



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

KÁTIA REGINA MONTEIRO BARBOSA

**DEGRADAÇÃO DE GEOGRELHAS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS EXECUTADAS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)**

Recife, PE
2017



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

KÁTIA REGINA MONTEIRO BARBOSA

**DEGRADAÇÃO DE GEOGRELHAS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS EXECUTADAS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco, da Universidade de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Alexandre D. Gusmão
Co-orientador: Prof. Dr. Eder C. G. Santos

Recife, PE
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Universidade de Pernambuco – Recife

B228d

Barbosa, Kátia Regina Monteiro

Degradação de geogrelha em estradas não pavimentadas executadas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). / Kátia Regina Monteiro Barbosa. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2017.

121 f.: il.

Orientador: Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Co-Orientador: Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

1. Resíduos de Construção e Demolição 2. Estradas não pavimentadas 3. Reforço 4. Geogrelha 5. Danos mecânicos 6. Fator de redução. I. Engenharia civil - Dissertação II. Gusmão, Alexandre Duarte (orient.) III. Santos, Eder Carlos Guedes dos Santos (co-orient.) IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título

CDD: 690.0286

KÁTIA REGINA MONTEIRO BARBOSA

**DEGRADAÇÃO DE GEOTRELHAS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS EXECUTADAS COM RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador:



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco

Co-orientador:



Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos
Universidade Federal de Goiás

Examinadores:



Prof. Dr. Béda Barkokébas Junior
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Jefferson Lins da Silva
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Alexandre Gusmão, pela disponibilidade de tempo, sugestões e por toda ajuda oferecida à minha pesquisa. Ao meu co-orientador, Eder Santos, pelo apoio, exigências e comprometimento, que apesar de todas as mudanças formais que ocorreram durante o desenvolver deste trabalho não prejudicou a sua conclusão. Gostaria de agradecê-los, principalmente, pela confiança a mim investida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado durante todo o período de realização deste trabalho.

À empresa Ciclo Ambiental, por sua importante contribuição ao fornecer os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) utilizados na pesquisa, disponibilizar um espaço para construção dos trechos experimentais de estradas não pavimentadas, e por todo esforço e dedicação de sua equipe.

À empresa Huesker, por doar as geogrelhas utilizadas na pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela contribuição em minha formação profissional, e a seus funcionários, em especial à secretária Lúcia Rosani e ao técnico laboratorial Fábio Ferreira, que sempre disponibilizaram seu tempo e orientações.

Ao professor Jefferson da Silva, da Universidade de São Paulo, e a equipe do Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), pelo apoio na execução dos ensaios de tração nas amostras de geogrelhas.

Aos meus colegas e amigos do mestrado, pelo apoio mútuo e pela troca de conhecimentos e experiências, em especial à Eudes Rocha, Victor Lima, Osvaldo Neto e Nara Almeida, que se dispuseram a ajudar-me nos ensaios e nas atividades do mestrado.

A Deus, por ter-me concedido à oportunidade de cursar e concluir este mestrado, e por dar-me toda paz e harmonia espiritual que preciso para viver cada dia.

À minha família e amigos, em especial, meus pais, Eliane Barbosa e Antônio Barbosa, e a Tiago Silva e Danilo Barbosa que são partes importantes para conclusão desse trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são apontados como causadores de diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Apesar dos avanços observados na última década, o Brasil ainda sofre com a pouca capacidade de reciclagem desses resíduos. Por outro lado, muitas das estradas não pavimentadas do país passam por locais onde há subsolos compostos por solos de baixa capacidade de suporte, o que, somado à falta de um suporte técnico para o dimensionamento desse tipo de via e de manutenções periódicas, acaba inviabilizando ou comprometendo a sua funcionalidade. Estudos anteriores têm mostrado as vantagens técnicas e econômicas que o emprego dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e o reforço de geogrelha oferecem no aumento do número de ciclos suportados, condições de rolamento e durabilidade dessas vias. Nesse contexto, a utilização dos RCD-R em obras de estradas não pavimentadas reforçadas com geogrelha apresenta-se como uma interessante alternativa devido ao alto potencial de reciclagem desses materiais e pela numerosa demanda dessas vias no país. No entanto, tendo em vista a variabilidade regional das características físicas e químicas dos RCD-R, o uso de desses materiais pode gerar danos às geogrelhas, fazendo-se primordial investigar a degradação desses elementos de reforço. Diante disso, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a resistência de dois tipos de geogrelhas – poliéster (PET) e polipropileno (PP) – aos danos mecânicos e químicos causados pelo contato com RCD-R. Para isso, foram construídos trechos experimentais de estrada não pavimentada reforçada, onde as amostras de geogrelha foram submetidas a três cenários de interesse: i) danos de instalação; ii) danos de instalação e carregamentos cíclicos – causados pelo trânsito de caminhões; e iii) danos químicos. A caracterização do efeito dos danos no comportamento mecânico das geogrelhas foi estudada por meio de ensaios de tração – ensaios de curto prazo – e cálculo dos fatores de redução de resistência. Os resultados mostram que os RCD-R podem ser reciclados por meio de um tratamento simples (triagem e britagem), para criar um material com uma baixa energia incorporada, e apresentaram excelentes valores de parâmetros geotécnicos e baixa variabilidade. Foram verificados fatores de danos em amostras exumadas nos três cenários investigados – com maior severidade durante o carregamento cíclico – e correlacionado com o tipo de material empregado. Dessa forma, considerando esses fatores na concepção de projetos de estradas não pavimentadas construídas com RCD-R, pode-se estimular o desenvolvimento sustentável, aumentar as taxas de reciclagem de RCD no país e prover à sociedade estradas com melhores condições de operação.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição (RCD), Estradas não pavimentadas, Reforço, Geogrelha, Danos mecânicos e químicos, Fator de redução.

ABSTRACT

Construction and demolition wastes (CDW) can cause various environmental, social and economic impacts. Despite the advances observed in the last decade, Brazil still suffers from the scarce recycling capacity of these kind of wastes. On the other hand, many of the unpaved roads of the country pass through places where there are subsoil composed of low load capacity soils, which, added to the lack of technical support for the design of this type of road and periodic maintenance, making it unfeasible or compromising its functionality. Previous studies have shown the technical and economic advantages that the use of recycled construction and demolition waste (R-CDW) and geogrid reinforcement offer in increasing the number of supported cycles, bearing conditions and durability of these roads. In this context, the use of R-CDW in unpaved road works reinforced with geogrid appears as an interesting alternative due to the high recycling potential of these materials and the large demand for these roads in the country. However, in view of the regional variability of the physical and chemical characteristics of the RCD-R, the use of these materials can generate geogrids damages, making it fundamental to investigate the degradation of these reinforcement elements. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the resistance of two types of geogrids - polyester (PET) and polypropylene (PP) - to the mechanical and chemical damages caused by contact with R-CDW. For this purpose, an experimental road section was constructed in order to submit geogrid specimens to three scenarios of interest: i) installation damage; (ii) installation damage and cyclic loading - caused by truck traffic; and iii) chemical damage. The characterization of the effect of the damages on the mechanical behavior of the geogrids was studied through tensile tests - short term tests - and calculation of reduction factors. The results have shown that the non-selected CDW can be recycled using a simple treatment (sorting and crushing process) with low incorporated energy and can be used as an alternative to natural aggregates in geogrid-reinforced unpaved roads. Damage factors were observed for samples exhumed from the three scenarios investigated - with greater severity during cyclic loading - and they can be correlated with the type of material used. Considering these damage factors in the project design, it would be possible to stimulate sustainable development, increase CDW recycling rates in the country and provide roads to the society with better operating conditions.

Keywords: Construction and Demolition Waste (CDW), Unpaved road, Reinforcement, Geosynthetic, Geogrid, Mechanical and chemical damages, Reduction factor.

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Official</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
APAC	Agência Pernambucana de Água e Clima
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
C_u	coeficiente de uniformidade
CC	coeficiente de curvatura
CBR	<i>California bearing ratio</i>
CMT	capacidade máxima de tração
CV	coeficiente de variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESRS	eixo simples rodado simples
ESRD	eixo simples rodado duplo
ETD	eixo tandem duplo
ETT	eixo tandem triplo
FEC	fator de equivalência de carga
FV	fator de veículo
G_c	grau de compactação
w	teor de umidade
w_{ot}	teor de umidade ótimo
ICC	Indústria da Construção Civil
IDp	índice de degradação após compactação Proctor
n	número de amostras
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	polietileno de alta densidade
PBT	peso bruto total
PBTC	peso bruto total combinado
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos
PET	Poliéster
PGRCC	Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
pH	potencial hidrogeniônico

PIGRCC	Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PVC	policloreto de vinila
RCD	resíduo de construção e demolição
RCD-R	resíduo de construção e demolição reciclado
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	resíduo sólido urbano
s	desvio padrão amostral
t	variável aleatória da Distribuição de Student
\bar{X}	média amostral
μ	média populacional
γ	peso específico
$\gamma d_{máx}$	peso específico máximo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Total de RCD coletado por mil toneladas por ano.	24
Figura 2 – Logística reversa na construção civil.	28
Figura 3 – Trecho experimental de estrada não pavimentada.	30
Figura 4 – Seção do trecho experimental de estrada não pavimentada.	30
Figura 5 – Efeito da energia de compactação na curva granulométrica.	32
Figura 6 – Efeito da energia de compactação (Proctor Normal) na curva granulométrica.	32
Figura 7 – Rede rodoviária nacional – por tipo de superfície.	34
Figura 8 – Rede rodoviária nacional não pavimentada – por jurisdição.	34
Figura 9 – Trilha de rodas na estrada.	35
Figura 10 – Formação de buracos na estrada.	36
Figura 11 – Excesso de pó na estrada.	36
Figura 12 – Ondulações na estrada.	37
Figura 13 – Tipo de eixos de veículos brasileiros.	38
Figura 14 – Principais funções desempenhadas pelos geossintéticos: (a) drenagem; (b) filtragem; (c) proteção; (d) reforço; (e) separação; (f) controle de erosão superficial; (g) barreira de fluidos.	41
Figura 15 – Tipos de geogrelhas.	42
Figura 16 – Função do reforço de geogrelhas em estradas não pavimenta:	43
Figura 17 – Geogrelha e geotêxtil utilizados nos ensaios.	45
Figura 18 – Equipamento utilizado nos ensaios.	45
Figura 19 – Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.	46
Figura 20 – Disposição da instrumentação do ensaio.	46
Figura 21 – Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.	47
Figura 22 – Teste de estradas não pavimentadas em escala real.	48
Figura 23 – Trecho de estradas não pavimentadas.	49
Figura 24 – Perfil das seções transversais para trecho sem reforço.	49
Figura 25 – Perfil das seções transversais para geogrelhas biaxiais.	49
Figura 26 – Trecho de estradas não pavimentadas.	50
Figura 27 – Sulco formado após um mês de controle.	50
Figura 28 – Esquema da dependência do tempo de resistência à tração.	51
Figura 29 – Teste de instalação em campo em grande escala.	54
Figura 30 – Compactação com rolo vibratório.	54

Figura 31 – Equipamento utilizado para testes laboratoriais de danos mecânicos.....	55
Figura 32 – Ensaio de tração em amostras danificadas mecanicamente.	55
Figura 33 – Reação de despolimerização do polietileno tereftalato por hidrólise.....	57
Figura 34 – Caixa utilizada para reprodução do dano mecânico.....	59
Figura 35 – Exumação de amostras enterradas por um período de 15 meses.	59
Figura 36 – Colocação manual do RCD-R sobre o geossintético.	60
Figura 37 – Compactação da camada superior.....	60
Figura 38 – Comparação entre as curvas de tensões de geogrelhas virgens e exumados.	60
Figura 39 – Equipamento utilizado para a britagem do RCD.	62
Figura 40 – RCD-R misto.....	62
Figura 41 – Coleta da amostra de RCD-R na pilha.	63
Figura 42 – Secagem da amostra ao ar.	63
Figura 43 – Acondicionamento das amostras em sacos plásticos após o quarteamento.	63
Figura 44 – Geogrelha de PET.	64
Figura 45 – Geogrelha de PP.....	64
Figura 46 – Planta baixa do trecho experimental de estradas não pavimentadas.....	66
Figura 47 – Seção do trecho experimental de estradas não pavimentadas.....	67
Figura 48 – Escavação do trecho experimental 01.....	68
Figura 49 – Compactação do subleito e regularização da superfície com escavadeira (trecho 01).....	68
Figura 50 – Compactação do subleito com placa vibratória (trecho 01)	68
Figura 51 – Compactação do subleito com rolo compactador (trecho 02).....	68
Figura 52 – Espalhamento do RCD-R na camada base.....	69
Figura 53 – Compactação e regularização da superfície da camada de base com escavadeira (trecho 01).....	69
Figura 54 – Compactação da camada de base com placa vibratória (trecho 01)	69
Figura 55 – Compactação da camada de base com rolo compactador (trecho 02).	69
Figura 56 – Corpos de prova de geogrelha dispostos (trecho 01).	70
Figura 57 – Corpos de prova de geogrelha dispostos (trecho 02).	70
Figura 58 – Lançamento do RCD-R.....	70
Figura 59 – Espalhamento manual do RCD-R da camada superior.....	70
Figura 60 – Coleta da amostra de RCD-R.....	71
Figura 61 – Compactação e regularização da superfície da camada superior com escavadeira (trecho 01).....	71

Figura 62 – Compactação da camada superior com placa vibratória (trecho 01) .	71
Figura 63 – Compactação da camada superior com rolo compactador (trecho 02).	71
Figura 64 – Determinação da massa específica.	72
Figura 65 – Determinação da umidade.	72
Figura 66 – Exumação das geogrelhas.	72
Figura 67 – Disposição dos corpos de provas de geogrelhas (trecho 03).	73
Figura 68 – Compactação da camada superior (trecho03).	73
Figura 69 – Tráfego de caminhões sobre o trecho experimental.	74
Figura 70 – Caminhão eixo simples rodas duplas.	74
Figura 71 – Caminhão tandem duplo.	74
Figura 72 – Ensaio de resistência à tração à faixa larga (EESC-USP).	76
Figura 73 – Curvas granulométricas obtidas para as amostras de RCD-R.	77
Figura 74 – Coeficientes de variação em função da dimensão dos grãos do RCD-R.	78
Figura 75 – Curvas de compactação das amostras de RCD-R.	80
Figura 76 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 01.	81
Figura 77 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 02.	82
Figura 78 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 03.	82
Figura 79 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 04.	83
Figura 80 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 05.	83
Figura 81 – Gráfico Pressão x Penetração.	85
Figura 82 – Ensaio de tração, geogrelha de poliéster PET (Virgem).	86
Figura 83 – Ensaio de tração, geogrelha de polipropileno PP (Virgem).	87
Figura 84 – Chuva no dia anterior ao carregamento.	89
Figura 85 – Trilha causada pela passagem de camilhões no trecho experimental 01.	89
Figura 86 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).	90
Figura 87 – Ensaio de tração (trecho01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).	91
Figura 88 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).	92
Figura 89 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).	93
Figura 90 - Trilha causada pela passagem de camilhões no trecho experimental 02.	95
Figura 91 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).	96

