista/BA, constatou-se que a taxa de geração de resíduos originados pela Construção Civil varia entre 0,38 e 0,76 t/hab.ano (PINTO e GONZÁLEZ, 2005). De acordo com ABRELPE (2011), a taxa de geração de RCD no Brasil foi de 0,62 e 0,66 kg/hab.dia nos anos de 2010 e 2011, respectivamente,

dados que representam um aumento de material coletado no país, contudo não representa o total produzido, conforme já mencionado.

Estudos apontam que as duas principais cidades pernambucanas, Recife e Olinda, possuem taxa de geração de Resíduos de Construção e Demolição de 0,28 e 0,21t/hab.ano, respectivamente, entretanto se concluiu que estes valores podem estar subestimados, uma vez que ficaram abaixo de outras cidades brasileiras com o mesmo padrão de desenvolvimento (CARNEIRO, 2005 e FALCÃO, 2011).

De acordo com Pinto e González (2005), os RCD são obtidos na sua grande maioria por obras de demolição, reforma e ampliação (59%), que raramente possuem aprovação de plantas e solicitação de alvarás, seguido por edificações coletivas novas (21%) e por residências unifamiliares novas (20%), estas quase sempre autoconstruídas e informais.

Já Guerra (2009) afirma que 75% dos resíduos gerados pela construção nos municípios provêm de obras informais, através de serviços de construção, reformas e demolições, normalmente realizados pelos próprios usuários dos imóveis, que são responsáveis por disposições irregulares por toda a cidade.

## 2.2 AÇÕES, LEGISLAÇÃO E NORMAS VIGENTES

A Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas (Rio/92) consolidou, por meio da Agenda 21, o conceito de desenvolvimento sustentável, ou seja, o incentivo à preservação dos recursos naturais de maneira a garantir para as gerações futuras iguais condições de desenvolvimento (igualdade entre gerações) e maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento.

De acordo com Carvalho Filho (2001), para manter o desenvolvimento sustentável, o escopo do ciclo de vida se inicia no planejamento e termina com a reintegração das mesmas condições iniciais. Contudo, o ciclo de vida do processo construtivo pode se desenvolver de forma linear, onde cada etapa é ordenada sequencialmente e pode ser dividida em sub-etapas com a mesma filosofia (Figura 2.1). Frisa-se que na estrutura

linear, o material originado da desconstrução pode ser reintegrado no próprio sistema ou em outro sistema diferente.

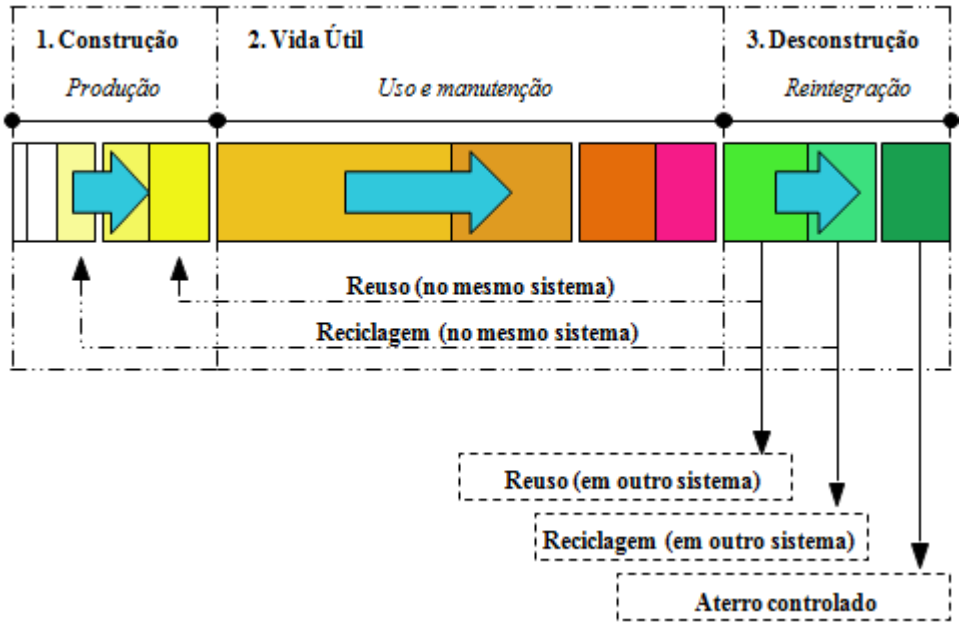



Figura 2.1 – Estruturação linear do ciclo de vida de um produto da construção.
Fonte: Adaptado de CARVALHO FILHO (2001).

No que se refere aos RCD, em 05 de julho de 2002, surgiu a Resolução CONAMA nº 307, a qual define o Resíduo da Construção e Demolição como “todo e qualquer resíduo proveniente de construções, reformas, reparos, demolições e escavação de terreno, tais como blocos cerâmicos, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, entre outros”.

A partir da aludida resolução, os grandes geradores de resíduos passaram a ser tratados como responsáveis pelos impactos ambientais, sendo adotado o princípio de poluidor-pagador. Nos casos de deposições clandestinas, as empresas coletoras e os transportadores começaram a ser considerados cúmplices dos crimes ambientais.

A fim de auxiliar os municípios brasileiros no tratamento dos resíduos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou 04 (quatro) normas em 2004, que tratam desde a instalação de recebimento do material até a sua aplicação em pavimentação ou em concreto sem função estrutural. As diretrizes são as seguintes:

- NBR 15113 – Resíduos sólidos da Construção Civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 – Resíduos sólidos da Construção Civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.

## 2.3 COMPOSIÇÃO DOS RCD

A variação dos materiais que constituem os Resíduos de Construção e Demolição depende de certas características como região, técnica construtiva empregada, disponibilidade de matéria-prima, fases da obra, equipamentos utilizados, entre outros. A variabilidade da composição dos RCD são apresentadas em percentagem por peso de alguns países (Tabela 2.1) e cidades brasileiras (Tabela 2.2), a título de exemplos.

Tabela 2.1 – Composição dos RCD em alguns países.

| **Composição dos RCD** | **Índia** | **Dinamarca** | **Holanda** | **Portugal** | **Malásia** |
|---|---|---|---|---|---|
| Solos de escavação, areia e cascalho | 35% | 37% | n.i. [1] | 45%[2] | n.i. |
| Alvenaria e tijolos | 30% | 5% | 26% | 35% | 14% |
| Concreto e argamassa | 25% | 22% | 42% | | 24% |
| Metais | 5% | n.i. | n.i. | 5% | 2% |
| Asfalto | 2% | 14% | 20% | 6% | n.i. |
| Madeira | 2% | n.i. | n.i. | 5% | 56% |
| Outros | 1% | 22% | 12% | 4% | 4% |

Fonte: Adaptado de Lau, Whyte e Law (2008) e Mália (2010).

[1] Não identificado
[2] Este percentual inclui brita da restauração de pavimentos, lama de dragagem e perfuração

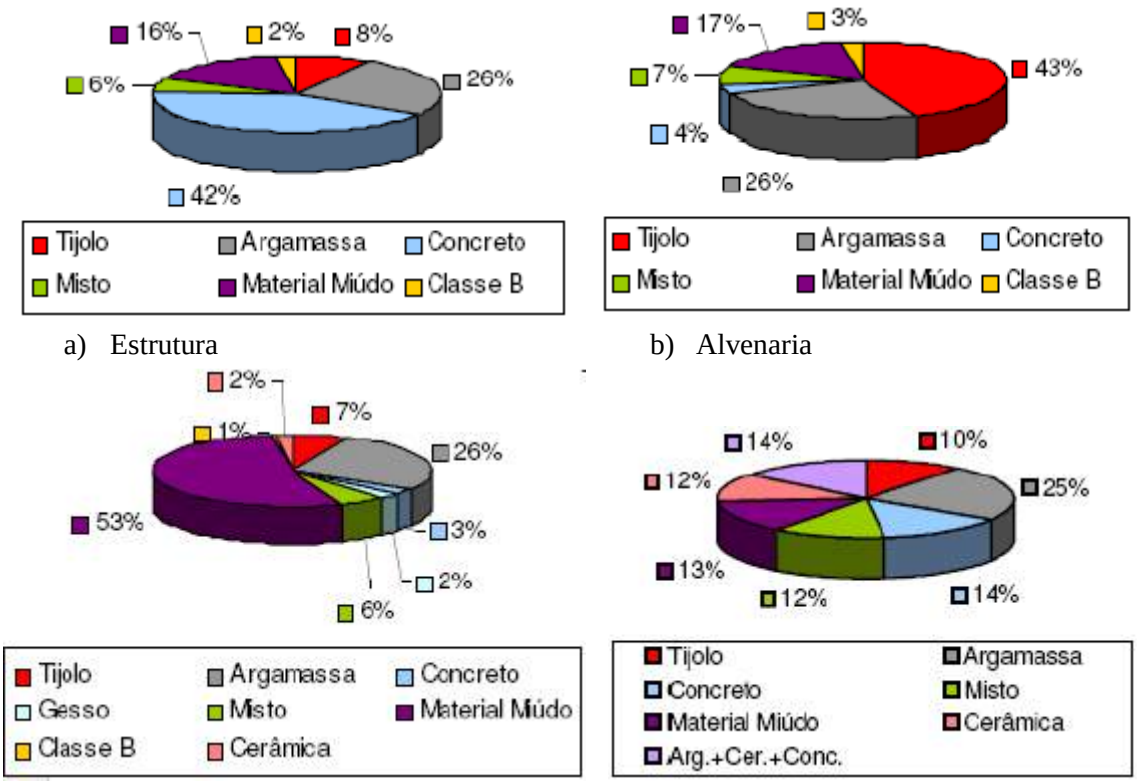
Tabela 2.2 - Composição do RCD de algumas cidades brasileiras.

| **Composição dos RCD** | **Recife**[1] | **São Carlos**[2] | **São Paulo**[2] | **Petrolina**[3] | **Passo Fundo**[4] | **Olinda**[5] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Concreto e argamassa | 43% | 69% | 33% | 19% | 44% | 46% |
| Solo e areia | 27% | n.i. | 32% | 14% | 10% | 32% |
| Cerâmica | 19% | 29% | 30% | 30% | 27% | 16% |
| Rochas | 9% | 1% | n.c. | n.c. | 14% | n.c. |
| Outros | 7% | 1% | 5% | 37% | 5% | 6% |

Fonte: [1]Carneiro (2005), [2]Carneiro *et* al. (2001) *apud* Oliveira e Mendes (2008), [3]Santos (2008), [4]Bernardes *et* al. (2008), [5]Falcão (2011).

Analisando as Tabela 2.1 e 2.2, nota-se uma considerável variabilidade dos constituintes de RCD entre os países e as cidades brasileiras, justificado pelos tipos de obras executadas em cada região. Observa-se que o percentual de concreto e argamassa gerados em Recife/PE (43%), Passo Fundo/RS (44%) e Olinda/PE (46%) são mais próximos entre si que das porcentagens de São Carlos/SP (69%) e de Petrolina/PE (19%).

A mudança nos tipos de materiais que compõem os RCD também ocorre dentro do próprio canteiro de obra. Araújo Junior (2010) fez o levantamento da composição gravimétrica nas fases de estrutura, alvenaria, acabamento e demolição em quatro obras da cidade do Recife/PE e notou que o material predominante ocorre em função dos tipos de serviços de cada etapa de construção (Figura 2.2).




a) Estrutura b) Alvenaria

c) Acabamento d) Demolição

Figura 2.2 – Composição gravimétrica nas quatro fases.
Fonte: Araújo Junior (2010).

Apesar da variabilidade dos constituintes dos RCD gerados no Brasil, verifica-se que a maior parte do material gerado é formada por parcelas potencialmente recicláveis, visto que há a predominância de materiais trituráveis como restos de alvenarias, argamassas, concretos, asfalto e solo, que podem corresponder a 80% da composição típica (PINTO *et.* al, 2012).

## 2.4 RECICLAGEM DE RCD

O uso de material reciclado, como tijolos britados ou telhas em cacos, e outras pedras trituradas, em uma mistura com cal, água e areia, na execução de construções era uma prática adotada pelo império romano entre 753 a.C. a 476 d.C (SANTOS, 1975 *apud* SANTOS, 2007).

Entretanto, foi durante a reconstrução das cidades europeias, após o final da Segunda Guerra Mundial, que ocorreu a maior demanda por Resíduos de Construção e

Demolição da história, uma vez que houve a necessidade de dar destino aos escombros e também quando houve grande procura por materiais de construção.

Como os resíduos são compostos por diferentes materiais, é indispensável que o processo seja capaz de realizar a segregação da fração reciclável, devendo passar por uma seleção rigorosa e serem estocados segundo qualidade e facilidade de tratamento (ANGULO, 2000).

Para potencializar o uso de RCD na própria atividade construtiva, é preciso realizar o processo de beneficiamento, o qual compreende normalmente etapas como: recepção do material e sua separação em resíduos de concreto e resíduos de alvenaria; retirada dos materiais não minerais e de gesso; homogeneização; separação da fração fina do resíduo; transporte do RCD bruto; trituração ou britagem do resíduo; retirada de contaminantes após a britagem; peneiramento; transporte e acondicionamento do agregado reciclado de RCD.

Para Angulo (2000), o tipo de equipamento utilizado na trituração do RCD também influencia na maior ou menor quantidade dos tipos de frações, podendo alterar potenciais aplicações. Por exemplo, uma elevada quantidade de agregados miúdos favorece a utilização de material reciclado em argamassas e blocos, enquanto a alta quantidade de agregados graúdos favorece o emprego em concretos. Já na pavimentação, existe um maior reaproveitamento de agregados, pois tanto a parte fina, quanto a parte grossa podem ser empregadas.

Angulo (2000) e Santos (2007) analisaram os tipos de britadores usados em reciclagem de RCD e suas respectivas características (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Características de britadores de RCD.

| Britador | Características |
|---|---|
| Impacto | Geração de grãos de formas cúbicas, com boa percentagem de finos e fornece agregados com boa granulometria para obras rodoviárias. |
| Mandíbula | Alta geração de material graúdo, com considerável percentagem de grãos lamelares, especialmente desenvolvido para britar rochas e materiais similares e produz bom agregado para concretos não estruturais. |
| Martelo | Produz alta percentagem de material miúdo, com granulometria muito fina. |
| Rolo | Reduz a diâmetros de 7,5 a 10 cm, podendo ser utilizado também como betoneira. |

Fonte: Adaptado de Angulo (2000) e Santos (2007).

Após a reciclagem, o resíduo pode ser classificado como agregado de resíduo de concreto (ARC), composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas ou pode ser classificado como agregado de resíduo misto (ARM), constituído por menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, conforme a NBR 15.116 (2004).

Os Resíduos de Construção e Demolição possuem grande possibilidade de utilização como material reciclado para alimentar o próprio setor construtivo, podendo ser usado em concreto sem função estrutural, camadas drenantes, pavimentação, estacas de compactação, entre outros.

No âmbito da aplicação em obras de pavimentação, escopo desta pesquisa, destaca-se que, segundo Motta (2005), pavimentações realizadas na cidade de São Paulo com agregado reciclado substituindo o material convencional, proporcionaram redução de 18% dos custos, tornando-se o principal atrativo no emprego destes em pavimentos. Estes materiais normalmente têm sido vendidos a preços inferiores aos dos granulares tradicionalmente empregados, visto que os custos da produção também são inferiores ao dos agregados naturais britados.

## 2.5 PAVIMENTAÇÃO

### 2.5.1 Definição, classificação e características dos pavimentos

A norma NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define o pavimento como:

> "uma estrutura construída após terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento".

Para Medina e Motta (2005), as características gerais de um pavimento são: faixa de terreno de cerca de 10 metros de largura, 50 centímetros de espessura, por vários quilômetros de extensão; investimento relativamente pequeno por metro quadrado; coeficientes de segurança baixos e indefinidos; o clima é fator preponderante; vida útil pequena (10 a 20 anos); a intemperização e a degradação das camadas superiores por ação do tráfego e do tempo afetam a integridade do pavimento, entre outros.

Os pavimentos são classificados em flexível, semirrígido e rígido. O primeiro é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. O segundo caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias. O último é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006).

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, cortes longitudinal e transversal, geralmente encontrados em pavimentos rígidos e flexíveis, conforme Bernucci *et* al. (2008).

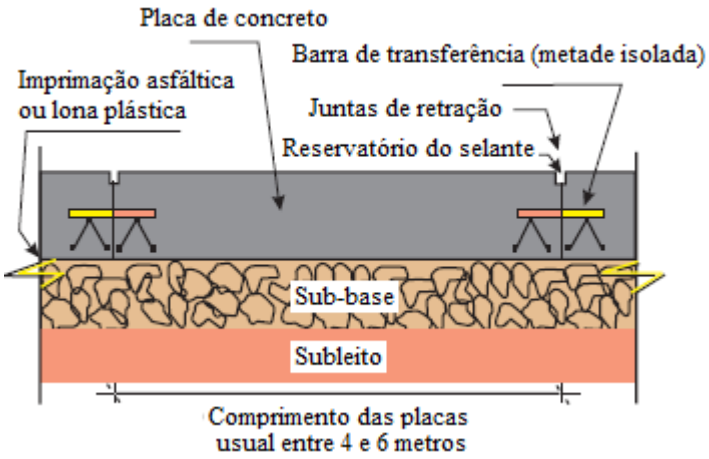



Figura 2.3 – Corte longitudinal típico de pavimento rígido.
Fonte: Bernucci *et* al. (2008).

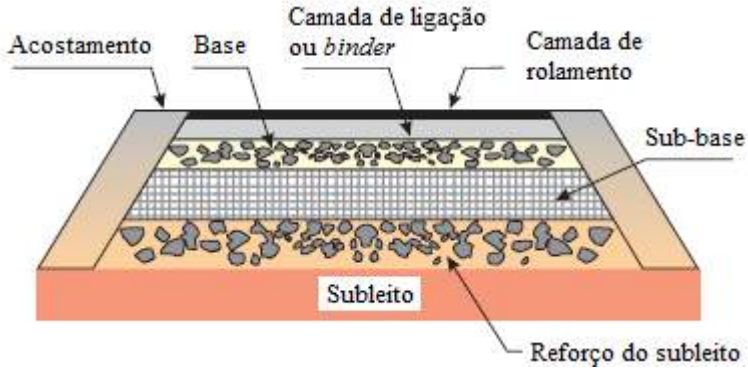



Figura 2.4 – Corte transversal típico de pavimento flexível.
Fonte: Bernucci *et* al. (2008).

Ainda segundo a NBR 7207/82, o pavimento se subdivide em camadas de acordo com as suas funções:

1) *Subleito* é o terreno de fundação do pavimento;
2) *Sub-base* é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
3) *Base* é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento;
4) *Revestimento* é a camada tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina econômica e simultaneamente a melhorar as condições do rolamento e resistir a esforços horizontais que nele atuam.

A Figura 2.5 ilustra o sistema de camadas de um pavimento flexível, com algumas tensões verticais solicitantes, como $\sigma_{v1}$ e $\sigma_{v3}$ no revestimento e sub-base, respectivamente, a tensão horizontal atuante entre a primeira e a segunda camada ($\sigma_{h1}$) e a tensão de contato ($\sigma_c$) com a superfície, de acordo com Bernucci *et* al. (2008).

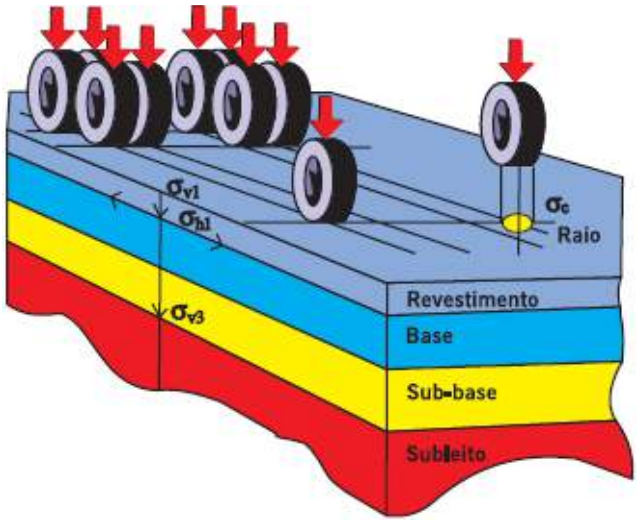



Figura 2.5 – Camadas de pavimento flexível.

Fonte: Adaptado de Bernucci *et* al. (2008).

Segundo o DNIT (2006), os materiais pétreos utilizados nas camadas de pavimentações são conhecidos normalmente por agregados. Os seus principais tipos e utilizações são como pedrisco em pavimentação asfáltica, brita graduada em base e sub-base, pedra marroada em base e areia artificial e areia natural em asfalto (DNPM, 2009).

O DNPM (2009) apresenta o consumo setorial de rocha britada e rocha bruta, agregados empregados na pavimentação brasileira no ano de 2007 (Figuras 2.6 e 2.7).

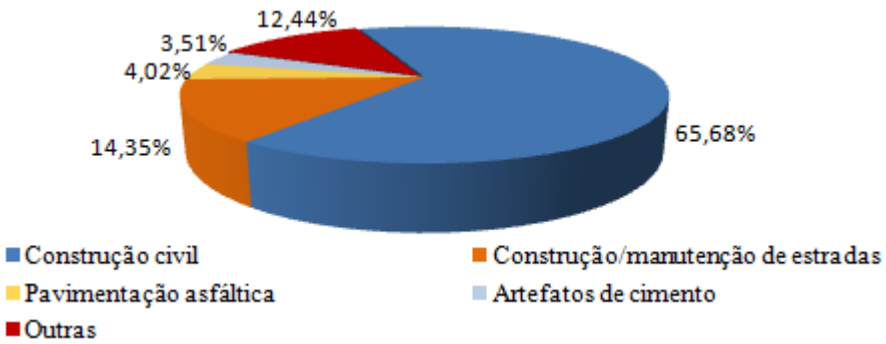



Figura 2.6 – Percentual de consumo setorial de rocha britada no ano de 2007.

Fonte: DNPM (2009).

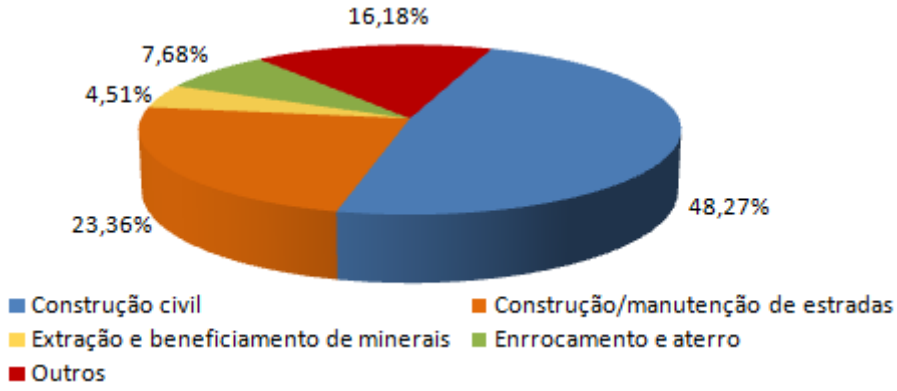



Figura 2.7– Percentual de consumo setorial de rocha bruta no ano de 2007.
Fonte: DNPM (2009).

Em 2007, segundo o DNPM (2009), a Construção Civil demandou 65,68% de rocha britada beneficiada, seguida pela construção/manutenção de estradas com 14,35% (Figura 2.6). Já com relação à rocha bruta, 48,27% deste material foi utilizado na Construção Civil e 23,36% na construção/manutenção de estradas (Figura 2.7), mostrando quais os principais setores que consomem agregados ou materiais pétreos.

A seguir são apresentados dois itens, o primeiro (2.5.2) com informações gerais de pesquisas envolvendo a aplicação de Resíduos de Construção e Demolição em camadas de pavimentação e o segundo (2.5.3) com os resultados encontrados nas mesmas, mostrando as principais propriedades do agregado reciclado de RCD.

### 2.5.2 Aplicação de agregado reciclado de RCD em pavimentação

Diante da significativa disponibilidade de RCD e da existência de tecnologia de reciclagem, a utilização do agregado reciclado de RCD em camadas de pavimentos tem-se mostrado viável. Assim, vários estudos vêm sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo, objetivando a comprovação do uso deste como um material adequado, de baixo custo e menos impactante ao meio ambiente.

No Brasil, algumas cidades como Belo Horizonte/MG, Salvador/BA, São Paulo/SP, Jundiaí/SP e Goiânia/GO estão mais avançadas no âmbito da reciclagem, determinada pela Resolução CONAMA nº307 de 2002, pois desenvolveram ações de gerenciamento

de entulhos, implantaram usinas de beneficiamento e apresentaram soluções para a reciclagem de RCD com aplicação em obras da Construção Civil (MELO, NÓBREGA e ASSIS, 2008).

De acordo com Motta (2005) e Moreira, Dias e Rezende (2007), as cidades de São Paulo/SP e Uberlândia/MG, respectivamente, elaboraram especificações que passaram a incluir nos seus editais de licitação, na modalidade concorrência, a opção de utilização de materiais reciclados de RCD em camadas de pavimentos em vias locais. Isto consolida um Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos, através do incentivo ao reaproveitamento de materiais e tratamento dos Resíduos de Construção e Demolição, para a execução de bases ou sub-bases de pavimentos urbanos.

A primeira via pavimentada empregando agregados reciclados de RCD em sua camada de reforço do subleito em São Paulo ocorreu em 1984. A execução da Rua Gervásio da Costa teve o acompanhamento tanto executivo como de desempenho pela PMSP e pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, apresentando um comportamento altamente satisfatório. O tipo de resíduo sólido utilizado constituiu-se basicamente de solos, pedaços de tijolos e telhas de barro cozido, blocos de concreto, argamassas, ladrilhos cerâmicos, concreto, madeira e plástico. Sua execução deu-se em duas camadas de 0,10 m, sendo seu espalhamento feito com trator de esteiras e compactação por meio de rolo vibratório (OLIVEIRA, 2007). Um esquema dos materiais usados está apresentado na Figura 2.8, segundo Motta (2005).

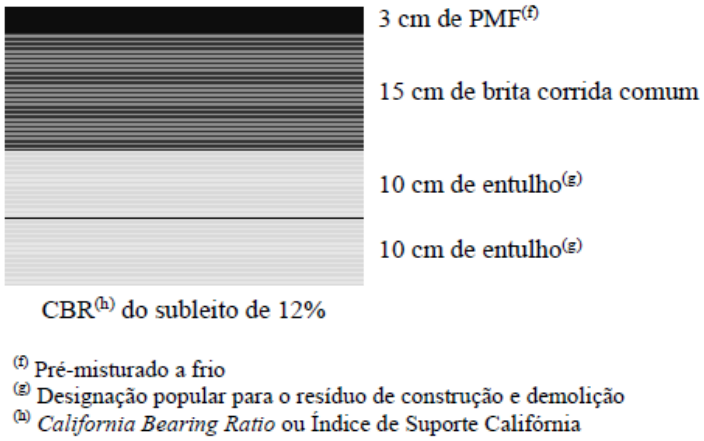



Figura 2.8 – Esquema do pavimento da Rua Gervásio da Costa.

Fonte: Motta (2005).

Em Belo Horizonte, desde 1996, os agregados reciclados de RCD são usados em camadas de base e sub-base. Como o dimensionamento da estrutura é baseado no Índice de Suporte Califórnia (ISC) e em experiência prática de engenheiros do município, não se pode afirmar se ocorreu ou não um superdimensionamento das camadas. Para Fernandes (2004), muitas vias urbanas foram construídas com agregados reciclados produzidos pela própria prefeitura e apresentam-se em condições de tráfego semelhantes aqueles trechos com agregados convencionais (Foto 2.1).

Foto 2.1 – Av. Mário Werneck, com trecho executado com agregado reciclado.
Fonte: Fernandes (2004).

Na cidade de Florianópolis, foi desenvolvido, por Trichês e Kryckyj (1999) *apud* Motta (2005), um estudo para o reaproveitamento de RCD em pavimentação. Analisou-se na ocasião o comportamento dos materiais provenientes de resíduos (entulho cinza e vermelho), de solos (areno-siltoso e argiloso) e da mistura solo-resíduo variando a percentagem da composição. Para os autores, os valores obtidos demonstraram uma excelente alternativa de uso do material em camadas de reforço do subleito e sub-base, visto que os RCD apresentaram expansão nula e contribuíam para o aumento da capacidade de suporte e a queda de expansão nas misturas com solo.

Em Goiânia, em 2004, construiu-se um trecho experimental de 50 m composto por uma mistura de solo argiloso e agregado reciclado nas camadas de base e sub-base (Tabela 2.4). A pista era solicitada por tráfego de caminhões considerável, visto que se tratava de um acesso à central de abastecimento de água da cidade, conforme Mendes *et* al. (2004). Neste estudo, o autor identificou que a base de entulho se mostrou viável de ser executada e que cuidados especiais devem ser adotados na execução de ensaios

pontuais, visto que os componentes do entulho podem interferir muito nos resultados e dificultar as análises.

Tabela 2.4 – Percentual dos materiais nas camadas de pavimento de um trecho em Goiânia.

| Camada | Agregado reciclado | Solo argiloso |
|---|---|---|
| Base | 75% | 25% |
| Sub-base | 83% | 17% |

Fonte: Mendes *et* al. (2004).

Fernandes (2004) coletou agregados reciclados de concreto e mistos em Belo Horizonte e no Rio de Janeiro e fez a caracterização mecanística em laboratório, comparando com materiais convencionalmente empregados. Na ocasião, ensaiou-se 10 amostras, variando a composição do agregado, a granulometria[3], a energia de compactação e a cidade onde foi feita a coleta.

De maneira geral, Fernandes (2004) concluiu que o uso dos agregados reciclados de RCD é viável tecnicamente, economicamente motivador, ambientalmente benéfico e, além disso, uma resposta à necessidade de crescimento sustentável não apenas de um município, mas de um país, caracterizando a adoção da filosofia da racionalidade.

Motta (2005) realizou um estudo com agregados reciclados mistos para aplicação de vias de baixo volume de tráfego em São Paulo. Na ocasião, analisou-se o comportamento de amostras de agregado reciclado puro (*in natura*), agregado reciclado com 4% de cal e agregado reciclado com 4% de cimento, e se concluiu que o RCD tem uso bastante promissor em vias de baixo volume de tráfego.

Leite (2007) fez um estudo de caso no pavimento do sistema viário da USP Leste, com quatro seções-tipo de pavimentos, três com base e sub-base de agregado reciclado e uma com base de brita graduada simples e sub-base de agregado reciclado (Figura 2.9). Os materiais reciclados eram da usina do município de São Paulo e da usina da cidade de Santo André/SP, analisados em laboratório e em campo.

[3] Em função da posição dentro da faixa D para base do DNER-ES 303/97 (superior, intermediária e inferior) ou bica corrida

Figura 2.9 - Quatro seções-tipo de pavimentos no sistema viário da USP Leste.
Fonte: Leite (2007).

De maneira geral, o agregado reciclado da usina de Santo André apresentou-se como material misto e quanto maior foi a presença de material cerâmico porosos (telhas e tijolos), maior foi a absorção de água, que interferiu diretamente na compactação (LEITE, 2007).

Ainda no ano de 2007, Oliveira (2007) analisou a utilização de agregado reciclado de RCD em pavimentos flexíveis no município de Goiânia em três etapas: realização de

ensaios de laboratório; participação na construção de uma pista experimental, com base e sub-base de agregados reciclados e solo argiloso; e monitoramento do desempenho da pista experimental em função da solicitação do tráfego, por meio de ensaios de campo. Para o cumprimento da primeira etapa, foram selecionadas duas amostras de RCD, uma constituída de resíduos de concreto e outra de resíduos cerâmico. Os ensaios foram feitos em cada tipo de agregado (misto e de concreto), na mistura de ambos e na adição de solo argiloso, onde as dosagens[4] estão presentes no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Composição das dosagens das amostras estudadas em um trecho em Goiânia.

| DOSAGENS | | PERCENTUAL DOS COMPONENTES NAS DOSAGENS | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ARM 19,1 | ARM 9,5 | ARM 4,8 | ARM TOTAL | ARC 19,1 | ARC 9,5 | ARC 4,8 | ARC TOTAL | ARM TOTAL | SOLO ARGILOSO |
| 01 | ARM | 33,3 | 33,3 | 33,4 | 100,0 | - | - | - | - | 100,0 | - |
| 02 | ARC | - | - | - | - | 27,5 | 27,5 | 45,0 | 100,0 | 100,0 | - |
| 03 | ARM 50/50 | 22,9 | 22,9 | 27,5 | 73,3 | 7,4 | 7,4 | 11,9 | 26,7 | 100,0 | - |
| 04 | ARM 25/75 | 10,7 | 10,7 | 15,3 | 36,7 | 19,6 | 19,6 | 24,1 | 63,3 | 100,0 | - |
| 05 | ARM 20% AS | 30,0 | 40,0 | 10,0 | 80,0 | - | - | - | - | 80,0 | 20,0 |
| 06 | ARMC 20% AS | - | - | - | - | 30,0 | 35,0 | 15,0 | 80,0 | 80,0 | 20,0 |
| 07 | ARM 50/50 10% SA | 22,0 | 22,0 | 22,0 | 66,0 | 10,0 | 7,0 | 7,0 | 24,0 | 90,0 | 10,0 |
| 08 | ARM 50/50 20% SA | 28,0 | 20,6 | 10,0 | 58,6 | 7,0 | 9,4 | 5,0 | 21,4 | 80,0 | 20,0 |
| 09 | ARM 50/50 30% SA | 26,0 | 25,3 | 0,0 | 51,3 | 9,7 | 9,0 | 0,0 | 18,7 | 70,0 | 30,0 |
| 10 | ARM 50/50 40% SA | 22,0 | 22,0 | 0,0 | 44,0 | 8,0 | 8,0 | 0,0 | 16,0 | 60,0 | 40,0 |
| 11 | ARM 25/75 10% SA | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 33,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 57,0 | 90,0 | 10,0 |
| 12 | ARM 25/75 20% SA | 12,2 | 12,2 | 4,9 | 29,3 | 21,1 | 21,1 | 8,5 | 50,7 | 80,0 | 20,0 |
| 13 | ARM 25/75 30% SA | 22,2 | 22,2 | 0,0 | 44,4 | 12,8 | 12,8 | 0,0 | 25,6 | 70,0 | 30,0 |
| 14 | ARM 25/75 40% SA | 11,0 | 11,0 | 0,0 | 22,0 | 19,0 | 19,0 | 0,0 | 38,0 | 60,0 | 40,0 |
| 15 | ARM 25/75 20% SA Finos | - | - | 29,3 | 29,3 | - | - | 50,7 | 50,7 | 80,0 | 20,0 |
| 16 | ARM 25/75 20% SA FX A | 20,7 | 8,7 | - | 29,4 | 15,3 | 35,3 | - | 50,6 | 80,0 | 20,0 |
| 17 | ARM 50/50 PM | 22,9 | 22,9 | 27,5 | 73,3 | 7,4 | 7,4 | 11,9 | 26,7 | 100,0 | - |

Fonte: Oliveira (2007).

De acordo com Oliveira (2007), durante o monitoramento da pista experimental, na fase de construção e ao longo da ação após três anos de tráfego, os resultados dos ensaios atestaram as boas condições estruturais do pavimento e a viabilidade técnica da aplicação de agregados reciclados de RCD em pavimentos flexíveis.

[4] A identificação das amostras analisadas foi realizada da seguinte forma: ARM e ARC são os agregados reciclados mistos e de concreto, respectivamente; os valores 50/50 ou 25/75 são as dosagens de ARM e ARC nas misturas, nesta ordem; as informações com 10%, 20%, 30% e 40% estão relacionadas às dosagens do solo argiloso (SA); os finos referem-se a grão passantes na peneira 4,8mm; FX A é a faixa A determinada pelo DNIT; e PM é a energia Proctor Modificada utilizada na compactação.

Kumar e Reddy (2008) verificaram misturas entre agregado natural e agregado reciclado (Tabela 2.5), a fim de empregá-los em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis da Índia. Os autores recomendaram que os agregados reciclados não apresentassem grande porcentagem de argamassa, para não prejudicar a capacidade de suporte do pavimento.

Tabela 2.5 – Misturas analisadas para uso em camadas de pavimentos da Índia.

| Identificação | Agregado reciclado (RA) | Agregado natural (NA) |
|---|---|---|
| RA:NA (90:10) | 90% | 10% |
| RA:NA (80:20) | 80% | 20% |
| RA:NA (70:30) | 70% | 30% |
| RA:NA (60:40) | 60% | 40% |

Fonte: Kumar e Reddy (2008).

Silva, Silva e Barroso (2008) coletaram em Fortaleza dois tipos de agregados reciclados (graúdo e miúdo) e um tipo de solo, os quais foram avaliados separadamente e em uma mistura proposta na seguinte dosagem: 50% de agregado graúdo, 40% de agregado miúdo e 10% de solo, que era a principal amostra a ser investigada. Após a análise laboratorial, concluiu que o solo puro não atingia resultados satisfatórios para pavimentos, contudo ao ser misturado com o agregado reciclado, o material mostrou desempenho satisfatório.

Hortegal, Ferreira e Sant'ana (2009) pesquisaram a história da coleta e da disposição dos RCD de São Luís/MA. Além disso, verificaram, por meio de análises laboratoriais, a composição dos resíduos e algumas propriedades mecânicas de três misturas de agregado reciclado de RCD com solo para aplicação em camadas de pavimentação (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Composição das misturas obtidas em São Luís.

| Amostra | Mistura 1 | Mistura 2 | Mistura 3 |
|---|---|---|---|
| Solo | 70% | 50% | 30% |
| Agregado reciclado | 30% | 50% | 70% |

Fonte: Hortegal, Ferreira e Sant'ana (2009).

Nesta ocasião, foi identificado que a mistura solo-RCD analisada é de uso promissor na pavimentação, dadas suas propriedades físicas e mecânicas aceitáveis de acordo com as normas consultadas (HORTEGAL, FERREIRA E SANT'ANA, 2009).

Em João Pessoa, Nóbrega e Melo (2009) investigaram a viabilidade técnica do agregado reciclado coletado na usina de reciclagem do município, por meio de ensaios físicos e mecânicos como análise granulométrica, abrasão “Los Angeles”, índice de forma, compactação e ISC. O agregado reciclado apresentou boas condições técnicas para aplicação em camada de sub-base de pavimentos urbanos, visto que atendeu os requisitos exigidos. Entretanto, alguns itens da norma só foram atendidos após a adoção de soluções simples que estão apresentadas no subitem 2.5.3.2 da presente dissertação.

Redivo (2011) analisou o comportamento de misturas entre solo e resíduos de cerâmica vermelha, visando seu emprego em camadas de pavimentos para baixo volume de tráfego em Santa Catarina. O autor utilizou três tipos de solos e misturas solo-agregado com diferentes dosagens (Quadro 2.2), os quais foram submetidos aos ensaios de granulometria, compactação, ISC e módulo de resiliência. A partir dos resultados obtidos, o autor concluiu que os resíduos de cerâmica vermelha podem ser utilizados em misturas com solo, na construção de camadas de pavimentos para baixo volume de tráfego.

Quadro 2.2 – Composições da mistura de solo e material cerâmico e nomenclatura[5].

| Jazida de solo | Composição da mistura | | Nomenclatura da mistura | |
|---|---|---|---|---|
| | Solo | Material cerâmico | Tijolo | Telha |
| Gravatal (constituído principalmente por areia) | 70 | 30 | GTI73 | GTE73 |
| | 50 | 50 | GTI55 | GTE55 |
| | 30 | 70 | GTI37 | GTE37 |
| Tubarão (constituído principalmente por areia) | 70 | 30 | TTI73 | TTE73 |
| | 50 | 50 | TTI55 | TTE55 |
| | 30 | 70 | TTI37 | TTE37 |
| Criciúma (constituído principalmente por silte) | 70 | 30 | CTI73 | CTE73 |
| | 50 | 50 | CTI55 | CTE55 |
| | 30 | 70 | CTI37 | CTE37 |

Fonte: Redivo (2011).

Jiménez *et* al. (2011) avaliaram a aplicação do agregado reciclado de RCD gerado em Córdoba, Espanha, com a finalidade de uso como materiais granulares em camadas de

[5] A identificação das amostras foi feita da seguinte forma: a primeira letra se refere ao local de coleta do solo, a segunda e terceira aos tipo de material que dá origem ao agregado reciclado e os dois últimos números dizem respeito ao percentual de cada material na dosagem. Assim GTI73, por exemplo, é a amostra com solo proveniente de Gravatal, o agregado é originado de tijolo e a dosagem é 70% de solo e 30% de material cerâmico.

sub-base. Os autores fizeram a verificação das características físicas e mecânicas de uma amostra de agregado natural (NA) e de sete amostras recicladas, das quais três eram provenientes de concreto (RCA-1 a RCA-3) e quatro eram de material misto (MD-1 a MD-4), coletados em três recicladoras diferentes do município. Para os autores, resultados técnicos aceitáveis destes materiais podem aumentar as oportunidades de vendas e consequentemente a taxa de reciclagem na Espanha, prolongando a vida útil dos aterros sanitários e reduzindo a exploração de recursos naturais em pedreiras.

Proença (2012) investigou, em laboratório, as propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de RCD coletados em uma usina de reciclagem de Recife/PE, identificando a possibilidade de empregá-los em camadas de base e sub-base de pavimentação de baixo volume de tráfego.

De maneira geral, os autores que investigam o uso de RCD em pavimentação concluem que a aplicação depende de um controle rigoroso no beneficiamento, execução dos serviços de pavimentação e, principalmente, deve ser realizada uma fiscalização para evitar o tráfego de veículos com pesos acima do limite.

### 2.5.3 Principais propriedades do agregado reciclado de RCD

Segundo DNIT (2006), as propriedades dos agregados a serem levadas em consideração nos serviços de pavimentação são granulometria, forma, resistência ao choque e ao desgaste, limpeza, densidade real e aparente do grão, Índice de Suporte Califórnia (ISC), entre outras.

De maneira geral, os materiais de pavimentação compactados devem ser resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI *et.* al, 2008).

#### *2.5.3.1 Composição granulométrica*

Neste subitem serão apresentados alguns estudos sobre a composição granulométrica de resíduos avaliados para aplicação em obras de pavimentação.

