



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL – PPGEC
INFRAESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM
MISTURAS COM SOLO PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS
DE PAVIMENTOS COM BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**

ISRAEL MACCARI REDIVO

Florianópolis
2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL – PPGEC
INFRAESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM
MISTURAS COM SOLO PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS
DE PAVIMENTOS COM BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio F. Marcon

ISRAEL MACCARI REDIVO

Florianópolis
2011

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM MISTURAS COM SOLO PARA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTOS COM BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

ISRAEL MACCARI REDIVO

Esta dissertação foi julgada e aprovada como requisito final para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, em sessão pública realizada em 07/07/2011.

Florianópolis, 07 de Julho de 2011.

Prof. Roberto Caldas Andrade Pinto
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon - Orientador – UFSC

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Glicério Trichês - Co-Orientador – UFSC

Profa. Dr^a. Liedi Légi Bariani Bernucci - PTR/EPUSP

Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi – UFSC

Profa. Dr^a. Liseane Padilha Thives – UFSC

Dedico este trabalho aos meus pais, Bonfílio e Carmem, que sempre acreditaram e ensinaram-me o quanto estudar é importante, à minha esposa Ângela pelo incentivo e companheirismo nos momentos difíceis e aos meus filhos Guilherme e Lucas, principais razões de meu grande esforço pessoal.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me cedido a possibilidade e a força de vontade em realizar este trabalho;

Em especial, ao Professor Antônio Fortunato Marcon, que durante este longo período nunca deixou de acreditar neste trabalho e, que além de orientador, passou a ser um grande amigo. Minha grande admiração e sincera gratidão;

Ao Professor Rafael Higashi, meu grande amigo e principal responsável pelo meu ingresso no curso de mestrado da UFSC, pelo incentivo e disposição nas horas de dúvidas;

Ao Professor e co-orientador Glicério Trichês pela colaboração prestada durante a realização dos ensaios no Laboratório de Pavimentação da UFSC;

Ao Professor Marciano Maccarini pela disponibilidade do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC durante a realização dos ensaios;

Ao Professor Luiz Vezaro pela colaboração prestada durante os ensaios no Laboratório de Mecânica dos Solos da UNISUL, no Campus de Tubarão;

Aos meus grandes colegas Marcelo Heidemann e Murilo Espíndola pela enorme dedicação durante a realização dos ensaios de laboratório e ao meu colega Carlos Quintero, pelo grande apoio nas horas de dúvidas. Meu muito obrigado;

Ao meu amigo Daniel Frasson que, mesmo a distância, não mediu esforços em me prestar auxílio;

À Empresa A. Mendes Pavimentação Ltda., pela disponibilização de equipamentos e funcionários durante a realização dos trabalhos em campo;

À cerâmica Guarezi, em especial meu primo Gelson Júnior, que sempre esteve à disposição para o fornecimento de cacos cerâmicos;

Aos meus pais, Bonfílio e Carmem, meu irmão Samuel e a minha esposa Ângela, pessoas que durante este período sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e não deixando que os problemas e o cansaço me desanimassem.

A FAPESC e Petrobrás pelo apoio na capacitação do Laboratório de Pavimentação, de Ligantes e Misturas Asfálticas da UFSC.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise, baseada em estudos de laboratório, do comportamento de misturas entre solo e resíduos de cerâmica vermelha, visando seu emprego em camadas de pavimentos de rodovias e ruas com baixo volume de tráfego. A indústria da cerâmica vermelha é responsável pela produção de um grande volume de tijolos, blocos e telhas e, como resultado do controle de qualidade e danos de manuseio, a quantidade de resíduos gerados é significativa. Na Região Sul de Santa Catarina, onde são produzidos cerca de 100 milhões de peças de tijolos e telhas por mês, aproximadamente 5% desta produção é descartada por algum tipo de defeito ocorrido durante o seu processo de produção ou transporte. Para a realização deste trabalho foram coletados 12 m³ deste resíduo, dos quais 6 m³ se tratavam de cacos ou resíduos de tijolos e 6 m³ de cacos ou resíduos de telhas. De forma separada, estes materiais foram fragmentados com a ajuda de um rolo compactador e o material resultante foi coletado, analisado e utilizado como agregado em misturas com três tipos de solo. Utilizaram-se três tipos de solos, coletados em jazidas nos municípios de Gravatal, Tubarão e Criciúma, que foram submetidos aos ensaios tradicionais de pavimentação, e aos ensaios da metodologia MCT. As misturas solo-agregado foram compostas com diferentes dosagens e submetidas a ensaios de Granulometria, Compactação, CBR e Módulo de Resiliência. Os resultados destes ensaios foram analisados e constatou-se que as misturas apresentaram comportamentos diferentes, que variaram de acordo com as dosagens dos materiais e o tipo de solo utilizado. Os melhores resultados foram observados nas misturas realizadas com 50% de solo e 50% de material cerâmico. A mistura composta por 50% de solo coletado na jazida de Tubarão e 50% de cacos de telhas foi utilizada como camada de sub-base no cálculo de dimensionamento de um pavimento localizado na Rua Hilário José de Mello, no município de Tubarão. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que os resíduos de cerâmica vermelha podem ser utilizados em misturas com solo, na construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: Cerâmica Vermelha. Misturas Solo-agregado. Módulo de Resiliência. Dimensionamento de Pavimentos.

ABSTRACT

This work presents an analysis, based on laboratory studies, on the mixture behavior between soil and red ceramic residues, aiming its use in pavements with low traffic. The red ceramic industry is responsible for the production of a great volume of bricks, blocks and tiles and as the result of this great production, the volume of residues created is also very high. In the South Region of Santa Catarina, where about 100 million of bricks and tiles are produced every month, 5% of this production is rejected because of some kind of defect occurred during its process of production or transportation. To accomplish this work, 12m³ of this residue were collected in which 6m³ were pieces of bricks and 6m³ of pieces of tiles. In separate ways, these materials were fragmented with a spiked heavy roller and the resulting material was collected, analyzed and used as aggregated in soil mixture. Three types of soil were collected in couches from Gravatal, Tubarão and Criciúma districts that were submitted to the tests used in the paving, as traditional and MCT methodologies. The mixtures of aggregated soil were constructed with different doses and submitted to tests of granulometry, compactness, CBR and Resilience Modulus. The results of these tests were analyzed showing that the mixture presented different behaviors that varied according to the dose materials and the type of soil used. The best results were observed in mixtures done with 50% soil and 50% of ceramic material. The mixture with 50% of soil collected in the couch of Tubarão and 50% of tile pieces were used as layers of sub-basis in the calculation of the dimension of a pavement at Hilário José de Mello street in the district of Tubarão. From the results it was concluded that the red ceramic residues can be used in soil mixture, with no restriction, in pavements layers with low traffic volume.

Keywords: Red Ceramic. Soil aggregated mixture. Resilience modulus. Pavement Dimension.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais pólos de cerâmica vermelha em alguns estados do Sul/Sudeste	36
Figura 2.2 - Localização da região de Morro da Fumaça	37
Figura 2.3 - Pavimentação utilizando material reciclado	44
Figura 2.4 - Aterro construído com resíduos de cerâmica vermelha	50
Figura 2.5 - Utilização de resíduo cerâmico como revestimento primário em estradas	51
Figura 2.6 - Carta de classificação do Método das Pastilhas	56
Figura 2.7 - Esquema de um dimensionamento mecânico de pavimentos	61
Figura 3.1 - Materiais e ensaios utilizados na pesquisa	63
Figura 3.2 - Cacos de tijolos	65
Figura 3.3 - Cacos de telhas	65
Figura 3.4 - Camada de cacos de tijolo antes da fragmentação	67
Figura 3.5 - Fragmentação do material cerâmico com rolo liso	67
Figura 3.6 - Material cerâmico após a fragmentação com 15 passadas do rolo pé-de-carneiro	68
Figura 3.7 - Amostras de material cerâmico submetidas ao Ensaio de Granulometria	69
Figura 3.8 - Jazida de Gravatal	70
Figura 3.9 - Jazida de Tubarão	70
Figura 3.10 - Jazida de Criciúma	71
Figura 3.11 - Amostras de misturas solo-agregado submetidas ao ensaio de granulometria	72
Figura 3.12 - Amostras utilizadas para ensaios de Módulo de Resiliência	74
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos cacos de tijolos fragmentados obtidas pela variação do número de passadas do rolo liso	79
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos cacos de tijolos fragmentados obtidas pela variação do número de passadas do rolo pé-de-carneiro	80
Figura 4.3 - Curvas granulométricas dos cacos de telhas fragmentados pela variação do número de passadas do rolo liso	82
Figura 4.4 - Curvas granulométricas dos cacos de telhas fragmentados pela variação do número de passadas do rolo pé-de-carneiro	82
Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos três solos	86

Figura 4.6 - Curvas de compactação dos três solos na energia intermediária	90
Figura 4.7 - Curvas de CBR dos três solos na energia intermediária.....	90
Figura 4.8 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de tijolo e solo de Gravatal	92
Figura 4.9 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de telha e solo de Gravatal	92
Figura 4.10 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de tijolo e solo de Tubarão.....	94
Figura 4.11 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de telha e solo de Tubarão.....	94
Figura 4.12 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de tijolo e solo de Criciúma	96
Figura 4.13 - Curvas granulométricas das misturas entre cacos de telha e solo de Criciúma.....	97
Figura 4.14 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de tijolos.....	98
Figura 4.15 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de telhas.	98
Figura 4.16 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de tijolos.	99
Figura 4.17 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de telhas.	100
Figura 4.18 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de tijolos.....	101
Figura 4.19 - Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de telhas.	101
Figura 4.20 - Curvas granulométricas das misturas GTI73 e GTI55 com o solo de Gravatal, antes e após a compactação.	103
Figura 4.21 - Curvas granulométricas das misturas GTI37 e GTE73 com o solo de Gravatal, antes e após a compactação.	104
Figura 4.22 - Curvas granulométricas das misturas GTE55 e GTE37 com o solo de Gravatal, antes e após a compactação.	104
Figura 4.23 - Curvas granulométricas das misturas TTI73 e TTI55 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação.	108
Figura 4.24 - Curvas granulométricas das misturas TTI37 e TTE73 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação.	108
Figura 4.25 - Curvas granulométricas das misturas TTE55 e TTE37 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação.	109
Figura 4.26 - Curvas granulométricas das misturas CTI73 e	

CTI55 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação.....	112
Figura 4.27 - Curvas granulométricas das misturas CTI37 e CTE73 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação.	113
Figura 4.28 - Curvas granulométricas das misturas CTE55 e CTE37 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação.	113
Figura 4.29 - Curvas de compactação das misturas com o solo de Gravatal.	117
Figura 4.30 - Curvas de CBR das misturas com o solo de Gravatal	117
Figura 4.31 - Curvas de compactação das misturas com o solo de Tubarão	119
Figura 4.32 - Curvas de CBR das misturas com o solo de Tubarão.....	120
Figura 4.33 - Curvas de compactação das misturas com o solo de Criciúma	122
Figura 4.34 - Curvas de CBR das misturas com o solo de Criciúma	122
Figura 4.35 - Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Tubarão e cacos de tijolos	124
Figura 4.36 - Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Tubarão e cacos de telhas.....	125
Figura 4.37 - Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Criciúma e cacos de tijolos	126
Figura 4.38 - Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Criciúma e cacos de telhas	127
Figura 4.39 - Comportamento da deformação permanente das misturas com o solo de Criciúma	129
Figura 4.40 - Evolução da deformação permanente com o número de aplicações de carga no ensaio triaxial de uma brita	130
Figura 4.41 - Comportamento da deformação permanente da mistura TTE55	131
Figura 5.1 - Localização da Rua Hilário José de Mello	133
Figura 5.2 - Estrutura de referência para o cálculo das tensões e deformações	141
Figura 5.3 - Serviços para a realização da camada de pavimento com a mistura TTE55	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dados da indústria cerâmica no Brasil.....	35
Tabela 2.2 - Produção de cerâmica vermelha na região de Morro da Fumaça	38
Tabela 2.3 - Estimativa de resíduos gerados na região de Morro da Fumaça	39
Tabela 2.4 - Quantidade de resíduos gerados por mês	39
Tabela 2.5 - Composição mineral do entulho.....	42
Tabela 2.6 - Especificação para utilização de materiais reciclados.....	45
Tabela 2.7 - Especificação DNER-ES 303/97.....	53
Tabela 3.1 – Composições das misturas de solo e material cerâmico e nomenclatura.....	72
Tabela 4.1 - Principais dados das amostras de solo.....	76
Tabela 4.2 – Dados dos materiais cerâmicos.....	76
Tabela 4.3 - Principais dados e resultados das misturas de solo com cacos cerâmicos fragmentados por 15 passadas do rolo pé-de-carneiro	77
Tabela 4.4 - Distribuição granulométrica dos cacos de tijolo fragmentados pelos rolos liso e pé-de-carneiro x número de passadas	80
Tabela 4.5 - Distribuição granulométrica dos cacos de telha Fragmentados pelos rolos liso e pé-de-carneiro x número de passadas ...	83
Tabela 4.6 - Distribuição granulométrica dos três solos	86
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de Compactação e CBR dos três tipos de solo	89
Tabela 4.8 - Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Gravatal	93
Tabela 4.9 - Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Tubarão	95
Tabela 4.10 - Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Criciúma	96
Tabela 4.11 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de tijolos, antes e após a compactação.....	105
Tabela 4.12 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de telhas, antes e após a compactação	106
Tabela 4.13 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de telhas, antes e após a compactação.....	110
Tabela 4.14 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de tijolos, antes e após a compactação	111

Tabela 4.15 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de telhas, antes e após a compactação.....	114
Tabela 4.16 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de tijolos, antes e após a compactação	115
Tabela 4.17 – Resultados apresentados pelas misturas realizadas com o solo de Gravatal	118
Tabela 4.18 – Resultados apresentados pelas misturas com o solo de Tubarão.....	120
Tabela 4.19 - Resultados obtidos das misturas com o solo de Criciúma	121
Tabela 4.20 - Valores de M_R das misturas envolvendo o solo de Tubarão	125
Tabela 4.21 - Valores de M_R das misturas envolvendo o solo de Criciúma.....	127
Tabela 4.22 – Valores de deformação permanente das misturas com o solo de Criciúma	128
Tabela 4.23 – Valores de deformação permanente da mistura TTE55	132
Tabela 5.1 - Projeção do tráfego futuro	135
Tabela 5.2 - Fatores de Conversão do Eixo Padrão	136
Tabela 5.3 - Classificação do material do subleito.....	137
Tabela 5.4 - Valores de t	137
Tabela 5.5 - Resultados de tensões e deformações na estrutura do pavimento.....	142
Tabela 5.6 - Planilha de custos da Rua Hilário José de Mello	142
Tabela 5.7 - Reajustamento do Custo Total Parcial da Rua Hilário José de Mello	143
Tabela 5.8 - Serviços necessários para a realização da mistura solo-agregado	144
Tabela 5.9 - Composição de custos para a realização da mistura TTE55	145
Tabela 5.10 - Planilha orçamentária do pavimento proposto para a Rua Hilário José de Mello.....	146

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
1.2 OBJETIVOS	26
1.2.1 Objetivos Específicos	26
1.3 JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 CERÂMICA VERMELHA.....	31
2.1.1 Histórico	31
2.1.2 Processo de fabricação da cerâmica vermelha	32
2.2 PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA	34
2.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	40
2.3.1 Classificação dos resíduos de construção e demolição	41
2.3.2 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição	43
2.3.2.1 A Reutilização dos resíduos de construção e demolição na própria Obra	47
2.3.2.2 Usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição	48
2.3.3 Reciclagem de cerâmica vermelha	48
2.4 MISTURAS SOLO-AGREGADO.....	52
2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	54
2.5.1 Classificação MCT	54
2.5.1.1 Ensaio para Identificação Expedita MCT - Método das Pastilhas	56
2.5.2 Classificação HRB	57
2.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS MATERIAIS	57
2.7 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	59
2.7.1 Métodos empíricos	59
2.7.2 Métodos mecânicos	60
2.7.3 Análise e conclusões	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1 MATERIAL CERÂMICO	65
3.1.1 Fragmentação do material cerâmico.....	66
3.1.2 Granulometria do material cerâmico	68
3.2 SOLO	69
3.2.1 Caracterização dos solos	71
3.3 MISTURAS DE SOLO COM MATERIAL CERÂMICO	71

3.3.1 Ensaio de granulometria	72
3.3.2 Ensaios de compactação e CBR	73
3.3.3 Ensaio de módulo de resiliência	73
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.1 ENSAIO DE GRANULOMETRIA	79
4.1.1 Granulometria dos materiais cerâmicos	79
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	85
4.2.1 Massa específica e limites de Atterberg	85
4.2.2 Ensaio de granulometria	85
4.2.3 Ensaios do método MCT e classificações dos solos	87
4.2.4 Ensaios de compactação e CBR	89
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO	91
4.3.1 Ensaio de granulometria	91
4.3.2 Ensaio de granulometria após a compactação das amostras ..	102
4.3.2.1 Misturas realizadas com o solo de Gravatal.....	102
4.3.2.2 Misturas realizadas com o solo de Tubarão	107
4.3.2.3 Misturas realizadas com o solo de Criciúma.....	112
4.3.3 Ensaios de compactação e CBR	116
4.3.3.1 Misturas realizadas com o solo de Gravatal.....	116
4.3.3.2 Misturas realizadas com o solo de Tubarão	119
4.3.3.3 Misturas realizadas com o solo de Criciúma.....	121
4.3.4 Ensaio de módulo de resiliência	123
4.3.4.1 Misturas realizadas com o solo de Tubarão	124
4.3.4.2 Misturas realizadas com o solo de Criciúma.....	126
4.3.4.3 Deformações permanentes das misturas solicitadas a cargas repetidas	128
5 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO TRECHO EXPERIMENTAL	133
5.1 PROJETO PROPOSTO PELA PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO	134
5.1.1 Volume de tráfego	134
5.1.2 Cálculo do número de operações do eixo padrão “N”	135
5.1.3 Estudos geotécnicos.....	137
5.1.4 Dimensionamento segundo método DNER.....	138
5.2 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZANDO A MISTURA SOLO-AGREGADO	138
5.2.1 Dimensionamento segundo método DNER.....	139
5.2.2 Análise mecanicista da solução proposta para a estrutura do pavimento	140

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS: PAVIMENTO TRADICIONAL E PAVIMENTO PROPOSTO	141
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	149
6.1 CONCLUSÕES	149
6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	151
REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o expressivo aumento da população e a alta concentração das cidades nos últimos tempos, a construção civil vem se desenvolvendo proporcionalmente a esses fatos. Com isso, os resíduos de construção e demolição estão cada vez mais presentes nas discussões ambientais. Do crescente aumento da geração de resíduos, não é difícil prever que há também o aumento da extração de recursos naturais. Diante do modelo de desenvolvimento sustentável não há mais espaço para a concepção de que, os locais de deposição de resíduos e os recursos naturais são abundantes.

De acordo com a Resolução do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002), os agentes geradores de resíduos da construção civil são pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades produtoras de resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e escavação de terrenos.

Cada vez torna-se mais importante o desenvolvimento de novas tecnologias que possam satisfazer técnica e economicamente a utilização de resíduos industriais, decorrentes muitas vezes de falhas no processo produtivo. A redução dos impactos provocados ao meio ambiente aliada ao desperdício e esgotamento de reservas naturais justificam ações que visem encontrar modelos de produção e consumo mais sustentáveis. A constante geração de resíduos e a destinação inadequada destes materiais acabam resultando, na maioria dos casos, em problemas ambientais, principalmente relacionados ao saneamento de áreas urbanas.

Para Vázquez (2001), a construção sustentável baseia-se na prevenção e redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis, no uso dos resíduos como materiais secundários e na coleta e deposição inerte. Portanto, devem ser tomadas medidas que transformem as correntes de resíduos em recursos reutilizáveis.

Inserindo-se em uma abordagem sobre a reciclagem de materiais, é apresentada, nesta pesquisa, uma alternativa para a utilização de resíduos provenientes da produção de cerâmica vermelha, conhecidos popularmente por cacos de tijolos ou telhas, em obras rodoviárias. O quadro da geração

destes resíduos foi diagnosticado para Região Sul de Santa Catarina, mais precisamente para a região de Morro da Fumaça.

Os resíduos de cerâmica vermelha utilizados neste trabalho são compostos por cacos de tijolos e telhas que, devido ao seu tamanho, foram fragmentados com a ajuda de um rolo compactador. Este material foi misturado, em diferentes dosagens, com solo coletado em três jazidas da região analisada e avaliado através de ensaios de laboratório.

A indústria de cerâmica vermelha é responsável pela produção de blocos, tijolos, telhas, tubos, ladrilhos, elementos vazados entre outros. A matéria-prima utilizada por esta indústria é constituída, basicamente, por argila plástica, cujos componentes principais são os argilominerais, matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Estas argilas são retiradas, geralmente, de margens de rios, lagos ou de várzeas (SANTOS, 1989).

No Brasil existem inúmeras indústrias de transformação de cerâmica vermelha, que fabricam um volume elevado de tijolos, blocos e telhas. A fabricação de produtos cerâmicos acaba gerando uma grande quantidade de resíduos que, por falta de um direcionamento adequado, acabam se transformando em simples entulho.

Pesquisas recentes avaliando o emprego de misturas de resíduos de cerâmica vermelha com solo em obras rodoviárias foram desenvolvidas por Dias (2004) e Cavalcante et al. (2006). Ambos os autores chegaram a resultados positivos quanto à utilização destas misturas em camadas de pavimentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o comportamento de misturas entre solo e agregados obtidos de resíduos da fabricação de tijolos e telhas, visando seu emprego em camadas de pavimentos de rodovias com baixo volume de tráfego.

1.2.2 Objetivos específicos

A pesquisa foi desenvolvida tendo os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a eficiência das passagens dos rolos compactadores para produção de agregados reciclados de material cerâmico;
- Investigar as características geotécnicas das amostras de solo selecionadas;
- Avaliar o comportamento das misturas solo-agregado em relação à quantidade de material cerâmico utilizado;
- Determinar, para cada tipo de solo analisado, a dosagem recomendada para as misturas com material cerâmico;
- Realizar um estudo para o dimensionamento de um pavimento para baixo volume de tráfego com a utilização de uma mistura solo-agregado.

1.3 JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DO TRABALHO

A proposta deste trabalho de utilizar os cacos de tijolos e telhas, após a fragmentação com rolo compactador, como agregado em misturas com solo apresenta repercussões na área ambiental, na área técnica e também na área de custos de uma obra.

Os tijolos e telhas utilizados nesta pesquisa são materiais resultantes da rejeição de lotes que não passaram pelo controle de qualidade durante seu processo de fabricação ou sofreram quebras durante o manuseio das peças. A alternativa de reaproveitar estes materiais em camadas de pavimentos proporciona um destino mais apropriado a este rejeito que, usualmente, é utilizado apenas como material de descarte.

A proposta de fragmentar o material cerâmico através de rolos compactadores tem o objetivo de facilitar e agilizar a quebra dos cacos de tijolos e telhas, diminuindo os custos com a execução dos agregados, uma vez que a trituração em unidades de britagem convencionais requer investimentos mais elevados. Com a utilização de rolos compactadores a trituração dos agregados pode ser realizada na própria obra, reduzindo os custos operacionais e as despesas com o transporte deste material.

Os cacos de cerâmica vermelha, quando misturados com solos, melhoram as características mecânicas destes, permitindo a sua utilização

em camadas de pavimentos, reduzindo as espessuras das camadas e, conseqüentemente, diminuindo os investimentos necessários para a construção dos pavimentos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além da presente Introdução, esta dissertação é composta pelos seguintes capítulos:

- Capítulo 2

É apresentada neste capítulo uma revisão bibliográfica do assunto a ser desenvolvido, abordando os seguintes tópicos: cerâmica vermelha, resíduos de construção e demolição (RCD), misturas solo-agregado e módulo de resiliência. São apresentados dados atuais sobre a produção de cerâmica vermelha no Brasil e em Santa Catarina, além da potencialidade para a reciclagem.

- Capítulo 3

Este capítulo descreve as características dos materiais estudados, e os métodos empregados na parte experimental da pesquisa. São descritos os procedimentos adotados na fragmentação do material cerâmico e na formulação das misturas com solo.

- Capítulo 4

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência realizados para os materiais utilizados na pesquisa. Também é realizado um estudo comparativo entre a distribuição granulométrica das misturas solo-agregado antes e após a compactação das mesmas para avaliar o efeito da quebra dos fragmentos do material cerâmico pela aplicação dos golpes de soquete.

- Capítulo 5

É apresentado neste capítulo o dimensionamento da estrutura de um pavimento utilizando a mistura composta entre solo e material cerâmico.

- Capítulo 6

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com os resultados dos ensaios realizados e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica enfoca os temas mais importantes da pesquisa: a cerâmica vermelha e suas possíveis formas de reciclagem, misturas solo-agregado e os ensaios necessários para a avaliação destes materiais.

2.1 CERÂMICA VERMELHA

De um modo geral pode-se dizer que cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Analisando especificamente a cerâmica vermelha, pode-se dizer que esta compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2006).

2.1.1 Histórico

A história da cerâmica vermelha retorna à pré-história, quando logo após o homem começar a usar fogo, o calor fixava a forma dos materiais terrosos e tendia a torná-los estáveis na água. Antigos produtores de tijolos cerâmicos queimados aprenderam sua arte pela experiência sem ter conhecimento real do processo que a finalizava. Eles aprenderam rapidamente que as argilas não tinham as mesmas propriedades e somente certas argilas eram utilizadas para certos produtos (GRIM, 2003).

Há cerca de sete mil anos, no Oriente Médio, utilizaram-se os tijolos de adobe (cerâmica crua) como substitutos das pedras de cantaria. Apesar de possuírem uma menor durabilidade, apresentavam a vantagem de uma melhor trabalhabilidade da argila na confecção ou moldagem dos elementos e facilitavam a composição das alvenarias. Pelas mesmas vantagens dos tijolos, as telhas de barro vieram a substituir a ardósia nos telhados da Europa Ocidental. Pela durabilidade e incombustibilidade, mostraram ser um eficaz sucedâneo para a palha e a madeira como material

de cobertura. Na história antiga, em pontos distintos como China, Babilônia e Grécia Helênica são encontrados elementos de cerâmica vermelha queimados e mesmo glazurados (SANTOS, 1989).

No Brasil, a cerâmica tem seus primórdios na Ilha de Marajó. A cerâmica marajoara tem sua origem na avançada cultura indígena que floresceu na Ilha. Estudos arqueológicos, contudo, indicam que a presença de uma cerâmica mais simples, ocorreu, ainda, na região amazônica por volta de 5.000 anos atrás. A cerâmica marajoara era altamente elaborada e de uma especialização artesanal que compreendia várias técnicas: raspagem, incisão, excisão e pintura (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, 2006).

Nos últimos anos, acompanhando a evolução industrial, a indústria cerâmica adotou a produção em massa, motivada pela disponibilidade de equipamentos e a introdução de técnicas de gestão, incluindo o controle de matérias-primas, dos processos e dos produtos fabricados.

2.1.2 Processo de fabricação da cerâmica vermelha

O processo para a fabricação de elementos cerâmicos vermelhos é bastante conhecido, seu domínio é milenar e apresenta pequenas variações para a obtenção dos diferentes produtos. De um modo geral, eles compreendem as etapas de extração e preparação da matéria-prima, formação das peças, tratamento térmico e acabamento.

A matéria prima da cerâmica vermelha é a argila, que significa, segundo o Manual de Cerâmica Vermelha (SEBRAE, 1995), material natural de textura terrosa e de baixa granulometria, que desenvolve plasticidade quando misturado a uma quantidade limitada de água. Sua extração é realizada a céu aberto com a ajuda de máquinas do tipo escavadeiras e, normalmente, suas jazidas encontram-se próximas às indústrias, haja vista que a dificuldade da entrada de caminhões na jazida inviabiliza o transporte a grandes distâncias.

As argilas utilizadas na fabricação de cerâmica vermelha devem ser facilmente moldáveis, possuir resistência mecânica adequada antes e após a queima e, preferencialmente, apresentar cor vermelha após a queima a temperaturas relativamente baixas (geralmente 950°C, sendo esta a temperatura usual de queima deste produto), com um mínimo de trincas e empenamentos.

A preparação da matéria prima consiste numa série de operações que conduzem a argila, desde o estado em que foi retirada da jazida até a fase final de acabamento da peça cerâmica. Entre estas operações pode-se citar a alimentação, a dosagem, a moagem, a mistura e a homogeneização do material.

A alimentação e a dosagem de material são realizadas através de um alimentador que tem como função permitir a constância na alimentação e na mistura de diversos materiais argilosos. A dosagem consiste na pesagem ou medida das matérias primas. A moagem da matéria prima tem por objetivo reduzir as dimensões dos fragmentos dos materiais utilizados na composição de massas. A mistura e a homogeneização é a etapa que tem por objetivo misturar os diversos materiais argilosos (SEBRAE, 1995).

A moldagem ou conformação da matéria prima é o processo pelo qual a massa adquire uma forma bem determinada. Os procedimentos de conformação de produtos cerâmicos são determinados de acordo com a finalidade, a forma e o tipo de produto que se fabrica. O método de conformação utilizado na produção de blocos cerâmicos é a extrusão, que é realizada através de um equipamento denominado extrusora ou maromba. Como resultado deste processo obtém-se uma coluna extrudada com seção transversal, possuindo formato e dimensões desejados. Em seguida esta coluna é cortada, obtendo-se desse modo peças como tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos de formato regular. A extrusão pode ser uma etapa intermediária do processo de formação, seguindo-se após o corte da coluna extrudada, a prensagem como é o caso para a maioria das telhas, ou o torneamento, como para os isoladores elétricos, xícaras e pratos, entre outros (SEBRAE, 1995).

A fase de secagem é de fundamental importância para obtenção dos produtos cerâmicos, pois dela depende o desenvolvimento das propriedades finais destes produtos. A secagem tem como função reduzir a quantidade de água adicionada para moldagem, de modo que a queima do material possa ser realizada em tempos industrialmente aceitáveis e aumentar a resistência mecânica do material. Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2006).

A secagem de uma massa cerâmica é influenciada por diversos fatores como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção de deslocamento do ar. Este processo pode ser realizado ao natural (ar livre) ou em secadores dotados de controle de condições.

A queima é uma das etapas mais delicadas no processo cerâmico, onde eventuais defeitos originados nas etapas anteriores revelam-se somente quando o material é queimado. Nesta fase as peças conformadas e secas são submetidas a uma determinada temperatura para que elas adquiram as propriedades desejadas, dentro de valores especificados.

Na cerâmica vermelha os produtos são queimados em fornos a uma temperatura em torno de 900 à 1000°C. Durante a queima é muito importante controlar a velocidade com que a temperatura aumenta ou diminui ao longo do tempo, devido às variações diferenciadas de dimensões das peças (expansão e contração) que ocorrem durante o aquecimento ou resfriamento (SEBRAE, 1995).

2.2 PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

O setor cerâmico é um grande consumidor de matérias-primas minerais. Seus diferentes segmentos consomem uma diversidade de substâncias minerais *in natura* ou beneficiada, cujas variedades empregadas dependem do tipo de produto e da localização da unidade fabril. Neste setor, verifica-se a convivência de diferentes tipos de estabelecimentos, com características distintas quanto aos níveis de produção, qualidade dos produtos, índices de produtividade e grau de mecanização.

A produção de matérias-primas cerâmicas é feita, em sua maioria, por empresas de pequeno e médio porte, de capital nacional. As minerações mais organizadas, que produzem matérias-primas com qualidade e regularidade, estão geralmente associadas a empresas multinacionais ou, algumas vezes, são unidades autônomas ligadas à indústria de revestimento (SEBRAE, 1995).

Dentre as diversas substâncias minerais consumidas, destacam-se, em face ao volume de produção atingido, as argilas de queima vermelha ou argilas comuns que respondem pelo maior consumo, sendo especialmente utilizadas na cerâmica vermelha e de revestimento, às vezes constituindo a única matéria-prima da massa. Tais argilas são caracterizadas como matérias-primas de baixo valor unitário, fato este que não viabiliza o seu transporte a grandes distâncias, condicionando a instalação de unidades industriais cerâmicas o mais próximo possível das jazidas. As reservas de argila para cerâmica vermelha são de grande porte e distribuem-se por praticamente todas as regiões do país.