Figura 92 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).	97
Figura 93 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).	98
Figura 94 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).	99
Figura 95 – Nivelamento do terreno com pá-carregadeira.	100
Figura 96 – Adição de novo material de RCD-R	100
Figura 97 – Compactação com pá-carregadeira.	100
Figura 98 – Geogrelha de poliéster (PET) virgem e danificada (após deformação excessiva do trecho).	101
Figura 99 – Geogrelha de polipropileno (PP) virgem e danificada (após deformação excessiva do trecho).	102
Figura 100 – Perfil transversal aproximado da deformação verificada em campo e esforços de tração nos corpos de provas de geogrelhas.	102
Figura 101 – Variação de temperatura para o trecho experimental 03.	103
Figura 102 – Ensaio de tração (trecho 03), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e químico).	104
Figura 103 – Ensaio de tração (trecho 03), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e químico).	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos RCD de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002.	22
Tabela 2 – Quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil.	23
Tabela 3 – Índice de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Normal.	33
Tabela 4 – Severidade das trilhas de rodas.	35
Tabela 5 – Veículos adotados na classificação do DNIT.	39
Tabela 6 – Equações do FEC do DNER PRO 159/85.	40
Tabela 7 – Faixa de valores indicativos para os fatores de redução utilizáveis na fase de projeto básico.	52
Tabela 8 – Fatores de redução para geogrelhas biaxiais e uniaxiais.	54
Tabela 9 – Fatores de redução de geogrelhas de poliéster.	55
Tabela 10 – Fatores de redução de resistência da geogrelha a danos causados por RCD-R.	59
Tabela 11 – Plano de coleta realizado para o RCD-R.	62
Tabela 12 – Especificações técnicas da geogrelha de poliéster (PET).	64
Tabela 13 – Especificações técnicas da geogrelha de polipropileno (PP).	64
Tabela 14 – Quantidade de amostras de geogrelha.	67
Tabela 15 – Especificações técnicas da escavadeira.	73
Tabela 16 – Especificações técnicas da placa vibratória.	73
Tabela 17 – Especificações técnicas do rolo compactador.	73
Tabela 18 – Fatores de veículos DNER PRO 159/85 (AASHTO).	75
Tabela 19 – Participação média das frações de partículas na curva granulométrica média do RCD-R.	78
Tabela 20 – Resultados das características granulométricas do RCD-R.	79
Tabela 21 – Resultados do ensaio de massa específica dos sólidos.	80
Tabela 22 – Resultados do ensaio de compactação.	81
Tabela 23 – Índice de quebra após o ensaio de compactação (Proctor Normal).	84
Tabela 24 – Resultados do ensaio de CBR.	85
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de tração, geogrelha de poliéster PET (Virgem).	86
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de tração, geogrelha de polipropileno PP (Virgem).	87
Tabela 27 – Resultados do ensaio de massa específica aparente <i>in situ</i> (trecho01).	88
Tabela 28 – Fatores de veículos (trecho 01).	89

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).....	90
Tabela 30 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).....	91
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).....	92
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).....	93
Tabela 33 – Resultados do ensaio de massa específica aparente <i>in situ</i>	94
Tabela 34 – Fatores de veículos (trecho 02).....	95
Tabela 35 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).....	96
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).....	97
Tabela 37 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).....	98
Tabela 38 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).....	99
Tabela 39 – Fatores de veículos (trecho 02 após restauração).....	101
Tabela 40 – Precipitação durante para o trecho experimental 03.....	103
Tabela 41 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 03), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e químico).....	104
Tabela 42 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 03), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e químico).....	105
Tabela 43 – Resumo dos trechos experimentais executados.....	106
Tabela 44 – Resumo dos ensaios de tração isolada à faixa larga da geogrelha PET.....	106
Tabela 45 – Resumo dos ensaios de tração isolada à faixa larga da geogrelha PP.....	106
Tabela 46 – Fatores de redução de resistência para o dano mecânico decorrente do processo de instalação da geogrelha de PET.....	108
Tabela 47 – Fatores de redução de resistência para o dano mecânico decorrente do processo de instalação da geogrelha de PP.....	108
Tabela 48 – Fatores de redução de resistência para dano mecânico causado pelo carregamento cíclico, geogrelha PET.....	109
Tabela 49 – Fatores de redução de resistência para dano mecânico causado pelo carregamento cíclico na geogrelha de PP.....	109
Tabela 50 – Fatores de redução de resistência para dano químico das geogrelhas de PET e de PP.....	110

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	18
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivo geral.....	19
1.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura do documento.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD).....	21
2.1.1 Contextualização legal e normativa dos resíduos de construção e demolição (RCD)	25
2.1.2 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R).....	26
2.1.3 RCD-R em Pavimentação.....	29
2.2 Estradas não pavimentadas.....	33
2.2.1 Generalidades.....	33
2.2.2 Principais defeitos de estrada não pavimentada.....	35
2.2.3 Limites de carga.....	37
2.3 Estrutura de solo reforçado.....	41
2.3.1 Geossintéticos.....	41
2.3.2 Mecanismo de ação do reforço.....	42
2.3.3 Estradas não pavimentadas reforçada com geogrelhas.....	44
2.3.4 Ensaio em laboratório submetidos a carregamento cíclico.....	44
2.3.5 Estudos de campo em estradas não pavimentadas.....	48
2.4 Degradação das geogrelhas.....	50
2.4.1 Fatores de redução.....	50
2.4.2 Fluência em tração.....	53
2.4.3 Dano de instalação.....	53
2.4.4 Degradação ambiental.....	56
2.4.5 Degradação mecânica e química de geogrelhas causadas por RCD-R.....	58
CAPÍTULO III.....	61
3 METODOLOGIA.....	61

3.1	Materiais	61
3.1.1	Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)	61
3.1.2	Geogrelhas	63
3.2	Métodos adotados na caracterização do RCD-R	65
3.3	Descrição dos Trechos Experimentais	66
3.4	Descrição de fatores externos	74
3.5	Ensaio de tração à faixa larga	75
CAPÍTULO IV		77
4	RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES	77
4.1	Caracterização do RCD-R	77
4.1.1	Análise Granulométrica	77
4.1.2	Limites de Consistência	79
4.1.3	Massa específica dos sólidos	79
4.1.4	Compactação	80
4.1.5	Efeito da compactação na granulometria das amostras ensaiadas	81
4.1.6	Índice Suporte Califórnia	84
4.2	Análise dos danos mecânicos e químicos nas geogrelhas	85
4.2.1	Trecho experimental 01	88
4.2.2	Trecho experimental 02	94
4.2.3	Trecho experimental 03	103
4.2.4	Fatores de redução de resistência	106
CAPÍTULO V		111
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	111
5.1	Conclusões	111
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	113
REFERÊNCIAS		115

O presente capítulo apresenta um breve contexto sobre a questão dos resíduos de construção e demolição (RCD) na sociedade atual, assim como a importância e os problemas de conservação das estradas não pavimentadas no Brasil, a fim de dar o embasamento para a proposta do emprego de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em tais obras. O capítulo também expõe o objetivo geral, os específicos e a estrutura da dissertação.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento social e econômico de um país. Entretanto, essa indústria, considerando as suas diversas etapas, é responsável por mais de 50% dos resíduos produzidos nas grandes cidades (GUSMÃO, 2008) e pelo consumo de 20 a 50% de todos os recursos naturais consumidos pela sociedade (JOHN, 2000). A preocupação com os problemas ambientais, a constatação da finitude dos recursos do planeta e o reconhecimento de sua fragilidade têm impulsionado a adoção de medidas para mudar as posturas adotadas até então.

Apesar dos avanços observados na reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) na última década, através de legislações e normas sobre o tema, estima-se que o Brasil possui uma capacidade instalada para reciclar apenas 16% de todo o RCD gerado no país (MIRANDA, 2013). Esse cenário colabora para um quadro marcado pela deposição inadequada dos RCD nas cidades brasileiras. Pode-se afirmar que os RCD tornaram-se um sério problema não só para os administradores públicos, mas também para a sociedade como um todo (SANTOS, 2011). Dessa forma, a ICC tem o desafio de desenvolver o crescimento econômico do país e, ao mesmo tempo, estabelecer processos técnicos que retornem esses resíduos para o ciclo produtivo e, assim, possa promover o desenvolvimento sustentável no setor.

Enquanto isso, as estradas não pavimentadas, dotadas de grande importância para a economia da maioria dos países em desenvolvimento, encontram-se em condições de má conservação. Segundo Góngora (2011), muitas dessas vias passam por locais onde há solos compostos por solos de baixa capacidade de carga. Segundo a autora, a falta de suporte técnico para o dimensionamento dessas obras e a falta de manutenções acabam inviabilizando ou comprometendo a funcionalidade dessas estruturas. A técnica de utilizar geogrelha como

elemento de reforço de estradas não pavimentadas tem sido estudada por diversos autores e apresenta-se como uma alternativa para melhorar as condições de suporte e rolamento dessas vias (SUN *et al.*, 2015; MEKKAWY *et al.*, 2011; LATHA *et al.*, 2010; PALMEIRA; ANTUNES, 2010; WATTS *et al.*, 2004).

A proposta de utilizar resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em obras de estradas não pavimentadas destaca-se como uma interessante alternativa, uma vez que tais obras demandam uma grande quantidade de material e pela numerosa oferta de vias brasileira. Dessa forma, tal proposta poderia contribuir para: i) melhoria da infraestrutura do país; ii) aplicação de um considerável volume de RCD-R; e iii) auxiliar na preservação dos recursos naturais, dado que ela desestimularia a abertura de novas jazidas de matérias-primas para a construção civil.

No entanto, tendo em vista a variabilidade regional das características físicas e químicas dos RCD-R, o uso de desses materiais poderia gerar danos às geogrelhas decorrentes da presença de grãos de grandes dimensões e/ou angulares, materiais perfurantes e substâncias agressivas na sua composição. Dessa forma, para viabilizar a sua utilização, faz-se primordial investigar a degradação dos elementos de reforço devido a danos mecânicos e químicos causados por esses novos materiais de aterro. A partir disso, será possível definir os fatores de redução de resistência a serem considerados em projetos de estradas não pavimentadas reforçadas construídas com RCD-R.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem o objetivo principal estudar e avaliar a degradação de geogrelhas utilizadas como elementos de reforço de estradas não pavimentadas construídas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) como material de aterro.

1.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral deste trabalho, faz-se necessário a obtenção dos seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar, com enfoque geotécnico, as propriedades físicas dos RCD-R produzidos em uma usina de beneficiamento;

- Investigar os danos mecânicos (instalação e carregamento cíclico) e danos químicos (em amostras submetidas a danos de instalação) de geogrelhas empregadas em estradas não pavimentadas construídas com RCD-R como material de aterro;
- Determinar os fatores de redução de resistência de geogrelhas empregadas em estradas não pavimentadas construídas com RCD-R;
- Disponibilizar, para a comunidade acadêmica e técnica, uma base de referência para projetos futuros de estradas não pavimentadas utilizando o RCD-R como material de aterro, com a possibilidade de melhorar os seus procedimentos e reduzir os seus custos de execução; e
- Contribuir para introdução de uma postura que contemple o desenvolvimento sustentável no setor da Indústria da Construção Civil.

1.3 Estrutura do documento

A dissertação está dividida em cinco capítulos, dentre os quais o primeiro compreende uma breve introdução, justificativas do tema de pesquisa e o objetivo geral e os específicos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o tema da dissertação, descrevendo alguns aspectos de interesse sobre os RCD-R, o reforço de estradas não pavimentadas e a degradação de elementos de reforços.

O Capítulo 3 aborda os materiais e métodos empregados para realização dos ensaios de caracterização dos RCD-R e de tração das geogrelhas, assim como, os procedimentos utilizados para a realização dos trechos experimentais – de campo – de estradas não pavimentadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as análises dos ensaios realizados visando avaliar a degradação dos elementos de reforço quando utilizados o RCD-R como material de aterro.

O Capítulo 5 descreve as principais conclusões obtidas no estudo e apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os principais temas a respeito dos resíduos de construção e demolição (RCD) – contextualização, impactos socioambientais, geração e aspectos normativos –, bem como a questão da sua reciclagem no Brasil e em outros países. Em seguida, são explicados os benefícios do emprego desses resíduos reciclados na pavimentação, em especial em estradas não pavimentadas. Apresenta-se a importância das estradas não pavimentadas para o país, seus principais defeitos e o efeito de reforço obtido com a inclusão da geogrelha. Finalmente, são mostrados os aspectos que causam danos aos elementos de reforços e os cálculos para a determinação dos fatores de redução de resistência.

2.1 Resíduo de Construção e Demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são definidos, segundo a Resolução 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, p. 1) como sendo:

“[...] os 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 em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.”

Esses resíduos são classificados, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), como inertes (Classe II-B), por não possuírem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Apesar de classificados como inertes, quando depositados sem controle, podem ser focos para o depósito de outros tipos de resíduos, descaracterizando-os como inerte, e oferecendo, assim, condições favoráveis para proliferação de espécies de vetores patogênicos (SCHENEIDER, 2003). Além disso, alguns tipos de RCD podem possuir elementos perigosos, principalmente quando não é realizada uma segregação correta na sua fonte de geração, o que representa um risco potencial para o meio ambiente. O risco de lixiviação é maior em obras que possuam contato direto com a água da chuva, como é o caso de estradas

não pavimentadas, exigindo um controle das condições de operação ideais para viabilizar a aplicação desses materiais (JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

De acordo com a resolução CONAMA nº 307, os RCD podem ser classificados em quatro classes, de acordo com suas características, conforme é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos RCD de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002.

CLASSE	DEFINIÇÃO
A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, provenientes do processo de construção, demolição, reformas, reparos de pavimentação e outras obras e do processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto. Tais como: tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, argamassa, concreto, solos provenientes de terraplanagem, etc.
B	São resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação. *
D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleo e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. **

Fonte: Resolução CONAMA nº 307/2002. Onde: (*) Resolução CONAMA nº 431/2011 e (***) Resolução CONAMA nº 348/2004.

A geração de RCD é um processo inerente a todas as atividades da construção civil nas suas diversas fases. Nas etapas de construção acontece, muitas vezes, por desperdícios devido à adoção de técnicas rudimentares, incompatibilidade de projetos, falta de treinamento dos trabalhadores, etc. Embora essa geração esteja presente nas atividades de manutenção e reformas, é na etapa de demolição que acontece a maior quantidade de entulho gerado, principalmente quando não se adota processo racionalizado ou qualquer tipo de segregação (GUSMÃO, 2008). A quantidade gerada de RCD é proporcional ao grau de desenvolvimento de cada cidade, o que torna os problemas de gestão e impactos ambientais mais intensificados nas principais regiões metropolitanas do país (SCHENEIDER, 2003), onde vivem 45,7% da população brasileira – cerca de noventa e quatro milhões de habitantes (IBGE, 2016).

Segundo Pinto (1999), o Brasil possuía uma produção média anual de RCD de 500 kg/hab. Em 2015, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) revelou que foi recolhido cerca de 45 milhões de toneladas de RCD no país, o

que representou, aproximadamente, 62% dos 72,5 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados em 90,8% dos municípios que fazem algum tipo de coleta pública. Os valores de RCD coletados por região com os seus respectivos índices de geração são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil.