Fernandes (2004) determinou a composição granulométrica de agregados reciclados de usinas de reciclagem, ensaiando duas bicas corridas e materiais equivalentes às britas 1 e 0, ao pedrisco e ao pó-de-pedra (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Composição granulométrica dos agregados investigados no Rio de Janeiro.

| **Peneiras** | | **Passante (%)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **#** | **mm** | **Brita 1** | **Brita 0** | **Pedrisco** | **Pó-de-pedra** | **Bica corrida (concreto)** | **Bica corrida (mista)** |
| 1 1/2" | 38 | 100 | 100 | 100 | 100 | 92,25 | 92,72 |
| 1" | 25,0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 75,81 | 78,05 |
| 3/8" | 9,5 | 2,97 | 90,34 | 100 | 100 | 52,58 | 52,9 |
| nº 4 | 4,8 | 0,65 | 13,1 | 99,8 | 99,9 | 40,71 | 43,15 |
| nº 10 | 2,0 | 0,59 | 2,96 | 76,9 | 95,4 | 30,31 | 35,39 |
| nº 40 | 0,4 | 0,42 | 1,52 | 39,7 | 68,2 | 11,14 | 17,55 |
| nº 200 | 0,1 | 0,16 | 0,18 | 15 | 22,8 | 0,24 | 0,57 |

Fonte: Adaptado de Fernandes (2004).

A análise granulométrica realizada por Motta (2005) em uma única amostra tornou possível verificar que durante a operação de agitação das peneiras culminava no fracionamento dos grãos durante a execução do peneiramento, tornando difícil enquadrar o material em uma faixa granulométrica normalizada (Figura 2.10).

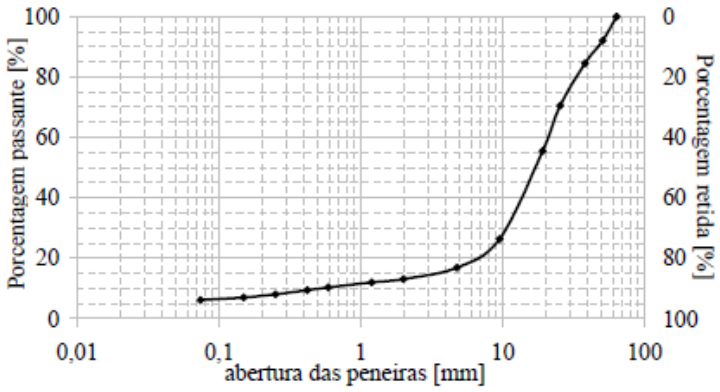



Figura 2.10 – Distribuição granulométrica de agregado reciclado estudado por Motta (2005).

Fonte: Motta (2005).

Diante da Figura 2.10, pode-se obter o coeficiente de uniformidade (42) e a porcentagem de material passante na peneira 0,42mm (10%), o que significa que o material satisfaz as especificações da NBR 15.116 (2004) de 10 a 60 e de 10 a 40%, respectivamente, para agregado reciclado de RCD.

A análise granulométrica (peneiramento), realizada por Leite (2007), foi feita em uma amostra aleatória coletada na usina de reciclagem de Santo André/SP. A Figura 2.11 mostra que o material se encontrou na Faixa B do DNIT (2006) e, por meio da verificação do coeficiente de uniformidade (53) e da porcentagem que passa na peneira 0,42mm (21,2%), que o agregado atendia aos requisitos da NBR 15.116 (2004).

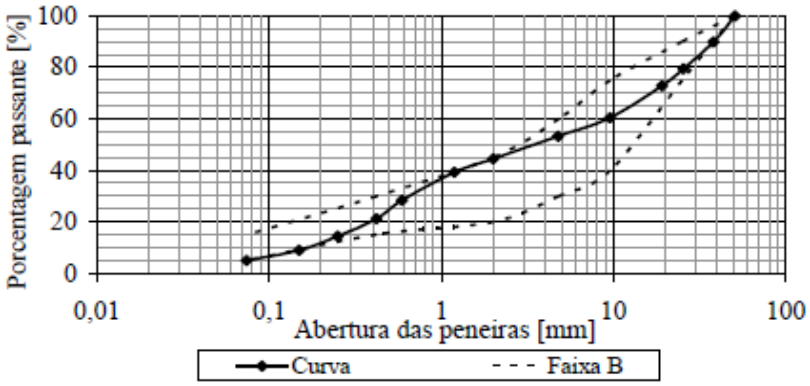



Figura 2.11 – Granulometria do agregado da usina de Santo André/SP.
Fonte: Adaptado de Leite (2007).

Leite (2007) também realizou verificações de granulometria após a compactação nas energias intermediária e modificada, em que os valores de CNU mudaram para 43 e 74 e os percentuais passantes na peneira 0,42 mm foram 25% e 28%, respectivamente.

As granulometrias das dosagens de Oliveira (2007), expostas no Quadro 2.3, se enquadraram na faixa C (média) da ES 303/97 do DNER, com exceção das amostras nº 15 e 16, as quais ficaram dentro das faixas F (fina) e A (grossa), respectivamente. Os valores de coeficiente de não uniformidade (CNU) e de curvatura ($C_C$) foram iguais a 100 e 2, respectivamente, correspondendo a uma distribuição granulométrica bem graduada para as amostras da Faixa C.

Quadro 2.3 - Granulometria dos agregados reciclados investigados - % passante.

| | ABERTURAS DAS PENEIRAS (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AMOSTRAS** | **25,4** | **9,5** | **4,8** | **2** | **0,42** | **0,075** |
| **1** | 100 | 77,6 | 50,6 | 36,7 | 24,5 | 7,4 |
| **2** | 100 | 80,9 | 59,2 | 39,8 | 18,1 | 5,8 |
| **3** | 100 | 77,6 | 52,5 | 39,8 | 24,8 | 6,7 |
| **4** | 100 | 79,5 | 52,5 | 38,1 | 21,1 | 5,8 |
| **5** | 100 | 81,1 | 51,8 | 39,6 | 33,6 | 19,8 |
| **6** | 100 | 76,4 | 47,6 | 33,4 | 26 | 16,1 |
| **7** | 100 | 78,7 | 52,6 | 39,7 | 29,7 | 13,2 |
| **8** | 100 | 74,9 | 51,2 | 40,6 | 32,9 | 19 |
| **9** | 100 | 74,1 | 47,2 | 36,9 | 33,1 | 22,2 |
| **10** | 100 | 79,5 | 54,3 | 45,6 | 41,9 | 28,3 |
| **11** | 100 | 80,8 | 52,8 | 39,6 | 27,7 | 13,2 |
| **12** | 100 | 77,1 | 47,6 | 34,9 | 27,9 | 16,7 |
| **13** | 100 | 77,1 | 47,6 | 34,9 | 27,9 | 16,7 |
| **14** | 100 | 81 | 54,3 | 45,3 | 41,5 | 27,9 |
| **15** | - | - | 100 | 86,5 | 53,3 | 16,9 |
| **16** | 100 | 77,6 | 42,4 | 29 | 24,4 | 11,4 |
| **17** | 100 | 77,6 | 52,5 | 39,8 | 24,8 | 6,7 |

Fonte: Oliveira (2007).

Silva, Silva e Barroso (2008) apresentaram os resultados da granulometria dos RCD e do solo, conforme a Figura 2.12. Destaca-se que a mistura proposta pelos autores citados foi feita em uma proporção que permitisse o enquadramento na faixa C do DNER e uma distribuição aproximadamente contínua.

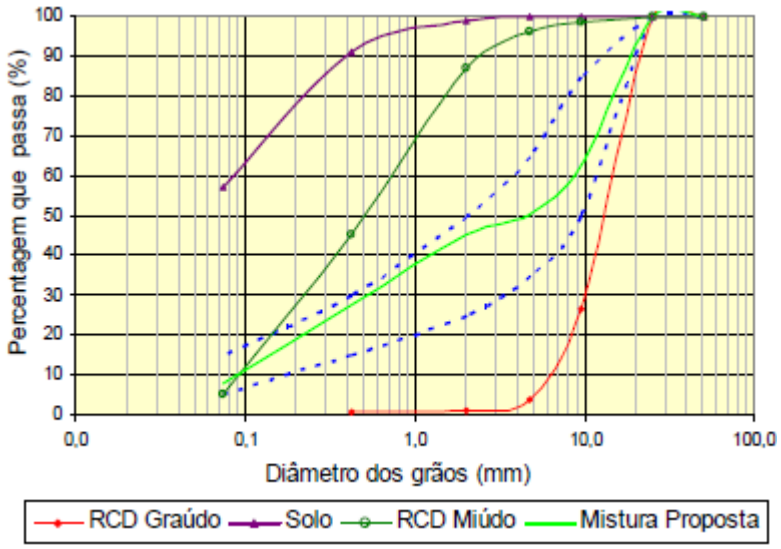



Figura 2.12 – Granulometria nos materiais estudados e na mistura proposta pelos autores.
Fonte: Silva, Silva e Barroso (2008).

A partir da Figura 2.12, os autores encontraram para a mistura proposta um coeficiente de uniformidade de 95 e percentual passante na peneira 0,42 mm de 27%, ambos atendendo a NBR 15.116 (2004).

Nóbrega e Melo (2009) verificaram a granulometria e as características definidas pela NBR 15.116 (2004) de cinco amostras obtidas de uma usina de reciclagem. Nesta ocasião, também foram feitas análises estatísticas dos dados obtidos (Tabela 2.9).

Avaliando a Tabela 2.8, o valor máximo passante na peneira de 0,42 mm foi de 42,9%, obtido através da análise estatística, não atendendo ao prescrito pela NBR 15.116 (2004), entretanto o valor mínimo de 36,2% está bem acima do limite mínimo estabelecido. A dimensão máxima característica das amostras foi de 19,1 mm, sendo o valor encontrado inferior aos 63,5 mm exigidos. Já os valores de coeficiente de uniformidade (entre 11,83 e 20,22) permaneceram dentro dos limites da NBR 15.116 (2004).

Tabela 2.8 – Percentual passante do RCD em cada peneira - João Pessoa.

| **Peneiras** | **Amostras** | | | | | **X** | **s** | **$X_{mín}$** | **$X_{máx}$** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **(mm)** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | | | | |
| 38,1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 100 | 100 |
| 25,4 | 100 | 100 | 98,9 | 100 | 100 | 99,8 | 0,9 | 99,1 | 100 |
| 19,1 | 96,3 | 94,5 | 97,6 | 95,9 | 98,2 | 96,5 | 2,9 | 94,3 | 98,7 |
| 9,5 | 85,8 | 79,7 | 84,4 | 84,8 | 85,7 | 84,1 | 5,0 | 80,2 | 87,9 |
| 4,8 | 74,0 | 68,3 | 72,0 | 73,7 | 74,1 | 72,4 | 4,9 | 68,7 | 76,2 |
| 2,0 | 63,1 | 59,5 | 62,8 | 61,4 | 60,1 | 61,4 | 3,2 | 58,9 | 63,9 |
| 1,2 | 58,5 | 53,1 | 55,0 | 57,0 | 55,3 | 55,8 | 4,1 | 52,6 | 59,0 |
| 0,6 | 51,0 | 45,5 | 47,4 | 50,7 | 48,5 | 48,6 | 4,6 | 45,0 | 52,2 |
| 0,42 | 40,4 | 36,8 | 38,2 | 42,4 | 39,7 | 39,5 | 4,3 | 36,2 | 42,9 |
| 0,30 | 27,2 | 25,0 | 27,9 | 27,9 | 26,9 | 27,0 | 2,4 | 25,1 | 28,8 |
| 0,15 | 12,5 | 12,0 | 13,7 | 13,7 | 12,8 | 12,9 | 1,5 | 11,8 | 14,1 |
| 0,074 | 6,8 | 7,3 | 8,3 | 7,1 | 7,3 | 7,4 | 1,1 | 6,5 | 8,2 |

Fonte: Nóbrega e Melo (2009).

Redivo (2011) analisou a granulometria de misturas de solo-agregado, conforme apresenta o Quadro 2.4. De modo geral, verificou-se que a granulometria de todas as amostras investigadas variou com a quantidade de material cerâmico presente na mistura e que os materiais constituídos por cacos de telhas apresentaram maior percentual de material retido nas peneiras quando comparadas às misturas compostas por cacos de tijolos. Segundo o autor, todas as amostras de Gravatal ficaram dentro da

Faixa A do DNER, diferentemente do que ocorreu com as amostras de Tubarão e Criciúma.

Quadro 2.4 – Distribuição granulométrica das misturas de solo-agregado.

| Peneira (mm) | | | 38,1 | 25,4 | 19,0 | 9,5 | 4,8 | 2,0 | 1,2 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Passante | Gravatal | GTI73 | 100 | 98,6 | 93,0 | 73,1 | 51,7 | 31,0 | 26,2 | 19,7 | 16,6 | 14,8 | 11,8 | 9,5 |
| | | GTI55 | 100 | 97,7 | 89,1 | 65,4 | 46,4 | 27,8 | 23,3 | 17,8 | 15,3 | 13,8 | 11,2 | 8,9 |
| | | GTI37 | 100 | 96,8 | 85,1 | 57,6 | 41,2 | 24,6 | 20,5 | 15,9 | 13,9 | 12,8 | 10,6 | 8,3 |
| | | GTE73 | 100 | 94,2 | 89,4 | 69,1 | 48,4 | 29,5 | 24,9 | 18,6 | 15,7 | 13,9 | 10,8 | 8,6 |
| | | GTE55 | 100 | 88,8 | 81,8 | 58,4 | 40,7 | 25,1 | 21,1 | 15,9 | 13,7 | 12,2 | 9,5 | 7,5 |
| | | GTE37 | 100 | 83,4 | 74,6 | 48,4 | 33,6 | 20,9 | 17,6 | 13,5 | 11,8 | 10,6 | 8,3 | 6,5 |
| | Tubarão | TTI73 | 100 | 98,6 | 93,8 | 83,8 | 78,7 | 66,1 | 60,6 | 54,0 | 51,9 | 49,0 | 42,6 | 35,5 |
| | | TTI55 | 100 | 97,7 | 89,6 | 73,0 | 65,7 | 52,9 | 47,9 | 42,3 | 40,6 | 38,3 | 33,0 | 27,5 |
| | | TTI37 | 100 | 96,8 | 85,5 | 62,2 | 52,7 | 39,6 | 35,3 | 30,6 | 29,1 | 27,5 | 23,8 | 19,5 |
| | | TTE73 | 100 | 99,1 | 94,9 | 73,4 | 66,3 | 56,2 | 51,6 | 45,9 | 44,1 | 41,5 | 35,9 | 29,9 |
| | | TTE55 | 100 | 91,7 | 85,1 | 67,4 | 58,1 | 47,6 | 43,3 | 38,1 | 36,5 | 34,2 | 29,4 | 24,3 |
| | | TTE37 | 100 | 90,2 | 81,0 | 58,4 | 48,5 | 37,7 | 33,7 | 29,0 | 27,6 | 25,8 | 21,9 | 17,9 |
| | Criciúma | CTI73 | 100 | 98,6 | 95,7 | 92,2 | 89,9 | 86,3 | 84,0 | 79,6 | 76,4 | 71,9 | 62,8 | 52,9 |
| | | CTI55 | 100 | 97,7 | 94,1 | 84,7 | 79,6 | 74,1 | 68,2 | 61,6 | 57,5 | 52,4 | 46,4 | 41,9 |
| | | CTI37 | 100 | 92,9 | 85,5 | 74,7 | 66,9 | 53,9 | 48,7 | 41,1 | 37,7 | 34,5 | 30,2 | 25,3 |
| | | CTE73 | 100 | 93,2 | 90,9 | 86,3 | 83,8 | 81,1 | 79,1 | 75,4 | 72,5 | 67,4 | 58,7 | 49,4 |
| | | CTE55 | 100 | 88,8 | 86,4 | 75,7 | 70,3 | 64,0 | 61,5 | 55,4 | 51,7 | 46,9 | 41,2 | 37,3 |
| | | CTE37 | 100 | 81,0 | 75,8 | 63,5 | 55,8 | 46,4 | 42,1 | 35,3 | 32,4 | 29,3 | 25,3 | 22,4 |

Fonte: Adaptado de Redivo (2011).

Segundo Jiménez *et* al. (2011), a distribuição granulométrica das sete amostras de RCD estudadas está dentro das especificações de granulometria da Espanha, ZA25 e ZA20 presente na UNE-EM 933-1, mostrada no Quadro 2.5, as quais permitem o uso destes materiais em pavimentação.

Quadro 2.5 – Granulometria dos agregados de RCD ensaiados em Córdoba, na Espanha.

| Identificação | Abertura das peneiras em mm | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 | 25 | 20 | 8 | 4 | 2 | 0,5 | 0,25 | 0,063 |
| | Percentual passante (%) | | | | | | | | |
| ZA25 | 100 | 75-100 | 65-90 | 40-63 | 26-45 | 15-32 | 7-21 | 4-16 | 0-9 |
| ZA20 | - | 100 | 75-100 | 45-73 | 31-54 | 20-40 | 9-24 | 5-18 | 0-9 |
| NA | 100 | 96,3 | 91,3 | 65,3 | 47,3 | 35,3 | 17,7 | 12,3 | 7,3 |
| RCA-1 | 100 | 92,3 | 85,7 | 56,0 | 39,7 | 30,0 | 15,6 | 10,7 | 5,4 |
| RCA-2 | 100 | 88,0 | 80,1 | 52,0 | 35,9 | 26,1 | 12,0 | 8,0 | 4,1 |
| RCA-3 | 100 | 75,2 | 67,1 | 46,8 | 31,3 | 23,7 | 14,7 | 11,5 | 7,7 |
| MD-1 | 100 | 84,4 | 74,1 | 46,1 | 34,6 | 28,8 | 19,9 | 16,7 | 9,5 |
| MD-2 | 100 | 86,0 | 76,9 | 45,0 | 31,3 | 24,0 | 12,6 | 8,7 | 4,1 |
| MD-3 | 100 | 86,2 | 77,0 | 47,2 | 34,2 | 27,4 | 17,4 | 13,3 | 7,6 |
| MD-4 | 100 | 94,0 | 92,0 | 66,8 | 49,1 | 40,0 | 25,0 | 18,9 | 3,1 |

Fonte: Adaptado de Jiménez (2011).

As cinco granulometrias encontradas por Proença (2012) apresentaram quantidade maior de material correspondente à fração de pedregulho, com exceção da amostra 5, a qual mostrou maior quantidade de material miúdo, conforme a Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Distribuição das frações (%) da curva granulométrica original das amostras de RCD em Recife.

| Fração granulométrica | Diâmetro equivalente (mm) | Percentual das frações por constituintes Amostras 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pedregulho | 63,5 < Φ < 4,76 | 93,82 | 52,80 | 50,92 | 66,08 | 31,58 |
| Areia grossa | 2,00 < Φ < 1,19 | 2,37 | 13,90 | 16,35 | 10,22 | 18,46 |
| Areia média | 0,59 < Φ < ,030 | 2,28 | 12,90 | 13,56 | 6,96 | 16,57 |
| Areia fina | 0,018 < Φ < 0,075 | 1,08 | 7,72 | 8,31 | 6,11 | 12,96 |
| Silte | 0,053 < Φ < 0,026 | 0,19 | 5,58 | 5,75 | 5,35 | 9,19 |
| Argila | 0,019 < Φ < 0,001 | 0,25 | 7,11 | 4,82 | 5,42 | 10,87 |

Fonte: Proença (2012).

Proença (2012) verificou também o percentual de material passante na peneira 0,42 mm e encontrou que apenas as amostras 1 e 4 não obtiveram resultados que atendessem o requisito da NBR 15.116/04 (entre 10 e 40%), sendo 4,7 e 5,1%, respectivamente.

*2.5.3.2 Forma do material*

A NBR 15.116/04 determina que para a análise da forma do agregado reciclado graúdo seja adotado o método da NBR 7809/83, a qual define como 3,0 o valor máximo para o índice de forma de partículas com dimensão máxima superior a 9,5 mm.

Apesar da norma brasileira de agregado reciclado referenciar apenas a NBR 7809/83[6], de acordo com Motta (2005), em pavimentação procura-se não utilizar agregados de formas lamelares, definido pela NBR 6954/89, uma vez que estes tendem a se fracionar facilmente, podendo interferir no arranjo da estrutura da camada, sendo a forma cúbica a mais indicada. Além destas duas maneiras de classificar a forma do agregado, existe também a classificação segundo o DNER - ME 086/94, a qual coloca como limite mínimo o valor de 0,50 para o índice de forma.

[6] Revisada em 2008, ou seja, a norma em vigor NBR 7809/08.

Portanto, alguns autores seguem a norma própria para agregados reciclados (NBR 15.116/04), enquanto outros estudiosos investigam as partículas recicladas de RCD a partir da NBR 6954/89 ou DNER (1994), as quais são específicas para agregados naturais utilizados em pavimentações (Tabela 2.10).

Tabela 2.10 – Compilação dos resultados de índice de forma quanto à NBR 7809/08, NBR 6954/89 e ME 086/94 do DNER.

| Autor | Forma | Norma |
|---|---|---|
| Fernandes (2004) | 2,7 a 2,9 | NBR 7809/08 |
| Motta (2005) | Cúbica | NBR 6954/89 |
| Leite (2007) | Cúbica | NBR 6954/89 |
| Oliveira (2007) | 0,69 a 0,86 | ME 086/94 - DNER |
| Silva, Silva e Barroso (2008) | Lamelar | NBR 6954/89 |
| Nóbrega e Melo (2009) | 2,32 e 3,32 | NBR 7809/08 |
| Proença (2012) | Lamelar e cúbica | NBR 6954/89 |

Para Fernandes (2004), “a cubicidade dos agregados reciclados, principalmente aqueles de tipo misto, decorre em parte da sua suscetibilidade ao desgaste superficial das partículas”.

Leite (2007) analisou também as amostras após a compactação com as energias intermediária e modificada e concluiu que o material passou a ter um leve aumento de partículas com formas cúbicas – normalmente de natureza cimentícia ou rochosa – do mesmo modo que diminuiu a presença de grãos lamelares e alongados.

Segundo Nóbrega e Melo (2009), o índice de forma encontrado estava acima do máximo estabelecido pela NBR 15.116/04, porém após a compactação, notou-se uma redução do índice para 2,32, adequando-se aos requisitos da norma aludida.

*2.5.3.3 Abrasão “Los Angeles”*

A resistência ao choque e ao desgaste está associada à ação do tráfego ou aos movimentos recíprocos das diversas partículas, sendo avaliada pelo ensaio de abrasão Los Angeles e, embora não esteja indicado um critério sobre este parâmetro na norma

brasileira para agregados reciclados, é importante conhecer a granulometria dos agregados a serem estudados (FERNANDES, 2004).

Conforme mencionado, a norma brasileira NBR 15.116/04 não faz nenhuma menção ao ensaio de abrasão Los Angeles, entretanto, a NBR 11.804/91 apresenta como requisito um desgaste inferior a 55%, para bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente. Destaca-se que o ensaio também pode ser realizado de acordo com a norma DNER-ME 035/98 ou ainda segundo a especificação de serviço DNER ES 303/97.

Para facilitar a comparação entre os dados obtidos por alguns autores investigados, os resultados de desgaste de amostras com agregado reciclado de RCD são apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Resultados de desgaste.

| **Autor** | **Graduação** | **Abrasão Los Angeles (%)** | **Norma** |
|---|---|---|---|
| Fernandes (2004) | A, B e C | 52 a 66 | NBR 11804/91 |
| Motta (2005) | B | 50 | DNER-ME035/98 |
| Oliveira (2007) | B, C, e D | 33 a 59 | DNER-ES 303/97 |
| Kumar e Reddy (2008) | N.i.* | 35 a 43 | IRC 37/01 |
| Silva, Silva e Barroso (2008) | N.i. | 50 | NBR 11804/91 |
| Nóbrega e Melo (2009) | N.i. | 65 | DNER-ME035/98 |
| Jiménez *et* al. (2011) | N.i. | 33 a 41 | UNE EN 1097-2:1999 |

*Não informada

No que diz respeito ao agregado reciclado de concreto, Juan e Gutiérrez (2004) afirmam que quanto mais argamassa presente na amostra, maior é o desgaste do material, justificado por sua natureza porosa e de menor resistência. Considerando isto, tem-se que os maiores percentuais de desgaste nos estudos de Fernandes (2004), Oliveira (2007) e Nóbrega e Melo (2009), conforme a Tabela 2.11, correspondem a amostras que apresentam maiores quantidades de argamassa, diferentemente de Kumar e Reddy (2008) e Jiménez *et* al. (2011), os quais mostram valores inferiores de abrasão.

Para Motta (2005), estipular uma faixa aceitável de desgaste para este tipo de material é uma tarefa difícil, por conta da variação significativa da composição e origem do agregado reciclado, os quais possuem relação intrínseca com a técnica construtiva empregada, a disponibilidade de matéria-prima, a fases da obra, entre outros.

*2.5.3.4 Compactação*

A compactação é a operação que proporciona maior contato entre as partículas constitutivas de um material, aumentando a massa específica aparente, reduzindo a percentagem de vazios de ar e a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais integrantes do pavimento, durante a vida de serviço (DNIT, 2006).

Existem três tipos de energia diferentes que podem ser empregadas durante a execução do ensaio de compactação: normal, intermediária e modificada. A energia de compactação empregada é diretamente proporcional ao valor do peso específico aparente seco máximo e inversamente proporcional ao teor de umidade ótima. A escolha de qual energia deve ser aplicada deve ser feita em função do uso dado ao material analisado.

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos pelos autores na compactação de amostras com agregado reciclado, alguns dados foram compilados na Tabela 2.12. Como alguns estudiosos investigaram várias amostras, optou-se pela exibição da faixa dos resultados encontrados.

Tabela 2.12 – Compilação dos resultados de compactação de RCD de vários tipos e locais.

| **Autor** | **Energia de compactação** | **Umidade ótima (%)** | **Peso específico aparente máximo (kN/m³)** |
|---|---|---|---|
| Fernandes (2004) | Intermediária e modificada | 12,4 a 17,0 | 17,60 a 19,10 |
| Motta (2005) | Intermediária | 11,0 | 18,30 |
| Leite (2007) | Intermediária e modificada | 14,6 e 13,5 | 17,60 e 18,20 |
| Oliveira (2007) | Normal e intermediária | 12,3 a 21,4 | 15,39 a 18,71 |
| Silva, Silva e Barroso (2008) | Intermediária | 11,0 | 19,25 |
| Hortegal, Ferreira e Sant'ana (2009) | Intermediária | 4,5 a 8,1 | 17,75 a 19,32 |
| Nóbrega e Melo (2009) | Intermediária | 14,3 | 18,18 |
| Redivo (2011) | Intermediária | 11,5 a 24,0 | 14,41 a 18,87 |
| Jiménez *et* al. (2011) | Modificado | 10,3 a 13,3 | 18,30 a 20,00 |
| Proença (2012) | Intermediária e Modificada | 17,4 a 21,5 | 16,90 a 18,10 |

Ao observar a Tabela 2.12, nota-se muita variação entre os valores obtidos de peso específico aparente seco máximo e de umidade ótima, justificada pela composição ou tipo de agregados reciclados, energia de compactação utilizada e granulometria do material.

Para Jiménez *et* al. (2011), o agregado reciclado proveniente do concreto apresentam maior densidade seca máxima e menor absorção de água quando comparado ao agregado misto.

Proença (2012) destaca que a quebra das partículas ocorre com a aplicação dos primeiros golpes do processo de compactação. No caso desta pesquisa, na energia intermediária ocorreram proporcionalmente mais quebras em relação à modificada.

*2.5.3.5 Índice de Suporte Califórnia*

Para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, o experimento Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) foi concebido, no final da década de 1920, a fim de verificar o potencial de ruptura do subleito (BERNUCCI *et.* al, 2008).

No Brasil, este índice torna possível o dimensionamento de pavimentos por meio de métodos empíricos, definidos pelo DNIT (2006), sendo um dos mais empregados no meio rodoviário.

Segundo a norma NBR 15.116/04, o ISC é um item necessário a ser verificado quando se utiliza o agregado reciclado de RCD em pavimentação. A Tabela 2.13 apresenta as especificações mínimas de ISC e os requisitos máximos de expansibilidade que cada camada do pavimento pode apresentar.

Tabela 2.13 – Valores limites de ISC e de expansão para uso de RCD em pavimentação.

| **Camada** | **$ISC_{mínimo}$ (%)** | **$Expansão_{máxima}$ (%)** | **Energia de Compactação** |
|---|---|---|---|
| Regularização do subleito | 12 | 1,0 | Intermediária |
| Sub-base | 20 | 1,0 | Intermediária |
| Base | 60 | 0,5 | Intermediária ou Modificada |

Fonte: NBR 15.116/04.

O tempo de imersão utilizado neste ensaio é de 04 (quatro) dias, contudo Motta (2005) analisou corpos de prova com 0, 28, 90 e 180 dias de cura úmida[7], conforme mostrado na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Dados do Índice de Suporte Califórnia do RCD de São Paulo com várias idades de cura úmida.

| Tempo de cura (dias) | Índice de Suporte Califórnia (%) |
|---|---|
| 0 | 76 |
| 0 | 74 |
| 28 | 87 |
| 28 | 101 |
| 90 | 126 |
| 90 | 107 |
| 180 | 121 |
| 180 | 128 |

Fonte: Motta (2005).

Motta (2005) verificou um aumento de até 67% no valor de ISC das amostras investigadas *in natura*, ou seja, sem a adição de cal ou cimento, mostrando que há indício de reação pozolânica por parte das partículas de concreto presentes no RCD, com potencial reativo, provocada pela adição de água para atingir o teor de umidade na compactação.

A análise de ISC feita por Leite (2007) foi realizada em amostras coletadas na usina de reciclagem de Santo André/SP e São Bernardo/SP e teve dois tipos de energia de compactação: a intermediária e a modificada (Tabela 2.15).

[7] Por exemplo, o tempo de “28” dias significa 24 dias de câmara úmida e 4 dias de imersão em água destilada.

Tabela 2.15 – Compilação dos valores de ISC de RCD de duas usinas de São Paulo para dois níveis de energia.

| Procedência | Energia de Compactação | ISC (%) | Expansão (%) |
|---|---|---|---|
| Santo André | Intermediária | 63 | 0 |
| Santo André | Intermediária | 64 | 0 |
| Santo André | Intermediária | 72 | 0 |
| Santo André | Intermediária | 94 | 0 |
| Santo André | Modificada | 81 | 0 |
| Santo André | Modificada | 121 | 0 |
| Santo André | Modificada | 124 | 0 |
| Santo André | Modificada | 143 | 0 |
| Santo André (1) | Intermediária | 84 | 0 |
| Santo André (2) | Intermediária | 53 | 0 |
| Santo André (3) | Intermediária | 59 | 0 |
| Santo André (4) | Intermediária | 63 | 0 |
| São Bernardo (1) | Intermediária | 49 | 0 |
| São Bernardo (2) | Intermediária | 70 | 0 |

Fonte: Adaptado de Leite (2007).

De acordo com Leite (2007), os dados da Tabela 2.15 se apresentaram muito dispersos, em função da heterogeneidade do agregado reciclado e também dos erros inerentes ao ensaio, uma vez que caso um agregado grande fique embaixo do pistão, a penetração será dificultada e implicará em resultados altos de ISC. Ressalta-se ainda que os corpos de prova, moldados com energia modificada, atingiram os maiores resultados de ISC, entre 81 e 143%.

Segundo Oliveira (2007), o aumento da energia de compactação nas amostras estudadas resultou em um aumento significativo no valor de ISC, contudo as suas expansões foram nulas, independente da aplicação da energia intermediária ou modificada (Figura 2.13). O autor notou também que nas dosagens[8], quanto maior o percentual de solo argiloso (SA) adicionado, menor era o valor de ISC obtido, observado nas amostras ARM 50/50 30% SA, ARM 50/50 40% SA e ARM 25/75 30% SA, por exemplo.

[8] A identificação das amostras analisadas foi realizada da seguinte forma: ARM e ARC são os agregados reciclados mistos e de concreto, respectivamente; os valores 50/50 ou 25/75 são as dosagens de ARM e ARC nas misturas, nesta ordem; as informações com 10%, 20%, 30% e 40% estão relacionadas às dosagens do solo argiloso (SA); os finos referem-se a grão passantes na peneira 4,8mm; FX A é a faixa A determinada pelo DNIT; e PM é a energia Proctor Modificada utilizada na compactação.

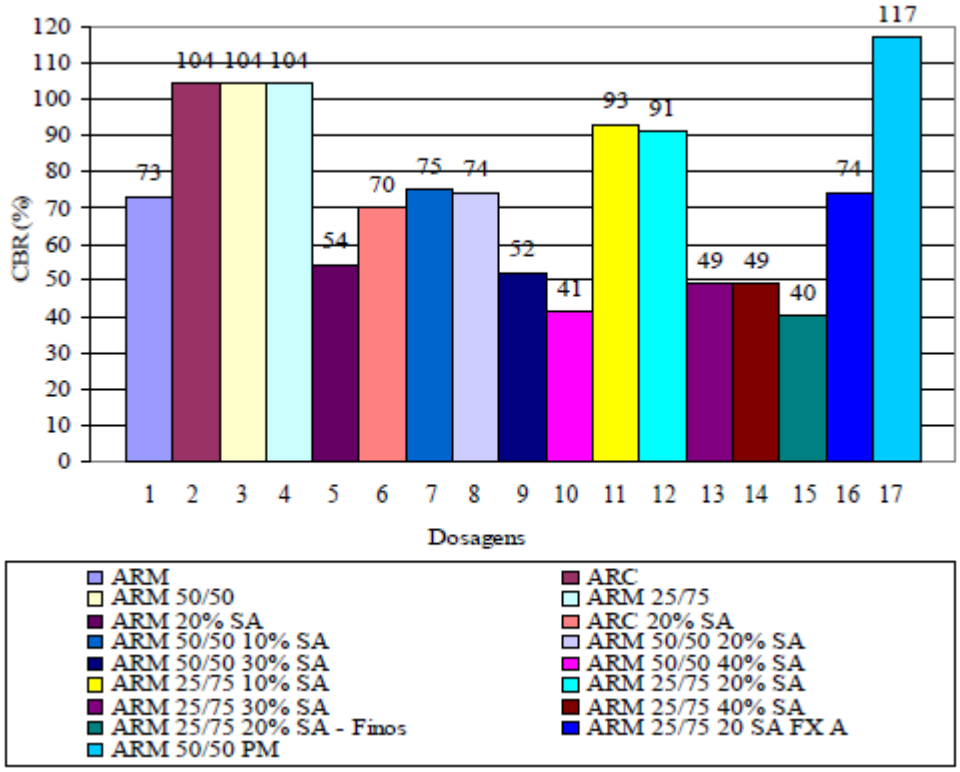



Figura 2.13 – Valores de ISC das dosagens de RCD misto e de concreto com solo de Goiânia.
Fonte: Oliveira (2007).

O valor de ISC encontrado por Kumar e Reddy (2008) na mistura RA:NA[9] (90:10) não permitia seu uso em sub-bases, segundo a norma IRC 37/01. Entretanto a amostra RA:NA (60:40) atendia aos requisitos para aplicação em sub-base de estradas de baixo a alto volume de tráfego, atendendo aos requisitos da norma indiana (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 – Resultados de ISC de mistura de RCD e agregado natural da Índia.

| Material | ISC (%) |
|---|---|
| RA | 10 |
| RA:NA (90:10) | 15 |
| RA:NA (80:20) | 19 |
| RA:NA (70:30) | 25 |
| RA:NA (60:40) | 35 |
| NA | 83 |

Fonte: Adaptado de Kumar e Reddy (2008).

Segundo Silva, Silva e Barroso (2008), os resultados de ISC e expansão do material investigado – composto por 50% de RCD graúdo, 40% de RCD miúdo e 10% de solo –

[9] RA e NA referem-se ao agregado reciclado e agregado natural, respectivamente.

foram 72% e 0, respectivamente, sendo recomendado o seu uso em camadas mais nobres da pavimentação, se utilizado os métodos de dimensionamento empíricos do DNIT (2006).

Os dados de ISC obtidos por Hortegal, Ferreira e Sant'ana (2009) variaram bastante, de 13 a 54%, por se tratar de três misturas com dosagens diferentes de solo e agregado reciclado, contudo as três expansibilidades foram nulas. Dentre as amostras investigadas, a Mistura 3, com 30% de solo e 70% de resíduo, foi a que apresentou resultado mais expressivo de ISC (54%), atendendo aos requisitos da NBR 15.116/04 e podendo ser aplicada em reforço do subleito e sub-base, conforme os autores.

Nóbrega e Melo (2009) moldaram corpos de prova com agregado reciclado e uso de energia intermediária, para determinação do ISC e da expansibilidade do material. De acordo com a Tabela 2.17, o material tem capacidade técnica para aplicação na camada de sub-base, já que apresentou ISC mínimo superior aos 20% exigidos e a expansão máxima obtida foi inferior a 1%, conforme a NBR 15.116/04.

Tabela 2.17 – Resultados do ensaio de ISC e expansão do RCD de João Pessoa.

| | **X** | **s** | **$X_{mín}$** | **$X_{máx}$** |
|---|---|---|---|---|
| **ISC (%)** | 41 | 9,0 | 26,8 | 54,8 |
| **Expansão (%)** | 0,23 | 0,12 | 0,04 | 0,42 |

Fonte: Nóbrega e Melo (2009).

Para Redivo (2011), o material cerâmico misturado a um solo coletado em jazida proporcionou um aumento de até 5 vezes no valor de ISC dos materiais, além da redução das suas expansões. A Tabela 2.18 apresenta os resultados obtidos pelo autor na análise do solo puro e da mistura de Santa Catarina.

Tabela 2.18 – Compilação dos dados de ISC de mistura de solos e RCD de cidades de Santa Catarina.

| Amostra | ISC (%) | Expansão (%) |
|---|---|---|
| Solo 1 (Gravatal) | 22 | 0 |
| GTI73 | 31 | 0 |
| GTI55 | 36 | 0 |
| GTI37 | 38 | 0 |
| GTE73 | 46 | 0 |
| GTE55 | 39 | 0 |
| GTE37 | 34 | 0 |
| Solo 2 (Tubarão) | 7 | 2,59 |
| TTI73 | 34 | 0,72 |
| TTI55 | 28 | 0,61 |
| TTI37 | 30 | 0,63 |
| TTE73 | 24 | 0,07 |
| TTE55 | 32 | 0,11 |
| TTE37 | 36 | 0,15 |
| Solo 3 (Criciúma) | 11 | 2,57 |
| CTI73 | 31 | 0,11 |
| CTI55 | 28 | 0,88 |
| CTI37 | 33 | 0,50 |
| CTE73 | 24 | 0,78 |
| CTE55 | 17 | 0,15 |

Fonte: Adaptado de Redivo (2011).

Na Tabela 2.18 verifica-se que apenas um dos resultados, amostra CTE55, não atendeu à NBR 15.116/04 quanto ao ISC, podendo aplicar as demais misturas na sub-base de pavimento. Observou-se ainda que realizando a mistura houve uma redução de até 97,3% da expansibilidade, ao se comparar o Solo 2 (Tubarão) com a amostra TTE73, por exemplo.

As amostras investigadas por Jiménez *et* al. (2011) mostraram alta capacidade de carga, em que os RCA – agregados reciclados de concreto – obtiveram valores entre 97 e 138% e os MD – agregados mistos – apresentaram resultados entre 62 e 94%.

Proença (2012) ensaiou 30 corpos de prova no ISC, dos quais metade foi moldada com a energia intermediária e a outra metade com a energia modificada (Tabela 2.19). Os materiais poderiam ser aplicados em vias de baixo tráfego, podendo as amostras 1 e 3 serem empregadas até em bases e as amostras 2, 4 e 5 em sub-bases e reforço do subleito.

Tabela 2.19 – Valores de ISC e expansão do RCD com aplicação de energias intermediária e modificada de Recife.

| Energia | Amostras | Umidade média (%) | Parâmetros | Corpos de prova | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | A | B | C |
| Intermediária | 1 | 21,5 | ISC (%) | 105 | 88 | 93 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 20,3 | ISC (%) | 72 | 51 | 40 |
| | | | Expansão (%) | 1,8 | 0 | 0,9 |
| | 3 | 21,2 | ISC (%) | 33 | 89 | 66 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 4 | 18,1 | ISC (%) | 49 | 51 | 41 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 5 | 18,5 | ISC (%) | 50 | 53 | 60 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| Modificada | 1 | 18,1 | ISC (%) | 206 | 206 | 206 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 17,6 | ISC (%) | 91 | 76 | 80 |
| | | | Expansão (%) | 1,7 | 1,1 | 0,8 |
| | 3 | 18,0 | ISC (%) | 162 | 148 | 127 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 4 | 17,9 | ISC (%) | 109 | 115 | 113 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |
| | 5 | 17,7 | ISC (%) | 80 | 68 | 85 |
| | | | Expansão (%) | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Adaptado de Proença (2012).

Os valores médios do ISC nas energias intermediária e modificada variaram entre 47 a 95% e 78 a 206%, respectivamente. Tais resultados indicam que os agregados de RCD podem ser utilizados em vias de baixo volume de trafego, podendo ser aplicados em camadas de reforço do subleito, sub-base e em camadas de base. Destaca-se que, neste último caso, apenas as amostras 2, 4 e 5 da energia intermediária não atenderia aos requisitos da NBR 15.116/04 para base (PROENÇA, 2012).

A heterogeneidade do RCD e até mesmo o controle no processo de beneficiamento de resíduos pode acarretar valores diferentes para um mesmo parâmetro analisado, a exemplo do que ocorreu nas amostras 2 e 3 moldadas na energia intermediária (corpos de provas A, B e C) de Proença (2012). Já a expansibilidade obtida nos estudos em geral apresenta que os RCD não têm expansão e ao se misturar com solos expansivos, tem a capacidade de baixar ou até anular a expansão destes.