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores pólos cerâmicos do País.

A Tabela 2.1 sintetiza as informações a partir de dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica para o ano de 2008, que caracteriza a situação atual desta atividade no Brasil, utilizando, para tanto, indicadores referentes a número de empresas, produção por mês, consumo de matérias-primas, etc.

Tabela 2.1 – Dados da indústria cerâmica no Brasil

Produto	Nº empresas aproximado	% aprox. por área	Produção/mês (Nº de peças)	Consumo-ton/mês (argila)
Tijolos	4820	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2509	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	12	0,10%	325,5 km*	-

Fonte: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CERÂMICA (2008)

* Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano.

- Geração empregos diretos: 293 mil;

- Geração empregos indiretos: 1,25 milhões;

- Faturamento anual: R\$ 18 bilhões.

- Indústria de Cerâmica Vermelha: 4,8% da Indústria da Construção Civil (fonte: Anicer).

Apesar da expressiva produção apontada, a tecnologia das cerâmicas ainda é antiga, desenvolvida há mais de 50 anos, conforme referido por Zandonadi (1996) e reafirmado por Dualibi (1999). Os principais pólos produtores e indústrias de cerâmica vermelha são mostrados na Figura 2.1.

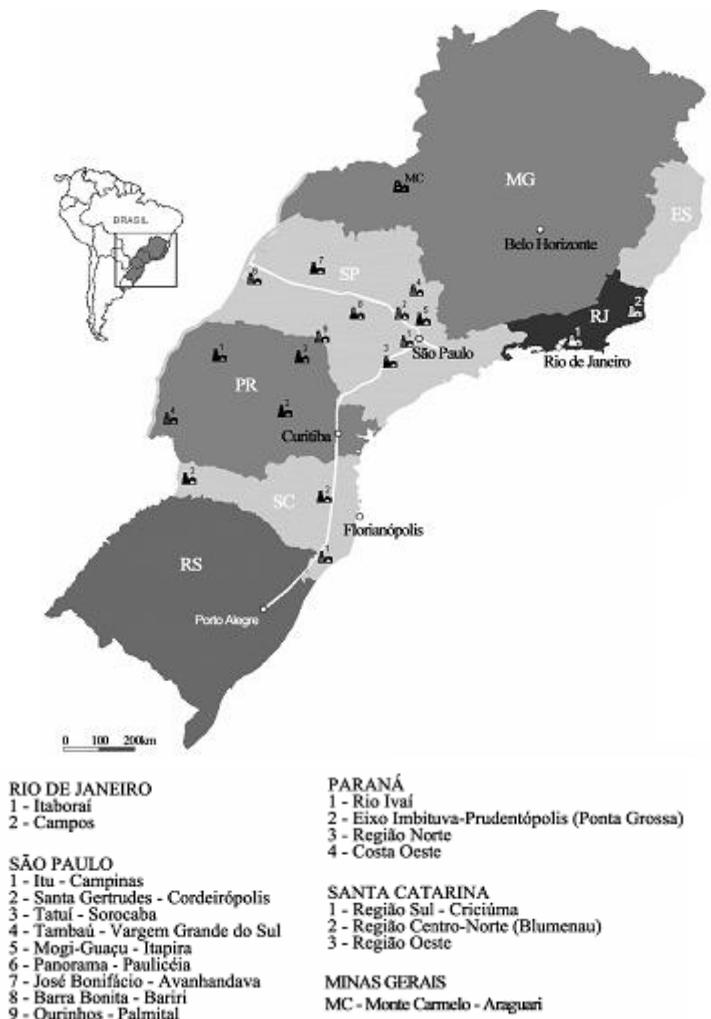


Figura 2.1 – Principais pólos de cerâmica vermelha em alguns estados do Sul/Sudeste (MOTTA et al., 2001)

A cerâmica vermelha exerce um papel importante para economia do país, com um faturamento anual estimado em R\$ 18 bilhões (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CERÂMICA, 2008). A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos

industriais, fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente com apreciável quantidade exportada.

No Estado de Santa Catarina, o segmento de cerâmica vermelha é de grande importância para o próprio setor cerâmico e para toda cadeia do macro complexo da construção civil, influenciando direta e indiretamente na economia do Estado. São milhares de empresas espalhadas por todo o país, produzindo, principalmente, blocos de vedação, telhas e componentes de lajes, além de blocos utilizados em alvenaria estrutural, pisos extrudados, manilhas e elementos vazados.

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria da Cerâmica (2008), 51,9% das empresas produtoras de cerâmica vermelha em Santa Catarina localizam-se na região do Alto Vale do Itajaí, 33,8% na região Sul do Estado e 9,3% na região do Oeste Catarinense. Na região Sul do Estado de Santa Catarina destacam-se os municípios de Morro da Fumaça e Sangão como principais produtores, onde o valor da produção de cerâmica vermelha é responsável por mais de 80% da renda destes municípios. A Figura 2.2 mostra parte da região sul do Estado de Santa Catarina, onde se concentram as indústrias cerâmicas.



Figura 2.2 – Localização das principais cerâmicas da Região Sul (Adaptado pelo autor)

Segundo os levantamentos do Sindicato da Indústria da Cerâmica Vermelha (2008) a região de Morro da Fumaça, composta pelos municípios de Morro da Fumaça, Treze de Maio, Sangão, Criciúma, Içara, Jaguaruna e

Cocal do Sul, possui um total de 156 indústrias que produzem, mensalmente, mais de 100 milhões de telhas e tijolos. Na Tabela 2.2 são apresentados os dados sobre a produção de cerâmica vermelha na região de Morro de Fumaça.

Tabela 2.2 – Produção de cerâmica vermelha na região de Morro da Fumaça

Descrição	Quantidade
Número de empresas	156
Fabricantes de telhas	35
Fabricante de blocos	121
Blocos/mês	80.000.000
Telhas/mês	20.000.000
Empregos diretos	5.000

Fonte: SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CERÂMICA VERMELHA (2008)

Devido ao grande número de indústrias e, conseqüentemente, a elevada produção de peças cerâmicas, também é grande o número de resíduos gerados neste processo de fabricação. Pode-se chamar de resíduos as peças inteiras, de tijolos e telhas, que não apresentam, após a queima nos fornos, as características técnicas exigidas para a comercialização e, também, pedaços originados das quebras das peças durante os deslocamentos a que são submetidas. Neste trabalho, estes resíduos serão chamados apenas de cacos.

Denomina-se, então, por “quebras de produção”, em porcentagem, a quantidade de tijolos ou telhas, refugadas após a queima, que constituem os resíduos gerados (cacos). Os fabricantes declararam o percentual que admitem para esta quebra da produção em função do número de peças fabricadas.

Este produto de quebra aparenta ser muito variável não só de indústria para indústria, como também de região para região. Um estudo realizado por Cavalcante, *et al.* (2006) apresenta o diagnóstico realizado junto às olarias localizados no Estado de Sergipe. Segundo estes, cerca de 7% de toda a produção de tijolos do pólo cerâmico sergipano é descartada, ou por defeitos decorrentes de queima inadequada ou pela quebra das peças cerâmicas na cadeia produtiva.

Dias (2004), em seu levantamento sobre a quantidade de resíduos de cerâmica vermelha gerados nas cidades de Ituiutaba e Monte Carmelo, em

Minas Gerais, apresenta uma quebra, declarada pelos fabricantes, de 3% de peças descartadas em relação à quantidade produzida.

O autor decidiu, então, calcular a quantidade de resíduo gerado pela região de Morro da Fumaça, utilizando a porcentagem de quebra informada pelos ceramistas, de aproximadamente 5% da produção total. Através do peso unitário de cada peça de tijolo, ou telha, foi calculada a massa total de resíduos gerados (Tabela 2.3). De acordo com este levantamento verifica-se a grande quantidade de material cerâmico descartado por mês pelas indústrias da região de Morro da Fumaça. São mais de dez mil toneladas de cacos de tijolos e telhas gerados mensalmente e que acabam sendo descartados devido à falta de um destino apropriado.

Um levantamento sobre a quantidade de resíduos de cerâmica vermelha gerados na região compreendida pelas cidades de Ituiutaba e Monte Carmelo, localizadas no Triângulo Mineiro, em Minas Gerais, foi realizado por Dias (2004). Neste estudo Dias levantou a quantidade, a massa e o volume dos cacos de telhas gerados por mês nas referidas cidades (Tabela 2.4).

Tabela 2.3 – Estimativa de resíduos gerados na região de Morro da Fumaça

Descrição	Produtos	
	Tijolos	Telhas
Produção mensal (peças)	80.000.000	20.000.000
Perda estimada (peças)	4.000.000	1.000.000
Massa unitária média (kg) ⁽¹⁾	2,00	2,00
Massa total (ton)	8.000	2.000
Volume total (m ³) ⁽²⁾	10.700	2.700

⁽¹⁾ massa unitária referente ao tijolo com 6 furos e à telha tipo paulista.

⁽²⁾ volume dos cacos cerâmicos obtido através da massa específica aparente das pilhas e cacos de tijolos e telhas depositados nos pátios das indústrias.

Tabela 2.4 – Quantidade de resíduos gerados por mês (DIAS, 2004)

Região	Quebra declarada % ⁽¹⁾ (média informada)	Quant. de cacos (peças)	Massa de cacos ⁽²⁾ (toneladas)	Volume de cacos ⁽³⁾ (m ³)
Ituiutaba	3,08	239.439	407	545
Monte Carmelo	3,00	1,350 milhões	2.295	3.072

Fonte: DIAS (2004).

⁽¹⁾ porcentagem de peças descartadas em relação à quantidade produzida. Fonte: SINCOTAP e ACEMC.

- (2) para apurar a massa dos cacos foi utilizada a massa seca média de uma telha tipo Plan após a queima = 1,58 kg, (IOSHIMOTO, 1995), e corrigida para 1,7 kg devido à umidade (adotada umidade média anual de 7,6%). Com esta massa calculou-se a quantidade de cacos.
- (3) volume dos cacos calculado utilizando a massa específica aparente de pilhas de telhas e cacos de telhas depositados no pátio da indústria, portanto com umidade, calculada a partir de informações fornecidas pela Indústria Alto Paranaíba – Monte Carmelo: volume da caçamba da máquina carregadeira = 1,53 m³; tara da carregadeira = 10.020 kg; 1ª. Pesagem = 11.000 kg; 2ª. Pesagem = 11.150 kg; 3ª. Pesagem = 11.340 kg; massa unitária média calculada = 747 kg/m³.

2.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Com o aumento da população e a respectiva concentração nas cidades, a construção civil vem experimentando um grande desenvolvimento nos últimos anos. Todo este desenvolvimento acaba gerando, além do aumento da extração de recursos naturais, um grande aumento na geração de resíduos.

O entulho da construção civil representa cada vez mais um problema no gerenciamento das grandes cidades, tanto pela grande quantidade gerada como pelos depósitos clandestinos destes materiais. Segundo Altheman (2002), este entulho pode ser definido como resíduos sólidos, provenientes das atividades de construção, demolição e reforma de estruturas e pavimentos e da indústria da construção, basicamente composto por concretos, rochas, argamassas, metais, madeiras, blocos, tijolos, cerâmicas, solos, gesso, asfalto e, em menor grau, plásticos, borrachas e papéis. São ainda considerados entulho: árvores, cepos, solo, rochas procedentes da limpeza, preparo e escavação de terrenos e ainda materiais salvados de demolições tais como portas, janelas e tubulações, os quais são reaproveitados em outras obras.

Sendo a atividade da construção civil reconhecidamente grande consumidora de recursos naturais não-renováveis, a reciclagem de RCD é uma forma de contribuição do setor para a sustentabilidade do meio ambiente, através da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da diminuição de demanda por recursos naturais não renováveis.

Desde a Antiguidade, atividades relacionadas com a reciclagem vêm sendo realizadas. Tem-se conhecimento de que escombros de construções já eram utilizados a dois mil anos, pelos romanos na

reconstrução de cidades destruídas pelas guerras de conquistas do Império e na construção de estradas misturados a cinzas vulcânicas, argilas e cacos cerâmicos, como sub-base de pavimentação, sobre a qual eram assentados blocos de pedra rejuntada com pasta de cal constituindo a camada de acabamento (BRITO, 1999).

Contudo, a reciclagem de materiais tomou impulso na época do pós-guerra, a partir de 1946, quando a Alemanha, com milhares de escombros espalhados por suas cidades encontrava dificuldades com a falta de locais de destino para os resíduos, começou a utilizar o entulho britado como agregado na produção de novos concretos para a reconstrução das cidades (SCHULZ e HENDRICKS, 1992). Comparada com o estágio em que se encontra em outros países, a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil é relativamente recente. Pinto (1987) realizou estudos sobre a utilização de entulho reciclado na produção de argamassas, enquanto Zordan (1997) apresentou vários estudos sobre a produção de concreto utilizando material reciclado.

2.3.1 Classificação dos resíduos de construção e demolição

A constituição dos rejeitos da construção civil é heterogênea e dependente das características de cada construção e do grau de desenvolvimento da indústria em uma determinada região. Os resíduos podem ser classificados da seguinte forma:

- Solos;
- Cerâmicos: rochas, concreto, argamassa de cimento e cal endurecidas, cacos de cerâmica vermelha, azulejos e cerâmica branca, placas de gesso e vidro;
- Metálicos: pontas de vergalhões de aço e arame utilizados para moldagem do concreto, retalhos de chapas de aço, latão e alumínio e pregos;
- Orgânicos: cavacos de madeira, plásticos, materiais betuminosos, papelão e papel de embalagem, tintas, vernizes e adesivos, raízes e restos de vegetais da limpeza do terreno.

Pinto (1987) e Zordan (1997) realizaram pesquisas nas cidades de São Carlos e Ribeirão Preto, respectivamente, demonstrando a grande heterogeneidade dos materiais encontrados nos entulhos. A Tabela 2.5 apresenta a composição mineral do entulho pesquisado pelos autores.

Tabela 2.5 - Composição mineral do entulho

Material	Composição média da fração mineral do entulho	
	Pinto (1987)	Zordan (1997)
Argamassa	64,40 %	37,60%
Concreto	4,80%	21,10%
Material Cerâmico	29,40%	23,40%
Pedras	1,40%	17,90%

Fonte: PINTO (1987)

A Resolução 307 de 5 de julho de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos. De acordo com a CONAMA 307 (2002), os RCD são classificados em:

(I) - Classe A

São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, que deverão ser encaminhados a áreas de aterro de RCD ou para centrais de reciclagem, tais como:

(a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem.

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento), argamassa e concreto.

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

(II)- Classe B

São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros que deverão ser encaminhados a áreas de armazenamento temporário para futura reciclagem.

(III) - Classe C

São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua

reciclagem/recuperação, tais como produtos oriundos do gesso, os quais deverão ser transportados e armazenados de acordo com normas específicas.

(IV) - Classe D

São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros que, deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com normas específicas.

2.3.2 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição

Atualmente, a proteção do meio ambiente vem se tornando uma questão fundamental, gerando um vasto leque de preocupações e iniciativas em todo o mundo. Neste sentido, assuntos de grande relevância para a indústria da construção dizem respeito ao reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição e ao uso sustentável das matérias-primas tais como os agregados naturais e os produzidos a partir de agregados reciclados de construção e demolição.

A construção civil é responsável por 15 a 50% do consumo de recursos naturais extraídos sendo que, em países desenvolvidos como o Reino Unido, o consumo de materiais de construção civil é de, aproximadamente, 6 toneladas/ano.habitante. No Brasil, a estimativa de consumo de agregados naturais, somente na produção de concretos e argamassas, é 1,3 toneladas/ano.habitante (JOHN, 2006).

Segundo John (2006), no Reino Unido, assim como no Brasil, a construção e manutenção de rodovias consomem grandes quantidades de agregados naturais. A utilização de material reciclado ajuda a aliviar os custos das obras e ainda reduz a extração de matérias primas. No entanto, preocupações com o desempenho do pavimento e respectivos custos adicionais têm dificultado a utilização destes agregados em tais aplicações.

Na Austrália, o *Institute Public Works Engineering Australia – NSW Division* (2010) foi contratado pelo Department of Environment, Climate Change and Water NSW para atualizar e aperfeiçoar a Especificação de Fornecimento de Materiais Reciclados para Pavimentos, Terraplenagens e Drenagens, publicada originalmente no ano de 2003, que havia sido realizada para suprir as necessidades das indústrias com relação a utilização

de materiais reciclados em obras públicas. Através deste estudo foram definidos alguns parâmetros para a utilização de materiais reciclados em obras de pavimentação. Na Tabela 2.6 são apresentadas as classes dos materiais de acordo com as suas propriedades e as possibilidades de reaproveitamento.

Várias obras foram executadas seguindo a especificação para utilização de materiais reciclados. Em 2006 foi executada a pavimentação asfáltica da Rua Armstrong, localizada no Estado de Artney Glen, com uma extensão de 680 metros, onde a estrutura do pavimento era composta por uma camada de revestimento com 4 cm de CBUQ, uma camada de base com 15 cm e uma camada de sub-base com 30 cm de espessura, composta por materiais reciclados (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Pavimentação utilizando material reciclado (INSTITUTE PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALIA – NSW DIVISION, 2010)

Tabela 2.6 – Especificação para utilização de materiais reciclados

Materiais Constituintes	Utilização			
	Base da estrada		Material de	Material
	N>10 ⁶	N<10 ⁶	fechamento	subleito
<i>Proporção de Material (% max. em peso)</i>				
Concreto	100	100	100	100
Asfalto recuperado	40	40	50	20
Cerâmica vermelha/alvenaria	20	30	100	100
Cinzas	10	10	5	5
Vidro moído	10	10	10	50
<i>Contaminação Máxima Admissível (% max. em peso)</i>				
Amianto	0	0	0	0
Metal, vidro e cerâmica	3	5	5	5
Gesso e pedaços de argila	0,2	0,2	1	0,5
Borracha, plástico, pape	0,1	0,2	0,2	0,5
<i>Distribuição granulométrica</i>				
% passante 100 mm			100	
% passante 75 mm			95 - 100	
% passante 26,5 mm	100	100		
% passante 19 mm	95 - 100	85 - 100	50 - 85	
% passante 13,2 mm	70 - 90	70 - 90		
% passante 9,5 mm	60 - 80	60 - 80	40 - 80	100
% passante 4,75 mm	40 - 65	40 - 65		80 - 100
% passante 2,36 mm	35 - 55	30 - 55	35 - 70	50 - 80
% passante 0,425 mm	10 - 30	10 - 30		10 - 35
% passante 0,075 mm	5 - 15	5 - 15		5 - 20

Fonte: INSTITUTE PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALIA – NSW DIVISION (2010)

De acordo com o relatório da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2000), o *Illinois Department of Transportation* utiliza anualmente milhões de toneladas de materiais em suas rodovias. A utilização de materiais reciclados, por ano, é superior a 1,5 milhões de toneladas, resultando na diminuição dos custos e aumento no desempenho das rodovias. O Departamento selecionou alguns materiais reciclados que vêm sendo utilizados para realizar a complementação ou a substituição dos

materiais convencionais: escória de alto-forno, subproduto da cal, cinzas, resíduos de vidro, escória de alto-forno granulada, microsíllica, pavimento de asfalto reciclado, pavimento de concreto reciclado, reforço de aço, escória de aço, entre outros.

Na Austrália, Larbi *et al.* (2000), por meio de um estudo preliminar de laboratório avaliaram a eficácia do tratamento térmico para melhorar a qualidade dos agregados reciclados de concreto. As amostras utilizadas para o estudo consistiam em agregados de concreto triturados que foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos com temperaturas de 650°C a 800°C. Em cada caso, o tratamento durou um período de 0,5 a 1 hora. Apesar de se tratar de um estudo preliminar, os resultados indicam que o tratamento térmico dos agregados reciclados de concreto, a uma temperatura de, aproximadamente, 800 °C pode render boa qualidade aos agregados.

Na Noruega, através de ações integradas de demolição e construção, é esperada para os próximos dez anos a utilização de cerca de 100.000 toneladas de resíduos da demolição de hospitais antigos na construção de modernos hospitais (DIAS, 2004).

Um estudo realizado por Carneiro *et al.* (2001) concluiu que o agregado reciclado, tanto na fração miúda quanto na fração graúda, apresentou-se adequado para ser usado como material para execução de base e sub-base de pavimentos, bem como em argamassa de revestimento, na área metropolitana de Salvador. Contudo, compreende-se a importância de realização de estudos específicos para os materiais regionais, visto que tanto o solo quanto o agregado reciclado possuem características próprias.

A Secretaria Municipal de Obras da Prefeitura Municipal de Uberlândia executou serviços de pavimentação utilizando RCD como camada de base do pavimento (DIAS e DORNELAS, 2008). A primeira aplicação deste material, após estudos e definição do comportamento, foi feita em 1600 m da via de acesso à ETE-Uberabinha (DMAE), em junho de 2003, estando esta pista em observação permanente.

Em setembro de 2005, com base em especificações técnicas constantes do edital de licitação, a mesma Secretaria de Obras proporcionou a alternativa de utilização do RCD britado na execução da base do pavimento, em uma extensão de 880 m, da pista direita da Av. Nicomedes Alves dos Santos na ligação com o Anel Viário de Uberlândia, sendo que a base da pista esquerda, com a mesma extensão, foi executada com material de uma pedreira convencional.

De acordo com Zordan (1997), a melhor forma de reciclagem para o entulho proveniente da construção civil, incluindo os materiais cerâmicos,

é a sua utilização em obras de pavimentação, seja em camadas de base, sub-base ou revestimento primário, na forma de bica corrida ou ainda em misturas com solo. Esta última alternativa possui as seguintes vantagens:

- é a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia, o que implica em um menor custo do processo;
- permite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- economia de energia no processo de moagem do entulho (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas;
- possibilidade de utilização de uma maior parcela do entulho produzido, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/ trituração;
- misturas realizadas entre RCD e solos saprolíticos apresentam melhor comportamento que misturas realizadas entre brita e o mesmo tipo de solo. Enquanto a adição de 20% de entulho reciclado ao solo saprolítico gera um aumento de 100% do CBR, nas adições de brita natural o aumento do CBR só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

2.3.2.1 A reutilização dos resíduos de construção e demolição na própria obra

De acordo com Altheman (2002) os resíduos no canteiro de obra variam conforme o cronograma de execução dos serviços. Grande parte do RCD gerado durante toda a construção, pode ser utilizada como agregado nas mais diversas fases da obra, considerando, porém, que a fração mineral (material cimentício e cerâmico) é a única a ser reciclada e utilizada no próprio canteiro, as demais frações como madeira, metais, gesso, plásticos e papéis, devem ser encaminhadas aos devidos locais de reciclagem ou descarte desses materiais. Altheman ainda cita algumas utilizações dos agregados reciclados na própria obra:

- Aterramento de valas e reconstituição de terreno;
- Execução de estacas ou sapatas para muros com pequenas solicitações;

- Lastro e contrapiso em áreas comuns externas e passeio público;
- Contrapiso interno às unidades habitacionais;
- Contrapiso ou enchimento em casa de máquinas a áreas comuns internas;
- Sistema de drenagem em estacionamentos, poços de elevadores e floreiras;
- Vergas e pequenas colunas de concreto com baixa solicitação;
- Assentamento de blocos e tijolos não estruturais;
- Enchimentos em alvenarias, lajes e esquadrias;
- Chumbamentos de batentes, contramarcos e esquadrias;
- Revestimentos internos e externos em alvenaria.

2.3.2.2 Usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição

Segundo Altheman (2002) o processo de reciclagem nas usinas é, em princípio, igual ao dos canteiros de obras, porém o grande volume e a variabilidade do RCD recebido resultam numa sistemática de manuseio mais complexa. A implantação de uma unidade recicladora pode diversificar-se pelo porte e complexidade, a depender da oferta de resíduos, demanda pelos agregados reciclados e características desejadas para o produto.

De acordo com os procedimentos, a separação dos materiais não minerais e contaminantes, executada antes da britagem, têm grande influência no teor de impurezas. Geralmente, esta separação é feita manualmente, onde consiste na retirada das frações visuais (dimensões passíveis de serem vistas pelos separadores), o que implica que esta remoção não é total.

2.3.3 Reciclagem de cerâmica vermelha

Do ponto de vista tecnológico, os resíduos cerâmicos apresentam potencialidade de uso variado, entre outras como agregado para concreto, argamassa ou artefatos de cimento (BASTOS E CERRI, 2004), material para camadas de pavimentos (DIAS, 2004; CAVALCANTE et al., 2006) cobertura de quadra de tênis e, ainda, poderiam ser reaproveitados no

próprio processo de produção da indústria cerâmica (RIPOLI FILHO, 1997).

O reaproveitamento dos resíduos de cerâmica vermelha apresentado por Ripoli Filho (1997) consiste na utilização do rejeito industrial cerâmico, chamado de chamote, como um fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos.

Recentemente, uma pesquisa realizada por Dias (2004) avaliou os resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para a utilização em camadas de pavimento de baixo custo. Na pesquisa foram utilizados, exclusivamente, cacos de telhas, coletados nas cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba, em Minas Gerais. O material cerâmico foi triturado através de um britador de impacto e avaliado, de forma isolada e em misturas com solos lateríticos.

As misturas realizadas por Dias (2004) apresentaram algumas peculiaridades que precisam ser melhor avaliadas, como a quebra de partículas mediante os esforços de compactação, o que colocaria em risco o seu emprego. De acordo com a pesquisa, as misturas entre agregado reciclado de telha (ART) e solos lateríticos da região analisada (argilosos ou arenosos), na proporção de 63% de ART e 37% de solo, apresentaram resultados satisfatórios em termos de CBR, podendo atender as exigências para camadas de sub-base. A mistura com solo argiloso apresentou, para um teor de umidade de 19,4%, um CBR superior a 50%, já a mistura realizada com solo arenoso, para um teor de umidade de 14%, apresentou um CBR próximo a 70%.

Com relação ao módulo de resiliência, que é o grande limitador para a utilização do ART puro, os ensaios realizados por Dias apresentaram ganhos expressivos nos resultados, potencializando o uso do ART em camadas mais nobres de pavimento. Em dosagens compostas por 41% de solo, tanto as misturas com solo argiloso quanto as misturas com solo arenoso, obtiveram ganhos superiores a 200% no Módulo de Resiliência.

Outro trabalho envolvendo resíduos de cerâmica vermelha foi realizado por Cavalcante *et al.* (2006), que avaliaram o comportamento dos resíduos da produção de blocos e lajotas cerâmicas das olarias do Estado de Sergipe. Nesta pesquisa os resíduos foram triturados através de um cilindro de compactação, onde se utilizou a energia Proctor Normal. O material resultante desta trituração foi misturado com solo tropical, tipicamente laterítico, arenoso, do município de Pacatuba, no Estado de Sergipe e avaliado através de ensaios de CBR. As misturas realizadas com 67 % de solo mais 33 % de resíduo (Mistura A) e com 50 % de solo mais 50 % de resíduo (Mistura B), em peso, indicaram um aumento expressivo no valor do CBR, quando se aumentou o percentual de resíduos na matriz de solo.

A mistura composta por 50% de resíduo apresentou um valor de CBR superior a 60%, para um teor de umidade de 12,6%.

Tanto Dias (2004) quanto Cavalcante *et al.* (2006) concluem que a utilização dos resíduos de cerâmica vermelha na pavimentação, no seu estado primário, é quase que impraticável. As sobras são normalmente encontradas ainda em forma de blocos, e não como cacos de pequenas dimensões e a sua aplicação direta, em camadas de pavimentos, certamente acarretarão sérios problemas, em virtude das deformações motivadas pela quebra destes quando as cargas do tráfego começassem a atuar.

De acordo com Cavalcante *et al.* (2006) cerca de 65 % dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos no pólo cerâmico do Estado de Sergipe são depositadas em aterros de várias naturezas, em praticamente todos os casos agredindo o meio ambiente. Estes resíduos também têm sido utilizados para tapar buracos de estradas vicinais e vendidos como produto de segunda categoria, principalmente os blocos mal queimados. Contudo, os autores destacam que em nenhum dos casos analisados há um suporte técnico para a aplicação do material.

Em Santa Catarina, a destinação dada aos resíduos de cerâmica vermelha é bastante semelhante aos procedimentos adotados no restante do país. Na região de Morro da Fumaça, segundo informações obtidas pelo autor junto aos fabricantes, os resíduos gerados são utilizados de diversas maneiras, normalmente, pelas próprias indústrias. Estes materiais são utilizados em aterros de valas de drenagem, em aterros (Figura 2.4), principalmente no pátio da indústria e, na maioria das vezes, na conservação das estradas de acesso às jazidas de extração de matéria prima (argila).



Figura 2.4 – Aterro construído com resíduos de telhas cerâmicas

Uma pequena quantidade dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos é utilizada como revestimento das ruas não pavimentadas. Experiências com este material foram realizadas no município de Morro da Fumaça (Figura 2.5), porém, sem muito sucesso, tendo em vista a pouca duração do revestimento.



Figura 2.5 – Utilização de resíduo cerâmico como revestimento primário em estradas

Em Hong Kong, Poon e Chan (2006) apresentaram um estudo na Universidade Politécnica de Hong Kong sobre a investigação da mistura agregado reciclado de concreto e tijolo triturado como agregados na produção de blocos de pavimentação. Os resultados indicaram que a incorporação de tijolo triturado reduziu a densidade, as resistências à compressão e à tração dos blocos de pavimentação. Em misturas compostas por 50% de cacos de tijolos em sua composição, a alta absorção de água pelas partículas de tijolo triturado fez com que a absorção dos blocos também aumentasse, diminuindo a resistência dos mesmos. Porém, em misturas com 25% de cacos de tijolos, os blocos foram aprovados nos requisitos mínimos para a utilização em zonas com tráfego leve.

Khalaf (2004) apresentou na Conferência Internacional para a Utilização de Materiais em Construção e Estruturas um estudo avaliando a possibilidade de utilizar cacos de tijolos como agregado em misturas betuminosas. Neste estudo foram realizados vários ensaios comparando as propriedades de um agregado de tijolo reciclado, chamado de RBA, com um agregado tradicional de granito. Os agregados selecionados foram analisados e então utilizados em misturas betuminosas, que por sua vez, foram ensaiadas para determinar as suas propriedades físicas e mecânicas.

Os resultados desta investigação mostram que a utilização de agregado de tijolo reciclado como agregado graúdo é uma opção viável, haja vista que, devido à alta porosidade e rugosidade das superfícies do agregado de tijolo, estes possuem a capacidade de absorver mais betume, proporcionando uma melhor ligação na mistura. Outro resultado importante obtido por Khalaf, foi que, devido a densidade dos blocos de tijolo serem menores que os de granito, a mistura betuminosa se torna mais leve, se tornando mais fácil de usar, transportar e executar na obra. A resistência do agregado de tijolo tem pouca influência nas propriedades finais das misturas betuminosas. Por outro lado, a porosidade e a rugosidade produzem melhores resultados.

Khalaf e DeVenny (2004) realizaram um estudo sobre a utilização de agregados reciclados de tijolo em concretos com cimento Portland. Após a realização de vários ensaios de densidade, porosidade, impacto e resistência à compressão, Khalaf e DeVenny verificaram que a densidade relativa e a resistência do concreto variam de acordo com a porosidade dos agregados reciclados de tijolo. De um modo geral, concluem que o concreto realizado com estes agregados pode ser utilizado em obras com níveis de solicitação mais baixos.

2.4 MISTURAS SOLO-CACOS CERÂMICOS

Várias pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos solos e as suas possíveis formas de estabilização. Um solo estabilizado pode apresentar maior resistência às cargas do tráfego, ao desgaste e à erosão. A estabilização pode ser realizada através de uma compactação eficiente, da correção da granulometria e da plasticidade ou através da adição de substâncias que confirmam ao solo uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de seus grãos.

