



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDOS SOBRE MISTURAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL COM SOLOS PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS

Fagner Ismael Teixeira de Santana

São Cristóvão

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDOS SOBRE MISTURAS DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL COM SOLOS PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTOS

Fagner Ismael Teixeira de Santana

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil como
requisito para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador(a): D.Sc. Erinaldo Hilário Cavalcante

Agência Financiadora: CAPES

São Cristóvão

2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S232e Santana, Fagner Ismael Teixeira de
Estudos sobre misturas de agregados reciclados de resíduos da construção civil com solos para utilização em pavimentos / Fagner Ismael Teixeira de Santana ; orientador Erinaldo Hilário Cavalcante. – São Cristóvão, 2014.
130 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, 2014.

1. Construção civil. - resíduos. 2. Pavimentação - reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Sustentabilidade. I. Cavalcante, Erinaldo Hilário, orient. II. Título.

CDU 628.4.036

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fagner Ismael Teixeira de Santana

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 10 DE ABRIL DE 2014.

BANCA EXAMINADORA:


Dsc. Erinaldo Hilário Cavalcante
Orientador


Dsc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
1º Examinador (Externo)
PPGECA/UFCG


Dsc. Osvaldo de Freitas Neto
2º Examinador (Interno)
PROEC/UFS

Aos meus pais e irmãos, amigos, colegas
e colaboradores que contribuíram para a
concretização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar nos caminhos da vida, me dando força para enfrentar os obstáculos e seguir em frente.

Ao professor Erinaldo Hilário Cavalcante, pelo incentivo, conhecimento, paciência, e pelos materiais e estrutura física que auxiliaram na construção deste trabalho, demonstrando dedicação como orientador e coordenador do PROEC.

Aos professores do PROEC: Gisélia Cardoso, Fernando Albuquerque, Ângela Costa, Cláudia Ruberg, Débora Santos e Suzana Russo, pelo conhecimento interdisciplinar adquirido durante o mestrado.

Aos professores John Kennedy e Adriano Lucena, da UFCG, e ao professor Osvaldo de Freitas, do PROEC, pelas sugestões que contribuíram na realização desta pesquisa.

Aos colegas do mestrado, em especial a Airton e Robson, pelo companheirismo e parceria nos estudos e pesquisas.

Aos técnicos e professores do GeoPav Willame e Washington, pela estrutura física e experiência compartilhadas, e pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos colegas do GeoPav, entre graduandos, mestrandos, doutorandos, bolsistas e voluntários, Guilherme, Paula, Bárbara, Juliana, Alan, David e Gabriel, pelas contribuições em várias etapas da pesquisa.

A José, da EMURB, pela ajuda na obtenção das amostras de solos, e a Victor, mestrando do PROEC, que possibilitou a coleta das amostras dos agregados de RCD.

A Universidade Federal de Sergipe, por proporcionar estrutura física e corpo docente fundamentais na concretização do trabalho e do conhecimento adquirido.

A CAPES pelo apoio financeiro fornecido durante uma etapa do mestrado.

Um agradecimento especial aos meus pais Arnaldo e Eliana e aos meus irmãos Rafael e Ilka, pelo amor, incentivo e contribuições que proporcionaram a busca dos objetivos, e à Laís, pelo amor, amizade, carinho e paciência durante as longas horas de estudos e pesquisas.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

O crescimento da indústria da construção civil no Brasil tem resultado no aumento crescente da geração de resíduos de construção e demolição (RCD). Diante desse fato, diversos estudos e pesquisas têm sido realizados com a finalidade de amenizar ou até mesmo extinguir os impactos indesejáveis causados pela deposição inadequada desses resíduos no meio ambiente. Por outro lado, as obras de infraestrutura rodoviária, em geral, consomem grandes quantidades de recursos naturais, que já se tornam escassos em diversas regiões do país. Mas, felizmente, cabe destacar que essa área da construção já possui um favorável histórico de incorporação de resíduos no seu processo construtivo, sendo o RCD o de maior destaque. Diante deste cenário, com esta pesquisa procurou-se avaliar as propriedades geotécnicas de agregados reciclados de RCD produzidos em uma usina recicladora da região metropolitana de Aracaju (RMA), preparando-se misturas desses materiais com dois solos tipicamente encontrados no Estado de Sergipe. Dessa forma, foram realizados ensaios para se avaliar a composição e porcentagem de materiais indesejáveis, granulometria, limites de Atterberg, absorção, desgaste por abrasão, massa específica, índice de forma, compactação, degradação, índice de suporte califórnia e módulo de resiliência. Com base nos resultados obtidos, utilizando-se a energia intermediária de compactação, verificou-se que os agregados reciclados de RCD proporcionaram significativas melhorias nas propriedades dos solos, expressa pelo desempenho mecânico satisfatório observado nos parâmetros ISC e MR das misturas. Os resultados apresentados nesta pesquisa indicam e ratificam a viabilidade técnica do uso do RCD em camadas de base e sub-base de pavimentos, o que pode contribuir para o desenvolvimento sustentável, o aumento da oferta de materiais e uma metodologia de aplicação na construção de vias urbanas da RMA e do Estado de Sergipe, além de resultar na diminuição da extração de materiais naturais de jazidas e das áreas de disposição final desses resíduos.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; agregados reciclados; pavimentos e meio-ambiente.

STUDIES ABOUT MIXTURES OF CONSTRUCTION RECYCLED AGGREGATES
WITH SOILS FOR USE IN PAVEMENTS

ABSTRACT

The growth of the construction industry in Brazil has resulted in increasing of construction and demolition wastes generation (CDW). Given this fact, various studies and researches have been conducted in order to mitigate or even extinguish the undesirable impacts caused by improper disposal of these wastes on the environment. On the other hand, the road infrastructure constructions, in general, consume large amounts of natural resources, that have become scarce in many regions of the country. But fortunately, it is worth noting that this construction area has a favorable history about incorporation of wastes in your construction process, and CDW is the most prominent. Against this background, with this research sought to evaluate the geotechnical properties of CDW recycled aggregates produced by a recycling plant in the Aracaju metropolitan region (AMR), preparing mixtures of these materials with two typically soils of Sergipe state. Therefore, tests were conducted to evaluate the composition and percentage of impurities, gradation, Atterberg limits, absorption, abrasion resistance, bulk density, grain form, compaction, degradation, califórnia bearing ratio and resiliente modulus. Based on results, obtained using the intermediate compaction energy, it was found that the CDW recycled aggregates provided significant improvements in the soils properties, expressed by satisfactory mechanical performance observed in the CBR and RM parameters of mixtures. The results presented in this research indicate and ratify the technical feasibility of using the CDW in base and sub-base pavements layers, which can contribute to sustainable development, increasing the materials supply and a application methodology in AMR and Sergipe urban roads constructions, in addition to resulting in decreased extraction of natural materials and areas of final disposal of such wastes.

Key words: construction and demolition wastes; recycled aggregates; pavements and environment.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xiii
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Estrutura do trabalho	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Os resíduos da construção civil	5
2.1.1 Agregados reciclados de RCD	11
2.1.2 Classificação ambiental do RCD	14
2.2 Pavimentos rodoviários	15
2.2.1 Classificação dos solos para fins rodoviários	18
2.2.2 Caracterização mecânica das camadas granulares de pavimentos	20
2.2.3 Ensaio triaxial com aplicação de carga repetida em solos e britas	21
2.2.4 Comportamento resiliente dos materiais	23
2.2.5 Uso de resíduos na pavimentação	24
2.3 Uso de RCD nas camadas granulares de pavimentos	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais utilizados	32
3.1.1 Solos	32
3.1.2 Resíduos de construção e demolição	34
3.1.3 Misturas RCD-solos	36
3.2 Métodos experimentais	38
3.2.1 Caracterização física dos solos e das misturas RCD-solos.....	39
3.2.2 Caracterização física do agregado reciclado miúdo	41
3.2.3 Caracterização física dos agregado reciclados graúdos.....	42

3.2.4 Compactação	45
3.2.5 Índice de degradação	45
3.2.6 Índice de Suporte Califórnia.....	46
3.2.7 Módulo de resiliência.....	47
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1 Caracterização física dos solos	53
4.2 Caracterização física do ARM	55
4.3 Caracterização física dos ARGs	58
4.4 Caracterização física das misturas	63
4.4.1 Análise granulométrica	63
4.4.2 Limites de consistência	67
4.4.3 Classificação TRB	68
4.5 Compactação	69
4.6 Índice de degradação (ID)	72
4.7 Índice de suporte Califórnia (ISC)	74
4.8 Expansão	76
4.9 Módulo de Resiliência	78
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
5.1 Conclusões	84
5.2 Recomendações	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A	94
ANEXO B	100

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 - Composição média do RCD de Aracaju	6
Tabela 2 - Número de municípios conforme o tipo de processamento do RCD	9
Tabela 3 - Porcentagem de RCD reutilizado ou reciclado em países da Europa	11
Tabela 4 – Relação de usinas recicladoras por região	12
Tabela 5 - Distribuição das rodovias municipais, estaduais e federais em quilômetros	15
Tabela 6 - Resultados de CBR e expansão obtidos para o ARC-solo e para o solo	27
Tabela 7 - Coordenadas dos pontos de coleta das amostras de solo	32
Tabela 8 - Materiais e proporções utilizadas	36
Tabela 9 - Pares de tensões utilizadas na fase de condicionamento	51
Tabela 10 - Pares de tensões utilizadas na fase de ensaio	51
Tabela 11 - Caracterização dos solos	54
Tabela 12 - Caracterização do Agregado Reciclado Miúdo	56
Tabela 13 - Caracterização dos ARGs	59
Tabela 14 - Valores de absorção obtidos em pesquisas	60
Tabela 15 – Absorção e Massa específica dos grãos retidos na peneira 4,8mm do agregado reciclado de Santo André, de acordo com a natureza dos seus constituintes	61
Tabela 16 - Valores de perda por abrasão obtidos em pesquisas	62
Tabela 17 - Coeficiente de Uniformidade e faixa granulométrica das misturas	66
Tabela 18 - Limites de consistência das misturas	68
Tabela 19 - Classificação TRB das amostras em estudo	68
Tabela 20 - Teor de umidade ótima e densidade aparente seca máxima das misturas com solo ALE	69
Tabela 21 - Teor de umidade ótima e densidade aparente seca máxima das misturas com solo ANI	69
Tabela 22 - Teor de umidade ótima e densidade aparente seca máxima das misturas com ARGs	71
Tabela 23 - Valores de teor de umidade ótima e massa específica seca máxima	

obtidos em outras pesquisas	72
Tabela 24 - Índice de degradação dos agregados reciclados de RCD e das misturas.	73
Tabela 25 - Variação da curva granulométrica após a compactação	74
Tabela 26 - Valores da expansão medida nos solos puros e nas misturas com ARM	77
Tabela 27 - Valores da expansão das misturas com os ARGs	78
Tabela 28 - Parâmetros de modelagem e coeficientes de determinação obtidos dos modelos propostos	79
Tabela 29 - Valores de MR obtidos para as misturas ARM-ALE	80
Tabela 30 - Valores de MR obtidos para as misturas das ARM-ANI	80
Tabela 31 - Valores de MR obtidos para as misturas ARG-ANI e ARG-ARM	81
Tabela 34 - Valores de MR obtidos por outros autores	81

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pág.
Figura 1 - Geração de resíduo devido à reforma no estádio “Batistão” no município de Aracaju	5
Figura 2 - Total de RCD coletados por região do Brasil entre 2008 e 2012	8
Figura 3 - Resíduos de construção depositados de forma irregular nas vias urbanas do município de Aracaju	9
Figura 4 - RCD mineral cinza (a) e vermelho (b) da usina Itaquera	12
Figura 5 - Resíduo de demolição contaminado com gesso e em condições inadequadas no município de Aracaju	14
Figura 6 - Estrutura típica de um pavimento flexível (a) e de um pavimento rígido (b).....	17
Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas	17
Figura 8 - Representação dos deslocamentos sofridos pelo corpo-de-prova	22
Figura 9 - Execução de pista experimental em Goiânia	26
Figura 10 - MR dos agregados reciclados de concreto para os tempos de cura de 0 e 90 dias	29
Figura 11 - Armazenamento das três diferentes frações de agregados de RCD próximo à aplicação	31
Figura 12 - Execução de um trecho da avenida Novo Horizonte com uso de misturas de agregados RCD	31
Figura 13 - Mapa de Sergipe com localização dos pontos de coleta	33
Figura 14 - Aspecto visual do ponto 1, na jazida Alegrete (ALE)	33
Figura 14 - Aspecto visual do ponto 2, na jazida Aningas (ANI)	34
Figura 16 - Foto da etapa de destorroamento da amostra do solo da jazida Alegrete (ALE)	34
Figura 17 - Agregado reciclado miúdo (ARM) coletado	35
Figura 18 - Agregados reciclados graúdos (ARGs) coletados	35
Figura 19 - Aspecto textural dos três agregados reciclados	36
Figura 20 - Foto da etapa de mistura dos materiais para a preparação da amostra A12	37
Figura 21 - Foto da amostra A12 preparada	37
Figura 22 - Foto da fase de preparação da amostra A07	38

Figura 23 - Foto da amostra A07 preparada	38
Figura 24 - Fluxograma empregado no programa experimental desta pesquisa	39
Figura 25 - Fotos da etapa de realização dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação das amostras	40
Figura 26 - Foto da etapa dos ensaios de Limite de Liquidez com o aparelho de Casagrande automático	40
Figura 27 - Imersão do ARM em água para saturação	41
Figura 28 - Uso do tronco cônico no ensaio de absorção	42
Figura 29 - Lavagem para preparação da amostra do ARG2	42
Figura 30 - Separação conforme a natureza dos constituintes do ARG1.....	43
Figura 31 - Separação conforme a natureza dos constituintes do ARG2	43
Figura 32 - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	43
Figura 33 - Máquina do ensaio de Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ” do GeoPav	44
Figura 34 - Aspecto do ARG 2 após o ensaio de Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ”	44
Figura 35 - Amostras de ARG 2 (à esquerda) e ARG 1 (à direita) após o ensaio de abrasão	45
Figura 36 - Soquete eletromecânico do GeoPav (a) e amostra compactada no cilindro (b)	45
Figura 37 - Corpo de prova imerso em água para ensaio de ISC e expansão	46
Figura 38 - Prensa mecânica manual do GeoPav	47
Figura 39 - Módulo de ensaio (a) e módulo de controle do SIEMBS (b)	47
Figura 40 - Cilindro bipartido utilizado na moldagem dos CPs	48
Figura 41 - Corpo de prova da amostra A02 com ruptura após o condicionamento	49
Figura 42 - Foto dos corpos de prova em cura na câmara úmida	49
Figura 43 - Da esquerda para a direita, amostras A12, A11 e A03 após o período de cura	50
Figura 44 - Etapas de preparação e acondicionamento dos CPs na câmara triaxial	50
Figura 45 - Extração de material do terço médio do CP da amostra A03 para determinação do teor de umidade	51
Figura 46 - Extração de material do terço médio do CP da amostra A10 para determinação do teor de umidade	52
Figura 47 - Curvas de distribuição granulométricas dos solos ALE e ANI	53
Figura 48 - Curva de distribuição granulométrica do ARM	55

Figura 49 - Caracterização do ARM	57
Figura 50 - Curvas de distribuição granulométrica dos ARGs	58
Figura 51 - Caracterização do ARG1	59
Figura 52 - Caracterização do ARG2	60
Figura 53 - Curvas granulométricas das misturas ARM-ALE	64
Figura 54 - Curvas granulométricas das misturas ARM-ANI	64
Figura 55 - Curva granulométrica da mistura ARG-ANI	65
Figura 56 - Curva granulométrica da mistura ARG-ARM	65
Figura 57 - Aspectos da amostra A10 durante o ensaio de sedimentação	67
Figura 58 - Valores do teor de umidade ótima das misturas e dos materiais puros	70
Figura 59 - Massa específica aparente seca máxima das misturas e dos materiais puros	70
Figura 60 - Valores de ISC obtidos dos solos puros e das misturas com ARM	75
Figura 61 - Valores de ISC obtidos na pesquisa	75
Figura 62 - Índice de Suporte Califórnia (ISC) das composições com os ARGs	76
Figura 63 - Gráfico dos valores de expansão em função do percentual de ARM	77
Figura 64 - Estrutura do pavimento considerada na análise de MR	80

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais
ALE	Solo da Jazida Alegrete
ANI	Solo da Jazida Aningas
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARG	Agregado reciclado graúdo
ARMi	Agregado de Resíduo Misto
ARM	Agregado reciclado miúdo
CAUQ	Concreto Afáltico Usinado a Quente
CBR	California Bearing Ratio
CCR	Concreto compactado com rolo
GC	Grau de compactação
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
Cu	Coefficiente de uniformidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes
EC	European commission
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GEIPOT	Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes
GeoPav	Laboratório de geotecnia e pavimentação da UFS
GPS	Global Position System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Índice de degradação
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de plasticidade

ISC	Índice de Suporte Califórnia
k1, k2, k3	Coefficientes das equações de módulo de resiliência
kPa	Kilopascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCT	Miniatura Compactada Tropical
ME	Método de ensaio
MMA	Ministério do Meio-Ambiente
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organizações das Nações Unidas
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PMGRCC	Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RMA	Região Metropolitana de Aracaju
R ²	Coefficiente de determinação
SMC	Solos melhorados com cimento
SGRCC	Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil
SIEMBS	Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFS	Universidade Federal de Sergipe
w mold	Umidade de moldagem
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor ou pressão de confinamento
σ_d	Tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial

1 INTRODUÇÃO

A Agenda 21, passo inicial para as diretrizes do desenvolvimento sustentável global, foi elaborada na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), denominada Eco-92, organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) e realizada na cidade do Rio de Janeiro entre 3 e 4 de junho de 1992, com a participação de 179 países. Desse evento, resultou um conjunto de resoluções e ações, que compuseram um documento com 40 capítulos acordado e assinado pelos chefes de Estado, para conciliar o crescimento econômico e social com a preservação do meio ambiente. Foi a partir da Agenda 21 que surgiu um novo padrão de desenvolvimento, em que cada país definiu as bases para a preservação do meio ambiente em seu território, de forma a possibilitar o desenvolvimento com sustentabilidade (MMA, 2013).

Sabe-se que a questão ambiental é de grande importância quando o objeto de estudo é a destinação final dos resíduos gerados nas indústrias. Quando esta é realizada sem um adequado gerenciamento, finda contribuindo para o aumento da poluição do solo, do ar e de bacias hidrográficas, muitas vezes resultando em danos ao meio ambiente e aos seres humanos. Para evitar isso, é preciso que se adotem ações que permitam o desenvolvimento sustentável do planeta calcado na “filosofia” dos 3Rs: Reduzir, Reutilizar e Reciclar.

A construção civil está entre as atividades industriais que apresentam alto potencial de impacto ambiental devido à grande quantidade dos resíduos gerados. Esses resíduos são provenientes dos processos de construção e demolição (RCD), e são compostos por uma grande parcela de materiais minerais, tais como os materiais cimentícios, cerâmica vermelha, solos e agregados naturais.

De acordo com Lucena (2009), a origem dos resíduos está relacionada aos restos de processos de produção e às “substâncias, produtos ou objetos que ficaram incapazes de utilização para os fins que foram produzidos”. A falta de investimentos públicos e privados nas políticas relacionadas à gestão desses resíduos acarreta em um desafio para o desenvolvimento sustentável do meio ambiente. Na Europa, segundo Motta (2005), vários países estão cada vez menos tolerantes quanto à destinação do RCD em aterros sanitários, adotando-se uma política de taxação como forma de inibir essa prática e incentivar a reciclagem.

Segundo o IBGE (2011), atualmente, 84,9% dos brasileiros vivem em zonas urbanas. Com uma taxa média de crescimento entre 2000 e 2010 de 12,3%, as cidades brasileiras

necessitam de novos investimentos em infraestrutura, principalmente com a abertura de novas vias e a melhoria das já existentes. Aliado a isso, de acordo com Grubba (2009), existe uma parcela significativa de vias urbanas sem pavimentação. Esse cenário mostra-se propício para o desenvolvimento e uso de materiais alternativos na construção de pavimentos, visto que as jazidas de materiais convencionais estão cada vez mais escassas e longe dos conglomerados urbanos, contribuindo para o aumento do preço de aquisição dos mesmos.

Os agregados de RCD vêm sendo empregados em sua grande parcela na construção rodoviária do Brasil e do mundo. O uso de grande quantidade de material reciclado e a simplicidade no processo de execução do pavimento e na produção do agregado, estão entre os principais fatores que favorecem ao aproveitamento do resíduo nessa área.

O reaproveitamento desses resíduos na construção e manutenção de pavimentos mostra-se como uma boa alternativa. Segundo Freitas (2010), o uso de resíduos nessas construções permite reduzir a utilização de recursos naturais e obter nova destinação a esses materiais, valorizando-se o que antes era considerado rejeito. Não obstante, o autor afirma que a utilização desses resíduos promove a melhora de características mecânicas dos materiais das camadas que constituem a estrutura do pavimento.

De acordo com a *Federal Highway Administration* (FHWA, 2000), para viabilizar o uso dos resíduos de construção, deve-se conhecer todas as características técnicas e ambientais no emprego desses materiais, sempre relacionando aos materiais convencionais empregados na pavimentação. A disposição de RCD em aterros não mais se justifica, principalmente em função da nova legislação ambiental, dos resultados positivos obtidos nas pesquisas e pelo bom desempenho de vias já executadas com esses materiais.

Diante desse contexto, pesquisas têm sido realizadas para comprovar a viabilidade técnica e econômica no uso desses resíduos em pavimentação e consolidar essa tecnologia em regiões onde essa área ainda foi pouco explorada. Com isso, em algumas regiões do Brasil, o desenvolvimento do uso de agregados de RCD na área rodoviária visando possibilitar a disposição correta desses resíduos se faz necessário.

Portanto, agregados reciclados de RCD provenientes de uma unidade de reciclagem de resíduos instalada no município de Nossa Senhora do Socorro, localizado na Região Metropolitana de Aracaju (RMA), foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, segundo a metodologia tradicional e de acordo com a teoria mecanicista.

Incorporando-se o material reciclado de resíduos da construção civil na composição de misturas com solos pretendeu-se manter ou melhorar o desempenho diante das especificações pertinentes ao uso desses materiais na pavimentação, razão pela qual essa pesquisa se propõe a contribuir nos estudos relacionados ao uso de RCD, pois esses materiais tem se mostrado favoráveis quanto à melhoria na granulometria, no Índice de Suporte Califórnia (ISC) e no módulo de resiliência (MR) em pesquisas já realizadas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades geotécnicas (características físicas e desempenho mecânico) de agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) em misturas com dois solos locais, visando aplicar esses materiais em camadas de sub-base e/ou base de pavimentos, com foco na Região Metropolitana de Aracaju (RMA) e no Estado de Sergipe.

1.1.2 Objetivos específicos

Caracterizar, segundo a NBR 15116 (2004), os agregados de RCD produzidos em uma Usina Recicladora em operação no município de Nossa Senhora do Socorro, na RMA.

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de solos empregados nesta pesquisa, bem como das misturas de agregados reciclados e das misturas de agregados com esses solos.

Analisar os resultados dos ensaios de caracterização física e de comportamento mecânico das misturas de agregado reciclado com os solos empregados nesta pesquisa e comparar com o comportamento dos mesmos solos puros, usualmente empregados na pavimentação local.

Contribuir com o desenvolvimento tecnológico regional, gerando metodologia de aplicação de RCD em misturas com solos locais com vistas à aplicação em camadas de pavimentos da RMA.

1.2 Estrutura do trabalho

Para realizar o estudo proposto, este trabalho está dividido em cinco capítulos. Na primeira parte é apresentada uma pequena introdução, constando de informações gerais sobre o assunto em estudo, objetivo e estrutura do texto.

A fundamentação teórica, necessária à elaboração desta pesquisa, encontra-se no Capítulo 2, subdividido em três partes, onde são tratados os assuntos relacionados aos resíduos

da construção civil, pavimentação rodoviária e uso dos resíduos da construção civil nas camadas granulares de pavimentos.

Já o Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos experimentais utilizados para realização da pesquisa, e o Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios.

O Capítulo 5 contém as conclusões obtidas, junto às recomendações para trabalhos acadêmicos futuros. Por fim, são mostradas as referências bibliográficas utilizadas e os anexos contendo os gráficos gerados pelos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apesar da grande importância da indústria da construção civil para o país, devido aos benefícios sociais e econômicos gerados, há a necessidade de se estabelecer uma política abrangente voltada para correta destinação dos resíduos gerados. Devido ao grande consumo de recursos naturais, à modificação da paisagem e ao volume de resíduos gerados, a indústria da construção civil é reconhecida como grande geradora de impactos ambientais e, por isso, tem o desafio de conciliar o crescimento do setor com condições sustentáveis de desenvolvimento (KARPINSKI, 2009).

2.1 Os resíduos da construção civil

De acordo com a NBR 15116/2004, que estabelece os parâmetros para a utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentação, os resíduos da construção civil são “resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto e solo”. A Figura 1 mostra um exemplo de geração de resíduos devido às atividades de construção e demolição.

Figura 1 - Geração de resíduo devido à reforma no estádio “Batistão”, no município de Aracaju.



Conforme a Resolução 307 (2002) do CONAMA e suas alterações quanto à classificação dos resíduos, descritas nas Resoluções 431 (2011) e 348 (2004), os resíduos da construção e demolição (RCD) são classificados em classes, da seguinte forma:

- a) Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento), argamassa, concreto e solos provenientes de obras de infraestrutura;
- b) Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, metais, vidros, madeiras e gesso;

- c) Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D - são resíduos perigosos, tais como: tintas, solventes, óleos, materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde, pela sua natureza, ou por terem sido contaminados no decorrer do uso da edificação, como em clínicas radiológicas e instalações industriais.

De acordo com Daltro Filho (2005), na composição do RCD há a predominância de resíduos de origem mineral (argamassas, concreto e elementos cerâmicos) gerados nas fases de execução de fundações, estrutura e alvenaria. Prata (2013), por exemplo, obteve o percentual de aproximadamente 97% de resíduos Classe A na composição do RCD gerado no município de Lagarto-SE. No contexto mundial, Ulsen (2006) afirma que a composição do RCD depende da sua origem, ou seja, da região em que o mesmo foi gerado. Como exemplo, o autor cita a Europa, que de forma geral possui teores de materiais não-minerais menores que 10%, enquanto que no Japão cerca de metade dos resíduos são compostos por outros materiais, tais como plásticos e papel.

A Tabela 1 apresentada a seguir, já adaptada com a nova classificação do gesso prevista na Resolução nº. 431 (2011), relaciona a composição média do RCD gerado em Aracaju.

Tabela 1 - Composição média do RCD de Aracaju (adaptado de DALTRO FILHO, 2005).

Classificação	Componente	(%)	% por classe
A	Argamassa	36,00	73,44
	Solo/Areia	19,96	
	Cerâmicos	14,42	
	Pedra	2,04	
	Mármore	0,44	
	Concreto	0,35	
	Brita	0,23	
B	Gesso	3,39	5,85
	Madeira	1,28	
	Papel	0,46	
	Plásticos	0,34	
	Papelão	0,28	
	Metal	0,06	
	Vidro	0,04	
C	Restos	19,85	19,85
D	Restos de telhas de cimento amianto	0,82	0,86
	Latas de tinta e derivados	0,04	
TOTAL		100	100

Considerada a maior indústria geradora de resíduos da sociedade, de acordo com John e Agopyan (2000), a construção civil descarta uma quantidade em massa igual ou superior à quantidade gerada de resíduo domiciliar. De acordo com Daltro Filho (2005), no município de Aracaju, 65% dos resíduos sólidos urbanos gerados são eminentemente RCD.

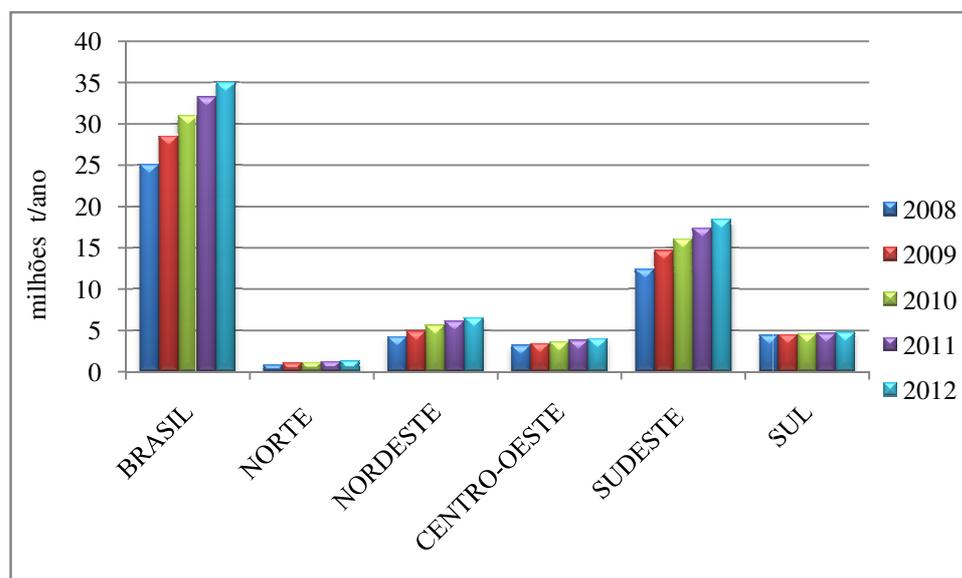
Segundo Pinto (2005), em relação à massa total de resíduos urbanos gerados, no estado de São Paulo, os provenientes de construções e demolições corresponderam a mais de 50% nos municípios de São Paulo, Guarulhos, Diadema, Campinas, Piracicaba, São José dos Campos, Ribeirão Preto, Jundiaí, São José do Rio Preto e Santo André.

Pesquisas realizadas estimam que no Brasil, só em 2012, foram coletados mais de 35 milhões de toneladas de RCD, quantidade 39% maior que o coletado em 2008. A Figura 2 mostra o aumento significativo da quantidade de resíduo coletado nas diferentes regiões do país entre 2008 e 2012, período de forte aquecimento no setor da construção civil (ABRELPE, 2012).

Vale ressaltar que esses valores, ainda que sejam expressivos, representam uma parcela menor que a quantidade real de resíduo gerado nas regiões, pois, sabe-se que os geradores, também responsáveis pela coleta e destinação final, nem sempre informam às autoridades os quantitativos reais de resíduos gerados nas obras, ao passo que os municípios, em geral, coletam somente os RCD lançados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2012). Ângulo (2005), englobando o total de resíduos gerados, estimava um montante de 68,5 milhões de toneladas de RCD por ano no país.

Segundo os dados obtidos na pesquisa realizada por Karpinski (2009) na cidade de Passo Fundo (RS), o volume de RCD gerado em um município é muito maior que o levantado pelas empresas e órgãos municipais responsáveis pela coleta e destinação final desses resíduos, pois grande parte dos mesmos é lançada em locais de deposição irregular. De acordo com Ribeiro e Resende (2006), no município de Piracicaba (SP), gerava-se na época da pesquisa um montante de 600 toneladas por dia de RCD, e grande parcela desse total era depositada de forma irregular em cerca de 180 pontos distribuídos na cidade.

Figura 2 - Total de RCD coletados por região do Brasil entre 2008 e 2012 (adaptado de ABRELPE, 2009, 2010, 2012).



Esse aumento expressivo na geração de RCD nos últimos anos, que pode ser estendido às diversas fontes geradoras, está relacionado ao grande crescimento da indústria da construção civil no Brasil. Sabe-se que os programas do governo voltados ao setor habitacional para diminuir o déficit de moradias impulsionaram a realização de inúmeras obras civis.

Aliado a isso, a ineficiência e o grande desperdício de materiais, muitas vezes relacionados à aplicação inadequada e à falta de mão-de-obra qualificada para atuar nos processos construtivos cada vez mais modernos, são fatores que contribuem para a geração ainda maior de resíduos nesse setor. Também, a falta de cultura em relação à reutilização e reciclagem de materiais provenientes de reformas é um fator que aumenta ainda mais o volume de resíduo gerado.

Segundo o IBGE (2008), dos 5564 municípios brasileiros, apenas 392 (7,0%) faziam algum tipo de processamento dos resíduos de construção e demolição. A Tabela 2 relaciona o número de municípios com os principais tipos de processamento empregados. É importante destacar que apenas 1,4% dos municípios reaproveitavam os agregados reciclados para a fabricação de componentes construtivos. Nessa mesma pesquisa, observou-se também que nos municípios do estado de Sergipe não havia esses modelos de processamento relacionados na Tabela 2 mostrada a seguir.

Tabela 2 - Número de municípios conforme o tipo de processamento do RCD (adaptado do IBGE, 2008).

Tipo de processamento dos resíduos	Nº de Municípios	% em relação ao total do Brasil (5564)
Triagem simples dos resíduos de construção e demolição reaproveitáveis (classes A e B)	124	2,2%
Triagem e trituração simples dos resíduos classe A	14	0,3%
Triagem e trituração dos resíduos classe A com classificação granulométrica dos agregados reciclados	20	0,4%
Reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos	79	1,4%

Os resíduos de construção e demolição, quando depositados em locais inapropriados, podem comprometer o meio ambiente, obstruir córregos e o sistema de drenagem, contribuir para a proliferação de vetores, e comprometer esteticamente as vias urbanas, conforme apresenta a Figura 3. De acordo com o IBGE (2008), a maioria dos municípios brasileiros ainda não adota um sistema de destinação adequado e também não possui as centrais de reciclagem de resíduos, ou seja, a gestão sustentável está longe de ser uma realidade para a maioria das cidades do Brasil. Como resultado, os resíduos são depositados sem critérios técnicos, muitas vezes de forma clandestina, requerendo grande quantidade de recursos públicos para a sua retirada.

Figura 3 – Resíduos de construção depositados de forma irregular nas vias urbanas do município de Aracaju.



Com a nova diretriz da Resolução nº. 448 (2012) do CONAMA e da Lei Federal 12305 (2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos seria o último recurso da gestão de resíduos, sendo a prioridade, pela ordem: a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento de resíduos sólidos. Já no âmbito do município de Aracaju, em fevereiro de 2014, entrou em vigor a Lei Municipal nº. 4452 (2013), que instituiu o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos (SGRCC).

Segundo essas novas leis, os municípios são responsáveis pela elaboração de um Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC), que consta de diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores; prevê o cadastramento de áreas aptas para o recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes para destinação posterior dos resíduos; além do estabelecimento de processos de licenciamento de áreas de beneficiamento e reserva de resíduos (BRASIL, 2010; ARACAJU, 2013).

Já em relação aos grandes geradores, estes são responsáveis pela elaboração e implementação do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), onde os procedimentos de manejo e destinação ambientalmente adequados serão estabelecidos. Essas novas legislações ainda estabelecem que os resíduos classe A não poderão ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, e sim, deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a área de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de forma a viabilizar a sua utilização ou reciclagem futura (BRASIL, 2010; ARACAJU, 2013).