# 3. MATERIAIS E MÉTODOS

## 3.1 INTRODUÇÃO

Neste item são apresentadas algumas características do terreno e da obra que cedeu o material para investigação da presente pesquisa. Expõe-se também a metodologia utilizada, que para análise dos resíduos empregados neste estudo, foi dividida em 08 (oito) etapas: *i)* contextualização; *ii)* pesquisa documental; *iii)* beneficiamento do RCD; *iv)* coleta de amostras; *v)* composição gravimétrica; *vi)* investigação laboratorial; *vii)* acompanhamento da execução de um trecho experimental no empreendimento; e *viii)* análise dos custos envolvidos.

A Figura 3.1 indica os ensaios que foram realizados no programa de investigação dos materiais desta pesquisa que consta do RCD e do solo proveniente da escavação das estacas.

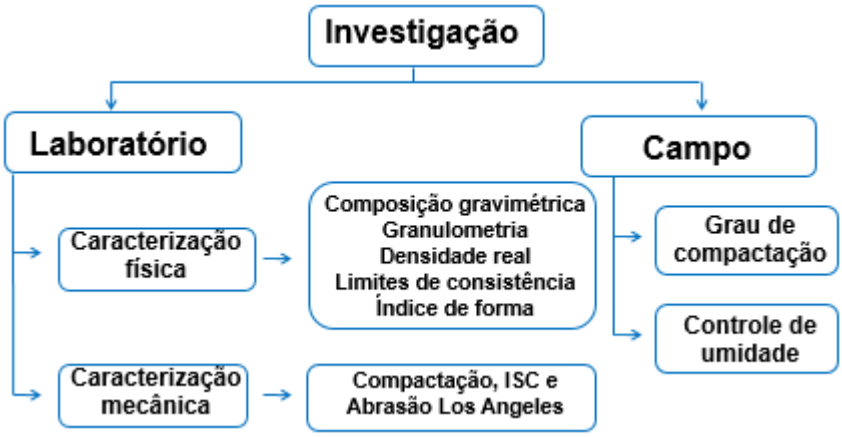



Figura 3.1 – Programa de investigação dos materiais (RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento).

Em campo, foram fornecidos pelos responsáveis pelo empreendimento os quantitativos dos materiais utilizados na execução do trecho experimental, a locação de aplicação dos mesmos e alguns resultados obtidos dos ensaios realizados "*in situ*".

## 3.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 3.2.1 Caracterização da obra

A obra que forneceu os RCD para análise se trata de uma estrutura aporticada pré-moldada e de concreto com 295.000 m² de área total construída, onde existem trechos com até 06 (seis) níveis de lajes na estrutura (Figura 3.2), com pavimento térreo implantado na cota + 3,00.

Figura 3.2 – Empreendimento que forneceu os materiais para a presente investigação.

A área total pavimentada da obra foi de 96.462,97 m² (Anexo A), cuja discriminação está apresentada na Tabela 3.1. De acordo com as especificações do projeto de pavimentação, a camada de sub-base na circulação do estacionamento externo - pavimento flexível - deveria ser estabilizada granulometricamente com material arenoso, apresentar uma espessura de 0,20 m e ISC mínimo de 20%. Nas vagas de estacionamento externo - pavimento semirrígido - a camada de sub-base deveria ser constituída de solo melhorado com 4% de cimento, ter 0,10 m de espessura e ISC mínimo de 20%.

Quadro 3.1 – Discriminação das áreas, tipo de pavimentação e camadas do local da presente pesquisa.

| Discriminação das áreas | Áreas ($m^2$) | Pavimento | Sub-base | | Base | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Espes-sura (m) | Detalhamento | Espes-sura (m) | Detalhamento |
| **Circulação de veículos de carga / locais especiais (vias de serviços)** | 16.208,30 | Rígido | 0,10 | Concreto compactado a rolo (CCR) | 0,20 | Placa de Concreto de Cimento Portland (PCCP) |
| **Circulação de estacionamento coberto** | 41.067,40 | Rígido | 0 | Não possui esta camada | 0,20 | Placa de Concreto de Cimento Portland (PCCP) |
| **Circulaçãodo estacionamento a céu aberto** | 22.545,18 | Flexível | 0,20 | Estabilização granulométrica (ISC>20%) | 0,15 | Brita Graduada Simples (B.G.S) |
| **Vagas dos estacionamentos / locais especiais** | 16.642,09 | Semirrígido | 0,10 | Solo melhorado com cimento com 4% (ISC>20%) | 0 | Não possui (bloco intertravado) |

Quanto à adequação à sustentabilidade, o empreendimento teve a iniciativa de destinar 40.000 m² à implantação de área verde, adotar ações de monitoramento dos níveis internos de $CO_2$, captar água da chuva na cobertura do edifício, utilizar gás refrigerante de baixo impacto ambiental no sistema de ar condicionado, integrar a iluminação natural com a iluminação artificial nas áreas das aberturas envidraçadas, usar esgoto a vácuo, que possibilita redução de 90% no consumo de água comparado com o sistema convencional, entre outros.

### 3.2.2 Geração de RCD

#### *3.2.2.1 Resíduo de demolição*

O material de demolição adquirido para análise procedeu de 07 (sete) galpões grandes e de 10 (dez) depósitos menores de uma fábrica antiga que havia no terreno (Foto 3.1).

Foto 3.1 – Galpões da antiga fábrica no local do empreendimento.
Fonte: Adaptado do Google (2012).

Somado aos RCD gerados pela demolição, tem-se ainda as instalações provisórias (Foto 3.2), as placas de concreto e os resíduos gerados na construção da obra. Após a execução do serviço de demolição, os RCD eram acondicionados em um local para posterior beneficiamento e investigação (Foto 3.3).

Foto 3.2 – Instalações provisórias no canteiro de obras do empreendimento.

Foto 3.3 – Acondicionamento do RCD bruto no local da presente pesquisa.

*3.2.2.2 Resíduo proveniente da execução da fundação (tipo hélice contínua)*

Do ponto de vista geológico, o terreno está localizado na planície flúvio-marinha, dentro do terraço marinho indiferenciado. Contudo, foi a partir da execução de 87 (oitenta e sete) furos de sondagem à percussão que se optou pelo uso da estaca tipo hélice contínua como fundação profunda da obra.

A Figura 3.3 apresenta um esquema de execução de estaca hélice contínua, no qual se tem a geração de RCD (solo) durante a etapa de concretagem, quando ocorre a retirada da hélice de dentro do solo, e as Fotos 3.4 e 3.5 a execução do serviço no canteiro de obra.

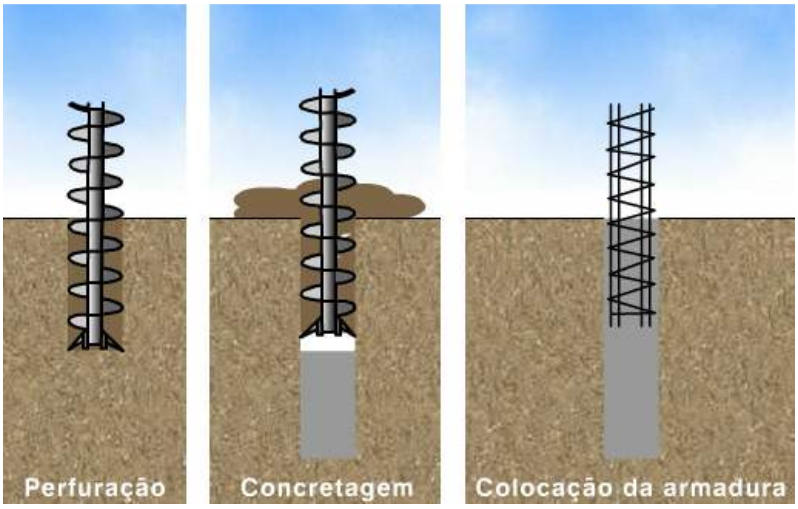



Figura 3.3 – Esquema de execução de estaca hélice contínua.
Fonte: Adaptado de Solossantini (2012).

Foto 3.4 – Execução da estaca hélice no local da presente pesquisa.

Foto 3.5 – Execução da estaca no canteiro de obra da presente pesquisa.

Assim como o RCD proveniente da demolição, o solo proveniente do estaqueamento originado também foi acondicionado em um local específico para posterior análise e utilização (Fotos 3.6 e 3.7). Informações específicas, como por exemplo, altura do depósito de resíduos estão apresentadas no item 3.5.

Foto 3.6 – Identificação do local de armazenamento do solo proveniente do estaqueamento.

Foto 3.7 – Local de acondicionamento de solo proveniente do estaqueamento da obra desta pesquisa.

## 3.3 PEQUISA DOCUMENTAL

A pesquisa documental se vale de materiais que ainda não receberam um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa, tais como: documentos de arquivos públicos, relatórios de pesquisas, cartas, contratos, diários, biografias, relatos de viagens, fotografias, gravações, filmes, mapas, dentre outros (FALCÃO, 2011).

Durante a coleta de dados foi realizado um levantamento de informações relativas à utilização do solo proveniente do estaqueamento e do agregado reciclado de RCD na própria obra, envolvendo projetos, relatórios, fichas técnicas, fotografias, vídeos, diários, plantas, entre outros.

No que se refere ao solo proveniente do estaqueamento, foi calculado o volume gerado na execução da estaca por trecho. As sondagens locadas nos trechos A a L e no viaduto interno do empreendimento (Anexo B), por exemplo, foram verificadas da seguinte forma: identificou-se a quantidade de solo proveniente do estaqueamento gerado por trecho, considerando o sobreconsumo (Anexo C), colocou-se 66 (sessenta e seis) furos de sondagem por metro linear em uma planilha e, por meio do cruzamento destes dados, obteve-se o volume de cada solo gerado.

Já a obtenção da quantidade de agregado beneficiado foi conseguida por meio das áreas dos galpões, identificados em planta, assim como as instalações provisórias de canteiro, tornando possível estimar o volume a partir do cálculo presente no item 4.1.

## 3.4 BENEFICIAMENTO DE RCD

O beneficiamento, conforme Pinto (1999), é a operação que permite a requalificação dos Resíduos de Construção e Demolição, por meio de sua reutilização, reciclagem, valorização energética e tratamento para outras aplicações.

Como a quantidade de RCD originado dos antigos galpões e depósitos era elevada, o empreendimento optou pela locação de 02 (dois) britadores móveis, denominados A e B neste estudo, para a execução da britagem dentro do próprio canteiro de obras (Fotos 3.8 e 3.9), evitando, desta maneira, maiores gastos com transporte.

Foto 3.8 – Britador A utilizado na obra da presente pesquisa.

Foto 3.9 – Britador B utilizado na obra da presente pesquisa.

O britador A é do tipo impacto e fornecia agregados com diâmetro máximo de 25 mm (Foto 3.10). A sua fonte de energia é elétrica, entretanto alimentada por um gerador a óleo diesel. O seu horário de funcionamento semanal foi das 7:30 às 17:30h, com uma hora de almoço, e aos sábados das 7:30h às 13:00h, durante os dias de serviços prestados, permanecendo no canteiro de 04 de outubro de 2010 a 23 de novembro de 2011. Além de 05 (cinco) funcionários operando no britador, também foi necessário uma pá carregadeira para alimentá-lo.

O britador B[10] é do tipo mandíbula e fornecia agregados com o diâmetro máximo de 38mm (Foto 3.11). A sua fonte de energia é óleo diesel e o seu horário de funcionamento igual ao do britador A, estando presente no canteiro desde 13 de outubro de 2011. Para operar este triturador foi necessário apenas 01 (um) funcionário, já que a máquina faz a sua própria alimentação.

Foto 3.10 - Agregado reciclado com diâmetro inferior a 25 mm – Britador A.

Foto 3.11 – Agregado reciclado com diâmetro inferior a 38 mm – Britador B.

Destaca-se que, entre os dois britadores, aquele que executava melhor segregação das impurezas era o britador A (Fotos 3.12 e 3.13), devido ao processo mais minucioso de obtenção do agregado beneficiado.

Foto 3.12 – Impurezas segregadas junto ao britador A.

Foto 3.13 – Impurezas segregadas junto ao britador B.

[10] A pá carregadeira deste equipamento possuía uma abertura que permitia o beneficiamento do material.

## 3.5 COLETA DE AMOSTRAS

A coleta das amostras se dividiu em 03 (três) etapas. O objetivo na Fase 1 foi conhecer as principais características dos materiais, a partir de ensaios preliminares. Na Fase 2, foram realizados ensaios complementares no resíduo beneficiado, no solo proveniente do estaqueamento e na mistura de ambos, permitindo uma análise mais detalhada de suas características. Já a finalidade da Fase 3, foi verificar as características do material na proporção em que estava sendo aplicado em campo na sub-base.

Na Fase 1, foram coletados aproximadamente 200 kg de material (Fotos 3.14 e 3.15), dos quais 100 kg era de solo proveniente do estaqueamento, obtidos em 05 (cinco) locais e alturas diferentes ($P_1$ a $P_5$) da pilha de armazenamento, variando entre 1,5 e 5m[11], sendo posteriormente misturados, formando uma única amostra. Já os 100 kg de RCD beneficiado (triturado) foram coletados em um único local ($P_6$), próximo ao britador A (Apêndice A).

Foto 3.14 – Coleta de solo proveniente do estaqueamento - Fase 1.

Foto 3.15 – Coleta de agregado reciclado de RCD - Fase 1.

Na Fase 2, foram coletadas 04 (quatro) amostras de solo proveniente do estaqueamento ($P_1$ a $P_4$) em diferentes locais e alturas (de 1,2 a 2,5m) e 02 (duas) amostras de Resíduo da Construção e Demolição reciclado ($P_5$ e $P_6$) próximo ao britador A, entretanto em dias distintos. No total foram coletados 625 kg de agregado reciclado e 985 kg de solo proveniente do estaqueamento (Fotos 3.16 e 3.17), locados conforme o Apêndice B.

[11] Isto ocorreu porque a pilha de solo não estava disposta em uma altura só.

Foto 3.16 – Coleta de solo proveniente do estaqueamento - Fase 2.

Foto 3.17 – Coleta de agregado reciclado de RCD - Fase 2.

Destaca-se que nas Fases 1 e 2, buscou-se o material na base da pilha, uma vez que a mesma estava exposta a chuva, sendo as partículas mais finas carreadas para o fundo. Outro ponto a se frisar foi a modificação entre as áreas de armazenamento do solo proveniente do estaqueamento, visto que se passou um trator de esteira a fim de espalhar o material e diminuir a altura da pilha, para no máximo 2,5 m.

A coleta do solo proveniente do estaqueamento e do agregado reciclado na Fase 3 foi realizada no trecho experimental (Apêndices C e D), o qual tinha material já misturado (solo + RCD beneficiado) aplicado na camada de sub-base, sendo obtidos em quatro pontos ($P_1$ a $P_4$), resultando em 200 kg de material no total (Fotos 3.18 e 3.19).

Foto 3.18 – Camada de sub-base executada com solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado.

Foto 3.19 – Coleta de material aplicado na sub-base – Fase 3.

Após a coleta, os materiais foram acondicionados em um laboratório de solos (empresa privada), contratado pelo canteiro de obra e parte das amostras da Fase 2 foi

transportada para o Laboratório Avançado da Construção Civil (LACC) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), com o objetivo de executar ensaios complementares (Fotos 3.20 a 3.21).

Foto 3.20 – Armazenamento das amostras no laboratório de solos (empresa privada).

Foto 3.21 – Acondicionamento dos materiais no LACC – POLI/UPE.

## 3.6 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A composição gravimétrica objetiva a identificação dos constituintes de uma determinada amostra, informando também o correspondente percentual em peso, geralmente executada no resíduo bruto.

Diante das várias dimensões do material da demolição (Fotos 3.22 e 3.23) e da disponibilidade da empresa para a coleta, nesta análise buscou-se cerca de 120 kg de agregado beneficiado em três locais diferentes da pilha (base, meio e topo), próximo ao britador B, sem qualquer tipo de segregação e coletado em um dia (Fotos 3.24 e 3.25).

Foto 3.22 – Variada dimensão do RCD bruto.

Foto 3.23 – Variada dimensão do RCD bruto.

Foto 3.24 – Coleta do RCD beneficiado no meio da pilha.

Foto 3.25 – Coleta do RCD beneficiado no topo da pilha.

O material foi separado tátil-visualmente em concreto, brita, tijolo, argamassa, cerâmica, material miúdo (argamassa, cerâmica, dentre outros com o diâmetro inferior a 4,8 mm), misto e outros (papel, plástico, madeira, aço, etc), conforme mostrado na Foto 3.26, e posteriormente pesado, permitindo a determinação da porcentagem em massa de cada tipo de material da amostra (Foto 3.27).

Foto 3.26 – Segregação tátil-visual do RCD deste estudo.

Foto 3.27 – Exemplo de pesagem do material graúdo do RCD beneficiado deste estudo.

## 3.7 INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

A execução dos ensaios de laboratório seguiu as recomendações da NBR 15.116 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo verificada a granulometria (peneiramento e sedimentação), o limite de liquidez e plasticidade, a densidade real, a

compactação, o ISC com medição de expansão, a abrasão “Los Angeles”, o índice de forma e teor de sulfato dos materiais investigados.

Foram analisadas amostras puras, constituídas apenas por solo proveniente do estaqueamento ou por resíduo beneficiado, e misturas entre ambos, com diferentes proporções, uma vez que, a estabilização granulométrica proporciona a melhoria das propriedades de um solo por meio da mistura com outros materiais (solos ou agregados), permitindo a obtenção de um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade, quando propriamente compactado.

Para facilitar a identificação das amostras investigadas, adotou-se um código contendo as principais informações de cada uma, como por exemplo, a amostra $F_1R_{100,}$ que se refere à Fase 1, com 100% de RCD beneficiado; a amostra $F_2P_1S_{40}R_{60}$, a qual diz respeito à Fase 2, Ponto 1, com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado e a amostra $F_1M_1S_{70}R_{30}$, que representa a Mistura 1 com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado realizada na Fase 1.

Ressalta-se que as proporções analisadas na Fase 1 foram escolhidas em conjunto com os responsáveis pela obra e os projetistas. Na Fase 2, optou-se pela mistura que obteve o melhor desempenho durante a Fase 1 – baseado na NBR 15.116/04, ou seja, a mistura com 60% de RCD beneficiado e 40% de solo. A proporção da Fase 3 também foi escolhida em reunião com projetistas e responsáveis pela obra, objetivando a utilização do máximo possível de solo proveniente das estacas na mistura com RCD beneficiado e a minimização dos custos em função da britagem, abordados com mais detalhe no item 4.10.

O Quadro 3.2 apresenta os ensaios realizados nas três fases, com as quantidades e as amostras de cada uma.

Quadro 3.2 – Quadro resumo dos ensaios realizados por fase laboratorial.

| | Amostras | Ensaios | | | | | | | | | Quantidade |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Granulometria | Densidade real | Limite de liquidez | Limite de plasticidade | Compactação | ISC | Índice de forma | Abrasão "Los Angeles" | Teor de sulfatos | |
| Fase 1 | $F_1S_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | - | 32 |
| | $F_1R_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | - | |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | - | |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | - | |
| Fase 2 | $F_2P_1S_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | X | 76 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | X | |
| | $F_2P_3S_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | X | |
| | $F_2P_4S_{100}$ | X | X | X | X | X | X | - | - | X | |
| | $F_2P_5R_{100}$ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | $F_2P_6R_{100}$ | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | X | - | X | X | X | X | - | - | - | |
| | $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | X | - | X | X | X | X | - | - | - | |
| | $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | X | - | X | X | X | X | - | - | - | |
| | $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | X | - | X | X | X | X | - | - | - | |
| Fase 3 | $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | X | - | - | - | X | X | - | - | - | 16 |
| | $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | X | - | - | - | X | X | - | - | - | |
| | $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | X | - | - | - | X | X | - | - | - | |
| | $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | X | - | - | - | X | X | - | - | - | |
| | | | | | | | | | | ∑= | 124 |

Os ensaios foram executados após a secagem, que durante o inverno foi feita por aquecimento em dois bicos de gás e no verão foi realizada ao ar livre; o quarteamento - realizado após a limpeza do chão e o controle dos finos na divisão das amostras - e a homogeneização, seguida do acondicionamento em sacos plásticos (Fotos 3.28 a 3.34).

Foto 3.28 – Secagem realizada durante o inverno.

Foto 3.29 – Secagem do material realizada durante o verão.

Foto 3.30 – Limpeza do chão.

Foto 3.31 – Quarteamento do material.

Foto 3.32 – Controle dos finos.

Foto 3.33 – Homogeneização da amostra.

Foto 3.34 – Armazenamento das amostras em sacos plásticos.

Na Fase 1, separou-se a quantidade de material necessária para fazer os ensaios das amostras compostas apenas por solo proveniente do estaqueamento e por resíduo beneficiado; em seguida, com o restante dos materiais, foram realizadas 02 (duas) misturas volumétricas[12] com proporções diferentes (70% de solo + 30% de RCD beneficiado e 40% de solo + 60% de RCD beneficiado), utilizando o fundo da peneira (Fotos 3.35 e 3.36).

Foto 3.35 – Solo proveniente do estaqueamento colocado no fundo da peneira.

Foto 3.36 – Solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado sendo misturado.

Como a quantidade de material coletado na Fase 2 foi superior à Fase 1, a mistura volumétrica foi feita com um balde (Foto 3.37), no qual o percentual de solo proveniente do estaqueamento foi 40% e de RCD beneficiado foi 60%.

A Figura 3.4 apresenta as etapas para a obtenção das amostras da Fase 2, a qual teve, na primeira etapa, todos os materiais ensaiados ($F_2P_1S_{100}$, $F_2P_2S_{100}$, $F_2P_3S_{100}$, $F_2P_4S_{100}$, $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$), na segunda etapa houve a mistura das amostras constituídas apenas por RCD e, na terceira etapa, o ensaio das amostras após a mistura ($F_2M_1S_{40}R_{60}$, $F_2M_2S_{40}$ $R_{60}$, $F_2M_3S_{40}$ $R_{60}$, $F_2M_4S_{40}$ $R_{60}$).

Frisa-se que as 02 (duas) amostras de resíduos foram misturadas na segunda etapa e, posteriormente, divididas em quatro partes iguais, para que cada uma passasse a constituir uma nova mistura com os pontos coletados de solo proveniente do estaqueamento (3ª etapa).

[12] Optou-se pela mistura volumétrica em laboratório, uma vez que no campo a mistura foi executada a partir da capacidade dos caminhões.

Foto 3.37 – Mistura volumétrica de RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento na segunda etapa.

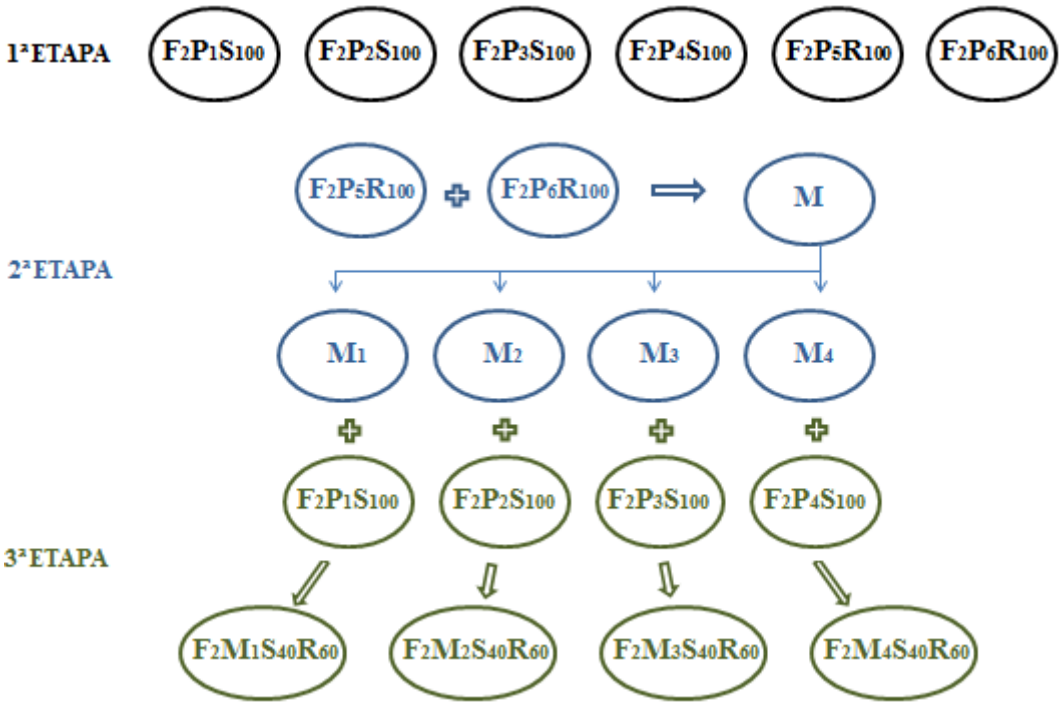



Figura 3.4 – Materiais investigados na Fase 2 da presente pesquisa.

A mistura volumétrica da Fase 3 foi feita por meio de caminhões com capacidade de 12 m³ na área do trecho experimental. A cada 03 (três) caminhões de solo proveniente do estaqueamento eram despejados 02 (dois) caminhões de resíduo triturado, formando uma mistura com 60% de solo proveniente do estaqueamento e com 40% de resíduo beneficiado (Foto 3.38). O procedimento de execução adotado no trecho experimental é apresentado no item 3.8.

Foto 3.38 – Solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado sendo aplicados na sub-base no local desta pesquisa.

### 3.7.1 Caracterização física

*3.7.1.1 Granulometria*

Para o estudo da granulometria, a partir do peneiramento e da sedimentação (Lei de Stokes), utilizou-se a norma NBR 7181 (1984), a qual classifica os materiais da seguinte maneira: 0,25 a 1 m – matacão; 7,6 a 25 cm – pedra; 4,8 a 7,6 cm – pedregulho; 2,0 a 4,8 cm – areia grossa; 0,42 mm a 2,0 cm – areia média; 0,05 a 0,42 mm – areia fina; 0,005 a 0,05 mm – silte; e inferior a 0,005 mm – argila.

A análise granulométrica foi realizada nas Fases 1, 2 e 3 do estudo, no qual as amostras foram investigadas quanto às especificações da NBR 15.116/04 e classificadas conforme o *Transportation Research Board (TRB)*. Das Fotos 3.39 a 3.41 são exibidas algumas das etapas do ensaio.

Foto 3.39 – Série de peneiras do peneiramento grosso.

Foto 3.40 – Separação nas diversas frações do material peneirado neste estudo.

Foto 3.41 – Mistura separada para o ensaio de sedimentação.

Destaca-se que a estimativa dos percentuais passante em cada peneira na etapa de sedimentação das amostras $F_2M_1S_{40}R_{60}$, $F_2M_2S_{40}R_{60}$, $F_2M_3S_{40}R_{60}$, $F_2M_4S_{40}R_{60}$, $F_3M_1S_{60}R_{40}$, $F_3M_2S_{60}R_{40}$, $F_3M_3S_{60}R_{40}$ e $F_3M_4S_{60}R_{40}$ foi feita por meio do método de Fuller-Talbot[13] (VARGAS, 1977 e ALMEIDA *et* al., 2010), pois um incidente no laboratório terceirizado ocasionou a mistura dos materiais, impossibilitando a realização deste ensaio.

*3.7.1.2 Densidade real*

Na determinação da densidade real, empregou-se a norma NBR 6508/84, método do picnômetro e bomba à vácuo, nas amostras das Fases 1 e 2.

Foi realizada a verificação da densidade real apenas nas amostras das Fases 1 e 2, pela mesma razão descrita no item 3.7.1.1.

*3.7.1.3 Limites de consistência*

Como a granulometria e a densidade real não são suficientes para classificar fisicamente um material, complementou-se a investigação dos materiais das Fases 1 e 2 por meio

[13] $P = 100\,(d/D)^n$

Onde: P – percentual que passa pela peneira em questão;
d – abertura da peneira;
D – máxima dimensão do agregado do solo;
n – expoente variável, em função da máxima densidade, geralmente considerado igual a 0,5. Expoente ligado à porcentagem de finos.

- $n < 4$, excesso de finos.
- $0,4 < n < 0,6$, agregados de graduação contínua densa (diâmetros abrangendo praticamente todas as frações granulométricas).
- $n > 0,6$, agregado de graduação aberta contínua (falta de finos).

dos ensaios de limites de liquidez (NBR 6459/84) e limites de plasticidade (NBR 7180/84). Nas Fotos 3.42 e 3.43 são apresentados os procedimentos adotados para a realização destes ensaios nas amostras desta pesquisa.

Foto 3.42 – Uma das amostras desta pesquisa no aparelho Casagrande.

Foto 3.43 – Execução do limite de plasticidade numa das amostras desta pesquisa.

Frisa-se que as amostras da Fase 3 não foram analisadas, pelo mesmo motivo descrito no item 3.7.1.1.

*3.7.1.4 Índice de forma*

Para a obtenção do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica superior a 9,5 mm, foi utilizada a norma NBR 7809/08 nas amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$ da Fase 2. Decidiu-se seguir esta norma porque a NBR 15.116/04, define limite máximo 3,0 para este índice, que é simples, sendo necessário apenas o uso do paquímetro.

Como o material graúdo da Fase 2 foi coletado no britador A, o seu diâmetro máximo foi de 25mm, portanto para a execução deste ensaio foi preciso selecionar 24 kg de cada amostra, conforme especificado pela NBR 7809/08 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Quantidade de material selecionado para o ensaio de forma pela NBR 7809/08.

| Dimensão (D) dos grãos (mm) | Massa mínima da amostra inicial (kg) |
|---|---|
| D < 19 | 8 |
| 19 < D < 25 | 16 |
| 25 < D < 38 | 24 |
| 38 < D | 32 |

### 3.7.2 Caracterização mecânica

#### *3.7.2.1 Compactação*

A energia intermediária aplicada no ensaio de compactação foi definida a partir da NBR 15.116/04 (Tabela 3.2), já que o material estudado destinava-se a camada de sub-base. Para a definição da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo das amostras das Fases 1, 2 e 3, seguiu-se a norma NBR 7182/86. As Fotos 3.44 e 3.45 apresentam algumas etapas de execução deste ensaio.

Tabela 3.2 – Energia de compactação definida pela NBR 15.116/04.

| Camada do pavimento | Energia de compactação |
|---|---|
| Regularização do subleito | Proctor normal |
| Sub-base | Proctor normal ou intermediária |
| Base | Intermediária ou modificada |

Foto 3.44 – Preparação da amostra para ensaio de compactação.

Foto 3.45 – Compactação da mistura na energia intermediária.

*3.7.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)*

Os ensaios de ISC com medição de expansão seguiram as determinações da NBR 9895/87 e foram realizados nas três fases laboratoriais do estudo, a fim de definir a capacidade de suporte dos solos e dos materiais granulares, por meio da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão nos corpos de prova, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração num material granular padrão de referência.

As amostras compactadas receberam uma sobrecarga de discos anulares de aproximadamente 4,5 kg e foram levadas a imersão em água por 04 (quatro) dias (Fotos 3.46 e 3.47), para simular uma condição desfavorável em campo.

Foto 3.46 – Amostras submersas por 4 dias para ensaio de expansão e ISC.

Foto 3.47 – Execução do ensaio de ISC.

Na Fase 1, foram realizadas duas verificações de ISC e expansão - Prova (P) e Contraprova (CP) - para cada amostra, já que os materiais estavam sendo avaliados pela primeira vez e este parâmetro é de suma importância para os pavimentos, sendo identificados como $F_1S_{100}$ (P) e $F_1S_{100}$ (CP), por exemplo. Nas demais fases, procedeu-se com 01 ensaio para cada amostra, resultando em 22 investigações no total.

*3.7.2.3 Abrasão "Los Angeles"*

Assim como o índice de forma, este ensaio também se refere apenas ao agregado graúdo, sendo investigadas as amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$ da Fase 2, por meio da NBR NM 51/01, após a definição da faixa granulométrica B, através da NBR NM 248/03. A Tabela 3.3 apresenta a carga abrasiva de acordo com cada graduação.

Tabela 3.3 – Determinação da carga abrasiva para o ensaio abrasão "Los Angeles" em função da faixa granulométrica.

| Graduação | Número de esferas | Massa da carga (g) |
|---|---|---|
| A | 12 | 5000 ± 25 |
| B | 11 | 4584 ± 25 |
| C | 8 | 3330 ± 20 |
| D | 6 | 2500 ± 15 |
| E | 12 | 5000 ± 25 |
| F | 12 | 5000 ± 25 |
| G | 12 | 5000 ± 25 |

Fonte: NBR NM 51/01.

### 3.7.3 Caracterização química

*3.7.3.1 Teor de sulfatos*

De acordo com DNIT (2004), a presença de alguns íons, como $SO_4^{--}$, são capazes de agir prejudicialmente a longo prazo em pavimentos rígidos, podendo atuar diretamente sobre o cimento ou agregado, já que o cimento, meio altamente alcalino, favorece as reações expansivas.

Nas camadas de base e sub-base de pavimentos, a presença de gesso (sulfato de cálcio) também pode trazer problemas a longo prazo, devido à formação de vazios pela sua lixiviação, e afetar a composição e pHs da água do solo de forma mais rápida que a fração à base de cimento Portland afeta (JOHN e CINCOTTO, 2003).

Portanto, a fim de verificar se os materiais investigados atendem à NBR 15.116/04, foram analisados os teores de sulfatos das amostras da Fase 2, conforme disciplina a

NBR 9917/87, constituídos apenas por um material por vez: solo proveniente do estaqueamento ou agregado de RCD.

## 3.8 ACOMPANHAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

No início da obra, em 2010, foi feito um aterro com resíduo de demolição bruto, em que a espessura variou de 40 a 60 cm nos caminhos de serviços e em alguns locais de instalações provisórias do canteiro (Apêndice E). Em seguida, executou-se outro aterro, desta vez com resíduo beneficiado, apresentado no Apêndice F, entretanto com espessura não informada.

Em novembro de 2011, houve a liberação de alguns locais onde tinham sido executados os aterros, tornando possível dar continuidade ao serviço de terraplenagem e pavimentação. A partir deste momento, além do acompanhamento da execução da atividade, foram fornecidos pelo empreendimento alguns projetos e resultados de campo para esta pesquisa. Destaca-se que nesta ocasião não foi possível interferir no controle dos materiais aplicados e repetição de ensaios, ficando esta atividade a cargo do laboratório terceirizado existente no canteiro.

A execução da regularização do subleito e da sub-base seguiu as seguintes etapas: espalhamento e mistura do material, RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento, com uma motoniveladora; retirada das impurezas; umectação da camada, feita com um caminhão pipa até atingir a umidade ótima; compactação com um rolo compactador vibratório; e, por último, com um rolo pneumático até atingir o grau de compactação adequado (Fotos 3.48 a 3.52). Frisa-se que o número de passadas dos rolos não foi informado pela empresa que executou o serviço no momento que a atividade estava sendo desenvolvida.

Foto 3.48 – Execução da regularização do subleito no local desta pesquisa.

Foto 3.49 – Motoniveladora espalhando e misturando os materiais na camada de sub-base.

Foto 3.50 – Retirada das impurezas da sub-base feita visual e manualmente.

Foto 3.51– Rolo compactador.

Foto 3.52 – Rolo pneumático.

Posteriormente, no caso do pavimento flexível, foi dada sequência à execução da base, da imprimação e do revestimento (Fotos 3.53 a 3.58). No caso do pavimento semirrígido, colocou-se um colchão de areia e blocos intertravados e, no pavimento rígido foi executada a concretagem na última camada.

Foto 3.53 – Execução da base com BGS no local do pavimento asfáltico.

Foto 3.54 – Imprimação da base nos locais com pavimento asfáltico da obra desta pesquisa.

Foto 3.55 – Vibro-acabadora aplicando concreto asfáltico.

Foto 3.56 – Pavimentos flexível e semirrígido finalizados.

Foto 3.57 – Pavimentos flexível e semirrígido concluídos no trecho experimental.

Foto 3.58 – Trecho liberado e viaduto interno concluído.

No trecho experimental foram aplicados diferentes percentuais de solo proveniente do estaqueamento e resíduo reciclado no reforço do subleito e na sub-base do pavimento flexível, semirrígido e rígido do empreendimento, a fim de definir qual material apresentava um melhor comportamento em campo, utilizando o máximo possível de solo proveniente do estaqueamento.

No Apêndice G são apresentadas as áreas com as proporções de cada mistura empregada no trecho experimental, onde a primeira executada foi a área em amarelo, com 2.215,32 m² e composta por 100% de RCD beneficiado; a segunda área possui 3.091,14 m², está marcada em azul e é constituída por 30% de RCD beneficiado e 70% de solo proveniente do estaqueamento; a terceira área é a magenta, tem 60% de RCD beneficiado e 40% de solo proveniente do estaqueamento aplicado e 3.921,01m²; já a quarta área é a verde, possui 5.669,01 m² e é constituída por 40% de RCD beneficiado e 60% de solo proveniente do estaqueamento.

Frisa-se que estão inclusos nas três primeiras áreas (amarelo, azul e magenta) os pavimentos flexível e semirrígido, já a última área insere os três tipos de pavimentos que existem, ou seja, flexível, semirrígido e rígido e que as espessuras das camadas foram as mesmas especificadas pelo projetista de pavimentação.

### 3.8.1 Controle tecnológico em campo

Os ensaios de controle tecnológico realizados em campo foram desenvolvidos por uma empresa terceirizada, sendo disponibilizados apenas para interpretação nesta pesquisa.

No trecho experimental foram aplicados resíduo beneficiado e solo proveniente do estaqueamento em diferentes proporções na regularização do subleito, na sub-base da circulação do estacionamento a céu aberto (pavimento flexível) e vagas do estacionamento externo (pavimento semirrígido), conforme apresentado no Apêndice G.

Para obtenção dos parâmetros de campo (umidade e grau de compactação) foi preciso realizar a coleta de material em alguns locais para execução do ensaio de compactação em laboratório (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Características das amostras coletadas para o ensaio de compactação.

| Locais | Material | Setores | Energia de Compactação[14] |
|---|---|---|---|
| 1 | 100% resíduo beneficiado | J | Intermediária |
| 2 | 60% solo proveniente do estaqueamento + 40% RCD beneficiado | G, I e J | Modificado |
| 3 | 70% solo proveniente do estaqueamento + 30% RCD beneficiado | J | Intermediária |
| 4 | 60% solo proveniente do estaqueamento + 40% RCD beneficiado | I | Modificado |
| 5 | 60% solo proveniente do estaqueamento + 40% RCD beneficiado | I | Modificado |
| 6 | 70% solo proveniente do estaqueamento + 30% RCD beneficiado | J | Modificado |
| 7 | 100% RCD beneficiado | J | Modificado |
| 8 | 40% solo proveniente do estaqueamento + 60% RCD beneficiado | G, H, I e J | Modificado |

Nesta ocasião, a empresa responsável pelos ensaios optou pelo uso de energia intermediária nos Locais 1 e 3, os quais foram os primeiros a serem analisados, e nos demais locais (2, 4, 5, 6, 7 e 8) a energia aplicada foi a modificada, sem justificar o motivo. Ressalta-se ainda que não foram disponibilizadas as coordenadas dos locais de coleta, sendo anotados apenas os percentuais das misturas e os setores dentro da obra.

Os ensaios de campo, frasco de areia e método Speedy, foram realizados em dias distintos e nos setores G, H, I e J.

[14] Na compactação de bases e sub-bases com agregado reciclado a energia mínima a ser utilizada é a intermediária, segundo a NBR 15.116/04

*3.8.2.1 Controle da densidade de campo*

Este índice foi obtido por meio da NBR 7185/86, frasco de areia, método empregado no controle de densidade de campo.

O ensaio consistiu em assentar uma bandeja com um furo no centro sobre a superfície do terreno; escavar um furo com profundidade de 20 cm, de espessura da camada de sub-base; medir a massa escavada e a massa inicial do frasco de areia; abrir o registro, deixando a areia fluir para dentro do furo e medir a massa final do frasco (Fotos 3.59 a 3.62).

Durante o ensaio ocorreram dificuldades no momento de escavação do furo, visto que as camadas do pavimento eram constituídas de RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento com grãos de dimensões variáveis.

O DNER-ME 92/94 disciplina que o ensaio só pode ser feito com a ausência de vibrações de tráfego ou equipamentos e o controle da densidade deve ser feito em diversas seções da estrada em distâncias de no mínimo 25 metros alternadamente no centro e nas bordas. No acompanhamento de campo, notou-se que ambas diretrizes não foram obedecidas.

Foto 3.59 – Colocação da bandeja com furo.

Foto 3.60 – Areia fluindo para dentro do furo feito na camada.

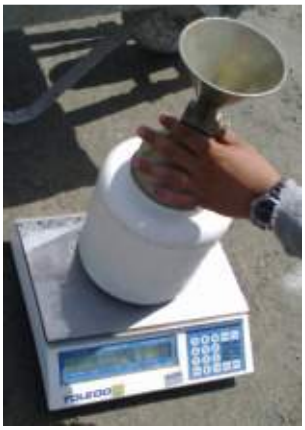


Foto 3.61 – Pesagem do frasco de areia.

*3.8.2.2 Controle da umidade*

A umidade medida no trecho experimental seguiu a ME-10/03 da Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB), obtida pelo método Speedy, o qual é determinado por meio da pressão resultante de uma reação química entre a água existente no solo úmido e o carbureto de cálcio colocado dentro de um recipiente hermético. As Fotos 3.62 e 3.63 apresentam os aparelhos usados e a execução do ensaio.

Foto 3.62 – Aparelho “Speedy”.

Foto 3.63 – Execução do ensaio de controle de umidade.

## 3.9 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a verificação da economia obtida no trecho experimental foi realizado o levantamento da quantidade de material empregado e suas respectivas áreas mostradas no Apêndice G. Além disto, foi feita também uma pesquisa dos custos de agregados naturais, comumente utilizados na terraplenagem e na pavimentação, bem como o custo de obtenção de resíduo beneficiado, valores de transporte externo e destino final dos RCD.