A estabilização granulométrica é um processo de melhoria das propriedades de um solo através da mistura com outros materiais (solos ou agregados), de forma a obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade, quando propriamente compactado. Quando, ao solo é adicionado algum tipo de agregado para a obtenção da granulometria adequada, dá-se o nome de solo-agregado.

Dias (2004) realizou estudos sobre misturas entre solo e agregados reciclados de resíduos de cerâmica vermelha. Através de ensaios de compactação em misturas volumétricas que variavam de 100% de agregado

e 0% de solo, até 100% de solo e 0% de agregado, foi determinada a dosagem ideal da mistura. Segundo Dias (2004), o percentual de solo a ser utilizado na mistura com agregado deve ser igual a, aproximadamente, 41%.

A utilização de solos em misturas com agregados apresenta-se como uma alternativa interessante, tendo em vista que os solos são tradicionalmente utilizados em rodovias, são abundantes, de baixo custo e os seus procedimentos de execução são bem conhecidos.

A estabilização de um solo pode ser analisada através da sua distribuição granulométrica e dos seus índices físicos (LL e LP), além do ensaio mecânico que forneça dados para a determinação do índice de suporte do material, antes e após o processo de estabilização. Para a realização de uma mistura estabilizada é necessário conhecer a natureza das partículas e o travamento destas com a compactação.

A dosagem dos componentes na estabilização granulométrica é determinada de acordo com a faixa granulométrica exigida. A busca por maneiras de conseguir um produto final com qualidade superior aos de origem levou os técnicos rodoviários a adotarem regras empíricas, fundamentadas em ensaios de laboratório e campo, que deram origem às especificações granulométricas. Na Tabela 2.7 é apresentada a especificação do DNER para camadas de base estabilizadas granulometricamente.

Tabela 2.7– Especificação DNER-ES 303/97

Tipos	Para N > 5 x 10 ⁶				Para N > 5x10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNER (1997)

Para evitar o acúmulo de finos na parte inferior da curva de máxima densidade, a porcentagem de material que passa na #200 (0,074 mm) não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem de material que passa na #40

(0,42 mm). A maioria das especificações preconiza a utilização de um ensaio de resistência da mistura estabilizada, (geralmente CBR e expansão) e de um ensaio para avaliação da qualidade do agregado, geralmente o ensaio de Abrasão Los Angeles.

Como o objetivo desta pesquisa é a utilização destas misturas em camadas de pavimentos, optou-se por realizar a comparação entre a distribuição granulométrica das misturas apresentadas e as granulometrias especificadas pelo DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes para camadas de base estabilizadas granulometricamente. De acordo com as especificações deste órgão a faixa granulométrica de uma mistura é determinada em função do diâmetro máximo dos agregados que a compõe. Para estas misturas utilizou-se a especificação correspondente ao diâmetro máximo de 2”. Esta especificação de base é também conhecida no meio técnico como faixa “A” de base estabilizada.

Os projetos de mistura de agregados são muito utilizados na execução de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente, em misturas betuminosas ou quaisquer outras misturas que envolvam dois ou mais materiais de granulometrias diferentes (misturas solo-cimento, solo-cal, macadames, etc.).

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Os solos podem ser classificados de diversas maneiras, levando em consideração a sua origem, a sua evolução e sua estrutura, entre outras propriedades. Os sistemas de classificação que se baseiam nas características dos grãos que constituem os solos têm como objetivo a definição de grupos que apresentem comportamento semelhante sob os aspectos de interesse da engenharia civil (PINTO, 2002).

2.5.1 Classificação MCT

A classificação MCT, que é baseada nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, determina a partir de corpos-de-prova, compactados, de dimensões reduzidas, não levando em consideração ensaios de granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade.

Esta classificação é parte integrante da Metodologia MCT desenvolvida por Nogami e Villibor (1981) a partir das limitações impostas pelas classificações tradicionais (HRB, SUCS) em relação à utilização de solos tropicais. Esta metodologia possui uma grande utilização em obras viárias, mas também é utilizada em obras de terra em geral e mapeamento geotécnico envolvendo solos tropicais. A classificação MCT divide os solos em duas grandes classes de comportamento:

- solos de comportamento laterítico (L);
- solos de comportamento não-laterítico (N).

Estas duas classes se subdividem em sete grupos:

- LG': argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas;
- LA': areias argilosas lateríticas;
- LA: areias com pouca argila laterítica;
- NG': argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas;
- NS': siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos;
- NA': areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas;
- NA: areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos.

Os ensaios utilizados para a classificação MCT dos solos são o Ensaio de Compactação Mini-MCV e o Ensaio de Perda de Massa por Imersão. De acordo com ensaios padronizados, é possível classificar os solos em um dos sete grupos e prever suas respectivas propriedades mecânicas e hidráulicas quando compactados.

O ensaio de compactação Mini-MCV é realizado em amostras de solo, previamente secas ao ar, e com granulometria passante na peneira número 10 (2,0 mm). Estas amostras são compactadas em diferentes moldes cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Os resultados da compactação são plotados em um gráfico composto pela variação da altura do corpo-de-prova, *versus*, o logaritmo do número de golpes. Através deste gráfico determina-se o coeficiente c' (inclinação da curva de deformabilidade para Mini-MCV).

No ensaio de perda de massa por imersão os corpos de prova do ensaio de compactação são imersos, horizontalmente, em água, permanecendo com um centímetro para fora do cilindro de compactação. Após 20 horas, o solo desprendido pela ação da água é recolhido em uma cápsula e seco em estufa para determinação do peso seco de material. A Perda de Massa por Imersão, conhecida como Índice Pi (expresso em porcentagem) é calculada pela equação 1:

$$P_i = 100 \frac{M_i \times L_{cp}}{M_s \times L_f} F_c [\%] \quad (1)$$

Onde:

M_i = Massa seca despreendida [g].

M_s = Massa seca do corpo de prova, logo após a sua compactação [g].

L_{cp} = Altura final do cp, logo após a compactação [mm].

L_f = 10 mm = Altura do C_p , para molde.

F_c = 1,0 quando ocorre um despreendimento normal (esperado).

F_c = 0,5 quando a parte despreendida é um monobloco (exceção).

2.5.1.1 Ensaio para Identificação Expedita MCT - Método das Pastilhas

O Método das Pastilhas foi apresentado por Nogami e Villibor (1994) para simplificar o método tradicional MCT, facilitando a identificação dos grupos através de um gráfico composto pelo valor da contração diametral versus penetração. Assim sendo, o método baseia-se em determinações efetuadas em pastilhas que são moldadas em anéis de inox, secadas, verificando-se a contração diametral, e submetidas a reabsorção de água, quando se observa o surgimento de trincas, expansão e resistência a penetração de uma agulha padrão.

Os valores da contração diametral e da penetração são locados em uma carta (Figura 2.6), aonde é obtido o grupo de solo da metodologia MCT.

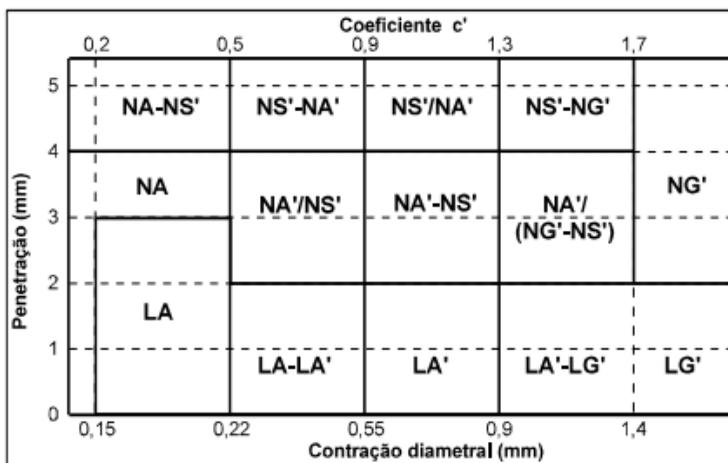


Figura 2.6 – Carta de classificação do Método das Pastilhas (NOGAMI E VILLIBOR, 1994)

2.5.2 Classificação HRB

O sistema de classificação de solos proposto pela *Highway Research Board* (HRB) é empregado na engenharia rodoviária em todo o mundo (CORRÊA, 2008). Este sistema foi iniciado pelo *Bureau of Public Roads* e revisto pela HRB em 1945.

Além de se basear nas propriedades índices do solo: limites de Atterberg (LL e LP) e granulometria, a classificação HRB-AASHTO utiliza o índice de grupo (IG) determinado com os valores de porcentagem passante na peneira de malha 0,074 mm (nº 200), do LL e do IP (índice de plasticidade), podendo assumir qualquer valor inteiro positivo, inclusive zero, no que difere do proposto originalmente, quando sua amplitude varia de 0 a 20. Como o IG atribui um valor ao solo, o qual varia inversamente à capacidade de suporte do subleito, sob boas condições de drenagem e compactação, se um solo possuir IG igual a zero será considerado bom material e, quanto mais elevado for seu valor, pior o material.

O sistema HRB classifica os solos em 8 grupos:

- solos granulares (% passante #200 < 35%): A-1, A-2 e A-3;
- solos finos (% passante #200 > 35%): A-4, A-5, A-6 e A-7;
- solos altamente orgânicos: podem ser classificados como A-8.

2.6. MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS MATERIAIS

O Módulo de Resiliência é utilizado para estudar as características de deformabilidade dos materiais que compõe a estrutura dos pavimentos rodoviários em condições cíclicas. O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é desenvolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações, ou seja, é a energia potencial de deformação. (MEDINA, 1997). A determinação do seu valor pode ser feita por meio das Equações 2 e 3.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2)$$

onde:

M_R = Módulo de Resiliência;

σ_d = Tensão desvio aplicada repetidamente;

ε_r = Deformação axial recuperável correspondente a um determinado número de aplicações de carga σ_d .

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

onde:

Δh = Deslocamento axial recuperável ou resiliente;

h_0 = Altura inicial do corpo de prova.

Observa-se, na Equação 1, que o valor do Módulo de Resiliência varia inversamente com o valor da deformação resiliente ou recuperável. Portanto, quanto mais deformável for o material, menor será o valor de seu Módulo de Resiliência.

De acordo com Duncan *et al.* (1968), em solos granulares o módulo de resiliência sofre a influência de uma tensão de confinamento (σ_3), que pode ser expresso através da Equação 4.

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \quad (4)$$

onde:

M_R = Módulo de Resiliência;

σ_3 = Tensão de confinamento;

K_1 e K_2 = constantes experimentais.

Segundo Bezerra Neto (2004), atualmente, um modelo mais genérico tem sido bastante utilizado pelos pesquisadores para representar a variação do módulo de resiliência com o estado de tensão dos materiais geotécnicos. Este modelo considera, conjuntamente, o efeito da variação da tensão confinante e da tensão desvio no módulo de resiliência, e pode ser descrito pela Equação 5.

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \quad (5)$$

onde:

M_R = Módulo de Resiliência;

σ_3 = Tensão de confinamento;

σ_d = Tensão desvio;

K_1 , K_2 e K_3 = constantes experimentais.

2.7 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.7.1 Métodos empíricos

Os métodos empíricos são aqueles baseados na experiência acumulada e correlacionam o desempenho do pavimento com algumas propriedades dos materiais utilizados na construção. Possuem a vantagem de serem facilmente empregados, pois os ensaios de caracterização exigidos são simples e não requerem aparelhagem sofisticada. Entretanto, são bastante limitados pelas condições de contorno (materiais de construção, clima da região, condições de tráfego, etc.) não permitindo uma generalização adequada para outras regiões, novos materiais e diferentes cargas de tráfego (BEZERRA NETO, 2004).

O método do DNER é o método empírico mais utilizado no Brasil e tem como base o trabalho "*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*", da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO. Este método foi elaborado pelo Eng^o Murilo Lopes de Souza em 1966 e desde então tem sido utilizado em todo o território nacional (BEZERRA NETO, 2004).

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo ensaio de ISC, adotando-se o método de ensaio preconizado pelo método DNER-ME 049 (DNER, 1994), em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço. São adotados aos materiais integrantes do pavimento coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas.

2.7.2 Métodos mecanísticos

Um método de dimensionamento é dito mecanístico (ou analítico) quando utiliza uma teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais.

No dimensionamento mecanístico, parte-se de espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões, deformações e deslocamentos que são comparadas aos valores limites estabelecidos. Por realimentações sucessivas chega-se a uma estrutura satisfatória (MEDINA e MOTTA, 2005). O procedimento é comum e bastante utilizado devido a economia de tempo e maior versatilidade e contrasta com a abordagem determinística do método do CBR do DNER.

Por este tipo de análise, tem-se um panorama de funcionamento da estrutura quando solicitada, possibilitando modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas. Ao analisar a estrutura do ponto de vista mecanístico, pode-se alterá-la de modo a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação seja demasiada em uma das camadas de modo a levá-la precocemente à ruptura.

Segundo Ferreira (2002), o método consiste em determinar a melhor configuração estrutural possível (quais camadas e com que espessuras) para uma determinada rodovia, mediante o equilíbrio entre os esforços (tensões e deformações) a ela impostos pelas cargas de tráfego e a capacidade resistente dos materiais utilizados em sua implantação ou restauração e pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2.6 (MOTTA, 1991 apud MEDINA e MOTTA, 2005).

O programa computacional EVERSTRESS determina os esforços internos solicitantes da estrutura do pavimento em um sistema tridimensional (sistema de coordenadas x , y , z) de camadas elástico-lineares submetidas a até dez cargas verticais aplicadas na superfície do sistema ($z = 0$). Determina também as tensões, os deslocamentos e as deformações atuantes na estrutura do pavimento constituído por até cinco camadas, sob uma condição de carregamento pré-estabelecida (AMARAL, 2004).

Este programa aplica-se em problemas de elasticidade linear de meios estratificados, com a solução de Burmister ampliada para cinco camadas, utilizando o método das diferenças finitas na resolução das expressões. A superposição dos efeitos causados por várias rodas é correta

para o cálculo dos deslocamentos, mas aproximada para as tensões. Consideram-se as camadas homogêneas, isotrópicas e horizontalmente infinitas, sendo o subleito um meio semi-infinito. Para cada camada do pavimento é definido o módulo de elasticidade constante e o coeficiente de Poisson nos dados de entrada (MEDINA e MOTTA, 2005).

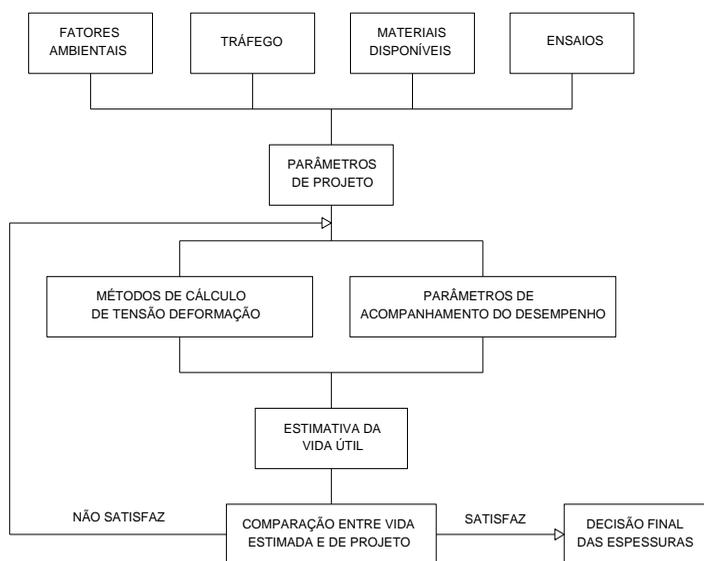


Figura 2.7 – Esquema de um dimensionamento mecânico de pavimentos (MOTTA, 1991 apud MEDINA e MOTTA, 2005)

2.7.3 Análise e conclusões da revisão bibliográfica

Com base nas informações apresentadas, verifica-se que o reaproveitamento dos resíduos de cerâmica vermelha em obras rodoviárias se trata de uma alternativa bastante conhecida, tanto no Brasil, como em outros países. Geralmente, este material é classificado como resíduo de construção e demolição e a sua utilização está diretamente ligada à utilização de outros materiais reaproveitados. A opção de utilizar apenas os cacos de tijolos e telhas em camadas estruturais de um pavimento ainda é pouco explorada.

No Brasil já foram desenvolvidas algumas pesquisas sobre a utilização de resíduos de cerâmica vermelha em obras rodoviárias, onde se

destacam os trabalhos realizados por Dias (2004) e por Cavalcante *et al.* (2006), porém sem nenhuma experiência prática executada na realidade.

De acordo com os levantamentos realizados, a região de Morro da Fumaça apresenta uma elevada quantidade de cacos de tijolos e telhas, que são gerados mensalmente, resultantes do processo de fabricação da cerâmica vermelha. O reaproveitamento destes materiais se mostra uma alternativa bastante interessante, tanto financeira quanto ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados para a obtenção e coleta dos materiais, as características físicas e a classificação geotécnica dos solos e as características físicas dos materiais cerâmicos analisados.

Para facilitar a apresentação dos materiais utilizados na pesquisa, bem como o conjunto dos ensaios realizados, optou-se por agrupar estas informações em um único fluxograma que está apresentado na Figura 3.1.

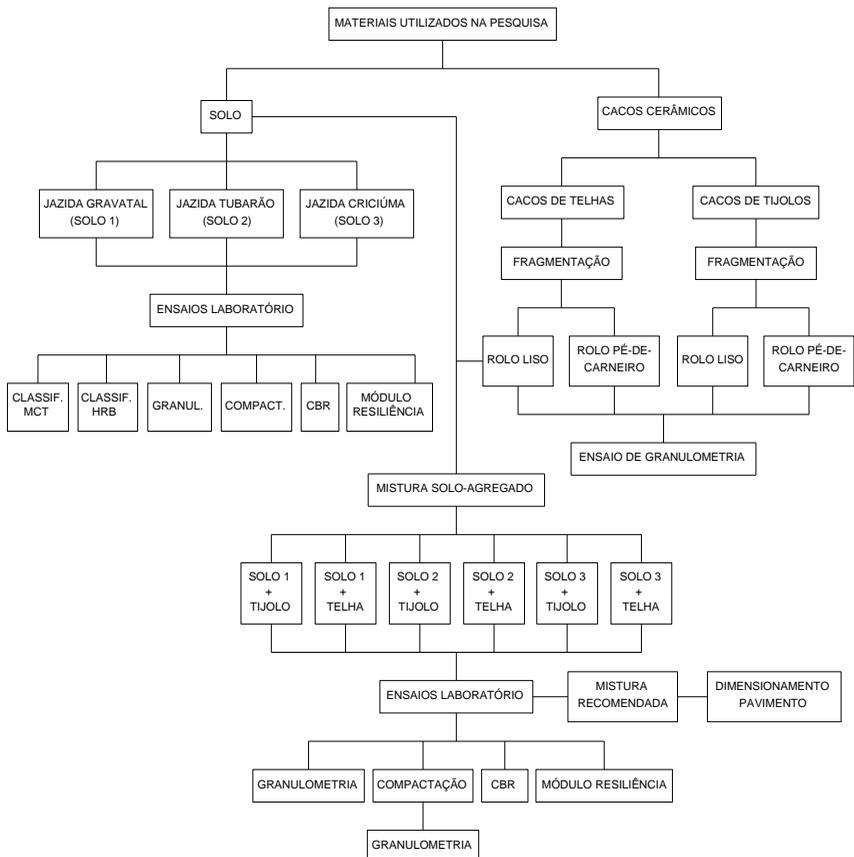


Figura 3.1 – Materiais e ensaios utilizados na pesquisa

3.1 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos utilizados nesta pesquisa são constituídos de cacos de tijolos e cacos de telhas e foram coletados em cerâmicas localizadas no município de Morro da Fumaça, em Santa Catarina.

Ambos os materiais coletados estavam depositados em pilhas de peças que estavam sendo descartadas pelo fato de terem sido quebradas ou danificadas durante seu transporte (Figuras 3.2 e 3.3).



Figura 3.2 – Cacos de tijolos



Figura 3.3 – Cacos de telhas

3.1.1 Fragmentação do material cerâmico

A fragmentação ou trituração do material cerâmico foi realizada para a redução do tamanho dos cacos de tijolos e telhas com o objetivo de obter partículas com dimensões apropriadas para a realização dos ensaios programados. Esta fragmentação foi obtida através de passagens de rolos compactadores sobre o material cerâmico.

Para a fragmentação do material cerâmico foram utilizados dois tipos de rolo compactador: um rolo pé-de-carneiro e um rolo liso. A utilização de dois tipos diferentes de rolo teve por objetivo avaliar o desempenho individual de cada equipamento, podendo-se assim, determinar qual o modelo mais eficiente para a realização deste serviço.

Para obter uma avaliação mais precisa do desempenho dos dois tipos de equipamentos, os trabalhos de fragmentação foram realizados com mesmo rolo compactador. O rolo utilizado no experimento foi do tipo pé-de-carneiro, da marca Caterpillar, modelo CS 531-C. Segundo informações do equipamento, este rolo apresenta um peso estático de 9.163 kg e em movimento, no modo vibratório, um peso de, aproximadamente, 26.000 kg. Este rolo possui uma chapa metálica que é utilizada como um dispositivo opcional do equipamento e, tem por objetivo, envolver o tambor do rolo, deixando-o com um formato liso. Esta chapa é móvel e pode ser utilizada de acordo com a necessidade do serviço. A alternativa de utilizar o mesmo equipamento no experimento foi tomada com o objetivo de diminuir o número de variáveis envolvidas na pesquisa, pois utilizando as mesmas unidades dos equipamentos, garantiu-se que o material foi submetido às mesmas condições de fragmentação nas duas situações.

O local escolhido para a realização dos trabalhos de fragmentação foi um canteiro de obras da empresa A. Mendes Pavimentação localizado no município de Criciúma. Para a realização do experimento utilizou-se um segmento de rua que se encontrava na cota final de terraplenagem e devidamente compactado. Estes cuidados com o subleito tiveram o objetivo de garantir que o rolo compactador trabalhasse sobre uma superfície que não interferisse tanto na energia compactação exercida pelo equipamento, ou seja, que fosse evitado que os cacos penetrassem no chão.

O material cerâmico coletado foi transportado até o local determinado para a realização dos trabalhos onde foram espalhados, separadamente, com a ajuda de uma pá carregadeira, de modo que apresentassem o formato de duas pistas. Estas camadas apresentavam uma superfície bastante irregular e uma espessura de, aproximadamente, 30 cm (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Camada de cacos de tijolo antes da fragmentação

Sobre as camadas de material cerâmico foram passados os rolos compactadores. Cada tipo de material cerâmico sofreu, em segmentos diferentes, a aplicação do rolo pé-de-carneiro e do rolo liso. Os dois tipos de rolo passaram quinze vezes sobre cada camada de material cerâmico (Figura 3.5). A compactação foi realizada com o rolo trabalhando em seu formato vibratório e na velocidade lenta (tartaruga), ou seja, exercendo todo seu poder de compactação sobre o material.



Figura 3.5 – Fragmentação do material cerâmico com rolo liso

Para cada tipo de material cerâmico foram coletadas três amostras: após a quinta, a décima e a décima quinta passada de cada tipo de rolo.

Estas amostras receberam uma nomenclatura específica, de acordo com o tipo de equipamento utilizado e seu respectivo número de passadas. As amostras cujo material havia sido fragmentado com o rolo liso foram denominadas de RL5, RL10 e RL15 e as amostras coletadas após as passadas do rolo pé-de-carneiro foram chamadas de RC5, RC10 e RC15, respectivamente. A Figura 3.6 apresenta o aspecto do material resultante da fragmentação com o rolo pé-de-carneiro por 15 passadas.

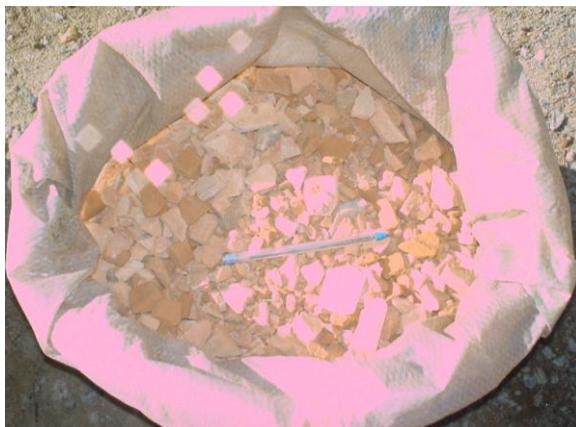


Figura 3.6 - Material cerâmico após a fragmentação com 15 passadas do rolo pé-de-carneiro

3.1.2 Granulometria do material cerâmico

A análise granulométrica do material resultante da fragmentação dos cacos de tijolos e telhas foi realizada através do processo de peneiramento para a fração grossa (partículas com diâmetro $\geq 0,074\text{mm}$) e sedimentação para a fração fina (partículas com diâmetro $< 0,074\text{mm}$).

Para a realização do Ensaio de Granulometria, o material cerâmico foi separado de acordo com o tipo de material e tipo de equipamento utilizado na sua fragmentação. As amostras foram divididas em cacos de tijolos e cacos de telhas e, em materiais fragmentados com o rolo pé-de-carneiro e o rolo liso. Esta divisão é apresentada no fluxograma da Figura 3.7 e obedece aos mesmos critérios e número de amostras para os dois tipos de materiais cerâmicos.

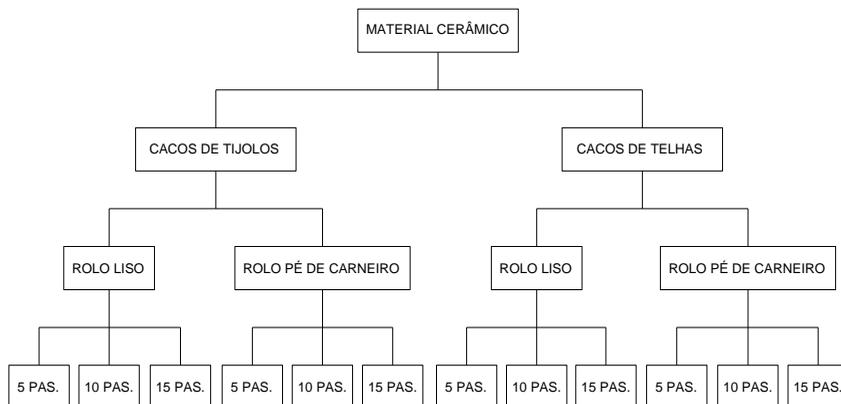


Figura 3.7 - Amostras de material cerâmico submetidas ao Ensaio de Granulometria

3.2 SOLO

Os solos utilizados nesta pesquisa foram coletados em três jazidas diferentes, que estão localizadas em municípios da região de Tubarão e Criciúma. As amostras foram coletadas em jazidas em exploração ou jazidas com bom potencial para serem exploradas, cujos materiais são típicos do subleito e das camadas de reforço, sub-base e base dos pavimentos locais. A opção de trabalhar com mais de um tipo de solo nas misturas com agregado tem o objetivo de avaliar o desempenho do material cerâmico quando misturado com solos de diferentes propriedades.

As jazidas utilizadas estão localizadas nos municípios de Gravatal, Tubarão e Criciúma. A jazida de Gravatal está situada na Rua Luiz Tomé dos Santos a 350 metros das margens da Rodovia SC-438, no km 202, próximo ao trevo de acesso ao Bairro Riacho. Esta jazida está localizada nas coordenadas 22J 0692626 e UTM 6863673 (Figura 3.8).

A jazida de Tubarão está situada na Estrada Geral municipal para a localidade de Congonhas, próximo ao trevo de acesso ao Morro das Antenas no Bairro Congonhas. Esta jazida está localizada nas coordenadas 22J 0695290 e UTM 6843366 e se encontra a 200 metros da estrada geral (Figura 3.9). O material desta jazida foi estudado por Higashi (2006) em seu trabalho sobre a ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental.

A jazida de Criciúma está situada na Rua Alexandre Beloli, no Bairro Primeira Linha, próxima ao trevo de interseção com a Rodovia Jorge Lacerda (Figura 3.10). Esta jazida se encontra às margens da rua e está localizada nas coordenadas 22J 0656503 e UTM 6822050.



Figura 3.8 – Jazida de Gravatal

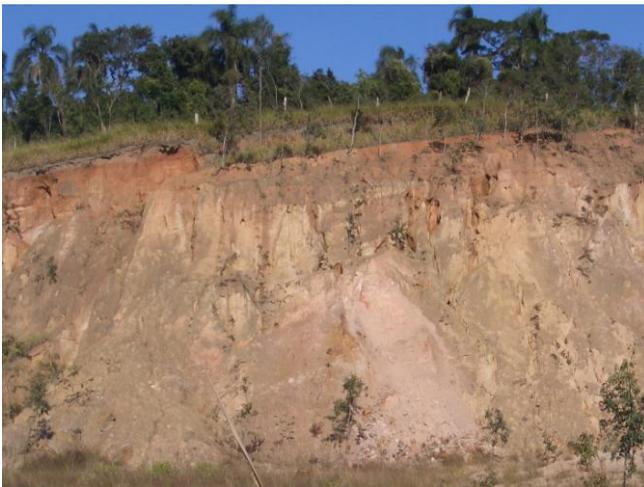


Figura 3.9 – Jazida de Tubarão



Figura 3.10 – Jazida de Criciúma

3.2.1 Caracterização dos solos

Para a realização dos ensaios em laboratório para a caracterização dos materiais coletou-se, aproximadamente, 300 kg de cada tipo de solo. A caracterização foi realizada através de ensaios de Granulometria, Compactação e CBR, Limites de Atterberg (LL e LP), além do Ensaio das Pastilhas para identificação expedita do grupo MCT.

3.3. MISTURAS DE SOLO COM MATERIAL CERÂMICO

O principal objetivo desta pesquisa é a determinação de uma mistura envolvendo solo e material cerâmico para a utilização em obras de pavimentação. Por isso, foram realizadas várias tentativas de dosagens dos materiais envolvidos. Tendo em vista a grande variação de possíveis dosagens entre os materiais utilizados e a conseqüente quantidade de amostras e ensaios a serem realizados, optou-se por estabelecer apenas três misturas, cujas proporções em peso estão apresentadas na Tabela 3.1. Estas misturas foram realizadas para os três tipos de solos e para os dois tipos de material cerâmico, fragmentados por 15 passadas do rolo pé-de-carneiro.

Tabela 3.1 – Composições das misturas de solo e material cerâmico e nomenclatura

Jazida de solo	Composição da mistura (%)		Nomenclatura da mistura	
	Solo	Mat. cerâmico	Tijolo	Telha
Gravatal	70	30	GTI73	GTE73
	50	50	GTI55	GTE55
	30	70	GTI37	GTE37
Tubarão	70	30	TTI73	TTE73
	50	50	TTI55	TTE55
	30	70	TTI37	TTE37
Criciúma	70	30	CTI73	CTE73
	50	50	CTI55	CTE55
	30	70	CTI37	CTE37

As propriedades destas misturas foram avaliadas através de ensaios de Granulometria, Compactação, CBR e Módulo de Resiliência.

3.3.1 Ensaio de granulometria

As misturas solo-agregado foram divididas em misturas de solo com cacos de tijolos e misturas de solo com cacos de telhas. Para cada tipo de solo foram realizadas as misturas conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.11.

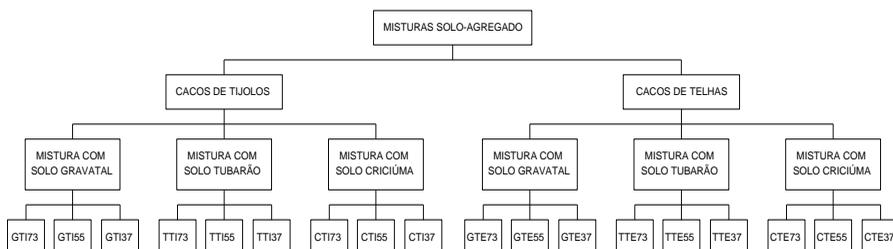


Figura 3.11 – Misturas solo-agregado submetidas ao ensaio de granulometria

3.3.2 Ensaio de compactação e CBR

Os ensaios de Compactação e CBR foram realizados com todas as misturas construídas para a pesquisa. A compactação foi executada utilizando a energia Proctor Intermediária.