REGIÃO	POPULAÇÃO (hab.)	RCD COLETADO (t/dia)	ÍNDICE (kg/hab/ano)
NORTE	17.472.636	4.736	98,92
NORDESTE	56.560.081	24.310	156,95
CENTRO-OESTE	15.442.232	13.916	328,87
SUDESTE	85.745.520	64.097	273,02
SUL	29.230.180	16.662	208,05
BRASIL	204.450.649	123.721	220,83

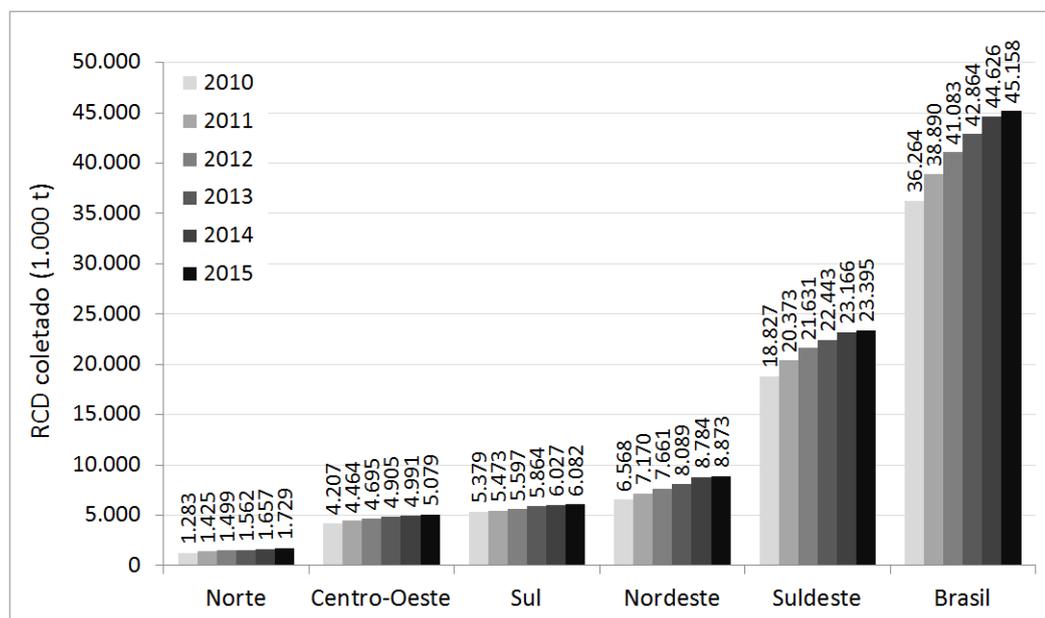
Fonte: modificado da ABRELPE (2015).

No entanto, a produção média anual de aproximadamente 220 kg/hab não representa o total de geração de RCD no país. Neste contexto, pode-se obter valores bem maiores, visto que a ABRELPE contabilizou apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos, não incluindo os RCD coletados por serviços privados, os quais constituem grande parte do volume total gerado no país.

Esses resíduos dispostos de forma irregular geram impactos ambientais causados pela: i) poluição do solo; ii) deterioração da paisagem urbana; iii) comprometimento do tráfego de pedestres e veículos; iv) danificação da drenagem urbana; e v) ameaça à saúde pública. Essa prática acontece devido a uma lógica econômica que visa apenas à redução de custos por parte dos transportadores privados com a mera remoção dos RCD sem o devido controle e fiscalização (SCHNEIDER, 2003).

O crescimento da coleta de RCD nos últimos anos no país é apresentado na Figura 1. Observa-se que em 2011 houve um crescimento de 7,2% da massa de RCD coletada em relação ao ano de 2010; entretanto, em 2015 o crescimento foi 1,2% em relação ao ano de 2014. Com isso, percebe-se uma tendência de redução da quantidade coletada de RCD lançados em logradouros públicos ano após ano.

Figura 1 – Total de RCD coletado por mil toneladas por ano.



Fonte: Adaptado pela autora, dados da ABRELPE (2010 a 2015).

A composição dos RCD está diretamente relacionada às características da atividade presente na sua fonte geradora (construção, reformas ou ampliações e demolições) e do momento de coleta das amostras. Diferenças podem ser observadas entre países, estados, cidades, ou até mesmo entre bairros, caracterizando-o como um resíduo extremamente heterogêneo. Segundo Carneiro (2005), os principais aspectos que interferem na quantidade, composição e características desse resíduo são: i) o nível de desenvolvimento industrial; ii) os tipos de materiais predominantes e/ou disponíveis na região; iii) a ocasião de construção de obras especiais; iv) o desenvolvimento econômico da região; e v) a demanda por novas construções.

A Região Metropolitana do Recife (RMR) é caracterizada por possuir um RCD composto predominantemente por argamassa, solo, cerâmica vermelha, concreto, brita, areia e pedregulho – tais materiais representam 91% da massa total. Sua principal fonte geradora é a construção de prédios multipisos, o que representa 57% do total observado. Dentro do processo de construção, a composição do RCD vai depender da fase construtiva com maior geração de: i) solo (72%), na fundação; ii) concreto (53%), na execução da estrutura do edifício; iii) alvenaria (79%), na realização de serviços de alvenaria; e iv) argamassa (52%), na fase de acabamento (CARNEIRO, 2005).

Segundo Santos (2007), a Indústria da Construção Civil (ICC) ainda demonstra uma característica bastante peculiar, guardando fortes traços artesanais, o que contribui para uma

elevada geração de resíduos. Outra forma de geração de RCD são os desastres naturais e as guerras, que, por sua vez, é caracterizada pelo grande volume de RCD gerado em um curto intervalo de tempo, o que exige que as autoridades adotem medidas para solucionar esse problema através do desenvolvimento de tecnologias voltadas para a reciclagem dos RCD.

2.1.1 Contextualização legal e normativa dos resíduos de construção e demolição (RCD)

No Brasil, a principal mudança legal referente aos RCD ocorreu por meio da publicação da Resolução CONAMA nº 307/2002. Tal resolução foi publicada com o objetivo de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil dispostos em locais inadequados e pela parcela significativa que esses representam nos resíduos sólidos produzidos em áreas urbanas. Após tal publicação, os municípios e o Distrito Federal deveriam elaborar o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PIGRCC), em concordância com o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, por meio da elaboração de Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC).

Com isso, os geradores passaram a serem responsáveis pelos RCD produzidos, não podendo mais dispô-los em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota-fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei (CONAMA, 2002). A partir disso, foi adotado o princípio do poluidor-pagador, o qual prevê que as empresas geradoras são responsáveis pelos seus impactos ao meio ambiente e as empresas transportadoras ou coletoras também podem ser consideradas como coautores de crimes ambientais. Nos últimos anos, a resolução CONAMA sofreu algumas alterações, por meio das Resoluções nº 348/2004, nº 431/2011 e nº 448/2012.

Em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.305, conhecida como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tendo a sua última regulamentação ocorrida por meio do Decreto Presidencial nº 7.404. A PNRS dispõe diretrizes sobre a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos e a obrigatoriedade da implantação de sistemas de logística reversa, a qual consiste em “[...] ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010b, p. 2).

No âmbito do estado de Pernambuco, a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) foi instituída anteriormente à PNRS, em 2001, pela Lei nº 12.008. No âmbito do município do Recife-PE, foi elaborado o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) por meio da Lei 17.072, no ano de 2005. A partir de então, toda atividade geradora de resíduos executada por “grandes geradores” – definidos como os geradores cujos volumes de RCD são superiores ou iguais a 1m³/dia – deve obter licença de operação, submetida à aprovação do órgão gestor da limpeza urbana do município, tendo como objetivo estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e a destinação finais ambientalmente adequadas. Segundo a legislação, o município do Recife-PE tornou-se responsável pela coleta dos resíduos produzidos pelos “pequenos geradores” – os geradores de volumes inferiores a 1m³/dia.

Em 2004, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) revisou a NBR 10.004 (ABNT, 1987a) referentes aos resíduos sólidos, e publicou cinco normas relativas ao tratamento e aplicação dos RCD, atentando para a Resolução CONAMA nº 307:

- NBR 15112/04 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Área de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113/04 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114/04 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115/04 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos; e
- NBR 15116/04 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

2.1.2 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)

A intensa geração do RCD e a falta de políticas municipais eficientes sobre esse tema agravam os problemas relacionados à coleta, ao transporte e à destinação adequada desses resíduos. O RCD tem um potencial de reciclagem de 90% de sua massa sobre forma de agregado, podendo-se utilizar solo, argamassa, cerâmica vermelha, concreto, brita, areia e pedregulho (GUSMÃO, 2008).

A reciclagem do RCD não é uma solução apenas sustentável, mas também econômica. Uma vez que o agregado derivado do RCD possui um grande potencial de utilização e pode substituir o agregado natural e continuar rentável mesmo quando requer uma adição de cimento. Na Inglaterra, a deposição desses resíduos em aterro sanitário é bastante onerosa devido aos altos impostos britânicos, o que incentivou as empresas locais a investirem em novas instalações de reciclagens na última década (SOUTSOS; FULTON, 2015). Em Hong Kong, é proibida a eliminação desses resíduos em aterros sanitários; mesmo assim, a crescente taxa de geração de RCD na cidade pode causar uma crise de falta de espaço dentro de alguns anos. Diante desse cenário, o governo da cidade tem investido em estratégias a fim de reduzir, reutilizar e reciclar esses resíduos de uma forma mais eficiente (YEUNG, 2008).

O Reino Unido conseguiu alcançar uma taxa de reciclagem de mais de 90% através do desenvolvimento de sistemas e metodologias; entretanto ainda existe uma lacuna de comunicação entre os setores de demolição e construção e pouca aceitação desses materiais (BJERREGAARD, 2008). Portugal, por outro lado, tem obtido taxas de reciclagens inferiores a 40%. No entanto, em 2011, sancionou uma lei que passou a obrigar as obras públicas a absorvem pelo menos 5% de materiais reciclados – desde que seja tecnicamente viável – a fim de aumentar essas taxas de reciclagem no país (DURÃO *et al.*, 2014).

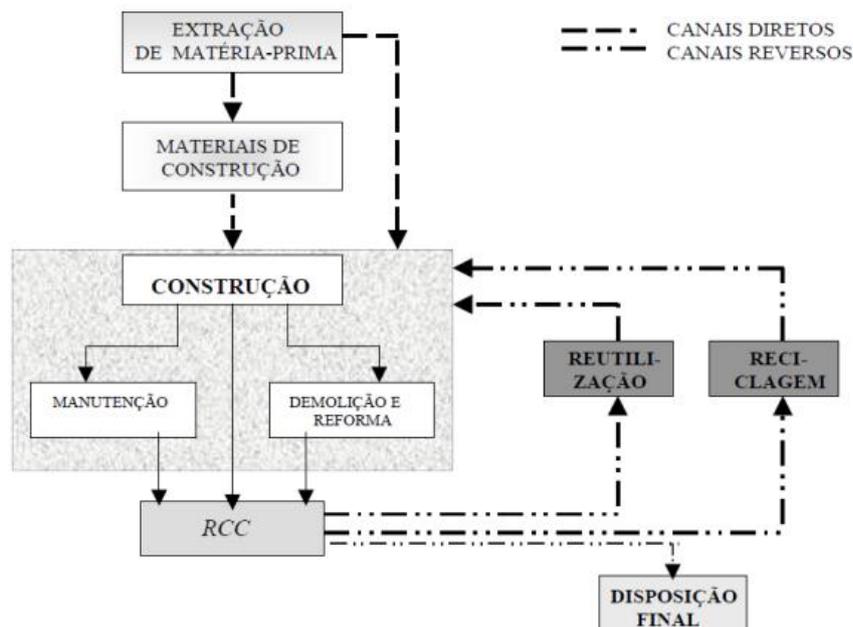
No Brasil, 94,5% dos RCD coletados estão sendo destinados a lixões, aterros controlados ou aterros sanitários juntamente com os resíduos sólidos urbanos (RSU) (NUNES *et al.*, 2009), práticas muito distantes das exigências da resolução nº 307/2002 do CONAMA. O país ainda sofre com a baixa capacidade de reciclagem dos RCD. As usinas brasileiras estão operando na faixa de 47% da sua capacidade máxima, o que representa um potencial de reciclagem de apenas 16% de todo o RCD gerado por ano, considerando as 310 usinas existentes no país.

Atualmente, ainda existe um percentual significativo (43,9%) de usinas de reciclagem brasileiras que consideram a situação atual de comercialização dos RCD-R como ‘ruim’. Para incentivar a reciclagem no país, faz-se fundamental uma maior iniciativa pública, exigindo o uso prioritário desses materiais nos editais de licitação, uma maior fiscalização do destino final dos RCD de pequenas e grandes obras, e a redução de impostos para agregados reciclados (MIRANDA, 2013).

Neste contexto, é importante difundir o conceito de logística reversa dentro da ICC. Segundo Nunes (2009), uma rede de logística reversa na ICC precisa estabelecer níveis de integração e definir: i) um mercado final para o produto processado, ii) localização dos centros de

recebimento e processamento dos RCD e iii) um sistema de monitoramento. A Figura 2 ilustra os canais de distribuição diretos e reverso que fluem em direção ao ciclo produtivo da construção. Entretanto, a autora evidencia que o ciclo dos canais reversos não é fechado, isso devido aos limites de beneficiamento e à viabilidade técnica-econômica desses materiais. Dessa forma, no final do ciclo, esses resíduos seriam encaminhados para aterros, aterros de inertes ou incinerados (NUNES, 2009).

Figura 2 – Logística reversa na construção civil.



Fonte: Nunes (2009).

Neste contexto, a utilização de resíduos de construção e demolião reciclados (RCD-R) apresenta-se como um importante meio de recuperar de 37% a 42% da energia incorporada de uma edificação (THORMARK, 2002). Dentre as vantagens da adoção do conceito da logística reversa na construção civil, pode-se destacar a redução: i) da quantidade de resíduos gerados, e, conseqüentemente, a exaustão de aterros sanitários; ii) do esgotamento de recursos naturais; iii) do consumo de energia; e iv) da emissão de gás carbono. Dentre os principais obstáculos para a falta de difusão da logística reversa na ICC pode-se destacar: i) o alto custo inicial, principalmente pela exigência de uma mão de obra especializada; ii) os esforços para execução de um planejamento contínuo; e iii) a falta de incentivos governamentais. Uma vez ignorados os impactos ambientais gerados pelos RCD, a sua destinação para aterros torna-se uma alternativa mais fácil e barata (HOSSEINI *et al.*, 2015).

2.1.3 RCD-R em Pavimentação

Atualmente, diversas pesquisas estão sendo realizadas com a finalidade de estudar a viabilidade técnica-econômica da substituição dos materiais naturais por materiais alternativos. Segundo Carneiro *et al.* (2001), a utilização do agregado reciclado em obras de pavimentação apresenta as seguintes vantagens:

- i) a possibilidade de utilização de uma quantidade significativa de material reciclado devido às grandes extensões desses tipos de obra;
- ii) a redução de custos de pavimentação, uma vez que estes materiais podem apresentar custos inferiores aos convencionais por simplicidade de processo;
- iii) os incentivos à difusão da reciclagem de RCD; e
- iv) a possibilidade de utilização de diversos tipos de resíduos (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.).

Dessa forma, o RCD-R apresenta-se como sendo um material sustentável bastante atraente para a área de pavimentação. Porém, vale salientar que algumas características desses materiais merecem destaques, como a maior absorção de água por parte dos agregados reciclados e por possuírem uma menor massa específica dos grãos quando comparados a agregados natural de mesmo tamanho, devido a sua maior porosidade o que requer uma maior adição de água na compactação, principalmente quando compostos por um maior percentual de materiais cerâmicos, altamente porosos, tais como: tijolos e telhas de telhado (AGRELA *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2011; MOTTA, 2005). Relativo à forma dos grãos, os agregados reciclados apresentam uma predominância de grãos cúbicos quando compostos por materiais cimentícios, e maior número de grãos lamelares nos materiais cerâmicos, características importantes para o arranjo dos grãos e do volume de vazios que esse material apresentará em campo, após a compactação (LEITE *et al.*, 2011; MOTTA, 2005).