Nesta pesquisa, fez-se o acompanhamento apenas das áreas demarcadas no Apêndice G (trecho experimental) e, como não foi fornecido pelo empreendimento a rastreabilidade de aplicação do solo proveniente do estaqueamento e resíduo beneficiado, optou-se por analisar cenários com situações hipotéticas. São elas:

1) Envio de todo o material (solo proveniente do estaqueamento e RCD bruto[15]) para um aterro de inertes da região;
2) Envio de todo o RCD bruto para uma usina de reciclagem e o Solo proveniente do estaqueamento em um aterro de inertes;
3) Aplicação de parte do Solo proveniente do estaqueamento em um aterro na própria obra (contenção em muro gabião com 965m³ de volume) e envio de outra parte do solo somada ao RCD bruto para um aterro de inertes;
4) Aplicação de parte do Solo proveniente do estaqueamento em um aterro na própria obra (contenção em muro gabião com 965 m³ de volume), envio de outra parte deste mesmo material para um aterro de inertes e envio do RCD bruto para uma usina de reciclagem;
5) Aplicação da mistura de Solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado na terraplenagem e na pavimentação (sub-base e base); aplicação do RCD beneficiado em uma parte da base e a complementação da mesma com agregado natural;

[15] Antes do beneficiamento

6) Aplicação da mistura de solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado na terraplenagem e na pavimentação (sub-base e base); aplicação de RCD beneficiado em uma parte da base e a complementação da mesma com agregado obtido de uma usina de reciclagem.

Frisa-se que na verificação dos cenários foi considerado o volume estimado a partir dos projetos de pavimentação, terraplenagem e contenção em muro gabião, fornecidos pelo empreendimento. Utilizou-se também os pesos específicos de 14 kN/m³ para os RCD e de 17 kN/m³ para o solo proveniente do estaqueamento.

# 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Serão apresentados a seguir os resultados e as correspondentes análises e comparações dos parâmetros coletados nas verificações de laboratório e de campo.

## 4.1 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RCD PROVENIENTE DA DEMOLIÇÃO E COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

Considerando a área total das antigas construções de 20.949,15 m² (Anexo D) e o indicador de geração de RCD em atividades de demolição de 0,90 t/m², determinado por Gusmão (2008), tem-se que os galpões originaram cerca de 18.900 t de resíduos ou 13.500 m³; este último obtido por meio do peso específico de 1,4 t/m³, definido por CARNEIRO (2005).

Somado às 18.900 t, existem ainda os resíduos provenientes de instalações provisórias e placas de concreto das vias de serviços, calculados de forma semelhante aos galpões, ou seja, de posse de todas as áreas, estimou-se que no total foram gerados 23.560 t ou 16.830 m³ de RCD.

No que se refere à composição gravimétrica dos resíduos de demolição beneficiado a Figura 4.1 apresenta os resultados da amostra estudada, obtida após segregação tátil-visual de cada constituinte, com sua correspondente pesagem.

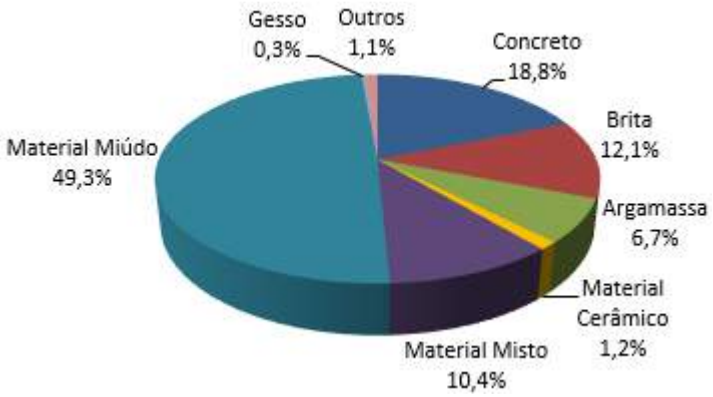



Figura 4.1 – Composição gravimétrica do RCD deste estudo.

Examinando a Figura 4.1, é possível perceber que o percentual de material miúdo (49,3%) foi significativo, justificado pelo processo de beneficiamento da amostra coletada, seguido da presença de 25,5% de materiais cimentícios (concreto e argamassa) e 12,1% de brita.

Pode-se observar ainda a presença de 1,1% de resíduos denominados como Outros (plástico, borracha, alumínio, concha, papel, aço, madeira e placa de amianto), os quais estavam presentes pela não segregação adotada durante o beneficiamento.

Ao se comparar a composição gravimétrica deste estudo com as obtidas por Araújo Jr. (2010), citadas no item 2.2, nota-se a semelhança com o material da fase de acabamento, ou seja, cerca de 50% da amostra era constituída por material miúdo.

## 4.2 ESTIMATIVA DO VOLUME E COMPOSIÇÃO DO SOLO PROVENIENTE DO ESTAQUEAMENTO

No que se refere às estacas, originou-se cerca de 25.360 m³ de solo durante a escavação, uma vez que foram executadas 4.203 (quatro mil duzentas e três) estacas, com diâmetros variando de 400 a 600 mm e comprimento médio de 23 m, detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características das estacas tipo hélice contínua.

| **Tipo de estaca** | **Diâmetro (mm)** | **Comprimento médio (m)** | **Quantidade** | **Volume de solo retirado (m³)** |
|---|---|---|---|---|
| H400 | 400 | 21,68 | 504 | 1.713,19 |
| H500 | 500 | 23,30 | 3.007 | 17.852,87 |
| H600 | 600 | 22,67 | 692 | 5.793,68 |

O solo proveniente do estaqueamento era constituído principalmente por materiais arenosos, com pequenas percentagens de matéria orgânica, silte e argila, apresentado no Anexo E, a partir do perfil preliminar do terreno, feito com 08 furos iniciais de sondagem e detalhado no Apêndice H, por meio do levantamento das 66 sondagens.

A Figura 4.2 apresenta o percentual de cada tipo de solo que constitui o subleito do

empreendimento, elaborado após análise das sondagens fornecidas.

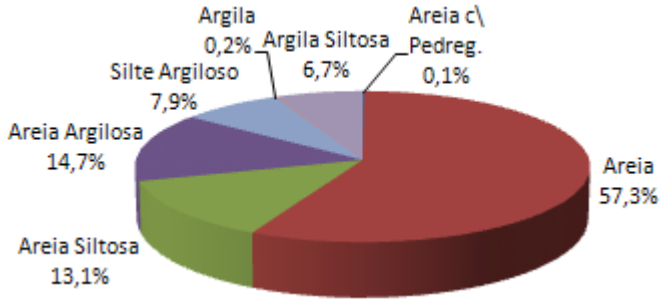



Figura 4.2 – Percentual de cada tipo de solo presente no subleito.

A partir da Figura 4.2, nota-se que 57,3% de solo retirado no estaqueamento são de areia, ou seja, 14.321,28 m³ ou 24.703,18 t, e levando-se em consideração areias siltosas (13,1%) e argilosas (14,7%), estes valores aumentam para 21.581,36 m³ ou 36.688,31t. Adotou-se o peso específico de 1,7 t/m³ para areia pura, areia argilosa e areia siltosa.

Diante deste cenário, era de se esperar que as amostras investigadas apresentassem um comportamento semelhante aos materiais arenosos quando avaliadas em laboratório, tendo em vista a quantidade de areia (36.688,31 t), bem superior a de argilas (862,24 t).

## 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.3.1 Granulometria

Este ensaio permitiu a construção das curvas granulométricas de todas as amostras investigadas, ou seja, nas 18 (dezoito) situações (Figura 4.3) e a obtenção do coeficiente de não uniformidade (CNU), coeficiente de curvatura ($C_C$), diâmetro efetivo ($D_{10}$) e percentual de material passante na peneira com abertura de 0,42mm.

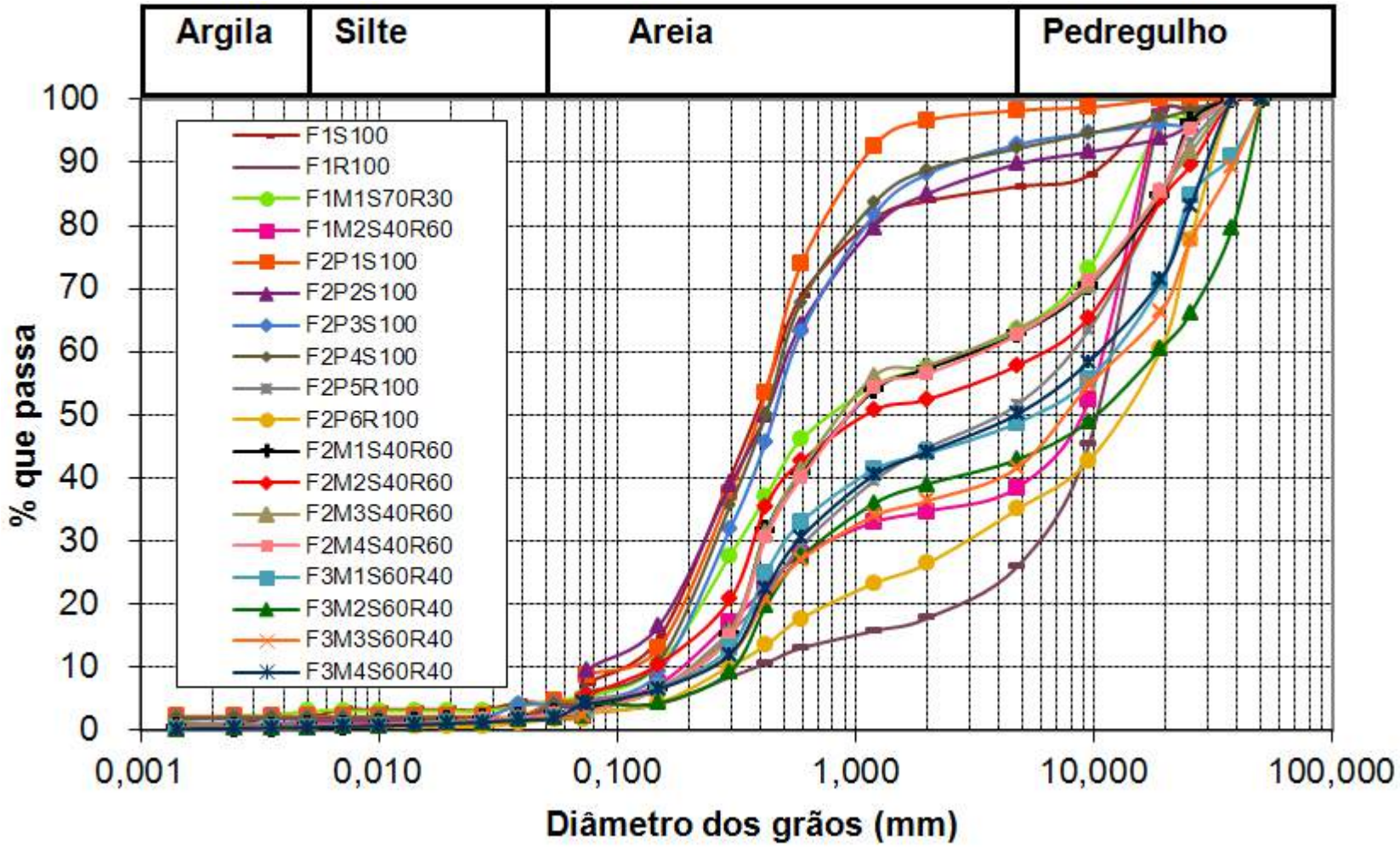



Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos solos provenientes do estaqueamento, dos RCD beneficiado e das misturas analisadas neste estudo.

Nota-se, a partir da Figura 4.3, que houve uma variação considerável entre as curvas granulométricas compostas pelo solo proveniente da estaca, pelo RCD beneficiado puro e pela mistura entre os dois materiais. Entretanto, observa-se que os dois principais contituintes de todas as amostras eram equivalentes a pedregulho e areia, os quais possuíam porcentagens entre 95,33 e 98,22% ao serem somados.

Com o intuito de melhorar a análise dos dados obtidos, dividiu-se as amostras a partir das diferentes proporções investigadas, expostas nas Figuras 4.4 a 4.8, que são respectivamente: solo proveniente do estaqueamento (05 amostras), RCD beneficiado (03 amostras), mistura com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado (01 amostra), 40% de solo proveniente do estaqueameto e 60% de RCD beneficiado (05 amostras) e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado (04 amostras).

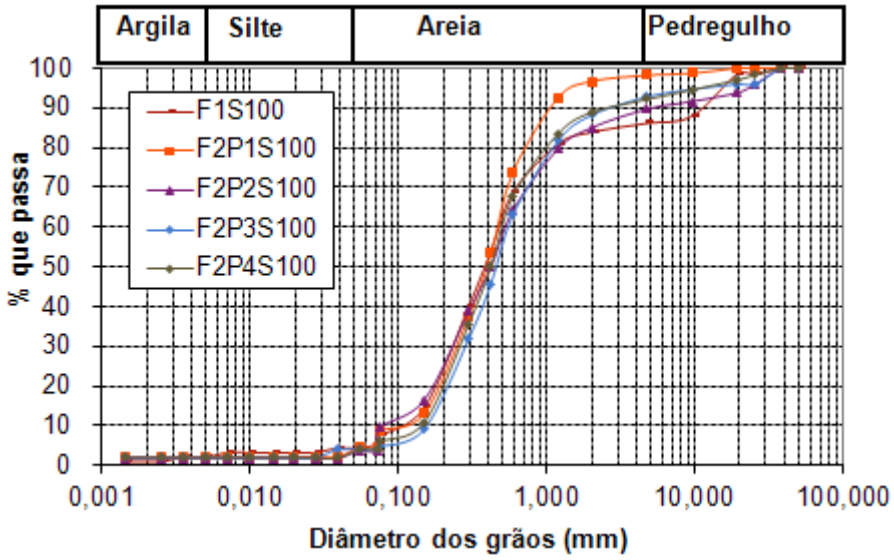



Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras constituídas por solo proveniente do estaqueamento.

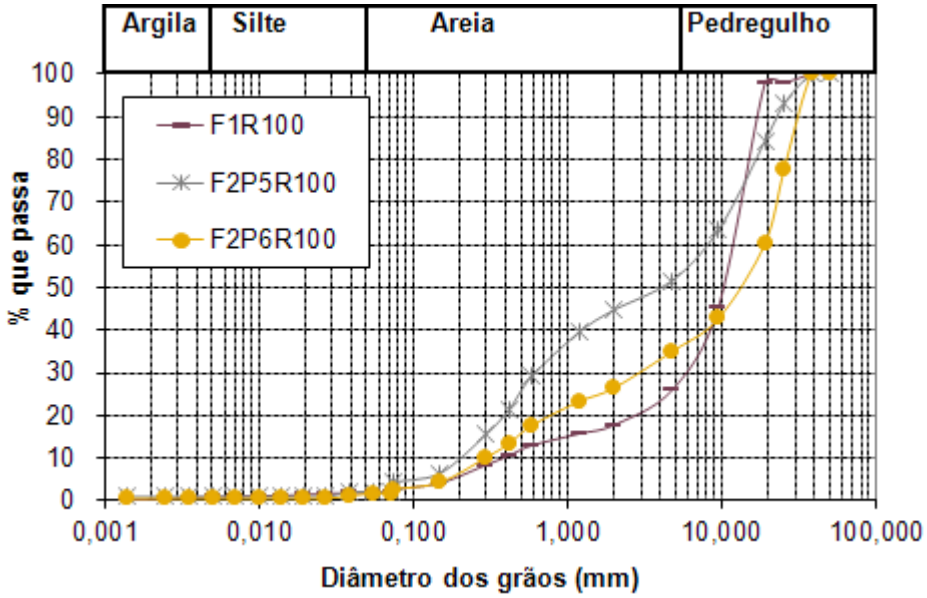



Figura 4.5 – Curvas granulométricas das amostras constituídas por RCD beneficiado.

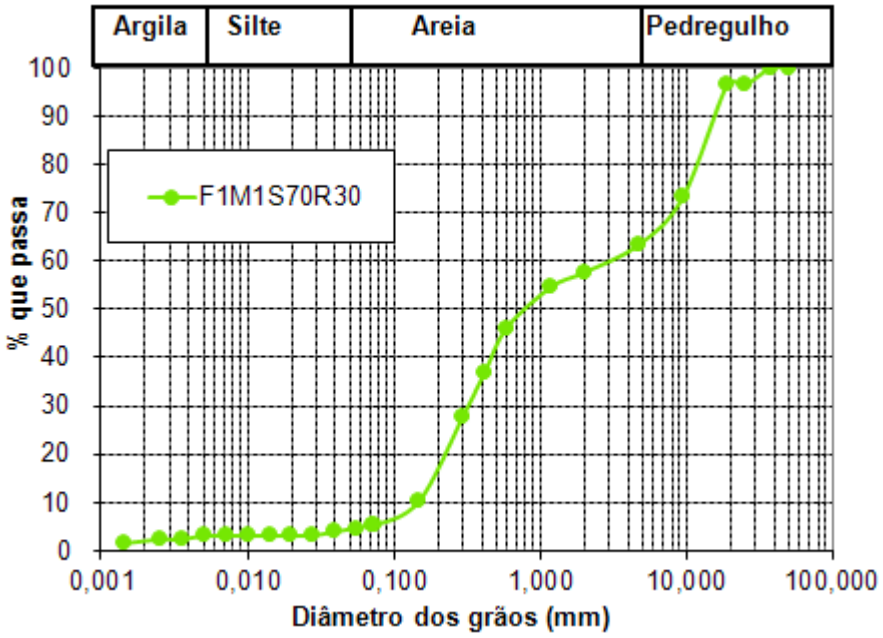



Figura 4.6 – Curva granulométrica da mistura com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado.

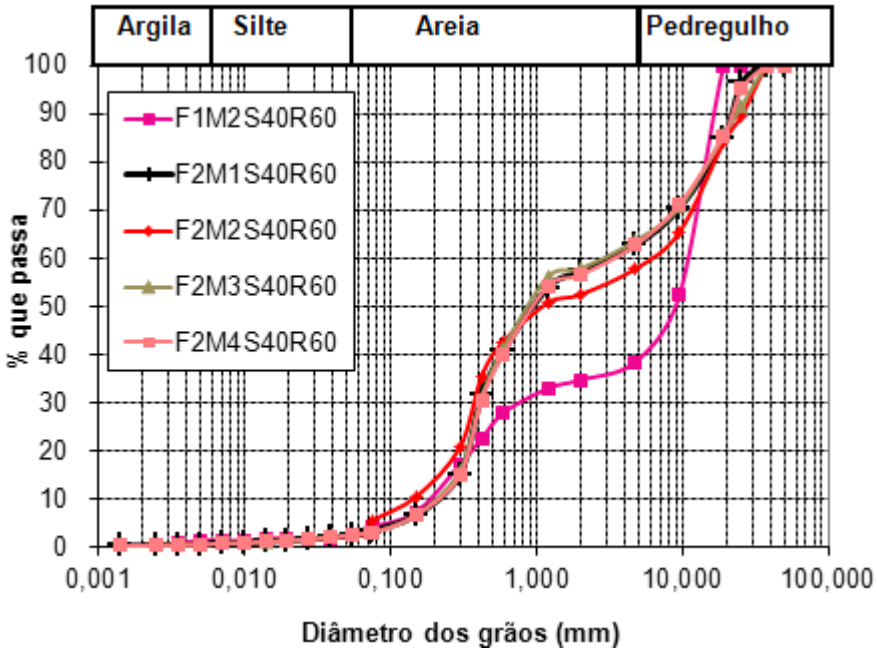



Figura 4.7 – Curvas granulométricas das misturas com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado.

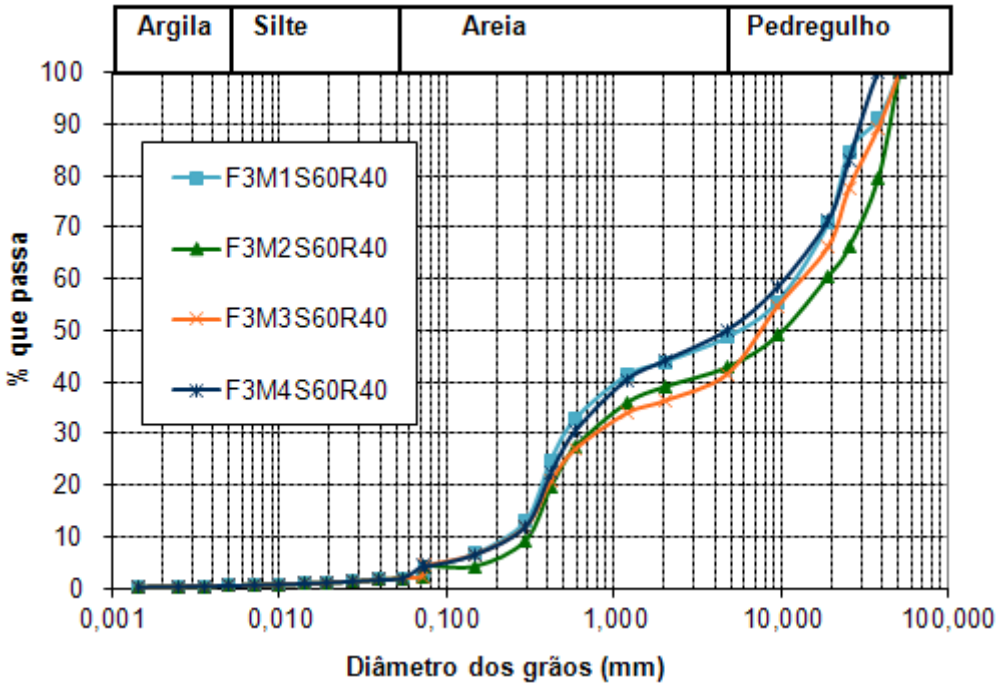



Figura 4.8 – Curvas granulométricas das misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado.

Verificando os materiais separadamente, percebe-se que cada mistura guarda uma semelhança granulométrica, com exceção das amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_1M_2S_{40}R_{60}$, expostas nas Figuras 4.5 e 4.7, respectivamente.

De posse das curvas, pode-se verificar que 13 (treze) amostras apresentaram uma granulometria aberta, com Cc abaixo de 1; 04 (quatro) materiais se desenvolveram suavemente, ou seja, bem graduado, com Cc entre 1 e 3 e CNU > 4; e 01 (uma) amostra obteve $C_C$ superior a 3 e CNU > 5, indicando a uniformidade do material. A Tabela 5.2 apresenta todos os valores obtidos no $C_C$ e CNU, bem como os resultados de $D_{10}$ e o teor de material passante na peneira 0,42 mm.

Tabela 4.2 – Coeficiente de não uniformidade e curvatura, diâmetro efetivo e teor de material passante na peneira de 0,42 mm das amostras deste estudo.

| **Fases** | **Amostra** | **CNU** | **$C_C$** | **Distribuição granulométrica** | **$D_{10}$ (mm)** | **Teor de material passante na peneira de 0,42 mm (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $F_1S_{100}$ | 4,81 | 1,15 | Bem graduado | 0,10 | 54,08 |
| | $F_1R_{100}$ | 31,74 | 7,08 | Gran. uniforme | 0,38 | 10,65 |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | 21,63 | 0,23 | Gran. aberta | 0,15 | 36,93 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | 58,17 | 0,34 | Gran. aberta | 0,19 | 22,54 |
| 2 | $F_2P_1S_{100}$ | 4,88 | 1,37 | Bem graduado | 0,10 | 53,47 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | 6,73 | 1,32 | Bem graduado | 0,08 | 50,04 |
| | $F_2P_3S_{100}$ | 3,62 | 0,94 | Gran. aberta | 0,15 | 45,76 |
| | $F_2P_4S_{100}$ | 3,78 | 0,99 | Gran. aberta | 0,14 | 50,18 |
| | $F_2P_5R_{100}$ | 39,29 | 0,24 | Gran. aberta | 0,21 | 21,47 |
| | $F_2P_6R_{100}$ | 64,50 | 1,79 | Bem graduado | 0,29 | 13,49 |
| | $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | 16,16 | 0,24 | Gran. aberta | 0,21 | 31,50 |
| | $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | 43,09 | 0,16 | Gran. aberta | 0,14 | 35,53 |
| | $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | 14,88 | 0,27 | Gran. aberta | 0,20 | 31,24 |
| | $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | 16,95 | 0,23 | Gran. aberta | 0,21 | 30,46 |
| 3 | $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | 54,54 | 0,10 | Gran. aberta | 0,22 | 24,90 |
| | $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | 61,19 | 0,10 | Gran. aberta | 0,30 | 19,65 |
| | $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | 57,32 | 0,21 | Gran. aberta | 0,24 | 20,78 |
| | $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | 44,13 | 0,13 | Gran. aberta | 0,24 | 22,39 |

Analisando o coeficiente de não uniformidade, observou-se que quanto maior a quantidade de RCD beneficiado na mistura, maior era a dispersão entre os resultados (Tabela 4.2), ou seja, nos materiais compostos apenas por solo proveniente do estaqueamento, os dados variaram entre 3,62 a 6,73, entretanto ao se avaliar as amostras com 60% de RCD beneficiado os valores ficaram entre 14,88 a 58,18. Apesar da dispersão, todas as misturas executadas apresentaram CNU acima de 10, atendendo aos requisitos da NBR 15.116/04.

No que se refere ao percentual passante na peneira 0,42 mm (Tabela 4.2), notou-se que o solo proveniente do estaqueamento puro não atendia às especificações da NBR 15.116/04 (10 - 40%), contudo ao se misturar os materiais ocorreu a correção dos valores. Ressalta-se que este percentual garante uma quantidade mínima de material fino para promover um maior embricamento de sua fração graúda.

*4.3.1.1 Classificação Segundo Transportation Research Board (TRB)*

A TRB classifica os materiais em grupos e subgrupos, designados pelos símbolos $A_1$ a $A_8$, cujo comportamento como agregado para camadas do pavimento é de qualidade decrescente na ordem dos grupos e é muito usada pelos engenheiros no meio rodoviário.

Considerando os dados obtidos na granulometria e as características dos grupos e subgrupos listadas pelo DNIT (2006), tem-se que:

1) as amostras $F_1R_{100}$; $F_1M_2S_{40}R_{60}$; $F_2P_5R_{100}$; $F_2P_6R_{100}$; $F_3M_1S_{60}R_{40}$; $F_3M_2S_{60}R_{40}$; $F_3M_3S_{60}R_{40}$ e $F_3M_4S_{60}R_{40}$ fazem parte do subgrupo A-1-A, que contém, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulhos, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante;
2) as amostras $F_1M_1S_{70}R_{30}$; $F_2P_2S_{100}$; $F_2P_3S_{100}$; $F_2P_4S_{100}$; $F_2M_1S_{40}R_{60}$; $F_2M_2S_{40}R_{60}$; $F_2M_3S_{40}R_{60}$ e $F_2M_4S_{40}R_{60}$ estão incluídas no subgrupo A-2-4, o qual abrange materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites do grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do grupo A-3;
3) as amostras que se enquadraram no grupo A-3 foram $F_1S_{100}$ e $F_2P_1S_{100}$, equivalentes a areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou incluindo pequena quantidade de silte não plástico. Este grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho.

Ainda de acordo com o DNIT (2006), os materiais classificados como A-1-A, A-2-4 e A-3 apresentam um desempenho como subleito variando de excelente a bom[16].

[16] O DNIT (2006) não faz menção às demais camadas.

*4.3.1.2 Classificação Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)*

Na classificação SUCS os materiais são divididos em 15 (quinze) grupos[17], os quais estão em ordem decrescente do seu bom desempenho para uso como base de pavimento, conforme Vargas (1997).

A Tabela 4.3 expõe a classificação feita por meio do Sistema Unificado de Classificação dos Solos das amostras investigadas. Para efeito de comparação, também foi inserida a classificação TRB para cada amostra.

Tabela 4.3 – Classificação das amostras deste estudo segundo SUCS e TRB.

| Fase | Amostra | Classificação SUCS | Classificação TRB |
|---|---|---|---|
| 1 | $F_1S_{100}$ | SM | A-3 |
| | $F_1R_{100}$ | GW | A-1-A |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | SM | A-2-4 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | GP | A-1-A |
| 2 | $F_2P_1S_{100}$ | SM | A-3 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | SM | A-2-4 |
| | $F_2P_3S_{100}$ | SP | A-2-4 |
| | $F_2P_4S_{100}$ | SM | A-2-4 |
| | $F_2P_5R_{100}$ | SP | A-1-A |
| | $F_2P_6R_{100}$ | GW | A-1-A |
| | $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | SP | A-2-4 |
| | $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | SM | A-2-4 |
| | $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | SP | A-2-4 |
| | $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | SP | A-2-4 |
| 3 | $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | GP | A-1-A |
| | $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | GP | A-1-A |
| | $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | GP | A-1-A |
| | $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | SP | A-1-A |

Como todas as amostras obtiveram classificação equivalente a areia e pedregulho (Tabela 4.3), não existiu fração fina suficiente para afetar o seu comportamento, sendo classificado de acordo com as suas curvas granulométricas.

[17] Os símbolos utilizados para uma referência imediata correspondem as iniciais das palavras inglesas e sueca que dignam os tipos de solos: G = *gravel* (pedregulho), S = *sand* (areia), L = *low* (baixo), H = *high* (alto), W = *well graded* (bem graduado), P = *poor graded* (mal graduado), F = *fines* (fino), C = *clay* (argila) e M = *mo* (silte).

### 4.3.2 Densidade real

Na Tabela 4.4, observa-se que os resultados das amostras variaram entre 2,447 e 2,716, possuindo resultados semelhantes a outros estudos desenvolvidos com Resíduos de Construção Civil, como por exemplo, os valores encontrados por Araújo Jr. (2010), os quais foram de 2,630 a 2,765.

Tabela 4.4 – Compilação dos resultados de densidade real dos materiais desta pesquisa.

| Fase | Amostra | Densidade real |
|---|---|---|
| 1 | $F_1S_{100}$ | 2,558 |
| | $F_1R_{100}$ | 2,575 |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | 2,570 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | 2,716 |
| 2 | $F_2P_1S_{100}$ | 2,449 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | 2,677 |
| | $F_2P_3S_{100}$ | 2,534 |
| | $F_2P_4S_{100}$ | 2,577 |
| | $F_2P_5R_{100}$ | 2,447 |
| | $F_2P_6R_{100}$ | 2,686 |

### 4.3.3 Limites de consistência

Por serem caracterizadas como materiais essencialmente granulares, nenhuma das amostras das Fases 1 e 2 apresentaram limites de liquidez e plasticidade, comportando-se como material não plástico.

### 4.3.4 Índice de forma

Como o índice de forma aborda apenas o agregado graúdo com dimensão máxima característica superior a 9,5 mm, foram ensaiadas apenas as amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$, as quais apresentaram como resultados, respectivamente, 2,2 e 2,1, atendendo ao limite máximo de 3,0 da relação comprimento/espessura presente na NBR 7809/83.

Para Mendes (2002), os agregados com índice de forma próximo a 1,0 tem forma cúbica e os de grãos lamelares possuem valores bem maiores, sendo considerado aceitável o limite de 3,0.

De acordo com a Tabela 2.11, um dos valores encontrados por Nóbrega e Melo (2009), 2,32, ficou bem próximo aos definidos neste estudo (2,2 e 2,1). Já os resultados de Fernandes (2004), 2,7 e 2,9, mostraram-se perto do limite estabelecido pela norma de agregado reciclado (3,0).

## 4.4 ABRASÃO “LOS ANGELES”

Assim como o índice de forma, a Abrasão “Los Angeles” se refere ao agregado graúdo, tendo sido ensaiadas apenas as amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$, as quais obtiveram graduação B e, respectivamente, 27% e 26% de desgaste, sendo inferior aos 50% definido como limite máximo de abrasão pela NBR NM 51/01.

Conforme citado no item 1.3.3.6, as NBR’s 15.115/04 e 15.116/04 não fazem referência a uma faixa de limites para o desgaste, mensurado pela abrasão “Los Angeles”, entretanto camadas estabilizadas granulometricamente devem apresentar valores inferiores a 55%, de acordo com a NBR 11.804/91, e a brita graduada deve possuir desgaste inferior a 40%, segundo a NBR 11.806/91, valores atendidos pelas duas amostras analisadas nesta pesquisa.

## 4.5 COMPACTAÇÃO

A compactação, executada por meio da aplicação de peso ou apiloamento, permitiu o aumento da densidade aparente do material lançado, aumentando também a sua resistência.

As curvas de compactação mostram a relação entre a massa específica seca aparente e o teor de umidade nas 18 (dezoito) situações investigadas (Figura 4.9).

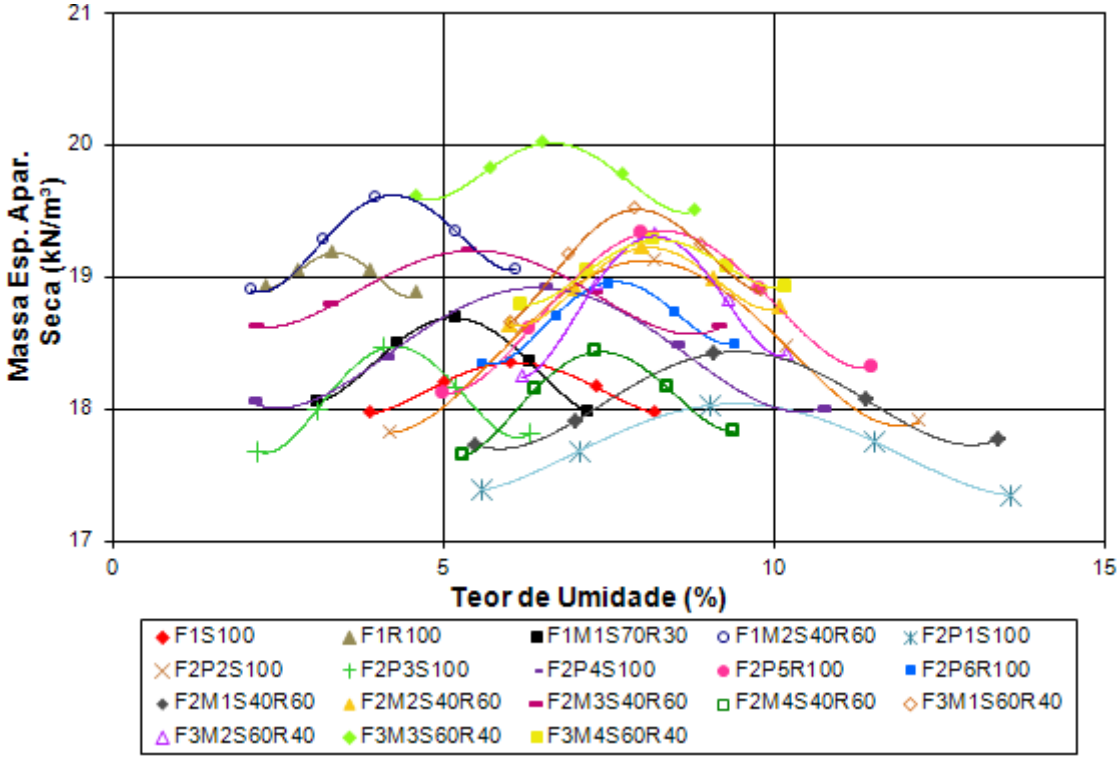



Figura 4.9 – Curvas de compactação das amostras desta pesquisa.

A fim de facilitar a verificação dos resultados mostrados na Figura 4.9, a umidade ótima e a massa específica seca máxima atingidas foram compiladas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados da compactação dos materiais desta pesquisa.

| Fase | Amostra | Umidade ótima (%) | Massa esp. ap. seca máxima (kN/m³) |
|---|---|---|---|
| 1 | $F_1S_{100}$ | 6,00 | 18,35 |
| | $F_1R_{100}$ | 3,30 | 19,18 |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | 5,20 | 18,69 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | 3,99 | 19,60 |
| 2 | $F_2P_1S_{100}$ | 9,03 | 18,03 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | 8,20 | 19,12 |
| | $F_2P_3S_{100}$ | 4,10 | 18,46 |
| | $F_2P_4S_{100}$ | 6,50 | 18,92 |
| | $F_2P_5R_{100}$ | 8,00 | 19,33 |
| | $F_2P_6R_{100}$ | 7,50 | 18,96 |
| | $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | 9,10 | 18,42 |
| | $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | 8,00 | 19,22 |
| | $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | 5,40 | 19,20 |
| | $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | 7,30 | 18,43 |
| 3 | $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | 7,90 | 19,51 |
| | $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | 8,20 | 19,31 |
| | $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | 6,50 | 20,01 |
| | $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | 8,20 | 19,28 |

Comparando a massa específica seca máxima da Tabela 2.17 (item 2.3.3.4) com a Tabela 4.5, foi possível perceber que alguns estudos mostraram resultados semelhantes aos encontrados nesta pesquisa. Pode-se citar, por exemplo, Jiménez *et* al. (2011), que apresentou dados entre 18,30 e 20,00 kN/m³, bem próximos aos obtidos neste estudo (entre 18,03 e 20,01 kN/m³). Vale destacar que as umidades dos materiais foram diferentes, pois nesta pesquisa variou entre 3,3 e 9,1% e na de Jiménez (2011) a variação ficou entre 10,3 e 13,3%, ressaltando que os materiais analisados nas pesquisas eram diferentes, assim como as energias utilizadas.

Conforme a Tabela 4.5, percebe-se maior dispersão em relação à umidade ótima das amostras, as quais variaram entre 3,3 e 9,1%, uma vez que a presença de certos materiais, como tijolo e cerâmica, proporcionam uma absorção de água mais elevada.

As massas específicas secas máximas atingidas pelas amostras foram dispostas na Figura 4.10, separadas pela quantidade de resíduo beneficiado presente nos materiais ($R_0$, $R_{30}$, $R_{40}$, $R_{60}$, $R_{100}$).

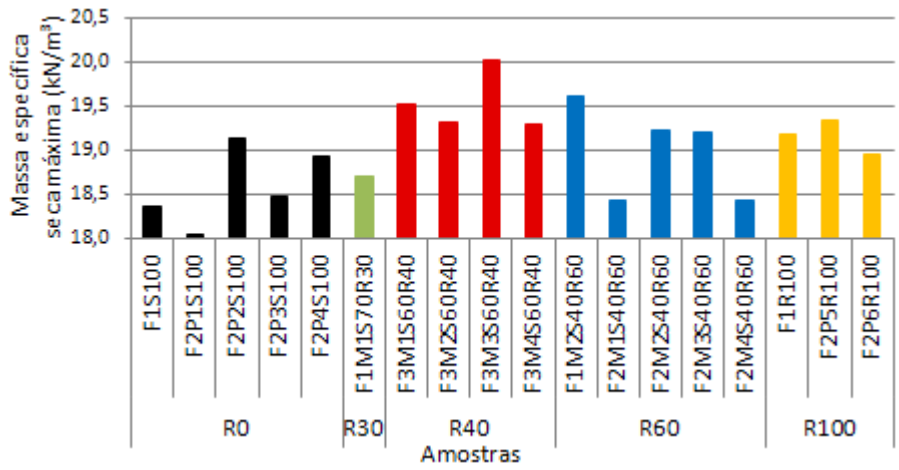



Figura 4.10 – Massas específicas secas máximas das amostras deste estudo em função da proporção de RCD beneficiado.

Na Figura 4.10, nota-se que as misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado ($R_{40}$) apresentam maiores valores de massa específica seca máxima, justificada pelo embricamento mais eficiente entre grãos, ocasionado por fragmentos de pedra ou pedregulhos, os quais podem funcionar como aglutinante, confirmando as classificações citadas no item 4.4.1.1.

Confrontando ainda a Figura 4.10 com as classificações TRB e SUCS, observou-se que os menores valores são de amostras com pequena quantidade equivalente a silte ou argila, incluindo também as misturas de areia fina mal graduada ($F_1S_{100}$; $F_2P_1S_{100}$; $F_2P_3S_{100}$; $F_2M_1S_{40}R_{60}$ e $F_2M_4S_{40}R_{60}$).

A dispersão dos resultados foi considerada em função da mediana das massas específicas secas máximas de cada proporção (Figura 4.11 e Tabela 4.6), uma vez que em cada situação houve uma quantidade de amostra diferente analisada, ou seja, três amostras foram verificadas com 100% de resíduo beneficiado e cinco foram avaliadas com 100% de solo proveniente do estaqueamento, por exemplo.

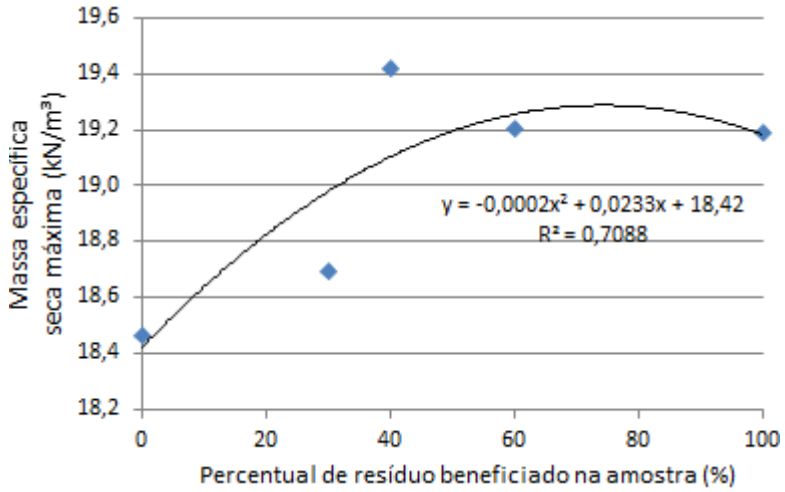



Figura 4.11 – Dispersão da mediana das massas específicas dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado.

Tabela 4.6 – Correlação entre as medianas das massas específicas dos materiais em função da proporção de RCD beneficiado.

| | **Percentual de RCD beneficiado (%) - X** | **Massa específica seca máxima (kN/m³) - Y** | **$X^2$** | **$Y^2$** | **XY** | **$r_{xy}$** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 18,46 | 0 | 340,77 | 0 | |
| | 30 | 18,69 | 900 | 349,32 | 560,70 | |
| | 40 | 19,41 | 1600 | 376,75 | 776,40 | 0,68 |
| | 60 | 19,20 | 3600 | 368,64 | 1152,00 | |
| | 100 | 19,18 | 10000 | 367,87 | 1918,00 | |
| ∑= | 230 | 94,94 | 16100 | 1803,35 | 4407,10 | |

A partir da Figura 4.11 e Tabela 4.6, pode-se observar que a associação entre as duas variáveis - percentual de resíduo beneficiado e massa específica seca máxima - apresentam uma correlação moderada positiva, visto que as variáveis crescem no mesmo sentido e o $r_{xy}$ foi igual a 0,68[18].