Os ensaios de Compactação e CBR foram executados com as amostras de solo e com as amostras nas quais foi realizado o ensaio de granulometria, ou seja, as misturas solo-agregado compostas por cacos de tijolos e telhas (Figura 3.11).

3.3.3 Ensaio de módulo de resiliência

A determinação do módulo de resiliência dos solos granulares e coesivos foi realizada segundo a norma DNER-ME 131/94 – “Solo – Determinação do Módulo de Resiliência” (DNER, 1994), a partir dos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, com instrumentação interna à câmara triaxial.

O Módulo de Resiliência foi determinado para as amostras de solo e para as amostras de misturas entre solo e material cerâmico. O ensaio triaxial de cargas repetidas foi realizado em 14 amostras, selecionadas de acordo com o tipo de material cerâmico e de solo utilizado. Os ensaios foram efetuados nas amostras de solo das jazidas de Tubarão e Criciúma e nas respectivas misturas realizadas com material cerâmico, conforme mostrado na Figura 3.12.

As amostras de solo coletado na jazida de Gravatal não foram ensaiadas devido à dificuldade encontrada na moldagem dos corpos de prova, haja vista, as suas características de material arenoso. Este solo foi submetido apenas a ensaios de compactação e CBR.

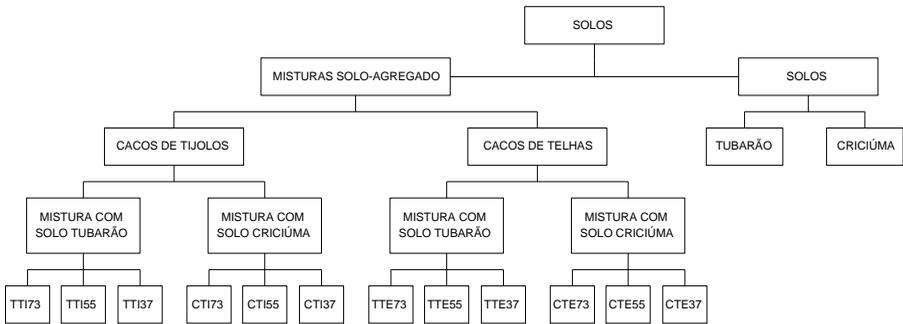


Figura 3.12 – Amostras utilizadas para ensaios de Módulo de Resiliência

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de granulometria, compactação, CBR e módulo de resiliência realizados nas amostras de solo e misturas com material cerâmico utilizadas nesta pesquisa.

Como forma de resumir as informações contidas neste capítulo e facilitar a interpretação das mesmas optou-se por agrupar os principais dados e resultados obtidos nesta pesquisa em quadros apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Pode-se verificar, com base nos dados apresentados verifica-se que os solos selecionados possuem características granulométricas grossa, média e fina. Isto permite uma avaliação mais ampla dos efeitos da estabilização granulométrica obtida pela adição de cacos de tijolo e telha.

Tabela 4.1 – Principais dados das amostras de solo

Solo	Índices Físicos				δ (g/cm ³)	Classificação		CBR (%)	Exp. (%)
	LL (%)	LP (%)	IP (%)			HRB	MCT Pastilhas		
Gravatal	28	23	5		2,664	A-1	NA-NS'	22	0
Tubarão	39	38	1		2,696	A-4	NS'-NA'	7	2,59
Cricúma	48	43	5		2,701	A-5	NG'	11	2,57

Tabela 4.2 – Dados dos materiais cerâmicos

Material cerâmico	Densidade real dos grãos (g/cm ³)	Absorção (%)
Cacos de tijolo	2,845	17
Cacos de telha	2,612	16

Tabela 4.3 – Principais dados e resultados das misturas de solo com cacos cerâmicos fragmentados
(*continua*)
por 15 passadas do rolo pé-de-carneiro

Solo	Amostra	Dosagem (%) (solo-agregado)	Energia de Compactação	w _{ótima} (%)	$\rho_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Exp. (%)	M _R (MPa)
	Solo 1	100% solo	Intermediária	6,80	1,980	22	0	-
	GTT73	70 solo – 30 tijolo	Intermediária	12,9	1,784	31	0	-
	GTT55	50 solo – 50 tijolo	Intermediária	16,0	1,672	36	0	-
	GTT37	30 solo – 70 tijolo	Intermediária	17,5	1,596	38	0	-
	GTE73	70 solo – 30 telha	Intermediária	11,5	1,887	46	0	-
	GTE55	50 solo – 50 telha	Intermediária	12,5	1,801	39	0	-
	GTE37	30 solo – 70 telha	Intermediária	14,4	1,754	34	0	-
	Solo 2	100% solo	Intermediária	14,0	1,721	7	2,59	M _R = 39,425 $\sigma_d^{-0,2455}$ (R ² = 0,7902)
	TTT73	70 solo – 30 tijolo	Intermediária	15,0	1,679	34	0,72	M _R = 61,303 $\sigma_d^{-0,1384}$ (R ² = 0,4634)
	TTT55	50 solo – 50 tijolo	Intermediária	18,0	1,601	28	0,61	M _R = 70,849 $\sigma_d^{-0,0338}$ (R ² = 0,0919)
	TTT37	30 solo – 70 tijolo	Intermediária	20,8	1,544	30	0,63	M _R = 109,12 $\sigma_d^{0,0804}$ (R ² = 0,2937)
	TTE73	70 solo – 30 telha	Intermediária	13,5	1,737	24	0,07	M _R = 83,922 $\sigma_d^{-0,1612}$ (R ² = 0,6157)
	TTE55	50 solo – 50 telha	Intermediária	13,5	1,695	32	0,11	M _R = 250,02 $\sigma_d^{0,1128}$ (R ² = 0,259)
	TTE37	30 solo – 70 telha	Intermediária	13,2	1,699	36	0,15	M _R = 267,74 $\sigma_d^{0,2189}$ (R ² = 0,5653)

Solo	Amostra	Dosagem (%) (solo-agregado)	Energia de Compactação	$w_{\text{ótima}}$ (%)	$\rho_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Exp. (%)	M_R (MPa)
	Solo 3	100% solo	Intermediária	17,5	1,441	11	2,57	$M_R = 99,046 \sigma_d^{-0,1133}$ ($R^2 = 0,9262$)
	CTI73	70 solo – 30 tijolo	Intermediária	23,2	1,519	31	0,11	$M_R = 88,796 \sigma_d^{-0,0687}$ ($R^2 = 0,0621$)
	CTI55	50 solo – 50 tijolo	Intermediária	24,0	1,523	28	0,88	$M_R = 140,49 \sigma_d^{-0,1186}$ ($R^2 = 0,9322$)
Criciúma	CTI37	30 solo – 70 tijolo	Intermediária	23,0	1,500	33	0,50	$M_R = 119,03 \sigma_d^{-0,0391}$ ($R^2 = 0,4192$)
	CTE73	70 solo – 30 telha	Intermediária	23,0	1,556	24	0,78	$M_R = 37,91 \sigma_d^{-0,436}$ ($R^2 = 0,971$)
	CTE55	50 solo – 50 telha	Intermediária	22,8	1,561	17	0,15	$M_R = 85,838 \sigma_d^{-0,2041}$ ($R^2 = 0,6317$)
	Solo 3	100% solo	Intermediária	17,5	1,441	11	2,57	$M_R = 99,046 \sigma_d^{-0,1133}$ ($R^2 = 0,9262$)

4.1 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O ensaio de granulometria foi utilizado para a caracterização do material cerâmico, dos solos e das misturas solo-agregado. No caso das misturas solo-agregado, foram realizados ensaios com amostras antes e após o ensaio de compactação com o objetivo de verificar a eventual quebra de grãos, provocada pelos golpes de soquete. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Solos da Universidade do Sul de Santa Catarina, UNISUL, localizado no Campus de Tubarão.

4.1.1 Granulometria dos materiais cerâmicos

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas de granulométricas dos cacos de tijolos após a fragmentação com o rolo liso e com o rolo pé-de-carneiro e a Tabela 4.4 as respectivas distribuições granulométricas.

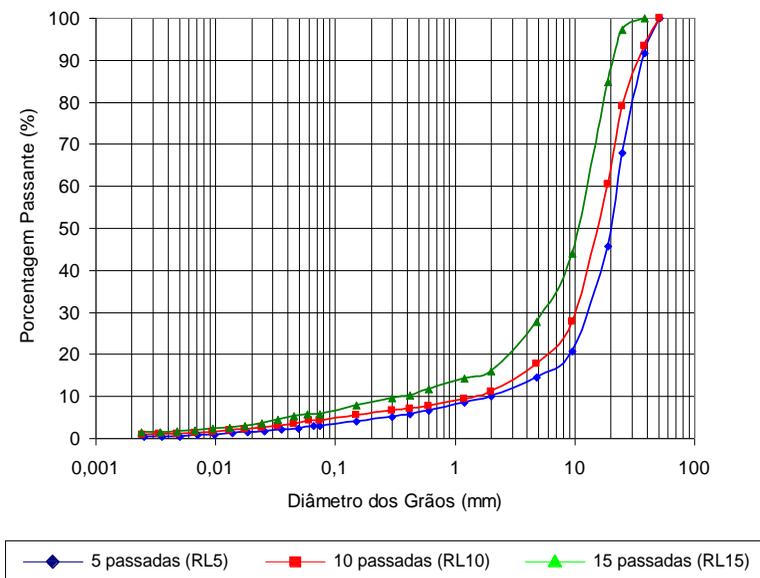


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos cacos de tijolos fragmentados obtidas pela variação do número de passadas de rolo liso

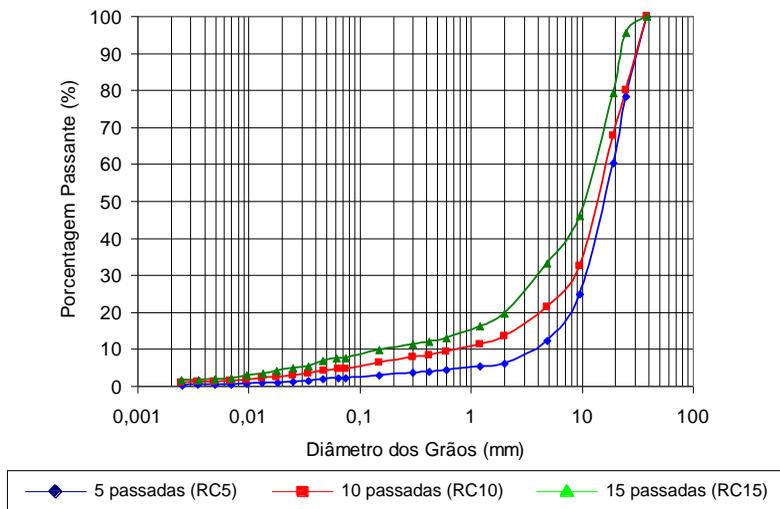


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos cacos de tijolos fragmentados obtidas pela variação do número de passadas de rolo pé-de-carneiro

Tabela 4.4 – Distribuição granulométrica dos cacos de tijolo fragmentados pelos rolos liso e pé-de-carneiro x número de passadas

Peneira (mm)	Porcentagem Passante					
	Fragmentação rolo liso			Fragmen. rolo pé-de-carneiro		
	RL5	RL10	RL15	RC5	RC10	RC15
50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
38,1	91,6	93,3	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	68,0	78,9	97,3	78,3	80,1	95,5
19	45,8	60,4	84,8	60,2	67,7	79,2
9,5	20,8	27,8	44,0	24,8	32,5	46,0
4,8	14,5	17,7	27,9	12,4	21,5	33,3
2	10,0	11,0	16,0	6,1	13,6	19,8
1,2	8,6	9,4	14,3	5,3	11,4	16,3
0,6	6,6	7,7	11,7	4,3	9,2	13,1
0,42	5,7	7,0	10,3	3,9	8,3	12,0
0,3	5,1	6,6	9,6	3,6	7,8	11,3
0,15	4,1	5,6	7,9	3,0	6,4	9,8
0,074	3,0	4,2	5,9	2,2	4,8	7,5

Analisando os resultados dos ensaios de granulometria realizados nos cacos de tijolo verifica-se uma semelhança entre as distribuições granulométricas dos materiais fragmentados com o rolo pé-de-carneiro e dos materiais fragmentados com o rolo liso.

Através de uma análise nas curvas granulométricas pode-se perceber que a diferença na porcentagem de material passante é significativa nas peneiras com abertura superior a 4,8 mm, principalmente no material fragmentado com o rolo liso. Na peneira 1” a porcentagem passante foi de aproximadamente 68% com 5 passadas do rolo liso, enquanto que com 15 passadas este valor foi elevado para mais de 97%, ou seja, uma diferença de percentual de quase 30%. Para o material fragmentado com o rolo pé-de-carneiro a diferença de percentual entre as curvas granulométricas, 5 e 15 passadas, foi um pouco menor, cerca de 19% na peneira 19 mm. No entanto, as quantidades de material passante foram superiores ao material fragmentado com o rolo liso na maioria das peneiras, de onde se pode concluir que o rolo pé-de-carneiro proporciona uma maior trituração do material cerâmico.

Nas peneiras com abertura inferior a 4,8 mm as diferenças de porcentagem de material passante para as curvas 5 e 15 passadas são menores, não ultrapassando 14%, na peneira 2 mm para o material fragmentado com o rolo pé-de-carneiro.

Na peneira nº 200, a porcentagem de material passante pode ser considerada baixa, sendo que a maior quantidade foi observada no material fragmentado por 15 passadas. Este valor variou entre 6%, para o material fragmentado pelo rolo liso, e 7,5% para material fragmentado pelo rolo pé-de-carneiro. Diante dos resultados apresentados pode-se constatar que os rolos compactadores realizam uma maior fragmentação nos cacos de tijolo com diâmetro mais elevado.

Os resultados dos ensaios de granulometria realizados com amostras de cacos de telhas são apresentados nas curvas de granulométricas das Figuras 4.3 e 4.4. Na Tabela 4.5 estão relacionadas as respectivas distribuições granulométricas.

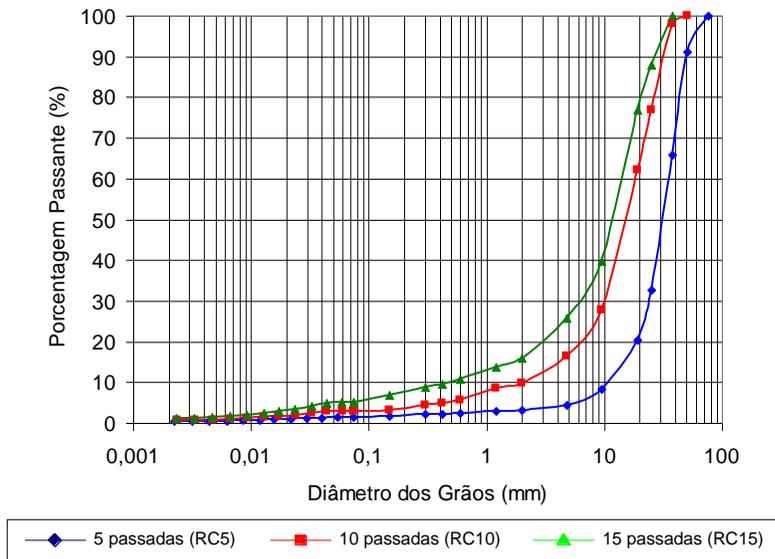


Figura 4.3 – Curvas granulométricas dos cacos de telhas fragmentados pela variação do número de passadas do rolo liso

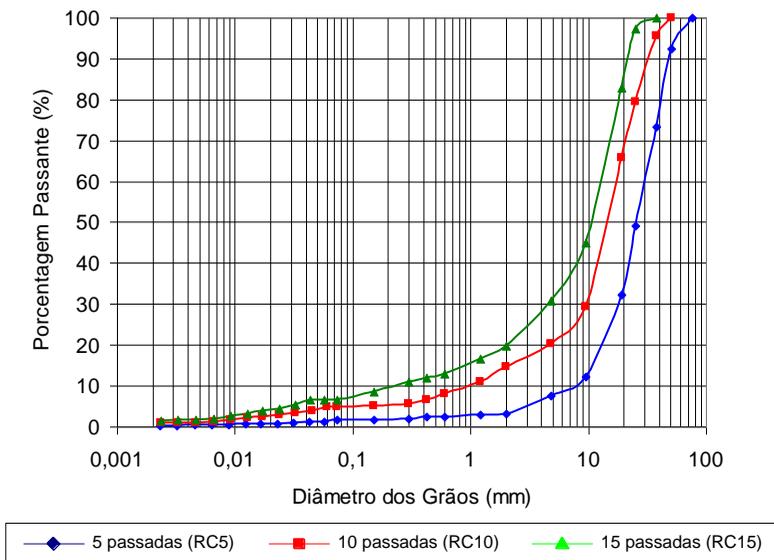


Figura 4.4 – Curvas granulométricas dos cacos de telhas fragmentados pela variação do número de passadas do rolo pé-de-carneiro

Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica dos cacos de telha fragmentados pelos rolos liso e pé-de-carneiro x número de passadas

Peneira (mm)	% Passante					
	Fragmentação rolo liso			Fragm. rolo pé-de-carneiro		
	RL5	RL10	RL15	RC5	RC10	RC15
76,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,8	91,2	100,0	100,0	92,3	100,0	100,0
38,1	65,9	97,9	100,0	73,3	95,6	100,0
25,4	32,7	76,8	87,9	49,2	79,5	97,3
19	20,5	62,1	76,8	32,2	65,6	82,9
9,5	8,2	27,6	39,7	12,2	29,3	45,0
4,8	4,5	16,5	25,8	7,6	20,4	30,9
2	3,2	9,9	15,9	3,1	14,6	19,9
1,2	2,8	8,5	13,8	2,8	11,0	16,6
0,6	2,4	5,7	10,7	2,5	8,1	13,0
0,42	2,2	4,9	9,5	2,3	6,6	11,9
0,3	2,1	4,3	8,8	2,0	5,7	10,9
0,15	1,8	3,2	6,9	1,8	5,1	8,6
0,074	1,5	3,0	5,2	1,7	4,8	6,5

A distribuição granulométrica dos cacos de telha após a fragmentação com os rolos compactadores é semelhante à distribuição granulométrica dos cacos de tijolo, porém, verifica-se que a diferença entre as curvas granulométricas, para 5 e 15 passadas dos rolos compactadores, é maior que nas distribuições dos cacos de tijolo. Isto significa que a fragmentação é maior com o uso do rolo pé-de-carneiro.

Para este material a diferença na granulometria das amostras também é mais evidente nas peneiras com abertura superior a 4,8 mm, o que caracteriza a melhor eficiência da fragmentação entre os cacos com diâmetro maior. Na peneira 19 mm a porcentagem passante foi de aproximadamente 20,5% com 5 passadas do rolo liso, enquanto que com 15 passadas este valor foi elevado para aproximadamente 77%, ou seja, uma diferença de percentual superior a 56%.

Para o material fragmentado com o rolo pé-de-carneiro a diferença entre as curvas granulométricas, 5 e 15 passadas, também foi um pouco menor que a diferença apresentada pelo material fragmentado com o rolo liso, porém, permanecendo ainda, superior à diferença apresentada pelas

curvas granulométricas dos cacos de tijolo. Na peneira 19 mm a porcentagem passante foi de 32% com 5 passadas do rolo liso, enquanto que com 15 passadas este valor foi elevado para mais de 82%, uma diferença de percentual superior a 50%.

As quantidades de material passante na peneira nº 200 foram semelhantes aos valores observados nas amostras de cacos de tijolo, porém com uma pequena redução. A maior quantidade de material passante nesta peneira foi visualizada no material fragmentado com rolo pé-de-carneiro, que apresentou 6%.

Através da distribuição granulométrica dos cacos de telha verifica-se que, assim como o ocorrido com os cacos de tijolos, a porcentagem passante do material fragmentado com o rolo pé-de-carneiro é maior que a do material fragmentado com o rolo liso. Diante disto, pode-se concluir que o rolo pé-de-carneiro proporciona uma maior fragmentação do material cerâmico que o rolo liso.

Verifica-se, ainda, que os grãos com diâmetro superior a 19 mm apresentam uma maior trituração após as passagens do rolo liso do que após as passagens do rolo pé-de-carneiro. Isto pode ser explicado pelo fato do formato liso da chapa proporcionar uma carga distribuída sobre a camada de material cerâmico, fragmentando os cacos de forma homogênea. Por outro lado, os grãos com diâmetro inferior a 9,5 mm possuem uma fragmentação maior após as passagens do rolo pé-de-carneiro, pois as “patas” deste rolo proporcionam uma carga concentrada sobre os cacos cerâmicos, triturando-os em pontos isolados com mais eficiência.

Com base nos resultados do ensaio de granulometria concluiu-se que o método de fragmentação mais eficiente foi o de 15 passadas do rolo pé-de-carneiro. Como forma de minimizar o número de variáveis deste trabalho e facilitar a execução dos demais ensaios de laboratório optou-se por utilizar no decorrer desta pesquisa apenas o material cerâmico fragmentado com o rolo pé-de-carneiro nas misturas com solo.

Um dos objetivos desta pesquisa foi utilizar resíduos de cerâmica vermelha nas misturas com solo, independente se estes forem cacos de tijolos ou cacos de telhas. Tendo em vista as informações apresentadas, pode-se afirmar que uma possível mistura entre os dois tipos de material cerâmico pode ser utilizada, sem nenhuma restrição. A utilização desta mistura se torna uma alternativa interessante, tendo em vista o aumento da quantidade de resíduos reaproveitados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A caracterização foi realizada através de ensaios de Granulometria, Compactação e CBR, além do Ensaio das Pastilhas, necessário para a classificação expedita do grupo MCT, e dos Limites de Atterberg (LL e LP), necessários para a classificação HRB.

4.2.1 Massa específica e limites de Atterberg

Os procedimentos adotados para a determinação da massa específica dos solos foram executados segundo a NBR 6508 (1984) – “Determinação da Massa Específica”. A determinação dos limites de Atterberg foi realizada seguindo os procedimentos descritos nas normas NBR 6490 (1984) – “Solo – Determinação do Limite de Liquidez” e NBR 7180 (1984) – “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade”.

4.2.2 Ensaio de granulometria

A análise granulométrica dos solos foi executada através do ensaio de Sedimentação, sendo que, foi utilizado como dispersor, uma solução de hexametáfosfato de sódio, que tem por objetivo separar eventuais aglomerações entre partículas. Este produto atua fornecendo cargas negativas às partículas, mantendo-as separadas e impedindo novas aglomerações. Na Figura 4.5 estão apresentadas as curvas granulométricas dos três solos estudados e na Tabela 4.6 os respectivos resultados do ensaio de granulometria.

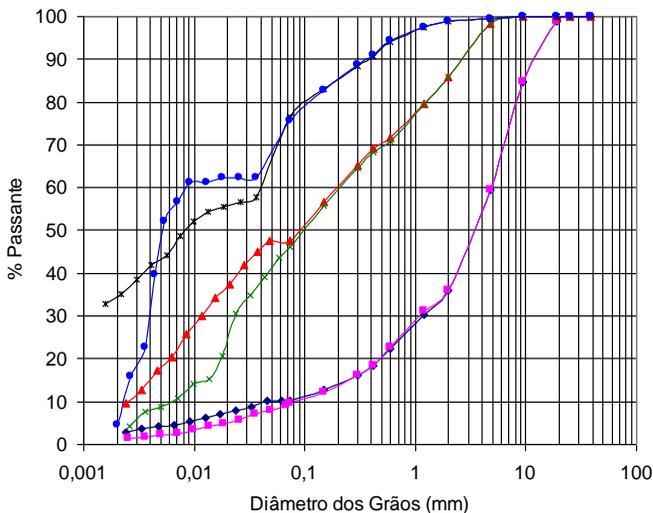


Figura 4.5 – Curvas granulométricas dos três solos

Tabela 4.6 - Distribuição granulométrica dos três solos

Classificação	Solo Gravatal		Solo Tubarão		Solo Criciúma	
	Com defl.	Sem defl.	Com defl.	Sem defl.	Com defl.	Sem defl.
Pedregulho	40,39	40,39	1,80	1,81	0,58	0,58
Areia Grossa	23,75	23,75	12,27	12,33	0,67	0,67
Areia Média	17,32	17,37	16,82	17,47	8,04	7,81
Areia Fina	8,33	8,93	21,61	22,29	14,35	15,24
Silte	6,01	7,38	30,35	37,39	37,75	52,99
Argila	4,21	2,18	17,16	8,71	38,61	22,71

Através da análise dos resultados do ensaio de granulometria pode-se perceber a diferença entre a distribuição granulométrica dos três tipos de solo. São materiais com granulometrias distintas, entre os quais, os solos de Gravatal e Tubarão se destacam pela quantidade de areia e o solo de Criciúma pela quantidade de silte.

Na peneira 9,5 mm os solos de Tubarão e Criciúma possuem 100% de material passante, enquanto, aproximadamente 85% do solo de Gravatal.

É observada também uma diferença na fração mais fina dos solos. Enquanto no solo de Gravatal apenas 10% do material passa na peneira nº 200, nos solos das jazidas de Tubarão e Criciúma este valor é bem mais elevado, cerca de 47% e 76% respectivamente.

A Tabela 4.6 mostra que pelo fato de possuírem uma grande quantidade de material fino em sua composição, os solos de Tubarão e Criciúma se comportam de forma semelhante à solução defloculante. Verifica-se que nestes solos, onde é grande a fração de material com diâmetro inferior a 0,074 mm, ocorre uma maior alteração no formato das curvas granulométricas, enquanto no solo de Gravatal, onde a porcentagem de material passante da peneira nº 200 é pequena, as duas curvas permanecem próximas.

Com relação às distribuições granulométricas dos solos conclui-se que os materiais das jazidas de Tubarão e Criciúma, devido as suas granulometrias mais finas, tendem a apresentar um melhor comportamento nas misturas solo-agregado, haja vista, que estes podem realizar um melhor envolvimento dos agregados cerâmicos, protegendo-os das tensões atuantes nas misturas.

4.2.3 Ensaio do método MCT e classificações dos solos

Nesta pesquisa foi realizado o Método das Pastilhas para a identificação expedita do grupo MCT. De acordo com os resultados obtidos, o solo coletado na Jazida de Gravatal apresentou uma classificação NA-NS'. De acordo com Nogami e Villibor (1995) os solos compreendidos no grupo NA são areias, siltes não lateríticos e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. As areias e siltes quartzosos não são expansivos ou muito pouco expansivos, ao passo que as variedades micáceas podem ser altamente expansivas. Quando compactados, possuem capacidade de suporte de pequena a média e, geralmente, são muito erodíveis. O grupo NS' compreende sobre tudo os solos saprolíticos silto-arenosos peculiares. Esses solos caracterizam-se por ter, quando compactados na umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, baixa capacidade de suporte quando imersos em água, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade, elevada expansibilidade (porém baixa pressão de expansão) e elevado coeficiente de sorção e permeabilidade média. Em suas condições naturais, apresentam geralmente baixa massa específica aparente seca, podem ser colapsíveis e

ter baixa capacidade de suporte. Nos taludes de cortes, predominam variedades com erodibilidade de média a elevada.

Segundo a metodologia de classificação de solos proposta pela HRB, o solo de Gravatal pode ser classificado como um solo do tipo A-1 e possui um índice de grupo (IG) igual a zero. Se trata de um solo granular que possui uma porcentagem de material passante na peneira nº 200 menor que 35%.

O solo coletado na Jazida de Tubarão apresentou uma classificação NS'-NA'. Segundo Nogami e Villibor (1995) os solos compreendidos no grupo NA', granulometricamente, são misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades similares) com finos passando na peneira de 0,075mm, de comportamento não laterítico. Quando a areia for bem graduada e a natureza e porcentagem de finos obedecerem às condições estipuladas tradicionalmente, podem apresentar propriedades adequadas para utilização como bases de pavimentos. Recomenda-se, pois, que se determine sua capacidade de suporte e suas características expansivas, mesmo de maneira expedita, na ocasião de sua classificação. Muitas de suas variedades podem ser excessivamente expansivas, muito resilientes, ou ainda, muito sujeitas à erosão hidráulica.

O material proveniente da Jazida de Tubarão apresentou um índice de grupo (IG) igual a 2,5 e, também, pode ser considerado como um bom material, de acordo com a classificação da HRB. Este material pode ser classificado como um solo do tipo A-4, ou seja, um solo fino que possui uma porcentagem de material passante na peneira nº 200 maior que 35%.

O solo coletado na Jazida de Criciúma apresentou, segundo a metodologia MCT, uma classificação NG'. De acordo com Nogami e Villibor (1995) Os solos típicos do grupo NG' compreendem, sobretudo, os saprolíticos argilosos, que derivam de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos) ou cristalinas, pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. Quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. Do ponto de vista da resiliência, apresentam, quando compactados, características bilineares em função da tensão desvio, sendo pouco dependentes da pressão de confinamento. O emprego dos solos desse grupo se prende às restrições conseqüentes das suas elevadas expansibilidade, plasticidade, compressibilidade e contração, quando submetidos à secagem.

Segundo a metodologia proposta pela HRB, o solo coletado na Jazida de Criciúma pode ser classificado como um solo do tipo A-5, ou seja, um solo fino que possui uma porcentagem de material passante na

peneira nº 200 maior que 35%. Este material obteve um índice de grupo (IG) igual a 9,7 e pode ser considerado como um material de qualidade regular para fins de pavimentação, principalmente, quando comparado com os materiais das jazidas de Gravatal e Tubarão.

4.2.4 Ensaios de compactação e CBR

O Ensaio de Compactação, realizado de acordo com a NBR 7182/84 (ABNT, 1986), possibilita a obtenção da correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia. Este ensaio foi realizado nos três tipos de solos utilizando a energia Proctor Intermediária para a obtenção de 5 pontos da curva de compactação. Através deste gráfico pôde-se determinar a umidade ótima de compactação.

O Ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) foi realizado de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 1987) e foi desenvolvido para avaliar os materiais utilizados nas camadas de base e sub-base, além do subleito. Este ensaio também foi realizado nos três tipos de solos utilizando amostras compactadas na energia correspondente ao Proctor Intermediário.

Os Ensaios de CBR e Compactação foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade do Sul de Santa Catarina, UNISUL, localizado no Campus de Tubarão.