Os agregados reciclados praticamente não apresentam expansão, com valores muito próximos à zero, característica importante para garantir a estabilidade da estrutura (VEGAS *et al.*, 2011; SANTOS, 2011; VEGAS *et al.*, 2008; LEITE, 2007; MOTTA, 2005). E possuem um aumento na capacidade de carga quando comparados aos agregados naturais decorrente da presença combinada do concreto e materiais cerâmicos e devido às atividades pozolânicas ou ao potencial hidráulico remanescente do cimento ou da argamassa (JIMÉNEZ *et al.*, 2012; VEGAS *et al.*, 2011; MOTTA, 2005);

Os agregados reciclados mistos são definidos pela NBR 15.116 (ABNT, 2004f, p. 3) como sendo aqueles “[...] obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à Classe A, composto, na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”. Os agregados selecionados possuem melhores características quando comparados aos agregados reciclados mistos não selecionados originados de entulho misto, apresentando menores teores de matéria orgânica e menor concentração de lascas de madeira e plásticos decorrentes da ausência de demolição seletiva (VEGAS *et al.*, 2008). Entretanto, a produção de agregado reciclado de alta qualidade requer um processo mais complexo de tratamento. A escolha por agregados reciclados mistos não selecionados utilizando um tratamento simples garante baixo consumo de energia e conseqüentemente baixa energia incorporada (JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

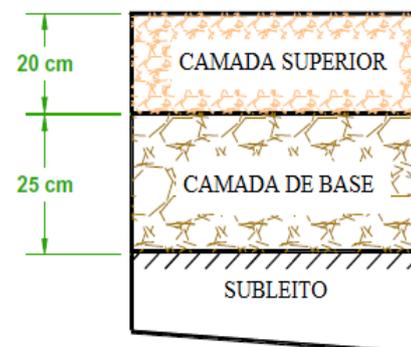
Jiménez *et al.* (2012) executaram um trecho experimental de estrada não pavimentada no sul da Córdoba, Espanha (Figura 3), com o objetivo de avaliar o desempenho e o impacto ambiental de um agregado reciclado de baixa qualidade – com baixa energia incorporada em um processamento que não selecionou o RCD – e identificar as diferenças entre os agregados reciclados e agregados naturais em condições de campo. A estrada foi dividida em duas seções de 100 m, uma constituída por agregado reciclado misto na camada superior e a outra por calcário esmagado. As duas seções apresentaram agregado natural na camada de base. O subleito tratou-se de um material composto de argila e cascalho, com nível do lençol freático muito profundo. As dimensões dos trechos experimentais são apresentadas na Figura 4.

Figura 3 – Trecho experimental de estrada não pavimentada.



Fonte: Jiménez *et al.* (2012).

Figura 4 – Seção do trecho experimental de estrada não pavimentada.



Fonte: modificado de Jiménez *et al.* (2012).

As seguintes conclusões foram observadas por Jiménez *et al.* (2012):

- i) o agregado reciclado misto não cumpriu os limites impostos pelos regulamentos espanhóis em relação às propriedades químicas, especialmente para os compostos de enxofre e teor de sal solúvel. Porém, os limites estabelecidos pelas normas espanholas são projetados para agregados naturais em vez de agregados reciclados. De forma geral, o agregado reciclado misto não apresentou um risco de lixiviação maior que o agregado natural e pode ser classificado como material inerte;
- ii) os valores médios de densidade seca do agregado natural foram mais elevados quando comparados ao agregado reciclado misto. Os dois materiais não apresentaram diferenças estatísticas significativas nos valores médios de densidade seca ao longo do tempo. Porém, o agregado reciclado obteve um ligeiro aumento após 3 (três) anos de tráfego;
- iii) através do teste de carga estática foi verificado que as duas seções apresentaram boa capacidade de suporte. Verificou-se um melhor desempenho em estradas construídas com agregado reciclado misto, por possuir um aumento na capacidade de suporte em 27% ao longo do tempo e menor deflexão superficial. A seção construída com agregado de calcário esmagado apresentou uma redução de 23% na capacidade de suporte após 3 (três) anos de tráfego;
- iv) a média dos valores iniciais de rugosidade superficial foi maior na seção construída por agregado reciclado misto, provavelmente devido ao aumento da percentagem de partículas finas produzidas durante a compactação do material. O aumento da rugosidade ao longo do tempo foi semelhante para ambas às seções; e
- v) os agregados reciclados misto não selecionados podem ser reciclado utilizando um tratamento simples com uma baixa energia incorporada como uma alternativa ao agregado natural em estradas não pavimentadas rurais. Estas utilizações poderão aumentar a taxa de reciclagem de RCD e apoiar o desenvolvimento sustentável no sector da construção.

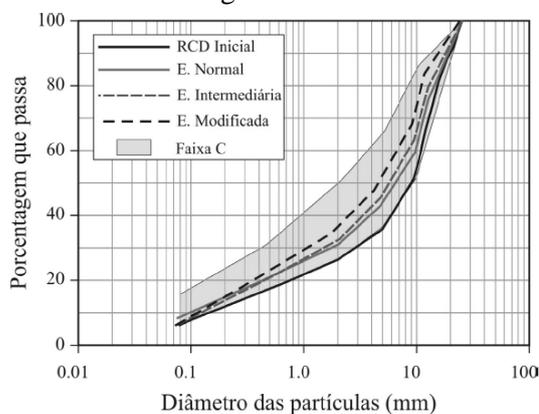
As normas brasileiras estabelecem alguns pontos para emprego dos RCD-R em pavimentação, tais como: i) a dimensão característica máxima dos grãos, ii) a porcentagem de material passante na peneira 0,42 mm, iii) o coeficiente de uniformidade (C_u) e iv) coeficiente de curvatura (CC). Assim, não é desejável que o RCD-R seja uniforme, o que causaria maiores quebras durante o processo de compactação em consequência do maior índice de vazios (LEITE, 2007).

O processo de compactação promove um esmagamento parcial e maior quebra das partículas do agregado de RCD-R, modificando a forma dos grãos com aumento da percentagem de grãos cúbicos. Isso contribui para o aumento da capacidade de carga, do módulo de resiliência e da resistência à deformação. A composição e a energia de compactação são fatores importantes para o comportamento físico e mecânico dos agregados reciclados e devem ser rigorosamente controladas, antes e após a sua aplicação (LEITE *et al.*, 2011).

A energia de compactação influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado alterando sua graduação após a compactação. Essa modificação intensifica-se com o aumento da energia, ocorrendo quebras mais significativas na energia modificada e nas frações dos agregados graúdos com produção de agregados de menor dimensão e finos. Dessa forma, a compactação tem a tendência de tornar o material melhor graduado e a seleção ou recusa do RCD-R não pode depender exclusivamente da granulometria original, outras propriedades devem ser consideradas além da análise dessas alterações granulométricas (JIMÉNEZ, 2011).

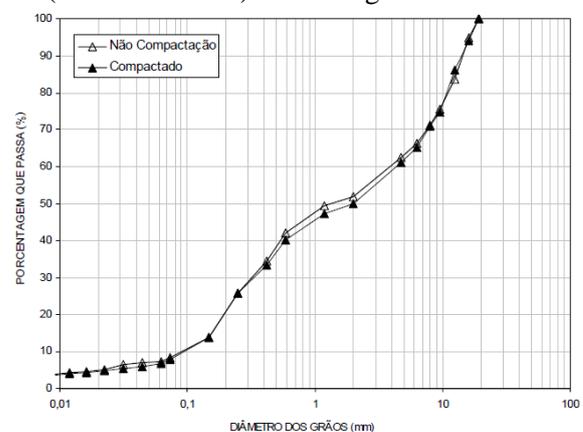
Jiménez (2011) analisou a mudança do tamanho dos grãos em relação com energia de compactação. Com umidade fixa em 13%, a autora observou que a menor mudança na forma da curva granulométrica após compactação ocorreu na energia normal e a maior quebra dos grãos foi na energia modificada. As curvas granulométricas foram deslocadas para a esquerda da curva original, sem ultrapassar o limite máximo da faixa C do DNIT (Figura 5). Para Santos (2007), o efeito de compactação não alterou significativamente a granulometria dos RCD-R estudado para energia normal de compactação (Figura 6).

Figura 5 – Efeito da energia de compactação na curva granulométrica.



Fonte: Jiménez (2011).

Figura 6 – Efeito da energia de compactação (Proctor Normal) na curva granulométrica.



Fonte: Santos (2007).

Para analisar o comportamento do material reciclado em função do desgaste sofrido durante a compactação Proctor, Jiménez (2011) utilizou o método fornecido pela norma DNER-ME 398/99 – “agregados – índice de degradação após compactação Proctor (ID_p)”. O índice de degradação após compactação Proctor (ID_p) é utilizado normalmente para agregados de rochas naturais e consiste em determinar o deslocamento médio da curva granulométrica da amostra compactada em relação a amostra não compactada. Obedecendo a uma faixa granulométrica padronizada entre as peneiras 25,4 mm e nº 200 (0,075 mm). A autora verificou que o ID_p esteve relacionado com o teor de água utilizado, com diminuição do índice de degradação ao aumentar o teor de umidade (Tabela 3).

Tabela 3 – Índice de quebra com variação do teor de umidade, energia Proctor Normal.

UMIDADE (%)	7	9	10	13	15	17	23
ID_p (%)	5.6	5.3	5.0	5.3	4.4	4.4	3.4

Fonte: Jiménez (2011).

2.2 Estradas não pavimentadas

2.2.1 Generalidades

Estradas não pavimentadas, ou seja, não revestidas por qualquer tipo de tratamento superficial, também denominadas de “estradas de terra” ou “estradas de chão”, são constituídas por solo local em sua camada superficial, com ou sem mistura de agregado granular, em consequência de manutenções. Essas estradas são o resultado da evolução de trilhas e caminhos precários que seguem as curvas naturais do terreno (ODA, 1995).

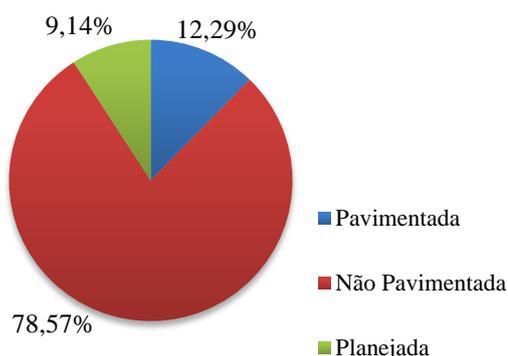
Essas vias possuem baixo custo, rápida execução e constituem um importante meio de ligação entre as áreas rurais e urbanas por oferecer às comunidades locais acesso a serviços de educação, saúde e lazer disponíveis nas cidades (GÓNGORA, 2011). São caracterizadas por possuírem baixo tráfego; entretanto, com o desenvolvimento da produção agrícola para as agroindústrias, tem-se acentuado o volume de veículos pesados. Essas vias passam a desempenhar funções não previstas em sua concepção, como descritas pelo DER/SP (2012, p.15) a respeito das estradas vicinais, pavimentadas ou não:

“[...] complementar a utilização dos sistemas coletor e arterial, alimentando-os; promover a integração demográfica territorial e cultural da região na qual se situam; possibilitar a elevação do nível de renda do setor primário facilitando o escoamento da produção e dos

insumos (atividades agropecuárias, agroindustriais, mineração, etc.); e permitir acessos a locais turísticos e históricos, entre outros”.

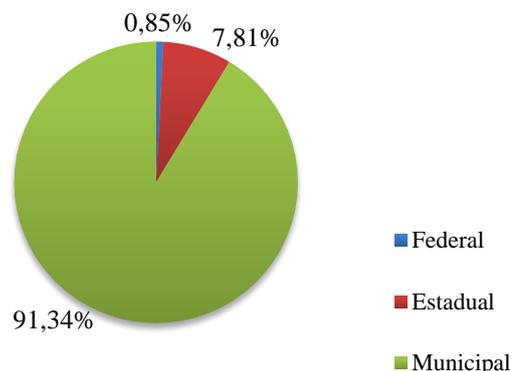
O Brasil possui uma malha viária composta por 1.351.978,10 km (78,57%) de estradas não pavimentadas, 211.468,30 km (12,29%) de estradas pavimentadas e 157.309,30 km (9,14%) de estradas planejadas (DNIT, 2015). Estrada planejada é uma “rodovia que consta de um planejamento e cuja construção se acha em perspectiva” (DNIT, 2007, p. 3). As vias não pavimentadas são predominantes em quase todos os países em desenvolvimento e quase sempre são de caráter local. No Brasil, grande parte dessas vias está sob a jurisdição de municípios, com um total de 1.234.918,30 km (91,34%); as demais, 105.600,60 km (7,81%) são estradas estaduais e apenas 11.459,20 km (0,85%) são estradas federais (DNIT, 2015). As Figuras 7 e 8 apresentam dados sobre a composição da rede rodoviária brasileira.

Figura 7 – Rede rodoviária nacional – por tipo de superfície.



Fonte: DNIT (2015).

Figura 8 – Rede rodoviária nacional não pavimentada – por jurisdição.



Fonte: DNIT (2015).

Apesar da importância que as estradas não pavimentadas possuem para o desenvolvimento e crescimento econômico do país, pouco se tem investido em estudos técnicos nessa área. Sua má conservação pode restringir a mobilidade, aumentar os custos operacionais dos veículos, e elevar as taxas de acidentes. Essa má conservação pode trazer consigo problemas sociais, tais como: analfabetismo, pobreza e falta de assistência médica, devido ao isolamento das comunidades rurais (GÓNGORA, 2015). A capacidade de suporte dessas vias depende das características do material da superfície (expansibilidade, compressibilidade, permeabilidade, entre outras) e da resistência do solo do subleito. As manutenções periódicas devem preservar a capacidade de suporte, as condições de rolamento e aderência, a fim de garantir a segurança e o conforto a seus usuários (ODA, 1995).

2.2.2 Principais defeitos de estrada não pavimentada

Segundo Oda (1995), os principais defeitos de estradas não pavimentadas são consequências de três agentes externos: i) o tráfego, que exerce ação abrasiva sobre a superfície; ii) a água da chuva, que ao encharcar o solo diminui sua capacidade de suporte; e iii) a falta de manutenção. Santos *et al.* (1988) define-os e os caracteriza como sendo:

Trilha de rodas (Figura 9): são depressões na superfície da estrada ao longo da trajetória dos pneus dos veículos de forma permanente, causadas pela falta de capacidade de suporte da estrada ou subleito e ausência ou deficiência do sistema de drenagem. O procedimento a ser realizado, nessa situação, é retirar a água acumulada no local através de valetas e colocar uma camada de reforço.

Figura 9 – Trilha de rodas na estrada.



Fonte: Góngora (2015).

Eaton *et al.* (1987) classificam a severidade da extensão das trilhas de rodas de acordo com a profundidade dos sulcos e extensão das trilhas em relação a área total da superfície da estrada coberta pelo afundamento (Tabela 4).

Tabela 4 – Severidade das trilhas de rodas.

SEVERIDADE	PROFUNDIDADE (cm)	PORCENTAGEM DOS SULCOS
Baixa	< 2,5	< 10
Média	Entre 2,5 e 7,5	Entre 10 e 30
Alta	> 7,5	> 30

Fonte: Eaton *et al.* (1987).