Já a qualidade do ajuste dos pontos traçados no diagrama de dispersão em torno da linha de tendência de segunda ordem na Figura 4.11 foi medida por meio do coeficiente de determinação ($R^2$) e ficou em torno de 0,71. Vale destacar que quanto mais próximo de 1, melhor é o poder explicativo do modelo e quanto mais próximo de 0 indica uma menor relação linear entre as variáveis.

## 4.6 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

A realização dos ensaios de ISC com medição de expansão permitiu a construção das curvas Penetração *x* Pressão nas 22 (vinte e duas) situações, simulando condições desfavoráveis em campo, uma vez que os corpos de prova passaram quatro dias imersos em água (Figura 4.12).

Por meio da análise da Figura 4.12, pode-se observar que o comportamento mecânico do solo proveniente do estaqueamento melhorou após o acréscimo de resíduo beneficiado em todas as amostras das Fases 1, 2 e 3, foram elas $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (P), $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (CP), $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (P), $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (CP), $F_2M_1S_{40}R_{60}$, $F_2M_2S_{40}R_{60}$, $F_2M_3S_{40}R_{60}$, $F_2M_4S_{40}R_{60}$, $F_3M_1S_{60}R_{40}$, $F_3M_2S_{60}R_{40}$, $F_3M_3S_{60}R_{40}$ e $F_3M_4S_{60}R_{40}$.

Para facilitar a comparação de desempenho entre os materiais com a mesma proporção de solo proveniente do estaqueamento e resíduo beneficiado, separou-se as amostras nas

[18] Interpretação dos valores de $r_{xy}$:
a) 0 a $\pm$ 0,19 – correlação bem fraca
b) -0,20 a - 0,39 ou 0,20 a 0,39 – correlação fraca
c) -0,40 a -0,69 ou 0,40 a 0,69 – correlação moderada
d) -0,70 a -0,89 ou 0,70 a 0,89 – correlação forte
e) -0,90 a -0,99 ou 0,90 a 0,99 – correlação muito forte
f) -1 ou +1 – correlação perfeita
Disponível em <http://w3.ufsm.br/adriano/aulas/coreg/Aula%2001%20Correla%E7ao%20Linear.pdf>.

Figuras 4.13 a 4.17, que são respectivamente: todos os meteriais investigados neste estudo (22 amostras), solo proveniente do estaqueamento (06 amostras), RCD beneficiado (04 amostras), mistura com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado (02 amostra), 40% de solo proveniente do estaqueameto e 60% de RCD beneficiado (06 amostras) e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado (04 amostras).

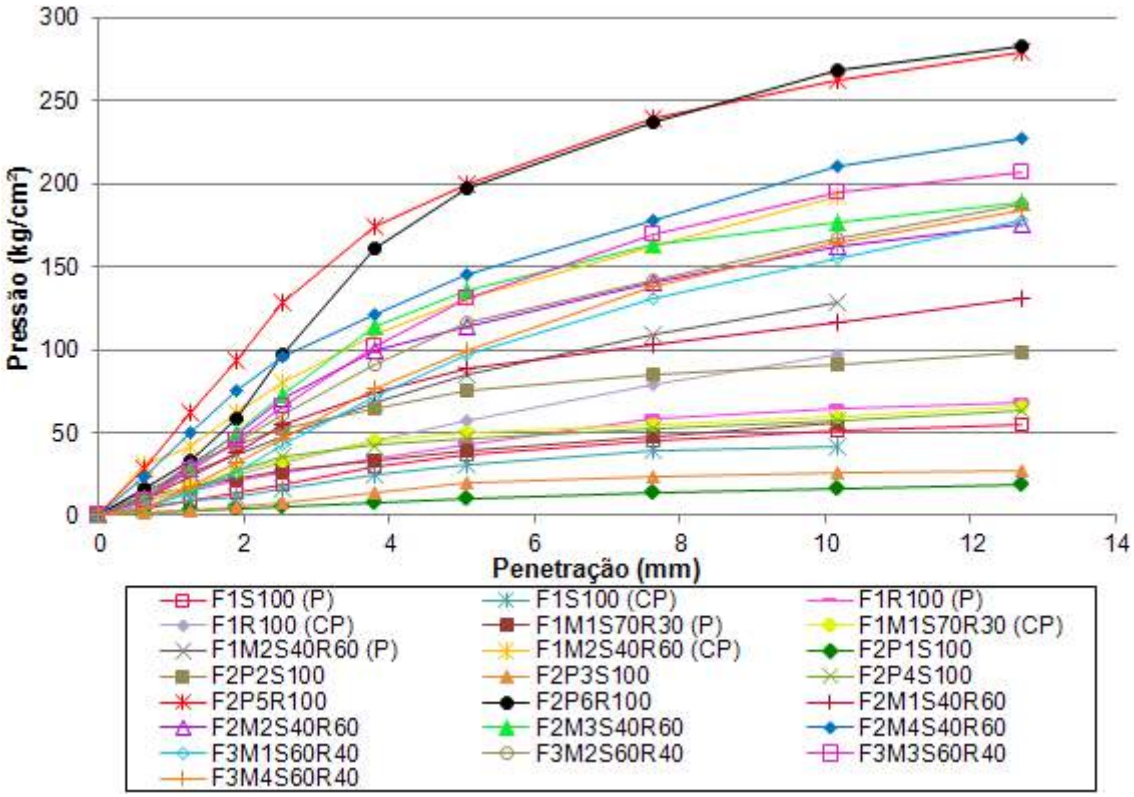



Figura 4.12 – Curvas Penetração *x* Pressão no ensaio ISC das amostras desta pesquisa.

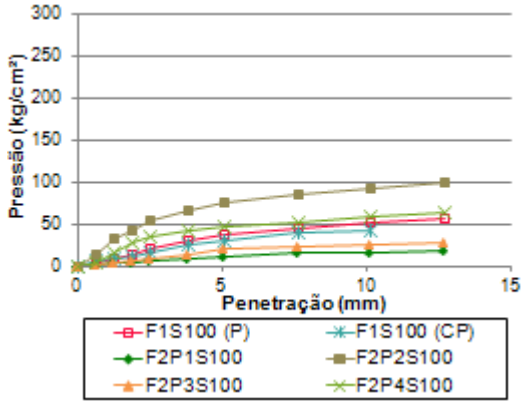



Figura 4.13 – Curvas Penetração *x* Pressão das amostras constituídas por solo proveniente do estaqueamento.

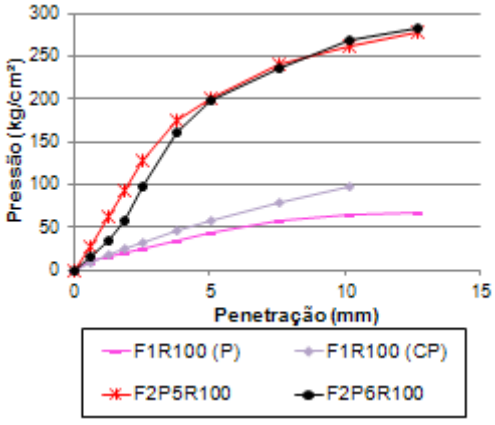



Figura 4.14 – Curvas Penetração *x* Pressão das amostras constituídas por RCD beneficiado.

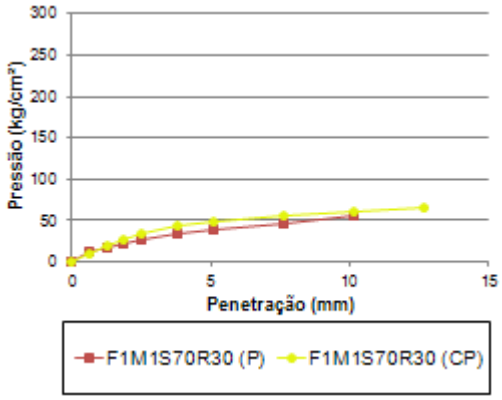



Figura 4.15 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 70% de solo proveniente do estaqueamento e 30% de RCD beneficiado.

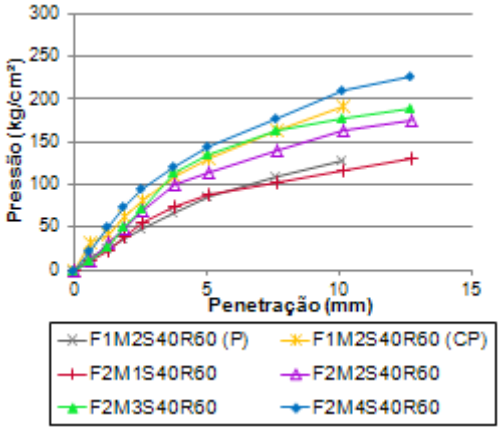



Figura 4.16 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado.

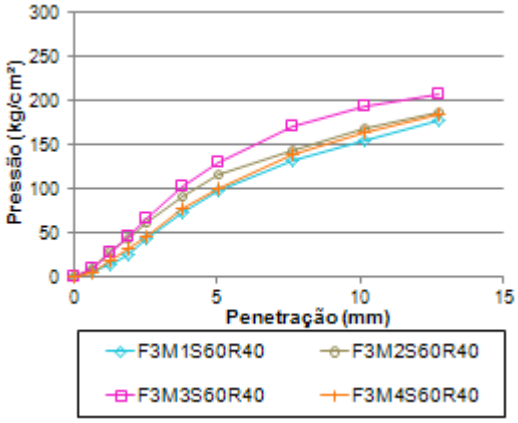



Figura 4.17 – Curvas Penetração *x* Pressão das misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado.

Analisando o traçado das curvas na Figura 4.13, é possível perceber que as amostras $F_2P_1S_{100}$ e $F_2P_3S_{100}$ apresentam as menores resistências à penetração ao pistão, uma vez que existia resto de matéria orgânica (raízes presentes no solo proveniente da execução da estaca) presente no material. Contudo, ao se misturar 40% de solo proveniente do estaqueamento com 60% de RCD beneficiado o traçado das curvas dos materiais $F_2M_1S_{40}R_{60}$ e $F_2M_3S_{40}R_{60}$ (Figura 4.16) apresentou um aumento considerável em suas resistências, por conta da adição de RCD beneficiado.

Na Figura 4.14, nota-se que as amostras de resíduo beneficiado das Fases 1 e 2 apresentam comportamento diferente, justificado pela variação dos constituintes de

RCD da atividade de demolição, os quais ora podem ser mais resistentes, como o concreto, ora pode ter resistência inferior, como material cerâmico. Entretanto, independente do tipo de amostra do RCD, ao misturá-las com o solo proveniente do estaqueamento, houve uma melhora do desempenho de 1,96 e 3 vezes, nas amostras $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (P) e $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (CP), respectivamente (Figura 4.16).

Observa-se ainda que comparando as proporções das misturas, aquelas que mostram maiores resistência à penetração do pistão são: 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de resíduo beneficiado (Figura 4.16) e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado (Figura 4.17).

A partir das correções realizadas nos pontos de inflexão, foi possível obter as pressões em porcentagem em relação às pressões padrões da brita padronizada, exposta na Tabela 4.7, a qual mostra também os valores de expansão encontrados.

Tabela 4.7 – Valores de ISC e expansão.

| Fase | Amostra | ISC (%) | Expansão (%) |
|---|---|---|---|
| 1 | $F_1S_{100}$ (P) | 35 | 0 |
| | $F_1S_{100}$ (CP) | 29 | 0,1 |
| | $F_1R_{100}$ (P) | 41 | 0 |
| | $F_1R_{100}$ (CP) | 55 | 0 |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (P) | 38 | 0,2 |
| | $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (CP) | 48 | 0,3 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (P) | 81 | 0,1 |
| | $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (CP) | 125 | 0,1 |
| 2 | $F_2P_1S_{100}$ | 10 | 0,2 |
| | $F_2P_2S_{100}$ | 76 | 0,1 |
| | $F_2P_3S_{100}$ | 19 | 0,1 |
| | $F_2P_4S_{100}$ | 51 | 0,1 |
| | $F_2P_5R_{100}$ | 190 | 0 |
| | $F_2P_6R_{100}$ | 188 | 0 |
| | $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | 84 | 0 |
| | $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | 108 | 0 |
| | $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | 130 | 0 |
| | $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | 138 | 0 |
| 3 | $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | 92 | 0 |
| | $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | 111 | 0 |
| | $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | 124 | 0 |
| | $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | 94 | 0 |

Como exposto anteriormente, as amostras $F_2P_1S_{100}$ e $F_2P_3S_{100}$ tiveram suas resistências aumentadas ao serem misturadas com resíduo beneficiado ($F_2M_1S_{40}R_{60}$ e $F_2M_3S_{40}R_{60}$), na ordem de 8,3 e 6,9 vezes, respectivamente, atendendo aos critérios estabelecidos pela NBR 15.115/04 para camadas de reforço do subleito, ISC > 12%; sub-base, ISC > 20%; e bases, ISC > 60% de pavimentos.

Os materiais $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$ alcançaram os valores de ISC mais expressivos, 190% e 188%, respectivamente, justificado por uma provável reação pozolânica e pela acomodação das partículas mais finas entre as parcelas com dimensões maiores. A reação pozolânica em agregados provenientes de RCD foi observada por Motta (2005), que definiu como sendo baixo para uma peça estrutural, contudo considerável para pavimentos. Destaca-se que para confirmar tal comportamento, pode-se executar uma investigação sobre a presença de óxidos nas amostras.

As misturas realizadas entre o solo proveniente do estaqueamento e o resíduo beneficiado atenderam aos requisitos da norma de agregado reciclado, permitindo o uso do material até como base, com exceção das amostras $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (P) e $F_1M_1S_{70}R_{30}$ (CP), que cumpriu as especificações somente para reforço do subleito e sub-base.

Dentre os resultados de ISC apresentados por Oliveira (2007) na Figura 2.14, observa-se que duas amostras (ARM 25/75 10% SA e ARM 25/75 20% SA) mostraram resistência elevada, com a presença de solo argiloso, resultante de um embricamento maior entre os grãos, também identificados nesta pesquisa, por exemplo nas amostras, $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (P), $F_1M_2S_{40}R_{60}$ (CP), $F_2M_1S_{40}R_{60}$, $F_2M_2S_{40}R_{60}$, $F_2M_3S_{40}R_{60}$, $F_2M_4S_{40}R_{60}$, $F_3M_1S_{60}R_{40}$, $F_3M_2S_{60}R_{40}$, $F_3M_3S_{60}R_{40}$ e $F_3M_4S_{60}R_{40}$.

No que se refere as medições de expansão, foram confirmadas as características arenosas das amostras, já que as dilatações foram muito pequenas ou nulas, as quais foram no máximo de 0,3% (Tabela 4.7). Destaca-se que o máximo admitido pela NBR 15.116/04 é de 1% para reforço do subleito e sub-base e de 0,5% para base de pavimentos executados com agregados reciclados.

A fim de analisar a relação entre a quantidade de material na mistura (solo proveniente do estaqueamento e resíduo beneficiado) e o ISC, elaborou-se a Figura 4.18, a qual as separa pela quantidade de resíduo beneficiado dos materiais ($R_0$, $R_{30}$, $R_{40}$, $R_{60}$, $R_{100}$).

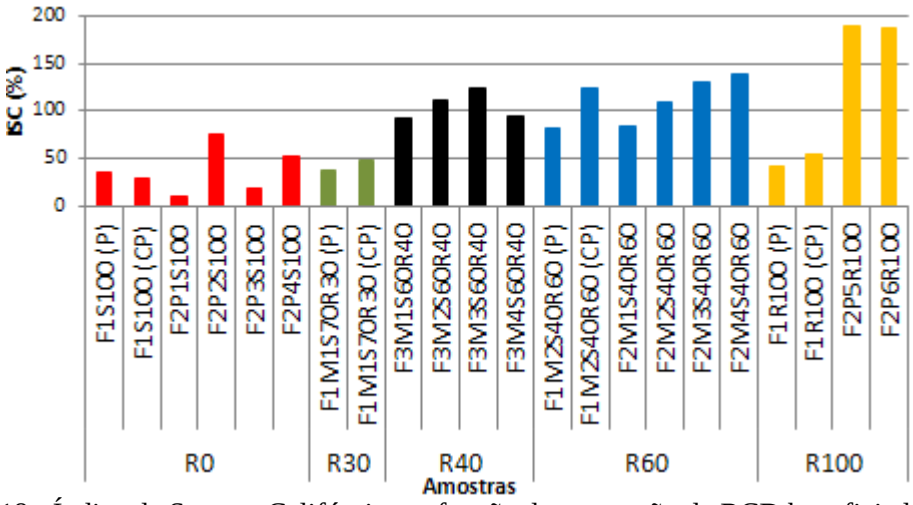



Figura 4.18 - Índice de Suporte Califórnia em função da proporção de RCD beneficiado nas amostras desta pesquisa.

As amostras de solo proveniente do estaqueamento $F_1S_{100}$ (P); $F_1S_{100}$ (CP); $F_2P_1S_{100}$ e $F_2P_3S_{100}$ apresentaram os menores valores de ISC, conforme a Figura 4.18, com característica equivalente a areia finas com granulometria aberta (item 3.4.1) e as menores massas específicas secas máximas (item 4.5).

Na Figura 4.18, fica claro perceber que as misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado ($R_{40}$) e com 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado ($R_{60}$) mostraram desempenho satisfatório, com o menor valor de ISC de 81,1%. Justificam-se estes valores por maior entrosamento dos grãos, podendo ser aplicadas em camadas de reforço do subleito, sub-base e base do pavimento.

De maneira geral, observa-se que os ISC dos resíduos obtidos em estudos anteriores variaram de 10 a 138% (Tabela 2.19) e que esta variação foi semelhante aos dados alcançados nas amostras desta pesquisa, contudo cada investigação apresenta particularidades, que podem decorrer da composição de suas amostras, da energia de compactação e dos dias de imersão em água. Por exemplo, Oliveira (2007) notou um

aumento de ISC em 2,85 vezes, por conta da mudança da energia de compactação e das dosagens dos materiais.

Para apresentar e descrever de forma mais apropriada as informações, a dispersão dos valores obtidos foi feita em função da mediana dos ISC's de cada proporção (Figura 4.19 e Tabela 4.8), análoga à análise do item 4.5, permitindo um melhor endendimento dos fenômenos em geral.

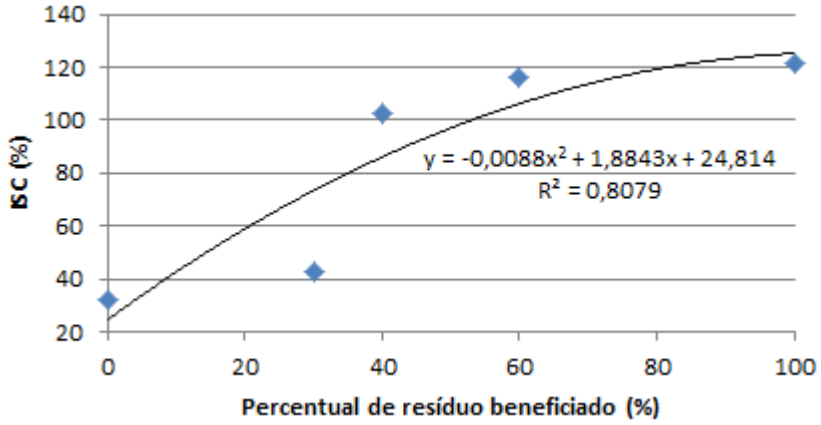



Figura 4.19 – Dispersão da mediana dos ISC's dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado.

Tabela 4.8 – Correlação entre as medianas dos ISC's dos materiais desta pesquisa em função da proporção de RCD beneficiado.

| | Percentual de RCD beneficiado (%) - X | ISC (%) - Y | $X^2$ | $Y^2$ | XY | rxy |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 32 | 0 | 1036,84 | 0 | |
| | 30 | 43 | 900 | 1836,12 | 1285,50 | |
| | 40 | 103 | 1600 | 10537,02 | 4106,00 | 0,86 |
| | 60 | 116 | 3600 | 13537,32 | 6981,00 | |
| | 100 | 122 | 10000 | 14786,56 | 12160,00 | |
| $\sum_{=}$ | 230 | 416 | 16100 | 41733,87 | 24532,50 | |

De posse da Figura 4.19 e Tabela 4.8, verificou-se que a associação entre as duas variáveis (percentual de resíduo beneficiado e ISC) apresenta correlação forte positiva, uma vez que as variáveis crescem no mesmo sentido e o $r_{xy}$ foi igual a 0,86, próximo a +1.

A qualidade do ajuste dos pontos do diagrama de dispersão, medida através do coeficiente de determinação ($R^2$), ficou em torno de 0,81, significando que aproximadamente 81% da variância de ISC é explicada pela variância do percentual de resíduo beneficiado dos materiais.

## 4.7 TEOR DE SULFATOS

O teor máximo de sulfatos em relação à massa do agregado reciclado é de 2%, segundo a NBR 15.116/04. A partir desta especificação foi possível elaborar a Tabela 4.9, com os dados encontrados em 06 (seis) amostras da Fase 2.

Tabela 4.9 – Percentual de Contaminante – Sulfato nas amostras deste estudo.

| **Amostra** | **Teor de sulfato** |
|---|---|
| $F_2P_1S_{100}$ | 0 |
| $F_2P_2S_{100}$ | 0 |
| $F_2P_3S_{100}$ | 0 |
| $F_2P_4S_{100}$ | 0,09% |
| $F_2P_5R_{100}$ | 0,05% |
| $F_2P_6R_{100}$ | 0,04% |

Como o percentual de sulfato encontrado nas amostras puras foi muito pequeno, no máximo 0,09%, não houve a necessidade de realização do ensaio nas amostras misturadas.

## 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE A NBR 15.116/04 E OS DADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO

Por meio dos resultados preliminares e das características definidas pela NBR 15.116/04, elaborou-se a Tabela 4.10, em que os valores destacados em vermelho não atenderam às especificações da norma e em verde o material que obteve melhor desempenho.

Tabela 4.10 – Comparação entre os resultados obtidos na Fase 1 desta pesquisa e a NBR 15.116/04.

| **Parâmetros** | **NBR 15.116/04** | **Fase 1** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **$F_1M_1S_{70}R_{30}$** | **$F_1M_2S_{40}R_{60}$** | **$F_1R_{100}$** | **$F_1S_{100}$** |
| Coeficiente de não uniformidade | ≥ 10 | 20,00 | **66,67** | 24,76 | **5,00** |
| Material passante na peneira nº 40 (%) | Entre 10 e 40 | 36,93 | **22,54** | 10,65 | **54,08** |
| ISC (%) - Reforço do subleito | ≥ 12 | 38 e 48 | **81 e 125** | 41 e 55 | 35 e 29 |
| ISC (%) - Sub-base | ≥ 20 | 38 e 48 | **81 e 125** | 41 e 55 | 35 e 29 |
| ISC (%) - Base | ≥ 60 | **38 e 48** | **81 e 125** | **41 e 55** | **35 e 29** |
| Expansão (%) – Reforço do subleito | ≤ 1 | 0,2 e 0,3 | **0,1 e 0,1** | 0 | 0 e 0,1 |
| Expansão (%) – Sub-base | ≤ 1 | 0,2 e 0,3 | **0,1 e 0,1** | 0 | 0 e 0,1 |
| Expansão (%) – Base | ≤ 0,5 | 0,2 e 0,3 | **0,1 e 0,1** | 0 | 0 e 0,1 |
| Dimensão característica máxima dos grãos (mm) | 63,5 | 38,10 | **19,10** | 38,10 | 38,10 |

Diante dos dados, confirmou-se que as amostras tinham resistência (ISC) suficiente para aplicação em reforço do subleito e sub-base, contudo deveria ser realizada a mistura entre os dois materiais (RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento), com no máximo 70% de solo proveniente do estaqueamento, para a correção do coeficiente de não uniformidade e do material passante na peneira nº 40 (Tabela 4.10).

Na Tabela 4.10, nota-se que os valores de expansão das amostras atendem às especificações da norma aludida, permitindo o emprego destes materiais nas três camadas do pavimento (reforço do subleito, sub-base e base), visto que a expansão máxima alcançada foi de 0,3%. Ressalta-se que este critério só é valido mediante o atendimento do valor de ISC descrito na NBR 15.116/04.

Observou-se também que a amostra $F_1M_2S_{40}R_{60}$ apresentou conformidade com os principais requisitos da supracitada norma (Tabela 4.10), além disso, o ISC foi até 2 (duas) vezes maior que o necessário para um desempenho satisfatório em campo, ou seja, de 125%, enquanto o valor definido para camadas de base é de 60%.

Analisando a dimensão característica máxima dos grãos, verificou-se que houve a presença de agregados com 38,10 mm (Tabela 4.10), os quais atendem ao requisito da NBR 15.116/04 (limite máximo de 63 mm), apesar do diâmetro máximo do agregado fornecido pelo britador A ser de 25 mm, segundo informação fornecida pelo responsável pelo triturador.

Da mesma maneira que se elaborou a Tabela 4.10 na Fase 1, fez-se a Tabela 4.11 com os resultados da Fase 2, onde os valores que não atenderam às especificações da norma de agregado reciclado foram destacados em vermelho e as amostras que obtiveram os melhores resultados foram expostos em verde.

Na Fase 2, confirmou-se a necessidade de realizar a mistura entre os materiais (resíduo beneficiado e solo proveniente do estaqueamento), para a correção do coeficiente de uniformidade e do percentual de material passante na peneira nº 40, uma vez que as amostras constituídas apenas por solo proveniente do estaqueamento ($F_2P_1S_{100}$, $F_2P_2S_{100}$, $F_2P_3S_{100}$, e $F_2P_4S_{100}$) não atingiram os limites estabelecidos pela NBR 15.116/04 (Tabela 4.11).

As misturas desta etapa (40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado), presentes na Tabela 4.11, atenderam aos critérios da supracitada norma, comprovando a potencialidade técnica do material no que diz respeito à sua aplicação em camadas de pavimentos.

As amostras $F_2M_1S_{40}R_{60}$, $F_2M_2S_{40}R_{60}$, $F_2M_3S_{40}R_{60}$ e $F_2M_4S_{40}R_{60}$ apresentaram ISC suficiente para aplicação em reforço do subleito, sub-base e base, sendo 84%, 108%, 130% e 138%, respectivamente. Além deste desempenho, as suas expansões foram nulas (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Comparação entre os resultados obtidos na Fase 2 desta pesquisa e a NBR 15.116/04.

| **Parâmetros** | **NBR 15.116/ 2004** | **Fase 2** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **$F_2P_1S_{100}$** | **$F_2P_2S_{100}$** | **$F_2P_3S_{100}$** | **$F_2P_4S_{100}$** | **$F_2P_5R_{100}$** | **$F_2P_6R_{100}$** | **$F_2M_1S_{40}R_{60}$** | **$F_2M_2S_{40}R_{60}$** | **$F_2M_3S_{40}R_{60}$** | **$F_2M_4S_{40}R_{60}$** |
| Coeficiente de não uniformidade | ≥ 10 | **4,88** | **6,73** | **3,62** | **3,77** | **39,28** | **64,49** | **16,16** | **43,08** | **14,88** | **16,95** |
| Material passante na peneira nº 40 (%) | Entre 10 e 40 | **53,47** | **50,04** | **45,76** | **50,18** | **21,47** | **13,49** | **31,50** | **35,53** | **31,24** | **30,46** |
| ISC (%) - Reforço do subleito | ≥ 12 | **10** | 76 | 19 | 51 | **190** | **188** | **84** | **108** | **130** | **138** |
| ISC (%) - Sub-base | ≥ 20 | **10** | 76 | **19** | 51 | **190** | **188** | **84** | **108** | **130** | **138** |
| ISC (%) - Base | ≥ 60 | **10** | 76 | **19** | **51** | **190** | **188** | **84** | **108** | **130** | **138** |
| Expansão (%) - Reforço do subleito | ≤ 1 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** |
| Expansão (%) – Sub-base | ≤ 1 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** |
| Expansão (%) – Base | ≤ 0,5 | 0,20 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** | **0,00** |
| Dimensão característica máxima dos grãos (mm) | 63,5 | 19,10 | 38,10 | 19,10 | 38,10 | **38,10** | **38,10** | **38,10** | **38,10** | **38,10** | **38,10** |
| Índice de forma | < 3,0 | ---- | ---- | ---- | ---- | **2,2** | **2,1** | **----** | **----** | **----** | **----** |
| Desgaste (%)* | < 50 | ---- | ---- | ---- | ---- | **27** | **26** | **----** | **----** | **----** | **----** |
| Teor de sulfato (%) | < 2,0 | 0 | 0 | 0 | 0,09 | **0,05** | **0,04** | **----** | **----** | **----** | **----** |

* NBR NM 51/01

De posse do baixo valor de ISC das amostras $F_2P_1S_{100}$ (10,20%) e $F_2P_3S_{100}$ (18,70%), notou-se a importância da retiradas de impurezas - madeira, aço, gesso, entre outros – do material antes da aplicação nas camadas do pavimento (trecho experimental), já que estes reduzem a capacidade de suporte do solo e do material granular. Destaca-se que neste momento o objetivo foi verificar o desempenho do material após o acréscimo de resíduo beneficiado, visto que o ISC aumentou em até 8,3 vezes, conforme apresentado no item 4.6.

Com relação à dimensão característica máxima dos grãos, o valor máximo encontrado foi de 38,10 mm com proporção variando entre 2 e 22% nas amostras da Fase 2, atendendo ao limite máximo de 63 mm da norma de agregado reciclado, entretanto mais uma vez esta informação foi diferente daquela fornecida pelo responsável pelo britador A, o qual afirmou que o diâmetro máximo fornecido era de 25mm.

Outro ponto a se frisar é a diferença obtida nos resultados de ISC da amostra constituídas apenas por resíduo beneficiado das Fases 1 (41% e 55%) e 2 (190% e 188%). Este fato comprova que a constituição do RCD tem relevância, uma vez que as energias de compactação foram mantidas durante o ensaio.

O teor de sulfato analisado nas amostras puras ($F_2P_1S_{100}$, $F_2P_2S_{100}$, $F_2P_3S_{100}$, $F_2P_4S_{100}$, $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$) não mostrou percentual acima de 2%, limite estabelecido pela NBR 15.116/04, e por este motivo não foi realizada a verificação deste parâmetro nas misturas.

No que se refere aos agregados graúdos ($F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100}$), foram verificados o índice de forma, por meio da NBR 7809/83, e a abrasão “Los Angeles”, através da NBR NM 51/01, onde os limites máximos de 3,0 e 50%, respectivamente, foram respeitados, conforme apresentado na Tabela 4.11.

Como citado anteriormente, decidiu-se executar a Fase 3 com uma nova proporção, 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado, para utilizar o máximo possível de solo proveniente do estaqueamento sem comprometer o comportamento do pavimento, sendo elaborada a Tabela 4.12, também com o intuito de

comparar os resultados obtidos e as especificações da norma de agregado reciclado. Os dados foram todos apresentados em verde, já que obtiveram o desempenho mínimo estabelecido.

Tabela 4.12 – Comparação entre os resultados obtidos na Fase 3 deste estudo e a NBR 15.116/04.

| **Parâmetros** | **NBR 15.116/04** | **Fase 3** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **$F_3M_1S_{60}R_{40}$** | **$F_3M_2S_{60}R_{40}$** | **$F_3M_3S_{60}R_{40}$** | **$F_3M_4S_{60}R_{40}$** |
| Coeficiente de não uniformidade | ≥ 10 | **54,54** | **61,19** | **57,32** | **44,13** |
| Material que passa na peneira nº 40 (%) | Entre 10 e 40 | **24,90** | **19,65** | **20,78** | **22,39** |
| ISC (%) - Reforço do subleito | ≥ 12 | **92** | **111** | **124** | **94** |
| ISC (%) - Sub-base | ≥ 20 | **92** | **111** | **124** | **94** |
| ISC (%) - Base | ≥ 60 | **92** | **111** | **124** | **94** |
| Expansão (%) - Reforço do subleito | ≤ 1 | **0** | **0** | **0** | **0** |
| Expansão (%) – Sub-base | ≤ 1 | **0** | **0** | **0** | **0** |
| Expansão (%) – Base | ≤ 0,5 | **0** | **0** | **0** | **0** |
| Dimensão característica máxima dos grãos (mm) | 63,5 | **38,1** | **38,1** | **38,1** | **25,4** |

Os principais critérios da aludida norma (coeficiente de não uniformidade, material que passa na peneira nº 40, ISC, expansão e dimensão máxima dos grãos) foram atendidos pelas 04 misturas analisadas na Fase 3, com ISC até 2 (duas) vezes maior que o limite mínimo para base do pavimento flexível (60%), obtido pela amostra $F_3M_3S_{60}R_{40}$.

A dimensão característica máxima dos grãos foi de 38,10 mm (Tabela 4.12), contudo, nesta ocasião, as amostras coletadas já estavam aplicadas na sub-base do trecho experimental e tinham sido fornecidas pelos dois britadores móveis (A e B) do canteiro de obras.

Vale ressaltar que mais uma vez as misturas atenderam às especificações do coeficiente de uniformidade e do percentual de material passante na peneira nº 40, estabelecido pela NBR 15.116/04, comprovando mais uma vez a necessidade de execução da mistura dos materiais.

Dentre os materiais analisados nesta fase, todos atenderam os requisitos da NBR 15.116/04, entretanto o que apresentou melhor desempenho foi $F_3M_3S_{60}R_4$ (124%).

## 4.9 CONTROLES DE CAMPO

Os resultados obtidos na verificação da umidade e do grau de compactação, por meio do método Speedy e frasco de areia, respectivamente, foram compilados na Tabela 4.13, junto com os dados da compactação realizada em laboratório.

Tabela 4.13 – Análises de campo.

| Local | Setor/Estaca | Situa-ção* | Método Speedy | Frasco de areia | Compactação | | Grau de Compac-tação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Umidade (%) | Massa esp. do solo seco (kN/m³) | Umidade ótima (%) | Massa específica aparente seca máxima (kN/m³) | |
| 1 | Setor J – ENI** | BD | 9,5 | 19,08 | 8,0 | 19,00 | 100% |
| | Setor J – ENI | EX | **10,0** | 19,34 | 8,0 | 19,00 | 102% |
| 2 | Setor I – E13 | EX | 7,2 | 20,16 | 8,4 | 19,57 | 103% |
| | Setor I – E11 | BE | 7,4 | 20,38 | 8,4 | 19,57 | 104% |
| | Setor I – E12+10 | EX | 7,5 | 19,54 | 8,4 | 19,57 | 100% |
| | Setor J – E3+10 | EX | 7,6 | 20,54 | 8,4 | 19,57 | 105% |
| | Setor J – E3 | EX | **4,0** | 20,07 | 8,4 | 19,57 | 102% |
| 3 | Setor J – E1+10 | EX | 6,0 | 19,42 | 7,2 | 18,80 | 103% |
| 4 | Setor I - E2 | BE | 8,0 | 19,65 | 8,2 | 19,70 | 100% |
| 5 | Setor I – E3 | BD | 8,6 | 19,57 | 9,9 | 19,43 | 101% |
| 6 | Setor J – Eixo 47 | EX | 9,4 | 19,44 | 9,4 | 19,70 | **99%** |
| 7 | Setor J – ENI | EX | 7,0 | 19,81 | 6,5 | 19,75 | 100% |
| | Setor J - ENI | BD | 6,4 | 19,95 | 6,5 | 19,75 | 101% |
| | Setor J - ENI | BD | 6,4 | 19,91 | 6,5 | 19,75 | 101% |
| 8 | Setor I – E9+10 | EX | 7,0 | 19,81 | 8,5 | 19,48 | 102% |
| | Setor I – E8 | BD | **6,4** | 19,95 | 8,5 | 19,48 | 102% |
| | Setor J – E3+10 | EX | 7,0 | 19,94 | 8,5 | 19,48 | 101% |
| | Setor J – E2+10 | EX | **3,0** | 19,54 | 8,5 | 19,48 | 100% |
| | Setor H - ENI | EX | 7,0 | 19,48 | 8,5 | 19,48 | 100% |
| | Setor H - ENI | EX | 7,4 | 19,67 | 8,5 | 19,48 | 101% |
| | Setor G – E1 | EX | 7,3 | 19,66 | 8,5 | 19,48 | 101% |
| | Setor H – E8+02 | EX | 8,0 | 19,49 | 8,5 | 19,48 | 100% |

*Na situação tem-se BD (borda direita), BE (borda esquerda) e EX (eixo)
**Estaca não informada

As investigações de campo executados pelo laboratório terceirizado garantiram resultados satisfatórios nas misturas realizadas, visto que somente uma amostra não

atingiu o grau de compactação de 100% (Local 6, Eixo 47), por um provável problema de execução, e quatro teores de umidade não ficaram entre os ± 1,5% da umidade ótima, definidos pela NBR 15.115/04, destacados em vermelho na Tabela 4.13.

Diante do grau de compactação atingido no Local 8, entre 100 e 102%, verificou-se a possibilidade de utilizar a mistura com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado no restante da pavimentação do empreendimento, permitindo que fosse utilizado um volume maior de solo proveniente do estaqueamento nas camadas do pavimento.

É importante ressaltar os procedimentos adotados pelo laboratório terceirizado para a liberação ou não dos trechos executados, bem como as soluções necessárias para o atendimento aos requisitos. Foram eles:

*i)* em compactações ocorridas com umidade ótima apresentando uma variação de 3%, passou-se o rolo compactador com maior intensidade no local;

*ii)* em trechos com umidade acima da ótima, passou-se o rolo compactador e verificava se existia a ocorrêcia de borrachudo, realizando a abertura, caso seja necessário;

*iii)* em umidade abaixo da ótima, realizou a abertura da área. Após o tratamento, os trechos foram liberados para o tráfego;

*iv)* nos locais em que o grau de compactação não atingiram o mínimo de 100%, passou-se o rolo com maior intensidade na área.

Ainda de acordo com a Tabela 4.13, apesar do grau de compactação ser suficiente para o pavimento, ao se comparar a variação de umidade ótima (± 3%) adotada pelo laboratório contratado e o valor exposto na norma de agregado beneficiado (± 1,5%), notou-se uma divergência nos dados utilizados como referência, o qual mereceria maior atenção antes da liberação do pavimento.

Outro ponto a se destacar foi a pequena quantidade de dados fornecidos durante a execução do trecho experimental, apresentado na Tabela 4.13, já que ao analisar a área acompanhada percebeu-se que um resultado cobre uma área de 678,0 m² e, como as

largura das faixas das vias possuem em torno de 10,0m[19], o espaçamento entre ensaios foi de 67,8m, superior aos 25 metros especificado na DNER-ME 92/64.

Na Tabela 4.14 estão mostradas as massas específicas aparentes seca máxima obtidas em campo e em laboratório para facilitar a comparação entre os dados obtidos.

Tabela 4.14 – Comparação entre os resultados de campo e de laboratório.

| **Laboratório** | | **Campo** | | **Amostra de campo analisada em laboratório** |
|---|---|---|---|---|
| **Amostra** | **Massa esp. ap. seca máxima (kN/m³)** | **Setor/Estaca** | **Massa esp. do solo seco (kN/m³)** | **Massa esp. aparente seca máxima (kN/m³)** |
| $F_1S_{100}$ | 18,35 | Setor J – ENI** | 19,08 | 19,00 |
| $F_1R_{100}$ | 19,18 | Setor J – ENI | 19,34 | |
| $F_1M_1S_{70}R_{30}$ | 18,69 | Setor I – E13 | 20,16 | |
| $F_1M_2S_{40}R_{60}$ | 19,60 | Setor I – E11 | 20,38 | |
| $F_2P_1S_{100}$ | 18,03 | Setor I – E12+10 | 19,54 | **19,57** |
| $F_2P_2S_{100}$ | 19,12 | Setor J – E3+10 | 20,54 | |
| $F_2P_3S_{100}$ | 18,46 | Setor J – E3 | 20,07 | |
| $F_2P_4S_{100}$ | 18,92 | Setor J – E1+10 | 19,42 | 18,80 |
| $F_2P_5R_{100}$ | 19,33 | Setor I - E2 | 19,65 | **19,70** |
| $F_2P_6R_{100}$ | 18,96 | Setor I – E3 | 19,57 | **19,43** |
| $F_2M_1S_{40}R_{60}$ | 18,42 | Setor J – Eixo 47 | 19,44 | **19,70** |
| $F_2M_2S_{40}R_{60}$ | 19,22 | Setor J – ENI | 19,81 | |
| $F_2M_3S_{40}R_{60}$ | 19,20 | Setor J - ENI | 19,95 | **19,75** |
| $F_2M_4S_{40}R_{60}$ | 18,43 | Setor J - ENI | 19,91 | |
| $F_3M_1S_{60}R_{40}$ | 19,51 | Setor I – E9+10 | 19,81 | |
| $F_3M_2S_{60}R_{40}$ | 19,31 | Setor I – E8 | 19,95 | |
| $F_3M_3S_{60}R_{40}$ | 20,01 | Setor J – E3+10 | 19,94 | |
| $F_3M_4S_{60}R_{40}$ | 19,28 | Setor J – E2+10 | 19,54 | **19,48** |
| | | Setor H - ENI | 19,48 | |
| | | Setor H - ENI | 19,67 | |
| | | Setor G – E1 | 19,66 | |
| | | Setor H – E8+02 | 19,49 | |

A energia modificada foi aplicada em algumas amostras coletadas no trecho experimental, destacadas em negrito na Tabela 4.14. Ressalta-se ainda que as massas específicas secas máximas foram próximas aos dados obtidos em laboratório (Fases 1, 2

[19] Alguns trechos possuem 5,0m de espessura

e 3), onde se utilizou a energia intermediária, as quais variaram de 18,03 a 20,01 kN/m³, já no campo a variação dos resultados encontrados foi de 19,43 a 19,78 kN/m³.