As curvas de compactação e CBR das amostras de solo são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4.6 e 4.7, e na Tabela 4.7 estão relacionados os valores de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, CBR e expansão obtidas para cada tipo de solo.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de Compactação e CBR dos três tipos de solo

Material	Massa Esp. Real Grãos (g/cm ³)	W _{ótima} (%)	γ _{máx} (g/cm ³)	CBR (%)	Exp.
Gravatal	2,664	6,80	1,980	22	0
Tubarão	2,696	14,0	1,721	7	2,59
Criciúma	2,701	17,5	1,441	11	2,57

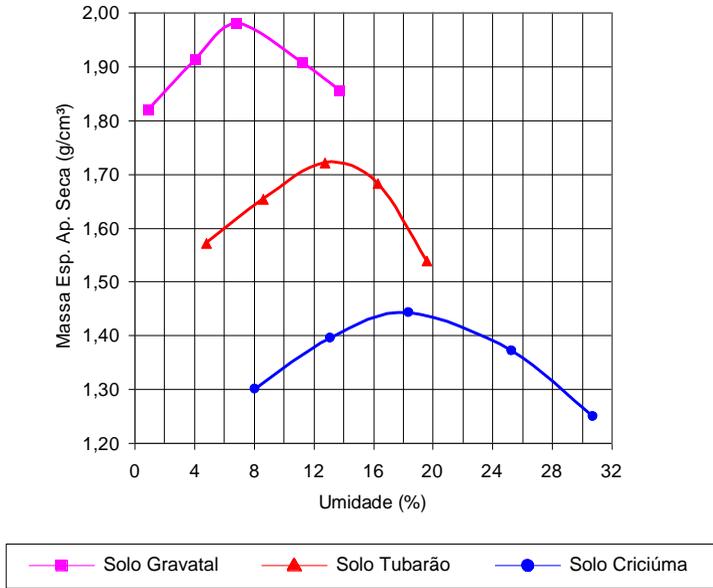


Figura 4.6 – Curvas de compactação dos três solos na energia intermediária

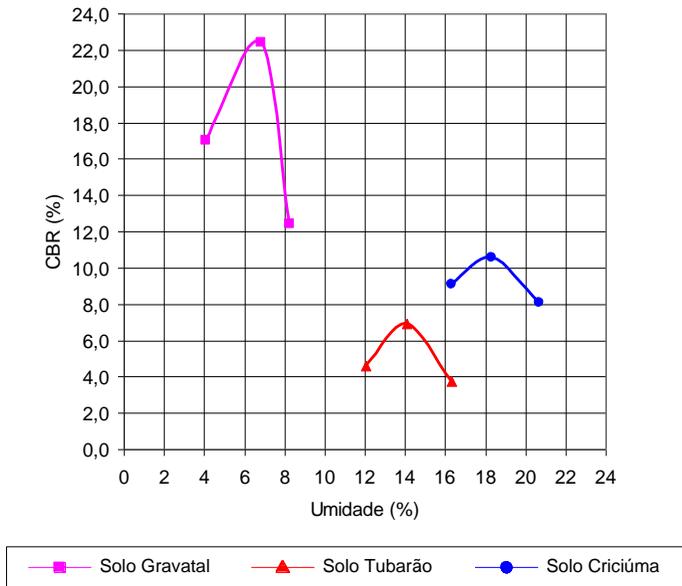


Figura 4.7 – Curvas de CBR dos três solos na energia intermediária

Com base nos resultados apresentados pode-se perceber a diferença entre as propriedades físicas dos três tipos de solo. Os solos apresentam valores de umidade ótima, massa específica e CBR bem distintos uns dos outros. O solo de Gravatal é um material bastante granular, enquanto os solos de Tubarão e Criciúma se apresentam com uma granulometria mais fina.

O solo de Criciúma, que possui uma umidade ótima de 17,5%, possui cerca de 73% de material passante na peneira nº 200, enquanto o solo coletado em Gravatal, que possui apenas 10% de material passante na peneira nº 200, apresenta uma umidade ótima de 6,8%.

Quando analisada a utilização destes materiais em obras de pavimentação verifica-se que o solo de Gravatal é o que possui as melhores características, apresentando uma alta densidade, baixa umidade ótima e um elevado valor de CBR. Os solos de Tubarão e Criciúma possuem qualidades inferiores ao solo de Gravatal, porém, apresentam valores de massa específica e CBR médios. O ponto negativo para a utilização destes materiais em obras rodoviárias é o elevado valor da expansão, que ultrapassa 2%, que é o limite máximo recomendado para subleito de rodovias.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ENTRE SOLO E MATERIAL CERÂMICO

A caracterização destas misturas foi realizada através de ensaios de Granulometria, Compactação, CBR e Módulo de Resiliência.

4.3.1 Ensaio de granulometria

Os resultados dos Ensaios de Granulometria foram divididos em misturas envolvendo cacos de tijolo (Figura 4.8) e misturas com cacos de telha (Figura 4.9). Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados dos ensaios.

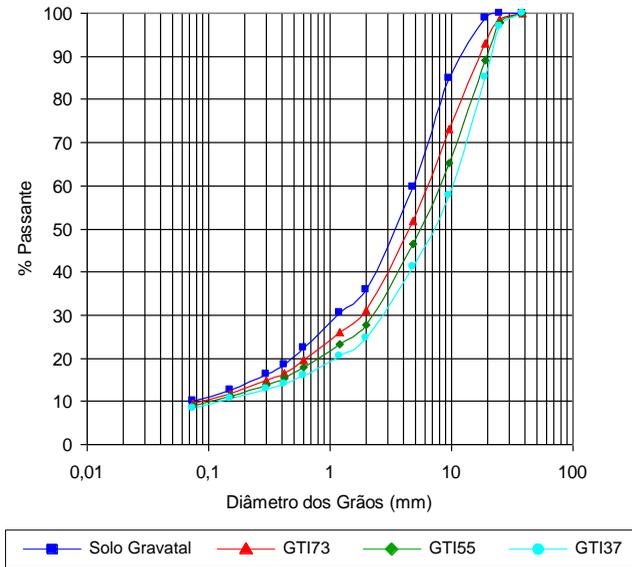


Figura 4.8 – Curvas granulométricas das misturas entre cacos de tijolo e solo de Gravatal

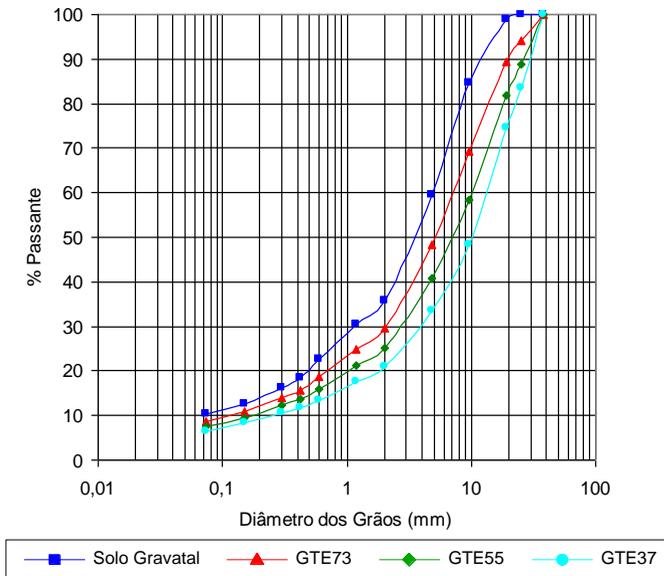


Figura 4.9 – Curvas granulométricas das misturas entre cacos de telha e solo de Gravatal

Tabela 4.8 – Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Gravatal

Peneira (mm)	% Passante					
	GTI73	GTI55	GTI37	GTE73	GTE55	GTE37
38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	98,6	97,7	96,8	94,2	88,8	83,4
19	93,0	89,1	85,1	89,4	81,8	74,6
9,5	73,1	65,4	57,6	69,1	58,4	48,4
4,8	51,7	46,4	41,2	48,4	40,7	33,6
2	31,0	27,8	24,6	29,5	25,1	20,9
1,2	26,2	23,3	20,5	24,9	21,1	17,6
0,6	19,7	17,8	15,9	18,6	15,9	13,5
0,42	16,6	15,3	13,9	15,7	13,7	11,8
0,3	14,8	13,8	12,8	13,9	12,2	10,6
0,15	11,8	11,2	10,6	10,8	9,5	8,3
0,074	9,5	8,9	8,3	8,6	7,5	6,5

Através da análise das curvas apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10 pode-se perceber uma semelhança entre a distribuição granulométrica dos seis tipos de misturas. Verifica-se que apesar da adição de material cerâmico as curvas permanecem com o mesmo formato da curva granulométrica do solo, alterando os percentuais passantes.

A semelhança entre as curvas granulométricas do solo e das misturas com material cerâmico pode ser atribuída à granulometria do solo que, devido à elevada quantidade de material graúdo, se assemelha com a granulometria dos cacos de tijolos e telhas após a fragmentação.

As misturas realizadas com cacos de telhas possuem um maior percentual de material retido nas peneiras que as misturas compostas por cacos de tijolos, pois são mais resistentes à fragmentação mais fina provocada pelas cargas do rolo compactador. Esta diferença na resistência dos cacos cerâmicos pode ser explicada pelo processo de fabricação da telha e do tijolo.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 são apresentadas as curvas granulométricas das misturas realizadas utilizando o solo de Tubarão e na Tabela 4.9 estão relacionados os respectivos percentuais passantes.

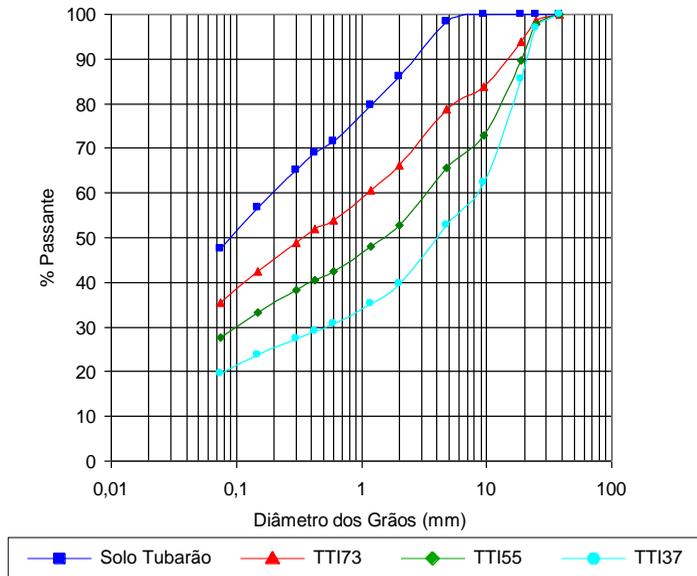


Figura 4.10 – Curvas granulométricas das misturas de cacos de tijolo e solo de Tubarão

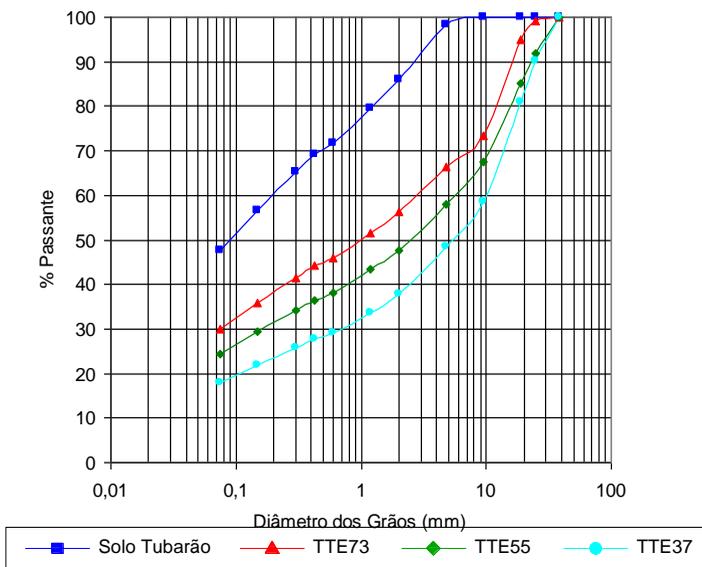


Figura 4.11 – Curvas granulométricas das misturas de cacos de telha e solo de Tubarão

Tabela 4.9 – Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Tubarão

Peneira (mm)	% Passante					
	TTI73	TTI55	TTI37	TTE73	TTE55	TTE37
38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	98,6	97,7	96,8	99,1	91,7	90,2
19	93,8	89,6	85,5	94,9	85,1	81,0
9,5	83,8	73,0	62,2	73,4	67,4	58,4
4,8	78,7	65,7	52,7	66,3	58,1	48,5
2	66,1	52,9	39,6	56,2	47,6	37,7
1,2	60,6	47,9	35,3	51,6	43,3	33,7
0,6	54,0	42,3	30,6	45,9	38,1	29,0
0,42	51,9	40,6	29,1	44,1	36,5	27,6
0,3	49,0	38,3	27,5	41,5	34,2	25,8
0,15	42,6	33,	23,8	35,9	29,4	21,9
0,074	35,5	27,5	19,5	29,9	24,3	17,9

Com base nos resultados apresentados verifica-se que as curvas granulométricas das misturas realizadas com o solo de Tubarão possuem um espaçamento entre si, ocasionado pela quantidade de material cerâmico envolvida na mistura e pela diferença entre a granulometria do solo e do material cerâmico. O solo de Tubarão possui uma granulometria com 47% de material passante na peneira 200, enquanto os cacos cerâmicos possuem uma granulometria com apenas 2% de material passante na mesma peneira. Quanto maior a quantidade de material cerâmico na mistura, maior a diferença no valor da porcentagem de material passante entre as misturas.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentadas as curvas granulométricas das misturas realizadas utilizando o solo de Criciúma e na Tabela 4.10 estão relacionados os respectivos percentuais passantes.

Tabela 4.10 – Distribuição granulométrica das misturas com o solo de Criciúma

Peneira (mm)	% Passante					
	CTI73	CTI55	CTI37	CTE73	CTE55	CTE37
38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	98,6	97,7	92,9	93,2	88,8	81,0
19	95,7	94,1	85,5	90,9	86,4	75,8
9,5	92,2	84,7	74,7	86,3	75,7	63,5
4,8	89,9	79,6	66,9	83,8	70,3	55,8
2	86,3	74,1	53,9	81,1	64,0	46,4
1,2	84,0	68,2	48,7	79,1	61,5	42,1
0,6	79,6	61,6	41,1	75,4	55,4	35,3
0,42	76,4	57,5	37,7	72,5	51,7	32,4
0,3	71,9	52,4	34,5	67,4	46,9	29,3
0,15	62,8	46,4	30,2	58,7	41,2	25,3
0,074	52,9	41,9	25,3	49,4	37,3	22,4

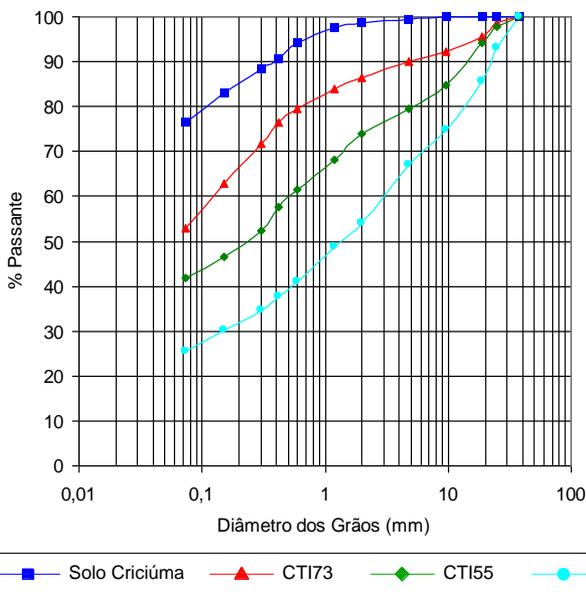


Figura 4.12 – Curvas granulométricas das misturas de cacos de tijolo e solo de Criciúma

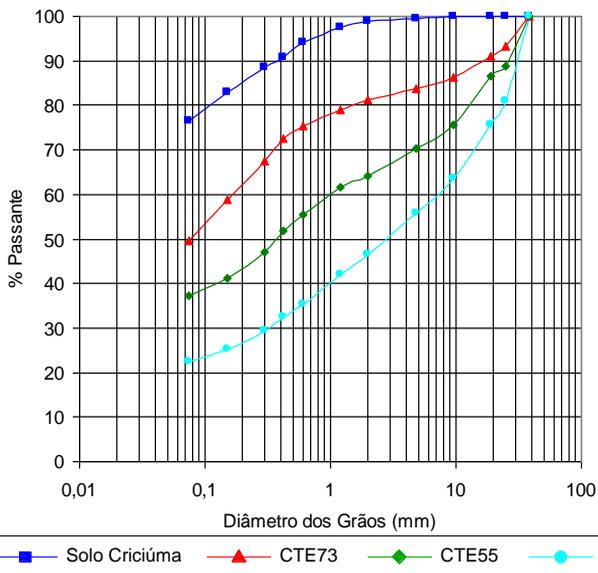


Figura 4.13 – Curvas granulométricas das misturas de cacos de telha e solo de Criciúma

De acordo com os resultados obtidos, pode-se perceber que as curvas granulométricas das misturas realizadas com o solo de Criciúma apresentam maiores variações na quantidade de material passante. Esta variação ocorre, assim como nas demais misturas, devido à quantidade de material cerâmico envolvida na mistura e pela diferença entre a granulometria do solo e do material cerâmico. O solo da jazida de Criciúma também possui 76% de material passante na peneira nº 200.

De um modo geral, pôde-se verificar que a granulometria de todas as misturas realizadas variou com a quantidade de material cerâmico na mistura e que as misturas realizadas com cacos de telhas apresentaram um maior percentual de material retido nas peneiras que as misturas compostas por cacos de tijolos.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 estão apresentadas as curvas granulométricas da especificação correspondente ao diâmetro máximo de 2", ou seja, a faixa "A" do DNER, e as curvas das misturas solo-agregado realizadas com o solo de Gravatal.

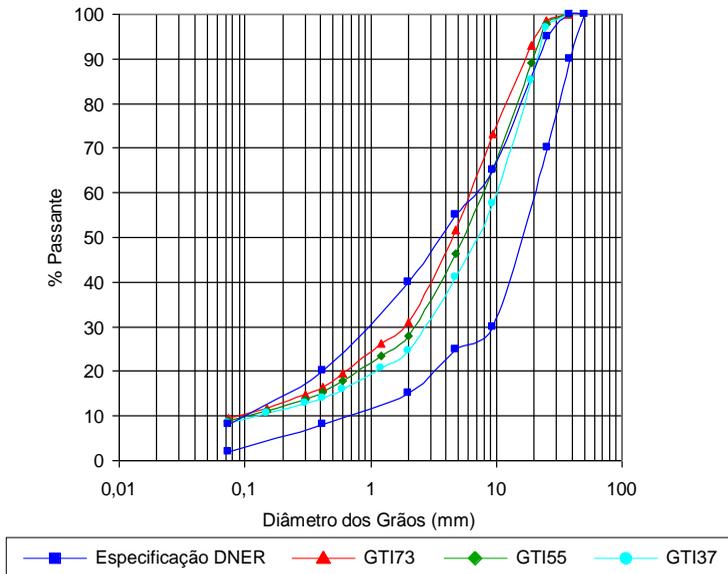


Figura 4.14 – Curvas granulométricas das misturas do solo de Gravatal e cacos de tijolos

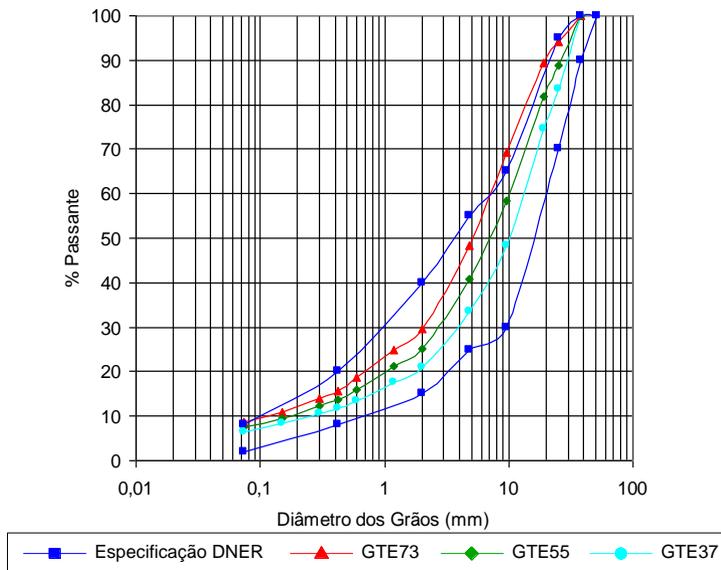


Figura 4.15 – Curvas granulométricas das misturas do solo de Gravatal e cacos de telhas

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15 pode-se perceber que grande parte das curvas granulométricas das misturas se enquadram dentro da faixa de trabalho da especificação do DNER. As misturas que contém 30% e 50% de cacos de tijolo (GTI73 e GTI55) ultrapassam o limite superior da especificação entre as peneiras 4,8 mm e 9,5 mm, e a mistura GTI37 que é composta por 70% de material cerâmico ultrapassa o limite superior apenas na peneira 1". Para as misturas compostas por cacos de telhas, as curvas granulométricas apresentam um melhor enquadramento dentro da faixa do DNER. A mistura GTE73 ultrapassa o limite entre as peneiras 4,8 mm e 9,5 mm, enquanto as misturas GTE55 e GTE37 praticamente se enquadram dentro da especificação.

O bom enquadramento das misturas envolvendo o solo de Gravatal dentro desta especificação pode ser explicado pela semelhança entre as curvas granulométricas do solo e dos cacos de tijolos e telhas após a fragmentação.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 estão apresentadas as curvas granulométricas da especificação "A" do DNER e as curvas das misturas solo-agregado realizadas com o solo de Tubarão. Cada gráfico apresenta três tipos de mistura e os limites inferior e superior da especificação.

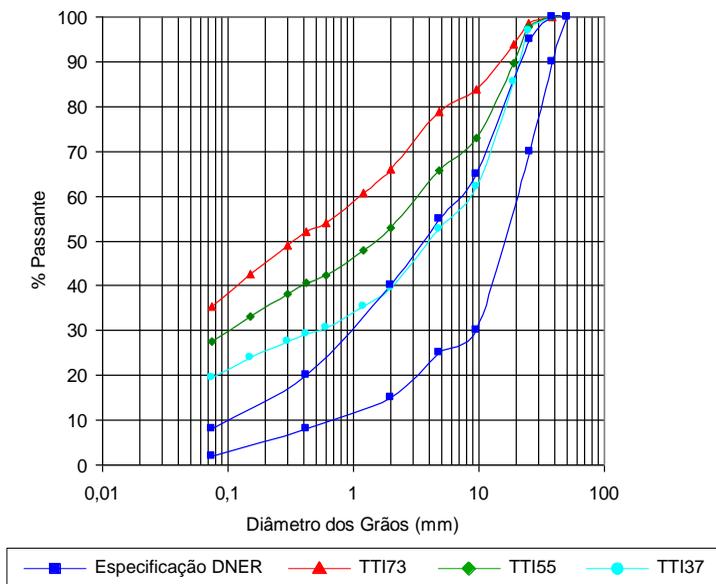


Figura 4.16 – Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de tijolos

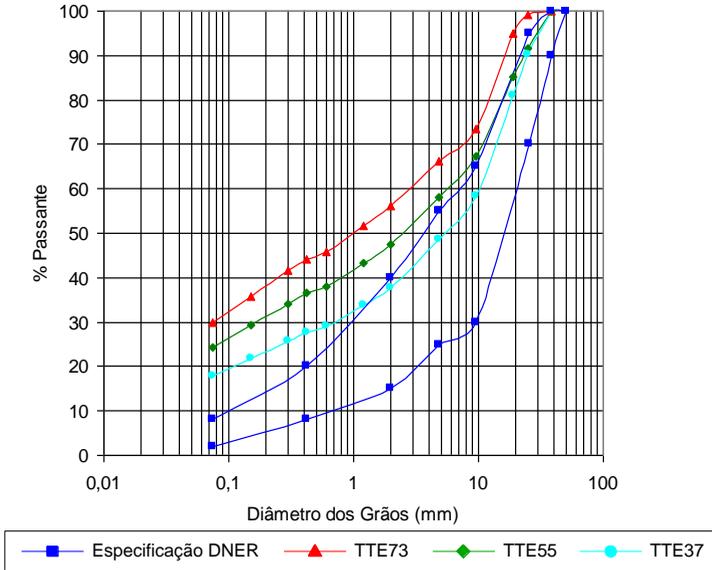


Figura 4.17 – Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de telhas

Através da análise dos gráficos apresentados verifica-se que, diferente do ocorrido com as misturas com o solo de Gravatal, praticamente nenhuma curva granulométrica ficou enquadrada dentro da faixa de trabalho da especificação do DNER. As misturas que continham 30% e 50% de material cerâmico ficaram totalmente fora dos limites da especificação. Por outro lado, as misturas TTI37 e TTE37 que são compostas por 70% de material cerâmico ficaram apenas com uma parte de suas curvas dentro dos limites.

A diferença entre as misturas envolvendo o solo de Tubarão e de Gravatal se deve à composição granulométrica dos dois tipos de solo. O solo de Tubarão é trata de um solo fino, com grande quantidade de material passante na peneira nº 200, enquanto o solo de Gravatal possui uma granulometria mais grosseira. Pode-se perceber que até mesmo as misturas TTI37 e TTE37 que possuem 70% de material cerâmico estão abaixo dos valores limites superiores da especificação, isto porque, existe uma grande quantidade de material passante nas peneira com abertura inferior a 2 mm.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 estão apresentadas as curvas granulométricas da especificação "A" do DNER e as curvas das misturas solo-agregado realizadas com o solo de Criciúma. Cada gráfico apresenta três tipos de mistura e os limites inferior e superior da especificação.

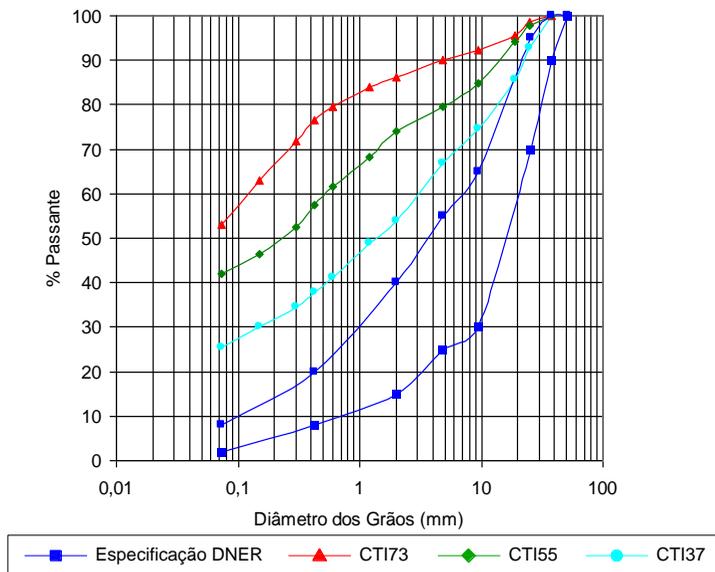


Figura 4.18 – Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de tijolos

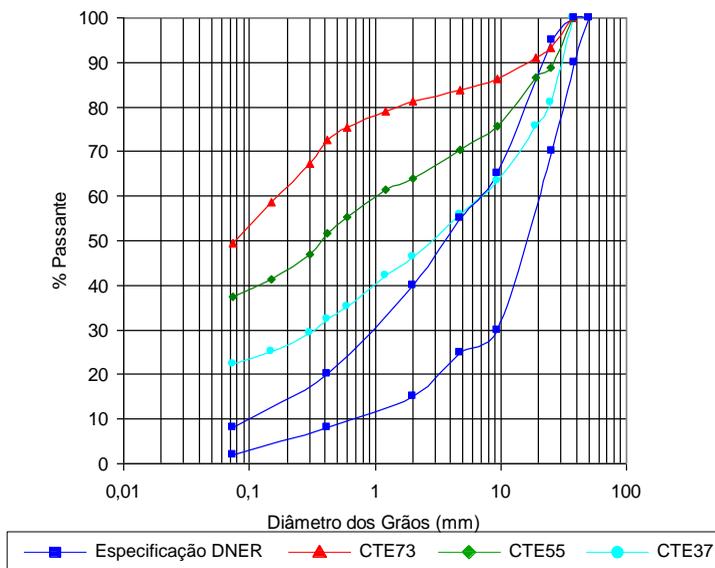


Figura 4.19 – Curvas granulométricas das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de telhas

Com base nos dados apresentados observa-se que as misturas realizadas com o solo de Criciúma possuem granulometrias semelhantes às misturas com o solo de Tubarão. Nenhuma curva granulométrica das misturas se enquadra nos limites da especificação do DNER. As misturas compostas por cacos de tijolos ficaram totalmente fora dos limites, enquanto nas misturas realizadas com cacos de telhas apenas as misturas CTE37, compostas por 70% de material cerâmico, apresenta uma pequena parte enquadrada dentro dos limites da especificação.

O solo de Criciúma, assim como o solo de Tubarão, é um material muito fino, que possui uma porcentagem elevada de material passante na peneira nº 200 (76%). Pode-se verificar que o excesso de material passante nas peneiras com abertura até 9,5mm faz com que nem mesmo as curvas das misturas com 70% de material cerâmico consigam se enquadrar dentro dos limites.

4.3.2 Ensaio de granulometria após a compactação das amostras

O ensaio de granulometria foi executado após a substituição do material cerâmico retido na peneira $\frac{3}{4}$ " (19mm), conforme a especificação DNER-ME 049/94 – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas.

A determinação da distribuição granulométrica das misturas após o ensaio de compactação tem por objetivo avaliar, individualmente, a quebra dos cacos de tijolos e telhas quando incluídos nas misturas com solo, provocada pelos impactos do soquete de compactação. A avaliação do comportamento do material cerâmico foi realizada através da comparação entre a distribuição granulométrica das misturas antes e depois da compactação das amostras. Admitiu-se a premissa que a variação na granulometria da mistura seria causada pela fragmentação do material cerâmico.

4.3.2.1 Misturas realizadas com o solo de Gravatal

Como forma de comparar a granulometria das misturas antes e após o ensaio de compactação optou-se por apresentar, separadamente, as curvas granulométricas de cada mistura. Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 são apresentados os gráficos com as curvas granulométricas das misturas

realizadas com o solo da jazida de Gravatal e nas Tabelas 4.11 e 4.12 estão relacionados os respectivos resultados dos ensaios.

Analisando as curvas apresentadas nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 percebe-se que apesar da substituição do material retido na peneira $\frac{3}{4}$ " (19mm), determinada pela especificação DNER-ME 049/94, a composição granulométrica das misturas permaneceu semelhante as suas respectivas misturas originais.

Após a compactação das amostras houve um aumento no percentual de material passante em todas as peneiras. Como esperado, este aumento foi de maior intensidade nas misturas que possuem uma quantidade maior de agregado, ou seja, nas misturas que possuem 70% de material cerâmico.

Nas misturas realizadas com o solo de Gravatal, as amostras compostas por 70% de cacos de tijolos (GTI37) apresentaram, após a compactação, um aumento na porcentagem de material passante de, aproximadamente, 28%. Nas amostras que possuem 50% e 30% de cacos de tijolo em mistura com o solo de Gravatal (GTI55 e GTI73), o valor do aumento na porcentagem de material passante foi de 23% e 12%, respectivamente.