De acordo com as boas práticas e com a legislação ambiental vigente, a redução da geração de resíduos deve ser o primeiro objetivo a ser alcançado em um canteiro de obras. De acordo com Karpinski (2009), a diminuição da geração de resíduos pode ser obtida através da utilização de materiais de qualidade, pela qualificação da mão-de-obra e pela aplicação de tecnologias e equipamentos adequados ao processo produtivo.

Segundo Schneider e Philippi (2004), o volume de resíduos gerados pela indústria da construção civil é um problema mundial, apesar disso, de acordo com Ângulo (2005), países como a Holanda, Dinamarca e Alemanha possuem índices de reciclagem entre 50 e 90% do total de RCD gerado. A Tabela 3 apresenta a porcentagem de RCD reutilizado ou reciclado em alguns países da Europa.

Tabela 3 - Porcentagem de RCD reutilizado ou reciclado em países da Europa (adaptado de EC, 1999).

PAÍS	PORCENTAGEM REUTILIZADA OU RECICLADA
	(%)
Holanda	90
Bélgica	87
Dinamarca	81
Finlândia	45
Reino Unido	45
Áustria	41

2.1.1 Agregados reciclados de RCD

Quanto à composição, a norma NBR 15116 (2004) classifica os agregados reciclados de resíduos em dois tipos: agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARMi). A diferença entre eles está na quantidade em massa de fragmentos da sua fração graúda que são à base de cimento Portland e rochas. O ARC, considerado o mais nobre e homogêneo, possui, no mínimo, 90% desses materiais, enquanto que o ARMi possui proporção abaixo desse valor.

Ulsen (2006) cita outro exemplo de classificação, também utilizada na prática, onde a fração mineral é classificada visualmente em Tipo I, ou cinza, e Tipo II, ou vermelha. Fazem parte do Tipo I os materiais predominantemente provenientes de componentes cimentícios, tais como concretos e argamassas. Já a fração do Tipo II é composta por materiais provenientes de componentes de natureza cerâmica, principalmente a vermelha. Resultados da pesquisa realizada pelo autor mostraram que os teores de compostos constituintes do RCD, tais como os óxidos sílica, alumina e óxido de cálcio, são essencialmente variáveis em função da granulometria, independente da classe (cinza ou vermelho).

A Figura 4 serve para ilustrar a diferença visual entre os dois produtos da usina Itaquera, no município de São Paulo. Segundo Ulsen (2006), essa classificação “é realizada em etapa anterior à britagem, de modo que sejam processadas separadamente seguindo o mesmo circuito”.

Figura 4 - RCD mineral cinza (a) e vermelho (b) da usina Itaquera (adaptado de Ulsen, 2006).



No processo de reciclagem feito nas centrais de beneficiamento, a exemplo das usinas de Itaquera-SP e de Vinhedo-SP, citadas por Ulsen (2006), esta última retratando grande parte das usinas brasileiras, empregava-se as seguintes etapas:

- Seleção manual ou catação (triagem) – etapa de remoção manual de impurezas;
- Cominuição ou Britagem – em britador de mandíbulas (Vinhedo-SP) ou de impacto (Itaquera-SP);
- Separação magnética – utilização de separador magnético de baixa intensidade instalada na correia transportadora após a britagem (apenas Itaquera-SP); e
- Classificação granulométrica – etapa de peneiramento a seco com frações de 40, 20 e 4,8mm (Itaquera-SP) e 12,7, 9,5 e 4,8mm (Vinhedo-SP).

Quando relacionado ao número total de municípios em toda a extensão do país, percebe-se, de acordo com a Tabela 4, que a quantidade de usinas de reciclagem de RCD ainda é pequena. Nesse contexto, a região Sudeste destaca-se por possuir uma grande parcela dessas instalações (Moreira, Dias e Resende (2007); Grubba (2009); Ulsen (2012); Carneiro, Burgos e Alberte (2001); Cavalcante (2013); CRETA (2012)).

Tabela 4 – Relação de usinas recicladoras por região.

Região do Brasil	Estado/DF	Município	Quant.
Nordeste	Maranhão	São Luis	1
	Ceará	Fortaleza	1
	Paraíba	João Pessoa	1
	Pernambuco	Petrolina	1
	Alagoas	Maceió	1
	Sergipe	Aracaju	1
	Bahia	Salvador	1

Tabela 4 - Relação de usinas recicladoras por região (continuação).

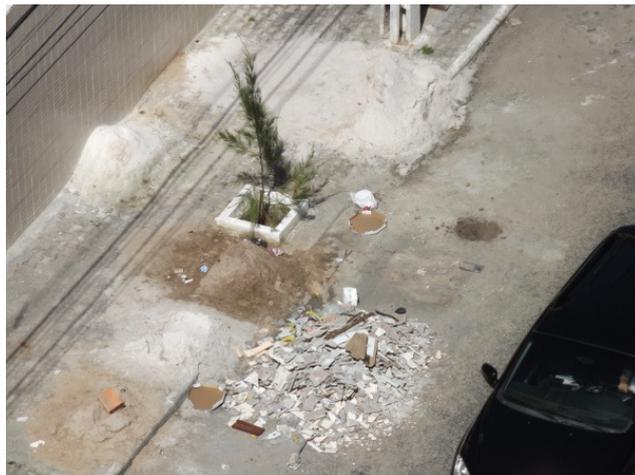
Região do Brasil	Estado/DF	Município	Quant.
Centro-Oeste	Distrito Federal	São Sebastião	1
		Brasília	2
Sudeste	São Paulo	São Paulo	2
		Ribeirão Preto	1
		Piracicaba	2
		São José dos Campos	3
		Socorro	1
		Guarulhos	2
		Vinhedo	1
		Ribeirão Pires	1
		Jundiaí	1
		Campinas	1
		São B. do Campo	2
		São José do Rio Preto	1
		São Carlos	1
		Taboão da Serra	1
		Caraguatatuba	1
		Limeira	1
		Americana	1
		Osasco	1
		Paulínia	1
		Barretos	1
	Itaquaquecetuba	1	
	Minas Gerais	Belo Horizonte	3
		Muriaé	1
Rio de Janeiro	Macaé	1	
	São Gonçalo	1	
	Rio das Ostras	1	
Sul	Paraná	Londrina	2
		Ponta Grossa	1
		Colombo	1
	Rio Grande do Sul	Ciríaco	1
		Santa Maria	1

Para viabilizar o uso de resíduos da construção civil como matéria prima para a fabricação de materiais de construção, a exemplo do concreto, e nas camadas granulares em pavimentos, há a necessidade de uma adequada gestão dos resíduos no canteiro, evitando que o material seja contaminado por outros insumos empregados em obras, tais como metais, madeira, tinta e gesso. Segundo Fernandes (2004), uma das maiores dificuldades no uso

desses materiais está na sua heterogeneidade. Na prática, por exemplo, de acordo com Freitas (2010), a não separação dos resíduos de gesso dos resíduos Classe A está relacionada à baixa quantidade daqueles em relação aos demais rejeitos da obra.

O gesso, quando presente nos agregados reciclados, nos casos onde não se tem uma boa gestão dos resíduos no canteiro, ou quando esse é utilizado como revestimento e está parcialmente aderido à base de alvenaria e não pode ser segregado, conforme apresentado na Figura 5, pode trazer problemas em longo prazo. Como o gesso é um material solúvel em água, a presença de pontos com grande concentração desse material nas misturas com agregados reciclados para compor camadas de pavimentos poderá contribuir para a formação de vazios pela lixiviação do gesso. Outro problema em relação à presença do gesso nos agregados reciclados são os sulfatos do gesso, que podem alterar a composição e o pH da água do solo (JOHN e CINCOTTO, 2003).

Figura 5 - Resíduo de demolição contaminado com gesso e em condições inadequadas no município de Aracaju.



2.1.2 Classificação Ambiental do RCD

Na pesquisa realizada por Carneiro, Burgos e Alberte (2001), onde os agregados reciclados de RCD do município de Salvador foram caracterizados quanto ao grau de contaminação ao meio ambiente, constatou-se, através da verificação da concentração de metais, que os valores obtidos se apresentavam dentro dos limites máximos permitidos pela NBR 10004, norma que trata da classificação dos resíduos sólidos em geral. Silva (2009) também obteve resultados favoráveis, classificando o RCD reciclado de Fortaleza na classe II-B, ou seja, não-perigoso e inerte. Para John e Agopyan (2000), embora o RCD seja classificado por exceção como inerte pela norma NBR 10004, a grande maioria seria classificada como não inerte devido ao pH e dureza da água absorvida.

Grubba (2009), com base no ensaio de solubilização com os agregados reciclados de São Carlos, obteve concentrações de alumínio e fenóis totais superiores aos limites da norma NBR 10004. Já Fernandes (2004) obteve concentrações de selênio, nas amostras de Belo Horizonte, e alumínio, em Belo Horizonte e no Rio de Janeiro, maiores que os recomendados por norma no ensaio de solubilização. Isso fez com que esses agregados reciclados utilizados pelos dois autores fossem classificados como do tipo Classe II-A, isto é, resíduo não perigoso e não inerte. Para Fernandes (2004), apesar dos resultados obtidos, estes, ainda assim, não inviabilizam o uso desses agregados na pavimentação. Para isso, de acordo com o autor, deve-se ter uma atenção especial ao seu emprego, observando-se os cuidados a serem tomados com a drenagem de águas superficiais e subterrâneas.

Mesmo com essa classificação obtida nos ensaios ambientais, Grubba (2009) salienta que diversos materiais comuns empregados na composição de camadas de pavimentos, tais como alguns solos tropicais estudados em outras pesquisas, são enquadrados nos limites propostos pela NBR 10004 como não inertes. Com isso o autor é favorável que, devido aos argumentos apresentados, mesmo que sejam considerados não inertes, os agregados reciclados RCD não devem ser inviabilizados para uso em camadas de pavimentos.

2.2 Pavimentos Rodoviários

O modal rodoviário no Brasil é responsável por aproximadamente 60% do transporte de cargas e por ele também circulam 96% dos passageiros (GEIPOT, 2001 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2006). De acordo com a Tabela 5 e segundo Freitas (2010), a extensão das rodovias jurisdicionadas pelos municípios e em regiões metropolitanas, sejam elas planejadas, em execução, pavimentadas ou não, concentram uma parcela majoritária em relação às estaduais e federais.

Tabela 5 - Distribuição das rodovias municipais, estaduais e federais em quilômetros (BRASIL, 2010 *apud* FREITAS, 2010).

REGIÃO	JURISDIÇÃO		
	MUNICIPAL	ESTADUAL	FEDERAL
NORTE	84.501,90	38.471,80	21.136,60
NORDESTE	333.022,20	79.390,60	31.195,40
SUDESTE	458.165,50	46.708,60	28.362,50
SUL	339.247,60	27.015,40	18.430,40
CENTRO-OESTE	124.189,70	62.550,20	17.637,50
BRASIL	1.339.126,90	254.136,60	118.762,40

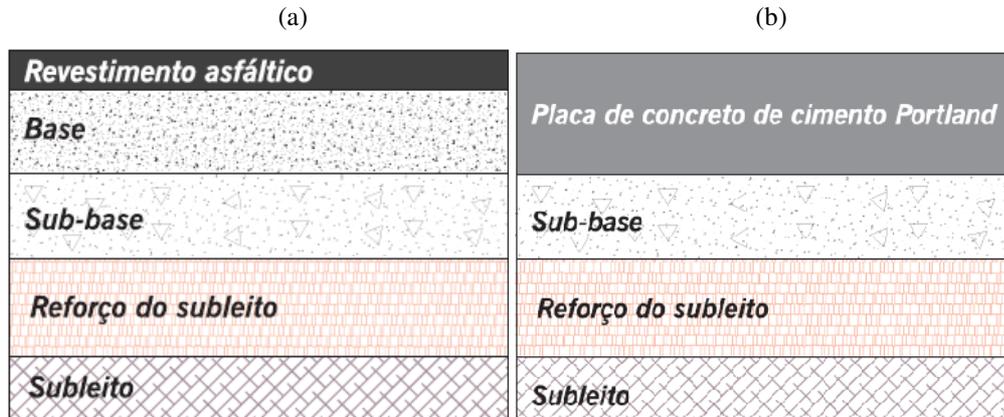
Bernucci *et al.* (2006, p. 9) descrevem pavimento como “uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima”. Além disso, o pavimento deve melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto, economia e segurança aos seus usuários. De acordo com Senço (1997, p. 20), “o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito”.

As diferentes camadas que compõem a estrutura de um pavimento podem variar quanto ao material utilizado, como também quanto à espessura, determinados por métodos de dimensionamento. Esses dois parâmetros de cálculo, rigidez e espessura das camadas, devem permitir que a estrutura, ou conjunto, resista às tensões e deformações as quais está sujeita. Segundo Medina e Motta (2005), os pavimentos, de forma geral, podem ser classificados estruturalmente em:

- Flexíveis: quando o pavimento é dimensionado para que as diferentes camadas constituintes sofram deformações elásticas significativas sob o carregamento aplicado, a exemplo do pavimento constituído de sub-base granular de solo revestida por uma camada de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ);
- Semi-Rígidos: quando há a existência de uma camada intermediária com rigidez maior que as demais, a exemplo do uso de solo cimento para compor camada de base revestida por camada de CAUQ;
- Rígidos: quando o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas subseqüentes, absorvendo praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, a exemplo do pavimento revestido por placa de concreto de cimento Portland.

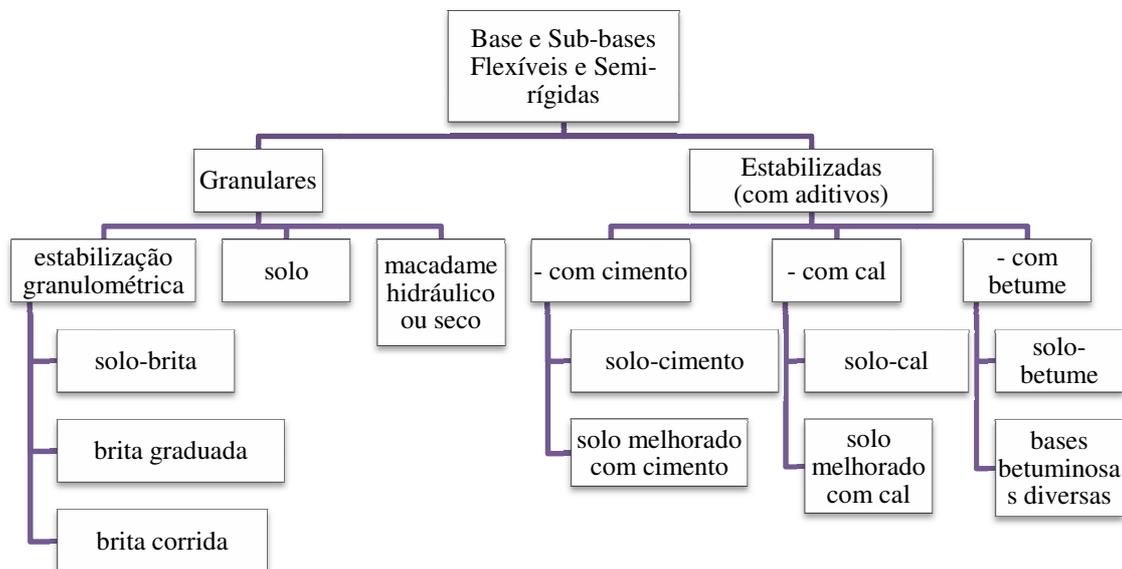
A Figura 6 ilustra as estruturas típicas de dois tipos extremos de pavimentos com todas as camadas possíveis.

Figura 6 - Estrutura típica de um pavimento flexível (a) e de um pavimento rígido (b) (adaptado de BERNUCCI *et al.*, 2008).



De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT, 2006), as bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas podem ser classificadas de acordo com o esquema apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas (adaptado do DNIT, 2006).



As camadas granulares estabilizadas granulometricamente, objeto de estudo desse trabalho, e utilizadas para compor a base e sub-base, são responsáveis pela absorção e distribuição dos esforços de compressão, reduzindo os esforços a níveis aceitáveis para as camadas subjacentes, e minimizando ou eliminando as deformações de consolidação e cisalhamento no subleito (BALBO, 2007).

O processo de execução desses tipos de camadas se dá pela estabilização através do umedecimento e compactação de solos naturais, rochas alteradas ou a combinação desses materiais. De modo geral, o material compactado deve ser resistente às solicitações, apresentando pouca deformação e com permeabilidade compatível com a sua função na estrutura (PINTO e PREUSSLER, 2002).

A base de pavimentos deve ser composta por um material que propicie um bom suporte estrutural, promovendo rigidez e resistência à fadiga na estrutura. Já a sub-base, além da função estrutural, previne o bombeamento de finos do subleito na base e proporciona uma plataforma de trabalho para os diversos equipamentos durante a execução do pavimento (PINTO E PREUSSLER, 2002).

Para compor as camadas granulares, Balbo (2007) cita, entre os materiais mais comuns em pavimentação, o solo arenoso fino laterítico, o solo argiloso laterítico, solo laterítico concrecionado, solo-brita ou solo-agregado, e o solo saprolítico. Os solos lateríticos concrecionados, dependendo da região do Brasil, podem ser chamados de laterita, canga e piçarra, entre outros nomes. Já os solos saprolíticos, podem ser conhecidos como saibro ou cascalho. Estes são de natureza granular, provenientes da decomposição de rochas (solo residual ainda jovem).

2.2.1 Classificação dos solos para fins rodoviários

Dentre as classificações utilizadas para solos está o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Porém, para fins de pavimentação, os solos são tradicionalmente classificados pelo sistema T.R.B. (*Transportation Research Board*) e pela metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical).

No Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) ou *Unified Soil Classification System* (USCS), que foi desenvolvido por Casagrande para a pavimentação de aeroportos, a classificação do solo é baseada na granulometria, na textura e na plasticidade dos solos. A forma das curvas granulométricas também é considerada para distinguir os solos bem graduados dos solos mal graduados (SENÇO, 1995; COSTA, 2006). Nessa classificação, de uma forma geral, os solos podem ser:

- Solos de granulação grossa, quando apresentam 50% ou mais dos grãos retidos na peneira nº200;
- Solos de granulação fina, apresentando 50% ou mais passando na peneira nº200;

- Solos altamente orgânicos, representados pelas turfas ou similares, onde apresentam matéria orgânica decomposta de fácil identificação.

Já na classificação T.R.B. os solos são divididos em grupos e subgrupos, relacionados à granulometria, aos limites de consistência e ao índice de grupo, este último calculado através dos resultados desses ensaios (DNIT, 2006). No decorrer do desenvolvimento da engenharia rodoviária nacional, percebeu-se que a limitação dada pelos europeus e norte-americanos aos solos finos, quanto ao uso como material de pavimentação, não estava coerente com o comportamento apresentado pelos solos tropicais presentes no Brasil (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Algumas características indesejadas presentes nos solos finos de regiões de clima frio e temperado, sujeitos ao congelamento, tais como baixa permeabilidade, menor rigidez, maiores deformabilidades, aumento da expansão volumétrica e redução da resistência com a presença de água, podem não ser observadas em solos tropicais. Estudos geológicos e pedológicos foram fundamentais na compreensão do comportamento geotécnico diferenciado desses solos através da sua formação (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

A partir daí, Nogami e Villibor desenvolveram uma nova classificação aplicada a solos tropicais para obras viárias. Nessa classificação, o solo é dividido em: de comportamento laterítico (representado pela letra L) e de comportamento não laterítico (representado pela letra N). Conhecida como classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical), essa abordagem enfoca adequadamente as características e peculiaridades dos solos desenvolvidos no clima tropical úmido (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Os solos saprolíticos e os lateríticos são duas classes que se destacam dentre os solos tropicais, pois apresentam comportamentos distintos. Em seus experimentos, Nogami e Villibor (1995) obtiveram comportamentos distintos com solos que pertenciam à mesma classe segundo as classificações tradicionais. Segundo os autores, os solos tropicais avaliados pertenciam à classe A-7-5 na classificação T.R.B., porém os lateríticos apresentaram melhor desempenho mecânico frente aos saprolíticos. Isso mostra que apenas a aplicação da classificação T.R.B. pode restringir o uso de um determinado material com determinadas qualificações relevantes.

2.2.2 Caracterização mecânica das camadas granulares de pavimentos

Ainda está em uso no Brasil a caracterização de um material através do ensaio ISC (Índice de Suporte Califórnia), que representa um índice de resistência à penetração de um pistão por compressão no solo, com aplicação lenta e crescente de tensão envolvendo grandes deslocamentos. Apesar de ser de amplo uso, o parâmetro ISC possui baixa correlação com o comportamento real e o desempenho de um pavimento, pois em situações reais as cargas provenientes das rodas dos veículos são aplicadas rapidamente, com intensidades e frequências variáveis, ao contrário do módulo de resiliência (MR), que tem relação direta com o tipo de solicitação imposto pelo tráfego ao pavimento. Bernucci *et al.* (2008) listam as seguintes razões para se substituir o ISC (CBR) e outros valores de resistência dos materiais pelo MR:

- o MR indica uma propriedade básica do material que auxilia na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- o MR é um parâmetro aceito internacionalmente para projetos e avaliação de desempenho de pavimentos;
- há técnicas disponíveis para a estimativa do módulo de resiliência em campo, através de ensaios não-destrutivos, como, por exemplo, Viga Benkelman e FWD (*Falling Weight Deflectometer*), facilitando na uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

Nas situações de deflexão, termo aplicado para deslocamentos verticais de curta duração provocados pela carga das rodas, onde o material responde a uma dada solicitação com um deslocamento vertical, o estado inicial é recuperado rapidamente quando a ação da carga é anulada. Segundo Bernucci *et al.* (2008, p. 346), “parcela desse deslocamento é permanente, não-recuperável, e parcela é resiliente, recuperável quando cessa a ação da solicitação”.

De acordo com Fernandes (2004), o desenvolvimento computacional contribuiu para uma visão mais mecânica (racional) e menos empírica na análise do comportamento dos materiais nas diferentes camadas de um pavimento rodoviário, através da verificação do desempenho frente aos esforços mecânicos transmitidos pelas rodas dos veículos.

O comportamento resiliente do material é um importante critério a ser observado no dimensionamento das camadas de um pavimento. Assim, de acordo com o MR dos diferentes

materiais empregados no pavimento, procura-se obter a menor espessura que terá um melhor desempenho diante das solicitações impostas.

Os primeiros estudos sobre a análise do comportamento resiliente dos materiais empregados na pavimentação se deu na década de 1930, através de pesquisas feitas por Francis Hveen, quando as fissuras surgidas no revestimento betuminoso foram relacionadas às deformações recuperáveis. Ele também adotou o termo “resiliência”, que pode ser definido como a “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Em seus experimentos, Hveen media as deformações verticais provocadas por carregamentos através de sensores eletromecânicos. Para não ser confundido com o módulo de Young (ou de elasticidade), que é determinado estaticamente, foi criado o nome módulo de resiliência, agora determinado por cargas cíclicas (HVEEN, 1955 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 291).

Segundo Balbo (2007), embora as deformações elásticas estejam associadas às micro-deformações de natureza plástica, nos regimes de trabalho e resposta elástica, o módulo de resiliência dos materiais de pavimentação pode ser determinado a partir de ensaios de laboratório e de campo. No laboratório, o valor do módulo de resiliência é determinado com base na relação entre a tensão aplicada e a respectiva deformação recuperável. Por outro lado, a partir dos ensaios de campo, são interpretadas as deflexões ocorridas durante provas de carga realizadas com viga Benkelman ou FWD, empregando-se a técnica de retroanálise para estimativa do MR das camadas do pavimento.

Cada camada do pavimento possui um comportamento resiliente específico e, nas camadas granulares, esse parâmetro varia de acordo com estado de tensões em que o ponto avaliado está sendo submetido, devido à profundidade e a carga de tráfego (MEDINA e MOTTA, 2005).

De acordo com Motta e Medina (2006, p. 1) “o problema do trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos sob a ação do tráfego passou a ser modelado de forma mais adequada quando se aplicam os conceitos de deformabilidade elástica do pavimento”. A mecânica dos pavimentos vem englobando não somente essas novas modelagens, mas também o enfoque do pavimento como um sistema de multicamadas.

2.2.3 Ensaio triaxial com aplicação de carga repetida em solos e britas

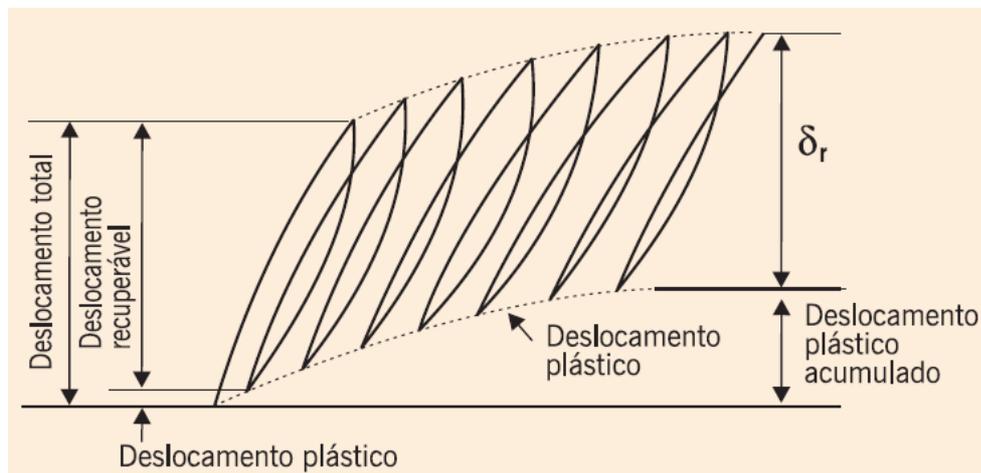
O ensaio Triaxial de Carga Repetida é utilizado para determinar o parâmetro módulo de resiliência (MR) dos materiais empregados na base, sub-base, reforço do subleito e subleito de

pavimentos. São materiais geralmente constituídos por agregados, solos e aditivos como cimento, cal, dentre outros, que quando devidamente executados respondem ao efeito da ação de cargas repetidas oriundas do tráfego no pavimento, com intensidades variadas e com diferentes frequências, que podem acontecer em frações de segundos, conforme citado por Bernucci *et al.* (2008).

A aparelhagem do ensaio possui um sistema de carregamento pneumático, no qual a tensão desvio e a pressão confinante são controladas por rotinas computacionais, que ativam as válvulas, enquanto que os deslocamentos do corpo-de-prova são medidos com o auxílio de no mínimo dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) colocados diametralmente opostos no corpo de prova.

Após a fase de aplicação de combinações variadas de tensões, os deslocamentos resilientes relativos aos ciclos de repetição de carga são obtidos, como representado na Figura 8. Observando o comportamento desse gráfico, percebe-se que uma parcela de deslocamento é recuperável e a outra é acumulada e permanente. A fase de condicionamento auxilia para que estas deformações plásticas sejam de pequena magnitude. Esses deslocamentos são obtidos ao longo de uma determinada altura através do LVDT instalado no aparelho (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 8- Representação dos deslocamentos sofridos pelo corpo-de-prova (BERNUCCI *et al.*, 2008).



De acordo com a norma DNIT-ME 134 (2010), com os valores obtidos, são calculados os módulos de resiliência para cada par de tensões e deformações, por meio das seguintes expressões:

$$MR = \frac{\sigma d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta h}{H_0} \quad (2)$$

Sendo:

MR = módulo de resiliência (kPa);

Σd = tensão desvio aplicada repetidamente (kPa);

ε_R = deformação específica resiliente;

Δh = deformação resiliente registrada no computador (cm)

H_0 = distância entre alças, no terço médio do corpo de prova (cm)

2.2.4 Comportamento resiliente dos materiais

Atualmente, o parâmetro módulo de resiliência é bastante empregado no estudo da mecânica dos pavimentos, tanto na fase de projeto, como a dosagem das misturas, dimensionamento da espessura das camadas e escolha dos materiais, quanto na avaliação do desempenho de pavimentos existentes. Neste sentido, de acordo com Bernucci *et al.* (2008, p. 339), é preciso ter “o entendimento do pavimento como uma estrutura que forma um sistema em camadas que trabalham solidariamente”, o que “permite compatibilizar os materiais em termos de rigidez”.

Em solos coesivos, verifica-se que a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão-desvio, diminuindo sensivelmente essa variação para maiores tensão-desvio. Já para solos granulares, há um aumento do módulo de resiliência quando esses são submetidos às pressões confinantes maiores. O mesmo não ocorre com o aumento da tensão desvio, neste caso, havendo pouca variação do MR (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Existem também os solos areno-argilosos, cujos comportamentos, segundo Motta *et al.* (1990) *apud* Bernucci *et al.* (2008), dependem tanto da pressão de confinamento como da tensão-desvio. Bernucci *et al.* (2008) acrescentam que, em materiais estabilizados com percentuais significativos de cimento ou cal, independente da tensão-desvio e da pressão de confinamento, o módulo de resiliência tende a ser constante, devido à cimentação das partículas.

Com o ensaio Triaxial de Carga Repetida são obtidos modelos matemáticos constitutivos que podem ser empregados para estimar o MR em função das tensões atuantes. A seguir, serão apresentados três modelos disponibilizados na literatura para se estimar o MR de solos e materiais granulares. O primeiro modelo, utilizado por Hicks (1970) *apud* Medina e Motta (2005), e recomendado para materiais granulares, relaciona o MR à pressão confinante aplicada (Equação 3); no segundo modelo, sugerido por Svenson (1980) e muito utilizado

para solos finos argilosos, o MR é dependente da tensão desvio (Equação 4); por fim, tem-se uma terceira formulação, denominado modelo composto dado na Equação 5 (MACÊDO, 1996), avaliado positivamente em pesquisas com o uso do agregado reciclado de RCD, como em Grubba (2009) e Silva (2009).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (4)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (5)$$

Sendo:

MR – Módulo de Resiliência

σ_3 – Pressão Confinante

σ_d – Tensão Desvio

k_1, k_2, k_3 – Parâmetros de resiliência obtidos nos ensaios triaxiais

As deformações e deflexões do pavimento estão relacionadas ao módulo resiliente dos materiais empregados e caracterizam as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito. É através do arqueamento provocado pela deformação recuperável que se dá, a partir de várias repetições, o fenômeno da fadiga das camadas mais rígidas (PINTO e PREUSSLER, 2002).

Vários comportamentos dos materiais de pavimento podem ser previstos com base no MR. Os solos apresentam características mecânicas que dependem, devido às variações no módulo de resiliência, das condições de umidade, da energia e do método de compactação. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), pode haver uma queda significativa no MR do material com o aumento da umidade. Em uma situação oposta, onde se tem a perda de umidade, os autores afirmam que os solos podem apresentar trincamento por contração, reduzindo o MR equivalente da camada.

De acordo com Motta e Medina (2006), a partir da década de 1990, aumentou-se o número de projetos elaborados através de métodos mecanísticos para pavimentos novos, sendo utilizados os resultados de ensaios triaxiais de cargas repetidas e métodos de cálculo de tensões e deformações, a exemplo do programa Elsym5.

2.2.5 Uso de resíduos na pavimentação

Muitas pesquisas já foram realizadas com o uso de resíduos aplicados à pavimentação, podendo-se destacar entre elas os estudos de Pinheiro e Soares (2005), que utilizaram os resíduos de borracha para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos, com a adição

do polímero ao ligante, resultando em uma mistura mais flexível, mais durável e com menor susceptibilidade térmica.

Casagrande *et al.* (2006) avaliaram o uso da borra oleosa asfáltica pura, proveniente do fundo dos tanques das refinarias como material componente das camadas de revestimento asfáltico para pavimentos de baixo volume de tráfego. Nessa pesquisa, eles compararam os resultados com os obtidos usando-se o CAP convencional, através de misturas do tipo CAUQ. Como resultado, obteve-se um bom desempenho no uso da borra oleosa asfáltica pura como ligante em pavimentos de baixo volume de tráfego, possibilitando uma destinação mais nobre desse material, tanto no ponto de vista ambiental quanto sócio-econômico.

Aldigueri, Parente e Soares (2004) avaliaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas contendo solo contaminado com petróleo. Essas contaminações de solos são o resultado de vazamentos de oleodutos, gerando impactos ao meio ambiente local. Diante dessa problemática, tornou-se necessária a realização de estudos para verificar a incorporação desse solo contaminado em misturas asfálticas do tipo CAUQ. Nesses experimentos foram avaliadas a influência do teor de solo contaminado no módulo de resiliência e na resistência à tração dessas misturas. De acordo com os dados obtidos, os autores concluíram que as misturas analisadas, no que diz respeito aos aspectos estruturais, podem ser aplicadas como camada de revestimento de pavimentos.

As escórias de alto forno e aciaria, os rejeitos da mineração, os resíduos sólidos da construção civil e os resíduos da perfuração de poços de petróleo (cascalho de perfuração) são outros exemplos de materiais alternativos com potencial de aproveitamento na cadeia produtiva de pavimentos do Brasil (OLIVEIRA, 2007; CAVALCANTE *et al.*, 2010).

Dos resíduos provenientes da indústria da construção civil, é importante destacar o trabalho pioneiro realizado por Freitas (2010), no qual foi usado o resíduo de gesso da construção como filer em misturas asfálticas do tipo CAUQ. Com base nos resultados obtidos, foi constatado que o emprego do resíduo de gesso, até cerca de 2% em massa, atendeu aos requisitos e especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT) e melhorou as características mecânicas da mistura, além de ter reduzido o consumo de ligante. Com esse resultado positivo, o uso desta técnica revelou-se uma alternativa tecnicamente viável para a destinação desse rejeito.

Lucena (2009) desenvolveu uma pesquisa na Universidade Federal de Campina Grande utilizando os resíduos de serragem de granito e de caulim como filer em misturas do tipo

CAUQ. No trabalho, a autora analisou o comportamento mecânico, físico e mineralógico das misturas contendo esses resíduos. Como resultado, observou-se um bom desempenho das misturas, constituindo-se numa importante alternativa para minimizar o impacto ambiental ocasionado pela disposição inadequada desses materiais. Ainda de acordo com a autora, toda e qualquer forma de reciclagem de resíduos está sujeita à aprovação perante a legislação ambiental vigente, através da análise do impacto ambiental causado pela sua incorporação. A autora ainda afirma que “um resíduo que é totalmente incorporado na forma de produto final a um volume inerte de material perde sua identidade como resíduo”.

2.3 Uso de RCD nas camadas granulares de pavimentos

Segundo Ulsen (2006), a pavimentação é a área que mais aproveita os resíduos da construção civil reciclados no Brasil e no exterior. O uso do RCD como matéria prima reduz a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente, substituindo em grande parte os agregados naturais empregados na produção de material de pavimentação, na forma de brita corrida ou ainda em misturas do resíduo com solo. A reciclagem pode auxiliar na produção de materiais de menor custo, também colaborando na redução do custo de obras rodoviárias. O resíduo reciclado, além de ser produtivo, reduz a necessidade de espaço para a concentração dos mesmos e aumenta a vida útil de aterros sanitários.

De acordo com Carneiro, Burgos e Alberte (2001), o uso do agregado reciclado de RCD classe A na pavimentação tem como vantagens a utilização de grande quantidade de material reciclado, a simplicidade no processo de execução do pavimento e produção do agregado, uso da grande variedade de materiais dessa classe e utilização da granulometria graúda, possibilitando a redução do consumo de energia de produção do agregado. A Figura 9 apresenta um caso de aplicação do RCD na construção de um trecho experimental para análise posterior de desempenho.