## 4.10 ANÁLISE ECONÔMICA DO USO DE RCD EM PAVIMENTAÇÃO

Inicialmente, identificou-se o volume dos materiais aplicados no trecho experimental acompanhado, disposto na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Discriminação dos materiais empregados no trecho experimental desta pesquisa.

| **Mistura** | **Volume aplicado na regularização do subleito (m³)** | **Volume aplicado na sub-base do pavimento flexível (m³)** | **Volume aplicado na sub-base do pavimento semirrígido (m³)** | **Volume total (m³)** |
|---|---|---|---|---|
| 100% RCD beneficiado | 643,49 | 354,01 | 45,25 | 1.042,75 |
| 70% Solo da estaca +30% RCD beneficiado | 1.030,64 | 333,55 | 156,91 | 1.521,10 |
| 60% Solo da estaca +40% RCD beneficiado | 1.732,32 | 831,10 | 129,90 | 2.693,32 |
| 40% Solo da estaca +60% de RCD beneficiado | 1.273,12 | 472,35 | 162,10 | 1.907,57 |
| | | | | $\sum$ = 7.164,74 |

A patir deste levantamento, observou-se que o volume total de material empregado foi de 7.164,74 m³, dos quais 3.720,95 m³ eram de resíduo beneficiado e 3.9443,79 m³ eram solo proveniente do estaqueamento, considerando sempre um empolamento de 12%, baseado no percentual definido no projeto de terraplenagem da obra.

Em paralelo, fez-se um levantamento do custo unitário dos possíveis agregados a serem empregados na pavimentação (Tabela 4.16), permitindo a verificação dos custos no trecho experimental.

Tabela 4.16 – Custos de aquisição dos materiais para a pavimentação na região de Recife.

| Material | Unidade | Custo Unitário de Aquisição (R$) |
|---|---|---|
| Areia para aterro | $m^3$ | 30,00 |
| RCDR obtido com usina móvel no canteiro | $m^3$ | 30,00 |
| RCDR obtido de usina de beneficiamento fora do canteiro | $m^3$ | 19,20* |
| Brita graduada simples (BGS) | $m^3$ | 43,02 |
| Solo proveniente do estaqueamento hélice contínua | $m^3$ | 0** |

* não inclui o valor de transporte externo (até a obra)
** foi desprezado o custo de transporte no canteiro

Por meio do cruzamento das informações acima (Tabela 4.15 e 4.16), verificou-se que houve uma minimização dos custos no trecho experimental, uma vez que o resíduo beneficiado e o solo proveniente do estaqueamento aplicados promoveram uma economia na obtenção de agregado natural e na deposição dos resíduos no aterro de inertes (Tabela 4.17).

Tabela 4.17 – Custo do trecho experimental desta pesquisa.

| **Material aplicado** | **Simulação** | | **Obtido** | **Economia total (R$)[20]** |
|---|---|---|---|---|
| | **Custo do agregado natural (R$)** | **Custo da deposição em aterro de inertes (R$)** | **Custo do resíduo beneficiado (R$)** | |
| 100% RCD beneficiado | 31.282,53 | 85.620,27 | 31.282,52 | 85.620,27 |
| 70% solo proveniente do estaqueamento + 30% RCD beneficiado | 45.633,12 | 143.632,51 | 13.689,93 | 175.575,69 |
| 60% solo proveniente do estaqueamento + 40% RCD beneficiado | 80.799,44 | 249.581,39 | 32.319,78 | 298.061,05 |
| 40% solo proveniente do estaqueamento +60% RCD beneficiado | 57.226,90 | 170.055,44 | 34.336,14 | 192.946,20 |
| TOTAL | 214.941,99 | 648.889,61 | 111.628,37 | 752.203,21 |

[20] A economia total foi obtida por meio da soma dos custos de obtenção de agregado natural e deposição dos materiais em aterro de inertes, subtraindo o valor pago na aquisição do resíduo beneficiado

Verificando o valor gasto em cada parte do trecho experimental (Tabela 4.17), destaca-se a área constituída por 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de resíduo beneficiado, hachurada de verde do Apêndice I, já que demonstrou a maior economia quando comparada as demais áreas hachuradas (R$ 298.061,05).

Em uma obra comum os resíduos seriam destinados fora do canteiro de obras e o agregado natural adquirido, ocasionando um gasto de R$ 863.831,60. Com isso, analisando a Tabela 4.17, pôde-se notar uma economia total de R$ 752.203,21 no trecho experimental todo, equivalendo a uma minimização em 87%.

Destaca-se que a maior contribuição na minimização dos custos foi do não descarte do material em aterro de inertes, o qual participou com 75% da economia[21]. Já o uso do solo proveniente do estaqueamento nas camadas, através das misturas executadas no trecho experimental, proporcionou uma redução de 12% (R$ 103.313,62).

Como mencionado anteriormente no item 3.8, a empresa não forneceu a rastreabilidade da aplicação de todo o material, então se buscou a análise das possibilidades de uso do mesmo por meio de cenários (Quadro 4.1). Para isto, considerou-se, além dos valores já apresentados neste item, o custo de deposição dos resíduos em uma usina de reciclagem (27,65 R$/t).

A diferença entre o Cenário 1, normalmente adotado em canteiros de obra, e o Cenário 5, que possui a maior quantidade de RCD utilizado na própria obra, foi cerca de R$ 4,6 milhões de reais, ou seja, notou-se uma redução de 89,3% dos gastos, conseguidos através da substituição dos agregados naturais por resíduo beneficiado e solo proveniente do estaqueamento nos serviços de regularização, pavimentação, evitando também a destinação final em aterro de inertes ou em usina de reciclagem, apresentado na Quadro 4.1.

[21] O valor do transporte deste tipo de material é de 7,65 R$/t e o preço da destinação final em aterro de inertes é de 51,00 R$/t

Quadro 4.1 – Cenários considerados e custos totais.

| Cenário | Situação | Serviço | Material | Volume ($m^3$) | Peso (t) | Custo unitário[4] | | Custo/ material (R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | ($R$/m^3$) | (R$/t) | |
| 1 | Descarte | Aterro de inertes | RCD bruto | 16830 | 23562 | - | 58,65 | 1.381.911,30 |
| | | Aterro de inertes | Solo proveniente do estaqueamento | 25036 | 42561 | - | 58,65 | 2.496.214,38 |
| | Aquisição | Regularização | Areia para aterro | 32132 | - | 30,00 | - | 963.960,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Areia para aterro | 5392 | - | 30,00 | - | 161.766,39 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Areia para aterro | 1864 | - | 30,00 | - | 55.917,30 |
| | | Base (flexível) | BGS | 3788 | - | 43,02 | - | 162.942,12 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **5.222.711,49** |
| 2 | Descarte | Usina de reciclagem | RCD bruto | 16830 | 23562 | - | 27,65 | 651.489,30 |
| | | Aterro de inertes | Solo proveniente do estaqueamento | 25036 | 42561 | - | 58,65 | 2.496.214,38 |
| | Aquisição | Regularização | Areia para aterro | 32132 | - | 30,00 | - | 963.960,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Areia para aterro | 5392 | - | 30,00 | - | 161.766,39 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Areia para aterro | 4397 | - | 30,00 | - | 55.917,30 |
| | | Base (flexível) | BGS | 3788 | - | 43,02 | - | 162.942,12 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **4.492.289,49** |
| 3 | Descarte | Aterro de inertes | RCD bruto | 16830 | 23562 | - | 58,65 | 1.381.911,30 |
| | | Aterro de inertes + aterro no muro gabião | Solo proveniente do estaqueamento | 24071 + 965 | 40921 | - | 58,65 + 0 | 2.400.006,73 |
| | Aquisição | Regularização | Areia para aterro | 32132 | - | 30,00 | - | 963.960,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Areia para aterro | 5392 | - | 30,00 | - | 161.766,39 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Areia para aterro | 1864 | - | 30,00 | - | 55.917,30 |
| | | Base (flexível) | BGS | 3788 | - | 43,02 | - | 162.942,12 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **5.126.503,84** |

| Cenário | Situação | Serviço | Material | Volume (m³) | Peso (t) | Custo unitário[4] | | Custo/ material (R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | (R$/m³) | (R$/t) | |
| 4 | Descarte | Usina de reciclagem | RCD bruto | 16830 | 23562 | - | 27,65 | 651.489,30 |
| | | Aterro de inertes + aterro no muro gabião | Solo proveniente do estaqueamento | 24071 + 965 | 40921 | - | 58,65 + 0 | 2.400.006,73 |
| | Aquisição | Regularização | Areia para aterro | 32132 | - | 30,00 | - | 963.960,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Areia para aterro | 5392 | - | 30,00 | - | 161.766,39 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Areia para aterro | 1864 | - | 30,00 | - | 55.917,30 |
| | | Base (flexível) | BGS | 3788 | - | 43,02 | - | 162.942,12 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **4.396.081,84** |
| 5 | Descarte | Usina de reciclagem | RCD bruto | 0 | 0 | 30,00 | - | 504.900,00 |
| | | Aterro de inertes | Solo proveniente do estaqueamento | 0 | 0 | 0 | - | 0,00 |
| | Aquisição | Regularização | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 12.853 + 19.279 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 2.157 + 3.235 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 746+1.118 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Base (flexível) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento + 100% de RCD beneficiado + BGS | 935 + 1.403 + 143 +1.307 | - | 30,00 + 0 + 30,00+ 43,02 | - | 56.227,14 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **561.127,14** |
| 6 | Descarte | Usina de reciclagem | RCD bruto | 0 | 0 | 30,00 | - | 504.900,00 |
| | | Aterro de inertes | Solo proveniente do estaqueamento | 0 | 0 | 0 | - | 0,00 |
| | Aquisição | Regularização | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 12.853 + 19.279 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Sub-base (flexível) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 2.157 + 3.235 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Sub-base (semirrígido) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento | 746+1.118 | - | 30,00 + 0 | - | 0,00 |
| | | Base (flexível) | Mistura: 40% de RCD beneficiado + 60% de solo proveniente do estaqueamento + 100% de RCD beneficiado + agregado reciclado da usina de reciclagem | 935 + 1.403 + 143 +1.307 | 1.834 | 30,00 + 0 + 30,00 | 32,65 | 59.742,97 |
| | **TOTAL** | | | | | | | **564.642,97** |

Ainda verificando os Cenários 1 e 5 (Quadro 4.1), notou-se que a utilização dos materiais alternativos (solo proveniente do estaqueamento e resíduo beneficiado) na regularização foi responsável pela minimização de cerca de R$ 964 mil reais dos custos. Destaca-se ainda que a reutilização do RCD após o beneficiamento permitiu a diminuição de mais R$ 877 mil reais, ocasionado pela não deposição do material em aterro de inertes.

Comparando os Cenários 1 e 2 (Quadro 4.1), nota-se que a mudança de local de destinação do RCD bruto do aterro de inertes para uma usina de reciclagem permitiu uma redução de cerca de R$ 730 mil reais.

Destaca-se também que o uso de 965 m³ de solo proveniente do estaqueamento em aterro para execução do muro gabião aumenta este valor para aproximadamente R$ 825 mil reais, verificados através dos Cenários 2 e 4.

Por meio da análise dos cenários, observou-se que o gasto maior está na destinação dos resíduos, principalmente do solo proveniente do estaqueamento, o qual representa cerca de R$ 2,5 milhões de reais.

Entre os Cenários 5 e 6, verifica-se uma diferença de R$ 3,5 mil reais, mostrando que o agregado reciclado obtido da usina de reciclagem é mais caro que o BGS proveniente de uma pedreira, podendo ter ocorrido por conta da sua distância até o canteiro. Outras possíveis influências nestes custos podem ser a pouca disponibilidade de unidades de RCD e o fato do agregado reciclado ainda não ter sido absorvido plenamente pela cadeia construtiva.

Ainda comparando os Cenários 1 e 5 foi possível elaborar a Figura 4.20, com a economia proporcionada por uso de cada material (solo proveniente do estaqueamento e RCD beneficiado).

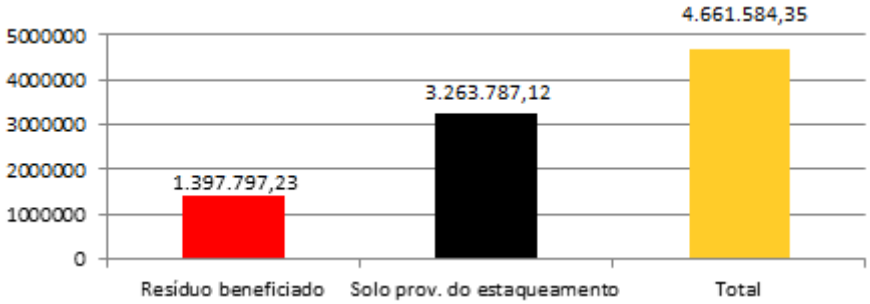



Figura 4.20 – Economia gerada por uso de cada material ao se comparar os Cenários 1 e 5 nesta pesquisa.

De acordo com a Figura 4.20, pode-se notar que o resíduo beneficiado foi responsável por uma redução de R$ 1,4 milhões de reais, enquanto a utilização de solo proveniente do estaqueamento possibilitou a minimização de mais de R$ 3,2 milhões de reais, gerando uma economia total de aproximadamente R$ 4,6 milhões de reais.

# 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

## 5.1 CONCLUSÕES

A potencialidade técnica do Resíduo da Construção e Demolição (RCD) beneficiado e do solo proveniente da execução de estaca hélice contínua foi avaliada por meio de amostras de cada um dos materiais e misturas, de ambos em proporções diferentes, com o intuito de substituir o agregado natural comumente usado em camadas de pavimentos.

Na composição gravimétrica, observou-se que o principal constituinte foi o material miúdo (49,3%), o que pode ter ocorrido por conta do processo de beneficiamento, executado antes da coleta da amostra.

A granulometria mostrou que as amostras de RCD eram constituídas por materiais equivalentes a solos grossos, conforme as classificações TRB e SUCS. Este aspecto foi reforçado pela ausência de LL e LP, típico de materiais pedregulhosos e arenosos.

O resultado médio de massa específica seca máxima foi em torno de 19 kN/m³, valor próximo ao encontrado em outros estudos. Notou-se ainda que as misturas com 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado apresentam os maiores pesos específicos secos máximos, uma vez que o embricamento do material foi mais eficiente.

As proporções 40% de solo proveniente do estaqueamento e 60% de RCD beneficiado ($R_{60}$) e 60% de solo proveniente do estaqueamento e 40% de RCD beneficiado ($R_{40}$) nas misturas mostraram as maiores resistências à penetração do pistão e ISC suficiente para aplicação destes materiais até em base de pavimento flexível, considerando o ISC mínimo de 60%, conforme a NBR 15.116/04.

As amostras $F_2P_5R_{100}$ e $F_2P_6R_{100,}$ constituídas apenas por resíduo beneficiado, tiveram índice de forma mensurado por meio da NBR 7809/83, ambas apresentaram resultados

inferiores ao limite máximo (3,0) e, no que se refere ao desgaste, encontrou-se uma abrasão de 27% e 26%, respectivamente.

O teor de sulfatos medido nas amostras de solo proveniente do estaqueamento e de resíduo beneficiado na Fase 2 mostrou valor máximo de 0,09%, atendendo ao limite máximo de 2% da NBR 15.116/04.

Em campo, o desempenho do material foi medido por meio do grau de compactação, e apenas um ponto analisado de 22 (no local 6) não atingiu os 100% esperado, entretanto, recebeu o tratamento, sendo, posteriormente, liberado para o tráfego. E, com relação ao teor de umidade, 04 (quatro) amostras de 22 não permaneceram na variação de $\pm$ 1,5% da umidade ótima, definidos pela NBR 15.115/04. Frisa-se que o espaçamento utilizado na execução de ensaios nesta etapa foi superior ao definido pela norma DNER-ME 92/64.

Da análise econômica, pode-se perceber que ocorreu uma redução de 87% (cerca de R$ 752 mil reais) dos custos ao se utilizar 3,7 mil m³ de resíduo beneficiado e 3,9 mil m³ de solo proveniente do estaqueamento no trecho experimental acompanhado.

Considerando a diferença entre os Cenários 1 (resíduos destinados fora da obra e agregados naturais adquiridos para pavimentação) e Cenário 5 (uso do máximo possível de resíduo em pavimentação), pode-se perceber a diminuição de 89,3% dos gastos, equivalendo a aproximadamente R$ 4,6 milhões de reais. O uso de resíduo beneficiado poderia proporcionar uma minimização de R$ 1,4 milhões de reais e a utilização de solo proveniente do estaqueamento equivaleria a diminuição de R$ 3,2 milhões de reais.

Perante o que foi exposto ao longo desta pesquisa, houve a constatação da viabilidade técnica das misturas (RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento) e obteve-se a comprovação da viabilidade econômica, por meio do levantamento dos custos.

Este estudo de caso identificou a possibilidade de utilização de resíduo de demolição de antigos galpões existentes no terreno e do solo proveniente da execução de estacas tipo hélice contínua como jazida alternativa, evitando outro impacto ambiental na não

deposição dos materiais em aterros inertes, comprovando que uma obra sustentável pode ser mais barata que uma obra convencional, reforçando o potencial da economia verde.

## 5.1 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS

- Analisar a possibilidade da existência de poder cimentício no RCD quando em contato com a água.

- Avaliar a granulometria do material após exposição ao compactador em campo, durante a aplicação do resíduo na camada.

- Realizar ensaios de Módulo de Resiliência (MR) em várias tensões aplicadas, com uso de equipamento triaxial de carga repetida, apresentando a deformabilidade elástica do material.

- Realizar ensaios FWD (Falling Weight Deflectometer) para avaliar o comportamento do pavimento por meio da bacia de deflexão gerada por uma carga controlada.

- Acompanhamento sistemático (análise visual) dos trechos em que foram aplicadas as misturas de RCD beneficiado e solo proveniente do estaqueamento.

- Revisar as normas NBR 15.115/04 e 15.116/04, acrescentando requisitos novos a serem atendidos em análises mais profundas em laboratório, por exemplo, módulo de resiliência, e em campo, que permitam definir de forma mais adequada a investigação do material aplicado nas camadas dos pavimentos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 1097 – 2.** Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Madrid, 1999.

ABELPRE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011.** 2011. 186p. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2012.

ALMEIDA, M. M. S.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; MACHADO, C. C.; BARBOSA, P. S. A. e SILVA, C. H. C. Correção granulométrica de solo para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da Cenibra. **Revista Árvore**, v. 36, p 1085 – 1090, Viçosa/MG, 2010.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos da construção e demolição reciclados**. 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRE. Brasília. 2009. **Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres – AETT**. Disponível em: < http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/10874/1_1_REDE_RODOVIARIA.html >. Acessado em 15 de julho de 2011.

ARAÚJO JUNIOR, E. L. **Uso de resíduos da construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. 2010. 166 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207:** Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185:** Solo - Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:** Solo - Índice de Suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6954:** Lastro-padrão - Determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11804:** Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11806:** Materiais para sub-base ou base de brita graduada - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da Construção Civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da Construção Civil e resíduos inertes - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917:** Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, A. G. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo/RS. **Ambiente Construído**, v. 8, n 3, p. 65-76, 2008.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 3ª reimpressão. 2010. Rio de Janeiro: PETROBRÁS e ABEDA. 2008.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. **Construção Civil: Desempenho e Perspectivas**. Informativo Econômico. Brasília, 2011.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade do Recife.** 2005. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

CARVALHO FILHO, A. C**. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventários del ciclo de vida del cemento.** Tese (Doutorado). Universidad Politécnica da Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. 2001.

CONFEDERACAO NACIONAL DO TRANSPORTE ‐ CNT. **Boletim Estatístico de Agosto de 2012**. Distrito Federal, 2012. Disponível em: < http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%C3%ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20ago_2012.pdf >. Acesso em: 27 ago. 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Brasília. 2002. **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002**.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **ME 92/94**. Solo - Determinação da Massa Específica Aparente, "In Situ", com emprego do Frasco de Areia. Rio de Janeiro, 1994.

DNER ME **086/1994** – Agregado – Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

DNER **303/1997** – ES. Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

DNER **035/1998** – ME. Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2ed. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Economia Mineral do Brasil – Agregado Mineral**. 2009. Capítulo 8, p 602-635. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4008>. Acessado em 15 de julho de 2011.

EC - EUROPEAN COMMISSION. **Energy, transport and environment indicators**. 2011. 218p. Eurostat Pocketbooks.

EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA. **ME 10:** Determinação da umidade pelo método expedito (“Speedy”). Volume 12. Recife, 2003.

FALCÃO, N. C. B. **Diagnóstico da situação atual dos Resíduos da Construção Civil no município de Olinda.** 2011. 125p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco (POLI-UPE). Recife, 2011.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecanística de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição nos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. 109p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2004.

GOOGLE. Disponível em http://maps.google.com.br. Acessado em 15 de janeiro de 2012.

GUERRA, J. S. **Gestão de Resíduos da Construção Civil em Obra de Edificações**. 2009. 105p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco (POLI-UPE). Recife, 2009.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife/PE. Gráfica Editora, 2008.

HAO, J. L.; HILLS, M. J.; TAM, V. W. Y. The effectiveness of Hong Kong's Construction Waste Disposal Charging Scheme. **Waste Management & Research,** v. 26, p. 553-558, 2008.

HORTEGAL, M. V.; FERREIRA, T. C.; SANT'ANA, W. C. Utilização de Agregados Resíduos Sólidos da Construção Civil para Pavimentação em São Luís – MA. **Pesquisa em Foco**. v. 17, n. 2, p. 60-74. 2009.

HUSUM, H.; RAHBEK, L. W.; NIELSEN, L. L. e SEHEIM, T. W. **Waste in Denmark**. 1999. 26p. Publicado por Ministry of Environment and Energy - Danish Environmental Protection Agency.

INDIAN ROADS CONGRESS. **IRC 37**. Guidelines for the design of flexible pavements. 77 p. Ed. 2. New Delhi, 2001.

JARON, A.; ROTHKIRCH, U. G. e SCHULZ, J. **Waste Management in Germany: a driving force for jobs and innovation**. 2006. 40p. Publicado por Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), 2006.

JIMÉNEZ, J. R.; AGRELA, F.; AYUSO, J. LÓPEZ, M. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. **Materiales de ConstruCción**, v 61, n 302, p. 289-302, 2011.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Alternativas de gestão de resíduos de gesso. Contribuição para a reformulação da Resolução Conama 307. 9 p. São Paulo, 2003. Disponível em <http://www.reciclagem.pCc.usp.br/incluir1.htm>. Acessado em 25 de maio de 2012.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: RILEM - INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES, 5, p. 536-544, 2004.

KUMAR, P.; REDDY, M. R. Reinforced embankments and sub base using demolition waste**. Scientific & Industrial Research**. v. 67, p. 386-391, 2008.

LAU, H. H.; WHYTE, A. e LAW, P. L. Composition and Characteristics of Construction Waste Generated by Residential Housing Project**. International Journal of Environmental Research** , v.2, n. 3, p. 261-268, 2008.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da Construção Civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 216p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LENNON, M. **Recycling construction and demolition wastes: A guide for architects and contractors.** 2005. 57p. The Institution Recycling Network, 2005.

LIMA, R. S. **Aproveitamento de Resíduos de Construção na Fabricação de Argamassas**. 2005. 93p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba - CT. João Pessoa, 2005.

MÁLIA, M. A. B. **Indicadores de resíduos de construção e demolição**. 2010. 138p. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2010.

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2005. 2ed. Rio de Janeiro: UFRJ. 570p.

MELO, R. A., NÓBREGA, R. D.; ASSIS, S. R. H. Caracterização mecânica de resíduos sólidos da Construção Civil para pavimentação de vias urbanas em João Pessoa, Brasil: resultados preliminares. In: Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies. NOCMAT, 2008. Colômbia.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba**. 2002. 163 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

MENDES, T. A.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, R. C.; CARVALHO, J. C.; VEIGA, R. Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado. In: Reunião Anual de Pavimentação, 35. Rio de Janeiro, 2004**. Anais**. Rio de Janeiro, ABPv, 2004. CD-ROM.

MOREIRA, J. F.; DIAS, J. F. e REZENDE, M. E. B. Utilização dos resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia (MG). **Vias Gerais**. 2007. Disponível em: http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais6/9.pdf. Acessado em 01 de maio de 2011.

MOTTA, R. S**. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduos sólidos da Construção Civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 160p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NÓBREGA, R. N.; MELO, R. A. Uso de agregados de Resíduos da Construção Civil na pavimentação urbana em João Pessoa. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção. ENARC. 2009.

OLIVEIRA, E. G.; MENDES, O. **Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e demolição: estudo de caso da Resolução 307 do CONAMA.** 2008. Disponível em: http://www.ucg.br/ucg/prope/cpgss. Acessado no dia 13 de maio de 2012.

OLIVEIRA, J. C. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da Construção Civil em pavimentos flexíveis.** 2007. 167p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. 1999. 189p. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. R. L. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil**. Ministério das Cidades, Brasília, 2005.

PINTO, T. P.; LARA, L. A.; SILVA, A. A. e GOMES, M. S. M. **Plano de Gestão de Resíduos Sólidos: Manual de Orientação**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2012.

PROENÇA, F. T. T. C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento em obras de pavimentação**. 2012. 121p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco (POLI-UPE). Recife, 2012.

REDIVO, I. M. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego**. 2011. 160 p. Programa de Pós0Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federa de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Petrolina (PE).** 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

SILVA, M. G. B.; SILVA, B. T. A; BARROSO, S. H. A. Um primeiro estudo dos resíduos de construção e demolição da Construção Civil para aplicação em camadas de pavimentos na cidade de Fortaleza/CE. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 15. Salvador/BA, 15ª RPU, 2008.

SOLOSSANTINI. Disponível em http://www.solossantini.com.br/interna.asp?id=23. Acessado em 15 de janeiro de 2012.

SOUZA, R; MEKBEKIAN, G. **Qualidade na aquisição de materiais e execução de obras.** 2002. 264 p. Editora Pini.

THOMAS, C.; SÁNCHEZ, J.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A.; BALLESTER, F. Sustainable management of construction and demolition waste: generation, recovery and applications. In: 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy. Madrid. 2009.

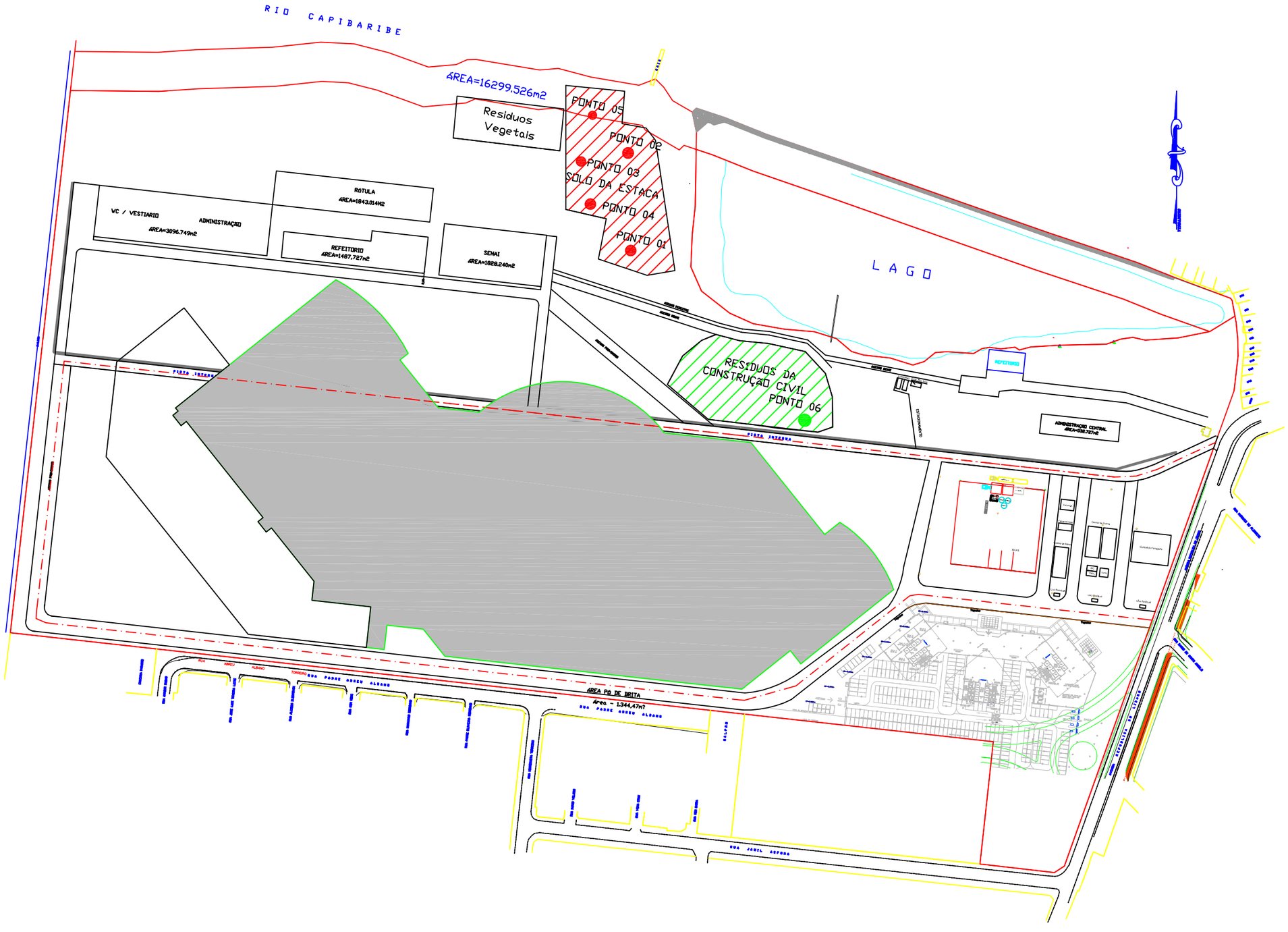
UNA NORMA ESPAÑOLA - EUROPEAN NORMA. **933-1**. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos de peneiramento.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 509 p. Editora McGraw – Hill do Brasil Ltda, 1997.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações.** 352 p. Volume 2. Editora Oficina de Textos, 2010.

# APÊNDICE A

## Coleta das amostras na Fase 1




Plantas Referenciadas:

1- Topografia
1RMS_TOP_PE001_R00.DWG

2-Sistema Viário
1RMS_TRF_PE001_R05.DWG

3-Arquitetura
1RMS_ARQ_PE001_R04.DWG

- AREA DO SHOPPING - ESTRUTURA
- DIQUE
- SOLO DA ESTACA
- RESIDUOS DA CONSTRUÇAO CIVIL
- PONTOS DE SOLOS COLETADOS
- PONTO DE COLETA DE RESIDUOS DA CONSTRUÇAO CIVIL RECICLADO

| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 18/04/12 | EMISSÃO INICIAL | | | | |

COORDENADAS GEOGRÁFICAS BASE RASTREADA DO PONTO DO IBGE SITUADO NA BIBLIOTECA DA UFPE COM COORDENADAS- WGS84 -LAT=8°03'03.46972"S e LONG=34°57'05.45911" W e he = 20.20,180m e SIRGAS 2000 = 284931.043mE e e 9109534.894mN ho=26.078m E AMARRADAS AS ESTAÇÕES E9 e E13 INTERNAS A PROPRIEDADE COM COORDENADAS RESPECTIVAS WGS 84 - 8°05'08.55080"S e 34°53'39.74600"W he=-1.713m e SIRGAS 2000 -291248.591mE 9105741.388mN e ho=2.074m - WGS 84 - 8°05'07.91808"S e 34°53'45.25378"W e he=-1.698m e SIRGAS 2000 - 291079.864mE 9105760.041mN e ho=2.089m .

IDENTIFICAÇÃO: APÊNDICE A

PROPRIETÁRIO: PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: RioMar Shopping

EMPREENDEDOR: JCPM João Carlos Paes Mendonça

CONSTRUÇÃO: Orgulho Nordestino

LOCALIZAÇÃO: LOTEAMENTO BACARDI, S/N. BAIRRO DO PINA, RECIFE – PE.

PROJETO: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL — ETAPA 01

TÍTULO: COLETA DAS AMOSTRAS NA FASE 01 — SETOR: — REVISÃO: 00

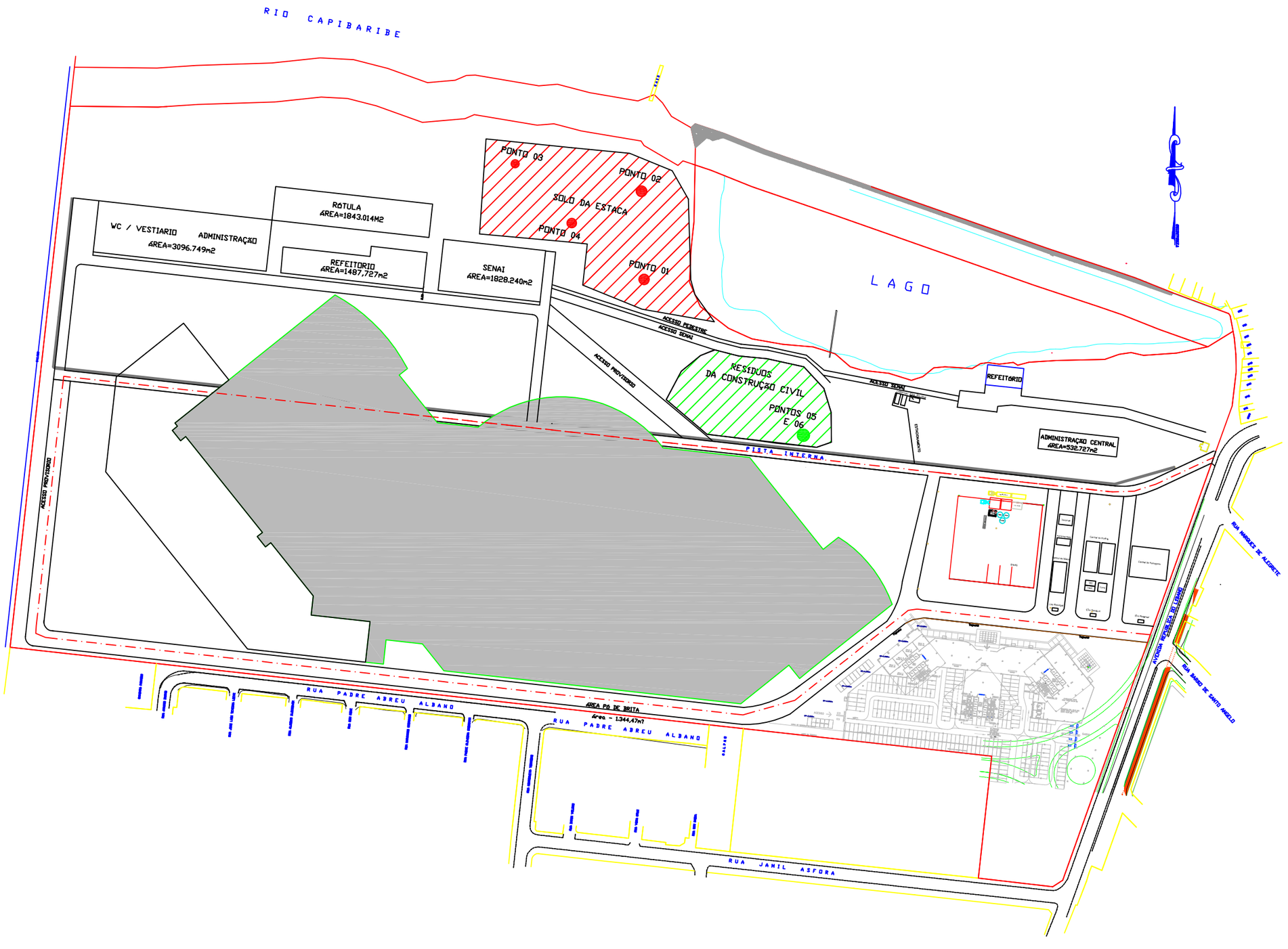
Nº DO DESENHO: 1RMS_RCC_PE001_R00.DWG

| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| ANDREA BATISTA | ANDREA BATISTA | ALEXANDRE GUSMÃO | 1/1000 |

RESPONSÁVEL TÉCNICO: — EQUIPE TÉCNICA:

# APÊNDICE B

## Coleta das amostras na Fase 2




Plantas Referenciadas:

1- Topografia
1RMS_TOP_PE001_R00.DWG

2-Sistema Viário
1RMS_TRF_PE001_R05.DWG

3-Arquitetura
1RMS_ARQ_PE001_R04.DWG

- ÁREA DO SHOPPING - ESTRUTURA
- DIQUE
- SOLO DA ESTACA
- RESIDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL
- PONTOS DE SOLOS COLETADOS
- PONTOS DE COLETA DE RESIDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL RECICLADO

| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 18/04/12 | EMISSÃO INICIAL | | | | |

COORDENADAS GEOGRAFICAS BASE RASTREADA DO PONTO DO IBGE SITUADO NA BIBLIOTECA DA UFPE COM COORDENADAS- WGS84 -LAT=8°03'03.46972"S e LONG=34°57'05.45911" W e he = 20.20,180m e SIRGAS 2000 = 284931.043mE e e 9109554.894mN ho=26.070m E AMARRADAS AS ESTAÇÕES E9 e E13 INTERNAS A PROPRIEDADE COM COORDENADAS RESPECTIVAS WGS 84 - 8°05'08.55589"S e 34°53'39.74600"W he=-1.713m e SIRGAS 2000 -291248.591mE 9105741.388mN e ho=2.074m - WGS 84 - 8°05'07.91808"S e 34°53'45.25378"W e he=-1.698m e SIRGAS 2000 - 291079.864mE 9105760.041mN e ho=2.089m .

IDENTIFICAÇÃO:
APÊNDICE B

PROPRIETÁRIO:
PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: RioMar Shopping

EMPREENDEDOR: Grupo JCPM – João Carlos Paes Mendonça – Orgulho de Nordestino

CONSTRUÇÃO:

LOCALIZAÇÃO:
LOTEAMENTO BACARDI, S/N. BAIRRO DO PINA, RECIFE – PE.

PROJETO: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL — ETAPA 01

TÍTULO: COLETA DAS AMOSTRAS NA FASE 02 — SETOR: — REVISÃO: 00

Nº DO DESENHO:
1RMS_RCC_PE002_R00.DWG

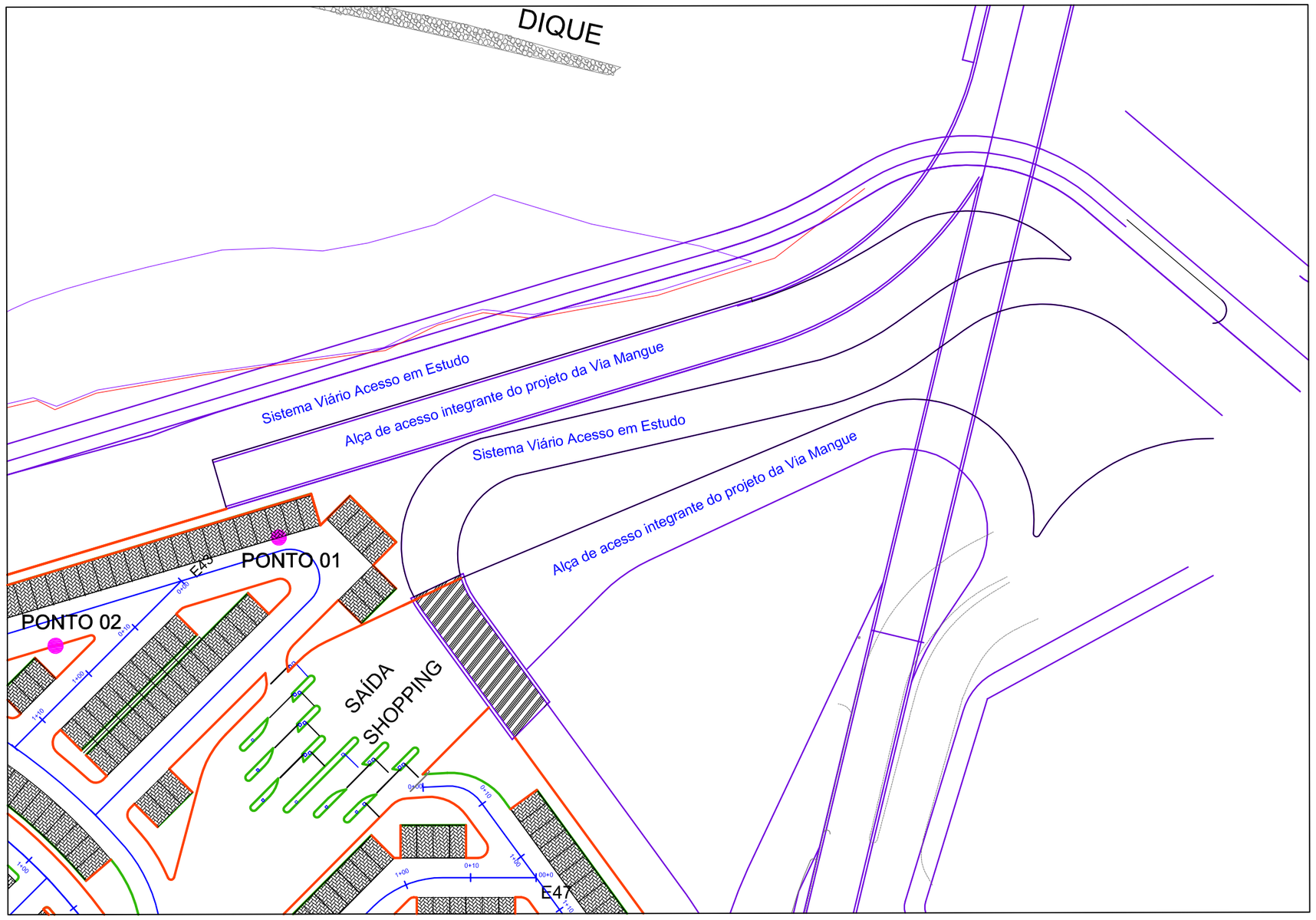
| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| ANDRÉA BATISTA | ANDRÉA BATISTA | ALEXANDRE GUSMÃO | 1/1000 |

RESPONSÁVEL TÉCNICO:

EQUIPE TÉCNICA:

# APÊNDICE C

## Coleta das amostras na Fase 3




LEGENDA :

- Pavimento intertravado
- Circulação de veículos de Passeio - Pavimento em Concreto Alfáltico na Ciculação
- Viaduto interno do shopping
- Dique
- Coleta de material reciclado aplicado na sub-base ( Mistura 60% de Solo da estaca e 30% de RCCR proveniente da Usifort e do Monte Sinai)
- Meio Fio - com linha d´água ( borda alta do pavimento)
- Meio Fio - sem linha d'água ( borda baixa do pavimento)
- Acesso viário
- Eixo de projeto dos acessos

Plantas Referenciadas:

1- Topografia
1RMS__TOP__PE001__R00.DWG

2-Sistema Viário
1RMS__TRF__PE001__R05.DWG

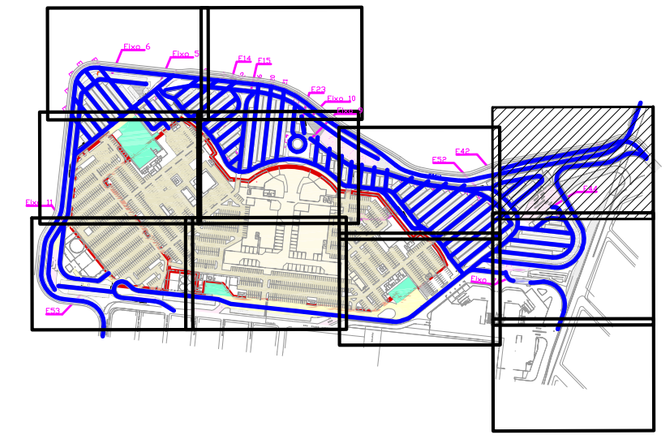
3-Arquitetura
1RMS__ARQ__PE001__R05.DWG

4- Paisagismo
1RMS__PAS__PE001__R11.DWG

5 - Pavimentação
1RMS__PAV__PE001__R06.DWG

Articulação

Esquema das áreas de Pavimentação e Localização dos Eixos



Sentido crescente do estaqueamento

| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 18/04/2012 | Emissão inicial | | | | |

IDENTIFICAÇÃO:
APÊNDICE C

PROPRIETÁRIO:
PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: RioMar Shopping

EMPREENDEDOR: Grupo JCPM – João Carlos Paes Mendonça

CONSTRUÇÃO: Orgulho de ser Nordestino.