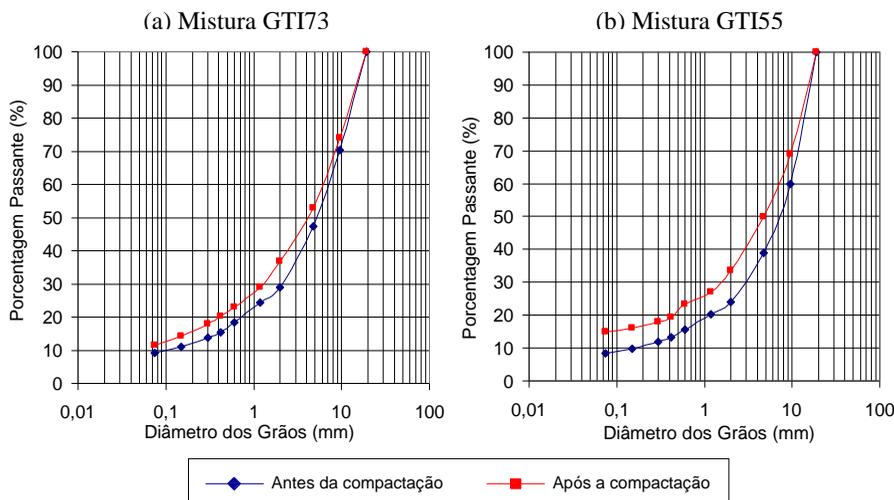


Figura 4.20 – Curvas granulométricas das misturas GTI73 e GTI55 com o solo de Gravatal, antes e após a compactação

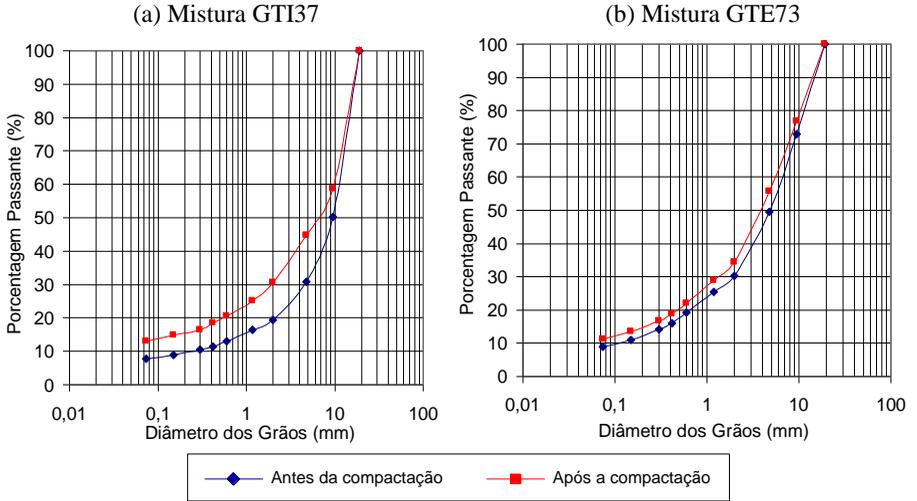


Figura 4.21 – Curvas granulométricas das misturas GTI37 e GTE73 o solo de Gravatal, antes e após a compactação

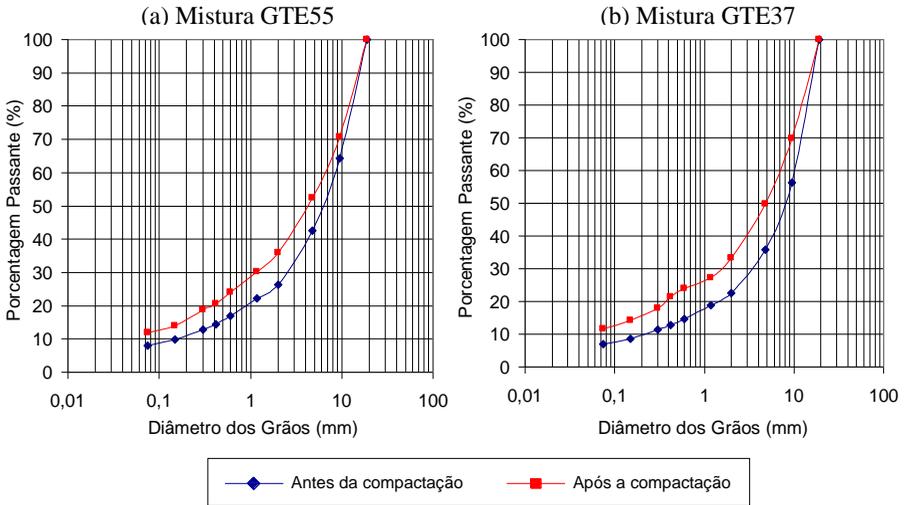


Figura 4.22 – Curvas granulométricas das misturas GTE55 e GTE37 com o solo de Gravatal, antes e após a compactação

Tabela 4.11 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de tijolos, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante											
	Mistura GTI73				Mistura GTI55				Mistura GTI37			
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0
9,5	70,2	74,0	3,7	59,9	69,0	9,1	50,1	58,7	8,5	58,7	58,7	8,5
4,8	47,4	52,9	5,5	39,0	49,8	10,8	30,9	44,8	13,8	44,8	44,8	13,8
2	28,9	36,8	7,9	23,9	33,7	9,7	19,3	30,6	11,2	30,6	30,6	11,2
1,2	24,4	29,0	4,6	20,2	27,1	6,8	16,3	25,1	8,7	25,1	25,1	8,7
0,6	18,4	22,9	4,5	15,6	23,3	7,6	12,9	20,6	7,6	20,6	20,6	7,6
0,42	15,5	20,3	4,8	13,4	19,3	5,8	11,4	18,4	6,9	18,4	18,4	6,9
0,3	13,7	18,0	4,3	11,9	18,0	6,0	10,4	16,5	6,0	16,5	16,5	6,0
0,15	11,0	14,2	3,2	9,8	16,1	6,2	8,8	14,8	5,9	14,8	14,8	5,9
0,074	9,1	11,6	2,4	8,3	14,9	6,5	7,7	12,9	5,1	12,9	12,9	5,1

Tabela 4.12 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Gravatal e cacos de telhas, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante											
	Mistura GTE73				Mistura GTE55				Mistura GTE37			
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,00
9,5	72,8	76,8	3,9	64,4	70,6	6,2	56,1	69,7	13,5	13,8	13,8	13,8
4,8	49,5	55,8	6,2	42,7	52,3	9,6	35,8	49,7	13,8	10,7	10,7	10,7
2	30,2	34,5	4,2	26,3	36,0	9,6	22,4	33,2	10,7	8,3	8,3	8,3
1,2	25,5	29,0	3,5	22,2	30,3	8,1	18,7	27,1	8,3	9,3	9,3	9,3
0,6	19,2	22,0	2,8	16,9	24,0	7,0	14,6	24,0	9,3	8,5	8,5	8,5
0,42	16,1	18,7	2,5	14,5	20,6	6,1	12,7	21,3	8,5	6,6	6,6	6,6
0,3	14,2	16,8	2,6	12,8	18,7	5,8	11,3	18,0	6,6	5,6	5,6	5,6
0,15	10,9	13,5	2,5	9,8	14,0	4,1	8,5	14,2	5,6	4,6	4,6	4,6
0,074	8,9	11,3	2,4	8,0	12,0	4,0	6,9	11,6	4,6			

Nas misturas realizadas com o solo de Gravatal, as amostras compostas por 70% de cacos de tijolos (GTI37) apresentaram, após a compactação, um aumento na porcentagem de material passante de, aproximadamente, 28%. Nas amostras que possuem 50% e 30% de cacos de tijolo em mistura com o solo de Gravatal (GTI55 e GTI73), o valor do aumento na porcentagem de material passante foi de 23% e 12%, respectivamente.

As misturas realizadas de solo de Gravatal e cacos de telhas apresentaram distribuição granulométrica e variação na porcentagem de material passante, após a compactação, semelhantes aos das misturas realizadas com cacos de tijolos. Nas amostras que possuem 70% de material cerâmico (GTE37) o aumento na porcentagem de material passante foi de 28%, exatamente como nas misturas realizadas com cacos de tijolos. As amostras que possuem 50% e 30% de cacos de telhas em sua composição (GTE55 e GTE73), o valor do aumento na porcentagem de material passante foi de 19% e 9%, respectivamente.

A peneira que apresentou as maiores variações na quantidade de material passante foi a de abertura igual a 4,8 mm. Nas misturas compostas por 70% de cacos de tijolo, esta variação chegou a 14%, já nas misturas que possuem 50% e 30% do mesmo material este aumento foi um pouco menor, cerca de 10% e 5%, respectivamente. Nas misturas realizadas com cacos de telha estas variações apresentaram os mesmos valores das misturas realizadas com cacos de tijolo.

4.3.2.2 Misturas realizadas com o solo de Tubarão

São apresentados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 os gráficos com as curvas granulométricas das misturas realizadas com o solo da jazida de Tubarão e nas Tabelas 4.13 e 4.14 estão relacionados os respectivos resultados dos ensaios de granulometria.

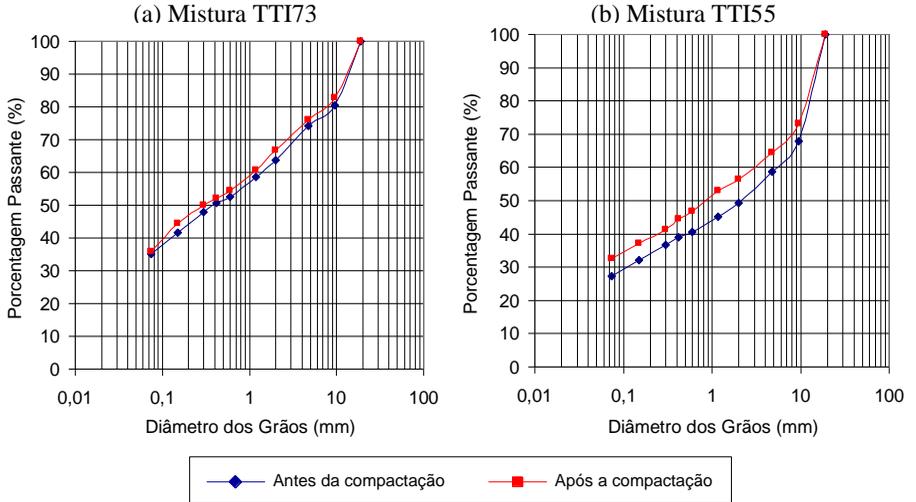


Figura 4.23 – Curvas granulométricas das misturas TTI73 e TTI55 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação

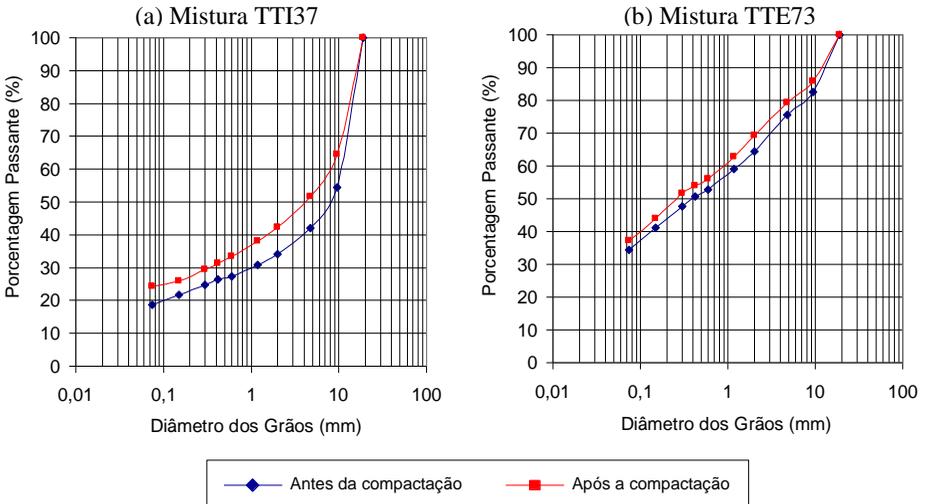


Figura 4.24 – Curvas granulométricas das misturas TTI37 e TTE73 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação

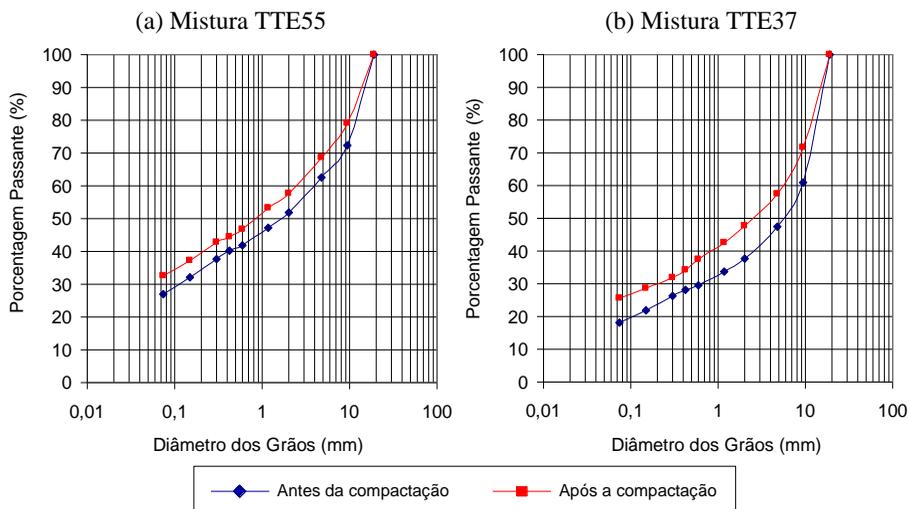


Figura 4.25 – Curvas granulométricas das misturas TTE55 e TTE37 com o solo de Tubarão, antes e após a compactação

Analisando os dados apresentados, verifica-se que o comportamento da distribuição granulométrica das misturas realizadas com o solo de Tubarão, após a compactação, se apresenta semelhante ao comportamento apresentado pelas misturas realizadas com o solo de Gravatal.

Os ensaios realizados após a compactação mostraram um aumento na quantidade de material passante em todas as peneiras e, como já era esperado, este aumento foi verificado em maior intensidade nas misturas que possuem 70% de material cerâmico. As amostras compostas por 70% de cacos de tijolos apresentaram (TTI37), após a compactação, um aumento na porcentagem de material passante de, aproximadamente, 16%. Nas amostras que possuem 50% e 30% (TTI55 e TTI73) este aumento foi de 11% e 3%, respectivamente.

Nas misturas realizadas com cacos de telhas o comportamento da distribuição granulométrica, bem como a variação na porcentagem de material passante, após a compactação, se apresentou semelhante ao das misturas realizadas com cacos de tijolos. Nas amostras que possuem 70% de cacos de telhas (TTE37), o aumento na porcentagem de material passante foi de 18%. Nas amostras que possuem 50% e 30% (TTE55 e TTE73) o valor deste aumento foi de 10% e 5%, respectivamente.

Tabela 4.13 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de telhas, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante											
	Mistura TTE73				Mistura TTE55				Mistura TTE37			
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0
9,5	82,5	85,8	3,2	72,4	79,0	6,5	60,8	71,6	10,7	60,8	71,6	10,7
4,8	75,6	79,4	3,8	62,5	68,7	6,1	47,5	57,4	9,87	47,5	57,4	9,87
2	64,3	69,4	5,0	51,9	57,7	5,7	37,6	47,7	10,0	37,6	47,7	10,0
1,2	59,1	62,9	3,7	47,3	53,2	5,9	33,7	42,6	8,8	33,7	42,6	8,8
0,6	52,8	56,0	3,1	41,9	46,8	4,8	29,5	37,4	7,9	29,5	37,4	7,9
0,42	50,8	54,0	3,1	40,2	44,5	4,2	28,0	34,3	6,2	28,0	34,3	6,2
0,3	47,7	51,6	3,8	37,7	42,9	5,2	26,1	31,9	5,7	26,1	31,9	5,7
0,15	41,1	44,0	2,8	32,1	37,1	4,9	21,8	28,7	6,8	21,8	28,7	6,8
0,074	34,4	37,1	2,6	26,9	32,6	5,7	18,2	25,5	7,2	18,2	25,5	7,2

Tabela 4.14 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Tubarão e cacos de tijolos, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante											
	Mistura TTI73				Mistura TTI55				Mistura TTI37			
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0
9,5	80,4	82,9	2,4	67,8	73,2	5,3	54,3	64,5	10,1	54,3	64,5	10,1
4,8	74,1	76,0	1,8	58,7	64,5	5,7	42,1	51,6	9,4	42,1	51,6	9,4
2	63,6	66,8	3,1	49,4	56,5	7,0	34,0	42,3	8,2	34,0	42,3	8,2
1,2	58,6	60,6	1,9	45,2	52,9	7,6	30,8	38,0	7,2	30,8	38,0	7,2
0,6	52,6	54,5	1,8	40,5	46,8	6,2	27,4	33,5	6,0	27,4	33,5	6,0
0,42	50,7	52,0	1,2	39,0	44,5	5,4	26,3	31,3	4,9	26,3	31,3	4,9
0,3	47,8	50,0	2,1	36,7	41,3	4,5	24,8	29,4	4,5	24,8	29,4	4,5
0,15	41,6	44,5	2,8	32,1	37,1	4,9	21,8	26,0	4,1	21,8	26,0	4,1
0,074	35,1	35,8	0,6	27,2	32,6	5,3	18,4	24,2	5,4	18,4	24,2	5,4

Com base nestes resultados verifica-se que, quando comparadas às misturas com o solo de Gravatal, as misturas compostas pelo solo de Tubarão apresentaram uma redução na quantidade de material fragmentado pela compactação, ou seja, nestas misturas a redução no tamanho dos cacos cerâmicos foi menor que nas misturas com o solo de Gravatal.

4.3.2.3 Misturas realizadas com o solo de Criciúma

São apresentados nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 os gráficos com as curvas granulométricas das misturas realizadas com o solo da jazida de Tubarão e nas Tabelas 4.15 e 4.16 estão relacionados os respectivos resultados dos ensaios de granulometria.

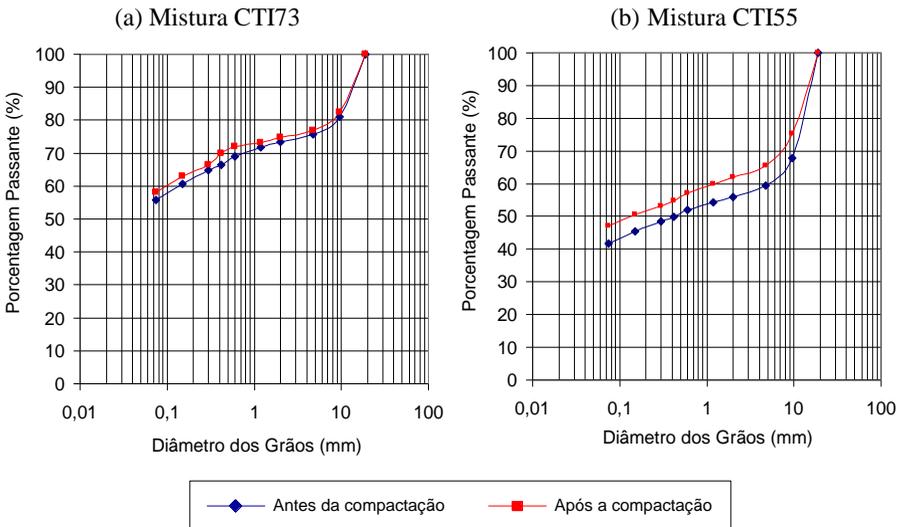


Figura 4.26 – Curvas granulométricas das misturas CTI73 e CTI55 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação

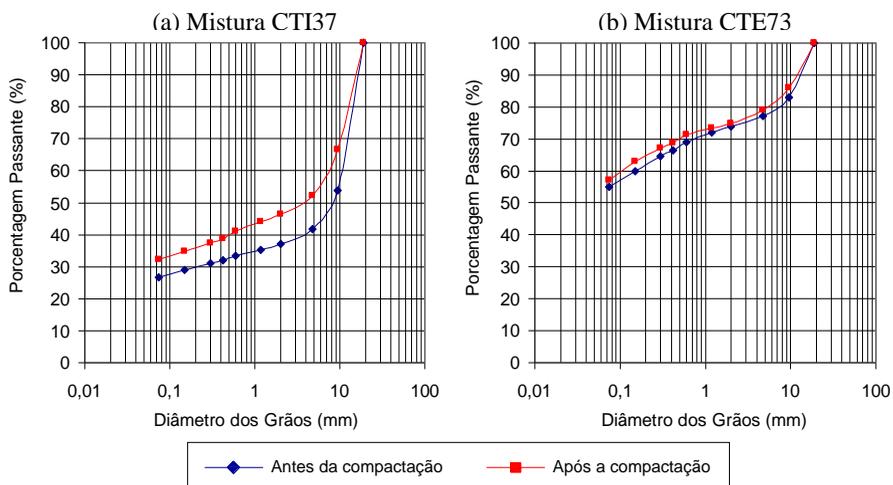


Figura 4.27 – Curvas granulométricas das misturas CTI37 e CTE73 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação

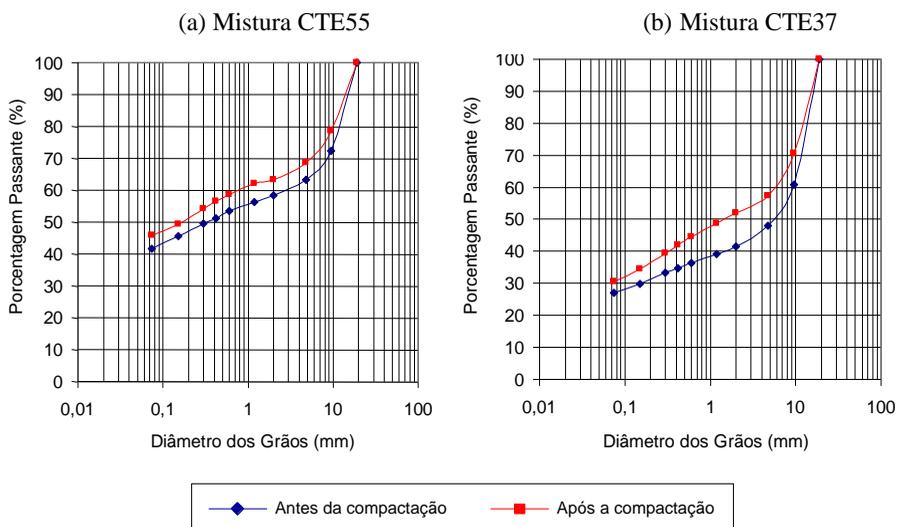


Figura 4.28 – Curvas granulométricas das misturas CTE55 e CTE37 com o solo de Criciúma, antes e após a compactação

Tabela 4.15 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de telhas, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante											
	Mistura TTE73				Mistura TTE55				Mistura TTE37			
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0
9,5	83,0	86,0	2,9	72,4	78,7	6,2	60,8	70,6	9,7	60,8	70,6	9,7
4,8	77,0	79,0	1,9	63,1	68,7	5,5	47,9	57,4	9,4	47,9	57,4	9,4
2	73,9	74,8	0,8	58,4	63,2	4,7	41,5	52,0	10,4	41,5	52,0	10,4
1,2	72,1	73,5	1,3	56,3	62,0	5,6	39,1	48,7	9,5	39,1	48,7	9,5
0,6	69,0	71,3	2,2	53,4	58,7	5,2	36,3	44,5	8,1	36,3	44,5	8,1
0,42	66,4	68,7	2,3	51,2	56,5	5,2	34,6	42,0	7,3	34,6	42,0	7,3
0,3	64,5	67,1	2,5	49,5	54,2	4,6	33,2	39,4	6,1	33,2	39,4	6,1
0,15	59,9	62,9	2,9	45,6	49,4	3,7	29,9	34,5	4,5	29,9	34,5	4,5
0,074	54,9	57,1	2,1	41,6	45,8	4,1	27,0	30,6	3,5	27,0	30,6	3,5

Tabela 4.16 – Distribuição granulométrica das misturas entre o solo de Criciúma e cacos de tijolos, antes e após a compactação

Peneira (mm)	% Passante									
	Mistura TTI73			Mistura TTI55			Mistura TTI37			Difer.
	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	Antes	Após	Difer.	
19	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	0,0	0,0
9,5	80,9	82,3	1,3	67,8	75,2	7,3	53,8	66,5	12,6	12,6
4,8	75,6	76,8	1,1	59,3	65,5	6,1	41,8	52,3	10,4	10,4
2	73,2	74,8	1,5	55,8	62,0	6,1	37,1	46,5	9,3	9,3
1,2	71,7	73,2	1,4	54,2	60,0	5,7	35,3	44,0	8,6	8,6
0,6	69,0	72,0	2,9	51,8	57,1	5,2	33,4	41,0	7,5	7,5
0,42	66,4	70,0	3,5	49,9	54,8	4,8	32,0	38,7	6,6	6,6
0,3	64,7	66,5	1,7	48,5	53,2	4,6	31,0	37,4	6,3	6,3
0,15	60,7	62,9	2,2	45,4	50,6	5,1	29,0	34,8	5,7	5,7
0,074	55,8	58,0	2,1	41,8	47,1	5,2	26,7	32,3	5,5	5,5

Com base nos dados apresentados verifica-se, de maneira geral, que o comportamento da distribuição granulométrica das misturas realizadas com o solo de Criciúma, após a compactação, é semelhante ao comportamento apresentado pelos demais solos.

As amostras compostas por 70% de cacos de tijolos e solo de Criciúma apresentaram, após a compactação, um aumento na porcentagem de material passante de, aproximadamente, 17%. Nas amostras que possuem 50% e 30% este aumento foi de 9% e 3%, respectivamente.

Nas misturas realizadas com cacos de telhas o comportamento da distribuição granulométrica também se apresentou semelhante ao das misturas realizadas com cacos de tijolos. Nas amostras que possuem 70% de cacos de telhas o aumento na porcentagem de material passante foi de 15%, e nas amostras que possuem 50% e 30% o valor deste aumento foi de 15% e 3%, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a quebra do material cerâmico, após a compactação das amostras, é menor nas misturas realizadas com os solos de Tubarão e Criciúma do que nas misturas compostas pelo solo de Gravatal. Este fato pode ser explicado pelo fato do solo de Gravatal possuir apenas 10% de material passante na peneira nº 200 em sua composição, enquanto os solos de Tubarão e Criciúma possuem 47% e 76%, respectivamente. Portanto, estes solos possuem uma granulometria mais fina que o solo de Gravatal, o que acaba gerando uma melhor acomodação do agregado dentro do solo e uma conseqüente proteção das partículas com relação às cargas de compactação aplicadas na mistura.

4.3.3 Ensaio de compactação e CBR

Os ensaios de Compactação e CBR foram realizados em todas as misturas solo-agregado, no Laboratório de Solos da Universidade do Sul de Santa Catarina, UNISUL, localizado no Campus de Tubarão.

4.3.3.1 Misturas realizadas com o solo de Gravatal

Nas Figuras 4.29 e 4.30 são apresentadas as curvas de compactação e CBR, respectivamente, das misturas envolvendo o solo coletado no

município de Gravatal. Na Tabela 4.17 estão apresentados todos os resultados obtidos nestes ensaios.

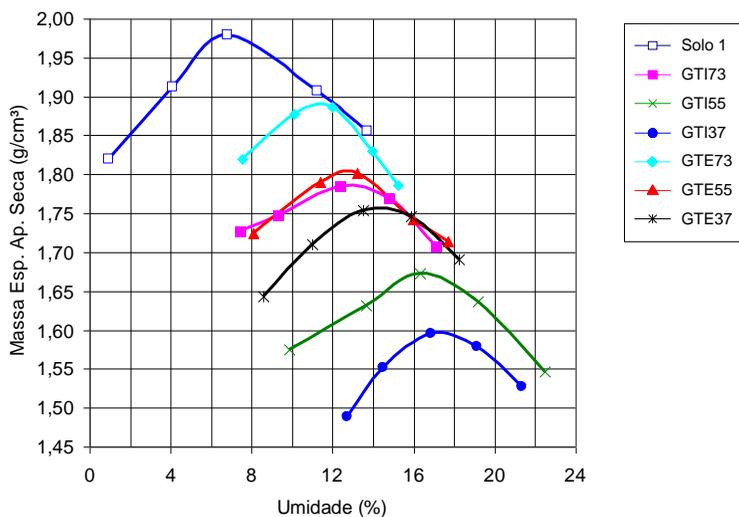


Figura 4.29 – Curvas de compactação das misturas com o solo de Gravatal

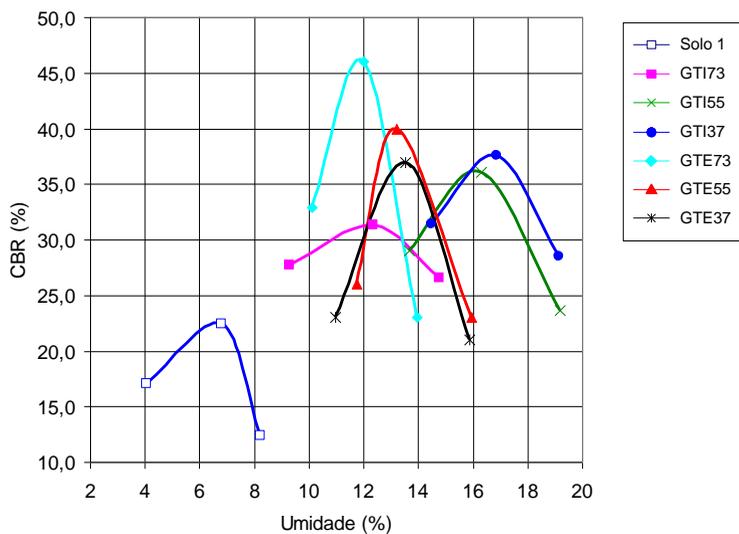


Figura 4.30 – Curvas de CBR das misturas com o solo de Gravatal

Tabela 4.17 – Resultados apresentados pelas misturas realizadas com o solo de Gravatal

Material	W_{ótima} (%)	ρ_{máx} (g/cm³)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo 1	6,80	1,980	22	0
GTI73	12,9	1,784	31	0
GTI55	16,0	1,672	36	0
GTI37	17,5	1,596	38	0
GTE73	11,5	1,887	46	0
GTE55	12,5	1,801	39	0
GTE37	14,4	1,754	34	0

Analisando os resultados apresentados no ensaio de compactação percebe-se que o material cerâmico provocou uma redução da massa específica aparente seca máxima e um aumento na umidade ótima das misturas com o solo da jazida de Gravatal. Os resultados obtidos através do ensaio de CBR mostram que todas as misturas apresentaram valores superiores ao valor obtido pela amostra composta por apenas solo.

A umidade ótima também é influenciada pela quantidade de material cerâmico inserido na mistura, pois, devido a sua capacidade de absorção, o material cerâmico acaba absorvendo uma parte da quantidade de água inserida na mistura.

As variações observadas entre os resultados obtidos pelas misturas podem ser justificadas pela distribuição granulométrica dos cacos cerâmicos e às composições das misturas, haja vista que os dois tipos de material cerâmico possuem propriedades físicas semelhantes.

Dentre todas as misturas, a mistura GTE73 que é composta por 30% de cacos de telhas, foi a que apresentou os melhores resultados nos ensaios realizados. No ensaio de CBR, o valor obtido por esta mistura foi superior ao dobro do valor apresentado pela amostra de solo pura, já a massa específica aparente seca máxima foi de 1,887 g/cm³ enquanto a mistura GTI73 que possui a mesma dosagem, porém, realizada com cacos de tijolos, é de 1,784 g/cm³.

A diferença entre a massa específica aparente seca máxima das misturas e do solo pode ser atribuída à elevada absorção de água por parte do material cerâmico, que acaba gerando uma massa específica aparente menor que a do conjunto de agregados.

Verificando os resultados obtidos através do ensaio de CBR, conclui-se que, de um modo geral, o material cerâmico atuou de forma

positiva nas misturas com solo, aumentando, em todas as misturas, o valor do CBR.

Com relação aos resultados apresentados pelo ensaio de expansão dos corpos de prova das misturas verificou-se que estes permaneceram iguais ao valor apresentado pela amostra de solo. No entanto, nenhum dos resultados apresentados condenou algum tipo de mistura, ou seja, todas as amostras obtiveram valores de expansão dentro das especificações do DNIT para material de sub-base.

4.3.3.2 Misturas realizadas com o solo de Tubarão

As curvas de compactação e CBR obtidas, através da energia intermediária, para as misturas realizadas com material cerâmico e o solo coletado no município de Tubarão são apresentadas nas Figuras 4.31 e 4.32. Os valores de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, CBR e expansão destas misturas estão apresentados na Tabela 4.18.

As amostras compostas por cacos de telhas apresentaram resultados mais próximos da massa específica do solo que as amostras compostas por cacos de tijolos. A mistura TTE73, composta por 30% de cacos de telhas apresentou uma massa específica seca de 1,737 g/cm³, bem próxima a do solo, 1,721 g/cm³.