Figura 9 - Execução de pista experimental em Goiânia (OLIVEIRA, 2007).



Dos resultados obtidos por Carneiro, Burgos e Alberte (2001) concluiu-se que o agregado reciclado miúdo (material passante na peneira 4,8mm), por ser puramente granular, se mostrou adequado para a estabilização de solos de plasticidade predominante, tais como o solo saprolítico usado na pesquisa. Grubba (2009) obteve valores de ISC superiores a 163% e expansibilidade nula, nos agregados de resíduo de concreto (ARC) compactados sob energia modificada. Já nas misturas com solos, com 75% de ARC, em comparação aos resultados obtidos com os solos puros, percebeu-se um aumento significativo do ISC e uma expansibilidade abaixo do limite máximo (0,5%) previsto na NBR 15115 (2004), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de CBR e expansão obtidos para o ARC-solo e para o solo (adaptado de GRUBBA, 2009)

CORPO DE PROVA	ISC (%)		EXPANSÃO (%)	
	ARC-SOLO	SOLO	ARC-SOLO	SOLO
1	173	54	0,0	0,25
2	168	30	0,0	0,26
3	152	38	0,0	0,37

Leite (2007), utilizando o agregado reciclado misto de Santo André, obteve um ISC médio de 117% para a energia modificada e 73% para a energia intermediária. Em ambos os casos, com relação à expansão, não foi observada qualquer alteração do material. Em sua pesquisa, o autor também observou a ocorrência de quebras dos grãos na compactação, e, conseqüentemente, alteração da granulometria inicialmente prevista. Com isso, ressalta-se que métodos de controle tecnológico normalmente empregados aos materiais convencionais podem não satisfazer ao caso de agregado reciclado de RCD.

No Brasil já existe normatização para o uso dos agregados reciclados de RCD em pavimentação. A norma ABNT NBR 15116 (2004), que também engloba o uso em concreto sem função estrutural, estabelece os requisitos de emprego dos agregados de RCD em pavimentos, através de propriedades como a distribuição granulométrica, o índice de forma, os teores máximos de contaminantes, além dos parâmetros de expansibilidade e capacidade de suporte. Por outro lado, a norma ABNT NBR 15115 (2004) estabelece os critérios para a execução de camadas de reforço de subleito, sub-base e base com agregados reciclados em pavimentação.

Nas pesquisas realizadas com o uso de RCD em pavimentação, Ricci (2007) utilizou o agregado reciclado de RCD na composição do concreto compactado com rolo (CCR) para

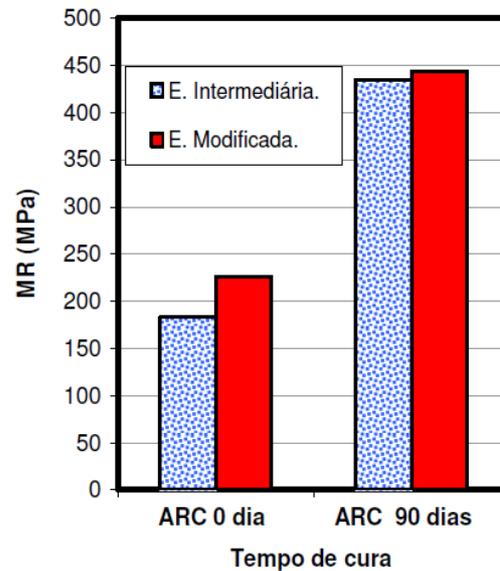
compor a camada de base de pavimentos. Comparando as características do agregado de RCD com os agregados naturais britados, o autor observou que o CCR composto por esses resíduos obteve bons resultados no parâmetro resistência. Já Amadei (2011) e Hood (2006) utilizaram os resíduos da construção como agregados na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Santos (2007) avaliou o uso de agregados de RCD do tipo “bica corrida” mista objetivando o seu uso como material de preenchimento de estruturas de solo reforçado.

Fernandes (2004) caracterizou mecanisticamente os agregados reciclados de RCD dos municípios de Belo Horizonte e Rio de Janeiro. Em sua pesquisa, foi elaborado um projeto rodoviário real onde os agregados convencionais foram substituídos por agregados da britagem dos RCD para compor camadas de base, sub-base e reforços de subleito de pavimentos rodoviários e rurais. Das conclusões, observou-se que há a viabilidade não só técnica, mas também, econômica e sócio-ambiental do emprego do RCD na pavimentação.

Gabr *et al.* (2013) analisaram o comportamento mecânico dos agregados reciclados de concreto provenientes de usinas recicladoras da cidade de Adelaide, no sul da Austrália e de um agregado natural obtido na região. Na pesquisa eles utilizaram o ensaio triaxial de cargas repetidas para avaliar as deformações das amostras e o comportamento resiliente dos materiais em diferentes condições de tensões e teores de umidade. A partir dos resultados obtidos, pelo comportamento apresentado nos ensaios, foi constatado que os agregados de RCD utilizados na pesquisa podiam ser utilizados como material de base e, para determinados teores de umidade, eles foram considerados adequados ao tráfego pesado, segundo os requisitos apresentados por Vuong e Arnold (2006).

Na pesquisa de Gabr *et al.* (2013), em geral, os agregados reciclados que foram analisados tiveram um desempenho melhor do que os agregados naturais da região, tanto em termos de deformação permanente quanto ao módulo de resiliência. Grubba (2009) utilizou o agregado reciclado de concreto, e os resultados obtidos indicaram um comportamento mecânico muito próximo ao do agregado natural, apresentando, inclusive, ganho considerável de resistência e rigidez com o decorrer do tempo e cura, devido ao fenômeno de cimentação própria do material, conforme pode ser visto na Figura 10. O autor afirma ainda que, no caso dos agregados reciclados, o desempenho mecânico depende de diversos fatores, tais como a resistência à compressão do concreto de origem, a composição ou percentual de materiais presentes, a graduação e o grau de compactação.

Figura 10 - MR dos agregados reciclados de concreto para os tempos de cura de 0 e 90 dias (GRUBBA, 2009).



Fernandes (2004) concluiu que a composição do agregado reciclado foi o fator que mais influenciou nos valores de módulo de resiliência obtidos em sua pesquisa. Nataatmadja e Tan (2001), com base nos resultados obtidos, também observaram que o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto está relacionado à resistência à compressão simples do concreto de origem, concluindo que quanto maior for essa resistência, maiores serão os valores de módulo de resiliência dos agregados reciclados.

Dias *et al.* (2006) realizaram ensaios triaxiais de carga repetida com amostras de diferentes distribuições granulométricas do agregado reciclado de telha cerâmica vermelha e com misturas desse material com solos, correlacionando os valores do módulo de resiliência com a porosidade do esqueleto granular do agregado. Os autores concluíram que quanto menor a porosidade do esqueleto granular do agregado, ou seja, quanto melhor for o empacotamento dos grãos, maior o valor do MR.

Esse princípio foi confirmado através dos resultados de MR obtidos para as misturas de agregado reciclado com solos lateríticos. Nessas misturas, otimizadas através de um percentual de solo na mistura igual ao valor da porosidade do agregado, observou-se aumentos expressivos no valor do MR em relação aos agregados com maior porosidade. Outro fator observado foi em relação à quebra dos grãos após os ensaios triaxiais, diferente do que ocorreu com os agregados reciclados puros, as misturas com solos finos, em proporção suficiente para o preenchimento dos vazios entre os grãos dos agregados, não apresentaram variação da distribuição granulométrica (DIAS *et al.*, 2006).

Motta (2005) empregou os aglomerantes cal e cimento Portland com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do agregado reciclado, através do ganho de resistência com o tempo e cura motivado pela atividade pozolânica intrínseca a esses materiais. O autor comparou seus resultados com os obtidos do material reciclado *in natura* com o mesmo tempo de cura, observando que, mesmo sem o uso de aglomerantes, a compactação faz com que ocorra aumento na quantidade de finos, ativando o potencial pozolânico dos agregados reciclados, que reage com a presença de água e ganha resistência com o tempo.

Oliveira (2007) estabeleceu indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimento, através da realização de ensaios de laboratório e de campo, obtendo bons resultados de desempenho mecânico e funcional no monitoramento de um trecho experimental com uso desses resíduos. De acordo com autor, a constituição do agregado de RCD é um dos importantes indicadores das potencialidades, pois a presença de grãos cimentícios contribui para o ganho de resistência ao longo do tempo. Outros indicadores importantes citados pelo autor são a resistência dos grãos dos agregados reciclados, determinada pelo índice de desgaste por abrasão Los Angeles, e os parâmetros de ISC e MR, que se mostraram adequados em relação ao emprego dos agregados reciclados em camadas de sub-base e base de pavimentos.

Segundo Motta (2005), o fator econômico, medido através dos menores preços de aquisição, comparados aos dos materiais naturais convencionalmente utilizados, torna o agregado reciclado bem atrativo para uso em pavimentos de baixo custo. Em alguns países como os Estados Unidos e a Holanda, já houve a consolidação da reciclagem de resíduos sólidos em pavimentos. Nesse último, por exemplo, cerca de 95% de toda a base dos pavimentos das ruas é executada com resíduos da construção civil (OLIVEIRA, 2007). Já nos Estados Unidos estima-se que 85% do total de resíduos de concreto reciclados são aplicados nas camadas de base e sub-base de pavimentos (WILBURN e GOONAN, 1998 *apud* GRUBBA, 2009).

Ribeiro e Rezende (2006) realizaram ensaios de campo para determinar parâmetros estruturais de um trecho de pavimento executado com o uso do RCD em Goiânia (GO). Embora o trecho em estudo tenha sido executado sem controle, os resultados obtidos foram satisfatórios com relação ao desempenho da pista. Já Fernandes (2004) verificou que, mesmo dimensionadas empiricamente, vias urbanas da cidade de Belo Horizonte que já tinham sido executadas com o uso de RCD em camadas de base e sub-base apresentaram bom

desempenho. O mesmo autor afirma que o uso do agregado reciclado de RCD é “uma resposta à necessidade de crescimento sustentável não apenas de um município, mas de um país, caracterizando a adoção da “filosofia” da racionalidade, da filosofia da preservação”.

Na RMA, recentemente observou-se uma aplicação pioneira de agregados reciclados de RCD em misturas com solos para compor a camada de base da avenida Novo Horizonte, no município de Nossa Senhora do Socorro. As Figuras 11 e 12 ilustram o andamento dos serviços de execução desse pavimento, que será composto por uma camada com 7 cm de revestimento asfáltico do tipo CAUQ, uma base com 23 cm de uma mistura preparada no local, composta por uma combinação das três frações do agregado de RCD estudado nesta pesquisa com um solo argiloso, e uma sub-base de solo argiloso com 20 cm de espessura.

Silva *et al.* (2006) destacam que a adição de material argiloso no enquadramento das misturas de solos com agregados reciclados em uma das faixas do DNIT melhora a trabalhabilidade no campo, diminuindo a quantidade de material solto devido a falta de coesão desses agregados.

Figura 11 – Armazenamento das três diferentes frações de agregados de RCD próximo à aplicação.



Figura 12 – Execução de um trecho da avenida Novo Horizonte com uso de misturas de agregados RCD.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram avaliados os desempenhos dos agregados reciclados graúdo e miúdo, tanto misturados entre si, quanto misturados com 2 (dois) solos típicos locais, frequentemente utilizados na execução de camadas de base e sub-base de pavimentos urbanos da RMA. A caracterização geotécnica dos materiais foi realizada com base nos métodos convencionais, além do emprego dos ensaios de módulo de resiliência para verificação do desempenho mecânico dos solos e das misturas em laboratório. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (GeoPav/UFS).

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Solos

Foram selecionadas 2 (duas) amostras de solos de jazidas que estão em uso ou já foram exploradas para compor camadas de pavimentos urbanos da Região Metropolitana de Aracaju. A primeira amostra foi coletada da jazida Alegrete (cujo solo será denominado nesta pesquisa como ALE), situada próximo ao povoado Aldeia, município de São Cristóvão/SE, pertencente à RMA; e a segunda foi extraída da jazida Aningas (cuja denominação utilizada será ANI), localizada no mesmo município. A opção de trabalhar com mais de um tipo de solo teve o objetivo de avaliar a influência dos agregados de RCD quando misturados com solos de propriedades geotécnicas relativamente diferentes.

Os pontos de coleta das amostras foram georreferenciados com o uso de instrumento de posicionamento tipo GPS (*Global Position System*). A Figura 13 mostra a localização dos pontos de coleta das duas jazidas e a Tabela 7 mostra as coordenadas desses pontos.

Tabela 7 – Coordenadas dos pontos de coleta das amostras.

PONTO	JAZIDA	COORDENADAS
1	Alegrete (ALE)	S10° 53' 57,7" ; W37° 15' 59,8"
2	Aningas (ANI)	S10° 58' 36,7" ; W037° 14' 17,2"

Figura 13 – Mapa de Sergipe com localização dos pontos de coleta.



Para a realização dos estudos, foram coletados aproximadamente 200 kg de cada solo. As duas amostras foram coletadas de pontos situados nos taludes de cortes da exploração da jazida, evitando-se assim a coleta de solo com a parcela orgânica. As Figuras 14 e 15 apresentam as vistas das ocorrências das amostras nos locais coletados.

Figura 14 – Aspecto visual do ponto de coleta 1, na jazida Alegrete (ALE).



Figura 15 – Aspecto visual do ponto de coleta 2, na jazida Aningas (ANI).



Após a coleta, as amostras de solos foram acondicionadas em sacos e armazenadas no laboratório, onde posteriormente foram realizadas as etapas de secagem ao ar, destorroamento (Figura 16), e separação em parcelas reduzidas para realização dos ensaios através do separador mecânico, conforme preconiza o método de ensaio DNER-ME 041 (1994).

Figura 16 – Foto da etapa de destorroamento da amostra do solo da jazida Alegrete (ALE).



3.1.2 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Foram coletadas 3 (três) amostras de agregados de RCD provenientes da usina recicladora instalada no município de Nossa Senhora do Socorro, pertencente à RMA. Buscou-se utilizar o RCD com maior heterogeneidade de materiais na sua composição, por estes serem produzidos com processos mais simplificados e por serem os materiais produzidos em maior escala, devido à falta de triagem das diferentes classes de materiais em grande parte dos canteiros de obras geradores da RMA.

Dias *et al.* (2006) afirmam que, no processo de produção de agregados reciclados, quanto menor for a necessidade de intervenção no processo de obtenção do material, menores serão os custos empregados, viabilizando o seu uso quando comparados aos materiais naturais.

No processo de reciclagem da usina, o RCD passa pelas etapas de triagem, trituração e peneiramento. Após o peneiramento, são geradas e separadas três faixas granulométricas de agregados que, conforme a NBR 15116 (2004), podem ser classificados em agregados reciclados miúdos ou graúdos. Os primeiros são os materiais que passam na peneira de malha com abertura de 4,8 mm, e os agregados reciclados graúdos são aqueles que ficam retidos nessa peneira. Visando-se a substituição de solos utilizados em pavimentação pelos agregados reciclados, nessa pesquisa, coletou-se cerca de 200 kg de cada um dos três materiais fornecidos pela usina recicladora, sendo um do tipo agregado reciclado miúdo (ARM), e dois do tipo agregado reciclado graúdo (ARG), conforme mostrado nas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 – Agregado reciclado miúdo (ARM) coletado.



Figura 18 – Agregados reciclados graúdos (ARGs) coletados.



Figura 19 – Aspecto textural dos três agregados reciclados.



Para a preparação dos agregados reciclados, foram realizadas as etapas de secagem ao ar seguida da separação em parcelas reduzidas, usando-se um separador mecânico, reduzindo as amostras em quantidades adequadas para a realização dos ensaios.

3.1.3 Misturas RCD-Solos

As proporções dos materiais adotadas nesta pesquisa foram estabelecidas de acordo com o que consta na Tabela 8. Com isso, foi possível analisar diferentes situações para se concluir acerca da viabilidade técnica no emprego do agregado reciclado de RCD em misturas com solos convencionais.

Tabela 8 – Materiais e proporções utilizadas.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	MATERIAIS E PROPORÇÕES
A01	100% ALE
A02	100% ANI
A03	100% ARM
A04	100% ARG 1
A05	100% ARG 2
A06	30% ARM + 70% ALE
A07	50% ARM + 50% ALE
A08	70% ARM + 30% ALE
A09	30% ARM + 70% ANI
A10	50% ARM + 50% ANI
A11	70% ARM + 30% ANI
A12	50% ANI + 25% ARG 1 + 25% ARG 2
A13	70% ARM + 15% ARG 1 + 15% ARG 2

Para uma maior racionalização na etapa de misturas desses agregados reciclados com os solos em uma situação de preparação dessas combinações para uso em um trecho a ser pavimentado, foram escolhidos os teores de 30%, 50% e 70% em massa de RCD na

composição das misturas com solos, visando uma aproximação maior com as frações 1/3, 1/2 e 2/3 usualmente utilizadas na prática de execução de pavimentos. As Figuras 20 e 21 mostram os aspectos da amostra A12 antes e após a mistura.

Figura 20 – Foto da etapa de mistura dos materiais para a preparação da amostra A12.



Figura 21 – Foto da amostra A12 preparada.

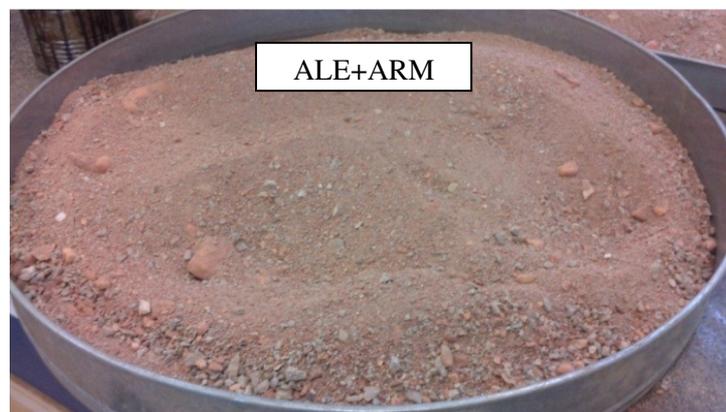


As combinações com o uso de ARM foram mais utilizadas por esse ser o material gerado em maior quantidade na usina recicladora e por permitir uma melhor estabilização granulométrica nas misturas com os solos granulares utilizados nesta pesquisa (Figuras 22 e 23). Já nas combinações com o uso dos ARGs, foram utilizados o ARM, para a preparação de uma mistura composta pelas três frações de agregados reciclados, e o solo ANI, por possuir, em relação ao solo ALE, uma parcela menor de grãos pedregulhosos.

Figura 22 – Foto da fase de preparação da amostra A07.



Figura 23 – Foto da amostra A07 preparada.



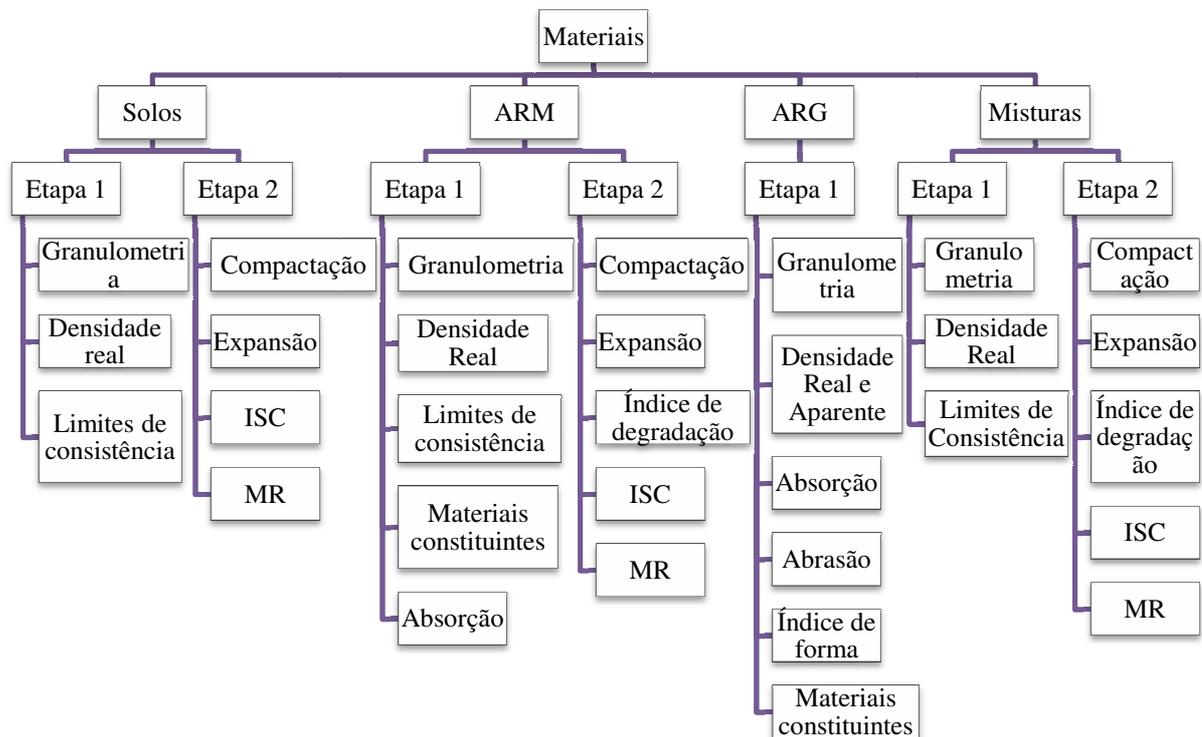
3.2 Métodos experimentais

O programa experimental idealizado para esta pesquisa foi dividido em duas etapas: i) a primeira voltada à parte de caracterização física das amostras de solos, dos agregados reciclados puros e das misturas solo-agregados RCD, onde foram realizados os ensaios de granulometria, densidade real, limites de Atterberg, absorção, abrasão e índice de forma; ii) na segunda etapa foram realizados os ensaios de compactação usando-se a energia intermediária, a granulometria após a compactação, e os ensaios mecânicos para a obtenção do Índice de Suporte Califórnia (ISC), expansão e Módulo de Resiliência (MR).

Dentro da etapa (i) também foi realizada a classificação dos agregados reciclados, segundo as prescrições da NBR 15116 (2004), e a análise da natureza dos materiais constituintes e do teor de contaminantes. Destaca-se que o comportamento mecânico dos materiais está relacionado às suas propriedades físicas, por isso essa etapa é de suma importância para a análise do desempenho dos agregados reciclados de RCD.

Tanto na etapa de caracterização física, quanto na etapa de caracterização mecânica, os ensaios foram realizados duas vezes e, quando os valores obtidos possuíam uma diferença maior que 10% da média dos resultados, uma terceira repetição de ensaio era realizada. Os resultados apresentados foram calculados através da média dos valores obtidos nas repetições de ensaios. A Figura 24 apresenta um fluxograma que resume o programa experimental utilizado nesta pesquisa, realizada no GeoPav/UFS.

Figura 24 – Fluxograma empregado no programa experimental desta pesquisa.



3.2.1 Caracterização física dos solos e das misturas RCD-solos

Após a separação e preparação das amostras de acordo com norma DNER-ME 041 (1994), foram iniciados os ensaios de caracterização dos solos e das misturas RCD-solos.

A caracterização inicial dos materiais (solos puros e as misturas com agregados reciclados) foi realizada com base nas suas texturas obtidas pela análise da distribuição granulométrica do processo de peneiramento e de sedimentação, conforme os procedimentos da norma DNER-ME 051 (1994). Já para a determinação da densidade real, dado importante para o ensaio de sedimentação, foi utilizada a norma DNER-ME 093 (1994). A Figura 25 abaixo mostra fotos das etapas de peneiramento e sedimentação da análise granulométrica.

Figura 25 – Fotos da etapa de realização dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação das amostras.



Para a fração de solo que passa na peneira com abertura de malha de 0,42 mm (nº. 40), foram determinados os limites de consistência através dos ensaios de Limite de Liquidez (LL), conforme mostra a Figura 26, e de Limite de Plasticidade (LP), utilizando-se as normas DNER-ME 122 (1994) e DNER-ME 082 (1994), respectivamente. Após a obtenção desses dois parâmetros obteve-se o índice de plasticidade (IP).

Figura 26 – Foto da etapa dos ensaios de Limite de Liquidez com o aparelho de Casagrande automático.



Na classificação dos solos e das misturas com resíduos usados nesta pesquisa, foi empregado o sistema T.R.B. (*Transportation Research Board*). A avaliação quanto à aplicabilidade dos materiais será feita com base nas especificações apresentadas pela NBR 11804 (1991) e pelo DNIT (2006), que estabelece os requisitos para os materiais usados na sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente.

3.2.2 Caracterização física do agregado reciclado miúdo

O procedimento de caracterização do agregado reciclado miúdo seguiu os métodos e requisitos estabelecidos pela norma NBR 15116 (2004). Desta forma, nesta pesquisa, o ARM foi caracterizado com base nos ensaios convencionais de análise granulométrica, massa específica real e limites de consistência, conforme as especificações das normas correspondentes, além da absorção, conforme a norma NBR NM 30 (2001), e da análise da natureza dos materiais constituintes e o teor de materiais indesejáveis.

No ensaio para análise da natureza de materiais constituintes e do teor de materiais indesejáveis do ARM, após a separação de uma amostra com 1000 g, obtida através do repartidor mecânico, o material foi lavado na peneira de malha 1,18 mm (nº. 16) e, em seguida, a parcela retida foi colocada na estufa para secagem até a constância de massa. Após essa etapa, a amostra passou pelo processo de catação e análise visual macroscópica, obtendo-se a quantidade em massa de cada material constituinte do ARM.

Para a determinação da absorção do ARM, foram separados 1000g de material e utilizaram-se os procedimentos da NBR NM30 (2001). Nessa etapa, o material seco foi imerso em água, conforme ilustrado na Figura 27. Após 24 horas de imersão, o ARM foi retirado da água e submetido ao processo de secagem com auxílio de um tronco cônico para obtenção da massa do agregado saturado com superfície seca, como pode ser visualizado na Figura 28. A quantidade de água absorvida foi obtida através da diferença em massa desse material saturado com esse mesmo material seco em estufa até constância de massa.

Figura 27 – Imersão do ARM em água para saturação.



Figura 28 – Uso do tronco cônico no ensaio de absorção.



3.2.3 Caracterização física dos agregados reciclados graúdos

Para a caracterização dos agregados reciclados graúdos (ARGs), foram realizados os ensaios de análise granulométrica por peneiramento, conforme a norma NBR NM 248 (2003), determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, de acordo com a NBR 7809 (1983), o ensaio abrasão “Los Angeles”, seguindo os procedimentos da NBR NM 51 (2001), e através dos procedimentos preconizados na NBR NM 30 (2009), foram obtidos os valores de massa específica e absorção dos ARGs.

As composições dos ARGs foram verificadas por meio da catação e análise visual macroscópica, utilizando uma amostra representativa com 4 kg de cada ARG e seguindo o procedimento da norma NBR 15116 (2004). Assim como foi feito com o ARM, nessa etapa, os grãos foram separados e agrupados conforme sua natureza, para a obtenção do percentual em massa de cada tipo distinto de material. Os materiais considerados contaminantes, pertencentes a outras classes, foram separados e pesados para verificar os seus teores em relação à massa total da amostra. As Figuras 29, 30 e 31 mostram os procedimentos dessa etapa de classificação dos ARGs.

Figura 29 – Lavagem para preparação da amostra do ARG2.



Figura 30 – Separação conforme a natureza dos constituintes do ARG1.



Figura 31 – Separação conforme a natureza dos constituintes do ARG2.



Nas determinações de massa específica e da absorção, foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela norma NBR NM 30 (2009). Já para a obtenção do índice de forma dos ARGs, foram calculadas as médias das relações de comprimento e espessura de 200 grãos de cada tipo de ARG. Para o ARG1, devido à distribuição granulométrica e conforme especificado na norma, foram utilizados os grãos retidos na peneira com abertura de 9,5 mm. Com o ARG2, os 200 grãos foram separados na mesma proporção das frações retidas nas peneiras com aberturas 12,5 mm e 9,5 mm, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.



Outro parâmetro analisado foi o percentual de perda de massa por abrasão dos ARGs. Como os ARGs utilizados não se enquadraram nas graduações estabelecidas pela norma, foram separados cerca de 5 kg de uma mesma fração granulométrica. Para o ARG1 foi utilizado o material que passava na peneira com malha de abertura 9,5 mm e ficava retido na de 6,3 mm. Já para o ARG2, foi utilizado o material que passava na peneira de abertura 19,0 mm e ficava retido na malha de 12,5 mm.

Após essa etapa, os materiais foram lavados, secados em estufa e submetidos ao ensaio de abrasão “Los Angeles”, para aplicação da carga abrasiva estabelecida na norma. Em seguida, os materiais foram lavados na peneira com abertura de malha de 1,7 mm e colocados em estufa para a verificação do material que foi perdido após o ensaio. As Figuras 33, 34 e 35 ilustram essas etapas da pesquisa.

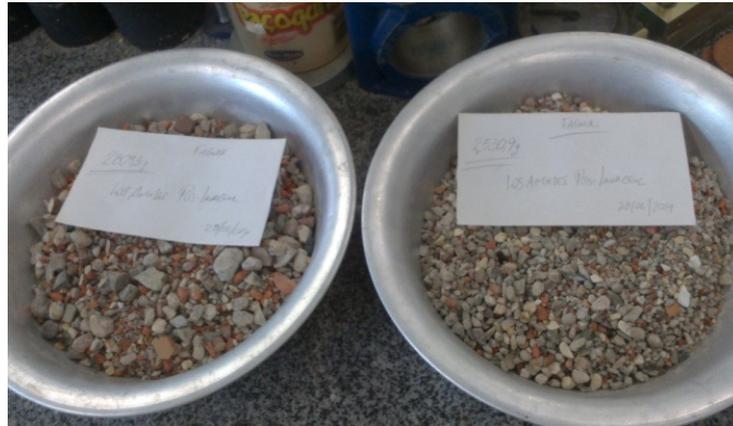
Figura 33 – Máquina do ensaio de Abrasão “Los Angeles” do GeoPav.



Figura 34 – Aspecto do ARG 2 após o ensaio de Abrasão “Los Angeles”.



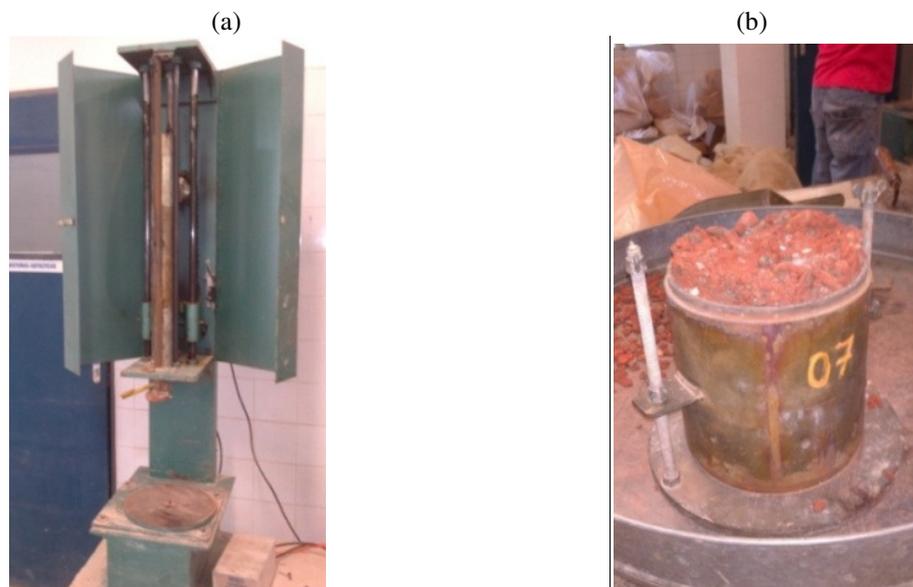
Figura 35 – Amostras de ARG 2 (à esquerda) e ARG 1 (à direita) após o ensaio de abrasão.



3.2.4 Compactação

Nesta etapa foram determinadas a massa específica seca máxima e o teor de umidade ótima através do ensaio Proctor com energia intermediária de compactação, visando o uso dos materiais em pavimentos de baixo volume de tráfego. Para a obtenção dessa energia, os corpos de prova foram moldados em 5 camadas no cilindro metálico grande, aplicando-se 26 golpes em cada camada com o soquete de 4,54 kg e altura de queda igual a 45,7 cm, conforme estabelecido pela norma NBR 7182 (1986). A Figura 36 ilustra essa etapa da pesquisa.

Figura 36 – Soquete eletromecânico do GeoPav (a) e amostra compactada no cilindro (b).



3.2.5 Índice de Degradação

Após a etapa de compactação, as amostras com agregados reciclados foram novamente avaliadas granulometricamente para a verificação da degradação do material causado pela

quebra dos grãos no processo de compactação. Para isso, os corpos de prova do ensaio Proctor foram destorroados e secos ao ar para a análise da distribuição granulométrica e para o cálculo do índice de degradação (ID).

A norma DNER-ME 398 (1999) estabelece os procedimentos para este ensaio, porém, diferentemente desta norma, que é específica para agregados naturais provenientes de rocha, na situação específica de uso dos agregados de RCD em misturas com solos, foram utilizadas as diferentes frações granulométricas entre 9,5 e 0,074 mm estabelecidas pela norma DNER-ME 051 (1994), calculando-se o ID através da média entre as diferenças percentuais de cada fração antes e após a compactação.

3.2.6 Índice de Suporte Califórnia

Os ensaios para obtenção do Índice de Suporte Califórnia (ISC) foram realizados de acordo com a norma NBR 9895 (1987). Para isso, os corpos de prova foram moldados nas condições próximas da umidade ótima e da massa específica seca máxima, obtidas nos ensaios Proctor utilizando-se a energia intermediária de compactação. Os CPs eram aceitos quando o grau de compactação (GC) estava entre 99 e 101%, e o teor de umidade de moldagem estava dentro de uma variação de $\pm 0,5\%$ em relação à umidade ótima.

Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram imersos em água por um período de quatro (04) dias e, durante esse período, foram feitas as leituras de expansão do material através de um extensômetro, como pode ser visto na Figura 37. O ensaio de ISC foi realizado na prensa mecânica manual apresentada na Figura 38, com uma velocidade de penetração do pistão de 1,27 mm/min, conforme estabelecido pela norma específica.

Figura 37 – Corpo de prova imerso em água para ensaio de ISC e expansão.