Buracos (Figura 10): Formados por uma plataforma mal drenada e contínua expulsão de partículas sólidas do leito através da passagem de veículos sobre o empoçamento de água. Verificado essa ocorrência, faz necessário drenar a água da plataforma através do abaulamento transversal, valetas e sangras, e fechamento de buracos isolados.

Figura 10 – Formação de buracos na estrada.



Fonte: Góngora (2015).

Excesso de pó (Figura 11): Causado pela abundância de materiais finos decorrente da passagem dos veículos, formando nuvens de poeira na época de seca, comprometendo a segurança e durabilidade dos veículos. Observa-se a maior incidência em solos constituídos por silte. É necessário, um revestimento primário selante e reforço do subleito para mitigar esse problema.

Figura 11 – Excesso de pó na estrada.



Fonte: Góngora (2015).

Ondulações (Figura 12): Também conhecidas como “costela de vaca”, são causadas pelo acúmulo e presença de materiais granulares de dimensões entre 5 e 10 mm, sem ligantes. Para corrigir esse problema, faz-se necessário substituir o material granular superficial.

Figura 12 – Ondulações na estrada.



Fonte: Góngora (2015).

De forma geral, Santos *et al.* (1988) recomendam, para reduzir essas falhas, a compactação com materiais granulares (areia, cascalho, etc.) e uma menor porção de material argiloso (utilizado como ligante que aglutina fortemente os grãos do material granular). A espessura desta camada deve considerar a quantidade e o tipo de tráfego, as condições de suporte do subleito, e ser construída geralmente entre 100 e 200 mm.

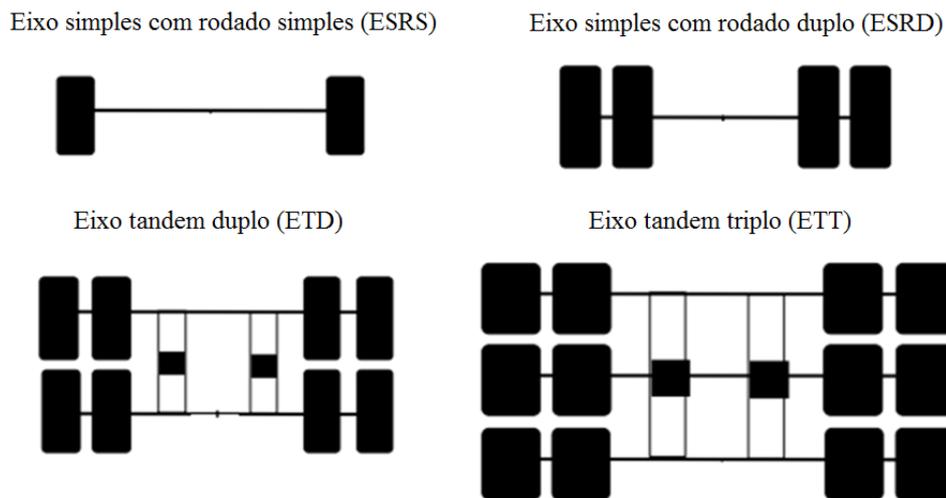
Além disso, um sistema de drenagem eficiente é de extrema importância para diminuir a quantidade de água retida, proteger a pista de rolamento e evitar que esses problemas ocorram prematuramente. Segundo Oda (1995), a precipitação pluvial é um dos principais fatores na formação de defeitos decorrentes de uma: i) seção transversal inadequada, com uma superfície sem declividade para direcionar a água para as valetas; e ii) drenagem lateral ineficiente, causada por valetas cobertas de vegetação ou cheia de entulhos.

2.2.3 Limites de carga

A principal causa de deterioração dos pavimentos é o excesso de carga por eixo. Mesmo que um veículo possua uma carga total elevada, mas corretamente distribuída por um número suficiente de eixos, o dano transmitido ao pavimento será reduzido. As limitações de carga e o controle do peso dos veículos, no país, ainda sofrem com a baixa fiscalização, o que representa um aumento de 33% dos gastos com manutenção em trechos onde não existe a pesagem de veículos. Os excessos de carga comprometem a segurança, o desempenho e a durabilidade dos pavimentos, exigindo das autoridades um maior anseio no sentido de programar dispositivos de fiscalização em pontos estratégicos das vias brasileiras (ALBANO, 2005).

De acordo com o DNIT (2012), os veículos são classificados através da distribuição de seus eixos. Os eixos podem ser isolados (eixo simples) ou em conjunto (eixo em tandem), podendo ser dotados de uma roda em cada extremidade (rodado simples), duas rodas em cada extremidade (rodado duplo) ou três rodas em cada extremidade (rodado triplo). Os tipos de eixos que trafegam nas rodovias brasileiras são apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Tipo de eixos de veículos brasileiros.



Fonte: DNIT (2012).

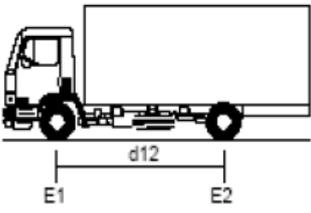
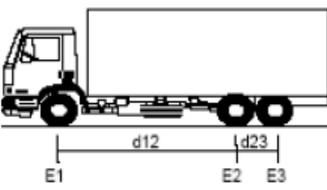
O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), através das Resoluções nº 12/98, nº 184/05 e nº 62/98, regulamentaram os artigos 99 e 100 do Código de Trânsito Brasileiro, os quais estabelecem que somente possa transitar por vias brasileiras os veículos cujo peso e dimensões atendam aos limites estabelecidos pelo CONTRAN. Considera-se excesso de peso, o veículo que transmitir ao pavimento, através de seus pneumáticos uma massa maior do que aquela prevista para o modelo do veículo fixado pelo fabricante. Admitindo um limite máximo de peso bruto por eixo isolado de (DNIT, 2012):

- i) 6,0 tf para eixos simples de rodado simples (ESRS);
- ii) 10,0 tf para eixos simples rodado duplo (ESRD);
- iii) 17,0 tf para eixos tandem-duplo (ETD); e
- iv) 25,5 tf para eixos tandem-triplo (ETT).

A legislação também prever um limite máximo de: i) Peso Bruto Total (PBT), que é o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, considerando a tara mais a lotação (carga máxima útil); e ii) Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e/ou Capacidade Máxima de

Tração (CMT), que consiste no peso máximo que pode ser transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão trator mais seu semirreboque ou de caminhão trator mais seu reboque de 45 tf (DNIT, 2012). A Tabela 5 apresenta a classe e caracterização de dois veículos adotados segundo a classificação do DNIT.

Tabela 5 – Veículos adotados na classificação do DNIT.

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/ CMT (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16 (16,8)	<p>CAMINHÃO</p> <p>E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), com carga máxima (CM) = 6t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático</p> <p>E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10 t, $d_{12} \leq 3,5m$</p>	2C
	3	23 (24,2)	<p>CAMINHÃO TRUCADO</p> <p>E1 = ES, RS, CM = 6t</p> <p>E2 E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17 t, $d_{12} > 2,4m$, $1,2m < d_{23} < 2,4m$</p>	3C

Fonte: modificado do DNIT (2012).

Devido às incertezas nas medições dos equipamentos, a Lei nº 7408/85 estabeleceu uma tolerância de 5% (cinco por cento) sobre os pesos regulamentares. Essa tolerância passou para 7,5% (sete e meio por cento) após a Resolução CONTRAN nº 258/07, e prorrogada mediante a Resolução CONTRAN nº 365/10. A partir da publicação da Resolução CONTRAN nº 525/15, fica admitido as seguintes tolerâncias na fiscalização dos pesos dos veículos por balança rodoviária:

- i) 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC); e
- ii) 10% (dez por cento) sobre os limites de peso regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas.

Os efeitos destrutivos de uma carga por eixo ou conjunto de eixos sobre um pavimento podem ser relacionados a um determinado número de passagens (N) de um eixo padrão através do fator de equivalência de cargas (FEC). Dessa forma, estudos realizados pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) Road Test, no final da

década de 50, definiram um eixo padrão como sendo um eixo simples de rodado duplo (ESRD) com carga de 18.000 lb ou 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus. Dessa forma, é possível prever custos de manutenções de rodovias por permitir comparar danos causados por diferentes solicitações através da Equação 2.1 (ALBANO, 2005).

$$FEC = \frac{Np}{Ni} = \left(\frac{Wi}{Wp}\right)^{m/n} \quad (2.1)$$

Onde: FEC = fator de equivalência de carga; Wp = carga de eixo tomada como referência ou padrão; Wi = carga de eixo analisada; Np = número de solicitações da carga Wp ; Ni = número de solicitações da carga Wi ; m e n são constantes.

Os fatores adotados no Brasil pelo DNIT, por meio do método DNER PRO 159/85 – “Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos”, com FEC baseados na equação geral de comportamento da AASHTO (Equação 2.1) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Equações do FEC do DNER PRO 159/85.

TIPO DE EIXO	EQUAÇÃO (P em tf)	ORIGEM
ESRS	$FEC = (P/7,77)^{4,32}$	(GEIPOT, 1977).
ESRD	$FEC = (P/8,17)^{4,32}$	(ASSHTO, 1972).
ETD	$FEC = (P/15,08)^{4,14}$	(ASSHTO, 1972).
ETT	$FEC = (P/22,95)^{4,22}$	(TREYBIG; VON QUINTUS, 1976).

Onde: **P** = peso bruto total sobre eixo.

Fonte: modificado do DNER PRO 159/85.

Silva *et al.* (2011) realizaram uma análise da influência da variação da carga por eixo e da pressão de enchimento dos pneus sobre as deflexões superficiais recuperáveis na camada de revestimento primário em uma estrada não pavimentada em Viçosa-MG. A aplicação de níveis mais críticos de carregamento representou efeitos mais destrutivos no pavimento, e dependeu da combinação da carga por eixo e da pressão de enchimento dos pneus. Os autores ressaltaram a importância de considerar esses parâmetros na determinação do FEC para vias vicinais brasileiras, uma vez que representam, com mais evidência, a realidade das solicitações da estrutura do pavimento.

2.3 Estrutura de solo reforçado

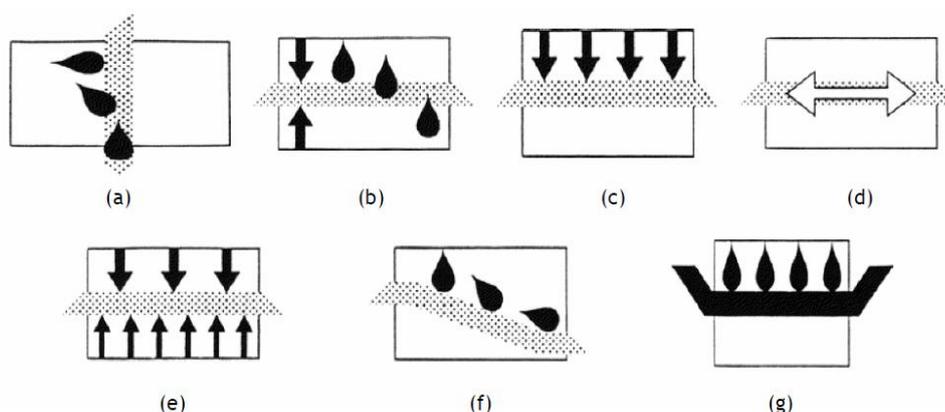
2.3.1 Geossintéticos

A aplicação de materiais para estabilização e melhoramento de solos é uma prática realizada há milhares de anos, por meio da utilização de madeira, bambu, raízes e até mesmo peles de animais pelas civilizações antigas. Com o desenvolvimento da indústria dos polímeros sintéticos, os geossintéticos começaram a ser utilizados de forma sistemática desde meados do século XX. Naquele cenário, os geotêxteis ganharam espaço no mercado devido às suas vantagens técnicas (facilidade de aplicação e variedade de função) e econômicas (aumento da vida útil da obra e redução de intervenções de manutenção) (CARNEIRO, 2009).

No Brasil, a utilização de geossintéticos foi intensificada no início dos anos 80, com a criação da Comissão Técnica de Geossintéticos pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). Em seguida, Simpósios Brasileiros foram realizados em Brasília-DF (1992), São Paulo-SP (1995) e Rio de Janeiro-RJ (1999). A IGS-Brasil (ramo brasileiro da IGS - *International Geosynthetic Society*), criada no ano de 1996, vem, em conjunto com a ABMS, organizando cursos e difundindo conhecimentos sobre as aplicações de geossintéticos no âmbito geotécnico (SIEIRA, 2003).

Segundo a NBR 10.318 (ABNT, 2013), as principais funções dos geossintéticos são: i) drenagem, ii) filtração, iii) reforço, iv) separação, v) controle de erosão superficial e vi) barreira de fluidos. Podendo desempenhar uma ou mais funções (Figura 14).

Figura 14 – Principais funções desempenhadas pelos geossintéticos: (a) drenagem; (b) filtração; (c) proteção; (d) reforço; (e) separação; (f) controle de erosão superficial; (g) barreira de fluidos.



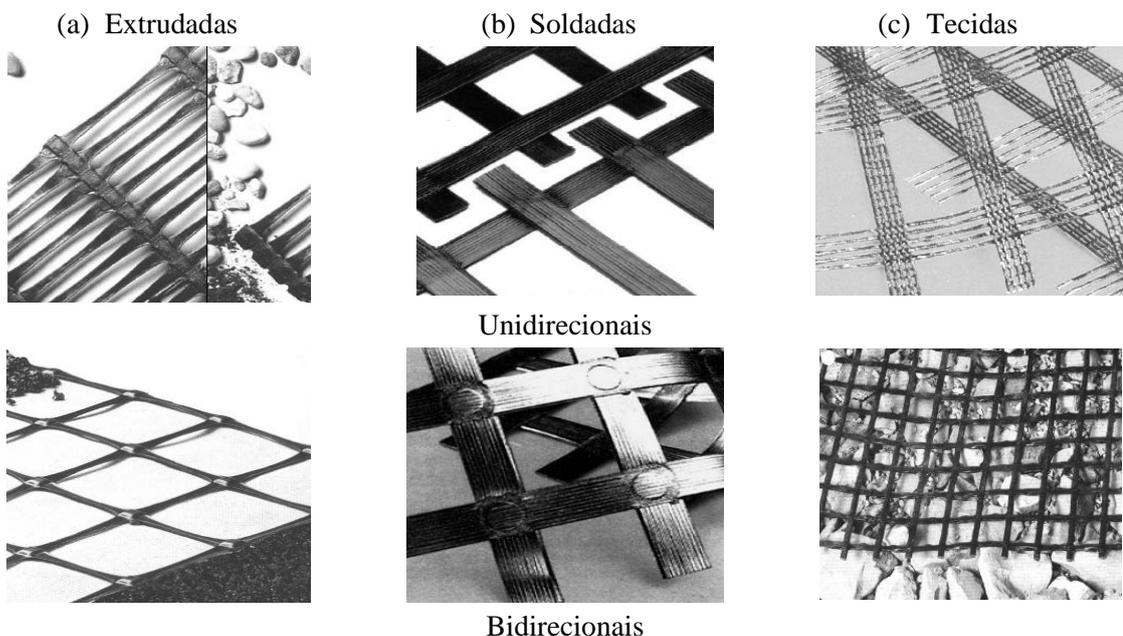
Fonte: Carneiro (2009).