LOCALIZAÇÃO:
LOTEAMENTO BACARDI, S/N. BAIRRO DO PINA, RECIFE - PE.

PROJETO:
RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

| TÍTULO: | SETOR: | REVISÃO: |
|---|---|---|
| COLETA DE MATERIAL NA SUB-BASE DA CIRCULAÇÃO A CÉU ABERTO | SETOR I | |

Nº DO DESENHO:
1RMS__RCC__PE003__R00.DWG

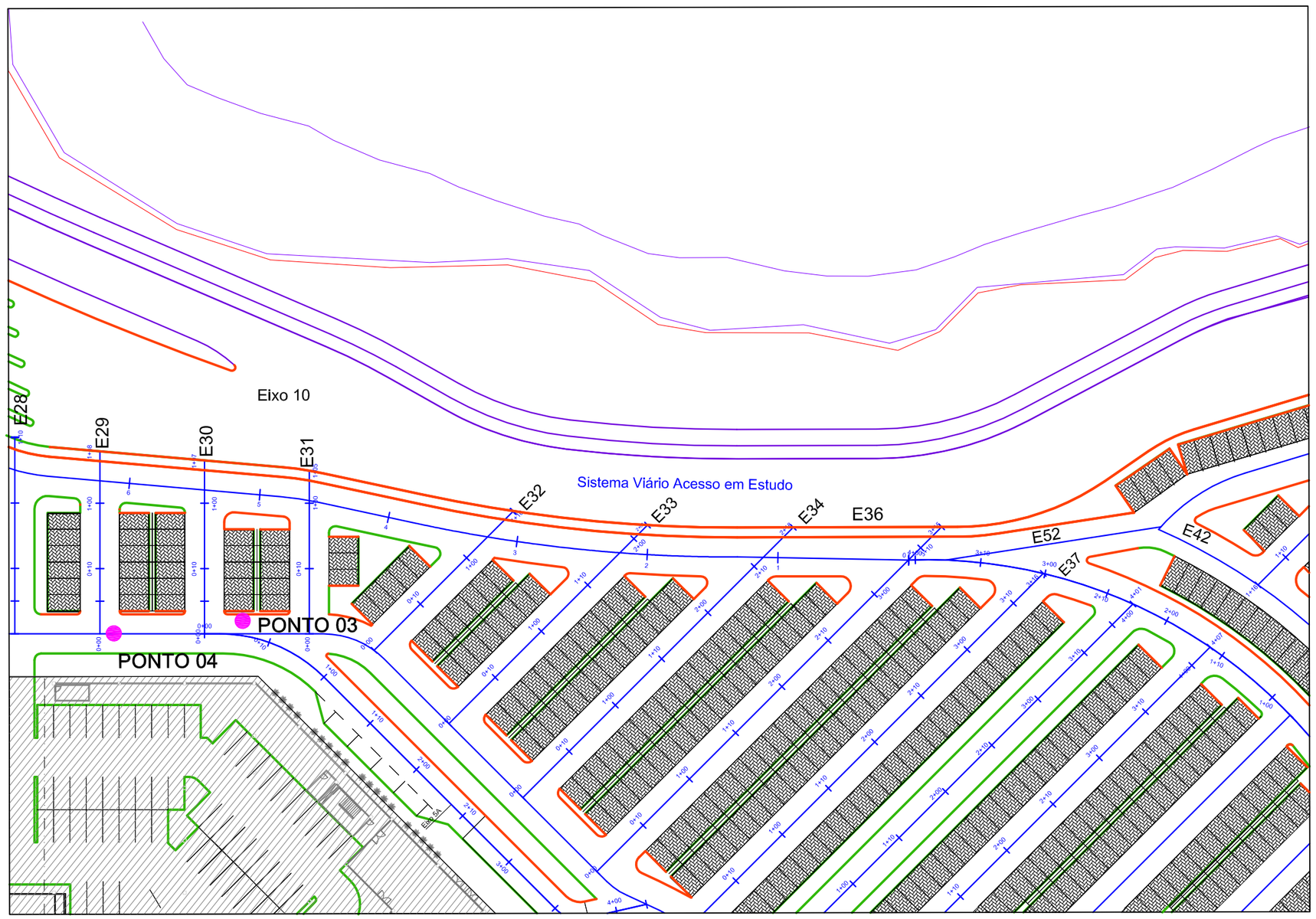
| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO: | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| ANDRÉA BATISTA | ANDRÉA BATISTA | ALEXANDRE GUSMÃO | 1/500 |

RESPONSÁVEL TÉCNICO:

EQUIPE TÉCNICA:

# APÊNDICE D

## Coleta das amostras na Fase 3




LEGENDA :

- Estacionamento na Área coberta - Pavimento em Concreto Armado
- Pavimento intertravado
- Circulação de veículos de Passeio - Pavimento em Concreto Alfáltico na Circulação
- Viaduto interno do shopping
- Dique
- Coleta de material reciclado aplicado na sub-base ( Mistura 60% de Solo da estaca e 30% de RCCR proveniente da Usifort e do Monte Sinai)
- Meio Fio - com linha d´água ( borda alta do pavimento)
- Meio Fio - sem linha d'água ( borda baixa do pavimento)
- Acesso viário
- Eixo de projeto dos acessos

Plantas Referenciadas:

1- Topografia
1RMS__TOP__PE001__R00.DWG

2-Sistema Viário
1RMS__TRF__PE001__R05.DWG

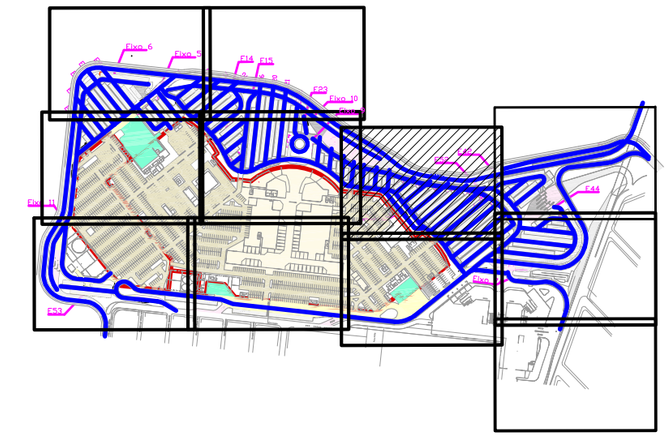
3-Arquitetura
1RMS__ARQ__PE001__R05.DWG

4- Paisagismo
1RMS__PAS__PE001__R11.DWG

5 - Pavimentação
1RMS__PAV__PE001__R06.dwg

Articulação

Esquema das áreas de Pavimentação e Localização dos Eixos



Sentido crescente do estaqueamento

| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 18/04/2012 | Emissão inicial | | | | |

IDENTIFICAÇÃO:
APÊNDICE D

PROPRIETÁRIO:
PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: RioMar Shopping

EMPREENDEDOR: GRUPO JCPM João Carlos Paes Mendonça

CONSTRUÇÃO: Orgulho de ser Nordestino.

LOCALIZAÇÃO:
LOTEAMENTO BACARDI, S/N. BAIRRO DO PINA, RECIFE - PE.

PROJETO:
RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

| TÍTULO: | SETOR: | REVISÃO: |
|---|---|---|
| COLETA DE MATERIAL NA SUB-BASE DA CIRCULAÇÃO A CÉU ABERTO | SETOR G | |

Nº DO DESENHO:
1RMS__RCC__PE004__R00.DWG

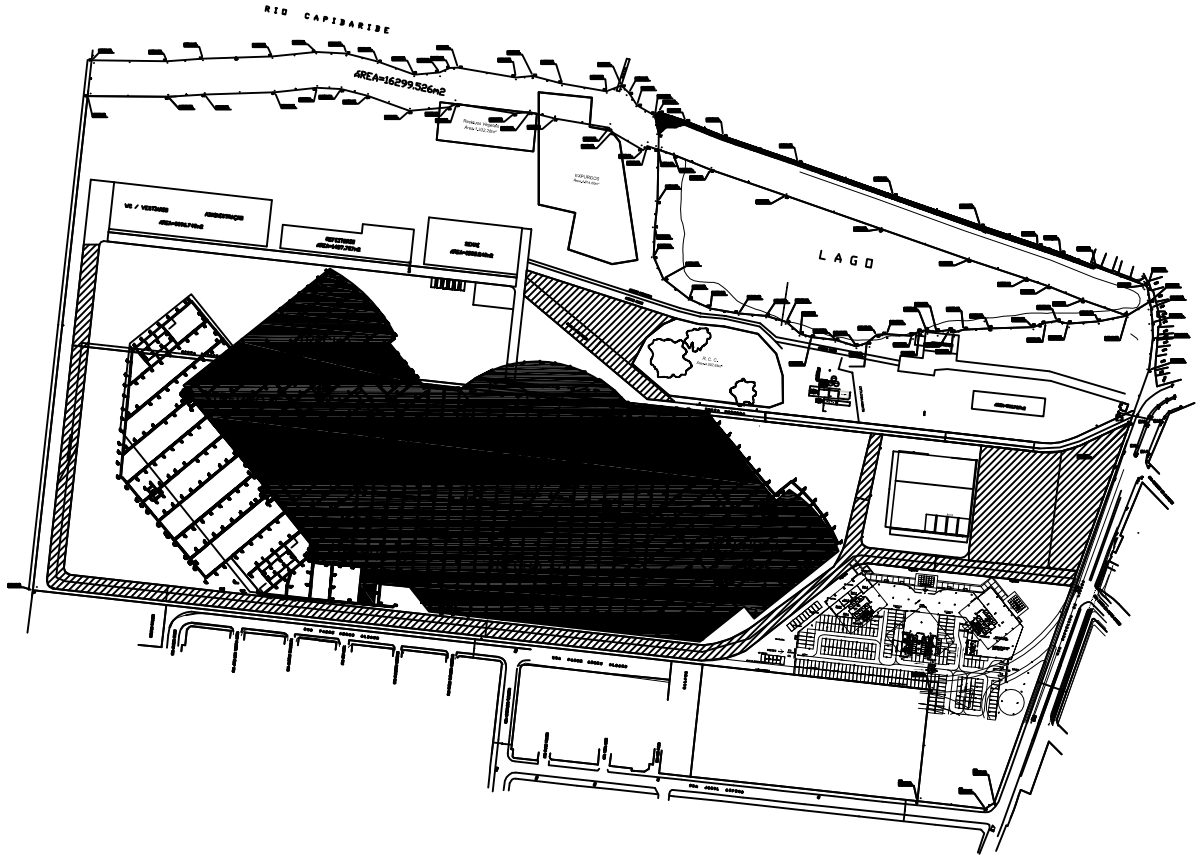
| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| ANDRÉA BATISTA | ANDRÉA BATISTA | ALEXANDRE GUSMÃO | 1/500 |

RESPONSÁVEL TÉCNICO:

EQUIPE TÉCNICA:

**APÊNDICE E**

**Mapeamento do RCD bruto**




Plantas Referenciadas:
1- Topografia
2- Sistema Viário
3- Arquitetura

RCC BRUTO APLICADO NO TERRENO
ÁREA DA ESTRUTURA
ACONDICIONAMENTO DO SOLO DA ESTAÇÃO
ACONDICIONAMENTO DO RCC BRUTO

| REV. | DATA | DESCRIÇÃO | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 10/04/12 | EMISSÃO INICIAL | MTEY | D.A. | F.M. | |

CONSIDERADAS GEOGRAFICAS DADE RASTREADA DO PONTO DO DOCE ESTUDOS DA INSTALAÇÃO DA UFPE COM CONDIÇÃO: VEIDA «LATA»PE/PE/ALAMPE» e LEGO-PE/PE/ALAMPE V e ha = 0,0.0.000m e ESTADO DOS = 0,0.0.0.000m e ESTADO DOS ha=0,0.0.0m E ANDAMENTO AS ESTAÇÕES EO e EOS INTERNAS A PROPOSIÇÃO DOS CONDIÇÕES RESPECTIVAS VEO 04 - 0°00'00.0000"S e 04°00'00.0000"W ha=-1,7.0m e ESTADO DOS =0,0.0.0.000m E ha=0,0.0.0m - VEO 04 - 0°00'00.0000"S e 04°00'00.0000"W ha=-1,0.0m e ESTADO DOS - 0,0.0.0.000m E ha=0,0.0.0m .

IDENTIFICAÇÃO:
APÊNDICE E

PROPRIETÁRIO:
PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: EMPREENDEDOR: CONSTRUÇÃO:

RIOMAR Shopping

LOCALIZAÇÃO:
LOTEAMENTO BACARDI, S/N, BAIRRO DO PINA, RECIFE – PE.

PROJETO:
RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

ETAPA 01

TÍTULO:
MAPEAMENTO DO RCC BRUTO

SETOR:

REVISÃO:
00

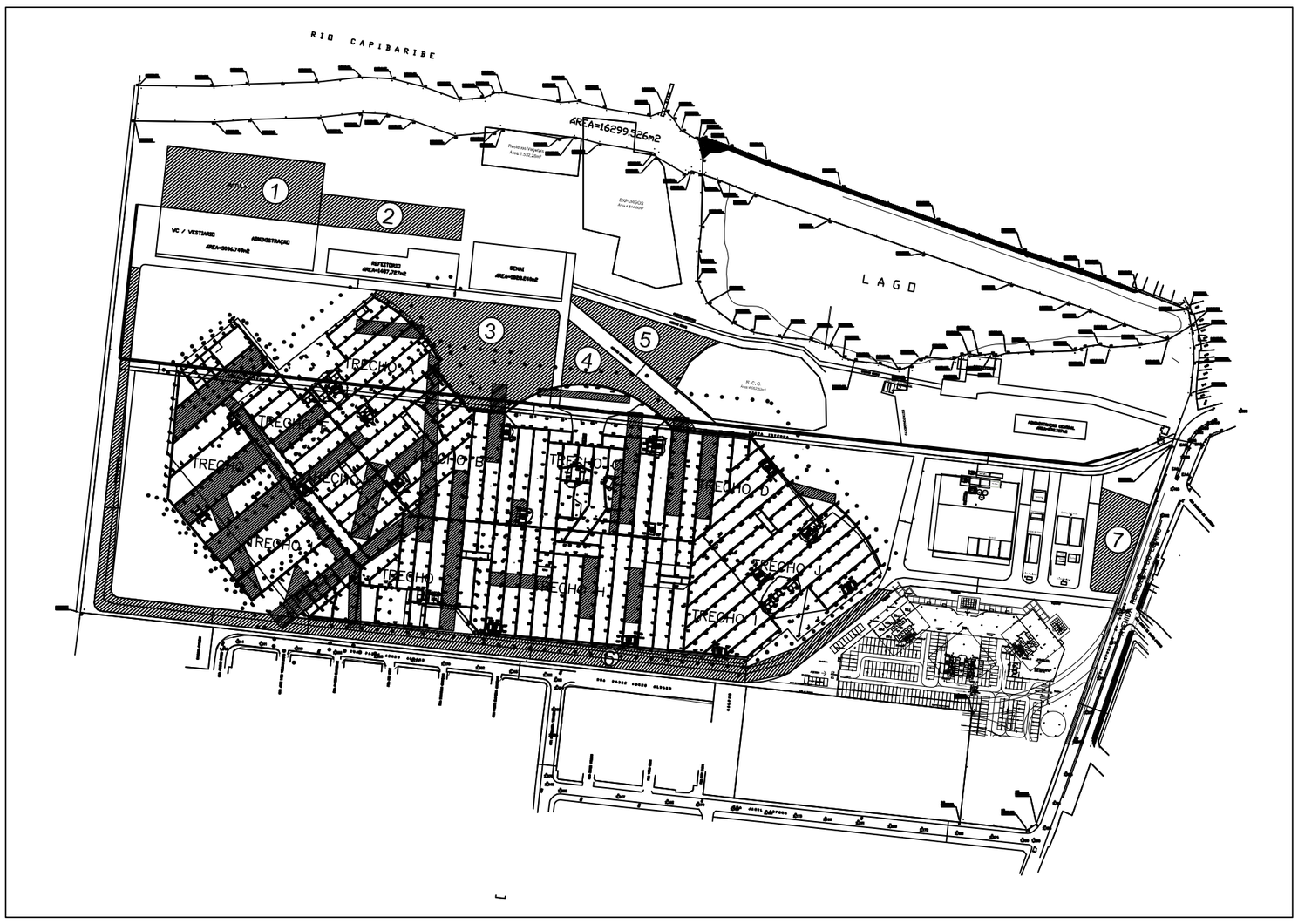
Nº DO DESENHO:
1RMS_RCC_PE007_R00.DWG

| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO: | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| ANDRÉA BATISTA | ANDRÉA BATISTA | ALEXANDRE GUIMÃO | 1/1000 |

RESPONSÁVEL TÉCNICO: EQUIPE TÉCNICA:

# APÊNDICE F

## Mapeamento do RCD beneficiado




Plantas Referenciadas:
1- Topografia
1RMS_TOP_PE001_R00.DWG
2-Sistema Viário
1RMS_TRF_PE001_R05.DWG
3-Arquitetura
1RMS_ARQ_PE001_R04.DWG

MATERIAL DA USIFORT APLICADO

1. RÓTULA PRÉMOLDADOS
2. REFEITÓRIO 2
3. CAMINHOS DE SERVIÇO
4. ESTACIONAMENTO VIP
5. ESTOQUE T&A
6. CAMINHOS DE SERVIÇO
7. CENTRAL DE FERRAGEM, DOBRA E ESTOQUE

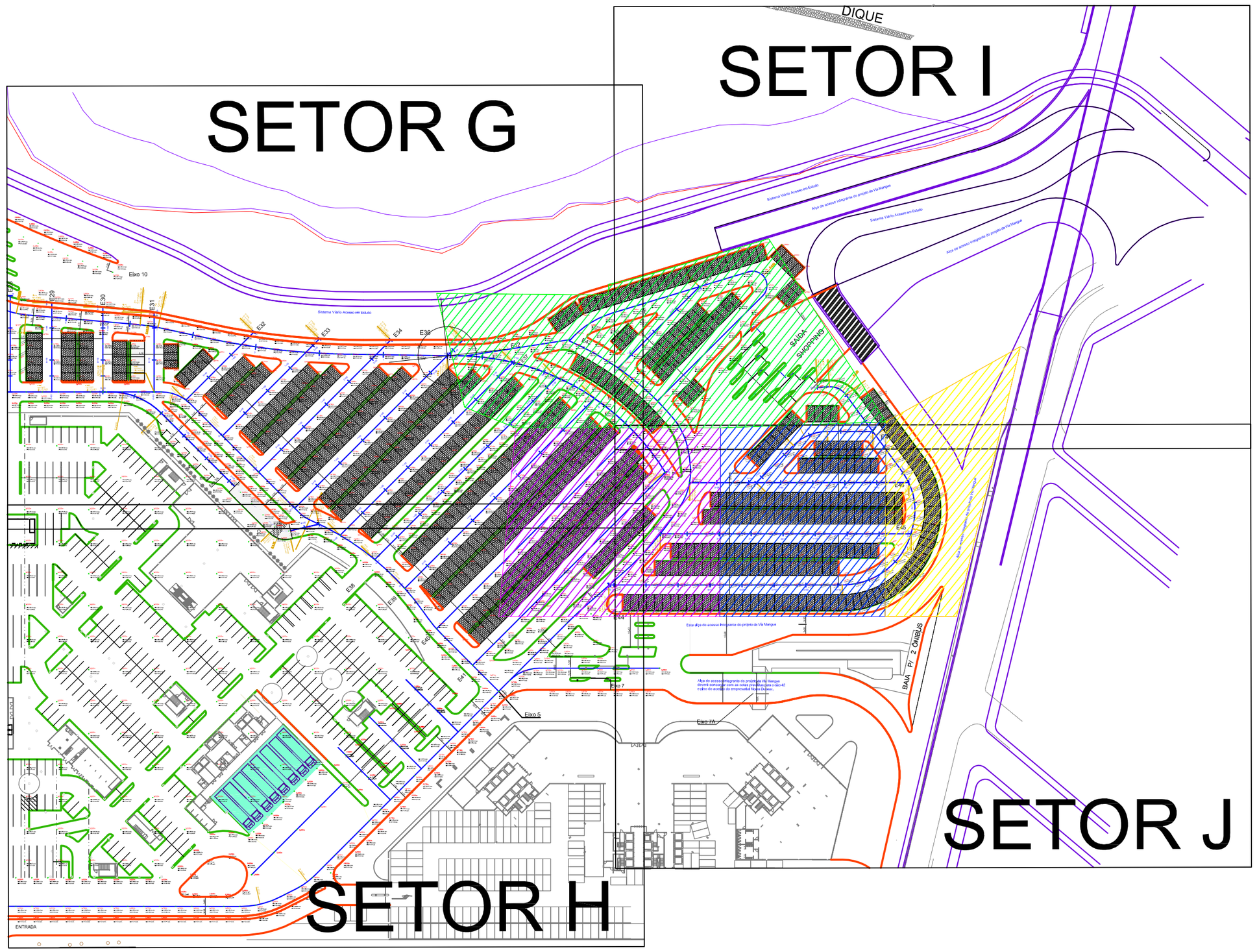
| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 13/03/12 | EMISSÃO INICIAL | MFZV | D.A. | F.M. | |

COORDENADAS GEOGRÁFICAS BASE RASTREADA DO PONTO DO IBGE SITUADO NA BIBLIOTECA DA UFPE COM COORDENADAS- WGS84 -LAT=8°03'03.46972"S e LONG=34°57'05.45911" W e he = 20.20,180m e SIRGAS 2000 = 284931.043mE e e 9109554.8694mN ho=25.070m E AMARRADAS AS ESTAÇÕES E9 e E13 INTERNAS A PROPRIEDADE COM COORDENADAS RESPECTIVAS WGS 84 - 8°05'08.55080"S e 34°53'39.74600"W he=-1.713m e SIRGAS 2000 -291248.591mE 9105741.388mN e ho=2.074m - WGS 84 - 8°05'07.91808"S e 34°53'45.25378"W e he=-1.698m e SIRGAS 2000 - 291079.864mE 9105760.041mN e ho=2.089m .

IDENTIFICAÇÃO: APÊNDICE F
PROPRIETÁRIO: PM PAR S.A.
EMPREENDIMENTO: RioMar Shopping
EMPREENDEDOR: JCPM
CONSTRUÇÃO: Queiroz Galvão Nordeste
LOCALIZAÇÃO: LOTEAMENTO BACARDI, S/N. BAIRRO DO PINA, RECIFE – PE.
PROJETO: RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL — ETAPA 01
TÍTULO: MAPEAMENTO DO MATERIAL DO BRITADOR A — SETOR: — REVISÃO: 00
Nº DO DESENHO: 1RMS_RCC_PE006_R00.DWG
DESENHO: ANDRÉA BATISTA | VERIFICAÇÃO: ANDRÉA BATISTA | APROVAÇÃO: ALEXANDRE GUSMÃO | ESCALA: 1/1000
RESPONSÁVEL TÉCNICO: — EQUIPE TÉCNICA:

# APÊNDICE G

## Material reciclado aplicado na pavimentação


SETOR G
SETOR I
SETOR H
SETOR J
DIQUE
Eixo 10
Eixo 9
Eixo 8
Eixo 7
Eixo 6
Eixo 5
Eixo 4A
Eixo 4
Eixo 3
Eixo 2
Eixo 1
SAÍDA SHOPPING
ENTRADA
Rua Pr. 2 Ônibus
Rua Pr. 1 Ônibus
Rua Pr. 3 Ônibus
Rua Pr. 4 Ônibus
Rua Pr. 5 Ônibus
Rua Pr. 6 Ônibus
Rua Pr. 7 Ônibus
Rua Pr. 8 Ônibus
Rua Pr. 9 Ônibus
Rua Pr. 10 Ônibus
Rua Pr. 11 Ônibus
Rua Pr. 12 Ônibus
Rua Pr.

**APÊNDICE H**

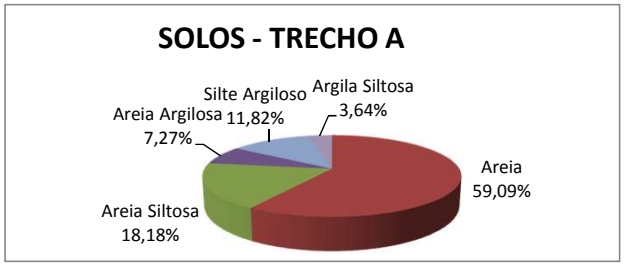
**Tipo de solo retirado no estaqueamento**

| TRECHO A | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COTA | SONDAGEM | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nspt | F09 (A) | | Nspt | F10 (VM) | | Nspt | F11 (A) | | Nspt | F16 (A) | | Nspt | F17 (VM) | | |
| | | CBF | 0,18 | | CBF | -0,24 | | CBF | -0,11 | | CBF | 0,18 | | CBF | -0,34 | |
| | | NA | 0,65 | | NA | 0,50 | | NA | 0,15 | | NA | NE | | NA | 0,30 | |
| 2 a 1 | 4 | Areia | | 3 | Areia | | 5 | Areia Siltosa | | 6 | Areia | | 4 | Areia | | |
| 1 a 0 | 2 | Areia | | 1 | Areia | | 2 | Areia Siltosa | | 7 | Areia | | 0 | Argila Siltosa | | |
| 0 a (-1) | 1 | Areia | | 1 | Areia Argilosa | | 0 | Argila Siltosa | | 1 | Areia Argilosa | | 1 | Areia Argilosa | | |
| (-1) a (-2) | 2 | Areia | | 4 | Areia | | 8 | Argila Siltosa | | 6 | Areia | | 3 | Areia | | |
| (-2) a (-3) | 7 | Areia | | 6 | Areia | | 8 | Areia | | 7 | Areia | | 8 | Areia | | |
| (-3) a (-4) | 11 | Areia | | 10 | Areia | | 8 | Areia | | 10 | Areia | | 9 | Areia | | |
| (-4) a (-5) | 12 | Areia | | 9 | Areia | | 8 | Areia | | 10 | Areia | | 12 | Areia | | |
| (-5) a (-6) | 9 | Areia | | 11 | Areia | | 8 | Areia | | 13 | Areia | | 7 | Areia | | |
| (-6) a (-7) | 12 | Areia | | 9 | Areia | | 7 | Areia | | 14 | Areia | | 12 | Areia | | |
| (-7) a(-8) | 13 | Areia | | 5 | Areia | | 5 | Areia | | 11 | Areia | | 11 | Areia | | |
| (-8) a (-9) | 6 | Silte Argiloso | | 8 | Areia | | 7 | Areia | | 10 | Areia | | 10 | Areia | | |
| (-9) a (-10) | 6 | Areia Siltosa | | 2 | Areia Siltosa | | 6 | Areia | | 2 | Areia | | 11 | Areia | | |
| (-10) a (-11) | 7 | Areia | | 4 | Areia Siltosa | | 5 | Areia | | 9 | Areia | | 5 | Areia Argilosa | | |
| (-11) a (-12) | 9 | Areia | | 2 | Areia Siltosa | | 11 | Areia | | 7 | Areia | | 6 | Areia | | |
| (-12) a (-13) | 12 | Areia | | 16 | Argila Siltosa | | 8 | Areia Siltosa | | 12 | Silte Argiloso | | 7 | Areia Siltosa | | |
| (-13) a (-14) | 10 | Areia | | 10 | Areia Siltosa | | 9 | Areia Siltosa | | 13 | Areia | | 11 | Areia Argilosa | | |
| (-14) a (-15) | 8 | Areia | | 11 | Areia Siltosa | | 7 | Areia Siltosa | | 16 | Areia | | 6 | Areia Siltosa | | |
| (-15)a (-16) | 32 | Areia | | 18 | Areia Siltosa | | 7 | Areia Argilosa | | 15 | Areia | | 3 | Areia Siltosa | | |
| (-16) a (-17) | 17 | Areia | | 24 | Areia Siltosa | | 27 | Areia Argilosa | | 22 | Areia | | 10 | Silte Argiloso | | |
| (-17) a (-18) | 23 | Silte Argiloso | | 36 | Areia Siltosa | | 36 | Silte Argiloso | | 31 | Areia Argilosa | | 21 | Silte Argiloso | | |
| (-18) a (-19) | 21 | Silte Argiloso | | 37 | Silte Argiloso | | 40 | Silte Argiloso | | 39 | Areia Siltosa | | 46 | Silte Argiloso | | |
| (-19) a (-20) | 40 | Silte Argiloso | | 1 | Areia Siltosa | | 40 | Silte Argiloso | | 40 | Areia Siltosa | | 43 | Silte Argiloso | | |
| (-20) a (-21) | 40 | Areia Siltosa | | 18 | Areia Siltosa | | 40 | Silte Argiloso | | 40 | Silte Argiloso | | 12 | Areia Argilosa | | |
| (-21) a (-22) | | | | 17 | Areia Siltosa | | 35 | Silte Argiloso | | 40 | Silte Argiloso | | 40 | Areia Argilosa | | |
| (-22) a (-23) | | | | 40 | Areia Siltosa | | 29 | Silte Argiloso | | | | | | | | |
| (-23) a (-24) | | | | | | | 40 | Silte Argiloso | | | | | | | | |
| (-24) a (-25) | | | | | | | 40 | Silte Argiloso | | | | | | | | |

| TRECHO A | |
|---|---|
| Média | |
| CBF | -0,07 |
| NA | 0,40 |

| TRECHO A | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COTA | SOLOS | | | | | | | | | | |
| | Areia c\ Pedreg. | Areia | Areia Siltosa | Areia Argilosa | Silte | Silte Arenoso | Silte Argiloso | Argila | Argila Arenosa | Argila Siltosa | |
| 2 a 1 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 1 a 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 0 a (-1) | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| (-1) a (-2) | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| (-2) a (-3) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-3) a (-4) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-4) a (-5) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-5) a (-6) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-6) a (-7) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-7) a(-8) | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-8) a (-9) | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| (-9) a (-10) | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-10) a (-11) | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-11) a (-12) | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-12) a (-13) | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| (-13) a (-14) | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-14) a (-15) | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-15)a (-16) | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| (-16) a (-17) | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| (-17) a (-18) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | |
| (-18) a (-19) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | |
| (-19) a (-20) | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | |
| (-20) a (-21) | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | |
| (-21) a (-22) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | |
| (-22) a (-23) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| (-23) a (-24) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| (-24) a (-25) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| SOMATÓRIO | 0 | 65 | 20 | 8 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 4 | 110 |

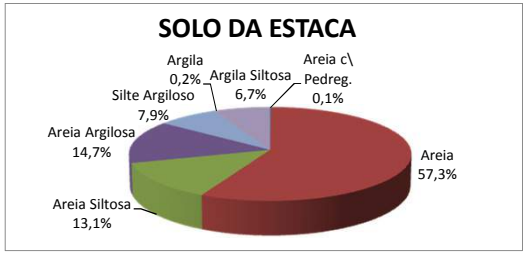
| | Areia c\ Pedreg. | Areia | Areia Siltosa | Areia Argilosa | Silte | Silte Arenoso | Silte Argiloso | Argila | Argila Arenosa | Argila Siltosa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PERCENTAGEM | 0,00% | 59,09% | 18,18% | 7,27% | 0,00% | 0,00% | 11,82% | 0,00% | 0,00% | 3,64% |
| VOL. CONC. (m³) | 1428,24 | 1428,24 | 1428,24 | 1428,24 | 1428,2 | 1428,24 | 1428,24 | 1428,2 | 1428,24 | 1428,24 |
| VOL. SOLO (m³) | 0,00 | 843,96 | 259,68 | 103,87 | 0,00 | 0,00 | 168,79 | 0,00 | 0,00 | 51,94 |



| SOLO DA ESTACA | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TIPOS DE SOLOS** | **Areia c\ Pedreg.** | **Areia** | **Areia Siltosa** | **Areia Argilosa** | **Silte** | **Silte Arenoso** | **Silte Argiloso** | **Argila** | **Argila Arenosa** | **Argila Siltosa** | **∑ =** |
| **$V_{SOLO}$ ($m^3$)** | 30,89 | ####### | 3285,85 | 3692,10 | 0,00 | 0,00 | 1973,79 | 42,20 | 0,00 | 1670,16 | **25036,85** |
| **PERCENTUAL** | 0,12% | 57,28% | 13,12% | 14,75% | 0,00% | 0,00% | 7,88% | 0,17% | 0,00% | 6,67% | |

| **Média** | |
|---|---|
| CBF | -0,11 |
| NA | 0,69 |

VSOLO GERADO = Volume de solo retirado na execução da estaca
CBF = Cota boca de furo
NA = Profundidade do nível d'água



# APÊNDICE I

## Economia obtida no trecho experimental

**TRECHO EXPERIMENTAL - QUANTITATIVOS**

| MISTURA | TERRAPLENAGEM | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | REGULARIZAÇÃO 1 | | | | REGULARIZAÇÃO 2 | | | | REGULARIZAÇÃO 3 | | | |
| | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado | Volume empolado[1] (m³) | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado | Volume empolado (m³) | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado (m³) | Volume empolado |
| 100% RCCR | 2.215,32 | 0,20 | 443,06 | 496,23 | 363,92 | 0,17 | 62,96 | 70,51 | 265,60 | 0,26 | 68,53 | 76,75 |
| 70% Solo da estaca + 30% RCCR | 3.091,14 | 0,20 | 618,23 | 692,42 | 1.246,76 | 0,17 | 215,69 | 241,57 | 334,50 | 0,26 | 86,30 | 96,66 |
| 60% Solo da estaca + 40% RCCR | 5.669,01 | 0,20 | 1.133,80 | 1.269,86 | 1.037,52 | 0,17 | 179,49 | 201,03 | 904,73 | 0,26 | 233,42 | 261,43 |
| 40% Solo da estaca +60% RCCR | 3.921,01 | 0,20 | 784,20 | 878,31 | 1.288,74 | 0,17 | 222,95 | 249,71 | 502,16 | 0,26 | 129,56 | 145,11 |

**TRECHO EXPERIMENTAL - CUSTO**

| MISTURA | VOLUME TOTAL (m³) | VOLUME DE CADA MATERIAL (m³) | | CUSTO UNITÁRIO DO RCCR (R$/m³) | CUSTO UNITÁRIO DO SOLO DA ESTACA (R$/m³) | CUSTO TOTAL (R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RCCR | SOLO DA ESTACA | | | |
| 100% RCCR | 1.042,75 | 1042,75 | 0 | 30,00 | 0 | 31.282,52 |
| 70% Solo da estaca + 30% RCCR | 1.521,10 | 456,33 | 1064,77 | 30,00 | 0 | 13.689,93 |
| 60% Solo da estaca + 40% RCCR | 2.693,31 | 1077,33 | 1615,99 | 30,00 | 0 | 32.319,78 |
| 40% Solo da estaca +60% RCCR | 1.907,56 | 1144,54 | 763,03 | 30,00 | 0 | 34.336,14 |
| | | 3720,95 | 3443,79 | | | 111.628,37 |

**TRECHO EXPERIMENTAL - QUANTITATIVOS**

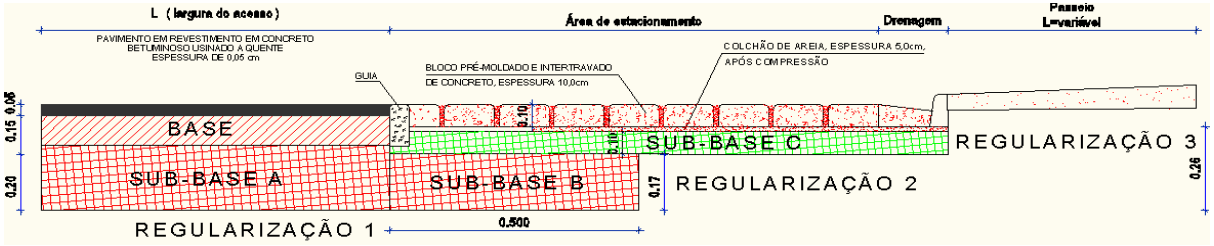
| MISTURA | PAVIMENTO FLEXÍVEL | | | | | | | | PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | SUB-BASE A | | | | SUB-BASE B | | | | SUB-BASE C | | | |
| | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado | Volume empolado (m³) | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado | Volume empolado (m³) | Área (m²) | Espessura (m) | Volume compactado (m³) | Volume empolado |
| 100% RCCR | 1.545,68 | 0,20 | 309,14 | 346,23 | 40,11 | 0,17 | 6,94 | 7,77 | 404,04 | 0,10 | 40,40 | 45,25 |
| 70% Solo da estaca + 30% RCCR | 1.355,66 | 0,20 | 271,13 | 303,67 | 154,22 | 0,17 | 26,68 | 29,88 | 1.400,98 | 0,10 | 140,10 | 156,91 |
| 60% Solo da estaca + 40% RCCR | 3.604,46 | 0,20 | 720,89 | 807,40 | 122,30 | 0,17 | 21,16 | 23,70 | 1.159,82 | 0,10 | 115,98 | 129,90 |
| 40% Solo da estaca +60% RCCR | 1.971,56 | 0,20 | 394,31 | 441,63 | 158,55 | 0,17 | 27,43 | 30,72 | 1.447,29 | 0,10 | 144,73 | 162,10 |

**TRECHO EXPERIMENTAL - SIMULAÇÃO**

| MISTURA | PESO DE CADA MATERIAL (ton) | | CUSTO UNITÁRIO DA DEPOSIÇÃO[2] (R$/ton) | VOLUME TOTAL DE AGREGADO NATURAL (m³) | CUSTO UNITÁRIO DO AGREGADO NATURAL (R$/m³) | CUSTO TOTAL DA SIMULAÇÃO (R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RCCR | SOLO DA ESTACA | | | | |
| 100% RCCR | 1459,85 | 0,00 | 58,65 | 1.042,75 | 30,00 | 116.902,80 |
| 70% Solo da estaca + 30% RCCR | 638,86 | 1810,11 | 58,65 | 1.521,10 | 30,00 | 189.265,63 |
| 60% Solo da estaca + 40% RCCR | 1508,26 | 2747,18 | 58,65 | 2.693,31 | 30,00 | 330.380,83 |
| 40% Solo da estaca +60% RCCR | 1602,35 | 1297,14 | 58,65 | 1.907,56 | 30,00 | 227.282,34 |
| | | | | | | 863.831,59 |

[1] O empolamento considerado foi de 12%

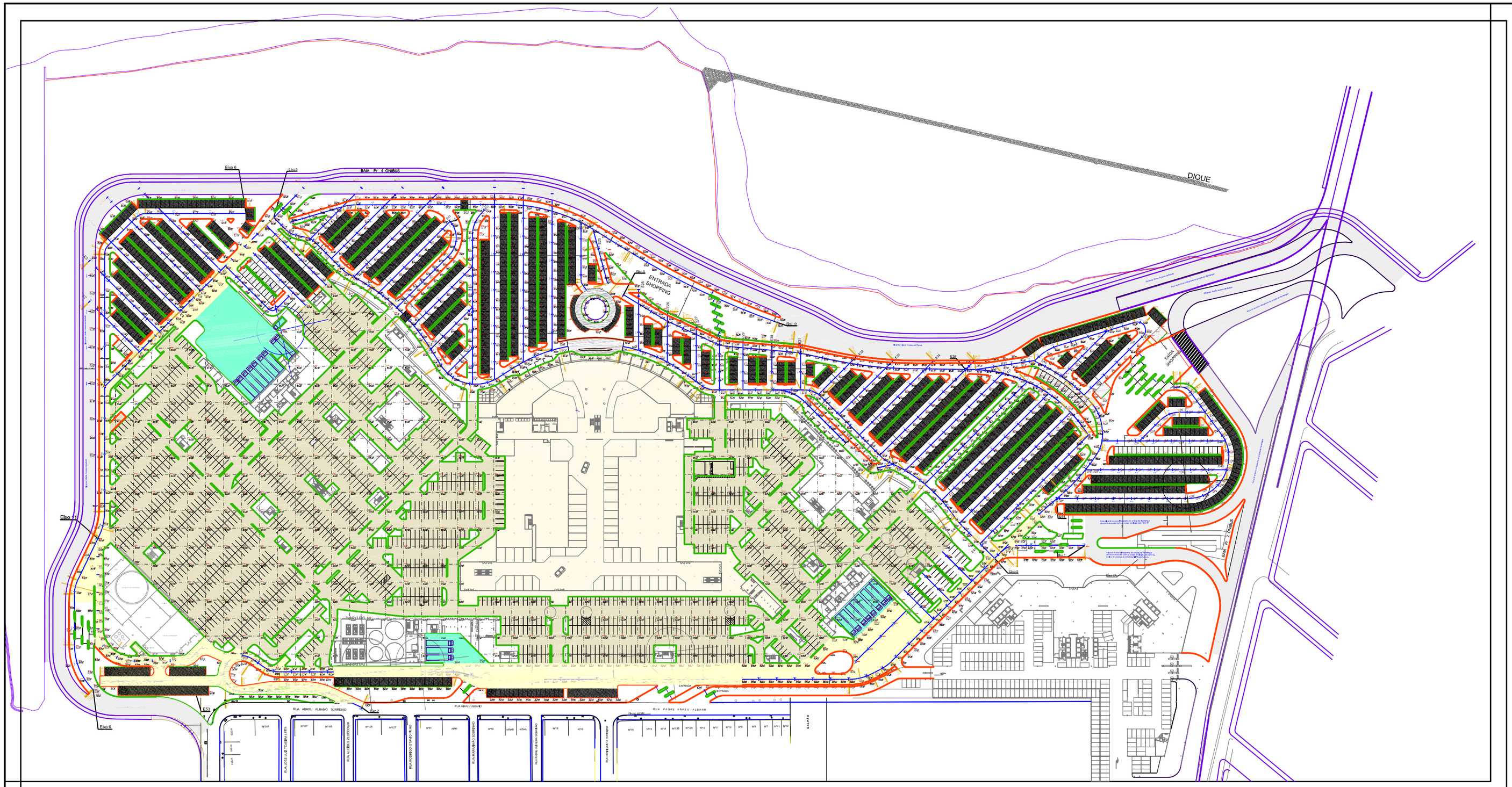
[2] O custo unitário da deposição inclui o valor do transporte (R$ 7,65/ton)




| Material | Economia/material (R$) |
|---|---|
| RCCR | 373.285,12 |
| Solo proveniente d | 378.918,09 |
| TOTAL | 752.203,21 |