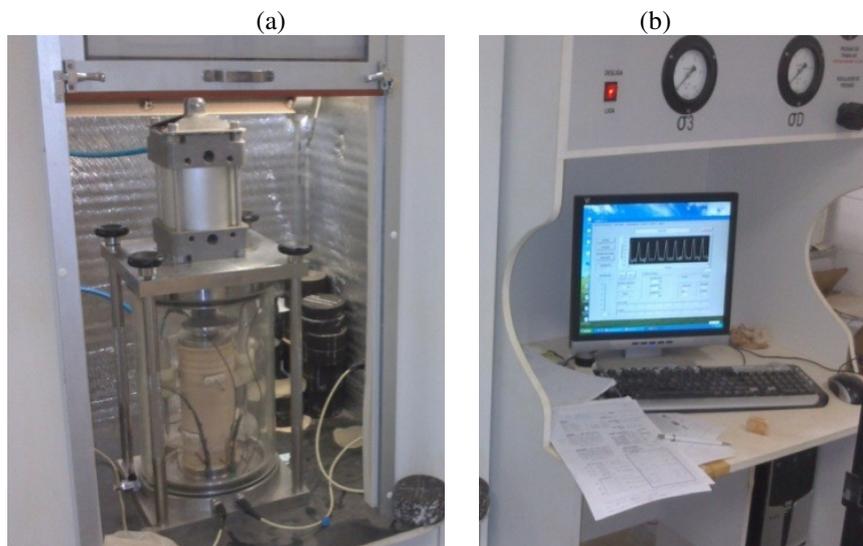
Figura 38 – Prensa mecânica manual do Geopav.



3.2.7 Módulo de Resiliência

Nessa fase de pesquisa, o desempenho mecânico das amostras foi analisado a partir dos resultados obtidos do ensaio triaxial de cargas repetidas, que fornece o módulo de resiliência, parâmetro resultante da relação entre os pares de tensão-desvio e pressão confinante aplicadas ao corpo de prova e a correspondente deformação resiliente. O equipamento utilizado para a realização destes ensaios foi o Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos (SIEMBS) do GeoPav (Figura 39).

Figura 39 – Módulo de ensaio (a) e módulo de controle do SIEMBS (b).



Para a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas, os corpos de prova (CPs) foram moldados utilizando-se a energia intermediária no ensaio de compactação e nas condições de teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima. Havia, assim como na moldagem dos CPs para o ensaio de ISC, uma tolerância de aceitação dos CPs, onde o grau de compactação (CG) deveria estar no intervalo entre 99 e 101%, e a umidade de moldagem não poderia divergir mais que 0,5% do teor de umidade ótimo. Para a moldagem dos CPs, utilizou-se o cilindro bipartido (ver Figura 40), com dimensões iguais a 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme prescrito na norma DNIT-ME 134 (2010).

Figura 40 –Cilindro bipartido utilizado na moldagem dos CPs.



Após a etapa de moldagem, inicialmente, pretendia-se realizar os ensaios triaxiais sem período de cura e com período de cura de sete (7) dias em câmara úmida, porém, alguns CPs com as amostras de solo puro, como as da amostra A02, e as que continham o menor teor de ARM nas misturas, como a amostra A06, sofreram grandes deformações e, em alguns casos houve a ruptura do CP na fase de condicionamento, não suportando as solicitações de tensão impostas, inviabilizando a etapa de ensaio dos CPs sem período de cura (Figura 41).

Cabe destacar que os corpos de prova dos solos utilizados na pesquisa de Silva (2009), moldados em diferentes energias de compactação, também não suportaram à fase de condicionamento. Aquele autor empregou dois tipos de solos em sua pesquisa com a finalidade de uso em misturas com RCD: um solo argiloso e um solo de matriz arenosa.

Com isso, deduziu-se que as amostras com maiores proporções de ARM também romperiam, visto que esse material possui mais de 85% dos seus grãos nas frações areia e pedregulho. Com isso, procurou-se analisar somente os CPs com um período de sete (7) dias de cura (Figura 42), por este ser o período em que o RCD e os solos obtiveram os maiores

valores de MR em pesquisas já realizadas com o uso desses materiais, a exemplo dos trabalhos de Jiménez (2011) e Silva, Amorim e Vieira (2002).

Figura 41 – Corpo de prova da amostra A02 com ruptura após o condicionamento.



Figura 42 – Foto dos corpos de prova em cura na câmara úmida.



Após o período de cura de sete (7) dias em câmara úmida (Figura 43), os CPs foram preparados e acondicionados na câmara triaxial, conforme apresentado na Figura 44.

Figura 43 –Da esquerda para a direita, amostras A12, A11 e A03 após o período de cura.



Figura 44 – Etapas de preparação e acondicionamento dos CPs na câmara triaxial.



Os ensaios para determinação do MR foram subdivididos em duas etapas: primeiramente foi realizado o condicionamento, para minimizar a influência das deformações plásticas e reduzir o efeito da história de tensões, e logo após, iniciou-se o ensaio, seguindo os procedimentos e pares de tensões prescritos na norma DNIT-ME 134 (2010), que trata da metodologia de ensaio para determinação do módulo de resiliência de solos. Todas as 11 amostras foram submetidas ao ensaio triaxial de cargas repetidas para avaliação do desempenho mecânico. As Tabelas 9 e 10 apresentam os pares de tensões utilizados, aplicados em frequência de 1 Hertz (60 ciclos por minuto) e com atuação da carga pelo tempo de 0,10 segundo, com 0,90 segundos de repouso.

Após cada ensaio, foram coletadas amostras de material do meio de cada corpo de prova para a determinação dos teores de umidade pós-ensaio (Figuras 45 e 46).

Tabela 9 – Pares de tensões utilizados na fase de condicionamento (adaptado de DNIT-ME 134, 2010).

PRESSÃO CONFINANTE, σ_3 (kPa)	TENSÃO DESVIO, σ_d (kPa)	RAZÃO DE TENSÕES σ_1/σ_3	CICLOS
68,9	68,9	2	200
68,9	206,8	4	200
102,9	309,0	4	200

Tabela 10 – Pares de tensões utilizadas na fase de ensaio (adaptado de DNIT-ME 134, 2010).

PRESSÃO CONFINANTE σ_3 (kPa)	TENSÃO DESVIO σ_d (kPa)	RELAÇÃO DE TENSÕES σ_1/σ_3	CICLOS
20,7	20,7	2	10
	41,4	3	10
	62,1	4	10
34,5	34,5	2	10
	68,9	3	10
	102,9	4	10
50,4	50,4	2	10
	102,9	3	10
	155,2	4	10
68,9	68,9	2	10
	137,9	3	10
	206,8	4	10
102,9	102,9	2	10
	206,8	3	10
	309,0	4	10
137,9	137,9	2	10
	274,7	3	10
	412,0	4	10

Figura 45 – Extração de material do terço médio do CP da amostra A03 para determinação do teor de umidade.



Figura 46 – Extração de material do terço médio do CP da amostra A10 para determinação do teor de umidade.

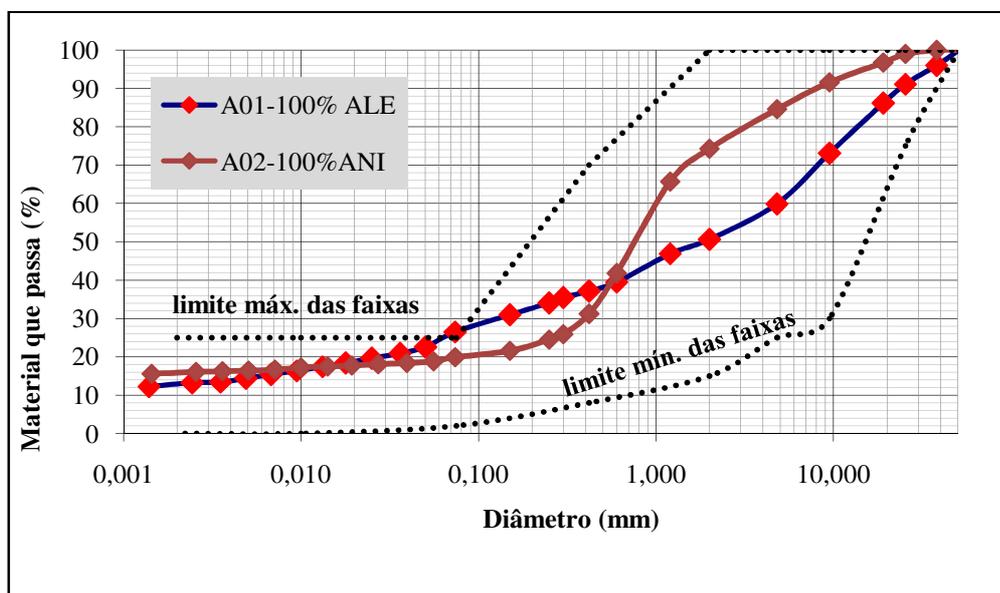


4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização física dos solos

A partir dos dados dos ensaios de análise granulométrica, com peneiramento e sedimentação, foram traçadas as curvas de distribuição granulométrica dos solos empregados nesta pesquisa, conforme se pode ver na Figura 47. Junto a essas curvas, colocou-se também os limites mínimos e máximos (curvas pontilhadas) estabelecidos pelo DNIT (2006) para o enquadramento dos materiais em uma das faixas granulométricas previstas.

Figura 47 – Curvas de distribuição granulométrica dos solos ALE e ANI.



O solo ALE, com características arenosas e com uma expressiva parcela de pedregulhos, apresentou uma curva granulométrica mais contínua, possuindo grãos com diversos tamanhos. Já o solo ANI, possui uma descontinuidade na sua curva granulométrica entre os diâmetros 0,4 e 1,2 mm.

Com base na distribuição granulométrica, pela classificação dada pelo DNIT (2006), os solos empregados nessa pesquisa enquadraram-se na Faixa D para uso como material de base de pavimentos. A Tabela 11 a seguir esquematiza os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos solos empregados.

Tabela 11 – Caracterização dos solos.

CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS UTILIZADOS					
Propriedades		Método Utilizado	Unidade	A01 -Solo Jazida Alegrete	A02 - Solo Jazida Aningas
Análise Granulométrica	Pedregulho	DNER-ME 051	%	49,40	25,73
	Areia Grossa		%	13,50	43,08
	Areia Média e Fina		%	10,60	11,30
	Silte		%	12,06	3,50
	Argila		%	14,44	16,39
Faixa granulométrica		DNIT	-----	D	D
Limite de Liquidez (LL)		DNER-ME 82	%	35	61
Limite de Plasticidade (LP)		DNER-ME 122	%	26	24
Índice de Plasticidade (IP)		DNER-ME 82	%	9	37
Massa específica real		DNER-ME 093	g/cm ³	2,65	2,64
Classificação TRB (Índice de grupo)		TRB	-----	A-2-4 (0)	A-2-7 (1)

Em relação aos índices de consistência, apesar dos dois solos apresentarem teores próximos da fração argila, observa-se que o solo ANI possui uma plasticidade muito elevada quando comparada à do solo ALE. Esses valores de LL e IP obtidos fazem com que esses dois materiais não se enquadrem nas especificações de consistência exigidas pelo DNIT (2006) para utilização em base de pavimentos, que, para essa finalidade, estabelece que o LL deva ser $\leq 25\%$ e o $IP \leq 6\%$. Entretanto, Costa (2006), caracterizando através da classificação MCT solos típicos da região costeira de Sergipe, em sua pesquisa, classificou o solo da jazida ANI como laterítico.

Costa (2006) também obteve o valor de 2,64 g/cm³ para uma amostra de solo da Jazida Aningas, valor esse igual ao obtido para o solo ANI (2,64 g/cm³) e muito próximo ao obtido para o solo ALE (2,65 g/cm³), que também é arenoso.

Com os dados da granulometria e dos índices de consistência, as amostras de solo foram classificadas segundo a classificação TRB: o solo ALE foi enquadrado como A-2-4 com índice de grupo (IG) igual a zero (0), enquanto que o solo ANI foi classificado como A-2-7 com IG igual a um (1). De acordo com esses parâmetros analisados, e seguindo as especificações do DNIT (2006), apenas o solo ALE poderia ser utilizado em sub-base de pavimentos.

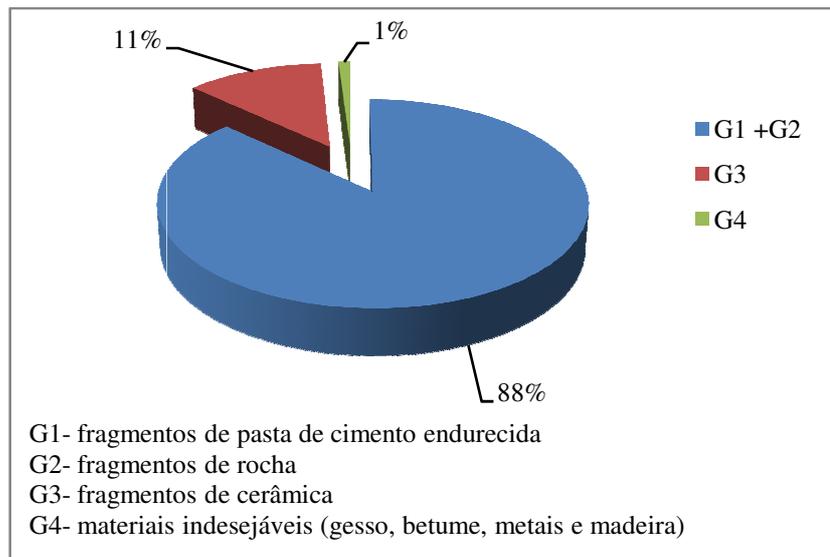
Tabela 12 – Caracterização do Agregado Reciclado Miúdo.

CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO				
Propriedades		Método Utilizado	Unidade	Agregado reciclado miúdo (ARM)
Análise Granulométrica	Pedregulho	DNER-ME 051	%	21,00
	Areia Grossa		%	26,84
	Areia Média e Fina		%	38,17
	Silte		%	9,89
	Argila		%	4,10
Faixa granulométrica		DNIT	-----	F
Coeficiente de uniformidade (Cu) – D60/D10 Limite da norma NBR 15116 – (Cu>10)		NBR 7181	-----	10,49
Limite de Liquidez (LL)		DNER-ME 82	%	NL
Limite de plasticidade (LP)		DNER-ME 122	%	NP
Índice de plasticidade (IP)		DNER-ME 82	%	-----
Massa específica real		DNER-ME 093	g/cm ³	2,653
Absorção		NBR NM 30	%	7,33
Dimensão máxima característica Limite da norma NBR 15116 – (≤63mm)		NBR NM 248	mm	4,8
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm Limite da norma NBR 15116 – (entre 10% e 40%)		NBR 7181	%	52,16
Classificação TRB (Índice de grupo)		TRB	-----	A-2-4 (0)
Classificação dos agregados reciclados		NBR 15116	-----	ARMi - Agregado de resíduo misto

Quanto à natureza dos materiais constituintes e o teor de materiais indesejáveis, na Figura 49 são mostrados os resultados obtidos no processo de catação e análise visual. Destaca-se que, embora o ARM possua uma fração mais fina, como era de se esperar, pela simplicidade do processo de catação, optou-se por utilizar o material retido na peneira de malha com abertura de 1,18 mm (nº. 16).

Para a classificação dos materiais constituintes, foi utilizada a convenção empregada pela norma NBR 15116 (2004), que separa os materiais em grupos. Os grupos G1 e G2 apresentados correspondem aos fragmentos de pasta de cimento endurecida e aos fragmentos de rocha, respectivamente. Já no grupo G3 estão presentes os fragmentos de cerâmica, e no grupo G4 estão os materiais indesejáveis encontrados na pesquisa, tais como os fragmentos de gesso, betume, metais e de madeira.

Figura 49 – Caracterização do ARM.



Da análise dos resultados, observa-se que o material pode ser classificado, segundo a NBR 15116 (2004), como Agregado de Resíduo Misto, por possuir menos de 90% de materiais das classes G1 e G2. Porém, vale destacar que, apesar desse valor não estar dentro desse limite estabelecido pela norma, o material, ainda assim, possui uma grande parcela (88%) dos materiais dos grupos G1 e G2, constituídos por componentes de concretos e argamassas. De acordo com Silva (2009), a presença de grande parcela desses materiais no RCD propicia um bom desempenho mecânico no uso desses agregados em pavimentação.

Em relação à massa específica real, verificou-se que o valor obtido foi $2,65 \text{ g/cm}^3$. Esse valor foi um pouco maior que o valor obtido por Carneiro, Burgos e Alberte (2001) e Amadei (2011) utilizando ARM mistos, que foi de $2,59 \text{ g/cm}^3$. Já Santos (2007), Leite (2007) e Silva (2012) obtiveram valores médios de massa específica real para o ARM misto de $2,82 \text{ g/cm}^3$, $2,75 \text{ g/cm}^3$ e $2,71 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Observa-se, a partir desses resultados, uma considerável variação nos valores na faixa de $2,59 \text{ g/cm}^3$ a $2,82 \text{ g/cm}^3$, enfatizando o caráter heterogêneo da composição do RCD em diferentes regiões.

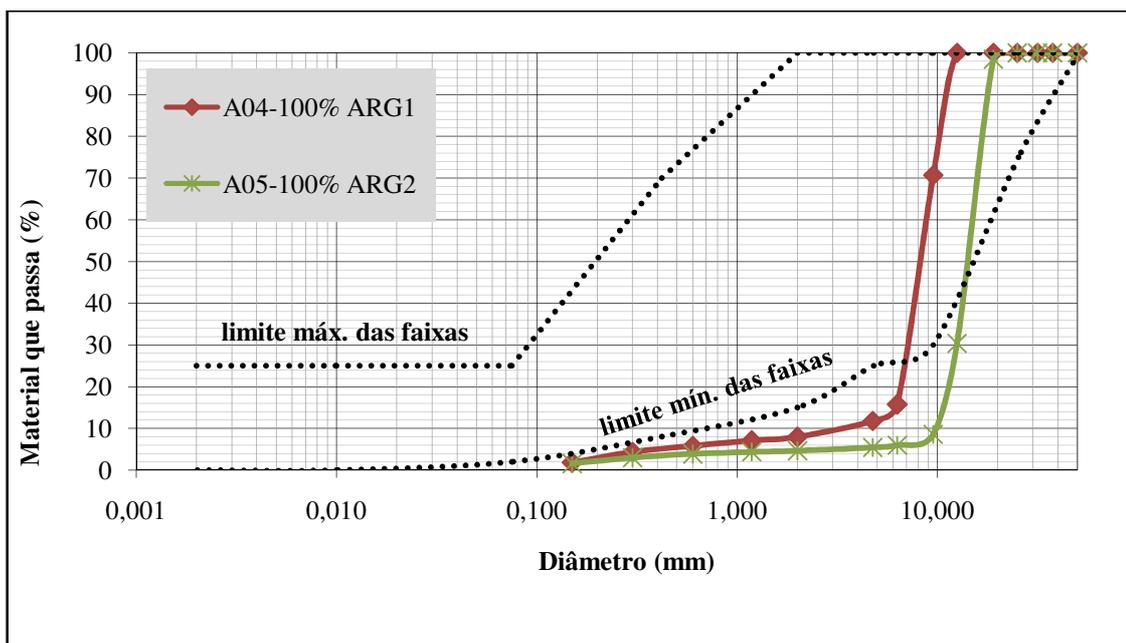
Analisando o teor de absorção do ARM em estudo, observa-se que o valor obtido (7,33%), foi menor que os valores de absorção dos ARMs mistos utilizados por Carneiro, Burgos e Alberte (2001) e Amadei (2011), que foram 10,4% e 11,62%, respectivamente. Hood (2006) comenta que valores entre 7 e 14% de absorção são comumente encontrados em agregados reciclados de RCD. Percebe-se, destes valores, que o ARM misto, em geral, possui elevada absorção quando comparados aos agregados naturais. Amadei (2011), por exemplo, obteve um teor de absorção igual a 0,78% em um agregado natural utilizado na sua pesquisa.

4.3 Caracterização física dos ARGs

Para a caracterização dos ARGs, foram utilizados os ensaios de análise granulométrica, abrasão Los Angeles, Índice de Forma, absorção e determinação da massa específica.

As distribuições granulométricas dos ARGs foram determinadas com os procedimentos da norma NBR NM248 (2003). Observa-se através das curvas granulométricas mostradas na Figura 50, que tanto o ARG1 quanto o ARG2 possuem uma expressiva descontinuidade e marcante uniformidade no tamanho dos grãos, sendo recomendado para uso na pavimentação apenas em composições de misturas com materiais finos. Destaca-se que as curvas desses agregados não podem ser enquadradas em nenhuma das faixas granulométricas de materiais de base, conforme estabelecido pelos limites máximos e mínimos delimitados pelas curvas pontilhadas.

Figura 50 – Curvas de distribuição granulométrica dos ARGs.



O ARG1 possui coeficiente de uniformidade igual a 2,00, enquanto que o ARG2 é 1,52. Esses valores de C_u e os teores de material passante na peneira de malha com abertura 0,42 mm estão fora dos limites estabelecidos pela norma, que são respectivamente 10 e entre 10 e 40%. A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Da classificação baseada na norma NBR 15116 (2004), observa-se que o ARG1 e o ARG2 se enquadram no grupo dos Agregados Reciclados Mistos ($G1+G2 < 90\%$), porém faz-se a mesma ressalva de que esses agregados, ainda assim, possuem uma grande parcela dos materiais dos grupos G1 e G2, conforme pode ser visto nos gráficos das Figuras 51 e 52.

Da parcela de materiais indesejáveis, tanto no ARM quanto nos ARGs, observou-se que os fragmentos de gesso correspondiam a 90% entre os materiais presentes (gesso, betume, madeira e metais). Os materiais contaminantes, quando presentes em grandes parcelas no material reciclado de RCD, podem provocar problemas, tais como deformações permanentes e trincamentos excessivos, prejudicando o bom desempenho da estrutura do pavimento.

Tabela 13 – Caracterização dos ARGs.

CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS GRAÚDOS					
Propriedades		Método Utilizado	Unidade	Agregado Reciclado Graúdo 1	Agregado Reciclado Graúdo 2
Análise Granulométrica	Pedregulho	NBR NM248	%	92,10	95,39
Coeficiente de uniformidade (Cu) – D60/D10 Limite da norma NBR 15116 – (Cu>10)		NBR 7181	-----	2,00	1,52
Limite de Liquidez (LL)		DNER-ME 82	%	NL	NL
Limite de plasticidade (LP)		DNER-ME 122	%	NP	NP
Índice de plasticidade (IP)		DNER-ME 82	%	-----	-----
Massa específica		NBR NM 53	g/cm ³	2,59	2,59
Absorção		NBR NM 53	%	8,9	10,2
Abrasão Los Angeles		NBR NM 51	%	48	46
Dimensão máxima característica Limite da norma NBR 15116 – (≤63mm)		NBR NM 248	mm	9,5	12,5
Índice de forma		NBR 7809	-----	2,18	2,58
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm Limite da norma NBR 15116 – (entre 10% e 40%)		NBR 7181	%	< 6	< 4
Classificação dos agregados reciclados		NBR 15116	-----	ARM - Agregado de resíduo misto	ARM - Agregado de resíduo misto

Figura 51 – Caracterização do ARG1.

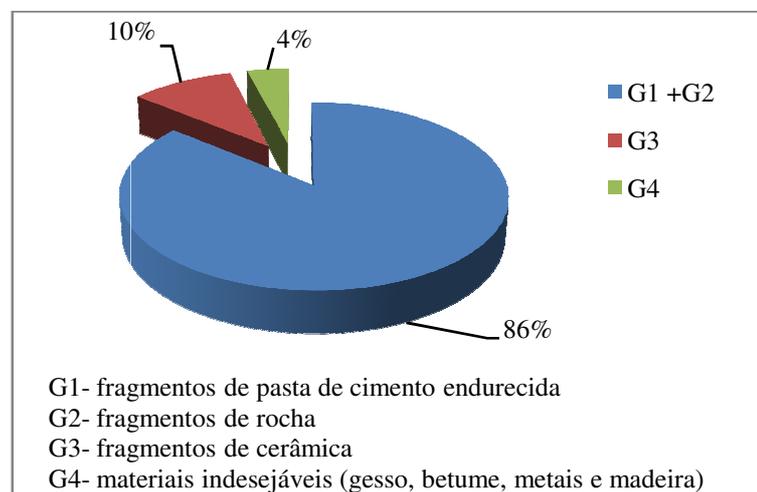
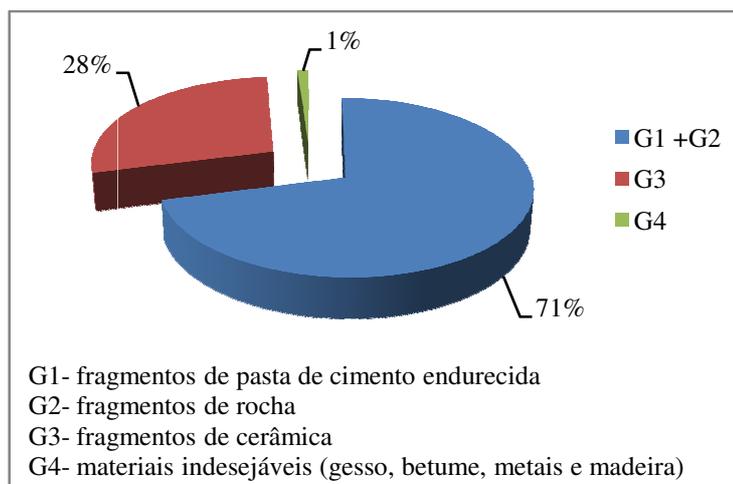


Figura 52 – Caracterização do ARG2.



A norma NBR 15116 (2004) estabelece que, para uso em pavimentação, o teor máximo de materiais indesejáveis de grupos distintos deve ser no máximo 3%, e para grupos com mesmas características, esse limite cai para 2%. Dos três agregados em estudo, apenas o ARG1 extrapolou os limites de materiais indesejáveis estabelecidos pela norma, porém, ainda apresentando valor baixo (4%).

Para a realização do ensaio de absorção e determinação da massa específica adotou-se os procedimentos da norma NBR NM53 (2009). Com isso, verificou-se que os valores de absorção do ARG1 e ARG2 foram, respectivamente, 8,9% e 10,2%. Para comparação dos resultados, a Tabela 14 mostra valores de absorção obtidos em outras pesquisas com o uso de agregados reciclados graúdos e de agregados naturais.

Tabela 14 – Valores de absorção obtidos em pesquisas.

Tipo de agregado	Origem	Absorção (%)	Autor
ARmisto	Aracaju (SE)	8,90	Esta pesquisa
ARmisto	Aracaju (SE)	10,2	Esta pesquisa
ARconcreto	Fortaleza (CE)	5,05	Silva (2009)
ARcerâmico	Barcelona (Espanha)	13,46	Rodríguez <i>et al.</i> (2012)
ARcerâmico	Hong Kong (China)	19,00	Poon e Chan (2006) apud Silva (2009)
ARcerâmico	Monte Carmelo (MG)	17,5	Dias <i>et al.</i> (2005a)
ARmisto	Salvador (BA)	8,20	Carneiro, Burgos e Alberte (2001)
ARconcreto	São Carlos (SP)	4,60	Grubba (2009)
AR natural	São Carlos (SP)	2,20	Grubba (2009)
ARmisto	Santo André (SP)	12,20	Leite (2007)

Com base nos valores obtidos em outras pesquisas, observa-se que quanto maior a presença de material cerâmico na composição dos agregados reciclados, maior a absorção desses materiais. Isso pode ser verificado analisando-se os dados de Leite (2007), que determinou o teor de absorção para dos diferentes componentes do ARG misto analisado (Tabela 15). Pode-se evidenciar esse comportamento com os próprios valores de absorção obtidos na pesquisa atual, onde o ARG2, que possui um maior teor de fragmentos cerâmicos, apresenta uma maior absorção. Verifica-se também que os valores de absorção dos ARGs estão bem acima dos valores convencionais apresentados pelos agregados naturais.

Já em relação à massa específica dos grãos, o valor obtido foi $2,59 \text{ g/cm}^3$ para os dois materiais. Leite (2007), utilizando o agregado reciclado de Santo André, que foi classificado como resíduo misto, determinou a massa específica de cada material constituinte do ARG, obtendo valores maiores para os fragmentos de natureza cimentícia e britas, conforme pode ser visto na Tabela 15. Na mesma pesquisa, o valor obtido de massa específica do conjunto considerando os teores dos diferentes materiais foi $2,69 \text{ g/cm}^3$. Essa diferença nos valores de massa específica dos grãos obtidos na pesquisa atual e na pesquisa de Leite (2007) está relacionada à heterogeneidade dos materiais envolvidos, já que ambas as pesquisas classificaram os ARGs como mistos.

Tabela 15 – Absorção e massa específica dos grãos retidos na peneira 4,8mm do agregado reciclado de Santo André, de acordo com a natureza dos seus constituintes (adaptado de Leite, 2007)

Natureza do material	Absorção (%)	Massa específica dos grãos (g/cm^3)
Cimentícios	11,5	2,75
Britas	3,8	2,71
Telhas/tijolos (cerâmicos)	20,7	2,55
Pisos/azulejos (cerâmicos)	11,1	2,50

Através dos resultados de massa específica, percebeu-se que os ARGs possuem menores valores de massa específica dos grãos do que o ARM. Segundo Leite (2007), isso ocorre pelo fato de que o ARM tende a sofrer redução de porosidade no processo de britagem ou quebra.

Embora a norma NBR 15116 (2004) não estabeleça um valor limite de desgaste por abrasão Los Angeles para os agregados reciclados de RCD, a norma NBR 11804 (1991)

especifica um valor máximo de 55% de perda para materiais empregados em bases e sub-bases de pavimentos. Analisando-se os resultados do ARG1 e ARG2, observa-se que os valores obtidos, respectivamente 48 e 46%, estão abaixo desse limite. A Tabela 16 enumera alguns resultados de desgaste por abrasão Los Angeles obtidos em outras pesquisas com o uso dos agregados reciclados de RCD, bem como valores obtidos em ensaios realizados com agregados convencionais.

Tabela 16 – Valores de perda por abrasão obtidos em pesquisas.

Tipo de agregado	Origem	Abrasão Los Angeles (%)	Autor
ARmisto	Aracaju (SE)	48	Esta pesquisa
ARmisto	Aracaju (SE)	46	Esta pesquisa
ARmisto	Salvador (BA)	45	Carneiro, Burgos e Alberte (2001)
ARconcreto	Fortaleza (CE)	33	Silva (2009)
ARconcreto	São Carlos (SP)	35	Grubba (2009)
ARcerâmico	Monte Carmelo (MG)	36	Dias <i>et al.</i> (2005)
AR natural	São Carlos (SP)	19	Grubba (2009)

Analisando os valores de abrasão obtidos em diversas pesquisas, observa-se que há uma grande variação nos resultados. Silva (2009) explica que a resistência ao desgaste está relacionada à composição do agregado, fazendo com que haja uma divergência nos valores obtidos devido à heterogeneidade do RCD utilizado. Apesar dessa divergência entre os valores, Grubba (2009) afirma que, em geral, através dos resultados obtidos em pesquisas nacionais, os agregados reciclados mistos apresentam desgastes maiores que os agregados reciclados de concreto. Verifica-se que os resultados apresentados na Tabela 11 estão coerentes com esse argumento.

Percebe-se também que os agregados reciclados de RCD possuem um desgaste maior quando comparados aos agregados convencionais. Grubba (2009) reforça dizendo que parte do desgaste dos agregados reciclados, principalmente quando há presença de fragmentos de argamassas e pasta de cimento, está relacionada ao desprendimento, após a ação da carga abrasiva, da parte que se encontrava aderida aos agregados naturais.

Em relação à dimensão máxima característica, tanto o ARM como os ARGs, como pode ser visto nas suas respectivas curvas, não possuem grãos com dimensões maiores que 63 mm, valor limite estabelecido pela norma. Com base nos resultados de caracterização do ARM e

dos ARGs, verifica-se que o uso isolado de um desses materiais não atende a todos os requisitos da norma NBR 15116 (2004). Porém, uma mistura composta por essas três frações, promovendo uma estabilização granulométrica através de um maior entrosamento entre os diferentes tamanhos de grãos, conforme representado pela amostra A13 dessa pesquisa, poderá ser utilizada para que todos esses requisitos sejam atingidos.

O índice de forma foi outro parâmetro observado nesta pesquisa. Esse índice foi obtido de acordo com os procedimentos da norma NBR 7809 (1983). De acordo com os resultados obtidos para o ARG1 (2,18) e ARG2 (2,58), observa-se que os valores são menores que três (3), estando dentro do limite estabelecido pela norma NBR 15116 (2004). Quanto à forma, através da análise visual, observou-se que os grãos eram irregulares, não lamelares, e com textura superficial áspera e porosa.

Após essa etapa de caracterização dos materiais envolvidos na pesquisa, Silva (2009) destaca que parâmetros isolados não podem ser utilizados para limitar o uso desses materiais. Para isso, são utilizados ensaios mecânicos que simulam a ação do tráfego para a análise do desempenho frente às solicitações impostas.

4.4 Caracterização física das misturas

4.4.1 Análise Granulométrica

Para cada mistura utilizada nessa pesquisa foram traçadas as curvas de distribuição granulométrica, conforme mostrado nas Figuras 53 e 54, onde se pode observar o comportamento das curvas obtidas das misturas de ARM com o solo ALE e das misturas de ARM com o solo ANI, respectivamente. Já as Figuras 55 e 56 mostram as curvas obtidas para as misturas dos ARGs com o solo ANI e das misturas dos ARGs com o ARM, respectivamente.

Figura 53 – Curvas granulométricas das misturas ARM-ALE.