A função de reforço consiste em melhorar as propriedades mecânicas de um solo ou de outro material de construção. Podendo ocorrer de duas maneiras: i) equilibrar e redistribuir ao reforço global uma diferença de pressão, quando colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes; e ii) aumentar a capacidade global da estrutura, quando colocados no interior de maciços para suportar tensões de tração – essa função requer que os geossintéticos possuam propriedades mecânicas para resistir aos efeitos da instalação e ao longo do tempo (CARNEIRO, 2009).

2.3.2 Mecanismo de ação do reforço

Os tipos de geossintéticos comumente empregados em estradas não pavimentadas com a função de reforço são: i) os geotêxteis tecidos, ii) os geotêxteis não tecidos e iii) as geogrelhas. As geogrelhas podem ser constituídas por elementos de tração: i) unidirecional, quando apresentam elevada resistência em apenas uma direção; e ii) bidirecional, quando apresentam elevada resistência nas duas direções principais (ortogonais). Em relação ao processo de fabricação, as geogrelhas podem ser: i) extrudadas, ii) soldadas ou iii) tecidas (Figura 15). As geogrelhas geralmente são construídas a partir de metais (normalmente aço), e polímeros como: o polietileno de alta densidade (PEAD), o poliéster (PET) e o polipropileno (PP) (SIEIRA, 2003).

Figura 15 – Tipos de geogrelhas.



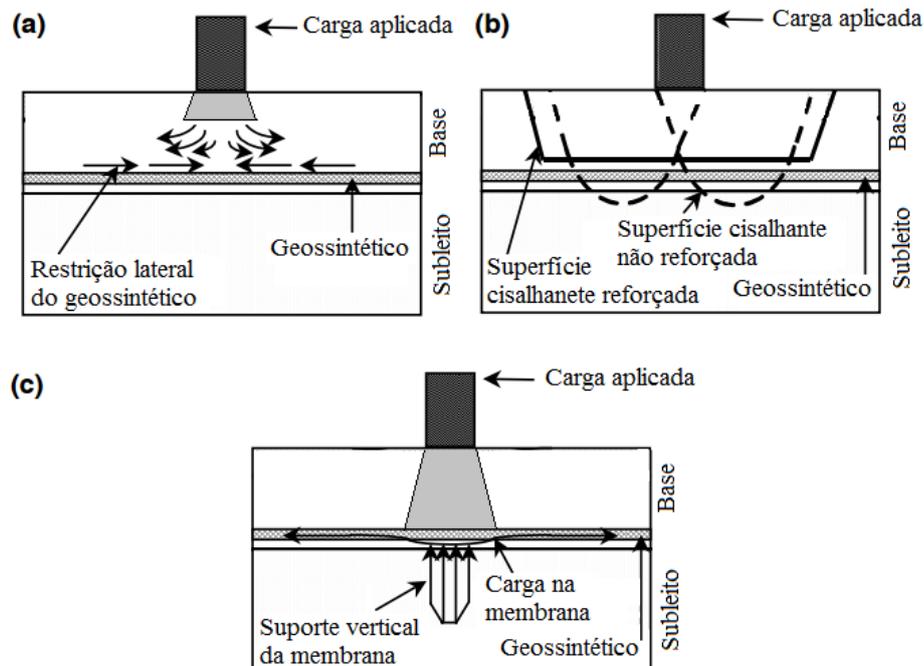
Fonte: Sieira (2003).

As geogrelhas apresentam normalmente 3 (três) mecanismos potenciais de reforço:

- i) restrição lateral do solo;
- ii) aumento da capacidade de carga; e
- iii) efeito membrana.

A restrição lateral do solo (Figura 16a) é causada pela interação de atrito e bloqueio entre o solo na camada de base. As cargas repetidas aplicadas pelas rodas dos veículos criam um movimento de espalhamento nessa camada que pode ser reduzido com a aplicação da geogrelha posicionada corretamente dentro da área de deformação lateral máxima. O aumento da capacidade de carga (Figura 16b) acontece devido à rigidez da geogrelha que limita as tensões laterais na camada de base, aumenta a tensão média, a rigidez e força de cisalhamento dessa camada – essa função vai depender das características de atrito e de bloqueio entre o solo e a geogrelha. O efeito membrana (Figura 16c) se desenvolve como um resultado das deformações verticais que criam uma forma côncava na geogrelha, a tensão desenvolvida na geogrelha ajuda a suportar a carga da roda e reduzir o estresse vertical no subleito (PERKINS; ISMEIK, 1997).

Figura 16 – Função do reforço de geogrelhas em estradas não pavimentadas: (a) restrição lateral do solo; (b) aumento da capacidade de carga; (c) efeito membrana.



Fonte: modificado de Perkins e Ismeik (1997).

2.3.3 Estradas não pavimentadas reforçada com geogrelhas

Segundo Bearden e Labuz (1997), o estudo sobre estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos teve um importante avanço a partir da pesquisa realizada por Giroud e Noiray (1981) sobre o reforço de geotêxtil na interface base-subleito, a qual introduziu o conceito do efeito membrana como mecanismo de sollicitação do reforço. Para o dimensionamento da espessura da camada de base da estrada, os autores consideraram: i) o volume de tráfego, ii) a força aplicada pela carga das rodas dos veículos, iii) a pressão dos pneus, iv) a resistência do subleito, v) a profundidade de sulcos, e vi) a influência da presença de um reforço.

A partir do método de projeto de Giroud e Noiray (1981), Giroud *et al.* (1984) desenvolveram um método de projeto para estradas não pavimentadas reforçado com geogrelha. Os autores incluíram 3 (três) mecanismos não considerados nos projetos com geotêxtil: i) o confinamento do solo de fundação, ii) a melhoria da distribuição de carga, e iii) o efeito membrana tensionada. A geogrelha confinada influenciou na melhor distribuição das cargas da camada de base para a sub-base (BEARDEN; LABUZ, 1997).

Giroud e Han (2004) incluíram outros parâmetros no dimensionamento dessas vias: i) o intertravamento da geogrelha e da base de agregado, ii) a abertura da geogrelha e iii) o módulo de resiliência do material de base. Os autores concluíram que o reforço melhora o desempenho das estradas através da: i) prevenção da movimentação lateral da camada de base; ii) aumento da rigidez do material da base, que reduz as tensões verticais; iii) melhoria da distribuição das cargas de tráfego e redução da tensão máxima vertical; e iv) redução da tensão de cisalhamento transmitida da base ao subleito, que aumenta a capacidade de carga do aterro.

2.3.4 Ensaios em laboratório submetidos a carregamento cíclico

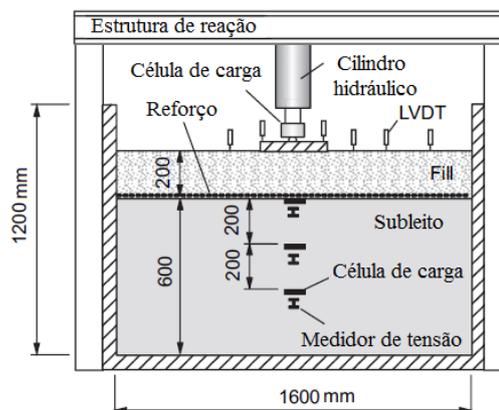
Palmeira e Antunes (2010) estudaram o uso de diferentes tipos de geossintéticos (geogrelha e geotêxtil) (Figura 17) na execução de reforço em estradas não pavimentadas sobre solo mole. O estudo foi realizado em um equipamento de dimensões de 1,2 m de altura, 1,6 m de largura e 1,6 m de comprimento (Figura 18). O estudo considerou a aplicação de carga cíclica com frequência de 1 Hz e uma tensão de placa de 566 kPa, o que corresponde a uma carga típica eixo de caminhão de 80 kN. Os testes foram realizados com 3 (três) fases de carregamento e profundidade máxima de sulcos estabelecida em 25 mm.

Figura 17 – Geogrelha e geotêxtil utilizados nos ensaios.



Fonte: Palmeira e Antunes (2010).

Figura 18 – Equipamento utilizado nos ensaios.



Fonte: modificado de Palmeira e Antunes (2010).

A utilização do reforço contribuiu de forma significativa para o aumento do número de ciclos de carga suportados pela estrada não pavimentada, com: redução da distribuição de tensões verticais transferidas ao subleito, e aumento do ângulo de propagação de carga. Na primeira fase de carregamento, a estrada reforçada com geogrelha apresentou um incremento de 89% em relação à estrada não reforçada (282.600 ciclos e 30.720 ciclos, respectivamente). Posteriormente, os experimentos foram restaurados a fim de simular uma manutenção periódica. Na segunda fase de carregamento, houve um ganho de 88% da estrada reforçada em relação à sem reforço (210.906 ciclos e 25.164 ciclos, respectivamente). Na terceira fase de carregamento o aumento foi de 86% (144.004 ciclos e 19.470 ciclos, respectivamente) (PALMEIRA e ANTUNES, 2010).

Palmeira e Antunes (2010) também realizaram uma análise dos custos em relação à eficácia da estrada não pavimentada reforçada. De forma geral, foi verificado que apesar do custo inicial ser maior na execução de estradas reforçadas, a redução de manutenções pode compensar o custo adicional do reforço. Além disso, outros benefícios podem ser verificados, tais como: i) menor número de manutenções de veículos, devido as melhores condições de tráfego; ii) menor o número de acidentes; e iii) repercussões econômicas positivas decorrentes de menos interrupções de tráfego para realização das manutenções necessárias.

Góngora (2011) analisou o comportamento de estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles reforçadas com geogrelhas na interface entre a camada de aterro e o subleito. A autora ensaiou 2 (dois) tipos materiais de aterro: i) resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) e ii) a brita. Os ensaios de carregamento cíclico foram realizados em um tanque cilíndrico metálico, rígido, com dimensões de 0,75 m de diâmetro e 0,53 m de altura.

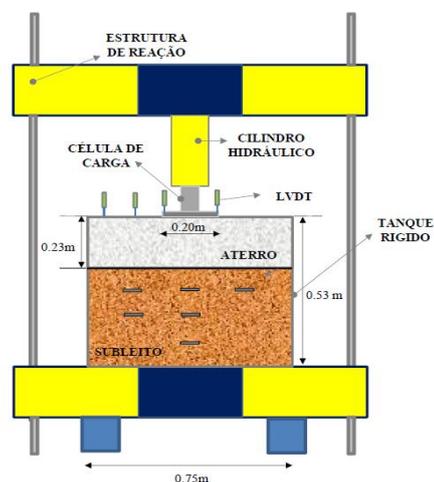
A ideia era simular o carregamento proveniente da roda de um veículo com carga por eixo de 80 kN (Figuras 19 e 20).

Figura 19 – Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.



Fonte: Góngora (2011).

Figura 20 – Disposição da instrumentação do ensaio.



Fonte: Góngora (2011).

O uso do reforço na estrada não pavimentada contribuiu para o aumento do número de ciclos suportados, devido a uma maior rigidez lateral na camada de aterro, o que, em condições reais, pode aumentar a vida útil desse tipo de obra. O desempenho por parte da estrada dependeu do tipo de material de aterro – com maior desempenho para os experimentos constituídos por RCD-R – e da relação entre as dimensões dos grãos e dimensões das aberturas da grelha (GÓNGORA, 2011).

Durante o primeiro estágio de carga os experimentos construídos com RCD-R e com brita, sem reforço, apresentaram resultados bastante semelhantes para profundidade máxima de sulcos estabelecida (25 mm): 1.710 ciclos e 1.630 ciclos, respectivamente. Os ensaios reforçados (+R) apresentaram um considerável aumento no número de ciclos, com incremento de 3.247% para o RCD-R+R e 1.376% para a brita+R, com total de 57.235 ciclos e 24.064 ciclos, respectivamente. Nesse cenário, o RCD-R+R apresentou um incremento de 138% em relação à brita+R. Após a restauração da via, no segundo estágio de carga, a brita+R apresentou um ganho de 241% em relação à brita sem reforço, com total de 42.146 ciclos e 12.355 ciclos, respectivamente. O reforço não ofereceu ganho para os experimentos que utilizaram o RCD-R, no segundo estágio de carga, porém o RCD-R+R obteve um incremento de 134% (98.423 ciclos) em relação à brita+R (GÓNGORA, 2011).

Sun *et al.* (2015) executaram nove testes de carregamento cíclico a fim de estudar: i) as distribuições de tensões radiais e verticais, ii) as deformações permanentes e iii) o comportamento elástico da geogrelha ao reforçar camadas de base de estradas não pavimentadas sobre subleito fraco. Foi utilizado um equipamento em grande escala, com dimensões de 2,0 m de altura, 2,2 m de largura e 2,0 m de comprimento, e uma frequência de carregamento cíclico de 0,77 Hz (Figura 21). O ensaio foi realizado para três espessuras de base (0,15 m, 0,23 m e 0,30 m), com incremento de carregamento. Para cada incremento de 5 kN, 100 ciclos foram aplicados sobre as seções do teste, até se obter uma carga total de 50 kN ou uma profundidade de sulcos estabelecida de 75 mm.

Figura 21 – Equipamento para ensaios de carregamento cíclico.



Fonte: Sun *et al.* (2015).

Os autores concluíram que a inclusão de uma geogrelha reduziu as deformações permanentes tanto para a camada de base como para o subleito. As tensões verticais na interface (base granular e subleito) foram reduzidas com a inclusão da geogrelha, essa redução foi mais evidente com a diminuição da espessura da base. Com o aumento do número de ciclos de carga houve: i) elevação da tensão vertical, indicando deterioração da camada de base devido à elevada carga; ii) aumento da tensão radial na camada de base, apontando um grande movimento lateral das partículas na parte inferior dessa camada; e iii) maior deformação permanente.

2.3.5 Estudos de campo em estradas não pavimentadas

Watts *et al.* (2004) realizaram um experimento, em escala real, de estradas não pavimentadas com baixo volume de tráfego e subleito fraco. Diferentes materiais foram utilizados e empregados 12 (doze) tipos reforços de geossintéticos para a avaliação da redução das deformações superficiais de uma estrada de terra, no Reino Unido. O experimento foi realizado em um trecho de 10 m de largura, 25 m de comprimento e 3 m de profundidade. O número de ciclos foi contabilizado ao gerar uma profundidade de sulco estabelecida em 40 mm (Figura 22).

Figura 22 – Teste de estradas não pavimentadas em escala real.



Fonte: Watts *et al.* (2010).

Os autores concluíram que todas as seções reforçadas apresentaram melhor desempenho do que as sem reforço – as seções sem reforço suportaram de 300 a 570 ciclos; para as seções reforçadas, os valores chegaram até 10.000 ciclos. O nível de desempenho dependeu do tipo de geossintético utilizado – com o maior número de ciclos sendo suportado por geogrelhas em comparação ao geotêxtil – e da resistência do material constituinte do subleito.

Latha *et al.* (2010) realizaram experimentos de campo, executados em Bangalore, Índia, com o objetivo de estudar o desempenho de estradas não pavimentadas de baixo volume construídas ao longo de um subleito fraco usando diferentes tipos de reforços: i) geotêxtil, ii) geogrelhas biaxial e uniaxial, iii) geocélulas e iv) pedaços de pneus na interface entre o subleito e a base. Um total de 7 (sete) testes de campo foram realizados, a carga aplicada foi realizada através da passagem de um veículo, com velocidade uniforme, durante um período máximo de 250 passagens (Figura 23).