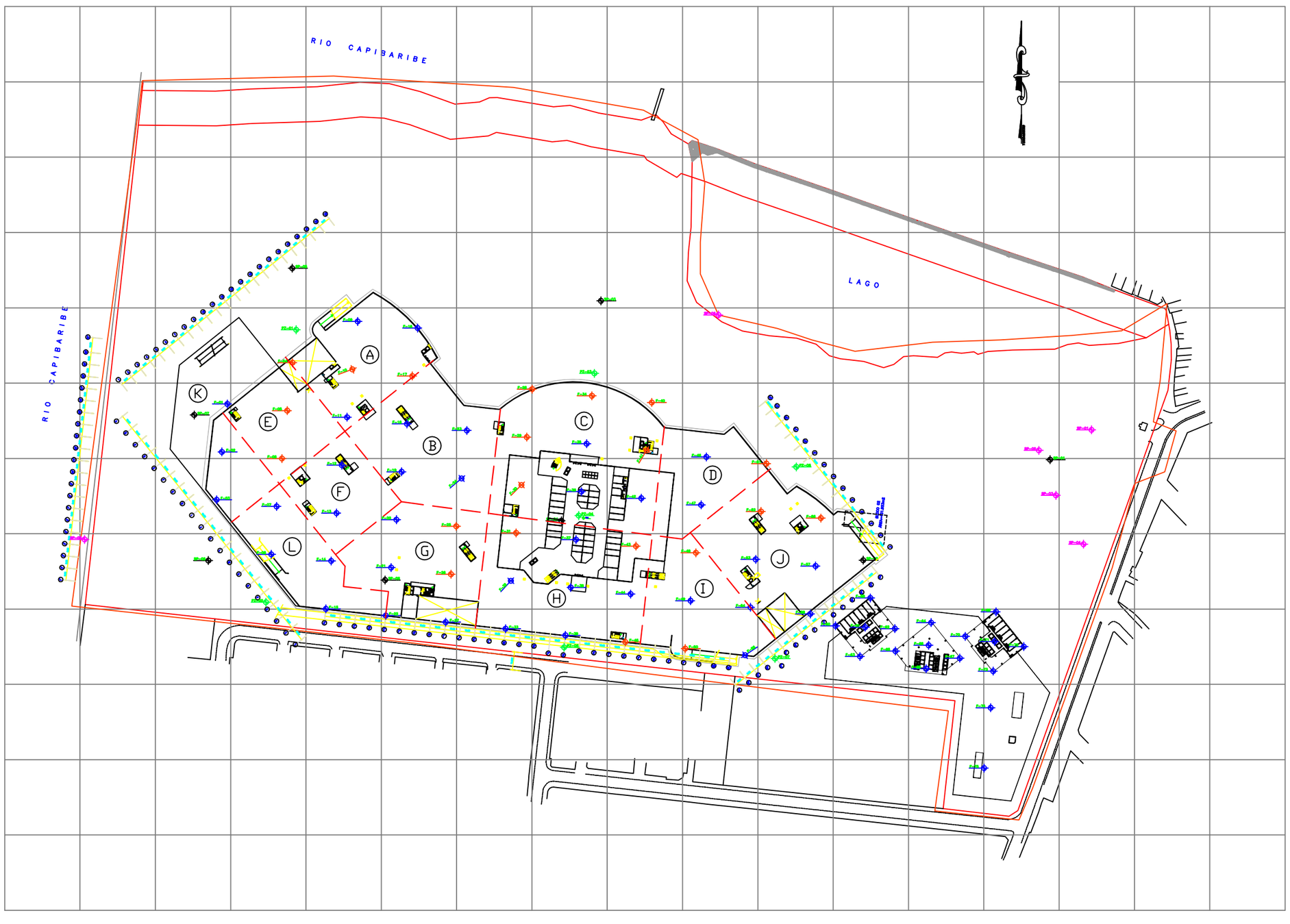
**ANEXO A**

**Projeto de pavimentação**


DIQUE
BAIA Pr. 4 ONIBUS
Eixo 6
Eixo 1
Eixo 11
ENTRADA SHOPPING
ENTRADA SHOPPING
RUA CARLOS DE TOLEDO LEITE
RUA ALCIDES GONÇALVES
RUA RAIMUNDO GONÇALVES
RUA ANTONIO GOMES RIBEIRO
RUA JOSÉ DE ALENCAR
RUA ABREU VIANNA TORRINHO
RUA PEDRO ABREU ALBANO
RUA ABREU VIANNA
Marco Anti Tsunami Area
Rua Dr. Carlos de Carvalho
Rua Dr. Carlos de Carvalho
Rua Dr. Carlos de Carvalho

**ANEXO B**

**Programação da prospecção geotécnica**




## COORDENADAS DAS SONDAGENS REL Nº 126/03

| FURO | LESTE | NORTE |
|---|---|---|
| SP–01 | 291063,690 | 9100749,173 |
| SP–02 | 291460,897 | 9100692,448 |
| SP–03 | 291369,781 | 9100584,838 |
| SP–04 | 291369,561 | 9100709,858 |
| SP–05 | 291090,919 | 9100879,379 |
| SP–06 | 291102,620 | 9100669,351 |
| SP–07 | 291035,808 | 9100770,845 |
| SP–08 | 291026,330 | 9100682,521 |

## COORDENADAS SONDAGENS REL Nº 58/10

| FURO | LESTE | NORTE |
|---|---|---|
| F–01 | 291047,788 | 9100784,144 |
| F–02 | 291044,301 | 9100754,345 |
| F–03 | 291045,755 | 9100722,531 |
| F–04 | 291091,663 | 9100613,884 |
| F–05 | 291057,648 | 9100781,747 |
| F–06 | 291084,089 | 9100749,841 |
| F–07 | 291083,912 | 9100718,135 |
| F–08 | 291076,895 | 9100688,328 |
| F–09 | 291134,338 | 9100840,863 |
| F–10 | 291130,601 | 9100800,157 |
| F–11 | 291127,304 | 9100771,351 |
| F–12 | 291123,797 | 9100745,845 |
| F–13 | 291120,270 | 9100713,739 |
| F–14 | 291116,763 | 9100681,833 |
| F–15 | 291113,330 | 9100650,127 |
| F–16 | 291174,056 | 9100656,827 |
| F–17 | 291170,579 | 9100804,761 |
| F–18 | 291167,060 | 9100772,855 |
| F–19 | 291163,548 | 9100741,149 |
| F–20 | 291160,028 | 9100709,243 |
| F–21 | 291156,511 | 9100677,536 |
| F–22 | 291152,994 | 9100645,700 |
| F–23 | 291209,919 | 9100768,008 |
| F–24 | 291205,302 | 9100736,102 |
| F–25 | 291199,746 | 9100704,848 |
| F–26 | 291196,388 | 9100673,140 |
| F–27 | 291192,751 | 9100641,374 |
| F–28 | 291250,004 | 9100785,808 |
| F–29 | 291246,677 | 9100754,102 |
| F–30 | 291243,060 | 9100722,396 |
| F–31 | 291238,643 | 9100700,600 |
| F–32 | 291236,009 | 9100658,744 |
| F–33 | 291232,606 | 9100636,638 |
| F–34 | 291288,602 | 9100791,572 |
| F–35 | 291286,338 | 9100759,766 |
| F–36 | 291282,618 | 9100727,860 |
| F–37 | 291279,301 | 9100696,104 |
| F–38 | 291275,795 | 9100664,347 |
| F–39 | 291272,387 | 9100632,641 |
| F–40 | 291328,609 | 9100787,176 |
| F–41 | 291326,092 | 9100755,370 |
| F–42 | 291325,575 | 9100723,643 |
| F–43 | 291319,058 | 9100691,707 |
| F–44 | 291315,541 | 9100659,951 |
| F–45 | 291313,024 | 9100628,145 |
| F–46 | 291365,600 | 9100781,373 |
| F–47 | 291362,333 | 9100719,167 |
| F–48 | 291358,816 | 9100687,391 |
| F–49 | 291355,299 | 9100655,685 |
| F–50 | 291351,782 | 9100623,749 |
| F–51 | 291405,699 | 9100775,570 |
| F–52 | 291402,091 | 9100714,771 |
| F–53 | 291398,574 | 9100682,995 |
| F–54 | 291395,057 | 9100651,189 |
| F–55 | 291391,540 | 9100619,383 |
| F–56 | 291441,848 | 9100770,376 |
| F–57 | 291438,531 | 9100676,888 |
| F–58 | 291434,814 | 9100646,702 |
| F–59 | 291474,440 | 9100697,378 |
| F–60 | 291491,581 | 9100638,864 |
| F–61 | 291471,351 | 9100627,699 |
| F–62 | 291490,600 | 9100637,018 |
| F–63 | 291487,888 | 9100618,944 |
| F–64 | 291515,002 | 9100641,017 |
| F–65 | 291491,330 | 9100652,139 |
| F–66 | 291513,295 | 9100626,944 |
| F–67 | 291534,079 | 9100617,497 |
| F–68 | 291511,661 | 9100610,351 |
| F–69 | 291508,002 | 9100648,193 |
| F–70 | 291507,727 | 9100631,842 |
| F–71 | 291507,127 | 9100638,663 |
| F–72 | 291576,545 | 9100695,004 |
| F–73 | 291555,301 | 9100609,779 |
| F–74 | 291560,576 | 9100594,476 |
| F–75 | 291555,141 | 9100644,393 |

## COORDENADAS DAS SONDAGENS REL Nº 001/11

| FURO | LESTE | NORTE |
|---|---|---|
| SP–01 | 291162,854 | 9100768,868 |
| SP–02 | 291088,664 | 9100730,302 |
| SP–03 | 291097,601 | 9100728,811 |
| SP–04 | 291018,184 | 9100663,076 |
| SP–05 | 290941,053 | 9100585,158 |
| SP–06 | 291381,664 | 9100840,914 |

## COORDENADAS DOS PIEZÔMETROS TIPO CASAGRANDE

| FURO | LESTE | NORTE |
|---|---|---|
| PZ–01 | 291053,481 | 9100692,429 |
| PZ–02 | 291073,476 | 9100694,053 |
| PZ–03 | 291291,500 | 9100806,481 |
| PZ–04 | 291281,089 | 9100712,057 |
| PZ–05 | 291271,367 | 9100624,699 |
| PZ–06 | 291439,497 | 9100744,379 |
| PZ–07 | 291411,416 | 9100617,154 |

## 1. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:

– PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ANÁLISES, FORAM FORNECIDOS PELO CLIENTE OS SEGUINTES DOCUMENTOS:

1. PLANTA DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DE AUTORIA DA EMPRESA H.C. NEGOCIAÇÕES IMOBILIÁRIAS E TOPOGRAFIA, DATADA DE MAIO DE 2005.
2. PLANTAS DO PROJETO ARQUITETÔNICO DO SHOPPING CENTER RIOMAR, DE AUTORIA DO ESCRITÓRIO ANF ARQUITETOS, DATADA DE MARÇO DE 2010.
3. RESULTADOS DE 06 (SEIS) FUROS DE SONDAGENS A PERCUSSÃO ATRAVÉS DO RELATÓRIO S–126/03, DE AUTORIA DA FIRMA ENGELO ENGENHARIA LTDA.

## 2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA AS SONDAGENS:

1. AS SONDAGENS À PERCUSSÃO F–01 a F–75 DEVEM TER PROFUNDIDADE DE PARALISAÇÃO DE ACORDO COM OS CRITÉRIOS DA NBR–6484. ESTE LIMITE PODERÁ SER MODIFICADO EM FUNÇÃO DOS PRIMEIROS RESULTADOS, OS QUAIS DEVERÃO SER REPASSADOS A GUSMÃO ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA, ESTIMA–SE UMA PROFUNDIDADE A SER ATINGIDA ENTRE 20,0 e 40,0m.
2. PARA A EXECUÇÃO DAS SONDAGENS DEVEM SER SEGUIDOS OS PROCEDIMENTOS DA NBR–6484 "EXECUÇÃO DE SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO DOS SOLOS–MÉTODOS DE ENSAIO".

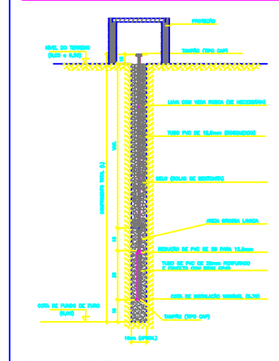
## 3. NOTAS:

1. FACE A COTA DE IMPLANTAÇÃO DO SUBSOLO (COTA 7,00) E DA PROXIMIDADE DO RIO CAPIBARIBE, É PROPOSTO A REALIZAÇÃO DE 07 (SETE) PIEZÔMETROS TIPO CASAGRANDE PARA MEDIÇÃO REAL DO NÍVEL D'ÁGUA NO TERRENO E A INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DAS MARÉS.
2. AS SONDAGENS LOCADAS COM INTERFERÊNCIA COM AS ESTRUTURAS EXISTENTES, CASO NÃO SEJA POSSÍVEL EXECUTÁ–LAS NO LOCAL PREVIAMENTE DEFINIDO POR LIMITAÇÕES DE PÉ DIREITO, ESTES FUROS DEVERÃO SER DESLOCADOS NO SENTIDO NORTE/SUL OU LESTE/OESTE QUE RESULTE EM MENOR DISTÂNCIA PARA O PONTO ANTERIORMENTE DEFINIDO, AS COORDENADAS DESTE NOVO PONTO DEVERÁ SER INFORMADA PARA A GUSMÃO ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA.

## LEGENDA:

- SP–01 – FUROS DE SONDAGENS A PERCUSSÃO RELATÓRIO Nº126/03
- F–01 – FUROS DE SONDAGENS A PERCUSSÃO (JÁ REALIZADO) RELATÓRIO Nº058/10
- PZ–01 – PIEZÔMETRO TIPO CASAGRANDE NOVOS FUROS DE SONDAGENS A PERCUSSÃO (A SER EXECUTADO)
- F–01 – NOVOS FUROS DE SONDAGENS (A SER EXECUTADO) RELATÓRIO Nº058/10.
- SP–01 – NOVOS FUROS DE SONDAGENS A PERCUSSÃO (A SER EXECUTADO) RELATÓRIO Nº001/11 – SP1 AO SP6 NO VIADUTO INTERNO.
- (A) – TRECHO A (NA ÁREA INTERNA DO EMPREENDIMENTO)
- – DIVISÓRIA ENTRE OS TRECHOS

## DETALHE DOS PIEZÔMETROS TIPO CASAGRANDE– PZ (7x)




## SEQUÊNCIA EXECUTIVA:

1– PERFURAÇÃO DE FURO COM DIÂMETRO APROXIMADO DE 10 cm ATÉ COTA INDICADA.
2– COLOCAÇÃO NO FURO DO FURO DE UMA CAMADA DE 15 cm DE AREIA GROSSA E LAVADA.
3– COLOCAÇÃO DO TUBO DE COMPRIMENTO "L" NO TOPO DA CAMADA DE AREIA.
4– PREENCHER 45 cm DO VAZIO ENTRE FURO E TUBO COM AREIA GROSSA LAVADA.
5– EXECUTAR CAMADA DE SELO ATÉ A SUPERFÍCIE, DEVEM SER UTILIZADAS BOLAS UMEDECIDAS DE BENTONITA PARA A EXECUÇÃO DESTE SELO.
6– COLOCAR A PROTEÇÃO E SINALIZAR O INSTRUMENTO.
7– AS LEITURAS INICIAIS DEVEM SER DIÁRIAS NA PRIMEIRA SEMANA, PASSANDO PARA QUINZENAIS.
8– DEVE SER REALIZADA MEDIÇÃO NA MESMA HORA DA MARÉ MÁXIMA INFORMADA PELO PORTO DE RECIFE.

| REV. | DESCRIÇÃO | APROVAÇÃO | LIBERAÇÃO | PROJETO | DATA |
|---|---|---|---|---|---|
| | REVISÕES | | | | |
| 01 | INDICAÇÃO NA PLANTA DAS SONDAGENS NOVAS QUE JÁ FORAM EXECUTADAS. | | | Guzmão | 03/06/10 |
| 00 | EMISSÃO INICIAL | | | Guzmão | 31/03/10 |

IDENTIFICAÇÃO
**ANEXO B**


GUSMÃO
ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA.
Av. Agamenon Magalhães 4911 Nº 1041 Sala 304 – Torreão – CEP: 52030-210 Recife/PE
Fone/Fax: (081) 3243–3004 – 3243–7570 e-mail: guzmao@hotmail.com


RESPONSÁVEL TÉCNICO
Jaime de Azevedo Guzmão Filho – CREA 030040/D
Alexandre Duarte Guzmão – CREA 17.403–6/PE
Gilmar de Brito Mota – CREA 2.004–6/PE

| | |
|---|---|
| OBRA: RIOMAR SHOPPING RECIFE | ARQUIVO Nº: 4310 |
| CLIENTE: JCPM | PRANCHA Nº: 01 |
| LOCAL: PINA – RECIFE – PE | REVISÃO: 01 |
| PROJETO: PROJETO DE FUNDAÇÕES | DATA: MARÇO/2010 |
| TÍTULO: PROGRAMAÇÃO DA PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA | ESCALA: 1/750 |
| | DESENHO: ANTONIO SOUZA |

**ANEXO C**

**Rastreabilidade das estacas**

GUSMÃO
ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA.

**PLANILHA DE RASTREABILIDADE DAS ESTACAS -**

| | | | | | | Volume (m³) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DATA** | **Pilar:** | **Estaca** | **Diâmetro** | **Trecho** | **Ponta do trado (m)** | **Téorico** | **Lido** | **Sobre Consumo** |
| 27/10/2010 | PAV10 | E01 | 500 | A | 23,25 | 4,56 | 6,40 | 40,35% |
| 27/10/2010 | PAU10 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,00 | 33,04% |
| 27/10/2010 | PAT10 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,00 | 33,04% |
| 27/10/2010 | PAS10 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,30 | 33,76% |
| 27/10/2010 | PAR10 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,00 | 27,39% |
| 27/10/2010 | PAQ10 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,20 | 31,63% |
| 27/10/2010 | PAP10 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,10 | 29,51% |
| 27/10/2010 | PAO10 | E01 | 500 | A | 22,50 | 4,41 | 6,60 | 49,66% |
| 27/10/2010 | PAN09 | E03 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 5,80 | 23,14% |
| 27/10/2010 | PAO09 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 5,40 | 19,73% |
| 28/10/2010 | PAP*08* | E01 | 400 | A | 22,20 | 2,78 | 3,35 | 27,70% |
| 28/10/2010 | PAP*07* | E01 | 400 | A | 22,10 | 2,77 | 3,55 | 28,16% |
| 28/10/2010 | PAP09 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,40 | 35,88% |
| 28/10/2010 | PAQ09 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,70 | 42,25% |
| 28/10/2010 | PAR09 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 5,80 | 23,14% |
| 28/10/2010 | PAS09 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 5,90 | 25,27% |
| 28/10/2010 | PAT09 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,80 | 34,57% |
| 28/10/2010 | PAU09 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,40 | 41,91% |
| 30/10/2010 | PAV10 | E02 | 500 | A | 22,50 | 4,42 | 6,20 | 40,41% |
| 30/10/2010 | PAU10 | E02 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 6,00 | 34,09% |
| 30/10/2010 | PAT10 | E02 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 5,80 | 29,62% |
| 30/10/2010 | PAS10 | E02 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,30 | 33,76% |
| 30/10/2010 | PAR10 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 5,70 | 26,28% |
| 30/10/2010 | PAQ10 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 5,60 | 24,07% |
| 30/10/2010 | PAP10 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,32 | 5,70 | 32,02% |
| 30/10/2010 | PAO10 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,32 | 6,30 | 45,92% |
| 30/10/2010 | PAN9 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,90 | 52,87% |
| 01/11/2010 | PAP*08* | E02 | 400 | A | 21,10 | 2,65 | 3,25 | 21,13% |
| 01/11/2010 | PAP*07* | E02 | 400 | A | 22,10 | 2,77 | 3,21 | 26,35% |
| 01/11/2010 | PAP05 | E01 | 400 | A | 22,10 | 2,77 | 3,50 | 13,72% |
| 01/11/2010 | PAQ05 | E01 | 400 | A | 22,60 | 2,83 | 3,15 | 8,13% |
| 01/11/2010 | PAU05 | E01 | 400 | A | 21,10 | 2,65 | 3,06 | 23,40% |
| 01/11/2010 | PAV*09* | E01 | 400 | A | 21,20 | 2,66 | 3,27 | 22,93% |
| 01/11/2010 | PAN09 | E04 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,30 | 33,76% |
| 01/11/2010 | PAO09 | E02 | 500 | A | 22,40 | 4,39 | 6,30 | 43,51% |
| 01/11/2010 | PAP09 | E02 | 500 | A | 23,10 | 4,53 | 6,10 | 34,66% |
| 01/11/2010 | PAQ09 | E02 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 6,20 | 38,70% |
| 01/11/2010 | PAR09 | E02 | 500 | A | 23,15 | 4,54 | 6,20 | 36,56% |
| 01/11/2010 | PAS09 | E02 | 500 | A | 22,25 | 4,36 | 6,00 | 37,61% |
| 01/11/2010 | PAT09 | E02 | 500 | A | 22,85 | 4,48 | 6,00 | 33,93% |
| 01/11/2010 | PAU09 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,00 | 33,04% |
| 01/11/2010 | PAV09 | E03 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,20 | 43,85% |
| 01/11/2010 | PAV10 | E03 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,00 | 39,21% |
| 01/11/2010 | PAU10 | E03 | 500 | A | 22,65 | 4,44 | 6,00 | 35,14% |
| 01/11/2010 | PAT10 | E03 | 500 | A | 22,65 | 4,44 | 6,20 | 39,64% |
| 01/11/2010 | PAS10 | E03 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 7,00 | 55,21% |
| 01/11/2010 | PAR10 | E03 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,60 | 46,34% |
| 03/11/2010 | PAQ10 | E03 | 500 | A | 23,35 | 4,58 | 6,40 | 39,74% |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 03/11/2010 | PAP10 | E03 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,20 | 37,47% |
| 03/11/2010 | PAO10 | E03 | 500 | A | 22,45 | 4,40 | 6,40 | 45,45% |
| 03/11/2010 | PAN09 | E05 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,30 | 39,69% |
| 03/11/2010 | PAN09 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,60 | 46,34% |
| 03/11/2010 | PAO09 | E03 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,30 | 39,69% |
| 03/11/2010 | PAP09 | E03 | 500 | A | 22,60 | 4,43 | 6,20 | 39,95% |
| 03/11/2010 | PAQ09 | E03 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,10 | 35,25% |
| 05/11/2010 | PAO09 | E04 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 7,00 | 48,62% |
| 05/11/2010 | PAP09 | E04 | 500 | A | 22,60 | 4,43 | 6,30 | 42,21% |
| 05/11/2010 | PAQ09 | E04 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,60 | 40,13% |
| 05/11/2010 | PAR09 | E03 | 500 | A | 23,10 | 4,53 | 7,10 | 56,73% |
| 05/11/2010 | PAS09 | E03 | 500 | A | 22,70 | 4,45 | 6,40 | 43,82% |
| 05/11/2010 | PAT09 | E03 | 500 | A | 22,20 | 4,35 | 6,70 | 54,02% |
| 05/11/2010 | PAU09 | E03 | 500 | A | 22,20 | 4,35 | 6,80 | 56,32% |
| 05/11/2010 | PAV10 | E04 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,60 | 29,93% |
| 05/11/2010 | PAX*10 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,40 | 48,49% |
| 05/11/2010 | PAU10 | E04 | 500 | A | 22,60 | 4,43 | 7,10 | 60,27% |
| 05/11/2010 | PAT10 | E04 | 500 | A | 22,30 | 4,37 | 6,50 | 48,74% |
| 05/11/2010 | PAS10 | E04 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 7,20 | 52,87% |
| 05/11/2010 | PAR10 | E04 | 500 | A | 22,30 | 4,37 | 6,70 | 53,32% |
| 05/11/2010 | PAP10 | E04 | 500 | A | 22,65 | 4,44 | 6,30 | 41,89% |
| 05/11/2010 | PAO10 | E04 | 500 | A | 22,60 | 4,43 | 6,30 | 42,21% |
| 05/11/2010 | PAQ10 | E04 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,80 | 44,37% |
| 06/11/2010 | PAN08 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 5,80 | 23,14% |
| 06/11/2010 | PAN09* | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 5,80 | 23,14% |
| 06/11/2010 | PAO09* | E01 | 500 | A | 21,10 | 4,14 | 5,20 | 25,60% |
| 06/11/2010 | PAO08 | E01 | 500 | A | 24,00 | 4,71 | 6,50 | 38,00% |
| 06/11/2010 | PAP08 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,30 | 39,69% |
| 06/11/2010 | PAQ08 | E01 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,00 | 33,04% |
| 06/11/2010 | PAR08 | E01 | 500 | A | 23,40 | 4,59 | 6,70 | 45,97% |
| 06/11/2010 | PAS08 | E01 | 500 | A | 22,50 | 4,41 | 8,00 | 81,41% |
| 06/11/2010 | PAT08 | E01 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 5,80 | 29,75% |
| 06/11/2010 | PAU08 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,40 | 25,29% |
| 06/11/2010 | PAV08 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,40 | 25,29% |
| 06/11/2010 | PAX*08 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,30 | 22,97% |
| 06/11/2010 | PAV07 | E01 | 500 | A | 21,60 | 4,23 | 6,40 | 51,30% |
| 08/11/2010 | PAS09 | E04 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 7,10 | 57,43% |
| 08/11/2010 | PAT09 | E04 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,70 | 48,56% |
| 08/11/2010 | PAU09 | E04 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 6,70 | 49,89% |
| 08/11/2010 | PAX*10 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,70 | 55,45% |
| 08/11/2010 | PAX*08 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,10 | 41,53% |
| 08/11/2010 | PAV08 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,70 | 48,56% |
| 08/11/2010 | PAU08 | E02 | 500 | A | 23,00 | 4,51 | 6,40 | 41,91% |
| 08/11/2010 | PAT08 | E02 | 500 | A | 22,80 | 4,47 | 7,50 | 67,79% |
| 08/11/2010 | PAR08 | E02 | 500 | A | 23,40 | 4,59 | 6,20 | 35,08% |
| 08/11/2010 | PAQ08 | E02 | 500 | A | 24,40 | 4,78 | 7,80 | 63,18% |
| 12/11/2010 | PAN08 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,10 | 48,06% |
| 12/11/2010 | PAN09* | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,80 | 40,78% |
| 12/11/2010 | PAO09* | E02 | 500 | A | 20,80 | 4,08 | 6,50 | 59,31% |
| 12/11/2010 | PAO08 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 7,30 | 77,18% |
| 12/11/2010 | PAP08 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 7,40 | 88,78% |
| 12/11/2010 | PAQ08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 7,10 | 72,33% |
| 12/11/2010 | PAR08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 7,10 | 72,33% |
| 12/11/2010 | PAS08 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,80 | 65,05% |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12/11/2010 | PAT08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,40 | 31,07% |
| 12/11/2010 | PAU08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,80 | 40,78% |
| 12/11/2010 | PAV08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,90 | 43,20% |
| 12/11/2010 | PAX*08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,20 | 50,49% |
| 12/11/2010 | PAV07 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,50 | 33,50% |
| 12/11/2010 | PAU07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,70 | 38,35% |
| 12/11/2010 | PAT07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,70 | 62,62% |
| 12/11/2010 | PAS07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,20 | 50,49% |
| 12/11/2010 | PAR07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,70 | 38,35% |
| 12/11/2010 | PAQ07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,80 | 40,78% |
| 12/11/2010 | PAP07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,90 | 43,20% |
| 13/11/2010 | PAO07 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,10 | 30,10% |
| 13/11/2010 | PAN07 | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,90 | 43,20% |
| 13/11/2010 | PAN10 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,50 | 50,81% |
| 13/11/2010 | PAN08 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,20 | 58,16% |
| 13/11/2010 | PAN08* | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,10 | 48,06% |
| 13/11/2010 | PAN07* | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,40 | 31,07% |
| 13/11/2010 | PAO08* | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,20 | 50,49% |
| 13/11/2010 | PAP08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,00 | 45,63% |
| 13/11/2010 | PAQ08 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,40 | 63,27% |
| 13/11/2010 | PAS08 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,80 | 65,05% |
| 13/11/2010 | PAT08 | E04 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,10 | 48,06% |
| 13/11/2010 | PAU08 | E04 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,20 | 50,49% |
| 13/11/2010 | PAV08 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,40 | 63,27% |
| 13/11/2010 | PAV07 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,20 | 50,49% |
| 13/11/2010 | PAT07 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 13/11/2010 | PAU07 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,90 | 43,20% |
| 13/11/2010 | PAS07 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,40 | 55,34% |
| 13/11/2010 | PAR07 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,00 | 45,63% |
| 13/11/2010 | PAN10 | E02 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,10 | 48,06% |
| 16/11/2010 | PAN10 | E03 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 7,40 | 79,61% |
| 16/11/2010 | PAN08 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,20 | 58,16% |
| 16/11/2010 | PAN08* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,70 | 70,92% |
| 16/11/2010 | PAN07* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 16/11/2010 | PAO08* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,90 | 50,51% |
| 16/11/2010 | PAO07* | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,00 | 27,55% |
| 16/11/2010 | PAP08 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 16/11/2010 | PAN07 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,30 | 35,20% |
| 16/11/2010 | PAO07 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,60 | 42,86% |
| 16/11/2010 | PAP07 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,90 | 50,51% |
| 16/11/2010 | PAQ07 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 16/11/2010 | PAR07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,90 | 50,51% |
| 16/11/2010 | PAS07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 16/11/2010 | PAT07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,20 | 32,65% |
| 16/11/2010 | PAS08 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,00 | 53,06% |
| 16/11/2010 | PAU07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,10 | 30,10% |
| 16/11/2010 | PAV07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 16/11/2010 | PAV09 | E05 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 7,10 | 64,73% |
| 16/11/2010 | PAV09 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,90 | 60,09% |
| 16/11/2010 | PAV06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,90 | 50,51% |
| 17/11/2010 | PAN10 | E04 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 6,00 | 45,63% |
| 17/11/2010 | PAN07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 17/11/2010 | PAO07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 17/11/2010 | PAP07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,10 | 30,10% |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17/11/2010 | PAQ07 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 17/11/2010 | PAR07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,40 | 37,76% |
| 17/11/2010 | PAS07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,40 | 63,27% |
| 17/11/2010 | PAT07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 17/11/2010 | PAV09 | E04 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,90 | 36,89% |
| 17/11/2010 | PAV09 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 7,80 | 80,97% |
| 17/11/2010 | PAV06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,30 | 35,20% |
| 17/11/2010 | PAU06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 17/11/2010 | PAT06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,20 | 32,65% |
| 17/11/2010 | PAS06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 17/11/2010 | PAR06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,00 | 27,55% |
| 17/11/2010 | PAQ06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 17/11/2010 | PAP06 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 17/11/2010 | PAO*06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 17/11/2010 | PAO*05 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 17/11/2010 | PAN08* | E03 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 7,00 | 62,41% |
| 18/11/2010 | PAN07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,90 | 76,02% |
| 18/11/2010 | PAO07* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 18/11/2010 | PAP07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,70 | 70,92% |
| 18/11/2010 | PAQ07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,10 | 55,61% |
| 18/11/2010 | PAO*05 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,10 | 30,10% |
| 18/11/2010 | PAO*06 | E05 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 6,40 | 48,49% |
| 18/11/2010 | PAO*06 | E01 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,70 | 32,25% |
| 18/11/2010 | PAP06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,40 | 37,76% |
| 18/11/2010 | PAQ06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,20 | 58,16% |
| 18/11/2010 | PAR06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,50 | 65,82% |
| 18/11/2010 | PAS06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,00 | 53,06% |
| 18/11/2010 | PAT06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,20 | 58,16% |
| 18/11/2010 | PAU06 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 18/11/2010 | PAV06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,40 | 63,27% |
| 18/11/2010 | PAU07 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,00 | 53,06% |
| 18/11/2010 | PAU05* | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 18/11/2010 | PAR05 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,20 | 32,65% |
| 18/11/2010 | PAS05 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 4,90 | 25,00% |
| 18/11/2010 | PAT05 | E01 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 4,80 | 22,45% |
| 18/11/2010 | PAT05* | E01 | 500 | A | 21,00 | 4,12 | 5,50 | 33,50% |
| 18/11/2010 | PAO*05 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,30 | 60,71% |
| 19/11/2010 | PAO*06 | E04 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,90 | 36,89% |
| 19/11/2010 | PAO*06 | E02 | 500 | A | 22,00 | 4,31 | 5,60 | 29,93% |
| 19/11/2010 | PAP06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 19/11/2010 | PAQ06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,70 | 45,41% |
| 19/11/2010 | PAR06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,20 | 58,16% |
| 19/11/2010 | PAS06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,40 | 63,27% |
| 19/11/2010 | PAT06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,40 | 37,76% |
| 19/11/2010 | PAU06 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 6,10 | 55,61% |
| 19/11/2010 | PAU05* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 19/11/2010 | PAR05 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,20 | 32,65% |
| 19/11/2010 | PAS05 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,30 | 35,20% |
| 19/11/2010 | PAT05 | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 4,90 | 25,00% |
| 19/11/2010 | PAT05* | E02 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,80 | 47,96% |
| 20/11/2010 | PAP06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,60 | 42,86% |
| 20/11/2010 | PAQ06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,90 | 50,51% |
| 20/11/2010 | PAR06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,50 | 40,31% |
| 20/11/2010 | PAS06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,10 | 30,10% |
| 20/11/2010 | PAT06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,40 | 37,76% |
| 20/11/2010 | PAR05 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,20 | 32,65% |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20/11/2010 | PAS05 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 4,80 | 22,45% |
| 20/11/2010 | PAT05 | E03 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 4,90 | 25,00% |
| 20/11/2010 | PAU06 | E04 | 500 | A | 20,00 | 3,92 | 5,96 | 52,04% |
| 06/12/2010 | PA0*10* | E01 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,20 | 21,67% |
| 06/12/2010 | PAP*10* | E01 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,20 | 21,67% |
| 06/12/2010 | PAP05 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,20 | 21,67% |
| 15/12/2010 | PAX*09* | E01 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,00 | 14,07% |
| 15/12/2010 | PAX09 | E01 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 2,94 | 11,79% |
| 15/12/2010 | PAX*07 | E01 | 400 | A | 21,40 | 2,68 | 3,20 | 19,40% |
| 15/12/2010 | PAX*06 | E01 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 2,94 | 11,79% |
| 15/12/2010 | PAV05 | E01 | 400 | A | 21,40 | 2,68 | 3,20 | 19,40% |
| 15/12/2010 | PAU05 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,00 | 14,07% |
| 15/12/2010 | PAQ05 | E02 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,40 | 23,19% |
| 15/12/2010 | PAP05 | E03 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,30 | 19,57% |
| 15/12/2010 | PAV*10 | E01 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,52 | 27,54% |
| 16/12/2010 | PAP*10* | E02 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,60 | 30,43% |
| 16/12/2010 | PAO*10* | E02 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,39 | 22,83% |
| 16/12/2010 | PAV*10 | E02 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,46 | 25,36% |
| 16/12/2010 | PAV*09* | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,76 | 3,00 | 8,70% |
| 16/12/2010 | PAX*09* | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,30 | 25,48% |
| 16/12/2010 | PAX09 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 2,91 | 10,65% |
| 16/12/2010 | PAX*07 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,20 | 21,67% |
| 16/12/2010 | PAX*06 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,10 | 17,87% |
| 16/12/2010 | PAV05 | E02 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,10 | 17,87% |
| 16/12/2010 | PAU05 | E03 | 400 | A | 21,20 | 2,66 | 3,00 | 12,78% |
| 16/12/2010 | PAQ05 | E03 | 400 | A | 22,20 | 2,78 | 3,36 | 20,86% |
| 16/12/2010 | PAP05 | E04 | 400 | A | 22,00 | 2,76 | 3,17 | 14,86% |
| 17/12/2010 | PAX09 | E03 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,00 | 14,07% |
| 17/12/2010 | PAX*07 | E03 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,40 | 29,28% |
| 17/12/2010 | PAX*06 | E03 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,33 | 26,62% |
| 17/12/2010 | PAV05 | E03 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,17 | 20,53% |
| 17/12/2010 | PAU05 | E04 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,23 | 22,81% |
| 17/12/2010 | PAQ05 | E04 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,10 | 17,87% |
| 18/12/2010 | PAX09 | E04 | 400 | A | 21,00 | 2,63 | 3,20 | 21,67% |
| 20/12/2010 | PAV05 | E04 | 400 | A | 21,40 | 2,68 | 3,00 | 11,94% |
| 20/04/2011 | PAT10* | E01 | 500 | A | 22,15 | 4,34 | 6,30 | 45,16% |
| 20/04/2011 | PAU10* | E01 | 500 | A | 22,10 | 4,33 | 5,95 | 37,41% |
| 25/04/2011 | PAU10* | E02 | 500 | A | 22,40 | 4,39 | 6,49 | 47,84% |
| 25/04/2011 | PAT10* | E02 | 500 | A | 22,20 | 4,35 | 6,32 | 45,29% |
| 30/04/2011 | PAN*07* | E01 | 500 | A | 22,10 | 4,33 | 6,54 | 51,04% |
| 16/05/2011 | PAV10* | E01 | 500 | A | 22,10 | 4,33 | 5,88 | 35,80% |
| 17/05/2011 | PAV10* | E02 | 500 | A | 22,20 | 4,35 | 5,94 | 36,55% |
| | | | | **Média =** | **21,49** | **∑ =** | **1428,24** | |

**ANEXO D**

**Topografia e área dos galpões**

| REV. | DATA | OBSERVAÇÕES | DES. | REV. | APROV. | AUTORIZ. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 00 | 27/04/10 | EMISSÃO INICIAL | MFZV | D.A. | F.M. | |

IDENTIFICAÇÃO: ANEXO D

PROPRIETÁRIO: PM PAR S.A.

EMPREENDIMENTO: | EMPREENDEDOR: | CONSTRUÇÃO:

RIOMAR Shopping

JCPM Jota Carlos Pires Menezes Group

Camilo de Holanda Construtora

LOCALIZAÇÃO: LOTEAMENTO BACARDI, S/N, BAIRRO DO PINA, RECIFE – PE.

PROJETO: TOPOGRAFIA E ÁREA DOS GALPÕES | ETAPA 01

TÍTULO: PLANIALTIMÉTRICA | SETOR: SETOR B | REVISÃO: 00

Nº DO DESENHO: TRMS_TOP_PE01_R00.DWG

| DESENHO: | VERIFICAÇÃO: | APROVAÇÃO | ESCALA: |
|---|---|---|---|
| MARCELLO | | | 1/750 |

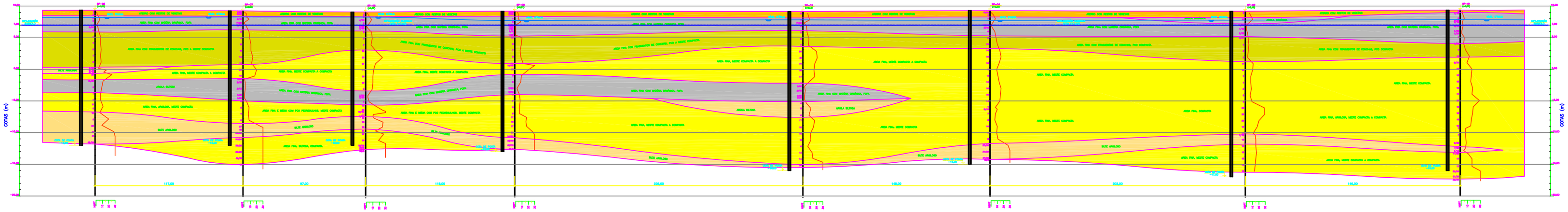
RESPONSÁVEL TÉCNICO: ANTONIO HENRIQUE MOREIRA CUELHO CREA-14.760 TD | EQUIPE TÉCNICA:

H.C. H C TOPOGRAFIA LTDA
FONES-3427.4624 - 9975.8480 - 9913.4224
Email - ahmcuelho@gmail.com | Site - henriquecuelho.com.br

**ANEXO E**

**Perfil do terreno**

## PERFIL GEOTÉCNICO DO SUBSOLO

NOROESTE

SUDESTE