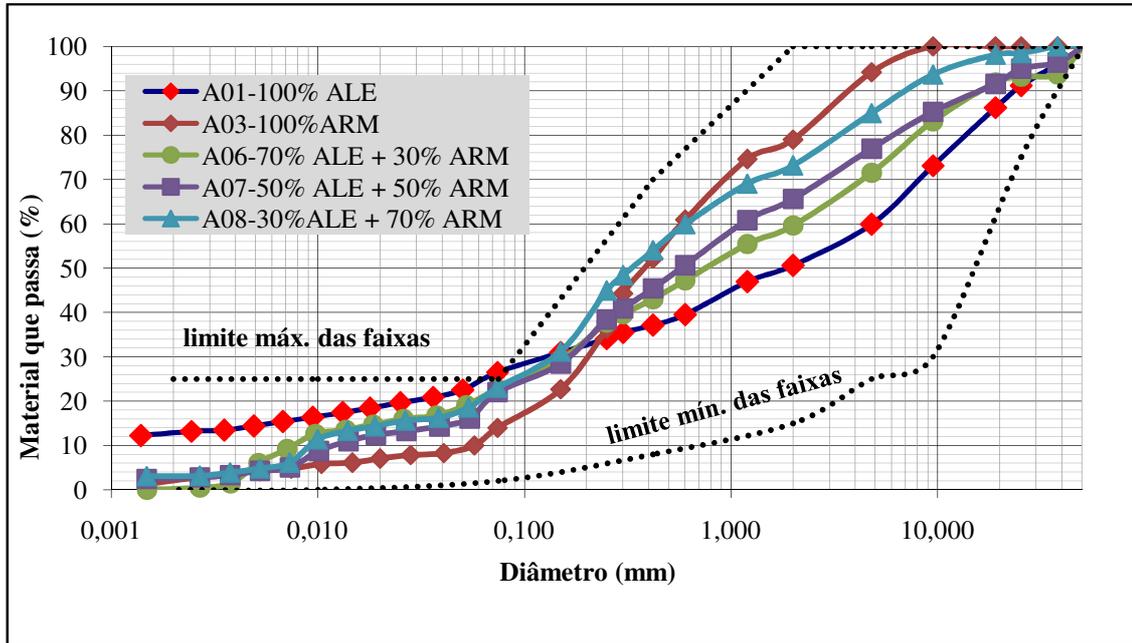
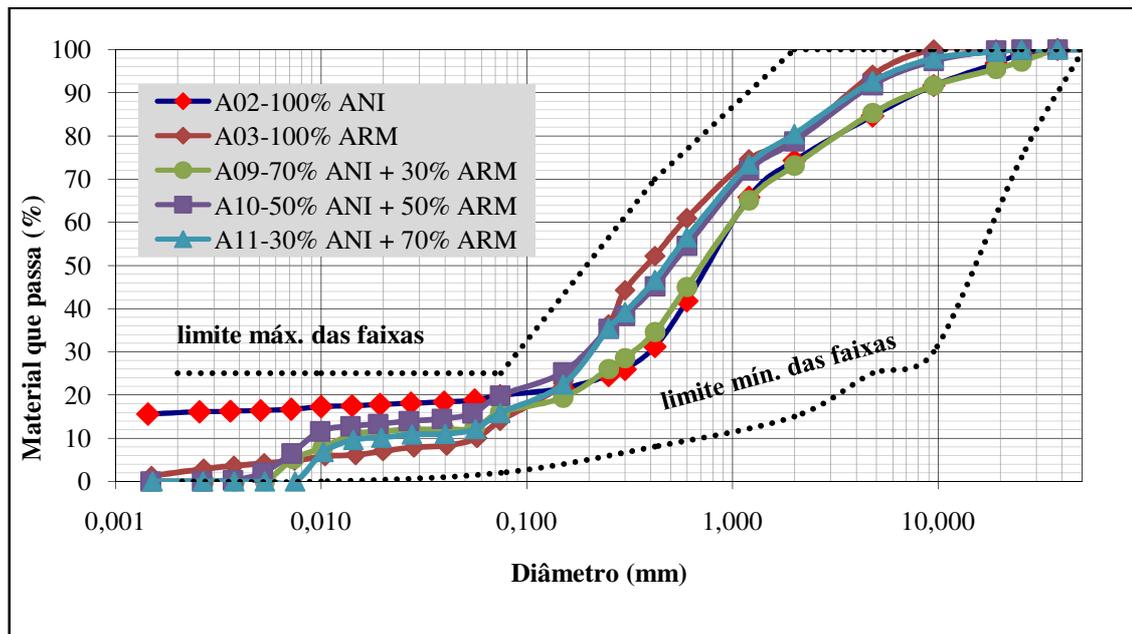


Figura 54 – Curvas granulométricas das misturas ARM-ANI.



as misturas podem ser enquadradas em uma das faixas granulométricas delimitadas pelas curvas pontilhadas.

Com relação aos valores de coeficiente de uniformidade (Cu) das misturas, os dados constam na Tabela 17. Em relação à faixa granulométrica na qual as misturas se enquadrariam para uso em base de pavimentos, a referida tabela também esquematiza esses valores, mostrando que nesse caso não existiu uma relação direta entre o Cu e as faixas do DNIT (2006).

Tabela 17 – Valores do Coeficiente de Uniformidade e faixas granulométricas das misturas.

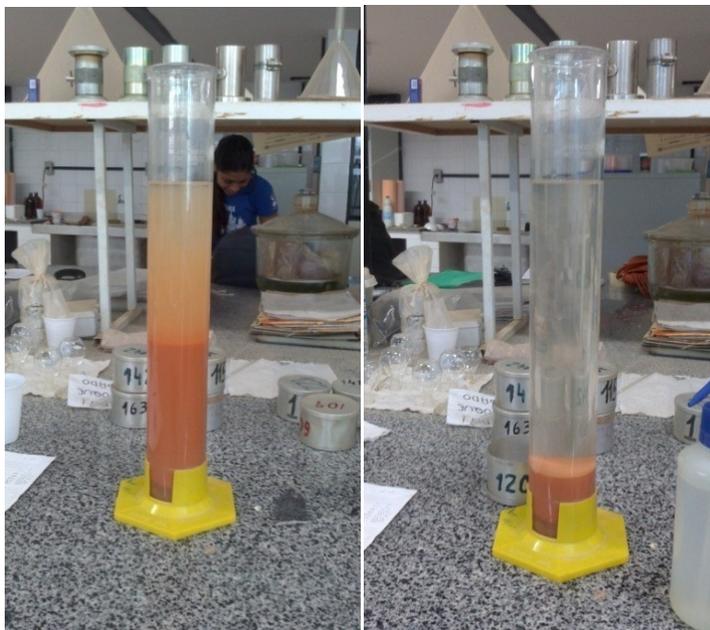
AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Cu (D60/D10)	Faixa Granulométrica	% de material que passa na peneira 0,42mm
A06	30% ARM + 70% ALE	492,7	D	43,02
A07	50% ARM + 50% ALE	85,2	D	45,43
A08	70% ARM + 30% ALE	120,1	F	53,95
A09	30% ARM + 70% ANI	84,8	D	34,57
A10	50% ARM + 50% ANI	121,5	E	45,16
A11	70% ARM + 30% ANI	61,3	E	46,63
A12	50% ANI + 25% ARG 1 + 25% ARG 2	128,4	C	17,12
A13	70% ARM + 15% ARG 1 + 15% ARG 2	64,9	D	38,03

Durante a realização dos ensaios de sedimentação, percebeu-se, como mostrado na Figura 57, e observando-se curvas de distribuição granulométrica das misturas ARM-ANI (Figura 54) e ARGs-ANI (Figura 55), que os percentuais das partículas entre 0,001 e 0,005 mm (fração argila) atingiam o patamar de 0%. Também, da análise das curvas de distribuição granulométricas obtidas após a compactação (Anexo A), verificou-se que esse fenômeno ocorreu em quase todas as misturas. Tal comportamento pode estar relacionado ao processo de estabilização química provocada pelas partículas de cimento e cal ainda presentes no ARM, que, por sua vez, quando em contato com as partículas de argila do solo ANI, classificado como laterítico por Costa (2006), reagiram tendendo a cimentar as partículas de solo formando aglomerados de grãos com tamanhos maiores (BENTO, 2006).

Bento (2006, p.14) explica que essa cimentação das partículas se dá quando “os íons de cálcio se combinam com a sílica e a alumina presentes na argila, dando origem a compostos

cimentícios adicionais, que são os silicatos de cálcio e os aluminatos, tendendo a cimentar as partículas de solo”.

Figura 57 – Aspectos da amostra A10 durante o ensaio de sedimentação.



Esse mesmo comportamento pode ser visto analisando-se, por exemplo, os resultados obtidos por Cunha, Resende e Ramos (2010), que também realizaram o ensaio de sedimentação com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, a mesma metodologia utilizada nesta pesquisa. Através desses resultados percebeu-se que o teor de argila de um solo laterítico passou de 44,31% para 6,60% quando o mesmo solo foi misturado à cal hidratada do tipo CH-III, a uma proporção de 9% da mistura solo-cal. Na mesma análise granulométrica, por outro lado, observou-se um significativo aumento das frações de silte e areia, onde o primeiro passou de 16,56% para 36,06% e o segundo passou de 39,13% para 57,34%.

4.4.2 Limites de Consistência

Com base nos resultados dos ensaios de limites de consistência, apesar de algumas misturas não atenderem às especificações estabelecidas pelo DNIT (2006) para enquadramento como materiais de base e sub-base, assim como Carneiro, Burgos e Alberte (2001) também constataram, pode-se afirmar que os agregados reciclados, devido à ausência de plasticidade, mostram-se adequados para a estabilização de solos com plasticidade, como os utilizados nessa pesquisa, que possuíam IP de 9% (solo ALE) e 37% (solo ANI).

Da Tabela 18, percebe-se que há uma redução gradativa no IP conforme há o aumento no teor de agregados nas misturas, tornando as misturas não plásticas nas maiores proporções de agregados de RCD. Porém, vale destacar que na amostra A12 não houve redução significativa do IP, pois os ARGs são compostos por partículas graúdas, não influenciando na plasticidade da parcela fina do solo.

Tabela 18 – Limites de consistência das misturas.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Limite de liquidez-LL (%)	Limite de plasticidade – LP (%)	Índice de plasticidade – IP (%)
A01	100% ALE	35	26	9
A02	100% ANI	61	24	37
A06	30% ARM + 70% ALE	29	22	7
A07	50% ARM + 50% ALE	NL	NP	-----
A08	70% ARM + 30% ALE	NL	NP	-----
A09	30% ARM + 70% ANI	38	19	20
A10	50% ARM + 50% ANI	31	20	11
A11	70% ARM + 30% ANI	NL	NP	-----
A12	50% ANI + 25% ARG 1 + 25% ARG 2	50	19	31
A13	70% ARM + 15% ARG 1 + 15% ARG 2	NL	NP	-----

4.4.3 Classificação TRB

Uma vez que foram obtidas as distribuições granulométricas dos materiais e os limites de consistência, as amostras foram, então, classificadas segundo o sistema de classificação TRB. Dessa forma, elaborou-se a Tabela 19, na qual são mostradas as classes das amostras analisadas. Com isso, observa-se que as misturas utilizadas se enquadrariam no grupo dos materiais granulares (% passante na peneira nº 200 \leq 35%), onde as amostras do grupo A-2-4, segundo essa classificação, seriam as mais recomendados para fins de pavimentação, devido à baixa plasticidade comparada às amostras classificadas como A-2-6 e A-2-7 (DNIT, 2006).

Tabela 19 – Classificação TRB das amostras em estudo.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Classificação TRB (índice de grupo)
A06	30% ARM + 70% ALE	A-2-4 (0)
A07	50% ARM + 50% ALE	A-2-4 (0)
A08	70% ARM + 30% ALE	A-2-4 (0)
A09	30% ARM + 70% ANI	A-2-6 (0)
A10	50% ARM + 50% ANI	A-2-6 (0)
A11	70% ARM + 30% ANI	A-2-4 (0)
A12	50% ANI + 25% ARG 1 + 25% ARG 2	A-2-7 (0)
A13	70% ARM + 15% ARG 1 + 15% ARG 2	A-2-4 (0)

4.5 Compactação

Nas Tabelas 20 e 21 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de compactação realizados com as amostras preparadas para esta pesquisa, usando-se a energia do Proctor Intermediário.

Tabela 20 – Teor de umidade ótimo e densidade aparente seca máxima das misturas com solo ALE.

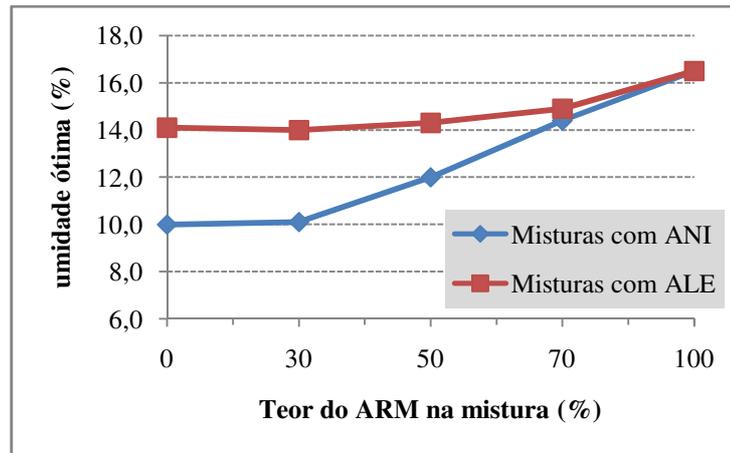
AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Teor de umidade ótimo (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
A01	100% ALE	14,1	1,94
A03	100% ARM	16,5	1,74
A06	30% ARM + 70% ALE	14,0	1,92
A07	50% ARM + 50% ALE	14,3	1,88
A08	70% ARM + 30% ALE	14,9	1,86

Tabela 21 – Teor de umidade ótimo e densidade aparente seca máxima das misturas com solo ANI.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Teor de umidade ótimo (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
A02	100% ANI	10,0	2,03
A03	100% ARM	16,5	1,74
A09	30% ARM + 70% ANI	10,1	2,02
A10	50% ARM + 50% ANI	12,0	1,96
A11	70% ARM + 30% ANI	14,4	1,87

Apesar de o ARM possuir partículas finas não plásticas, que, teoricamente, contribuiriam para diminuir o teor de umidade ótimo com o aumento da proporção desses materiais nas misturas, observou-se que as misturas apresentaram um comportamento inverso, ou seja, observou-se que o valor do teor de umidade ótimo aumentou com o incremento do teor de ARM na mistura, para os dois tipos de solos utilizados (Figura 58).

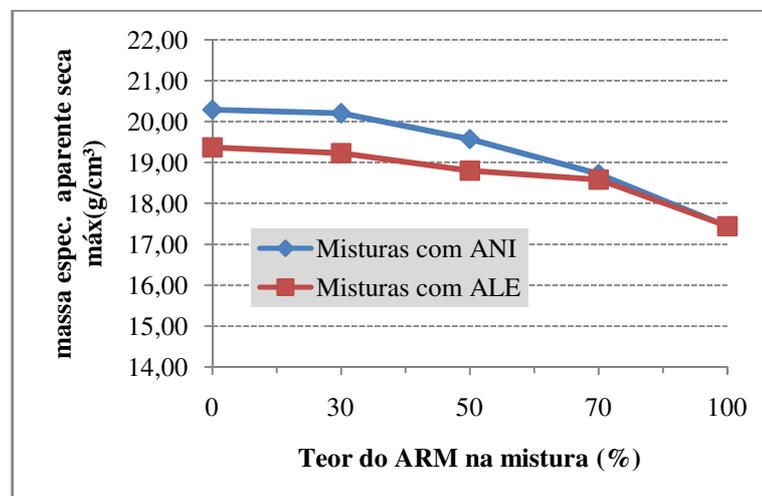
Figura 58 – Valores do teor de umidade ótimo das misturas e dos materiais puros.



Esse comportamento também foi observado por Carneiro, Burgos e Alberte (2001) nas misturas de ARM e solo laterítico da região de Salvador. Segundo os autores, esse aumento do teor de umidade ótimo está relacionado à elevada absorção de água do agregado reciclado misto. Vale lembrar que Costa (2006) classificou o solo obtido na jazida Aningas, mesma jazida da amostra A02, como laterítico, auxiliando para uma maior coerência na comparação entre esses resultados.

Assim como ocorreu na mistura de ARM com solo laterítico da pesquisa de Carneiro, Burgos e Alberte (2001), observa-se que há também diminuição gradativa da massa específica aparente seca com o incremento de ARM nas misturas com os solos ANI e ALE (Figura 59). Redivo, Marcon e Trichês (2011) também observaram que, devido à porosidade dos fragmentos cerâmicos de blocos e telhas, as misturas com solos apresentaram aumento da umidade ótima e redução da massa específica aparente seca máxima.

Figura 59 – Massa específica aparente seca máxima das misturas e dos materiais puros.



A Tabela 22 mostra os dados da compactação obtidos para as amostras A12 e A13, da qual se observa que o comportamento relacionado ao aumento do teor de umidade ótima e diminuição da massa específica aparente seca máxima foi apresentado pela amostra A12 quando adicionou-se os ARGs na composição da mistura com o solo ANI. Grubba (2009) também afirma que essa tendência está relacionada à maior absorção e menor densidade dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais, que, nesse caso, corresponderiam aos pedregulhos naturais do solo.

Já a amostra A13, que é composta pelas três frações de agregados reciclados estudadas, quando comparada à amostra A03, composta somente com o ARM, verifica-se que, devido a uma melhor distribuição granulométrica, proporcionada pela mistura de grãos de diversos tamanhos, ocorreu o aumento na massa específica aparente seca máxima e a diminuição no teor de umidade ótimo.

Tabela 22 – Umidade ótima e densidade aparente seca máxima das misturas com ARGs.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Teor de umidade ótimo (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
A02	100% ANI	10,0	2,03
A03	100% ARM	16,5	1,74
A12	25% ARG1 + 25% ARG2 + 50% ANI	11,9	1,88
A13	70% ARM + 15% ARG1 + 15% ARG2	14,9	1,82

Analisando os resultados obtidos na amostra A13, que é uma mistura composta pelas três frações de agregados reciclados, observa-se, com auxílio da Tabela 23, que Santos (2007), avaliando a “bica corrida” mista no ensaio Proctor normal, obteve valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima muito semelhantes. Já Fernandes (2004), obteve valores próximos utilizando agregados reciclados graúdos, enquanto que Grubba (2009), utilizando materiais desse tipo, conseguiu um valor menor de teor de umidade ótimo para a obtenção de uma massa aparente seca máxima ligeiramente superior, mas usando a energia a intermediária, o que seria esperado.

Tabela 23 – Valores de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos em outras pesquisas.

Tipo de agregado	Origem	Energia de compactação	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Autor
ARmisto (A12)	Aracaju (SE)	Intermediária	14,9	1,824	Esta pesquisa
ARmisto	Santo André (SP)	Intermediária	14,6	1,760	Leite (2007)
ARmisto	Campina Grande (PB)	Intermediário	16,0	1,712	Silva (2012)
ARmisto	São Carlos (SP)	Normal	14,9	1,844	Santos (2007)
ARconcreto	Belo Horizonte (MG)	Intermediária	15,2	1,820	Fernandes (2004)
ARconcreto	São Carlos (SP)	Intermediária	12,0	1,870	Grubba (2009)

Essa diminuição da umidade ótima obtida por Grubba (2009) pode estar relacionada à menor absorção dos agregados reciclados de concreto (ARC), comparada à absorção dos agregados reciclados mistos. Em relação à semelhança obtida com os resultados do ARC utilizado por Fernandes (2004), ressalta-se que a amostra A12 é composta por uma mistura de ARGs e ARM, o que contribui para um melhor entrosamento entre os diferentes tamanhos de grãos.

Percebe-se também na Tabela 11 que Leite (2007) e Silva (2012) obtiveram valores mais baixos de massa específica aparente seca máxima. Isso pode ser justificado pelo fato de que os materiais analisados pelos dois autores possuíam altos teores de fragmentos cerâmicos, com valores entre 29% e 32% desses materiais, que, além de possuírem elevada absorção, dificultando no processo de obtenção da umidade ótima, possuem valores de massa específica dos grãos mais baixos.

Dias *et. al.* (2005b) observaram na sua pesquisa que a quebra do agregado reciclado de telhas cerâmicas após a compactação resultou na variabilidade dos valores da máxima massa específica aparente seca máxima para um mesmo teor de umidade, e isso acabou dificultando o controle de execução de um trecho experimental. A partir daí, o autor chegou à conclusão de que esse comportamento poderia prejudicar na qualidade do pavimento e, somado à quebra de grãos provocada pela solicitação do tráfego, poderia também reduzir a capacidade de suporte da camada, e, conseqüentemente, a vida útil do pavimento.

4.6 Índice de degradação (ID)

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria, comparou-se o comportamento das curvas antes e após a compactação. Essas curvas granulométricas estão apresentadas no

Anexo A. Como pode ser observado na Tabela 24, as amostras que continham os ARGs apresentaram os maiores Índices de Degradação (ID). Na pesquisa de Carneiro, Burgos e Alberte (2001), também foram obtidos valores altos de ID, na faixa variando entre 8,8 % e 15,9 % para o ARG, e suas misturas com solos e com o ARM.

Tabela 24 – Índice de degradação dos agregados reciclados de RCD e das misturas.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Índice de degradação (%)
A03	100% ARM	4,93
A06	30% ARM + 70% ALE	0,65
A07	50% ARM + 50% ALE	5,26
A08	70% ARM + 30% ALE	0,54
A09	30% ARM + 70% ANI	3,15
A10	50% ARM + 50% ANI	1,84
A11	70% ARM + 30% ANI	3,19
A12	25% ARG1 + 25% ARG2 + 50% ANI	11,16
A13	70% ARM + 15% ARG1 + 15% ARG2	5,85

Grubba (2009) acredita que a diferença nos valores de degradação dos agregados de RCD está relacionada à natureza de seus materiais constituintes. Em sua pesquisa, por exemplo, os valores de degradação do agregado de resíduo de concreto utilizado foram menores que os obtidos nas pesquisas de Leite (2007) e Motta (2005), que utilizaram o agregado de resíduo misto. Já Santos (2007), baseado na granulometria após o ensaio Proctor Normal, observou que o material utilizado, nesse caso a “bica corrida” mista, não apresentou alteração significativa em sua granulometria. Esse fato deve estar relacionado à menor energia que foi utilizada nos ensaios de compactação, que foi a Normal.

Objetivando-se avaliar a variação das curvas das misturas e os parâmetros da distribuição granulométrica, elaborou-se a Tabela 25 para verificar o coeficiente de uniformidade antes e após a compactação, bem como a alteração em relação à porcentagem passante na peneira de abertura igual a 0,42 mm. Dos resultados obtidos, verifica-se que o coeficiente de uniformidade das misturas continuou acima do mínimo (≥ 10) recomendado pela NBR 15116 (2004). Em relação ao percentual de material que passa na peneira com abertura de malha de 0,42 mm, observa-se que somente as amostras A09 e A12 atenderiam a esse requisito após a compactação, lembrando que os limites estabelecidos na norma são voltados ao uso de agregados reciclados de RCD puros.

Tabela 25 – Variação da curva granulométrica após a compactação.

AMOSTRA	Cu (D60/D10)	Cu (D60/D10)	Material que passa na peneira 0,42 mm (%)	Material que passa na peneira 0,42 mm (%)
	Antes	Depois	Antes	Depois
A03	10,49	59,37	52,16	58,52
A06	492,69	278,12	43,02	43,55
A07	85,24	173,50	45,43	51,83
A08	120,14	85,48	53,95	53,95
A09	84,79	168,72	34,57	38,24
A10	121,52	169,82	45,16	47,74
A11	61,32	43,10	46,63	51,77
A12	128,38	255,08	17,12	27,72
A13	64,86	51,52	38,03	43,77

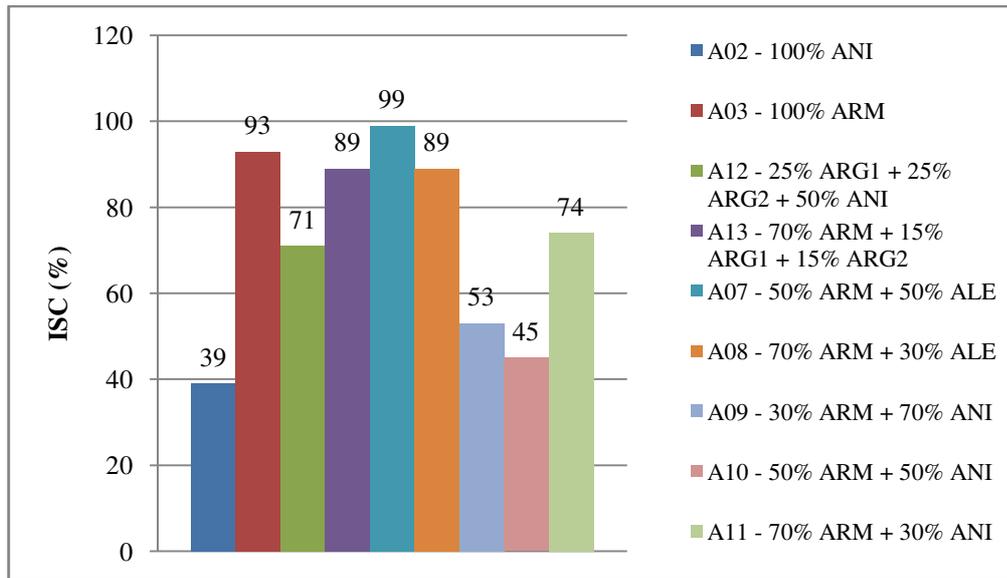
Leite (2007) afirma que apesar de haver degradação no material utilizado na sua pesquisa, que foi 3,7% para a energia intermediária, este valor obtido é equivalente a de alguns materiais naturais empregados nas camadas inferiores de pavimentos.

Já Dias *et al.* (2005b) observaram que quando os agregados reciclados da cerâmica vermelha são misturados com solos finos, há diminuição na quebra dos grãos e, quando essa proporção do solo é suficiente para o preenchimento dos vazios entre os grãos dos agregados, o índice de degradação pode ser nulo. Isso ocorre devido ao aumento nos pontos de contato das partículas, que, segundo o autor, acaba “distribuindo melhor as tensões, que antes provocavam a quebra, seja por concentração de tensão, seja por esforços de tração originados por falta de apoio para os grãos”.

4.7 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

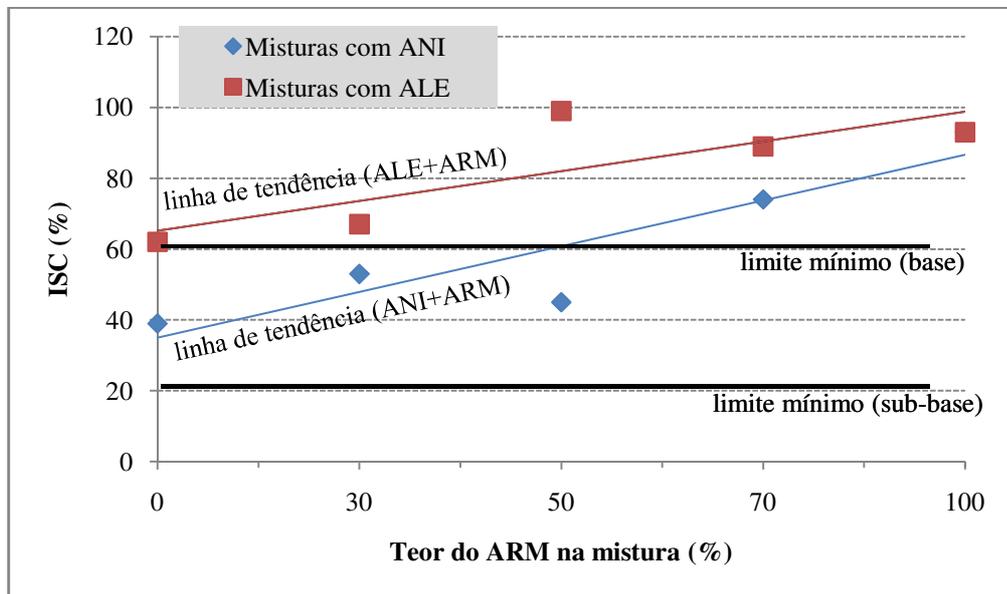
Foram realizados os ensaios de ISC com os solos puros, com o ARM puro e com todas as misturas apresentadas nesta pesquisa. Dos resultados obtidos com os solos puros, observa-se que, segundo as especificações da NBR 11804 (1991), o solo ALE se enquadraria para uso em camadas de base, por possuir valor de $ISC \geq 60$. Já no caso do solo ANI, seu uso ficaria restrito em camadas de sub-base ($ISC \geq 20$). A Figura 60 ilustra os resultados obtidos para os solos e misturas com ARM.

Figura 60 – Valores de ISC obtidos dos solos puros e das misturas com ARM.



Analisando-se as misturas com o ARM (Figura 61), observa-se que para os dois tipos de solos há uma tendência de aumento do valor de ISC com o incremento na proporção desses agregados reciclados.

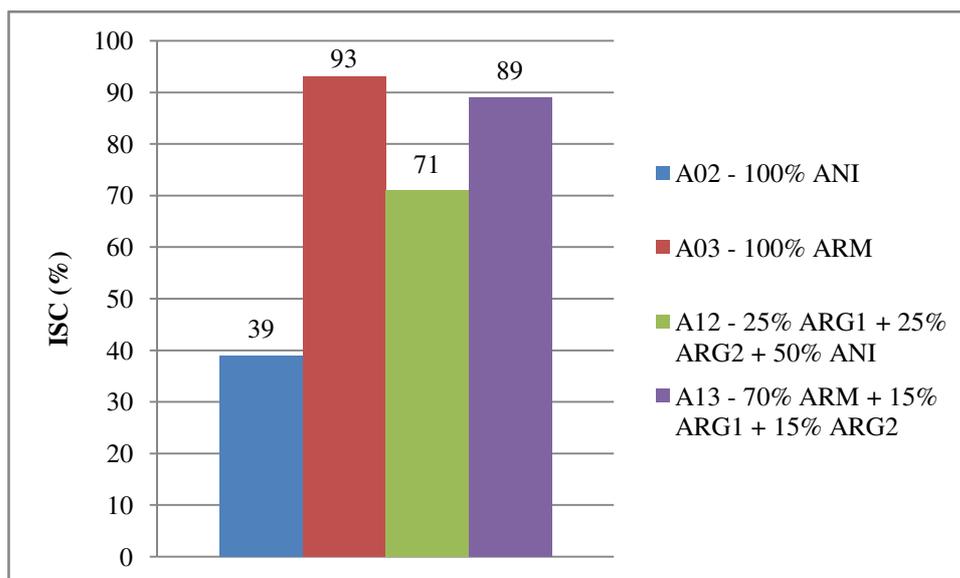
Figura 61 – Valores de ISC obtidos na pesquisa.



Silva (2009) obteve um valor de ISC de 60% na mistura com 50% de um solo argiloso e 50% do ARG utilizado na sua pesquisa e também moldado na energia intermediária. Esse valor ficou próximo ao obtido na mistura A12 desta pesquisa (71%). Apesar de haver diferenças nas características do solo e do ARG utilizados nas duas pesquisas, comparou-se esses dois valores por essas misturas estarem na mesma proporção de ARG e solo.

Santos (2007) obteve valores de ISC da ordem de 49% utilizando o agregado reciclado tipo “bica corrida” mista de São Carlos. Silva (2012) obteve valores de ISC em torno de 49% com um material semelhante proveniente de Campina Grande, enquanto que Leite (2007) obteve ISC igual a 73% para um agregado misto do município de Santo André. A Figura 62 ilustra os resultados obtidos nas misturas com os ARGs.

Figura 62 – Índice de Suporte Califórnia (ISC) das composições com os ARGs.



Jimenez (2011) observou aumento nos valores de ISC após o período de imersão. A autora destaca que esse aumento de resistência, muitas vezes com acréscimos significativos ao longo do tempo, está relacionado à presença de finos cimentícios que acabam reagindo com a água.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que, à luz das especificações rodoviárias brasileiras, em termos de ISC, todos os materiais se enquadrariam nas exigências para uso sub-base ($ISC \geq 20$), e muitos atenderiam à exigência para uso como base de pavimentos ($ISC \geq 60$). Embora seja ainda de grande uso na pavimentação, o valor do ISC não deve ser considerado como um fator limitador ao uso do material, pois as propriedades resilientes e as deformações permanentes são importantes e devem ser utilizadas na avaliação de um material a ser empregado na pavimentação, levando-se em consideração o tipo de solicitação a que são submetidas as camadas de um pavimento.

4.8 Expansão

Os valores de expansão das amostras foram obtidos das leituras realizadas no extensômetro instalado nos CPs durante a imersão destes em água por quatro (4) dias, parte da

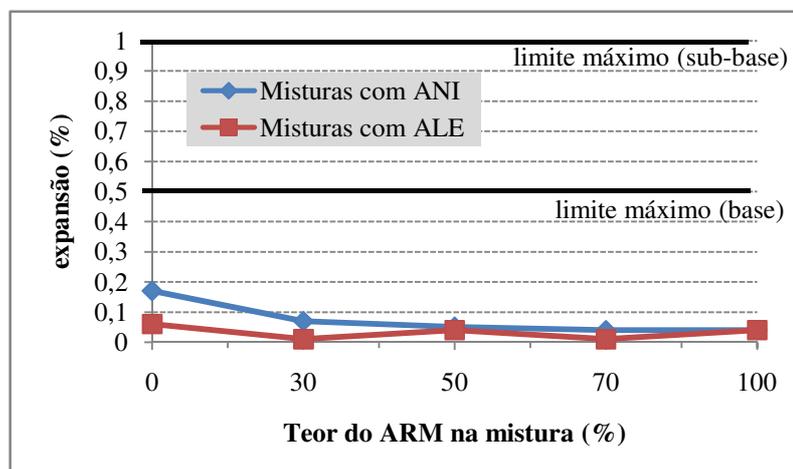
etapa preparatório do ensaio de ISC. Conforme pode ser observado na Tabela 26, conclui-se que todas as amostras avaliadas, inclusive às de solo puro, apresentaram valores de expansão muito abaixo do limite prescrito pela norma NBR 11804 (1991), ou seja, 0,50% para materiais de base e 1,0% para uso em sub-bases. O valor máximo medido nesta pesquisa foi 0,17%, obtida para o solo da jazida Aningas (amostra A02).

Tabela 26 – Valores da expansão medida nos solos puros e nas misturas com ARM.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	Expansão (%)
A01	100% ALE	0,06
A02	100% ANI	0,17
A03	100% ARM	0,04
A06	30% ARM + 70% ALE	0,01
A07	50% ARM + 50% ALE	0,04
A08	70% ARM + 30% ALE	0,01
A09	30% ARM + 70% ANI	0,07
A10	50% ARM + 50% ANI	0,05
A11	70% ARM + 30% ANI	0,04

Traçando-se um gráfico de tendência (Figura 63), observa-se que o ARM atua como agente estabilizante, levando os solos ANI e ALE a valores de expansão praticamente nulos. Carneiro, Burgos e Alberte (2001) conseguiram, inclusive, para o teor de 70% de ARM em uma mistura com solo saprolítico, baixar a expansão do solo puro com valores próximos a 6% para valores menores que 0,5%, melhorando significativamente a estabilidade do material. Já Grubba (2009), em todas as combinações utilizando agregados reciclados graúdos de concreto, obteve resultados de expansão nulos.

Figura 63 – Gráfico dos valores de expansão em função do percentual de ARM.



Em relação aos ARGs e suas misturas (Tabela 27), observa-se o mesmo comportamento apresentado pelo ARM, diminuindo a expansão do solo ANI e, inclusive, do próprio ARM. Santos (2007) e Leite (2007) também obtiveram valores praticamente nulos utilizando agregados reciclados mistos compostos por tamanhos variados de grãos, parecidos com material representado pela amostra A13.

Tabela 27 – Valores da expansão das misturas com os ARGs.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	expansão(%)
A02	100% ANI	0,17
A12	25% ARG1 + 25% ARG2 + 50% ANI	0,02
A03	100% ARM	0,04
A13	70% ARM + 15% ARG1 + 15% ARG2	0,01

4.9 Módulo de resiliência

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas foram realizados com os solos puros, com o ARM puro e com as misturas solo-resíduo para a avaliação do comportamento resiliente desses materiais. Para essa avaliação observou-se o modelo mais adequado para reproduzir o comportamento dos materiais ensaiados. A literatura apresenta modelos que representam o comportamento de solos arenosos, onde o MR depende fundamentalmente da pressão confinante. Há, por outro lado, outros que são aplicáveis aos solos argilosos. Porém, alguns materiais preparados, tais como os solos estabilizados granulometricamente, que possuem uma melhor variação e distribuição de diferentes frações, e os solos com aditivos estabilizantes, dependendo das combinações de tensões, podem se comportar simultaneamente das duas formas (BERNUCCI *et al.*, 2008; MEDINA e MOTTA, 2005).