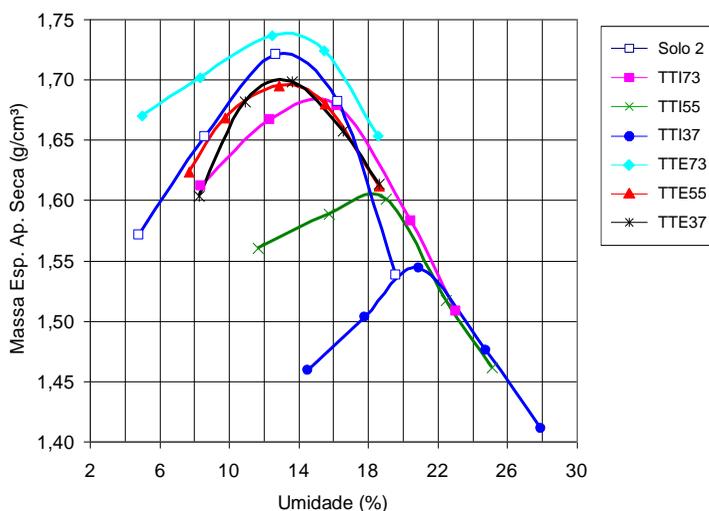


Figura 4.31 – Curvas de compactação das misturas com o solo de Tubarão

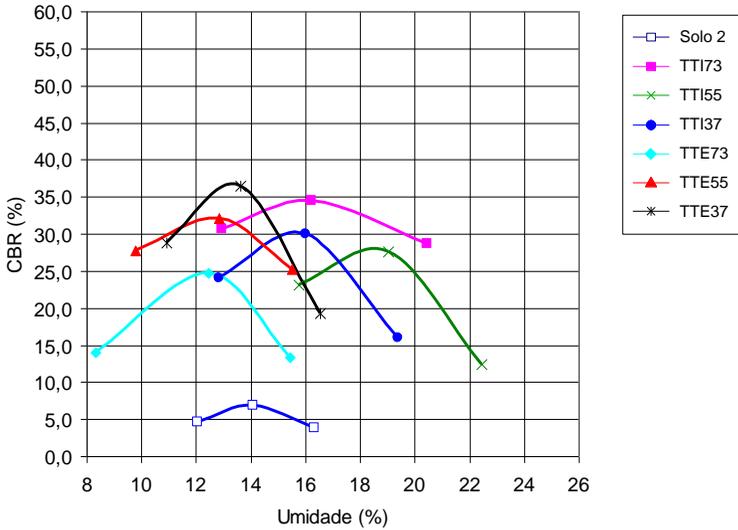


Figura 4.32 – Curvas de CBR das misturas com o solo de Tubarão

Tabela 4.18 – Resultados apresentados pelas misturas com o solo de Tubarão

Material	$W_{ótima}$ (%)	$\rho_{máx}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo 2	14,0	1,721	7	2,59
TTI73	15,0	1,679	34	0,72
TTI55	18,0	1,601	28	0,61
TTI37	20,8	1,544	30	0,63
TTE73	13,5	1,737	24	0,07
TTE55	13,5	1,695	32	0,11
TTE37	13,2	1,699	36	0,15

Os valores apresentados pelas misturas nos ensaios de CBR foram superiores ao resultado obtido pela amostra de solo. Pode-se verificar que o aumento do valor do CBR varia de acordo com o aumento da porcentagem do material cerâmico em sua composição. Os melhores resultados foram obtidos nas amostras compostas por 70% de cacos cerâmicos e 30% de solo. A única exceção foi visualizada na mistura TTI55 que apresentou um CBR inferior à mistura TTI73.

Os resultados obtidos através do ensaio de expansão verificaram a redução dos valores após a adição de material cerâmico na mistura. Enquanto na amostra de solo a expansão obtida foi de 2,59%, entre as amostras compostas pelas misturas o maior valor apresentado foi de 0,72%, na mistura composta por 30% de cacos de tijolos (TTI73).

De um modo geral verificou-se que o material cerâmico proporcionou um aumento expressivo da qualidade das misturas com solo coletado na jazida de Tubarão, aumentando o valor do CBR e reduzindo o valor da expansão.

4.3.3.3 Misturas realizadas com o solo de Criciúma

As curvas de compactação e CBR obtidas, através da energia intermediária, para as misturas realizadas com material cerâmico e o solo coletado no município de Criciúma são apresentadas nas Figuras 4.33 e 4.34. Os valores de umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, CBR e expansão destas misturas estão apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos das misturas com o solo de Criciúma

Material	W_{ótima} (%)	ρ_{máx} (g/cm³)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo 3	17,5	1,441	11	2,57
CTI73	23,2	1,519	31	0,11
CTI55	24,0	1,523	28	0,88
CTI37	23,0	1,500	33	0,50
CTE73	23,0	1,556	24	0,78
CTE55	22,8	1,561	17	0,15
CTE37	23,0	1,516	32	0,19

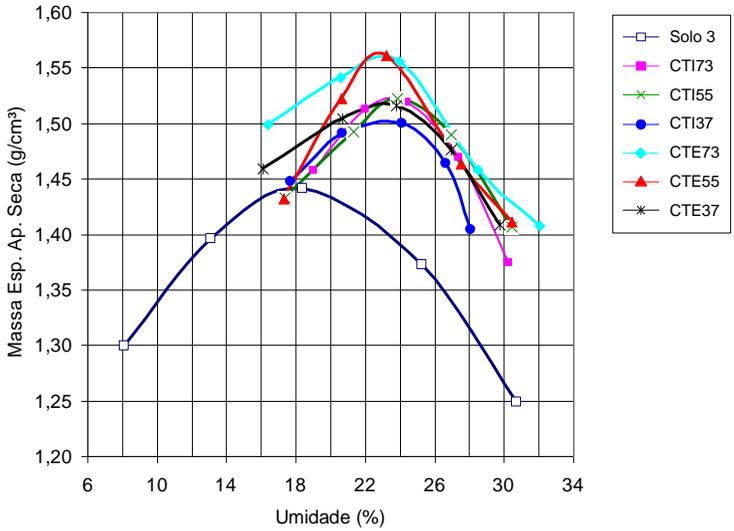


Figura 4.33 – Curvas de compactação das misturas com solo de Criciúma

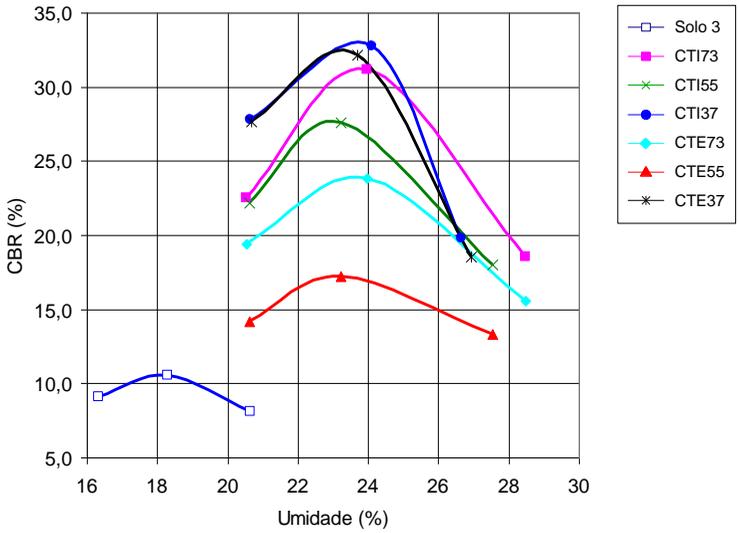


Figura 4.34 – Curvas de CBR das misturas com o solo de Criciúma

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.19 verifica-se que as misturas de material cerâmico com o solo coletado na jazida de Criciúma apresentaram, para todas as dosagens, uma massa específica superior à massa específica do solo.

As amostras compostas por cacos de telhas apresentaram resultados superiores às amostras compostas por cacos de tijolos. As misturas CTE73 e CTE55 foram as que obtiveram melhor desempenho apresentando uma massa específica seca de 1,556 g/cm³ e 1,561 g/cm³, respectivamente.

Os valores obtidos através do ensaio de CBR também foram superiores ao resultado obtido pela amostra de solo. Os melhores resultados foram obtidos nas amostras compostas por 70% de cacos cerâmicos e 30% de solo. As misturas realizadas com o solo de Criciúma apresentaram um aumento no Índice de Suporte Califórnia de acordo com o aumento da dosagem de material cerâmico em sua composição, porém, sendo verificada uma variação nas misturas M2 e M5.

Os resultados obtidos através do ensaio de expansão apresentaram a redução do valor em relação à amostra de solo após a adição de material cerâmico na mistura. Com a amostra de solo a expansão obtida foi de 2,57%, entre as amostras compostas pelas misturas o maior valor apresentado foi de 0,88%, na mistura composta por 50% de cacos de tijolo (CTI55). De um modo geral as misturas compostas por cacos de telhas apresentaram resultados menores de expansão que as misturas realizadas com cacos de tijolos.

Diante dos dados apresentados, pode-se concluir que o material cerâmico proporcionou um aumento expressivo da qualidade das misturas com solo coletado na jazida de Criciúma, aumentando o valor do CBR e reduzindo o valor da expansão.

4.3.4 Ensaio de módulo de resiliência

O ensaio triaxial de cargas repetidas foi realizado no Laboratório de Ligantes e Misturas Asfálticas da Universidade Federal de Santa Catarina e foi executado nos solos coletados nas jazidas de Tubarão e Criciúma e nas suas respectivas misturas com material cerâmico. Todas as amostras foram moldadas na energia Proctor Intermediária. Este ensaio não pôde ser realizado no solo da jazida de Gravatal, pois as características físicas deste solo, principalmente a sua granulometria, impossibilitaram a moldagem do corpo de prova.

Para facilitar a visualização do comportamento e desempenho das misturas, optou-se por separar os resultados obtidos de acordo com o tipo de solo e material cerâmico utilizado nas misturas.

4.3.4.1 Misturas realizadas com o solo de Tubarão

O comportamento resiliente das amostras compostas pelo solo de Tubarão, determinado a partir do ensaio triaxial de cargas repetidas, para corpos-de-prova moldados nas umidades ótimas com a energia de compactação Proctor Intermediário é apresentado nas Figuras 4.35 e 4.36. Na Tabela 4.20 são apresentados os valores modulares das misturas para cada estado de tensão.

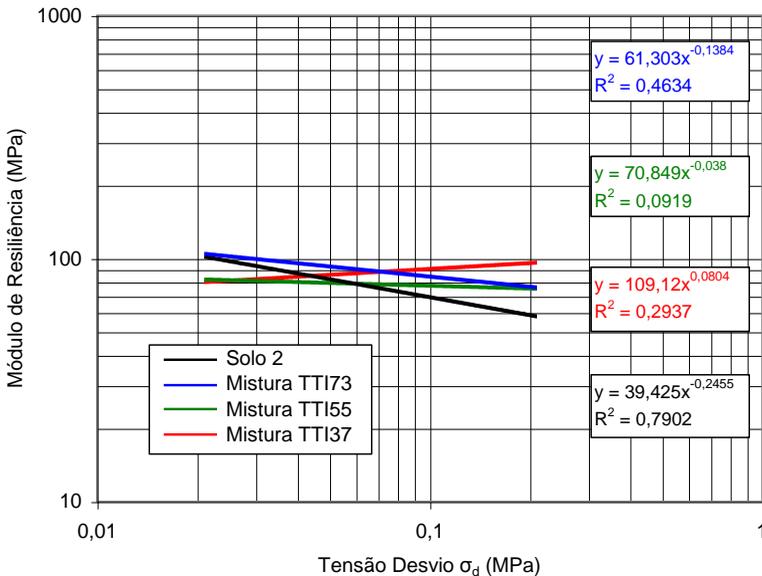


Figura 4.35 – Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Tubarão e cacos de tijolos

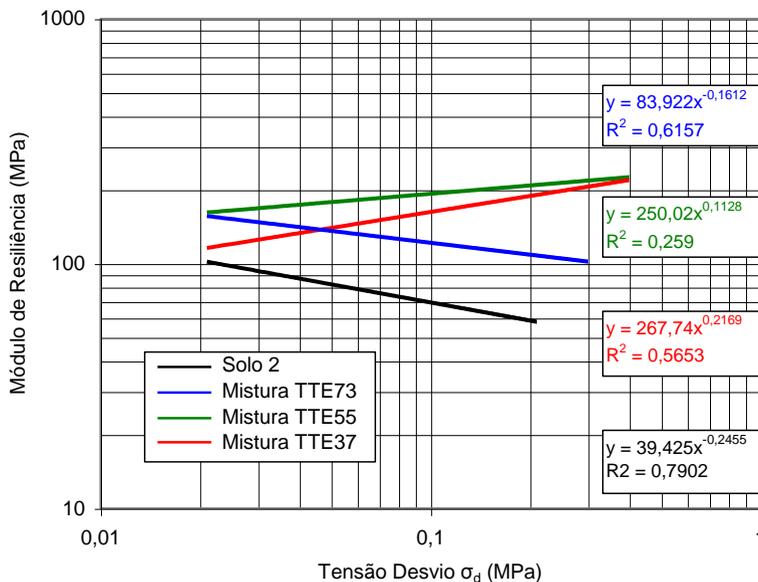


Figura 4.36 – Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Tubarão e cacos de telhas

Tabela 4.20 – Valores de M_R das misturas com o solo de Tubarão

σ_3 (MPa)	Valores de Módulo de Resiliência (MPa)						
	Solo 2	TTI73	TTI55	TTI37	TTE73	TTE55	TTE37
0,02	103,01	105,35	82,20	79,67	157,67	160,82	114,61
0,04	86,89	95,71	80,07	84,24	141,00	173,90	133,20
0,05	82,26	92,80	79,39	85,76	136,02	178,33	139,80
0,07	75,74	88,58	78,38	88,12	128,84	185,23	150,39
0,11	67,78	83,21	77,05	91,38	119,79	194,91	165,88
0,14	63,88	80,47	76,35	93,17	115,22	200,29	174,79
0,21	57,83	76,08	75,18	96,25	107,93	209,66	190,85

Com base nos resultados obtidos a partir do ensaio triaxial de cargas repetidas, verifica-se que as amostras compostas pelas misturas realizadas com o solo de Tubarão apresentaram valores de Módulo de Resiliência superiores que as amostras compostas por apenas solo. Observando os gráficos das Figuras 4.35 e 4.36, percebe-se que o aumento na quantidade de material cerâmico adicionado na mistura, proporciona uma alteração na inclinação da linha Módulo de Resiliência x Tensão

Desvio. O solo, que inicialmente apresentava um comportamento argiloso, com a adição de material cerâmico passa a apresentar um comportamento granular.

Os baixos valores apresentados pelos R^2 podem ser explicados pelo fato de que para o nível de tensão ensaiado, a resposta elástica do material é quase linear, ou seja, muda o estado de tensão, mas o módulo do material se mantém com a mesma ordem de grandeza.

As misturas compostas por cacos de telhas apresentaram comportamento superior às misturas realizadas com cacos de tijolos. Os resultados apresentados pelas misturas TTE73, TTE55 e TTE37 foram superiores aos resultados obtidos pelas misturas TTI73, TTI55 e TTI37.

4.3.4.2 Misturas realizadas com o solo de Criciúma

Nas Figuras 4.37 e 4.38 e na Tabela 4.21 são apresentados os dados de comportamento resiliente das amostras compostas pelo solo de Criciúma, determinado a partir do ensaio triaxial de cargas repetidas, para corpos-de-prova moldados nas umidades ótimas com a energia de compactação Proctor Intermediário.

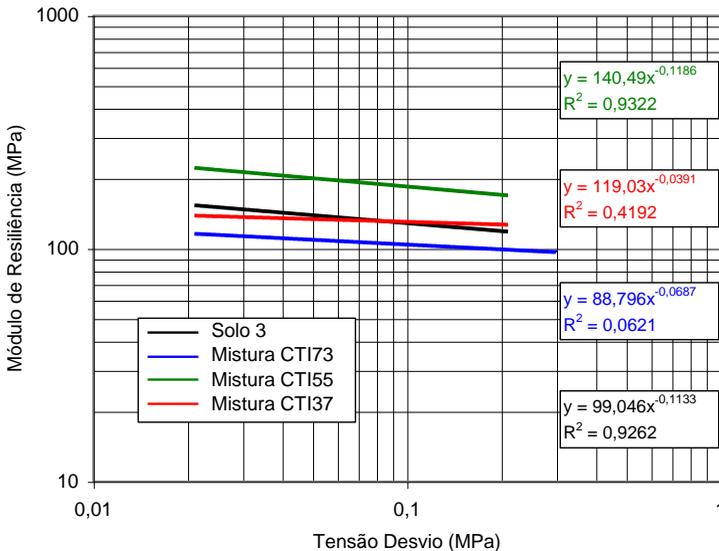


Figura 4.37 – Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Criciúma e cacos de tijolos

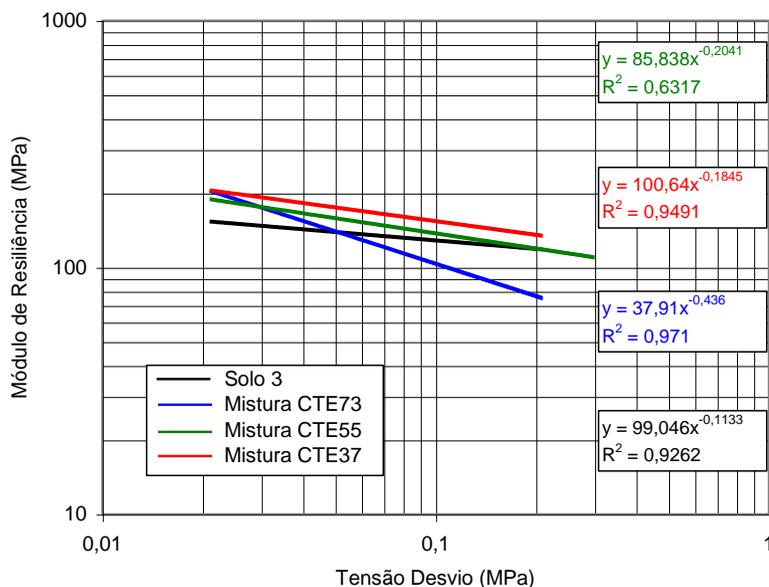


Figura 4.38 – Comportamento resiliente das misturas compostas pelo solo de Criciúma e cacos de telhas

Tabela 4.21 – Valores de M_R das misturas envolvendo o solo de Criciúma

σ_d (MPa)	Valores do Módulo de Resiliência (MPa)						
	Solo 3	CTI73	CTI55	CTI37	CTE73	CTE55	CTE37
0,02	154,29	116,17	223,43	138,70	208,69	190,74	207,12
0,04	142,63	110,77	205,80	134,99	154,26	165,58	182,26
0,05	139,07	109,09	200,42	133,82	139,96	158,20	174,91
0,07	133,87	106,59	192,58	132,07	120,86	147,70	164,38
0,11	127,19	103,34	182,53	129,76	99,24	134,69	151,23
0,14	123,76	101,64	177,38	128,54	89,34	128,22	144,65
0,21	118,20	98,85	169,06	126,52	74,86	118,04	134,22

De acordo com os resultados apresentados pelas amostras realizadas com o solo de Criciúma observa-se que nem todas as misturas obtiveram valores de M_R superiores ao do solo. A mistura composta por 30% de cacos de tijolo (CTI73) apresentou resultados inferiores para todas as tensões desvio.

Observando os gráficos das Figuras 4.37 e 4.38, percebe-se que as variações na inclinação da linha Módulo de Resiliência x Tensão Desvio foram menores que as variações apresentadas pelas misturas realizadas com o solo de Tubarão.

A partir dos dados obtidos verificou-se que, de um modo geral, as misturas compostas por cacos de telhas continuaram apresentando comportamentos modulares superiores às misturas compostas por cacos de tijolos.

4.3.4.3 Deformações permanentes das misturas solicitadas a cargas repetidas

A partir do ensaio triaxial de cargas repetidas, para corpos de prova moldados nas umidades ótimas com a energia de compactação Proctor Intermediário, pôde-se verificar o comportamento da deformação permanente das misturas com relação ao número de aplicações de carga. Na Tabela 4.22 e na Figura 4.39 são apresentados os resultados obtidos para as amostras compostas por cacos de tijolo e telha e pelo solo de Criciúma.

Tabela 4.22 – Valores de deformação permanente das misturas com o solo de Criciúma

σ_3	σ_d	Nº ciclos	Deformação acumulada da mistura (%)		
			Solo	CTI55	CTI37
0,21	0,21	200	0,195	0,099	0,159
	0,35	250	0,194	0,101	0,158
	0,53	300	0,195	0,102	0,160
	0,70	350	0,200	0,106	0,166
	1,05	400	0,242	0,138	0,214
	1,4	450	0,275	0,176	0,261
	2,1	500	0,310	0,217	0,310

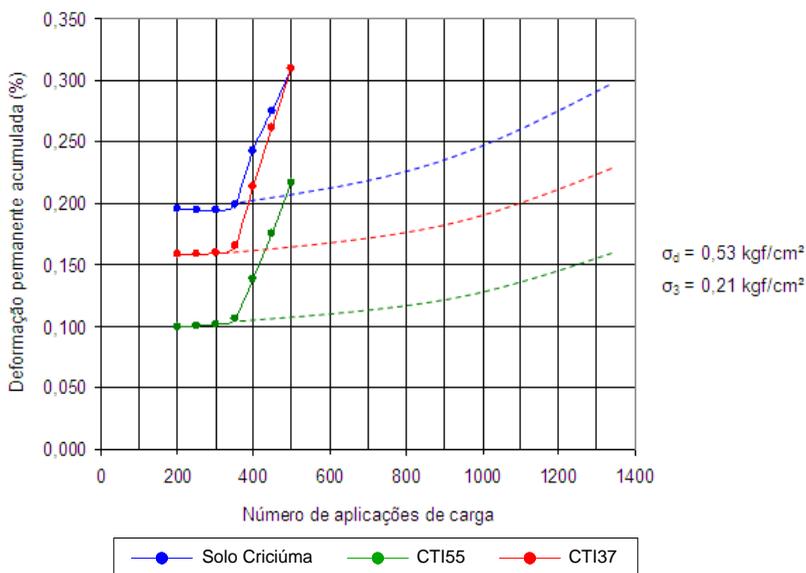


Figura 4.39 – Comportamento da deformação permanente das misturas com o solo de Criciúma

De acordo com os resultados apresentados, o melhor comportamento com relação à deformação permanente foi obtido pela mistura realizada com 50% de cacos de tijolo (CTI55). Diante de uma tensão confinante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$ e uma tensão desvio de $0,53 \text{ kgf/cm}^2$, esta mistura apresentou, para 300 aplicações de carga, uma deformação de aproximadamente 0,1%, com relação à altura inicial do seu corpo de prova.

Comparando os resultados obtidos pela mistura CTI55 e pela amostra composta por apenas solo, verifica-se que os cacos de tijolo atuaram de forma positiva nas misturas, melhorando as características resilientes do solo de Criciúma. Porém, as deformações apresentadas pela mistura, para o nível de tensão e para o número de aplicações de carga realizado, ainda são elevadas, o que pode comprometer a utilização deste material em camadas de base.

A mistura composta por 70% de cacos de tijolos apresentou uma deformação de, aproximadamente 0,31%, com relação à altura inicial do seu corpo de prova. Deve-se levar em consideração que foi aplicado um estado de tensão a partir de $1,05 \text{ kgf/cm}^2$, que dificilmente existirá no campo. Portanto, estas misturas não deverão apresentar problemas de deformação permanente.

O ensaio triaxial de cargas repetidas, para corpos-de-prova moldados nas umidades ótimas com a energia de compactação Proctor Intermediário, também foi executado nas misturas realizadas com o solo de Tubarão. Na Tabela 4.23 e na Figura 4.41 são apresentados os resultados de deformação permanente obtidos para as amostras compostas por 50% de cacos de telha e por 50% do solo de Tubarão (TTE55).

Para melhor visualizar o comportamento das misturas solo-agregado diante da deformação permanente, optou-se por comparar os valores apresentados na Tabela 4.21 com os valores obtidos por Pérez Espinosa (1987), no ensaio triaxial de cargas repetidas, para uma brita gnássica utilizada numa camada de base. Na Figura 4.40 é apresentada a evolução da deformação permanente com o número de aplicações de carga no ensaio triaxial de uma brita, segundo Pérez Espinosa.

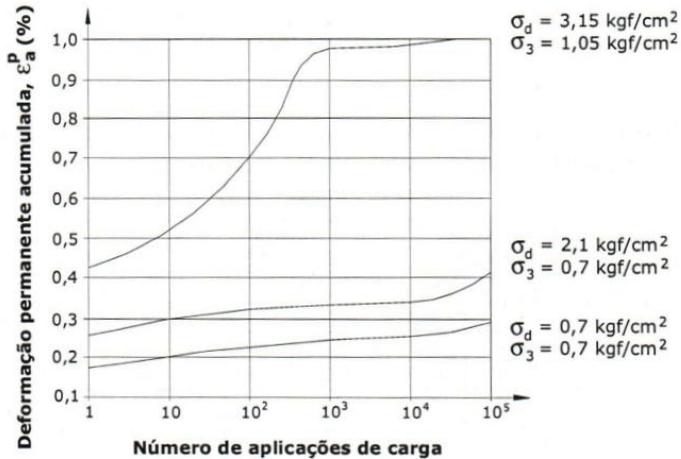


Figura 4.40 – Evolução da deformação permanente com o número de aplicações de carga no ensaio triaxial de uma brita (PÉREZ ESPINOSA, 1987)

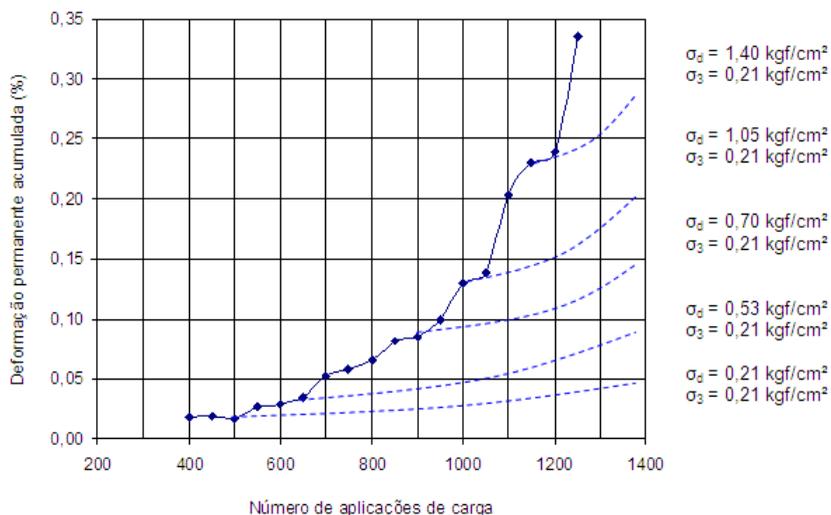


Figura 4.41 – Comportamento da deformação permanente da mistura TTE55

Analisando os resultados obtidos pela mistura TTE55, verifica-se que este material apresenta um melhor comportamento diante das deformações permanentes que a mistura com o solo de Criciúma. Com uma tensão confinante de $0,21 \text{ kgf/cm}^2$ e uma tensão desvio de $0,53 \text{ kgf/cm}^2$, esta mistura apresentou, para 650 aplicações de carga, uma deformação de aproximadamente $0,035\%$, com relação à altura inicial do seu corpo de prova.

Ao final do ensaio e para a tensão desvio de $1,05 \text{ kgf/cm}^2$, este material apresentou uma deformação de $0,24\%$ na altura inicial do seu corpo de prova, para uma quantidade de apenas 1.200 aplicações de carga, tendendo assim para a ruptura da amostra.

Quando são comparados os resultados obtidos pela mistura TTE55 com os resultados de deformação permanente de uma brita graduada, observa-se que as deformações nas misturas são maiores que na brita. Porém, ao avaliar estes materiais nos mesmos níveis de tensão, verifica-se que a mistura apresenta valores de deformação compatíveis com os da brita. No entanto, quando as tensões são aumentadas, a mistura tende ao colapso com um número de aplicações de carga bem inferior que a brita graduada.

Tabela 4.23 – Valores de deformação permanente da mistura TTE55

σ_3	σ_d	Nº ciclos	Altura corpo de prova		Deformação (cm)	Deformação acumulada (%)
			Inicial	Final		
0,21	0,21	400	20,320	20,316	0,00369	0,018
	0,21	450	20,320	20,316	0,00375	0,018
	0,21	500	20,320	20,316	0,00352	0,017
	0,35	550	20,320	20,314	0,00553	0,027
	0,35	600	20,320	20,314	0,00596	0,029
	0,35	650	20,320	20,313	0,00708	0,035
	0,53	700	20,320	20,309	0,01066	0,052
	0,53	750	20,320	20,308	0,01191	0,059
	0,53	800	20,320	20,307	0,01344	0,066
	0,53	850	20,320	20,303	0,01659	0,082
	0,53	900	20,320	20,303	0,01732	0,085
	0,70	950	20,320	20,300	0,02015	0,099
	0,70	1000	20,320	20,294	0,02637	0,130
	0,70	1050	20,320	20,292	0,02809	0,138
	1,05	1100	20,320	20,279	0,04129	0,203
	1,05	1150	20,320	20,273	0,04676	0,230
	1,05	1200	20,320	20,271	0,04857	0,239
	1,40	1250	20,320	20,252	0,06811	0,335

Diante dos resultados apresentados conclui-se que, assim com nas misturas com o solo de Criciúma, as deformações apresentadas pela mistura com o solo de Tubarão, para os níveis de tensão e para o número de aplicações de carga realizados, são elevadas. A utilização das misturas solo-agregado em camadas de base pode acarretar em problemas no pavimento, como afundamentos de trilha de roda, por exemplo. Porém, não pode ser descartada a utilização destas misturas em camadas de sub-base, onde os efeitos causados pelas aplicações de cargas são inferiores aos efeitos absorvidos pela camada de base.

5 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DO TRECHO EXPERIMENTAL

Um dos objetivos deste trabalho é realizar o dimensionamento da estrutura de um pavimento de rodovia ou rua de baixo volume de tráfego utilizando uma mistura composta por solo e material cerâmico. Para isto, obteve-se junto à Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Tubarão, um projeto de implantação e pavimentação para a Rua Hilário José de Mello, que possui uma extensão de 456 m e está localizada no município de Tubarão (Figura 5.1).

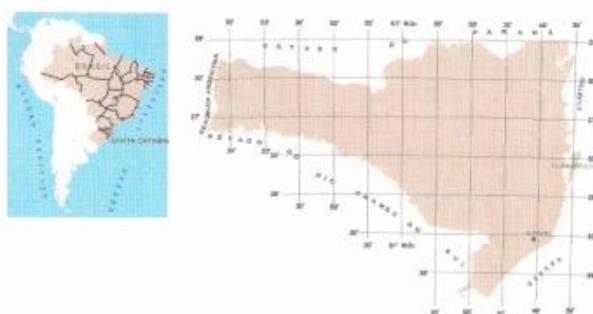


Figura 5.1 – Localização da Rua Hilário José de Mello

5.1 PROJETO PROPOSTO PELA PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO

O cálculo de dimensionamento da estrutura do pavimento foi obtido através do Projeto Básico de Engenharia – Volume 2 (PMT, 2004), no qual é descrito a relação de todos os dados utilizados. São apresentados os estudos de volume de tráfego, o cálculo do número de operações do eixo padrão “N”, os estudos geotécnicos e o dimensionamento segundo Método DNER (DNER, 1979).

5.1.1 Volume de tráfego

No presente estudo é apresentado o volume médio anual (VDMA), obtido a partir das contagens feitas pela Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal de Tubarão em contagens efetuadas nos meses março/abril e setembro/outubro de 2003.

Para determinação do tráfego futuro foram utilizadas taxas de crescimento baseadas em projeções para Santa Catarina. Para veículos de passeio utilizou-se 3,11% e para veículos comerciais, 4,31% (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004). Na Tabela 5.1 são apresentadas as projeções do tráfego futuro que foram calculadas através da fórmula abaixo:

$$T_{\text{futuro}} = T_0 (1 + i)^n$$

onde:

T_0 = Tráfego no ano base (2004);

i = Taxa de crescimento de tráfego;

n = Número de anos transcorridos entre o ano base e o ano n.

Tabela 5.1 – Projeção do tráfego futuro

Ano	Autom.	Ônibus	Caminhões			Total
			Simples	Duplo	Reb. e Semi Reb.	
2004	328	8	15	17	5	373
2005	338	8	15	17	5	383
2006	349	8	16	17	5	395
2007	359	9	16	18	6	408
2008	371	9	16	18	6	420
2009	382	9	17	18	6	432
2010	394	10	17	19	6	446
2011	406	10	18	19	7	460
2012	419	11	18	19	7	474
2013	432	11	19	20	7	489

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO (2004)

5.1.2 Cálculo do número de operações do eixo padrão “N”

Para a realização do cálculo do número “N” foram utilizadas as seguintes informações:

- Período: 10 anos
- $N = 365 \times F_p \times F_r \sum F_{vi} \times V$
- $F_p = 2$ (1 pista)
- $F_r = 1,0$ (Fator Climático)
- $F_v =$ Fator de Veículos ($F_v = \sum F_{vi} \times V_i$)

Os fatores de equivalência ao Eixo padrão foram adotados de acordo com as especificações do DER/SC (Tabela 5.2). Para a Rua Hilário José de Mello o número de operações do eixo padrão ficou definido como $N = 3,39 \times 10^5$.