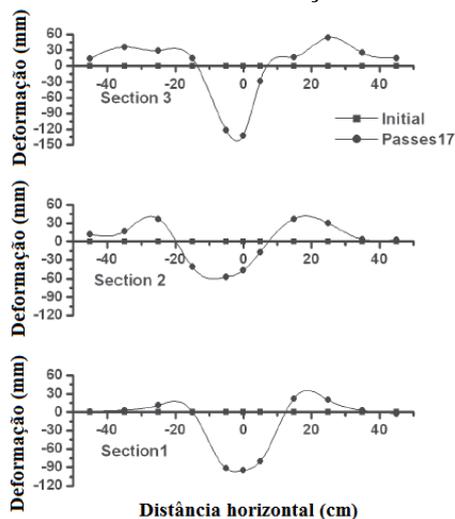
Figura 23 – Trecho de estradas não pavimentadas.



Fonte: Latha *et al.* (2010).

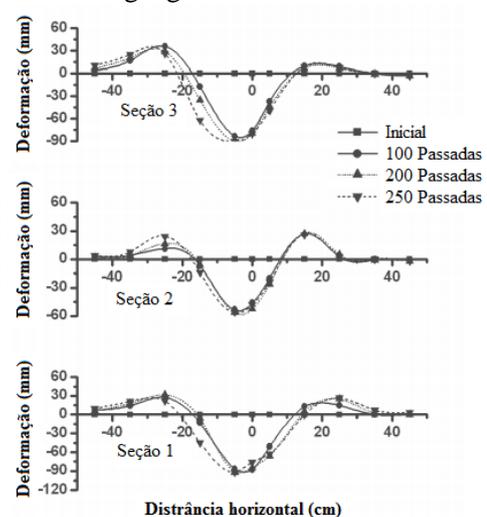
Os autores concluíram que todas as seções reforçadas suportaram mais de 250 passagens do veículo, exceto para o reforço com geotêxtil, que falhou em 100 passadas (40% do valor estabelecido como referência), e, assim, não foi considerado adequado para esse tipo de via. O trecho sem reforço foi comprometido em apenas 17 passadas (6,8% do valor estabelecido como referência). O perfil transversal da estrada não pavimentada sem reforço é ilustrado na Figura 24 – de tendo sido interrompido para 17 passadas devido à derrapagem do veículo, com depressões máximas de 95, 57 e 132 mm para as seções 1, 2 e 3, respectivamente. O perfil transversal da estrada não pavimentada construída com geogrelha biaxial é ilustrado na Figura 25 – de as deformações mantiveram-se estáveis, com depressões máximas de 92, 56 e 90 mm para as seções 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 24 – Perfil das seções transversais para trecho sem reforço.



Fonte: modificado de Latha *et al.* (2010).

Figura 25 – Perfil das seções transversais para geogrelhas biaxiais.



Fonte: modificado de Latha *et al.* (2010).

Mekkawy *et al.* (2011) realizaram experimentos de campo em Iowa, Estados Unidos (Figura 26), a fim de simular cargas repetidas de tráfego e avaliar o uso de três tipos de geogrelhas biaxiais, sobre um subleito fraco constituído por argila, para estabilizar uma seção de 310 m de extensão, durante um período de 10 meses. A aplicação de geogrelha em estradas permite que as manutenções ocorram de forma mais rápida, uma vez que se faz necessário apenas reparar a formação de sulcos (Figura 27), o que permite liberar o trecho para o tráfego imediatamente sem tempo de cura necessário.

Figura 26 – Trecho de estradas não pavimentadas.



Fonte: Mekkawy *et al.* (2011).

Figura 27 – Sulco formado após um mês de controle.



Fonte: Mekkawy *et al.* (2011).

O experimento de campo foi suplementado com um programa de testes laboratoriais em uma caixa de dimensões de 0,60 m x 0,60 m x 0,60 m. Segundo Mekkawy *et al.* (2011), o maior deslocamento observado pelos autores foi de 284 mm, para 15.000 cíclicos. As geogrelhas reduziram o deslocamento do solo de 70 a 75% em relação ao solo não reforçado; no entanto, as geogrelhas não impediram a perfuração do agregado na camada do subleito. Os resultados dos estudos de campo e laboratoriais indicaram que o reforço é um método eficaz para a redução sulcos. Contudo, é fundamental o monitoramento de seção teste para verificar o desempenho em longo prazo e avaliar o efeito de ciclos com maior carga de tráfego.

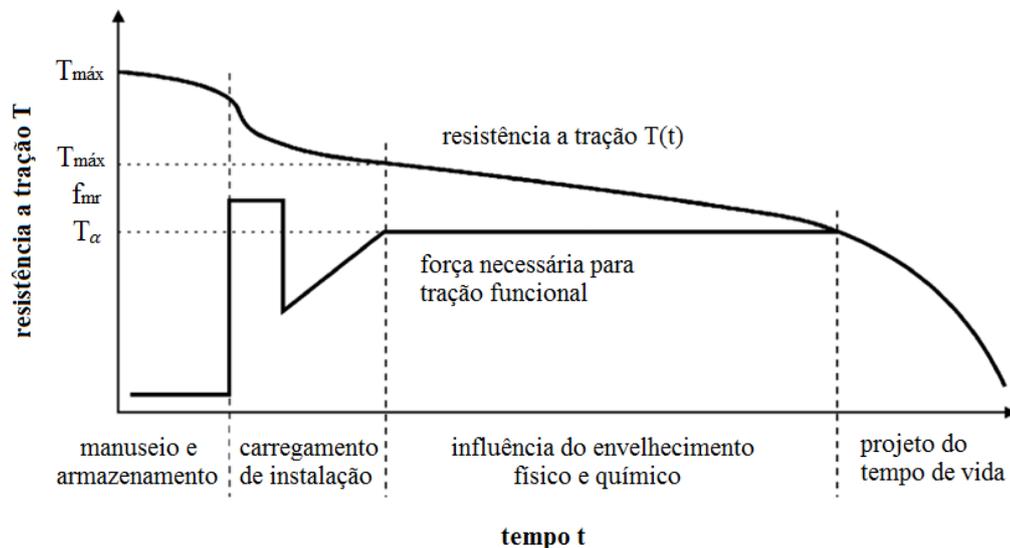
2.4 Degradação das geogrelhas

2.4.1 Fatores de redução

Diante das vantagens técnicas que a utilização de geogrelhas em estradas não pavimentadas oferece, faz-se importante identificar as causas de degradação desses elementos para concepção de novos projetos. As estruturas de solo reforçado possuem estimativa de projeto para durar até 100 anos. Entretanto, as propriedades das geogrelhas variam em função do

tempo, com diminuição de resistência à tração de curto e longo prazo. Os efeitos de curto prazo são causados durante a fase de serviço através de esforços provenientes de manuseio, instalação e compactação, que reduzem a força de tração máxima (HUFENUS *et al.*, 2005). O efeito em longo prazo não tem relação direta com os efeitos de curto prazo, entretanto os geossintéticos que sofreram danos de instalação são mais suscetíveis aos danos de longo prazo por estarem desprotegidos e apresentarem fatores de redução maiores em amostras danificadas (GREENWOOD, 2002). A Figura 28 apresenta a alteração de resistência à tração de uma geogrelha a partir da sua fabricação até ao final da sua vida útil.

Figura 28 – Esquema da dependência do tempo de resistência à tração.



Fonte: modificado de Hufenus *et al.* (2005).

Dessa forma, a sobrevivência dos geossintéticos está relacionada aos esforços de instalação (manuseio, deslocamento, compactação, etc.), sua constituição (matéria-prima, processo de fabricação, gramatura, etc.), condições ambientais e dos esforços solicitantes (objetos contundentes, energia de compactação, deformações de base, etc.). Assim, devido às incertezas com relação aos parâmetros e/ou métodos de cálculo adotados, utiliza-se um fator de segurança global (FR) para uma solicitação mínima requerida pelo geossintético. Em estruturas de solos reforçados, para uma dada tração requerida pelo geossintético (T_{req}) definida pelo projeto e considerando um valor de resistência à tração (T_{max}) fornecida pelo fabricante, adota-se um FR conforme a Equação 2.2 (VERTEMATTI, 2004):

$$FR = f_{cr} * f_{mr} * f_a * f_m \quad (2.2)$$

Onde:

FR : fator de redução global;

f_{cr} : fator de redução parcial para fluência em tração (T_{max}/T_{ref});

f_{mr} : fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;

f_a : fator de redução ambiental;

f_m : fator de redução parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético;

A partir do FR , pode-se determinar a resistência à tração disponível (T_α) do geossintético:

$$T_\alpha = \frac{T_{max}}{FR} \quad (2.3)$$

Portanto, deve-se ter que:

$$T_\alpha \geq T_{req} \quad (2.4)$$

Na prática, determina-se qual o menor T_{max} que atende as Equações 2.3 e 2.4:

$$T_{max} \geq FR * T_{req} \quad (2.5)$$

Esses fatores parciais podem ser obtidos através de tabelas disponíveis em bibliografia técnica, ensaios realizados e fornecidos pelos fabricantes ou por ensaios próprios realizados pelos interessados. Podendo-se, ainda, em fase de projeto básico, utilizar fatores parciais tabelados (Tabela 7), porém esses valores possuem faixas de valores relativamente grandes, elevando os valores de FR . Assim, é importante realizar pesquisas laboratoriais e de campo a fim de reduzir essas faixas de valores e adotar fatores de redução de resistência mais específicos para cada situação e tipo de geossintético empregado (VERTEMATTI, 2004).

Tabela 7 – Faixa de valores indicativos para os fatores de redução utilizáveis na fase de projeto básico

AMOSTRA	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Fluência em tração (f_{cr})	2,00	5,00
Danos de instalação (f_{mr})	1,50	2,00
Degradação ambiental (f_a)	1,05	2,00
Incetezas estatísticas do material (f_{mr})	1,05	1,40
Fator de redução global (FR)	3,03	28,00

Fonte: modificado de Vertematti (2004).

2.4.2 Fluência em tração

Como visto, os geossintéticos podem sofrer perdas de resistências a curto e a longos prazos, causados por diversos fatores. Em longo prazo essas perdas podem acontecer sob cargas constantes. Ocorrendo em obras que submetem o reforço a ações de extensões com o passar do tempo, como, por exemplo: reforço de taludes, muros de suporte ou reforço de fundações realizadas sobre solos moles. Para estudar a resposta dos geossintéticos às solicitações, ensaios laboratoriais de fluência e ruptura em fluência são realizados (PAULA *et al.*, 2009a).

Paula *et al.* (2009a) realizaram ensaio de fluência e ruptura em fluência em dois geossintéticos de estruturas diferentes (geotêxtil tecido em polipropileno e geogrelha tecida biaxial de poliéster). Por meio dos resultados obtidos, os autores puderam verificar alterações nas propriedades mecânicas dos geossintéticos com o tempo. Para um tempo de serviço de 30 anos, sobre cargas constantes, os fatores de redução foram de 1,74, para o geotêxtil, e 1,47, para a geogrelha. Esses resultados traduzem um maior efeito de ruptura em fluência para o geotêxtil em comparação com a geogrelha. Para o ensaio de fluência, a geogrelha manteve taxa de deformação constante ao longo do logaritmo do tempo, sem rompimento dos corpos de provas durante os 2 (dois) meses de ensaio. Por outro lado, o geotêxtil apresentou aumento da taxa de deformação para níveis de carga mais elevados.

2.4.3 Dano de instalação

As consequências dos danos mecânicos de instalação sobre as propriedades dos geossintéticos vêm sendo estudadas por vários autores por meio de reprodução de danos em ensaios de laboratório e execução de trechos experimentais. Esses danos estão associados ao tipo de geossintético (natureza e estrutura do polímero), material de preenchimento (tamanho dos grãos e forma dos grãos) e energia de compactação. Dessa forma, torna-se importante estudar as condições ideais de operação de modo a mitigar esses danos.

Hufenus *et al.* (2005) realizaram testes de campo, em grande escala (Figura 29), com 38 geossintéticos (geogrelhas e geotêxteis) a fim de investigar os danos de instalação, determinar fatores de redução correspondentes e avaliar a capacidade de sobrevivência de geossintéticos. As amostras foram instaladas entre uma camada de base de 120 mm e uma camada superior de 230 mm, compactadas com um rolo compactador vibratório (Figura 30). Foram empregados 3 (três) tipos de materiais de aterro: areia (0 – 4 mm), cascalho arredondado (0 –

60 mm) e brita angular (0 – 22 mm). Uma parte das amostras também foi exposta a hidrólise e a radiação solar.

Figura 29 – Teste de instalação em campo em grande escala.



Fonte: Hufenus *et al.* (2005).

Figura 30 – Compactação com rolo vibratório.



Fonte: Hufenus *et al.* (2005).

Hufenus *et al.* (2005) concluíram que a capacidade de sobrevivência de um geossintético depende principalmente do tipo (formato, elemento de tração, etc.) e, secundamente, da natureza do polímero. Os danos de instalação foram influenciados diretamente pela geometria e distribuição do tamanho das partículas do solo, bem como a energia de compactação. A Tabela 8 apresenta os fatores de redução de resistência para geogrelhas biaxiais e uniaxiais, em relação à energia de compactação, obtidos pelos autores.

Tabela 8 – Fatores de redução para geogrelhas biaxiais e uniaxiais.

SOLOS	FATORES DE REDUÇÃO	
	Energia ≤ 55 kPa	Energia > 55 kPa
Solos finos (argila, silte e areia)	1,0 – 1,2	1,1 – 1,4
Solos grosseiros arredondados (< 150 mm)	1,0 – 1,3	1,1 – 1,5
Solos grosseiros angulares (< 150 mm)	1,1 – 1,5	1,2 – 1,8

Fonte: modificado de Hufenus *et al.* (2005).

Paula *et al.* (2009b) estudaram o efeito da danificação durante a instalação no comportamento mecânico de tração a curto e longo prazo de uma geogrelha de poliéster (PET). Os autores reproduziram danos de instalação por meio de experimentos de campo utilizando dois tipos de solos (Solo 1 – brita a granel, com dimensão máxima das partículas de 50,8 mm; e Solo 2 – solo residual do granito, com dimensão máxima das partículas de 5 mm) e duas energias de compactação (EC 1 – 90% do Proctor normal; e EC 2 – 98% do Proctor normal). Os fatores

de redução de resistência encontrados pelos autores são apresentados na Tabela 9. Os autores concluíram que o solo constituído por partículas maiores (Solo 1) e o emprego de maior energia de compactação (EC 1) ofereceram maiores danos de instalação à geogrelha analisada.

Tabela 9 – Fatores de redução de geogrelhas de poliéster.

FATORES DE REDUÇÃO				
Solo 1		Solo 2		
EC 1	EC2	EC 1	EC2	
1,60	1,84	1,29	1,34	

Fonte: modificado de Paula *et al.* (2009b).