Nesta pesquisa foram avaliados três modelos de grande uso no meio científico, conforme descritos no item 2.2.4. A partir dos resultados de MR obtidos em diferentes combinações de tensão desvio e pressão confinante (Gráficos do Anexo B), foram calculados os valores de k (parâmetros de modelagem) e os respectivos coeficientes de determinação (R^2). Para a obtenção dos parâmetros do modelo composto, o conjunto de dados encontrados nos ensaios triaxiais foi submetido ao programa de computador de ajustes de curvas denominado *Lab Fit*, desenvolvido por pesquisadores da UFCG para o tratamento e análise de dados. Desta maneira, foi possível elaborar a Tabela 28, onde são apresentados os parâmetros necessários para a análise dos modelos propostos.

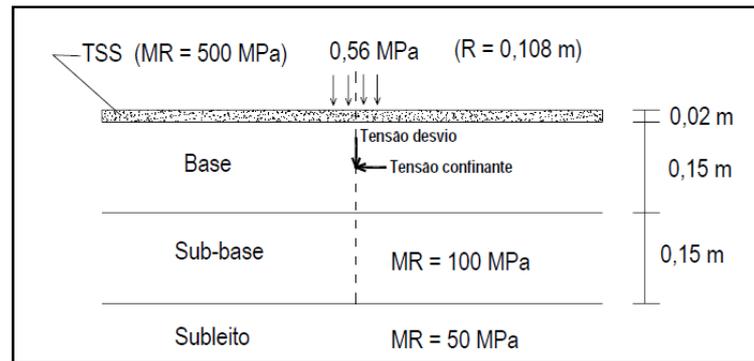
Tabela 28 – Parâmetros de modelagem e coeficientes de determinação obtidos dos modelos propostos.

AMOSTRA	MODELO									
	MR = f(σ_3)			MR = f(σ_d)			Modelo composto			
	MR = k1 . σ_3^{k2}			MR = k1 . σ_d^{k2}			MR = k1 . σ_3^{k2} . σ_d^{k3}			
	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²	k1	k2	k3	R ²
A01	294,6	0,125	0,27	286,3	0,145	0,54	288,0	-0,062	0,227	0,61
A02	246,6	0,127	0,44	224,4	0,120	0,58	242,4	0,021	0,127	0,62
A03	571,4	0,219	0,45	536,1	0,249	0,87	474,8	-0,092	0,312	0,89
A06	1143,0	0,317	0,57	965,7	0,327	0,90	905,2	-0,016	0,316	0,91
A07	763,10	0,194	0,39	731,2	0,227	0,79	647,6	-0,083	0,277	0,84
A08	658,2	0,093	0,20	666,2	0,123	0,53	589,1	-0,088	0,178	0,58
A09	212,1	-0,240	0,33	301,6	-0,150	0,19	190,9	-0,331	0,052	0,38
A10	1893,0	0,373	0,46	1605	0,399	0,79	1227,0	-0,065	0,352	0,83
A11	2553,0	0,323	0,39	2166	0,336	0,63	1788,0	0,012	0,222	0,57
A12	382,3	0,338	0,75	282,1	0,293	0,85	374,4	0,116	0,275	0,90
A13	377,7	0,348	0,59	314,3	0,360	0,94	330,7	-0,050	0,450	0,95

Analisando-se os coeficientes de determinação (R^2) apresentados na Tabela 30, observa-se, conforme esperado, que os maiores resultados obtidos foram com a aplicação do modelo composto, conforme destacado nas colunas 4, 7 e 11. Por esta razão, para a determinação dos valores de MR dos materiais desta pesquisa optou-se pela adoção do modelo composto.

Para facilitar a interpretação dos valores de MR das amostras a serem avaliadas, optou-se por utilizar uma estrutura de pavimento tipo (Figura 64) utilizada por Santos (2009), onde, através da retroanálise calculada pelo autor com o uso do software ELSYM 5, conseguiu-se determinar o nível de tensões (σ_3 e σ_d) para um ponto localizado no centro da camada de base, resultando em uma pressão confinante de cerca de 0,048 MPa e uma tensão desvio aproximada de 0,362 MPa. Para isso, o autor adotou um carregamento externo no valor de 0,56 MPa, correspondente à ação de um eixo simples padrão de 8,2 tf (pressão de 5,6 kgf/cm², aplicada numa área de raio igual a 10,8 cm), desconsiderando as tensões gravitacionais. Os valores de MR utilizados para as camadas de revestimento com TSS (tratamento superficial simples), sub-base e subleito foram obtidos através de pesquisas utilizando materiais convencionais de pavimentação (SANTOS, 2009).

Figura 64 – Estrutura do pavimento considerada na análise de MR (Santos, 2009).



Dessa maneira, com base no nível de tensões adotado e utilizando-se o modelo composto aplicado aos parâmetros de resiliência (k_1 , k_2 e k_3), foram calculados os valores de MR (Tabelas 29, 30 e 31), passando-se para a etapa de análise e comparação com os módulos obtidos em outras pesquisas que utilizaram os agregados de RCD. Nas Tabelas 29, 30 e 31 também foram colocados os percentuais de umidade residual após o ensaio triaxial em relação à umidade de moldagem dos corpos de prova (W_{res}).

Tabela 29 – Valores de MR obtidos para as misturas ARM-ALE.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	MR (MPa)	W_{res} (%)
A01	100% ALE	276,0	39,2
A03	100% ARM	457,3	21,1
A06	30% ARM + 70% ALE	689,3	33,8
A07	50% ARM + 50% ALE	628,8	32,5
A08	70% ARM + 30% ALE	642,2	45,0

Tabela 30 – Valores de MR obtidos para as misturas das ARM-ANI.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	MR (MPa)	W_{res} (%)
A02	100% ANI	199,9	23,7
A03	100% ARM	457,3	21,1
A09	30% ARM + 70% ANI	494,7	28,9
A10	50% ARM + 50% ANI	1045,3	34,9
A11	70% ARM + 30% ANI	1375,9	44,8

Tabela 31 – Valores de MR obtidos para as misturas ARG-ANI e ARG-ARM.

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO	MR (MPa)	W _{res} (%)
A02	100% ANI	199,9	23,7
A03	100% ARM	457,3	21,1
A12	25% ARG1 + 25% ARG2 + 50% ANI	199,1	33,4
A13	70% ARM + 15% ARG1 + 15% ARG2	243,7	26,6

Embora os corpos de prova tenham perdido boa parte do teor de umidade da moldagem durante o processo de cura na câmara úmida, observou-se que os valores de MR das misturas ARM-solos e do ARM puro foram elevados, comparados aos obtidos em outras pesquisas com o uso de RCD, como por exemplo Silva (2009), Leite (2007) e Fernandes (2004). Utilizando-se a mesma combinação de pressão confinante e tensão desvio utilizada nesta pesquisa, elaborou-se a Tabela 32, que apresenta os valores de MR obtidos nas citadas pesquisas com o uso de RCD e materiais convencionais de pavimentação.

Tabela 32 – Valores de MR obtidos por outros autores.

Material - Proporção	Energia de Compactação	Tempo de cura	MR (MPa)	Autor
Solo-brita 40-60	Intermediária	7	1050,8	Bernucci <i>et al.</i> (2010)
Solo-brita-cimento 40-60-4	Intermediária	7	6328,5	
Solo-cimento 5%	Intermediária	7	5823,2	
Solo argiloso laterítico	Intermediária	0	311,7	Bezerra Neto <i>et al.</i> (2003)
Solo arenoso laterítico	Intermediária	0	300,8	
Solo arenoso laterítico-brita 50-50	Intermediária	0	521,6	
Solo arenoso - ARGconcreto 50-50	Intermediária	1	172,5	Silva (2009)
Solo arenoso - ARGconcreto 40-60	Intermediária	1	255,33	
Solo argiloso - ARGconcreto 50-50	Intermediária	1	106,40	
Solo argiloso - ARGconcreto 40-60	Intermediária	1	144,10	
ARMisto	Intermediária	4	320,4	Leite (2007)
ARMisto	Intermediária	0	161,7	Fernandes (2004)
ARconcreto	Intermediária	0	160,2	Jimenez (2011)
ARconcreto	Intermediária	7	365,8	
ARconcreto	Modificado	4	6930,0	Nataatmandja e Tan (2001)

A análise dos dados desta pesquisa revela que o ganho de resistência dos solos ANI e ALE com a adição do ARM pode estar relacionada à cura do material, visto que, segundo Motta (2005), a compactação contribui para a formação de grãos mais finos, ativando o potencial pozolânico dos agregados reciclados, que, de acordo com Jimenez (2011), acabam reagindo com o hidróxido de cálcio na presença de água formando compostos com propriedades aglomerantes. Reforçando essa idéia, Jimenez (2011) observou ganhos de resistência nas amostras de agregado reciclado a partir de ensaios de cisalhamento rápido confinando e de resistência à compressão não confinada realizados em vários períodos de cura. Numa pesquisa relacionada ao uso da microscopia da composição solo-resíduo, Fugii (2012) identificou a presença de quantidade significativa de materiais cimentantes em misturas de solo-RCD.

Avaliando as pesquisas que utilizaram o aglomerante cal como aditivo para estabilização química de solos finos, observou-se que essas misturas apresentaram ganhos expressivos de resistência com o tempo de cura. Por exemplo, na pesquisa de Cunha, Resende e Ramos (2010), utilizando um solo fino laterítico da região do município de Aparecida de Goiânia/GO, moldado na energia intermediária, foram obtidos valores de MR para diferentes combinações de tensão desvio e pressão confinante entre 181,80 e 292,87 MPa. Com a adição de cal hidrata do tipo CH-III a uma proporção de 9% da mistura solo-cal, conseguiu-se valores de MR entre 428,9 e 2067,2 MPa.

Nóbrega (1991), utilizando a cal como aditivo e comparando os resultados obtidos, mostrou que as diferenças nas propriedades físico-químicas e mineralógicas entre os dois solos possibilitaram diferentes comportamentos mecânicos. Isso pode explicar os diferentes ganhos de resistência apresentados nas combinações ALE-ARM e ANI-ARM para os teores com 50% e 70% de ARM. Já Rosa, Ferreira e Guimarães (2006), realizando ensaios de mini-CBR em solos estabilizados quimicamente com cal, concluíram que solos lateríticos apresentaram grande reação com a cal.

Nos estudos com a adição de cimento, Bernucci *et al.* (2010) observaram que a mistura solo-brita-cimento (40%solo+60%brita+4%cimento), após um período de cura de 7 dias, apresentou maiores valores de MR que o solo-brita (40%solo+60%brita) e o solo-cimento (solo+5%cimento). Os autores argumentaram que o caráter cimentício do solo-brita-cimento garantiu a esse material maior rigidez, elevando o valor do módulo. Analisando o solo-

cimento e o solo-brita-cimento, observa-se que este último sofreu menor deformabilidade devido ao efeito das britas.

Motta e Macêdo (2006) observaram um aumento expressivo no valor do MR para solo-cimento em diferentes idades de cura. Para o período de 7 dias de cura, foram obtidos valores de MR entre 1100 e 2100 MPa na mistura de solo laterítico com 3% de cimento. Já Castro *et al.* (2011), realizando estudos de solos melhorados com cimento (SMC), observaram que os valores de MR obtidos aos três (3) e sete (7) dias de cura variaram aproximadamente de 200 para 450 MPa, para pressões confinantes entre 20 e 150 kPa.

Em relação às amostras utilizadas nesta pesquisa, outro fator que pode ter contribuído para a obtenção desses valores de MR, principalmente os valores expressivos das amostras A10 e A11, e os diferentes comportamentos resilientes das misturas ARM-solos, solos puros e A03 (ARM puro), está relacionado à porosidade do esqueleto granular desses materiais. Com os resultados obtidos por Dias *et al.* (2006), observou-se que quanto menor a porosidade do esqueleto granular do material estudado, ou seja, quanto melhor for o empacotamento dos grãos, maior o valor do MR.

Cabe finalmente destacar que, a avaliação de MR com valores altos ou baixos para uso em base ou sub-base com o uso do RCD ou outro material vai depender do tipo estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade das deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Da análise dos ensaios de laboratório e com base nos conceitos apresentados na revisão bibliográfica, procurou-se avaliar as propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de RCD produzidos na usina recicladora instalada na RMA visando o emprego dessa nova alternativa em camadas de base e sub-base de pavimentos. Ressalta-se que todas as conclusões obtidas nessa pesquisa restringem-se ao universo dos materiais e das condições estudadas.

Em relação às propriedades físicas, verificou-se que os agregados reciclados de RCD utilizados nessa pesquisa são do tipo misto, porém, com altos teores de fragmentos de concretos e argamassas, e baixa parcela de materiais indesejáveis. Parâmetros como absorção e massa específica real (dos grãos), apesar de algumas variações devido à heterogeneidade da constituição dos materiais, em geral, foram coerentes com os resultados obtidos em outras pesquisas.

Analisando-se os valores de desgaste por Abrasão “*Los Angeles*”, percebe-se que os agregados reciclados de RCD possuem um desgaste maior quando comparados aos agregados convencionais, porém, com valores menores que 55 %, estando ainda dentro do limite estabelecido pela norma para materiais empregados em camadas granulares de base e sub-base. Já em relação ao índice de forma dos grãos, os valores obtidos para os dois tipos de ARG se apresentaram de acordo com a NBR 15116 (2004).

Apesar de o ARM e os ARGs apresentarem descontinuidades nas curvas de distribuição granulométricas, observando-se os valores de Cu, foi possível, através das misturas solo-agregados de RCD, e da combinação ARM-ARGs, manter ou melhorar a distribuição granulométrica dos solos e do ARM.

Quanto à plasticidade, os agregados reciclados de RCD apresentaram comportamento não plástico e, mostraram-se adequados para a estabilização de solos de elevada plasticidade, inclusive tornando as misturas como não plásticas nas maiores proporções de agregados de RCD. Com isso, observou-se que as misturas foram enquadradas nos grupos A-2-4, A-2-6 ou A-2-7 pela classificação TRB.

No tocante à compactação, observou-se que a presença dos agregados reciclados de RCD nas misturas fizeram diminuir a massa específica seca máxima e aumentar o teor de

umidade ótima das amostras. Isso já era esperado, em virtude da maior absorção de água e menor massa específica aparente desses agregados.

Quanto à degradação causada pela compactação, observou-se que as misturas que continham ARGs apresentaram as maiores variações na curva granulométrica. Embora de uma forma geral os agregados tenham apresentado valores de índice de degradação entre 0 e 5%, esses valores obtidos são equivalentes aos de alguns materiais naturais empregados nas camadas inferiores de pavimentos.

Os resultados do ensaio de ISC para a energia intermediária foram satisfatórios. Observou-se que a adição gradativa dos agregados de RCD elevou o valor do ISC e, também, reduziu a expansão das amostras analisadas para valores próximos de 0. Todas as amostras atenderam à exigência para sub-base ($ISC \geq 20$), e as amostras A06, A07, A08, A11, A12 e A13, inclusive o ARM puro, ficaram com valores de ISC maiores que 60%, que é a exigência mínima para uso desses materiais na camada de base.

Quando são avaliados apenas os valores apresentados pelo ensaio de ISC, conclui-se que as misturas entre solo e agregados reciclados de ARM podem ser utilizadas em camadas de pavimentos de vias com baixo volume de tráfego. Destaca-se que esses parâmetros isolados não podem ser utilizados para limitar o uso desses materiais. As amostras dos materiais utilizados nessa pesquisa, sob o ponto de vista da deformação elástica, mostraram resultados compatíveis com módulos de resiliência geralmente encontrados em materiais usualmente empregados em camadas granulares de pavimentos. A presença do RCD contribuiu na melhoria do comportamento resiliente dos solos estudados.

Observou-se que os valores de MR das misturas ARM-solos e do ARM puro, com a aplicação de energia intermediária e um tempo de cura de 7 dias, foram elevados, comparados aos obtidos em outras pesquisas com o uso de RCD e até mesmo com os valores de MR obtidos em solos lateríticos utilizados em pavimentos. Neste sentido, destaca-se o comportamento resiliente das amostras A10 e A11, que apresentaram, para as combinações de pressão confinante e tensão desvio utilizadas, valores de MR com 1045,3 MPa e 1375,9 MPa, respectivamente.

Os resultados obtidos nessa pesquisa possibilitaram analisar, em escala de laboratório, a viabilidade técnica do uso do agregado de RCD com vistas ao uso na pavimentação urbana no estado de Sergipe, podendo se constituir numa interessante alternativa para a aplicação nas

rodovias vicinais e vias urbanas da cidade de Aracaju e sua região metropolitana, substituindo parte dos materiais convencionais.

Com isso, contribuiu-se para a difusão desta forma de reciclagem já consolidada em outras regiões, acrescentando uma alternativa tecnicamente vantajosa para o aumento na oferta de vias necessárias ao desenvolvimento urbano da RMA.

5.2 Recomendações para futuros trabalhos

Para o melhor conhecimento do comportamento dos agregados reciclados de RCD originados da RMA, com o uso desses materiais para fins de pavimentação, sugere-se:

- Avaliar o comportamento resiliente dos agregados reciclados de RCD mistos provenientes da RMA e de misturas com solos em diferentes tempos de cura visando o ganho de resistência pelo processo de cimentação;
- Avaliar a deformação permanente desses agregados reciclados e das misturas com solos;
- Realizar ensaios de compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral nas misturas com valores de MR elevados;
- Estudar a aplicação das três frações de agregados reciclados utilizados nessa pesquisa em misturas asfálticas, substituindo os agregados naturais;
- Fazer o monitoramento de um trecho experimental com o uso de RCD na RMA, avaliando-se o pavimento quanto ao desempenho estrutural e funcional ao longo do tempo, submetendo-o às interferências climáticas e à passagem do tráfego;
- Avaliar economicamente o uso do RCD em substituição aos materiais naturais, com foco na RMA;
- Realizar ensaios de lixiviação e solubilização para classificar o RCD da RMA segundo a NBR 10004 (2004).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11804: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente.** Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30: Agregado miúdo –Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.** Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo, 2009. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2009.pdf> >. Acesso em: 15/06/2013.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo, 2010. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2010.pdf> >. Acesso em: 15/06/2013.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo, 2012. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf> >. Acesso em: 15/06/2013.

ALDIGUERI, D. R.; PARENTE, E. B.; SOARES, J. B. **Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material para revestimento de vias de baixo volume de tráfego**. Acessado em 2 de agosto de 2012. Disponível em: <www.det.ufc.br>. 2004.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARACAJU. Lei nº 4.452, de 31 de outubro de 2013. **Intitui o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e resíduos volumosos – SGRCC e dá providências correlatas no município de Aracaju**. Disponível em: Acervo da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMA). Acesso em: 05 fev. 2014.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração**. Sao Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BENTO, P. F. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

BERNUCCI, L. B., et al. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS & ABEDA, 2006.

BERNUCCI, L. B., et al. Estudo comparativo de bases de pavimentos por meio de trechos monitorados: efeito da adição de cimento. In: 40ª Reunião anual de pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, 2010. **40ª RAPv**: Rio de Janeiro, 2010. CD-ROM.

BEZERRA NETO, R.S., et al. Propriedades resilientes de alguns materiais de pavimentação empregados na região de Campo Grande-MS. In: 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, SP, 2003. **34ª RAPv**: Rio de Janeiro, 2003. CD-ROM.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 05 abr. 2013.

BRASIL. Ministerio do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 05 abr. 2013.

BRASIL. Ministerio do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=449>>. Acesso em: 05 abr. 2013.

BRASIL. Ministerio do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3o da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em: 05 abr. 2013.

BRASIL. Ministerio do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 448, de 19 de janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.**Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672> >. Acesso em: 05 abr. 2013.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. de; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: Projeto entulho bom.** Salvador:EDUFBA, 2001. cap. 6, p. 188-227.

CASAGRANDE, M. D. T. et al. **Estudo da aplicabilidade de borra oleosa asfáltica pura como material para pavimentos de baixo volume de tráfego.** In: XX CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, v.2., **Anais...** p.1100-1109. Brasília, 2006.

CASTRO, G. R. et al. Estabilização de solos in situ com uso de cimento Portland para composição das camadas de infraestrutura do pavimento do rodoanel trecho sul/SP. In: 17ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Porto Alegre, RS, 2011. **17ª.RPU:** Rio de Janeiro, 2011. CD-ROM.

CAVALCANTE, E. H., et al. Construção de Trecho Monitorado com Utilização do Resíduo Cascalho de Perfuração. **XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto.** Rio de Janeiro. Vol. 1, pp. 2036-2047.

CAVALCANTE, E. H. (2013), Comunicação pessoal. 2013.

COSTA, J. H. **Caracterização geotécnica dos solos finos, da faixa litorânea e tabuleiros costeiros do estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego.** 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CRETA. **Resíduos de Construção e Demolição (RCD).** Disponível em: <http://www.cretatec.com.br/index.php?Itemid=78&catid=29:wiki-residuos&id=56:residuos-de-construcao-e-demolicao&option=com_content&view=article>. Acessado em: 09 jan. 2014.

CUNHA, RESENDE E RAMOS. Uso de materiais não convencionais para base de pavimentos asfálticos no município de Aparecida de Goiânia-GO. In: 40ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro, RJ, 2010. **40ª.RAPv:** Rio de Janeiro, 2010. CD-ROM.

DALTRO FILHO, J. (Coord.). **Resíduos sólidos da construção civil em Aracaju: diagnóstico.** Aracaju: SINDUSCON/SE, Projeto COMPETIR-SEBRAE/SENAI/GTZ, EMSURB, SEMA, 2005.

DIAS, J.F. et al. Avaliação das características de compactação e do ISC de agregado reciclado de telha cerâmica e de suas misturas com solos lateríticos. In: 36ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Curitiba, PR, 2005a. **36ª.RAPv:** Rio de Janeiro, 2005. CD-ROM.

DIAS, J.F. et al. Agregados reciclados de telha cerâmica. In: 36ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Curitiba, PR, 2005b. **36ª.RAPv:** Rio de Janeiro, 2005. CD-ROM.

DIAS, J. F. et al. Avaliação do módulo de resiliência de misturas solo-agregado reciclado cerâmico em função da porosidade do esqueleto granular do agregado. In: 13ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Maceió, AL, 2006. **13ª.RPU:** Rio de Janeiro, 2006. CD-ROM.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 041/1994: **Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 051/1994: **Solos – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 082/1994: **Solos – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/1994: **Solos – Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 122/1994: **Solos – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 398/1999: **Agregados – Índice de degradação após compactação Proctor**. Rio de Janeiro, 1999.

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

DNIT- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 134/2010: **Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

EUROPEAN COMMISSION (EC). 1999. **Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts – Final report**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_report.htm>. Acesso em: 15 de dezembro de 2013.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Recycled Materials in European Highway Environments: Uses, Technologies, and Policies**. Washington, 2000.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FREITAS, R. D. **Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FUGGI, L. M. T. Estudo de misturas de Solo, RCD e Cal Virgem e Hidratada para uso em obras Rodoviárias. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília.

GABR, A. R.; MILLS, K. G.; CAMERON, D.A. Repeated Load Triaxial Testing of Recycled Concrete Aggregate for Pavement base Construction. **Geotechnical and Geological Engineering**, v.31, p. 119-13, Fevereiro. 2013.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para a pavimentação.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, Coordenação de População e Indicadores Sociais, 2008.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios: Pnad**, 2011.
- JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília.
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: **SEMINÁRIO RECICLAGEM DE RESÍDUOS DOMICILIARES**, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>>. Acesso em: 16/05/2013.
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Alternativas de Gestão dos Resíduos de Gesso. Contribuição apresentada à discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307, relativa à gestão do gesso.** Julho de 2003. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Alternativas%20para%20gest%C3%A3o%20de%20res%C3%ADUOS%20de%20gesso%20v2.pdf>>. Acesso em: 15/04/2013.
- KARPINSKI, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: Uma abordagem ambiental.** Porto Alegre: Edipucrs, 2009.
- LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios defletométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996. 477p.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: 2ª Edição, 2005.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21.** 1992. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso em: 10/07/2013.
- MOREIRA, J. F.; DIAS, J. F.; REZENDE, M. E. Utilização dos resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG. **Vias Gerais**, Fev. 2007. p. 49-54, 2007.
- MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005.

Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

MOTTA, L.M.G; MACÊDO, M.M. Comportamento do solo melhorado com cimento para uso em pavimentação sob carga repetida. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Curitiba, PR, 2006. **13º COBRAMSEG**: Curitiba, 2006. CD-ROM.

MOTTA, L. M. G, MEDINA, J. **Investigação e desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE - Brasil**. Engenharia Civil – UM. No. 26. COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

NATAATMADJA, A.; TAN, Y.L. (2001) Resilient response of recycled concrete road aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, set-out, p. 450-453, 2001. Disponível em: <453.http://eprints.qut.edu.au/8558/1/8558.pdf>. Acesso em: 11/11/2013.

NÓBREGA, M. T. **A estabilização dos solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários**. Associação Brasileira de produtores de cal, boletim n.15, 1991, 116p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo; Editora Vilibor, 1995.

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

PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J.B. Realização e acompanhamento de dois trechos experimentais com asfalto-borracha no estado do Ceará. **Transportes**, Rio de Janeiro, v.XIII, n.1, p. 57-66, jun. 2005.

PINTO, S.;PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PINTO, T.P. (Coord.) **Gestão Ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do Sinduscon-SP**, São Paulo: **Obra Limpa**: I&T: Sinduscon-SP, 2005.

PRATA, V. C. **Gestão de resíduos da construção civil na zona urbana do município de Lagarto-SE**: do diagnóstico a uma proposta de modelo gerencial. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

REDIVO, I. M.; MARCON, A. F.; TRICHÊS, G. Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego. In: 17ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Porto Alegre, RS, 2011. **17ª.RPU**: Rio de Janeiro, 2011. CD-ROM.

RIBEIRO, F.; REZENDE, L.R. de. Avaliação do comportamento estrutural de uma via com aplicação de entulho em sua base. In: 13ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Maceió, AL, 2006. **13ª.RPU**: Rio de Janeiro, 2006. CD-ROM.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODRIGUEZ, D. et al. Recycling of ceramic fraction of construction and demolition waste as coarse aggregate for recycled concrete production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE

- OF AGRICULTURAL ENGINEERING, Valencia, Espanha, 2012. **CIGR-AgEng2012:** Valencia, 2012. Disponível em: <<http://www.cigr.ageng2012.org/>>. Acesso em: 06/02/2014.
- ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R.C. Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação. In: **IV Seminário de Iniciação Científica**, Goiânia, Goiás, 2006. Disponível em: <http://www.prp.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/iniccien/eventos/sic2006/arquivos/engenharias/estabilizacao_solo.pdf>. Acesso em: 08/01/2014.
- SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1997.
- SILVA, A.L. et al. Aplicação de agregados reciclados de resíduos da construção civil em pista experimental de Goiânia. In: 13ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Maceió, AL, 2006. **13ª.RPU**: Rio de Janeiro, 2006. CD-ROM.
- SILVA, T. A. S. **Utilização de materiais alternativos para a construção de pavimentos urbanos na região metropolitana de Fortaleza**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia dos Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- SILVA, V. C. **Estudo da aplicação de resíduos da construção e demolição da Universidade Federal de Campina Grande em pavimentos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- SILVA, B. A.; AMORIM, J.C.C.; VIEIRA, A. Estudo da variação do módulo de resiliência com o tempo para solos finos do centro-norte do Mato Grosso (2002). In: 11ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, Porto Alegre, RS, 2002. **11ª RPU**: Rio de Janeiro, 2002. CD-ROM.
- SCHNEIDER, D.M.; PHILIPPI, A.JR. Public management of construction and demolition waste in the city of São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2004.
- SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos da construção e demolição**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- VUONG, B.T.; ARNOLD, G. **Predicting in-service performance of alternative pavement materials for New Zealand conditions**. Land Transport New Zealand Research Report 304, ISBN 0-478-28716-X, ISSN 1177-0600, Nova Zelândia, 2006. Disponível em: <<http://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/304/docs/304.pdf>>. Acesso em: 24/05/2013.

ANEXO A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS ANTES E APÓS A
COMPACTAÇÃO

Figura A01 –Curvas granulométricas da amostra A03.

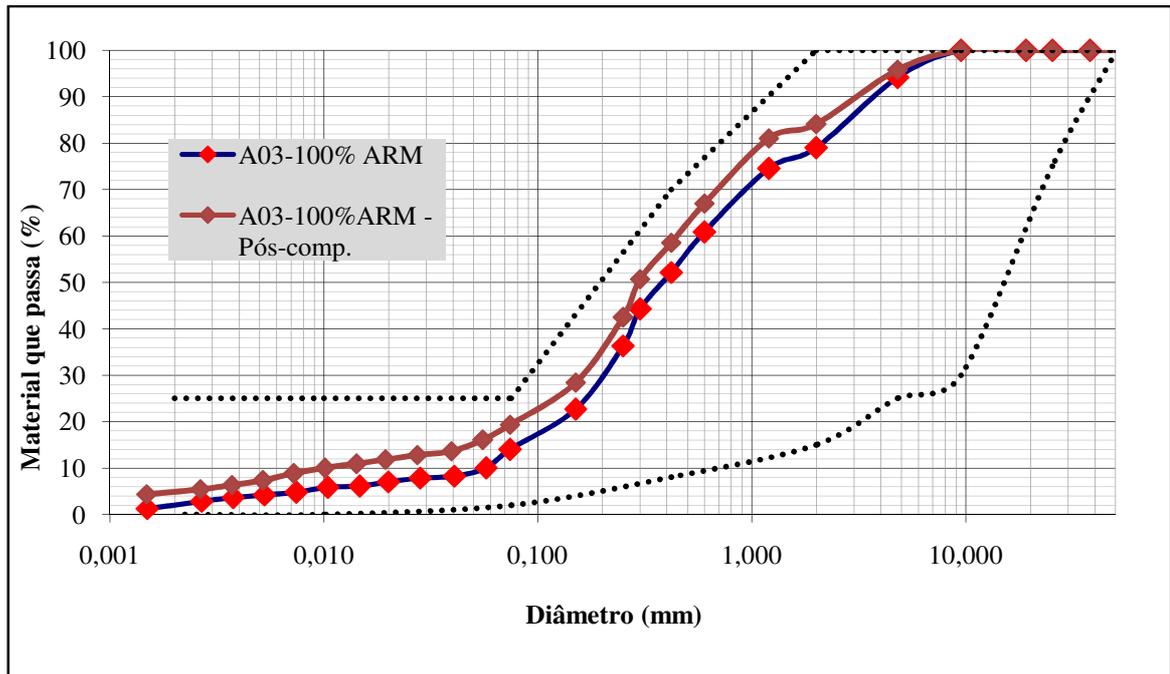


Figura A02 –Curvas granulométricas da amostra A06.

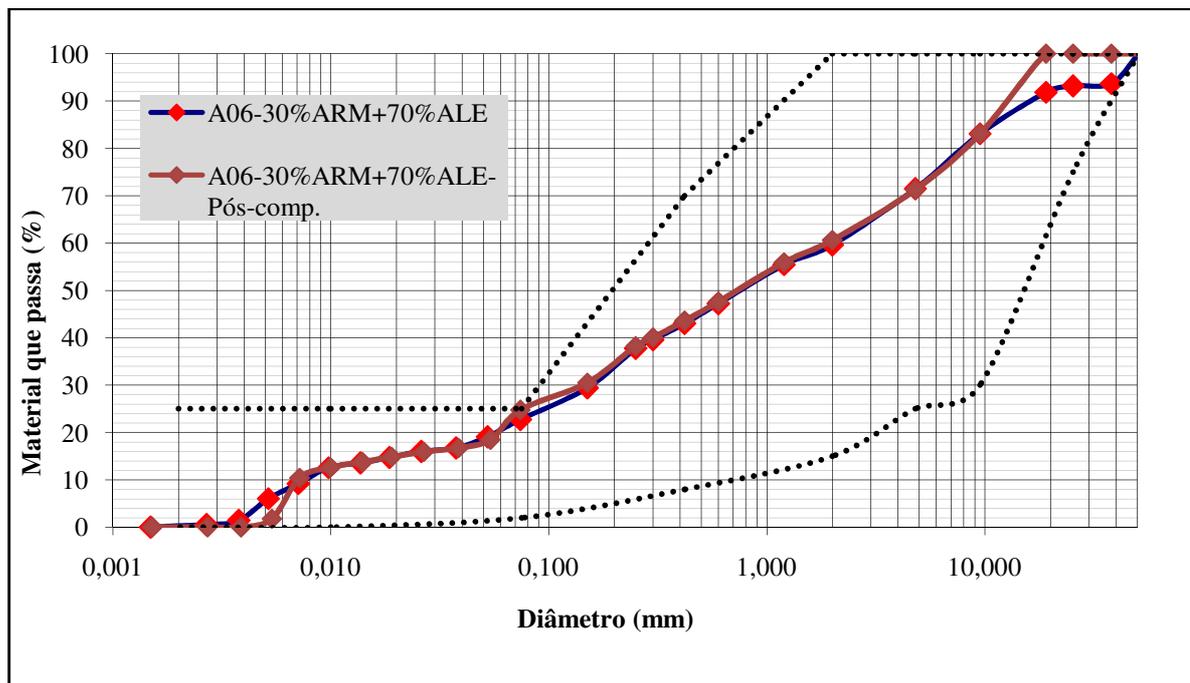


Figura A03 –Curvas granulométricas da amostra A07.

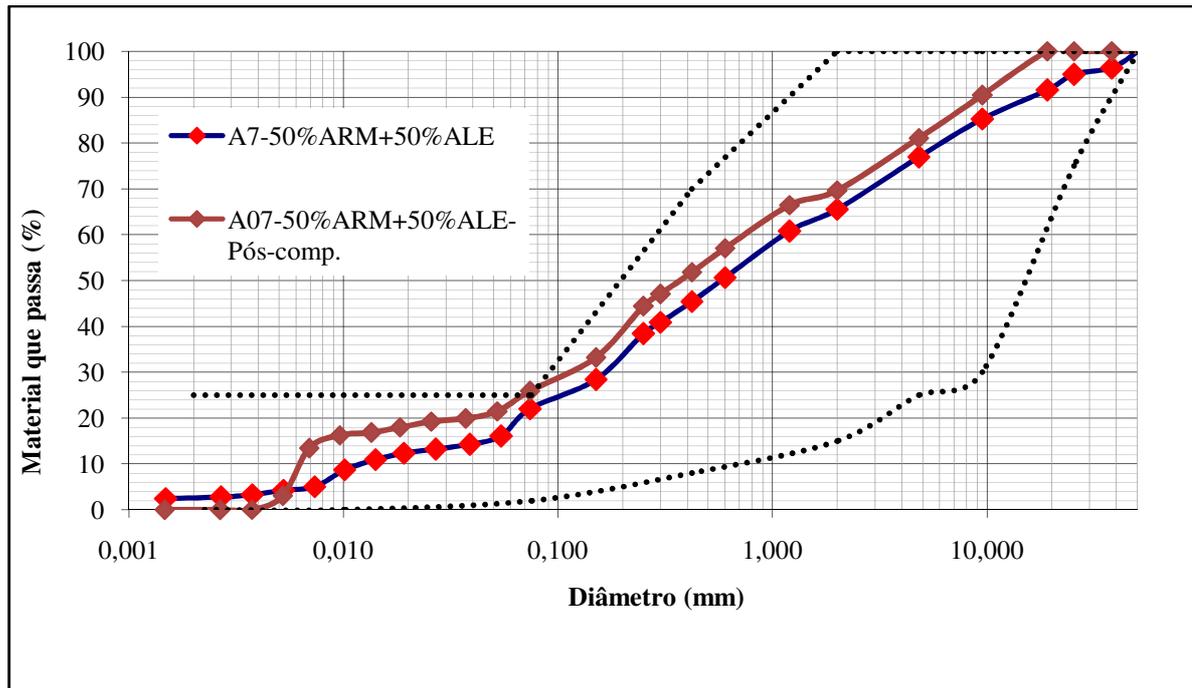


Figura A04 –Curvas granulométricas da amostra A08.