Tabela 5.2 – Fatores de Conversão do Eixo Padrão

	0	0,79	1,149	4,767	12,078				
Ano	Aut.	Ônib.	Cam. Simp.	Cam. Duplos	Cam. Reboq.	Total	(365xFr)/Fp (Fp=2/Fr=1)	Σ (VixxFri)	Tráfego Final
2004	328	8	15	17	5	373	183	165	30.192
2005	338	8	15	17	5	383	183	165	30.192
2006	349	8	16	17	5	395	183	166	30.402
2007	359	9	16	18	6	408	183	184	33.630
2008	371	9	16	18	6	420	183	184	33.630
2009	382	9	17	18	6	432	183	185	33.840
2010	394	10	17	19	6	446	183	190	34.857
2011	406	10	18	19	7	460	183	204	37.277
2012	419	11	18	19	7	474	183	204	37.422
2013	432	11	19	20	7	489	183	210	38.504

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO (2004)

5.1.3 Estudos geotécnicos

Os estudos geotécnicos foram desenvolvidos de forma a se conhecer as características dos materiais constituintes do subleito, determinar suas características físicas e mecânicas. A Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal de Tubarão realizou sondagens para a obtenção das amostras que foram classificadas de acordo com a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Classificação do material do subleito

Estaca	Lado	Material	ISC (%)
5	LD	Argila Arenosa	9,6
15	LE	Argila Arenosa	9,1

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO (2004)

Os dados da Tabela 5.3 são as únicas informações sobre o subleito apresentadas no projeto da prefeitura (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004). Verifica-se que se trata de uma quantidade pequena de amostras coletadas, além de uma caracterização muito vaga dos materiais.

Como a terraplenagem envolve o uso de solos, houve por bem tratar estatisticamente todos os solos. A determinação do intervalo de aceitação dos valores computados foi feita através de:

- Limite superior: $X + t \cdot S$
- Limite Inferior: $X - t \cdot S$

onde:

X = Média aritmética dos valores analisados;

S = Desvio Padrão;

t = Variável em função do n° de amostras analisadas (Tabela 5.4);

N = N° de amostras.

Tabela 5.4 – Valores de t

N	t
3	1,00
4	1,50
1 - 2	2,00
7 - 19	2,50
≥ 20	3,00

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO (2004)

Como todos os valores estão dentro do intervalo calculado não foi preciso nova análise. A partir dos valores de índice de suporte verificou-se que esta rua se trata de um segmento homogêneo quanto ao tipo de solo. Para a determinação do ISC de projeto (ISCp) foram encontrados os seguintes valores estatísticos:

$$\text{ISCp} = X - K \cdot S / (N)^{1/2}$$

$K = 1,29$ (valor do coeficiente usado, referente ao intervalo de confiança de 90%;

$$X_{\text{Médio}} = 10,04;$$

$$S = 1,21;$$

$$N = 16;$$

$$\text{ISCp} = 9,5\%.$$

5.1.4 Dimensionamento segundo método DNER

O dimensionamento das diversas camadas constituintes do pavimento foi realizado mediante aplicação do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER, de autoria do Eng^o Murilo Lopes de Souza. De acordo com o projeto proposto pela Prefeitura de Tubarão (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004), a estrutura do pavimento da Rua Hilário José de Mello deve possuir a seguinte estrutura:

- Revestimento: 5,0 cm de concreto betuminoso usinado quente;
- Base: 15,0 cm de brita graduada;
- Sub-Base: 20,0 cm de seixo bruto.

5.2 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZANDO A MISTURA SOLO-AGREGADO

O objetivo deste estudo é tentar substituir uma parte dos materiais utilizados na estrutura do pavimento pela mistura solo-agregado proposta neste trabalho. Para isto foram utilizados os dados levantados pela Prefeitura de Tubarão, contidos no Projeto Básico de Engenharia (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004).

Como forma de revisar os valores apresentados neste projeto optou-se em realizar um novo cálculo de dimensionamento para estrutura

do pavimento analisado. Utilizando a mesma metodologia e os mesmos valores de “N” e de CBR ou seja, N = 16 e CBR = 9,5%, obtiveram-se os seguintes resultados:

- Espessura total do pavimento a proteger o subleito (Ht):

$$Ht = 77,67 N^{0,0482} ISC^{-0,598}$$

$$Ht = 34 \text{ cm}$$

- Espessura total do pavimento acima da sub-base, utilizando CBR = 20% (H₂₀):

$$Ht = 77,67 N^{0,0482} ISC^{-0,598}$$

$$Ht = 21 \text{ cm}$$

Adotando-se uma espessura para a camada de revestimento de 4,0 cm de CAUQ e seguindo a mesma metodologia de dimensionamento obteve-se a seguinte estrutura para o pavimento analisado:

- Revestimento: 4,0 cm de concreto betuminoso usinado quente;
- Base: 13,0 cm de brita graduada;
- Sub-Base: 15,0 cm de seixo bruto.

De acordo com os valores apresentados verifica-se uma diferença entre a estrutura dimensionada neste trabalho e a estrutura proposta pela prefeitura para o pavimento da Rua Hilário José de Mello. Porém, para a análise comparativa entre a estrutura tradicional e a estrutura composta pela mistura solo-agregado, vamos utilizar a estrutura dimensionada pela Prefeitura Municipal de Tubarão.

5.2.1 Dimensionamento segundo método DNER

Para os estudos de dimensionamento da nova estrutura do pavimento, optou-se em utilizar como camada de sub-base uma mistura composta pelo solo do município de Tubarão, haja vista que a Rua Hilário José de Mello está localizada neste município. A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de CBR e Módulo de Resiliência decidiu-se utilizar a mistura composta por 50% de solo e 50% de cacos de telhas.

Para o cálculo do dimensionamento consideraram-se os dados do projeto da Prefeitura de Tubarão (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004), ou seja, um CBR de 9,5% para o subleito e N = 3,39 x 10⁵. Para a camada de sub-base, que será composta pela mistura solo-agregado, foi considerado um CBR de 32%. A opção de utilizar esta mistura como camada de sub-base, foi definida levando em consideração a

especificação do DNER, que diz que um material para ser utilizado como camada de base de um pavimento flexível necessita possuir um CBR mínimo de 80%.

As espessuras das camadas do pavimento foram definidas através da metodologia de dimensionamento da estrutura de pavimentos flexíveis proposto por Murillo Lopes de Souza e regulamentado pelo DNER em 1979 (SOUZA, 1981). Através desta metodologia obtiveram-se os seguintes resultados:

- Revestimento: 4,0 cm de concreto betuminoso usinado quente;
- Base: 13,0 cm de brita graduada;
- Sub-Base: 15,0 cm de mistura solo-agregado.

5.2.2 Análise mecanicista da solução proposta para a estrutura do pavimento

Este dimensionamento foi realizado a partir dos conceitos da Mecânica dos Pavimentos e através do emprego do software EVERSTRESS.

Para análise de tensão/ deformação, foram adotados os seguintes parâmetros gerais comuns a todas as estruturas:

- Pressão de contato pneu/ pavimento (p) = 5,8 kgf/cm²;
- Carga aplicada por roda, eixo simples de roda dupla (P) = 2050 kgf;
- Espaçamento entre rodas = 32cm e raio de área de contato = 10,6 cm;
- Módulo de Resiliência (MR) do revestimento = 30000 kgf/cm²;
- Coeficiente de Poisson (μ_1) do revestimento = 0,27;
- Módulo de Resiliência (MR) da base de brita graduada = 2000 kgf/cm²;
- Coeficiente de Poisson (μ_2) da base = 0,35;
- Módulo de Resiliência (MR) da Sub-base de mistura M5 = 1900 kgf/cm²;
- Coeficiente de Poisson (μ_3) da Sub-base = 0,35;
- Módulo de Resiliência (MR) do subleito: 700 kgf/cm²;
- Coeficiente de Poisson (μ_4) do subleito = 0,40.

Através dos valores de tensão no topo do subleito (σ_{vsl}), deflexão no topo do revestimento (δ) e deformação específica (ϵ_e) na fibra inferior do

revestimento foram verificados os números “N” utilizando as seguintes equações:

- Tensão admissível no topo do subleito, Heukelom e Klomp (1962 apud MEDINA; MOTTA, 2005):

$$\sigma_v = 0,006 \cdot M_R / (1 + 0,7 \log N)$$
- A deflexão máxima (δ) é calculada pela correlação (MEDINA; MOTTA, 2005):

$$\log \delta = 3,148 - 0,188 \log N$$
- A vida de fadiga do revestimento foi verificada através do modelo da curva de fadiga para mistura convencional do DNER apresentada em Trichês et al. (2008):

$$Nf = 2,808 \times 10^{15} (1/\epsilon_t)^{4,173}$$

A geometria e os parâmetros elásticos da estrutura dos pavimentos analisados estão apresentados esquematicamente na Figura 5.2 (CORRÊA, 2008).

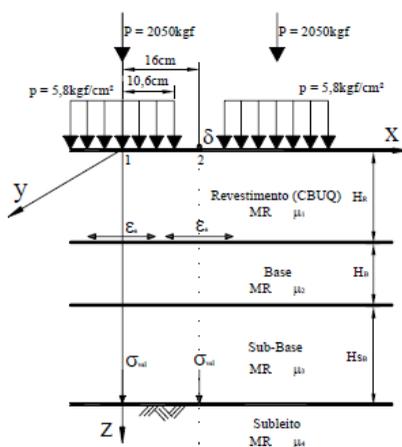


Figura 5.2 – Estrutura de referência para o cálculo das tensões e deformações (CORRÊA, 2008)

A estrutura obtida através do Método do DNER foi submetida aos cálculos das tensões e deformações no pavimento, que estão apresentados na Tabela 5.5. Através dos resultados apresentados pode-se concluir que a estrutura utilizando a mistura solo-agregado como sub-base do pavimento atenderá a solicitação imposta pelo tráfego.

Tabela 5.5 – Resultados de tensões e deformações na estrutura do pavimento

Tensão (σ_{vsl}) Deformação (ϵ_e) Deflexão (δ)	
EVERSTRESS	ADMISSÍVEIS
$\sigma_{vsl} = 0,61 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_{vsl \text{ adm}} = 0,86 \text{ kgf/cm}^2$
$\epsilon_e = 198,46 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$	$\epsilon_{e \text{ adm}} = 246 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$
$\delta = 0,50 \text{ mm}$	$\delta_{\text{adm}} = 1,28 \text{ mm}$

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS: PAVIMENTO TRADICIONAL E PAVIMENTO PROPOSTO

Como forma de comparar os custos necessários para a execução do pavimento proposto neste trabalho e do pavimento indicado pelo Projeto da Prefeitura Municipal de Tubarão optou-se em realizar um estudo comparativo, analisando os valores de cada pavimento.

O orçamento referente à pavimentação da Rua Hilário José de Mello foi obtido através do Projeto Básico de Engenharia – Volume 3 (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2004), no qual são quantificados todos os custos necessários para a execução do pavimento. Na Tabela 5.6 é apresentada a planilha orçamentária, Item Pavimentação, da Rua Hilário José de Mello, de acordo com o projeto da Prefeitura de Tubarão.

Tabela 5.6 – Planilha de custos da Rua Hilário José de Mello

Serviço	Un.	Quant.	Custo Unit. (R\$)	Custo Parcial (R\$)
Regularização do Subleito 100% PN	m ²	3.854,47	0,62	2.389,77
Camada de Seixo Bruto	m ³	770,89	26,80	20.659,85
Camada de Brita Graduada	m ³	523,43	61,20	32.033,92
Imprimação	m ²	3.193,05	2,70	8.621,24
Pintura de Ligação	m ²	3.193,05	0,60	1.915,83
Camada Concreto Asfáltico Usinado a Quente	t	399,13	158,60	63.302,02
TOTAL PARCIAL				128.922,62

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO (2004)

Como forma de atualizar os valores monetários para fins de comparação com os demais materiais utilizados nesta pesquisa, optou-se por realizar o reajustamento dos custos unitários dos serviços analisados. Este cálculo foi executado de acordo com os índices de reajustamento de preços do Departamento de Infra-estrutura de Transportes – DNIT (2011), que leva em consideração os dados obtidos através da Fundação Getúlio Vargas. Como data base foi utilizado o mês de maio do ano de 2004.

Na Tabela 5.7 é apresentado o Custo Total Parcial com o reajustamento realizado para o mês de fevereiro de 2011.

Tabela 5.7 – Reajustamento do Custo Total Parcial da Rua Hilário José de Mello

Descrição	Custo Parcial (R\$)
Custo Total Parcial PMT (2004)	128.922,62
Reajuste (Pavimentação = 53,24%)	68.638,40
Total Parcial Reajustado	197.561,02

A solução para a estrutura do pavimento da Rua Hilário José de Mello, proposta neste trabalho, é de substituir a camada de seixo bruto por uma camada, com mesma espessura, de uma mistura realizada entre o solo coletado no município de Tubarão e cacos de telhas fragmentados.

Para que se torne possível a comparação entre a estrutura já orçada (Tabela 5.7) e a estrutura proposta neste trabalho, é necessário a determinação do custo unitário da camada a ser executada com a mistura solo-agregado. Como ainda não existe uma composição de custos para este serviço, foi necessário realizar um levantamento, quantificando e orçando todas as etapas necessárias para a execução desta mistura. Na Figura 5.3 é apresentado um fluxograma relacionando os serviços necessários para a execução da camada de pavimento com a Mistura TTE55.

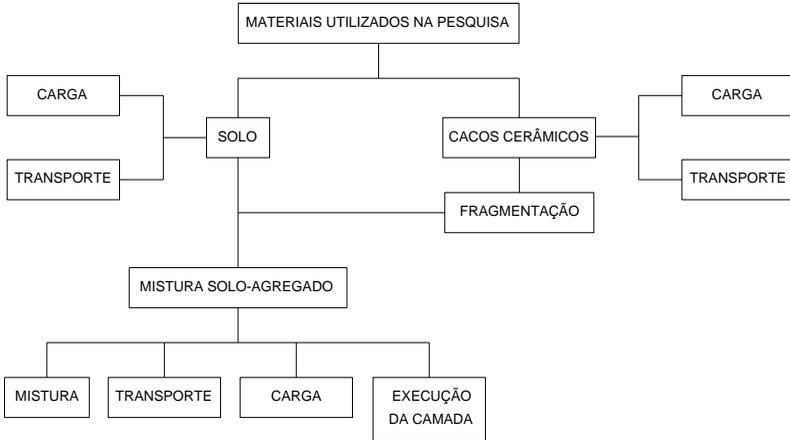


Figura 5.3 – Serviços para a realização da camada de pavimento com a mistura TTE55

Com base no fluxograma apresentado na Figura 5.3 realizou-se um levantamento dos serviços necessários para a execução da mistura solo-agregado. Para os serviços de carga, trituração dos cacos e mistura dos materiais foi realizado um levantamento através da observação do desempenho dos equipamentos em campo, onde foi analisado e determinado o tempo necessário para a execução de cada serviço (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Serviços necessários para a realização da mistura solo-agregado

Serviço	Equipamento necessário	Materiais envolvidos	Tempo estimado (horas)
		Solo	5,0
Carregamento	Carregadeira de pneus	Cacos de telha	5,0
		Mistura TTE55	10,0
Espalhamento	Carregadeira de pneus	Cacos de telha	5,0
Fragmentação	Rolo pé-de-carneiro	Cacos de telha	1,0
Mistura dos materiais	Carregadeira de pneus	Solo e cacos de telha	10,0

Para melhor avaliar os custos da utilização da mistura solo-agregado, optou-se por separar os custos necessários para realização da mistura, dos

custos necessários para a execução da camada de sub-base utilizando esta mistura. Na Tabela 5.9 é apresentada uma composição de custos para a realização da mistura TTE55.

Tabela 5.9 – Composição de custos para a realização da mistura TTE55

Serviço	Materiais envolvidos	Quantidade	Custo Unit. (R\$)	Custo Parcial (R\$)
Carga	Solo	289,09 m ³	1,86	537,71
	Cacos de telha	289,09 m ³	1,86	537,71
	Mistura TTE55	578,18 m ³	3,72	2.150,83
Transporte	Solo	289,09 m ³	5,69	1.644,92
	Cacos de telha	289,09 m ³	9,25	2.674,08
	Mistura TTE55	578,18 m ³	0,70	404,73
Espalhamento	Cacos de telha	289,09 m ³	1,86	537,71
Fragmentação	Cacos de telha	289,09 m ³	0,62	179,24
Mistura materiais	Solo e cacos de telha	578,18 m ³	1,86	1.075,41
Custo Total				9.742,33

Os custos unitários dos serviços de carga, espalhamento, fragmentação e mistura dos materiais, foram calculados através dos preços de hora-máquina, obtidos a partir do Referencial de Preços do DEINFRA (2005). Como custo da hora produtiva da carregadeira de pneus, considerou-se o valor de R\$ 107,63, já para o rolo compactador, determinou-se o valor de R\$ 180,94.

Os serviços de transporte também tiveram seus custos unitários calculados a partir do Referencial de Preços do DEINFRA (2005). Para a realização dos cálculos, considerou-se como Distância Média de Transporte (DMT) para o solo, a distância de 10 km e, para os cacos cerâmicos, a distância de 26 km. De posse destes valores foram utilizadas as seguintes equações:

- Transporte local com caminhão basculante: $Y = 0,33 \cdot X(1) + 0,41 \cdot X(2) + 0,68$
- Transporte comercial com caminhão basculante: $Y = 0,27 \cdot X(1) + 0,36 \cdot X(2)$

onde:

$X(1)$ = Distância percorrida em rodovia pavimentada (Km);

$X(2)$ = Distância percorrida em rodovia não pavimentada (Km);

$Y = \text{Custo do transporte (R\$/t)}$.

Os custos para o serviço de execução da camada de sub-base, utilizando a mistura TTE55, foram obtidos a partir do Sistema de Custos Rodoviários (DNIT, 2010). Como não existe uma composição de custos oficial para este serviço, optou-se por utilizar a composição de custos do serviço “*Base estabilizada granulométricamente com mistura solo - brita BC*”, haja vista que a execução dos dois serviços é bastante semelhante.

Segundo o Sistema de Custos Rodoviários, o custo unitário para a execução da camada de base estabilizada granulométricamente é de R\$ 7,94/m³, porém, como este preço é referente ao mês de julho de 2010, realizou-se a atualização do valor de acordo com os índices de reajustamento (DNIT, 2011). O valor atualizado do serviço de execução da camada de sub-base foi de R\$ 8,13/m³.

Com base nos valores apresentados na Tabela 5.9 e no custo para a execução da camada de sub-base, determinou-se o valor necessário para a execução de uma camada de pavimento utilizando a mistura TTE55 (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Planilha orçamentária do pavimento proposto para a Rua Hilário José de Mello

Serviço	Un.	Quant.	Custo Unit. (R\$)	Custo Parcial (R\$)
Regularização do Subleito 100% PN	m ²	3.854,47	0,95	3.662,09
Camada de Mistura Solo-agregado (TTE55)	m ³	578,18	24,98	14.442,94
Camada de Brita Graduada	m ³	453,64	93,78	42.543,67
Imprimação	m ²	3.193,05	4,14	13.211,18
Pintura de Ligação	m ²	3.193,05	0,92	2.935,82
Camada Concreto Asfáltico Usinado a Quente	t	319,3	243,04	77.602,24
TOTAL PARCIAL				154.397,93

De acordo com os valores apresentados na Tabela 5.10 pode-se concluir que após a substituição da camada de seixo bruto pela camada da mistura solo-agregado, o Custo Total Parcial desta estrutura sofreu uma redução de R\$ 43.163,09, ou seja, uma economia superior a 20 %.

Realizando um cálculo da disponibilidade de resíduo de cerâmica vermelha para a utilização em obras de pavimentação, chega-se a uma quantidade elevada de camadas de pavimentos que podem ser executadas.

Levando em consideração o volume de cacos de tijolos e telhas gerados mensalmente pela região de Morro da Fumaça, teríamos uma quantidade de material cerâmico suficiente para pavimentar, aproximadamente, 45 ruas com a mesma extensão da Rua Hilário José de Mello por mês. Se todo este volume de material cerâmico fosse aplicado em uma única obra, poderiam ser executados, aproximadamente, 8 km de camada de sub-base com 20 cm de espessura no mesmo período.

Diante dos dados apresentados conclui-se que a utilização deste resíduo, além de proporcionar uma economia financeira, também se mostra uma alternativa bastante interessante ambientalmente, haja vista a quantidade de material cerâmico reaproveitado.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o comportamento das misturas solo-agregado visando seu emprego em camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego. Teve ainda como objetivos decorrentes a verificação da eficiência de rolos compactadores para produção de agregados cerâmicos, a determinação da dosagem recomendada para as misturas solo-agregado e a conseqüente avaliação de seu comportamento, além da realização de um estudo para o dimensionamento de um pavimento de rodovia ou rua de baixo volume de tráfego utilizando esta mistura. Levando-se em consideração os resultados apresentados nos Capítulos 3 e 4 desta dissertação, pode-se concluir que estes objetivos foram alcançados.

São apresentadas neste capítulo as principais conclusões deste trabalho, bem como, algumas sugestões para o desenvolvimento de futuras pesquisas. Vale ressaltar que todas as conclusões são restritas ao universo dos materiais utilizados e dos ensaios realizados.

6.1 CONCLUSÕES

A partir do estudo desenvolvido puderam-se chegar as seguintes conclusões:

- a) Diante dos estudos realizados e dos resultados obtidos pode-se concluir que as misturas entre solo e agregados obtidos de resíduos da fabricação de tijolos e telhas podem ser utilizadas em camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego;
- b) Através da distribuição granulométrica dos cacos de telha verificou-se que, assim como o ocorrido com os cacos de tijolos, a porcentagem passante do material fragmentado com o rolo pé-de-carneiro é maior que a do material fragmentado com o rolo liso. Diante disto, conclui-se que o rolo pé-de-carneiro proporciona uma maior trituração do material cerâmico que o rolo liso;
- c) Constatou-se a eficiência dos rolos compactadores na fragmentação dos cacos cerâmicos e determinou-se que 15 passadas do rolo pé-de-carneiro é o procedimento ideal

para a obtenção de um agregado com distribuição granulométrica compatível para a utilização em misturas com solo;

- d) Observou-se que em todas as misturas realizadas ocorreu uma redução da massa específica aparente seca e um aumento da umidade ótima, quando comparadas com as amostras de solo. Com relação ao ensaio de CBR, estas misturas apresentaram um aumento no valor deste índice e uma redução no valor da expansão;
- e) Através da análise da granulometria das misturas após o ensaio de compactação verificou-se que, independente do tipo de solo, as misturas que mais apresentaram quebra dos cacos cerâmicos foram as misturas compostas por 70% de material cerâmico, devido a quantidade de cacos presentes nas misturas;
- f) A partir da análise dos resultados dos ensaios de Compactação e CBR pôde-se verificar que os cacos de telhas apresentaram melhor comportamento, quando incluídos nas misturas com solo, que os cacos de tijolos;
- g) Através do ensaio de Módulo de Resiliência observou-se que as misturas realizadas com 50% de material cerâmico apresentaram um bom comportamento resiliente, superando os resultados obtidos pelo solo e pelas demais misturas. Isto é muito importante para minimizar deformações resilientes que podem levar a estrutura do pavimento ao rompimento por deformação permanente;
- h) De acordo com os resultados obtidos através do ensaio de CBR determinou-se que a dosagem ideal para as misturas compostas com o solo de Gravatal é de 70% de solo e 30% de cacos de telhas;
- i) Analisando o comportamento das misturas realizadas com os solos de Tubarão e Criciúma nos ensaios de CBR e de Módulo de Resiliência concluiu-se que a dosagem recomendada para estas misturas é de 50% de solo e 50% de cacos de telhas;
- j) Verificou-se, através de cálculos de dimensionamento, que a mistura solo-agregado pode ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego e que a sua utilização pode gerar uma economia superior a 20 % no custo final da estrutura, além de reaproveitar uma grande quantidade de material cerâmico.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com o objetivo de dar continuidade a este trabalho e buscar melhorias nos estudos relacionados à pavimentação são consideradas as seguintes sugestões:

- a) Construir pistas experimentais utilizando as misturas pesquisadas, onde seja possível realizar o monitoramento e a análise do comportamento do pavimento com o passar do tempo;
- b) Intensificar os estudos sobre o comportamento resiliente e a deformação permanente das misturas;
- c) Dar continuidade a este trabalho pesquisando sobre a utilização de novas misturas solo-agregado, utilizando outros tipos de materiais cerâmicos e novos tipos de solo, estendendo com isso, o universo analisado;
- d) Desenvolver e analisar técnicas de execução de camadas de pavimentos utilizando menores quantidades de material cerâmico, com o objetivo de facilitar a utilização deste material e aumentando o rendimento das misturas.

REFERÊNCIAS

ALTHEMAN, Dener. **Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil**. Departamento da Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Relatório Final das atividades de Iniciação Científica, 2002.

AMARAL, Simonne da C. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimento de pavimento**. 2004. 174 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica no Brasil: números do setor – cerâmica vermelha**. São Paulo: Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. Acesso em: 23 ago. 2006.

_____. **Informações técnicas: processo de fabricação – tratamento térmico**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. Acesso em: 23 ago. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: solo: determinação do Índice de Suporte Califórnia. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CERÂMICA. **Setor**: dados oficiais. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>>. Acesso em: 23 ago. 2008.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO – ANFACER. **História da cerâmica**: origem da cerâmica no Brasil. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>>. Acesso em: 23 ago. 2006.

BASTOS, G.D.A.; CERRI, J.A. Avaliação do desempenho de argamassa de assentamento e revestimento produzidas com resíduos de construção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Curitiba, 2004. **48º CBC**. São Paulo: ABC, 2004. ref. 19-15. 10p. 1 CD-ROM.

BEZERRA NETO, R.S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecânico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

BODI, J. Experiência brasileira com entulho reciclado na pavimentação. In: Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental. **Anais...** São Paulo, abr. 1997. p. 56-63.

BODI, J. et al. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: 29ª. Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, 1995. **Anais...** Cuiabá: MT. p. 408-435.

BRITO FILHO, J.A. Cidade versus entulho. In: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1999. p. 56-67.

CARNEIRO, A.P. et al. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. 312 p. (Projeto Entulho Bom).

CAVALCANTE, Reinaldo H. et al. **Estudos para aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha de Sergipe na pavimentação rodoviária**. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Goiânia, 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA.
Resolução nº 307. Ministério do Meio Ambiente, 5 jul. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 23 abr. 2008.

CORRÊA, J.F. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA. **Referencial de Preços**: obras rodoviárias. Departamento Estadual de Infra-estrutura. 2005. Disponível em:
<<http://www.deinfra.sc.gov.br/getReferencial.do?nuSeq=5&cdPublicacao=169>>. Acesso em: 20 jul. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
Pavimentação: Base estabilizada granulometricamente – DNER-ES 303. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – DNER-ME 049**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Solos**: determinação do módulo de resiliência – DNER-ME 131. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER ME 256/94**: solos compactados com equipamento miniatura: determinação da perda de massa por imersão. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER ME 258/94**: solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Sistema de custos rodoviários: SICRO 2**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Março, 2011. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/servicos/sicro/manual-de-custos-rodoviarios>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Índices de reajustamentos de obras**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Outubro, 2010. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/servicos/indices-de-reajustamentos-de-obras/indices-de-reajustamentos-de-obras-rodibviarias>>. Acesso em: 29 out. 2010.

DIAS, João Fernando. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para o seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. São Paulo, 2004. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

DIAS, João Fernando; DORNELAS, Ricardo Cruvinel. **A construção e o desenvolvimento sustentável**. 2008. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/emextensao/article/viewFile/1639/1416>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

DUAILIBI, F.J. Mercado de cerâmica vermelha estrutural. **ABC Informativo**, n. 26, 1999.

DUNCAN, J.M.; MONISMITH, C.L.; WILSON, E.L. Finite element analysis of pavements. **Highway Research Record**, v. 228, p. 18-33, 1968.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Recycled materials in European highway environments: uses, technologies and policies**. Federal Highway Administration. Washington, 2000. Disponível em: <www.fhwa.dot.gov/PAVEMENT/recycling/recintro.cfm>. Acesso em: 23 abr. 2008.

FERREIRA, J.A.H.M. **Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

- GRECO, Jisela Aparecida Santanna. **Construção de estradas e vias urbanas**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Disponível em: <<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Projeto%20de%20misturas.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2008.
- GRIM, R.E. Applied clay mineralogy. In: TOMAZETTI, R.R. **Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**, 2006. 486p Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.
- INSTITUTE PUBLIC WORKS ENGINEERING AUSTRALIA – NSW DIVISION. **Specifications for Supply of Recycled Material for Pavements, Earthworks and Drainage**. Institute Public Works Engineering Australia – NSW Division, 2010.
- IOSHIMOTO, E. Programa de Modernização Tecnológica do Parque Cerâmico de Monte Carmelo. **Relatório**. Maio 1995. 44p.
- JOHN, V.M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm>. Acesso em: Nov. 2006.
- KHALAF, F. M. Recycling of clay bricks as aggregate in asphalt concrete. INTERNATIONAL RILLEN CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona.
- KHALAF, F. M and DEVENNY, A.S. **Recycling of demolished masonry rubble as course aggregate in concrete: review**, *ASCE j. Mater. Civ. Eng.* 16 (4) (2004) 1-10. Disponível em: <<http://www.ascelibrary.org>>. Acesso em: 01 junho 2011.
- LARBI, J.A. et al. Preliminary laboratory investigation of thermally treated recycled concrete aggregate for general use in concrete. Disponível em:

<www.iscowa.org/wascon2000/abstracts/myabstracts02>. Acesso em: 27 maio 2008.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MEDINA, J. de. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 194 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 574 p.

MIRANDA, L.F.R. **Estudos de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. 190 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MOTTA, J.F. et al. **As matérias-primas cerâmicas: parte I: o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos**. Cerâmica Industrial, 2001. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br>>. Acesso em: 27 maio 2008.

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro, 1981. **Anais...** Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, p. 30-41.

_____. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

PÉREZ ESPINOSA, Vicente R. **Ensaio triaxiais de carga retida de uma brita**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1987. 116p.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

PINTO, T.P. Utilização de resíduos de construção: possibilidades de uso em argamassas. SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA EM HABITAÇÃO: DA PESQUISA À PRÁTICA, 1., 1987, São Paulo. **Anais....** São Paulo, 1987. p. 189-193.

POON, C. S. and CHAN, D. **Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick**. Construction and Building Materials 20, 2006. p. 569-577.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO. **Projeto básico de engenharia** Secretaria de Planejamento. Prefeitura Municipal de Tubarão. Tubarão, 2004. v.2.

RIPOLI FILHO, F. **A utilização do rejeito industrial cerâmico - chamote - como fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos: um estudo experimental**. São Paulo, 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S03666913170003000007&script=sci_arttext>. Acesso em: 27 jul. 2006.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1989. v.1.

SCHULZ, R.R.; HENDRICKS, F. **Recycling of masonry rubble: recycling of demolished concrete and masonry**. Part 2. (editado por T. C. Hansen). Londres, E&FN Spon, 1992.

SEBRAE. Rio Grande do Sul. **Manual de cerâmica vermelha**. Porto Alegre, 1995.

SINDICER. **Números da Região de Morro da Fumaça**. Av. Celeste Recco, 414. Morro da Fumaça – SC. 04/2008.

SOUZA, M.L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. IPR/DNER. 3. ed. Rio de Janeiro, 1981.

TRICHÊS, G. et al. **Comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-**

borracha brasileiro. In.: ENCONTRO DE ASFALTO, 19., Rio de Janeiro, RJ. 2008.

VÁZQUES, E. **Projeto entulho bom.** Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2001. p. 22-25.

ZANDONADI, A.R. Cerâmica estrutural. In: **Anuário Brasileiro de Cerâmica.** São Paulo: ABC, 1996. 154 p.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.