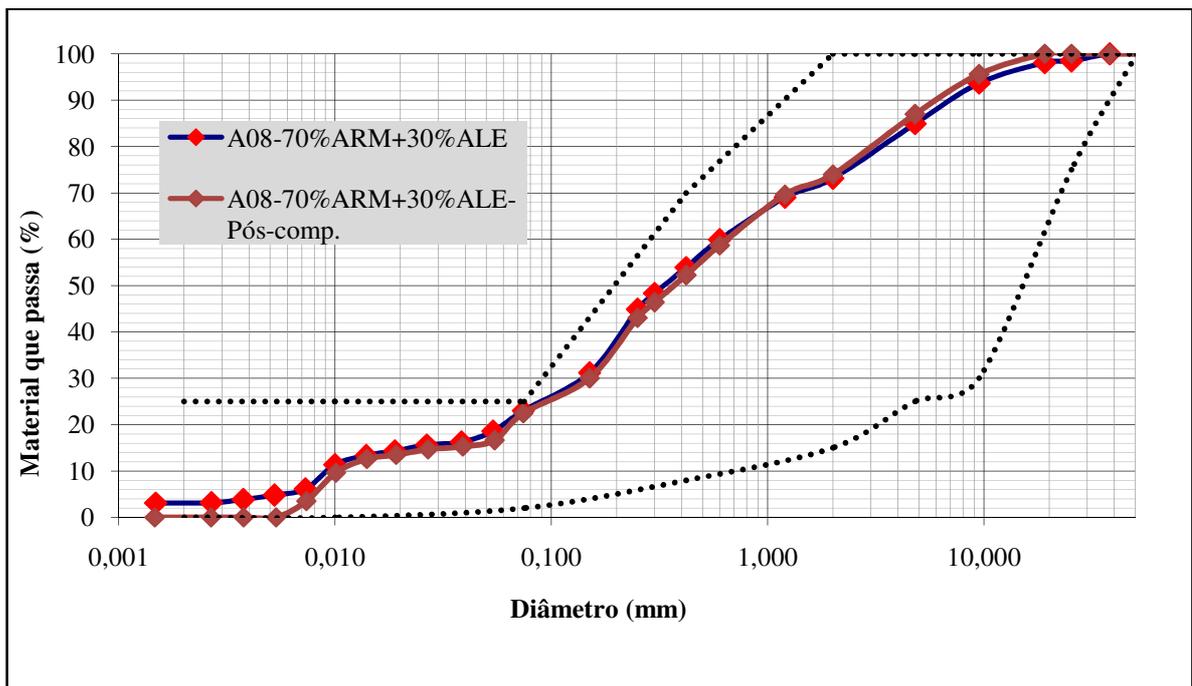


Figura A05 –Curvas granulométricas da amostra A09.

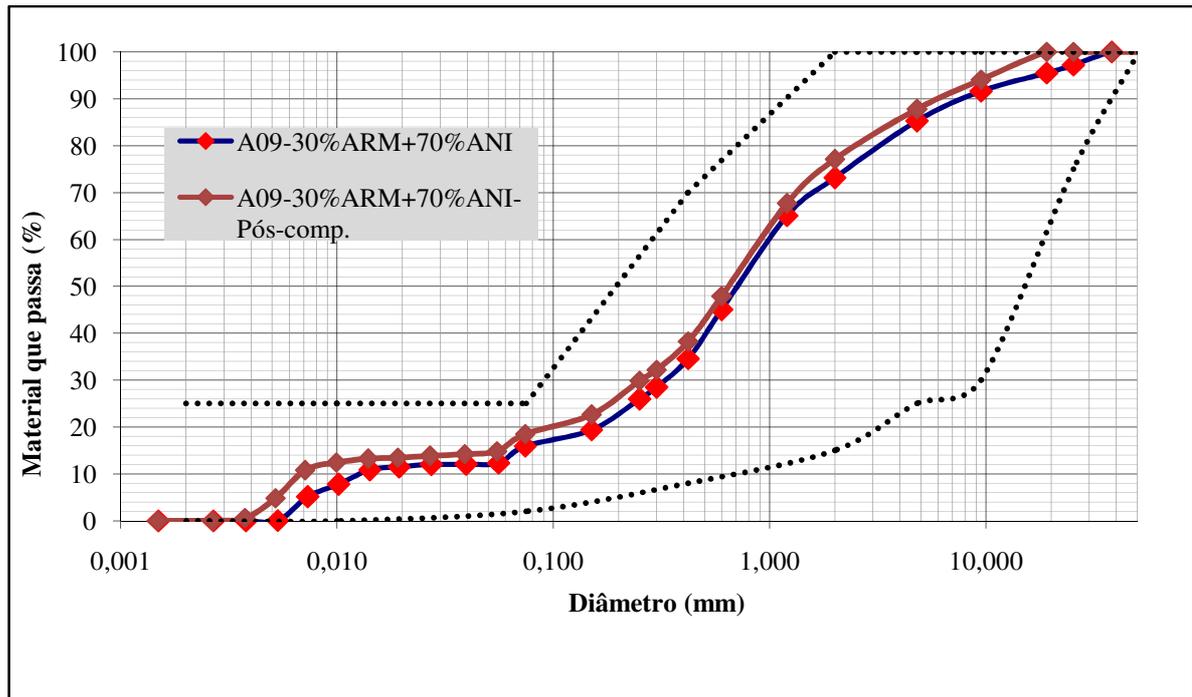


Figura A06 –Curvas granulométricas da amostra A10.

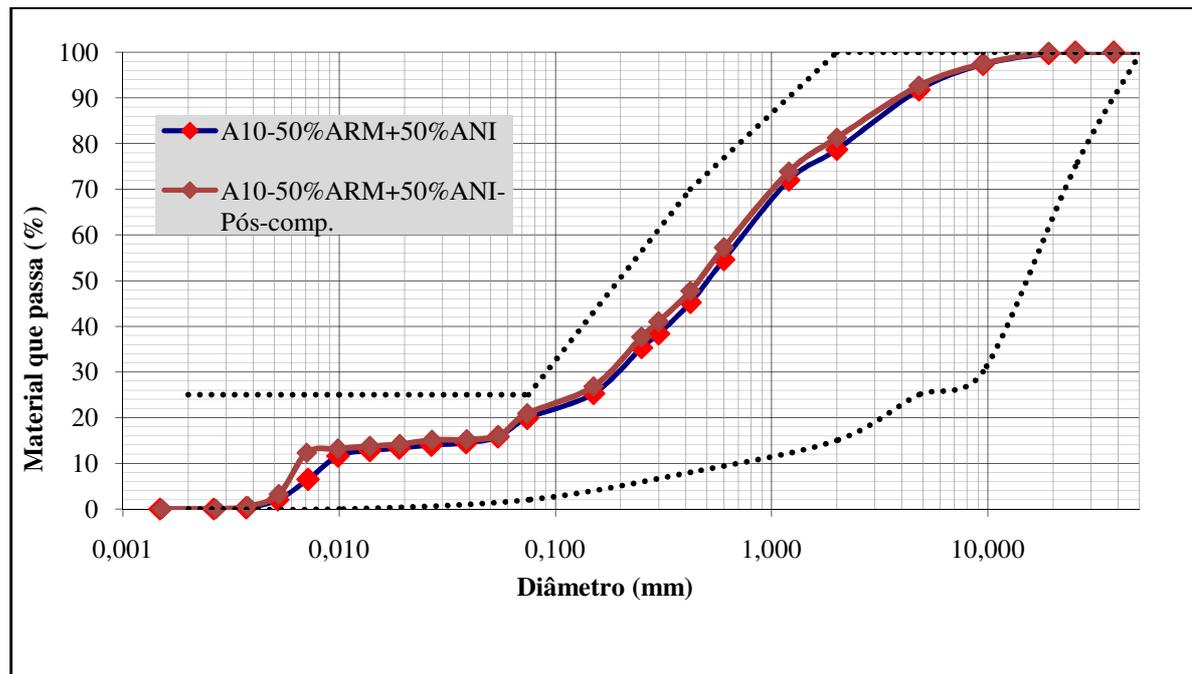


Figura A07 –Curvas granulométricas da amostra A11.

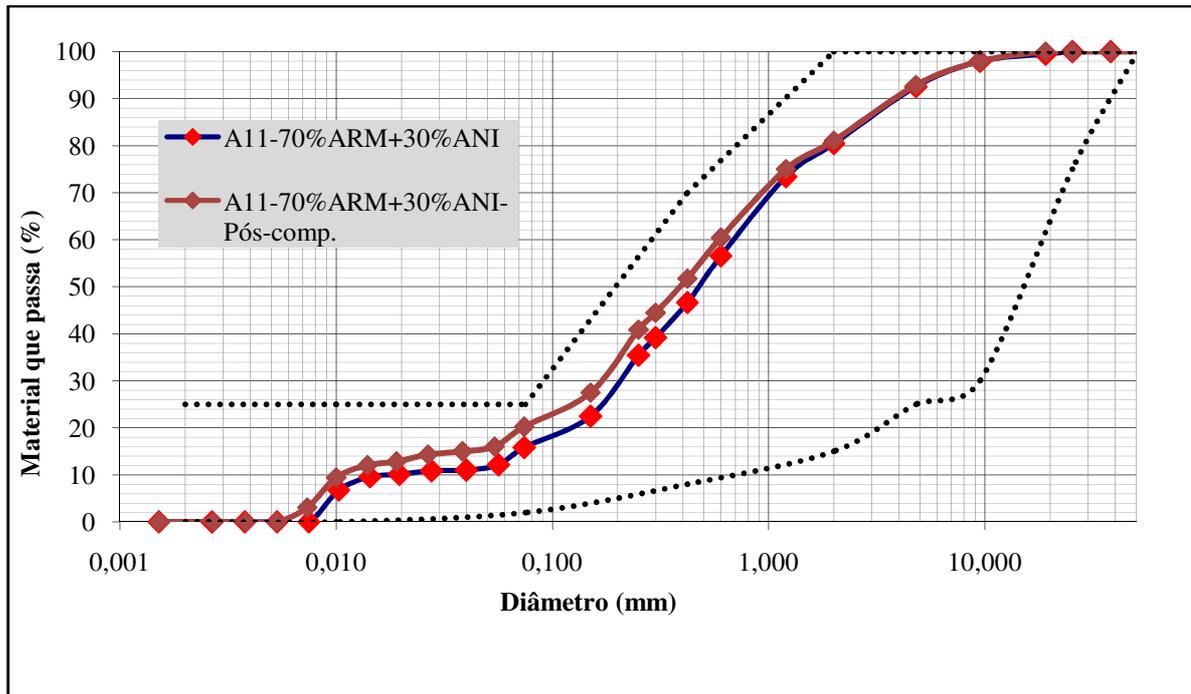


Figura A08 –Curvas granulométricas da amostra A12.

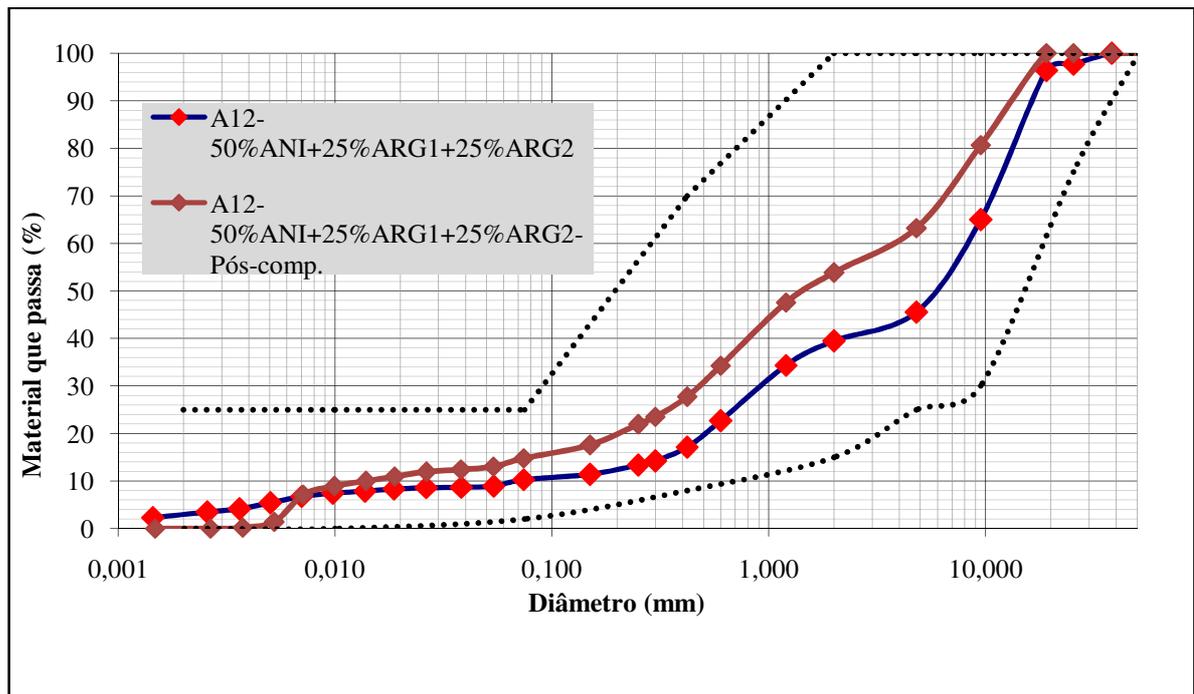
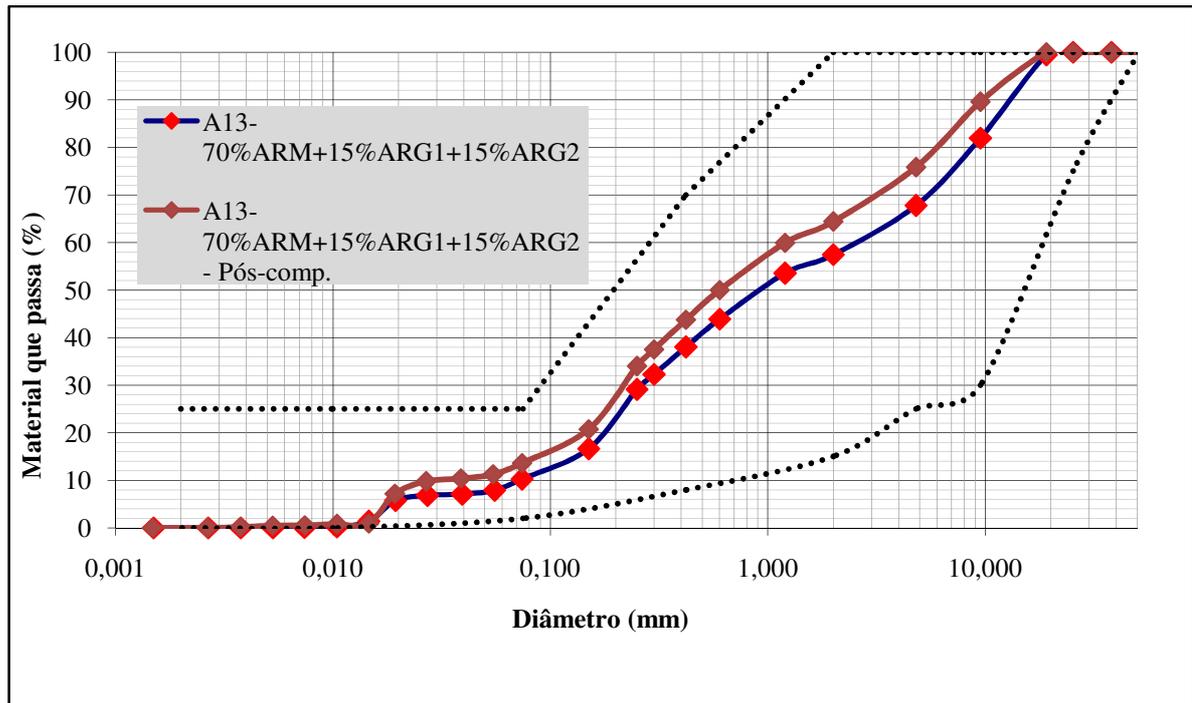


Figura A09 –Curvas granulométricas da amostra A13.



ANEXO B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS
SOLOS ESTUDADOS
GRÁFICOS TENSÃO CONFINANTE X MR
GRÁFICOS DE TENSÃO DESVIO X MR
GRÁFICOS DE TENSÃO CONFINANTE X TENSÃO DESVIO X MR PARA
OBTENÇÃO DE k_1 , k_2 e k_3

Figura B01 –Pressão confinante x MR A01.

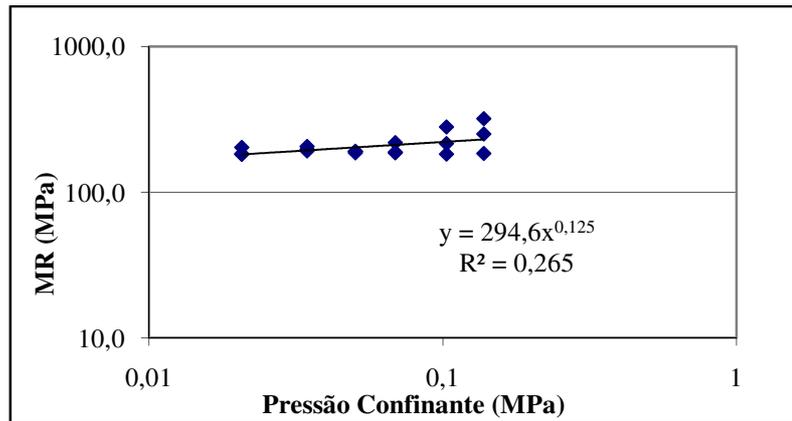


Figura B02 –Tensão desvio x MR A01.

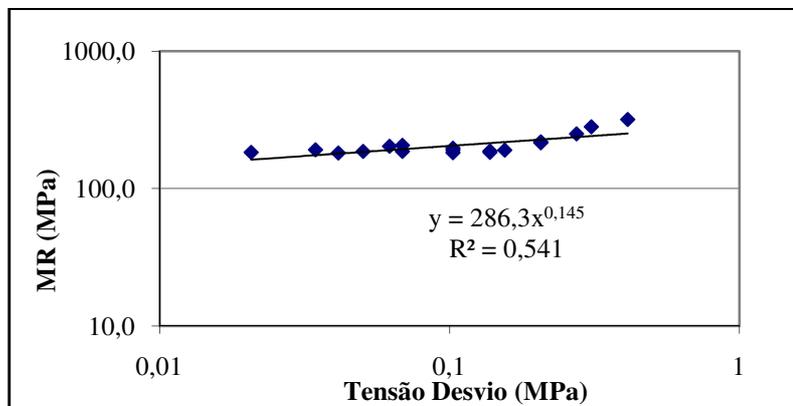


Figura B03 –Pressão confinante x MR A02.

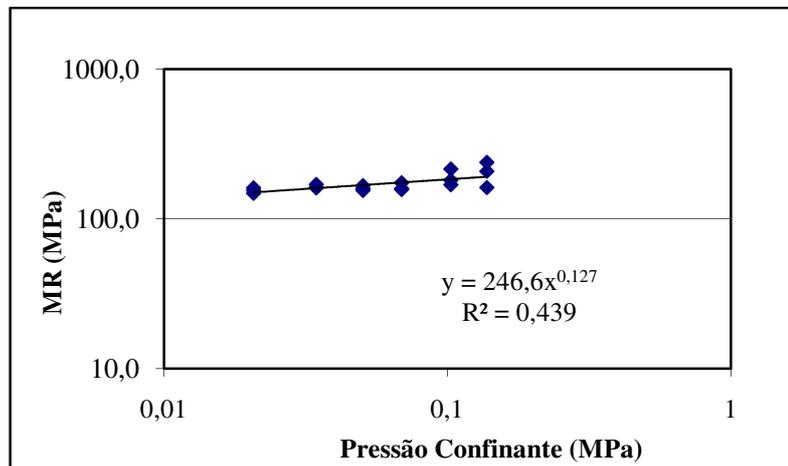


Figura B04 –Tensão desvio x MR A02.

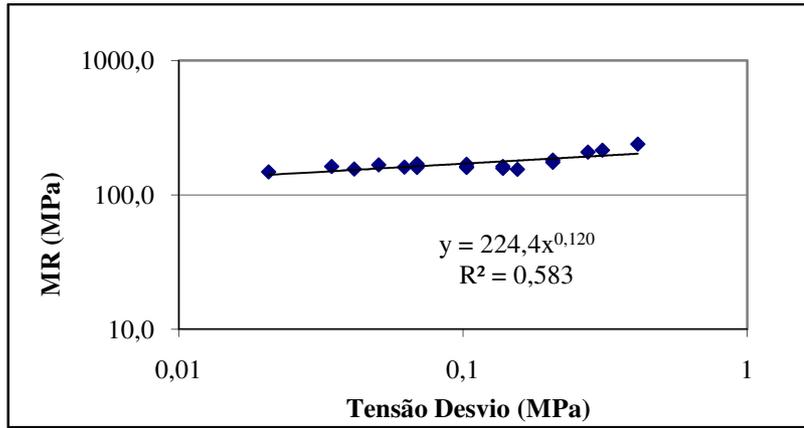


Figura B05 –Pressão confinante x MR A03.

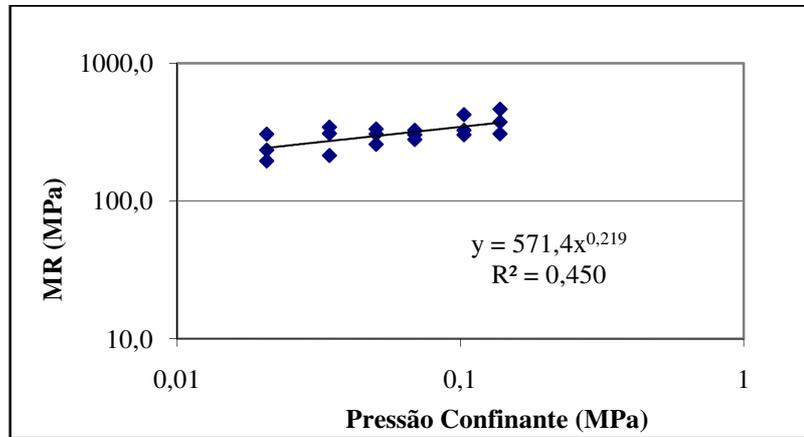


Figura B06 –Tensão desvio x MR A03.

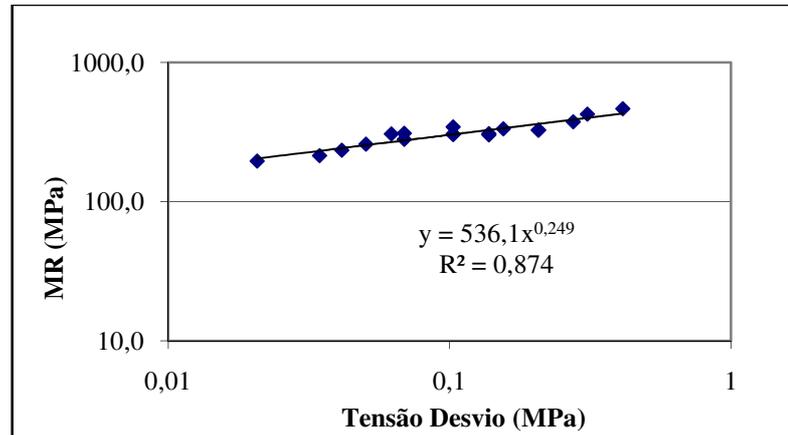


Figura B07 –Pressão confinante x MR A06.

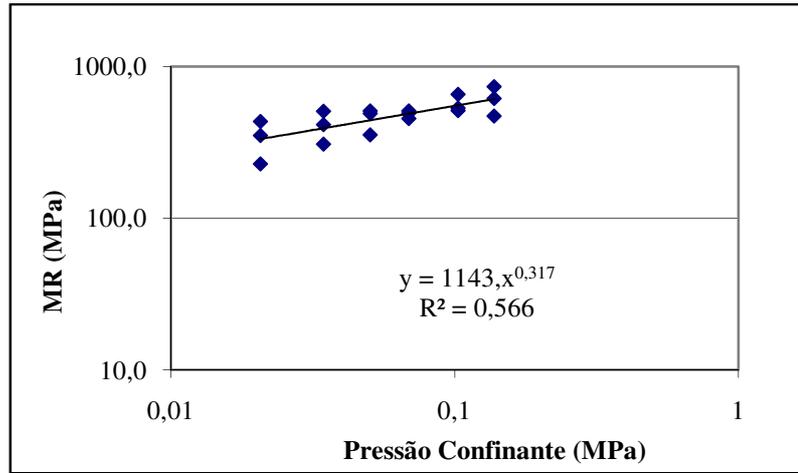


Figura B08 –Tensão desvio x MR A06.

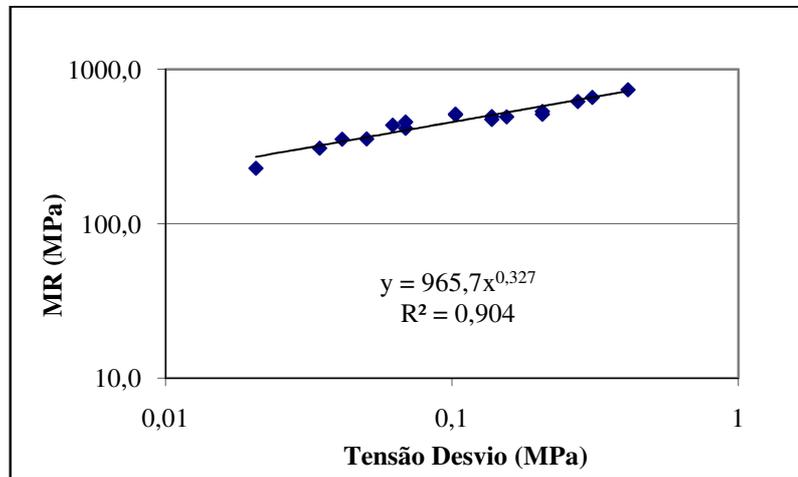


Figura B09 –Pressão confinante x MR A07.

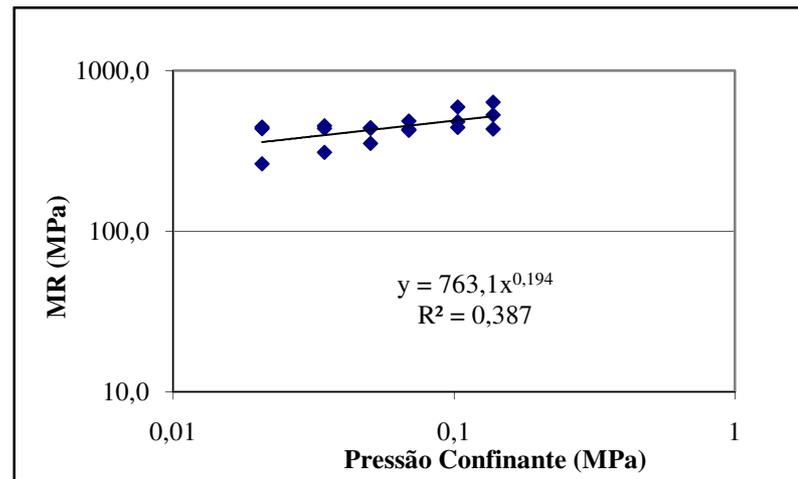


Figura B10 –Tensão desvio x MR A07.

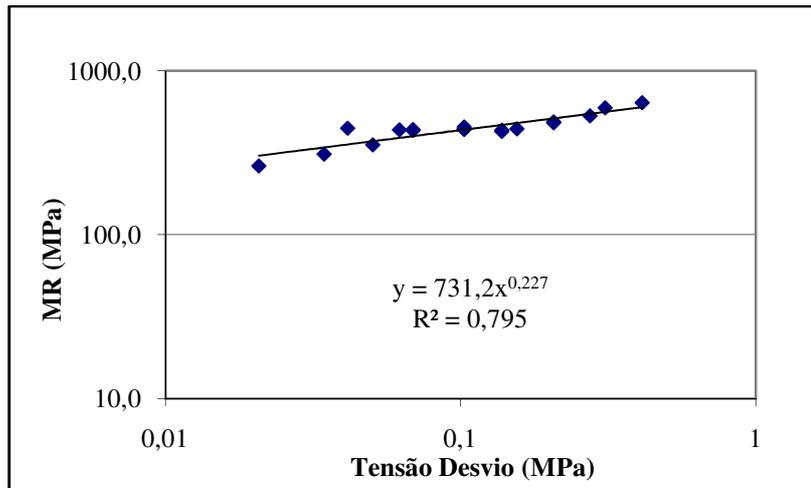


Figura B11 –Pressão confinante x MR A08.

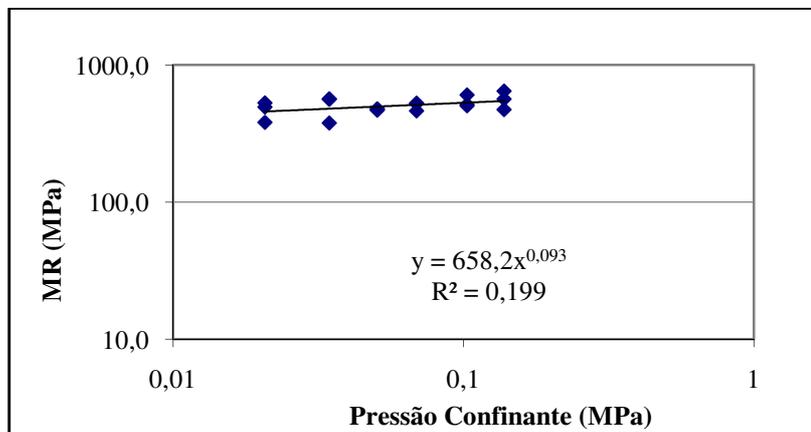


Figura B12 –Tensão desvio x MR A08.

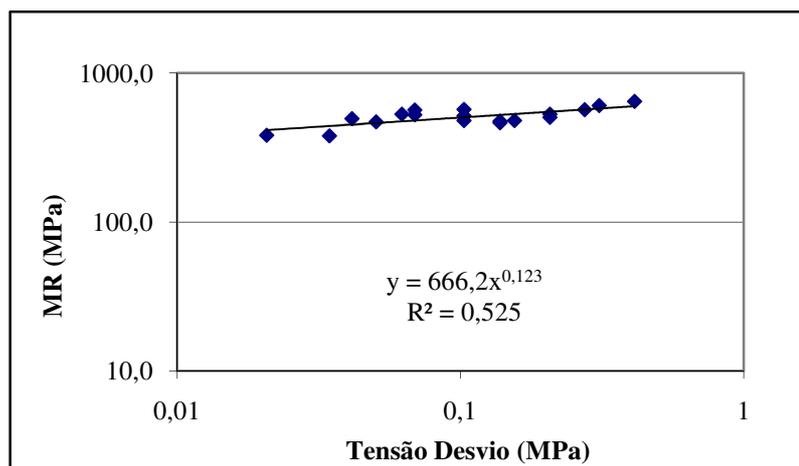


Figura B13 –Pressão confinante x MR A09.

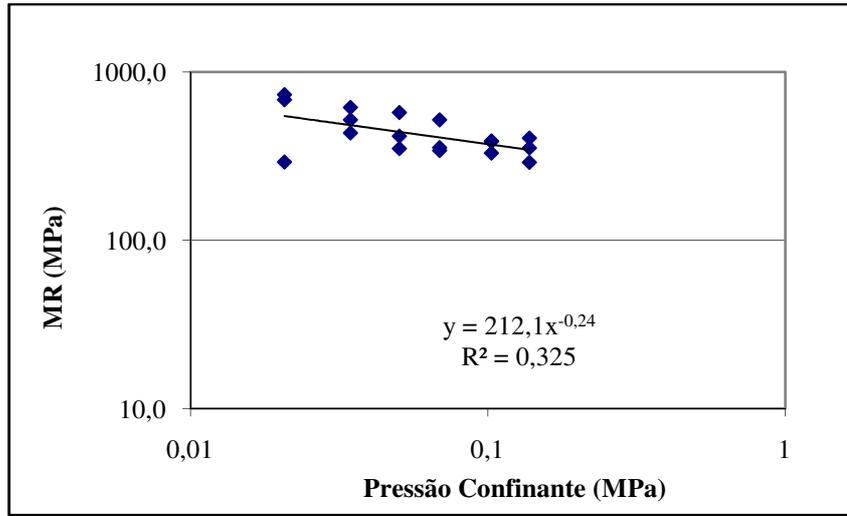


Figura B14 –Tensão desvio x MR A09.

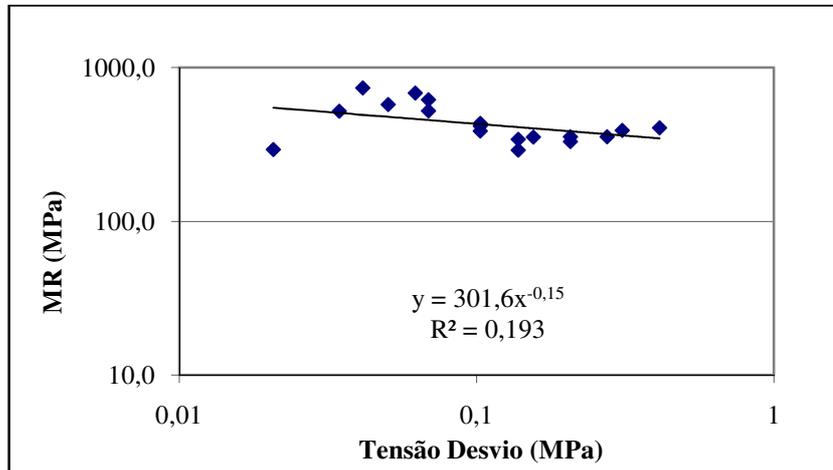


Figura B15 –Pressão confinante x MR A10.

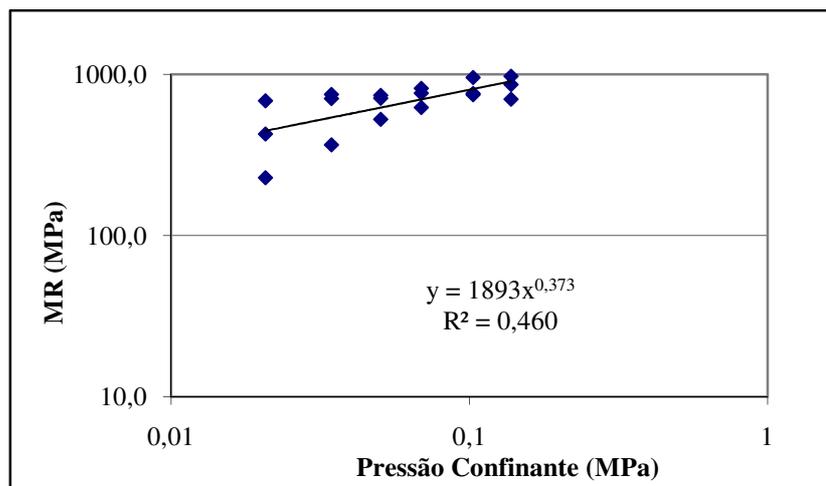


Figura B16 –Tensão desvio x MR A10.

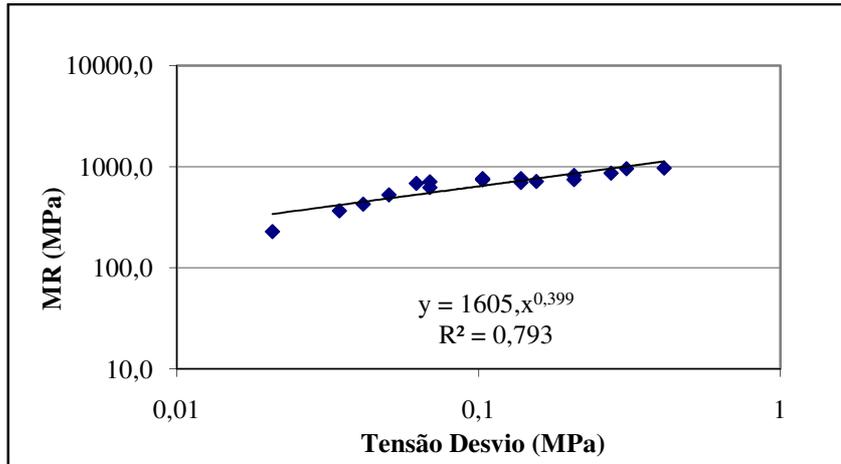


Figura B17 –Pressão confinante x MR A11.

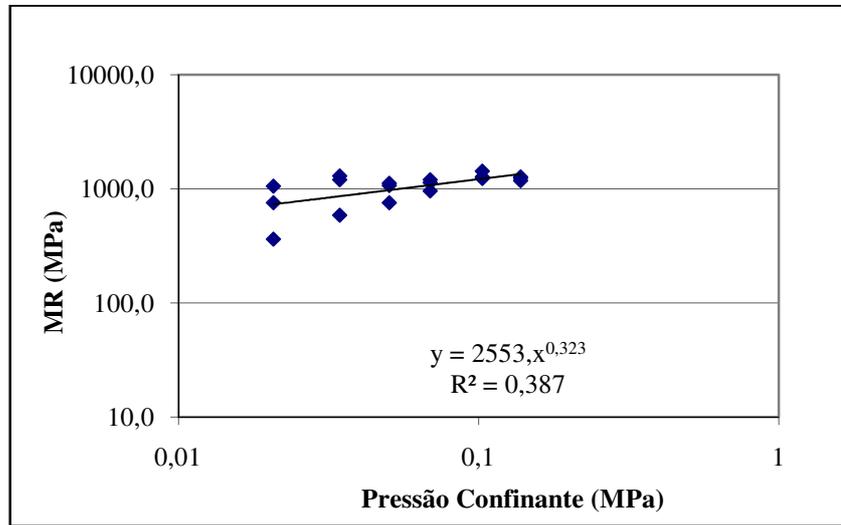


Figura B18 –Tensão desvio x MR A11.

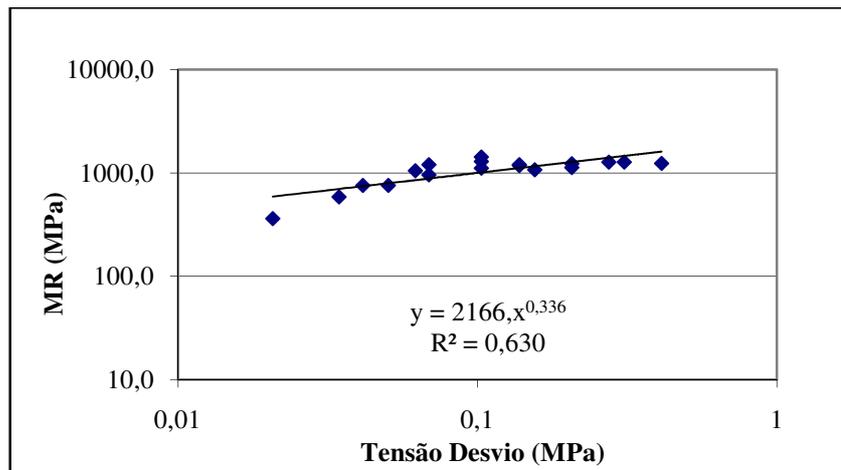


Figura B19 –Pressão confinante x MR A12.

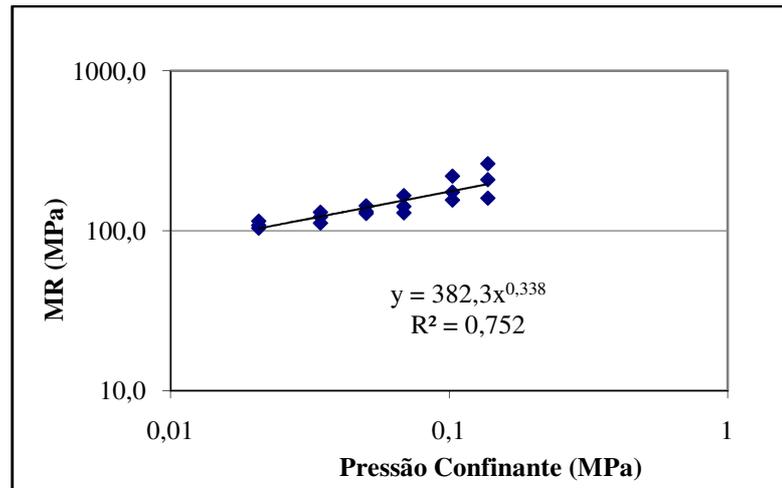


Figura B20 –Tensão desvio x MR A12.

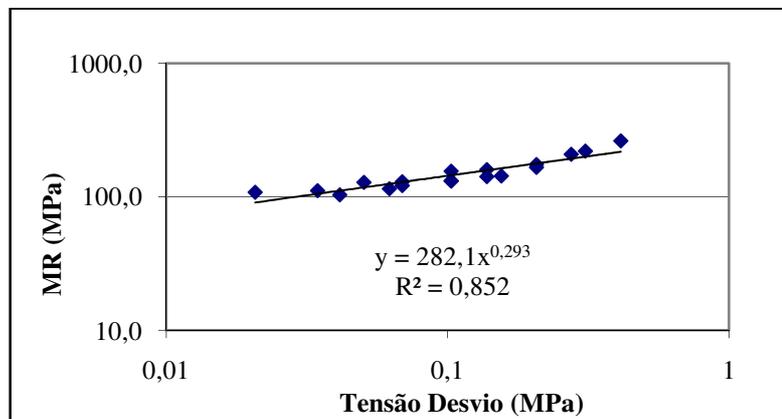


Figura B21 –Pressão confinante x MR A13.

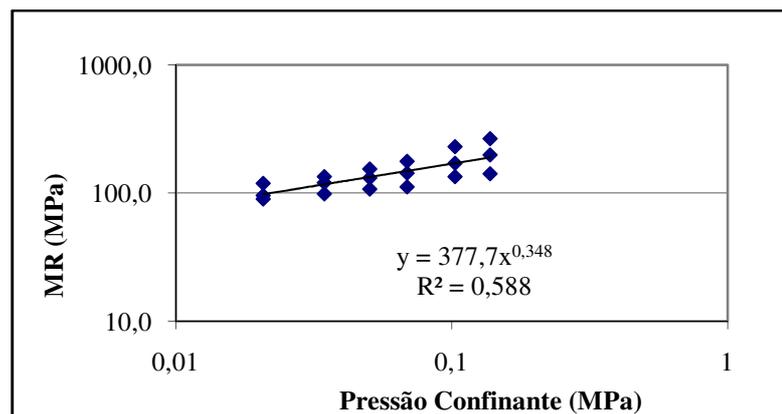


Figura B22 –Tensão desvio x MR A13.

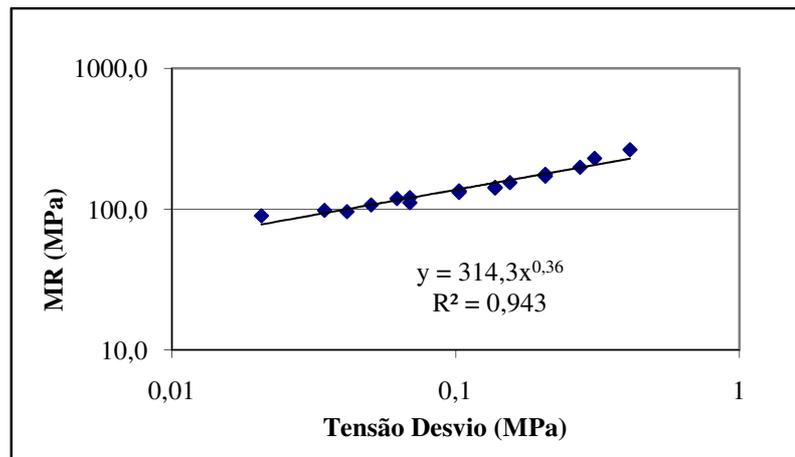


Figura B23 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A01.

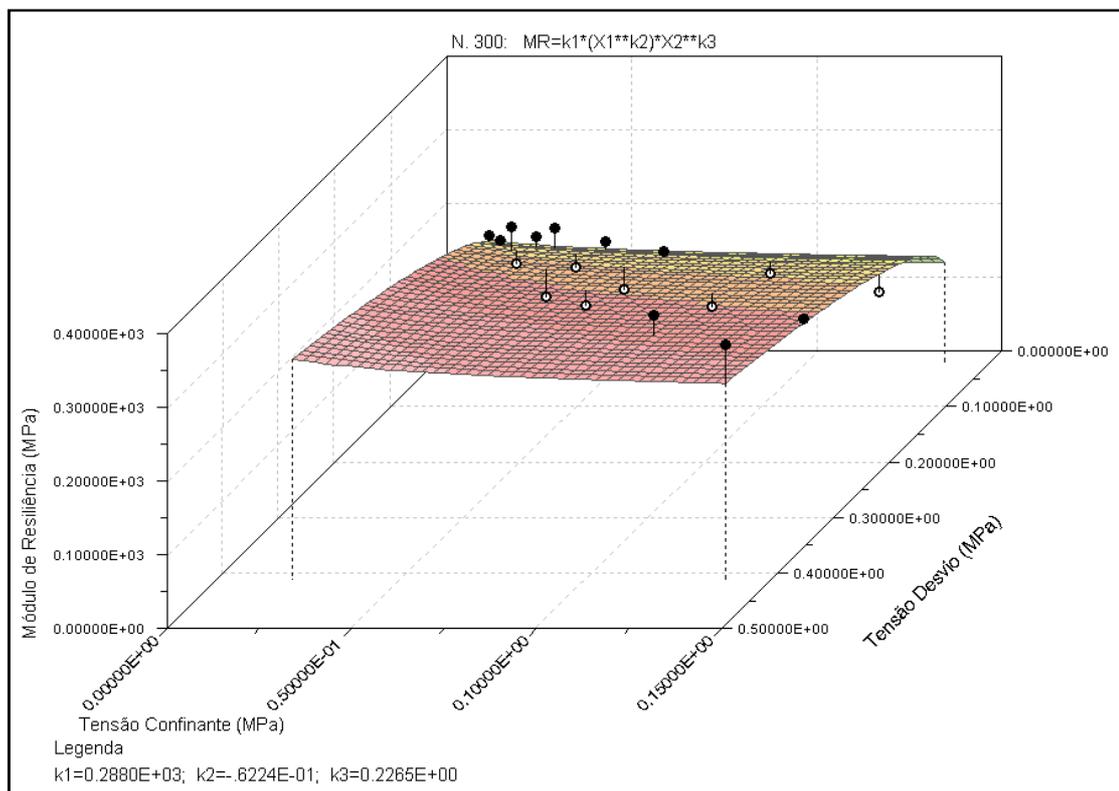


Figura B24 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A02.

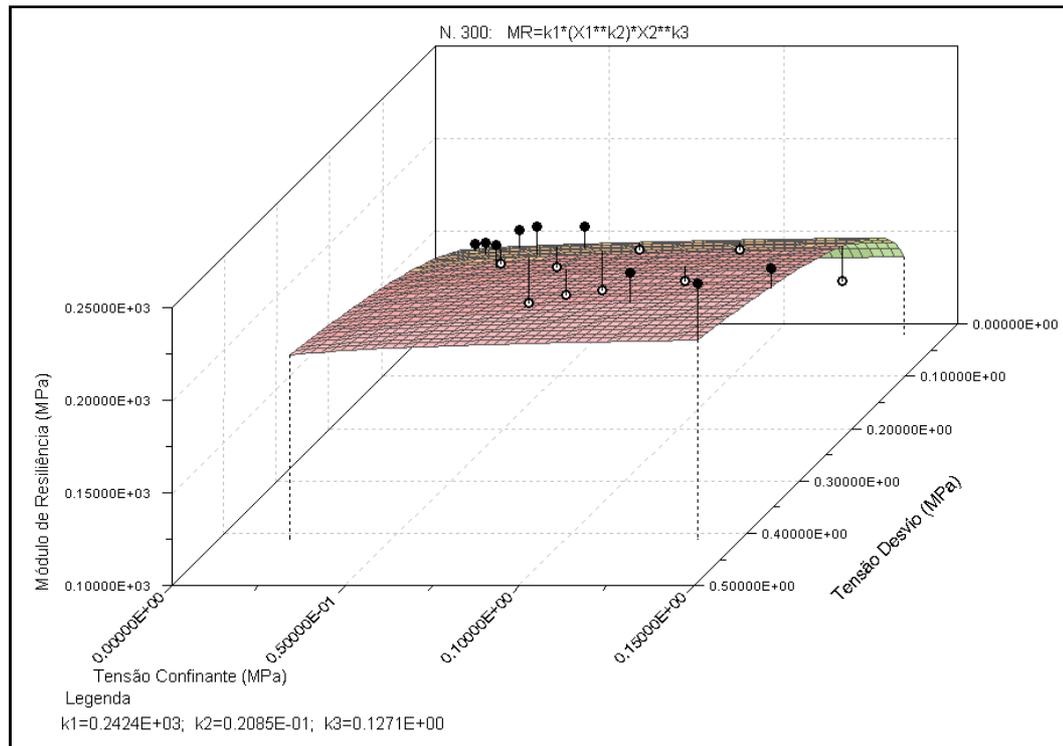


Figura B25 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A03.

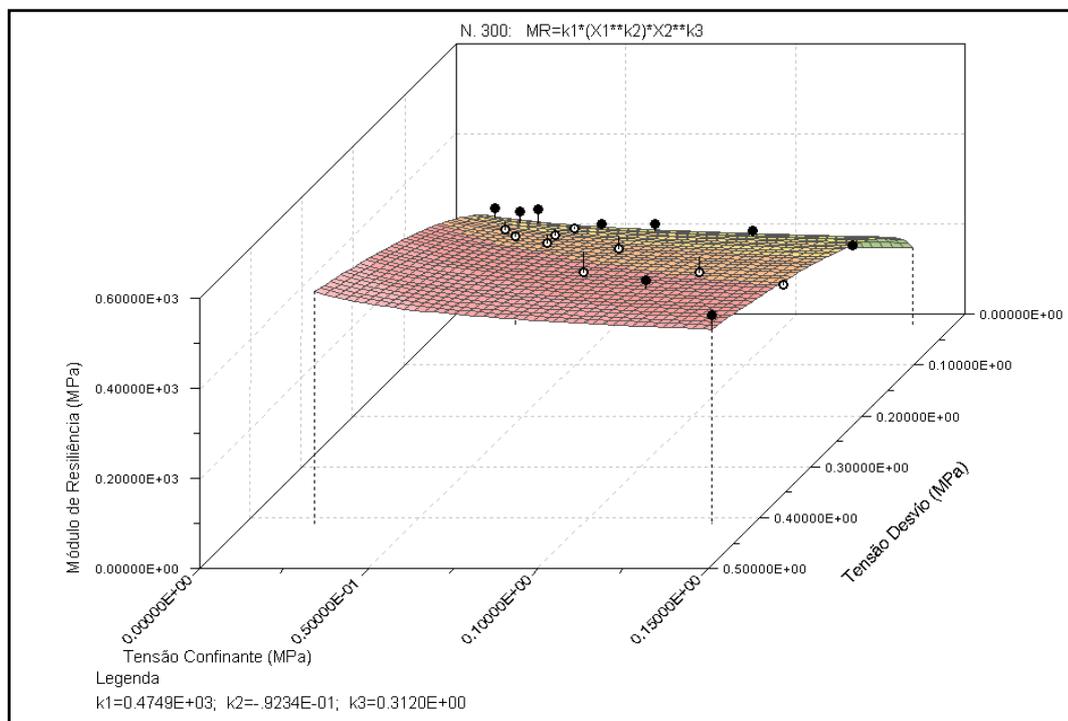


Figura B26 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A06.

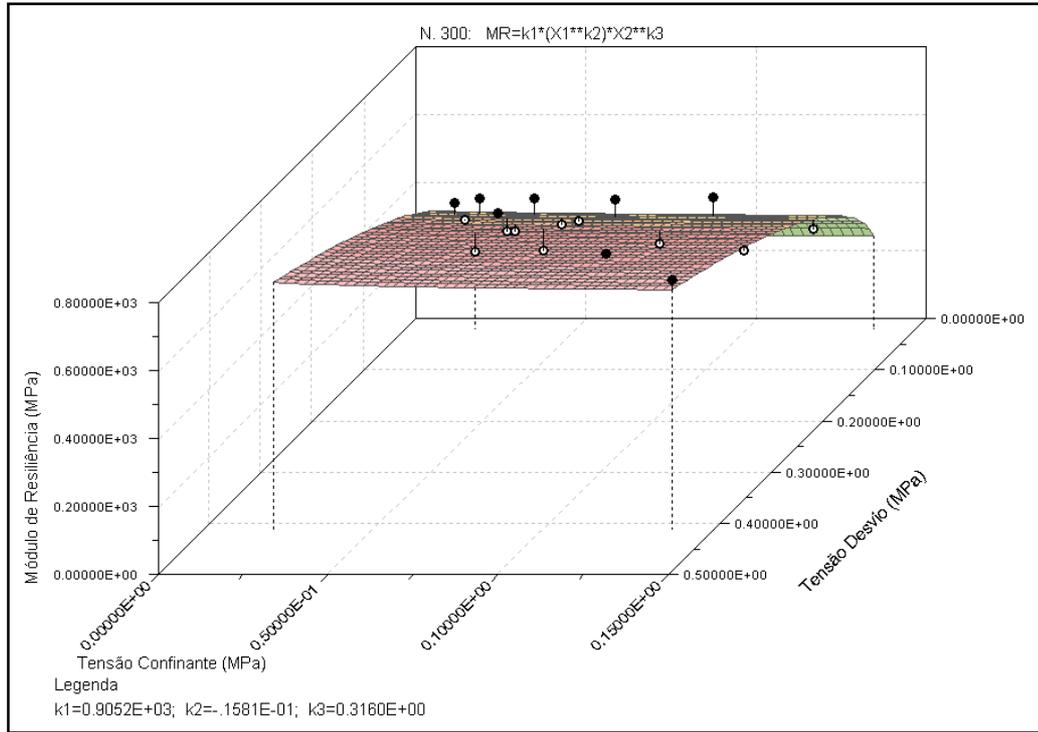


Figura B27 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A07.

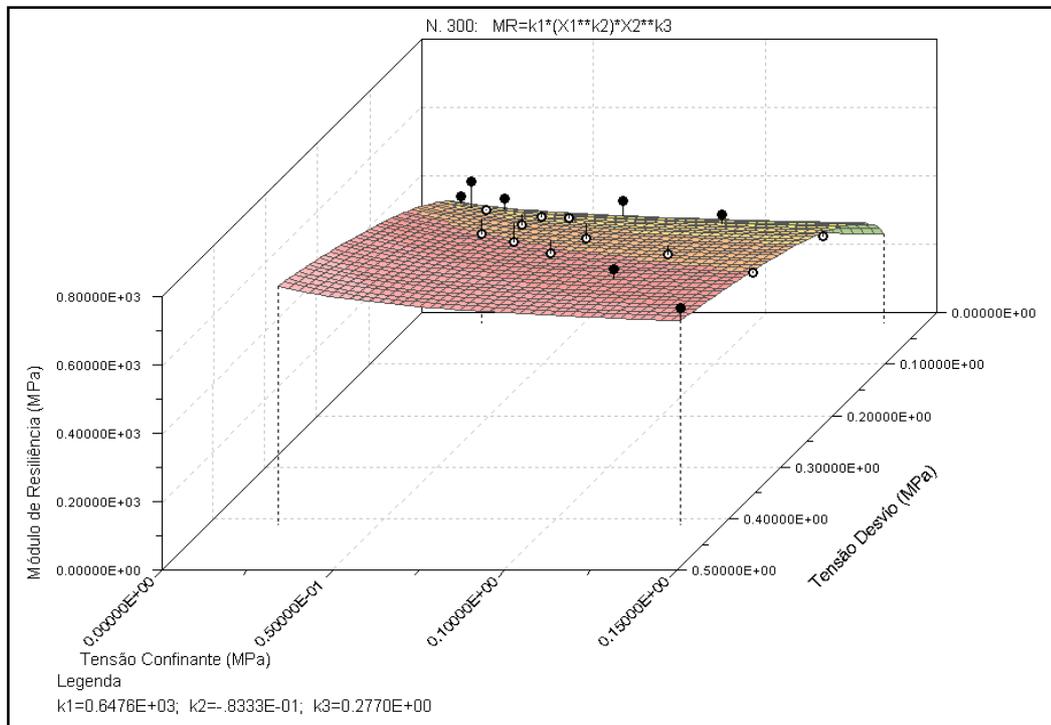


Figura B28 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A08.

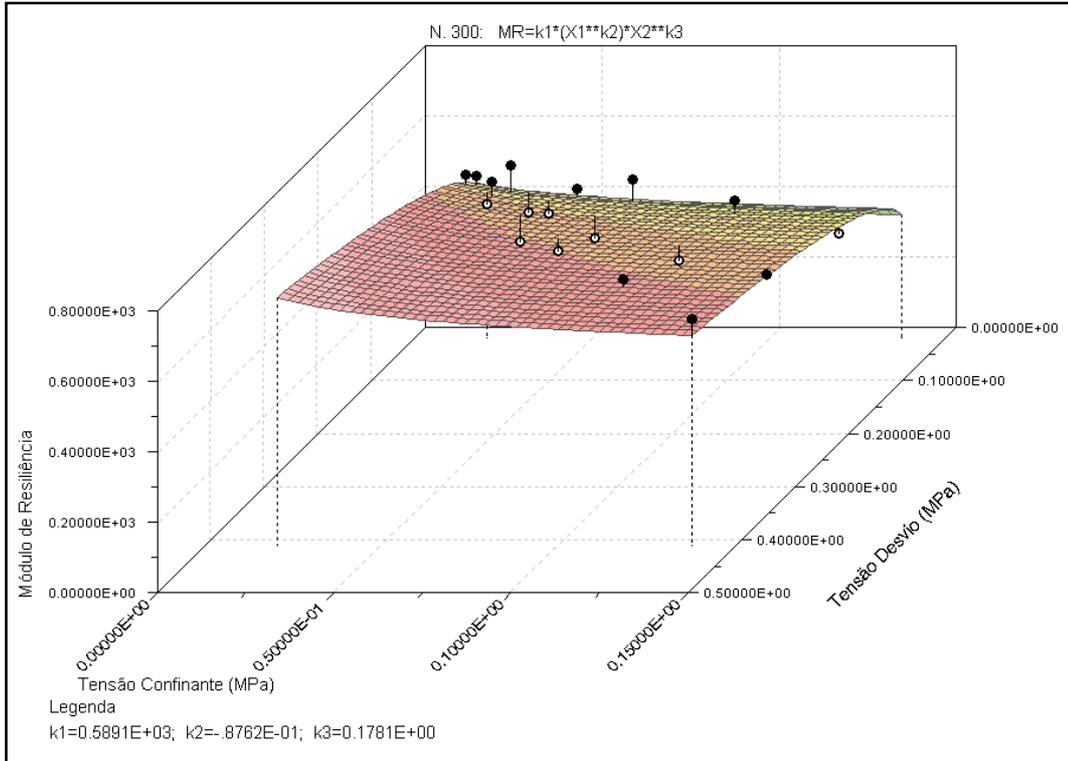


Figura B29 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A09.

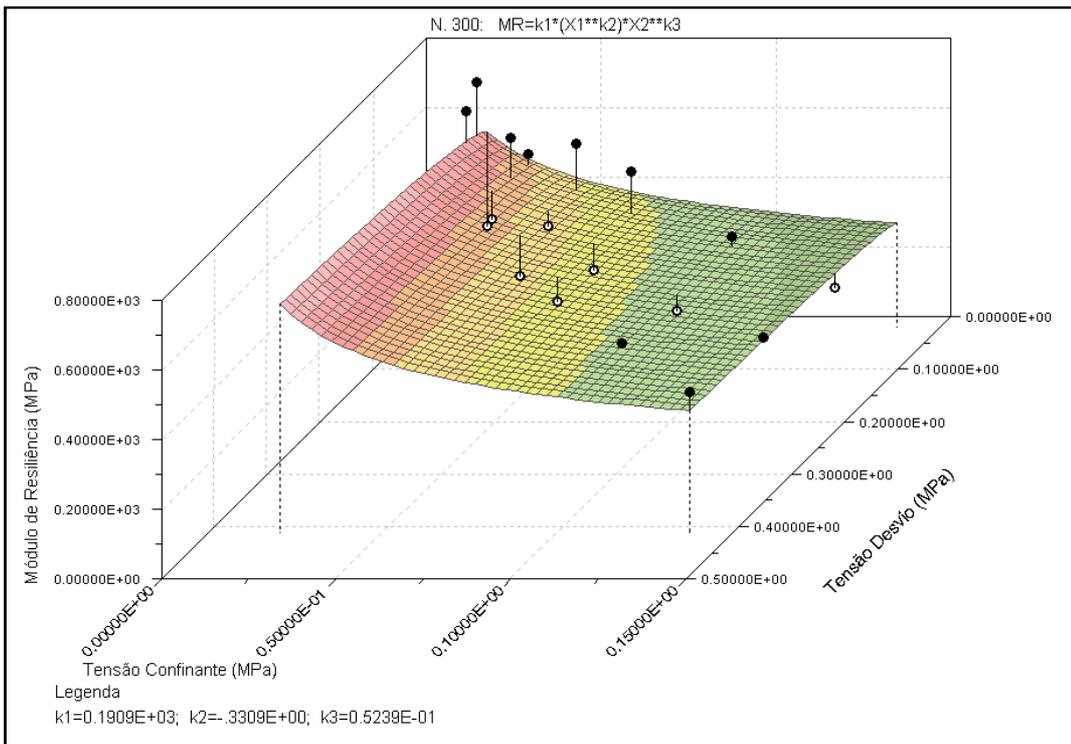


Figura B30 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A10.

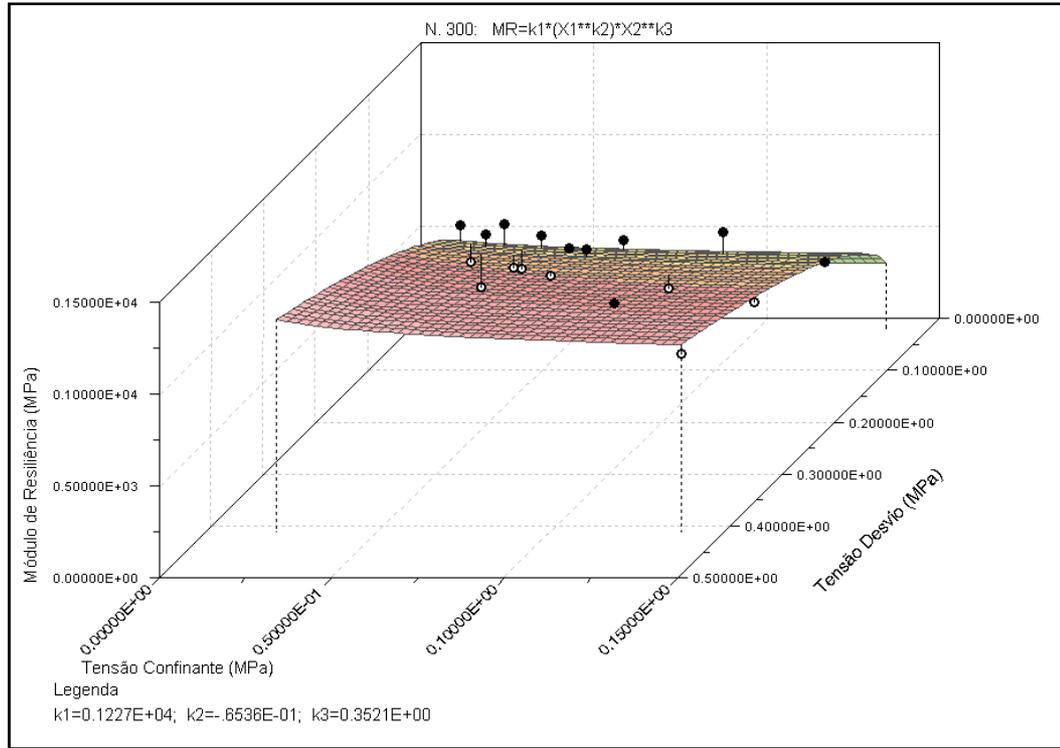


Figura B31 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A11.

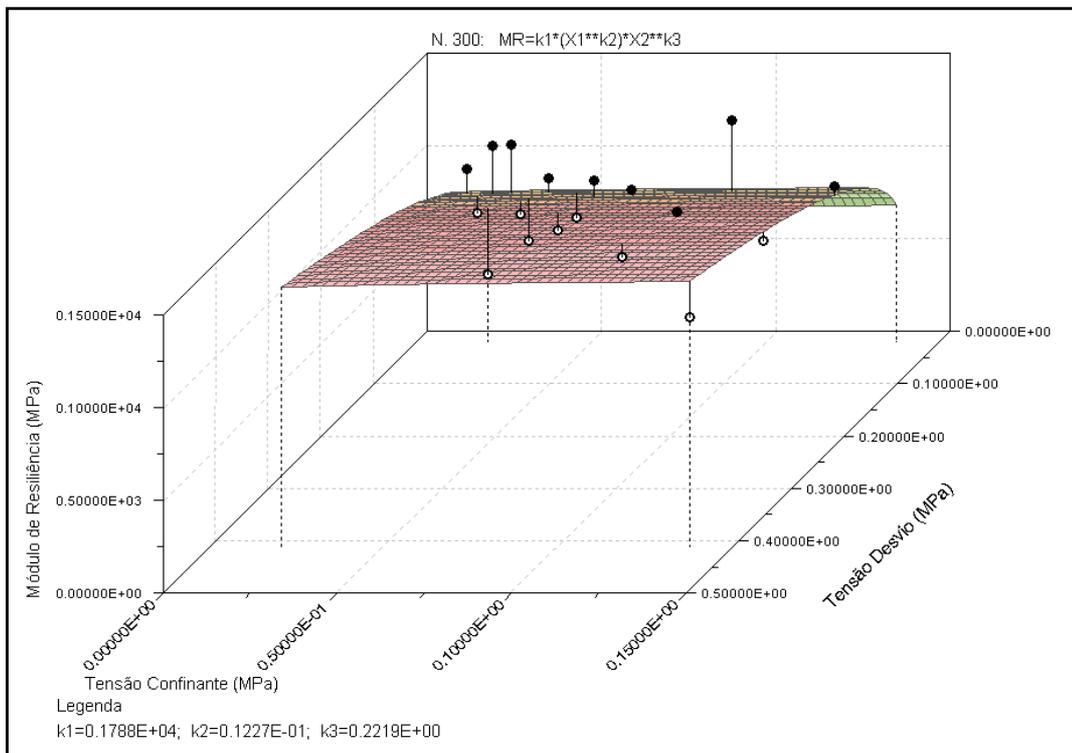


Figura B32 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A12.

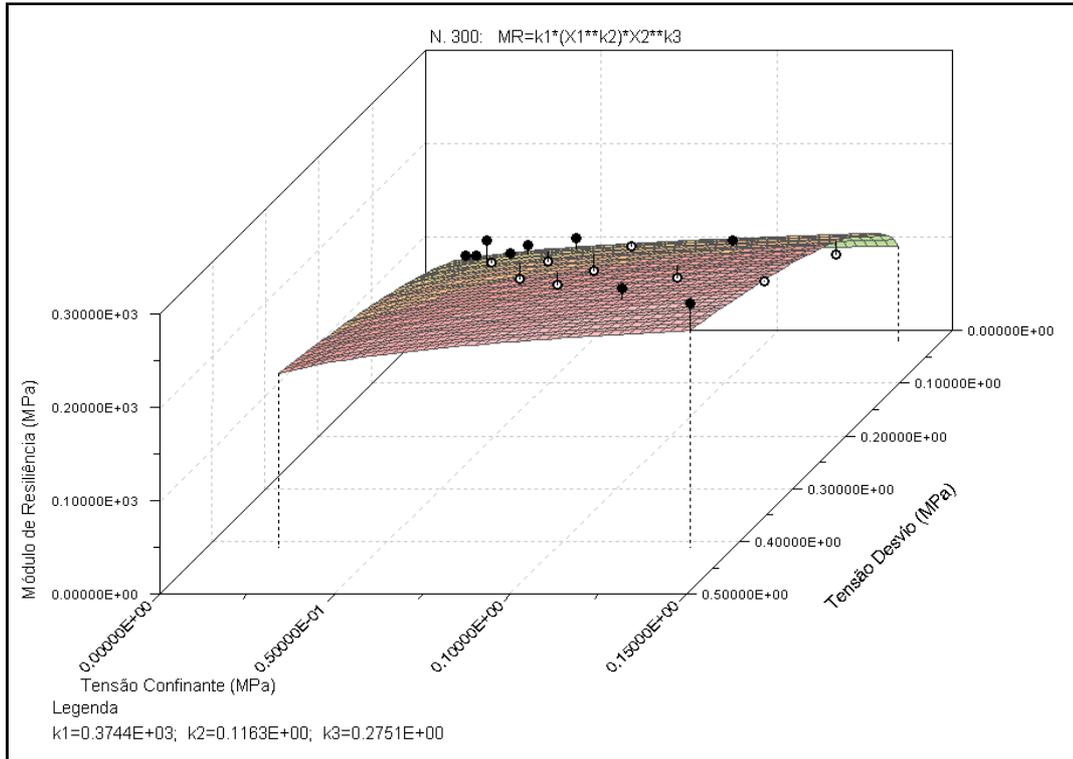


Figura B33 –Tensão desvio x Pressão confinante x MR A13.