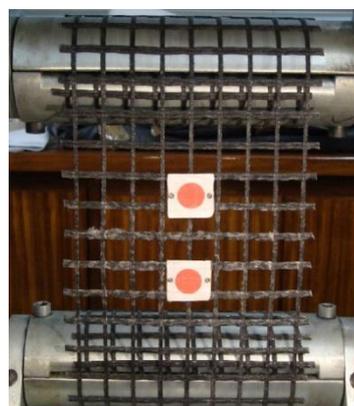
Pinho-Lopes e Lopes (2015) realizaram testes laboratoriais de danos mecânicos sob carga cíclica e à abrasão – com exposições únicas e múltiplas – para avaliar a resistência de três tipos de geossintéticos (geotêxtil, geogrelha tecida e geocomposto). Os ensaios realizados pelos autores não tiveram a pretensão de simular condições reais de campo, mas apenas possibilitar comparações entre materiais testados nas mesmas condições. Os geossintéticos foram colocados entre 2 (duas) camadas de um agregado sintético, com tamanhos de grão entre 5 mm e 10 mm (Figura 31), e submetidos a uma carga cíclica de 10 a 500 kPa, a uma frequência de 1 Hz, durante 200 ciclos de carga. Ao final do ensaio, a amostra foi removida e submetida a ensaios de tração (Figura 32).

Figura 31 – Equipamento utilizado para testes laboratoriais de danos mecânicos.



Fonte: Lopes e Lopes (2015).

Figura 32 – Ensaio de tração em amostras danificadas mecanicamente.



Fonte: Lopes e Lopes (2015).

Os resultados dos ensaios de tração revelaram que os danos foram mais efetivos – particularmente à abrasão – nas geogrelhas e nos geocompostos comparados ao geotêxtil. Os

fatores de redução para danos mecânicos foram de: 1,18, para as geogrelhas tecidas; 1,43, para os geocompostos; e 1,01, para o geotêxtil. Os autores concluíram que os danos causados aos elementos das geogrelhas, como cortes e divisões, reduziram o número de elementos solicitados durante o ensaio de tração. Para o geotêxtil, devido a sua elevada massa por unidade de área e espessura, os danos não foram transmitidos em toda a sua estrutura, e, quando submetido a testes de tração, a carga foi transferida a outros filamentos que não haviam sido danificados.

2.4.4 Degradação ambiental

No que diz respeito ao envelhecimento dos geossintéticos, a primeira característica a ser considerada é a sua estrutura molecular. Os polímeros são moléculas grandes construídas por meio da adição (polimerização) de pequenas moléculas repetitivas chamadas de monômeros. Portanto, a composição química do polímero determinará as suas propriedades físicas e químicas e os mecanismos de degradação susceptíveis (KAY *et al.*, 2004).

O polímero de poliéster (PET) possui excelente resistência à fluência e a outros processos envolvendo a reorganização da cadeia interna. No entanto, em determinadas condições, podem ser sensíveis a produtos químicos, tais como ácidos inorgânicos, ácidos orgânicos halogêneos, bases inorgânicas e orgânicas, álcool benzílico e fenóis halogêneos. O polímero de Polipropileno (PP) é composto por átomos de carbono e hidrogênio em sua estrutura molecular e possuem limitações a ambientes frios (-10°C) por se tornar frágeis e perder sua resistência. De forma geral, a temperaturas mais elevadas, o PP é altamente resistente à fluência, ao relaxamento e à fadiga. Porém, são sensíveis à oxidação devido à presença de ligações de carbono-hidrogênio mais fracas no átomo de carbono terciário (KAY *et al.*, 2004).

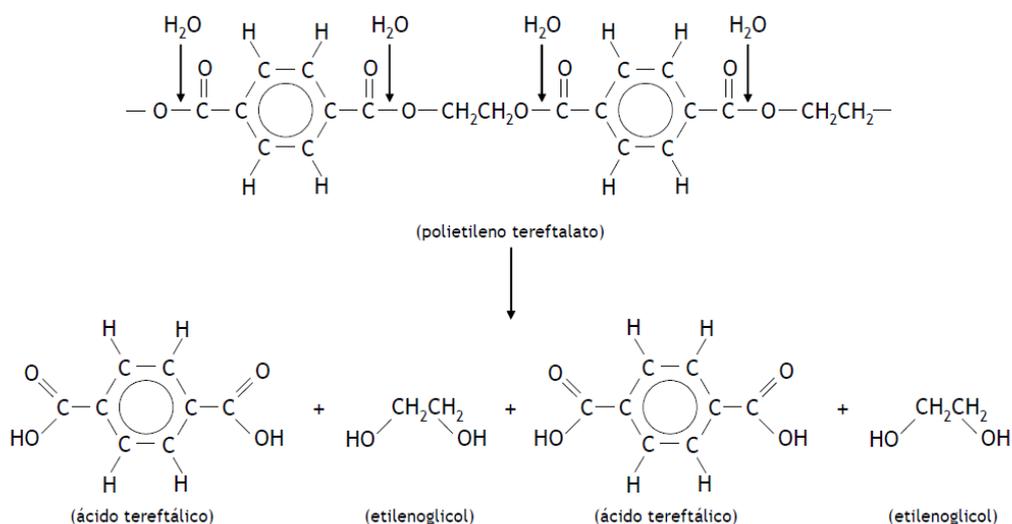
Segundo Carneiro (2009), os principais agentes da degradação dos polímeros são:

Ação de líquidos: Os líquidos absorvidos pelos polímeros podem quebrar as ligações entre as cadeias poliméricas, aumentar a distância entre essas cadeias e reduzir sua coesão, causando um aumento das dimensões dos materiais poliméricos e uma perda de rigidez. Os danos podem ser reversíveis ou causar alterações irreversíveis na estrutura desses materiais, com a remoção total ou parcial dos aditivos existentes nos geossintéticos por lixiviação ou volatilização. A resistência dos geossintéticos ao contato com líquidos vai depender do

processo de sua fabricação: as poliolefinas têm maior resistência aos ácidos, às bases e à maioria dos solventes; o PET é mais sensível à hidrólise; e as poliamidas aos ácidos.

A hidrólise é a reação química que acontece entre as moléculas da água e as dos polímeros, reduzindo suas massas moleculares, tornando-os mais frágeis e quebradiços. Essa reação depende do nível de temperatura (mais lentas em temperatura ambiente), da umidade e do pH (intensificada em meios ácidos e alcalinos). Os poliésteres (PET) são mais afetados pela hidrólise em meios alcalinos (elevado pH) de que as poliamidas, essas mais sensíveis a meios ácidos (baixo pH). A Figura 33 ilustra a reação de hidrólise do PET.

Figura 33 – Reação de despolimerização do polietileno tereftalato por hidrólise.



Fonte: Carneiro (2009).

De forma geral, os polímeros, à temperatura ambiente, possuem boa resistência à ação dos líquidos em contato com os solos naturais e os agregados por não possuem substâncias quimicamente agressivas.

Ação da temperatura: A ação da temperatura pode causar danos aos geossintéticos como resultado: i) da aceleração dos mecanismos de degradação dos polímeros, ii) da dissociação de suas ligações químicas, da formação de radicais livres, e iii) das dilatações ou contrações térmicas. Esses danos são potencializados com o aumento da temperatura. A radiação UV é a principal causa desses danos ao quebrar as ligações químicas existentes nos polímeros. Apesar de essa radiação representar apenas 4% do espectro solar, a exposição deve ser evitada por causar: i) descoloração, ii) aparecimento de fissuras, iii) fragilização e iv) modificação de suas propriedades.

Contato com oxigênio: O contato com o oxigênio pode gerar falhas prematuras dos geossintéticos através da oxidação que acontece normalmente com alterações físicas e mecânicas desses polímeros, tornando-os frágeis e quebradiços. Esse processo pode ser acelerado pela luz solar (radiação UV), aumento da temperatura, presença de cátions metálicos, humidade, fadiga mecânico, etc.

Ação dos microrganismos: O processo de degradação dos geossintéticos por microrganismos pode acontecer pela: i) metabolização de segmentos da cadeia polimérica, potencializada pela hidrólise ou oxidação enzimática, e ii) por reações químicas, produzidas pelo metabolismo dos microrganismos. Esse processo de degradação é mais potencializado em ambientes úmidos e temperatura estável em torno dos 30°C.

2.4.5 Degradação mecânica e química de geogrelhas causadas por RCD-R.

Com a finalidade de viabilizar o emprego dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em obras de estruturas reforçadas com geossintéticos, autores têm estudado os efeitos dos danos mecânicos de instalação e degradação química e biológica no comportamento físico, mecânico e hidráulico desses elementos de reforço.

Santos (2011) reproduziu danos mecânicos e químicos em geossintéticos empregados em uma estrutura experimental de solo reforçado construída com RCD-R. O autor submeteu geogrelhas a 3 (três) cenários: i) compactação com rolo leve (1,45 kN); ii) compactação com compactador à percussão tipo “sapo”; e iii) compactação com rolo leve e contato com RCD-R por um período de 15 meses. As Figuras 34 e 35 ilustram: i) a caixa utilizada para reprodução do dano mecânico; e a exumação das amostras mantidas enterradas por um período de 15 meses, respectivamente.

Figura 34 – Caixa utilizada para reprodução do dano mecânico.



Fonte: Santos (2011).

Figura 35 – Exumação de amostras enterradas por um período de 15 meses.



Fonte: Santos (2011).

Os valores obtidos por Santos (2011) demonstram que as amostras de geogrelhas submetidas à compactação com rolo apresentaram uma redução de resistência menor em relação às amostras compactadas com o compactador tipo “sapo”, com fatores de redução de 1,12 e 1,28, respectivamente. Para as amostras danificadas com o rolo e enterradas no RCD-R por um período de 15 meses, o fator de redução foi de 1,20. Essas amostras apresentaram uma redução “adicional” de resistência de aproximadamente 7% em relação às amostras compactadas apenas pelo rolo, uma consequência da exposição das fibras das geogrelhas após a compactação e possibilitando maiores efeitos do contato com o RCD-R. Vale ressaltar que o RCD-R apresentou valores médio de pH igual a 8,84, com coeficiente de variação de 0,4%, dentro dos limites recomendados ($4 < \text{pH recomendado} < 10$). Os fatores de redução de resistência obtidos pelo autor estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatores de redução de resistência da geogrelha a danos causados por RCD-R

AMOSTRA	FATORES DE REDUÇÃO
Rolo	1,12
“Sapo”	1,28
Exumada	1,20

Fonte: Santos (2011).

Vieira e Pereira (2015) reproduziram degradação química e ambiental, causado pelo RCD-R, em amostras danificadas pela instalação e exumadas após um período de 06 (seis) meses. Para o estudo, foram utilizados: uma geogrelha uniaxial de PEAD e um geotêxtil de PP não tecido reforçado com fios de PET. Para a realização do experimento, foi construído um aterro plano com dimensões de 2 m por 3 m, em planta, e altura de 0,45 m; os geossintéticos foram

dispostos e cobertos com RCD-R manualmente (Figura 36), e, em seguida, a camada superior (altura de 0,20 m) foi compactada com placa compactadora (Figura 37).

Figura 36 – Colocação manual do RCD-R sobre o geossintético.



Fonte: Vieira e Pereira (2015)

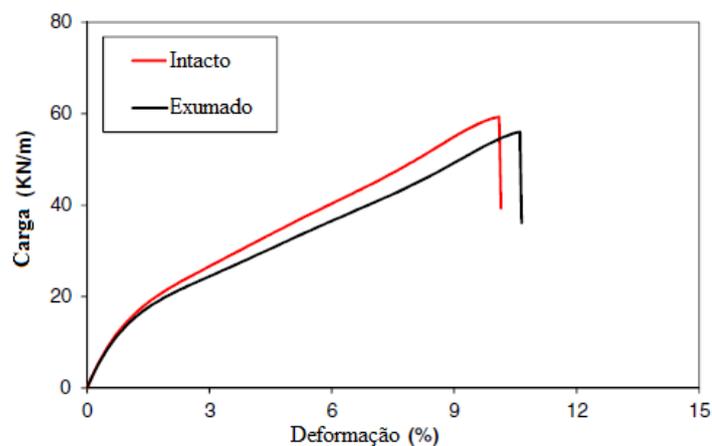
Figura 37 – Compactação da camada superior.



Fonte: Vieira e Pereira (2015).

Os resultados dos ensaios de tração – comparando os corpos de provas virgens e exumados – indicaram que os efeitos do RCD-R no comportamento de carga-deformação a curto prazo dependeram do geossintético utilizado. Para geogrelha de PEAD, o RCD-R induziu uma pequena diminuição na resistência à tração (5,9%) e redução da rigidez à tração da geogrelha. Para o geotêxtil, a redução da resistência à tração não foi muito significativo. As curvas de carga-deformação média para corpos de provas virgens e corpos de provas exumados das geogrelhas foram semelhantes, porém as coordenadas de ruptura foram deslocadas, conforme ilustra a Figura 38.

Figura 38 – Comparação entre as curvas de tensões de geogrelhas virgens e exumados.



Fonte: Vieira e Pereira (2015).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as informações sobre os materiais e métodos utilizados na pesquisa: i) as características dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R); ii) a metodologia de coleta das amostras de RCD-R, bem como o seu processo produtivo; e iii) os tipos e as propriedades das geogrelhas utilizadas. São descritas as normas consultadas, os procedimentos seguidos para execução dos trechos experimentais de estradas não pavimentadas reforçadas, os ensaios laboratoriais realizados e a metodologia seguida para os cálculos dos fatores de redução de resistência.

3.1 Materiais

3.1.1 Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) empregados neste estudo foram coletados em uma usina de reciclagem de resíduo de construção e demolição (RCD), localizada em Camaragibe-PE, na Região Metropolitana do Recife-PE (RMR), com capacidade de britagem de 250 toneladas por hora. Os RCD que chegam à usina são pesados e uma inspeção visual é realizada para garantir que o material recebido possua não mais que 30% de contaminantes. Posteriormente, as caçambas são esvaziadas na área de transbordo e triagem, onde ocorre à segunda inspeção visual; estando de acordo com as exigências da empresa, os resíduos são armazenados e em seguida encaminhados para o processo de britagem; caso o material possua mais de 30% de contaminantes, o preço de despejo é renegociado.

O RCD é britado sem um processo de pré-seleção, a remoção das impurezas (tais como, madeira, plástico, papel e metais) é realizada durante o processo de britagem, os elementos metálicos são removidos por meio de uma correia transportadora magnética. A simplicidade do processo garante que o agregado reciclado tenha baixo consumo de energia e, portanto, uma baixa energia incorporada. A Figura 39 apresenta o equipamento utilizado na britagem do RCD. A empresa produz 5 (cinco) materiais: i) areia grossa, ii) “expurgo para aterro”, iii) brita cascalhinho, iv) brita 19 e v) brita 25. O material coletado para o estudo é denominado pela usina como “expurgo para aterro”, classificado como material “misto”, sendo composto,

predominantemente, por solo e, com uma menor participação, por fragmentos de concreto, cerâmica e rocha (Figura 40).

Figura 39 – Equipamento utilizado para a britagem do RCD.



Fonte: A autora.

Figura 40 – RCD-R misto.



Fonte: A autora.

Para analisar as características dos RCD-R produzidos pela usina, amostras foram coletadas em 02 (duas) etapas distintas. Inicialmente, foram coletadas 05 (cinco) amostras durante um período de aproximadamente 01 (um) mês, com intervalos de 07 (sete) dias. Posteriormente, mais uma amostragem foi realizada durante a execução de cada trecho experimental. As quantidades e as datas das coletas são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Plano de coleta realizado para o RCD-R.

AMOSTRA	DATA DE COLETA	QUANTIDADE (kg)	LOCAL
RCD-R 01	29.03.2016	74	Pilha de estocagem
RCD-R 02	06.04.2016	68	Pilha de estocagem
RCD-R 03	13.04.2016	79	Pilha de estocagem
RCD-R 04	20.04.2016	81	Pilha de estocagem
RCD-R 05	27.04.2016	85	Pilha de estocagem
RCD-R 06	27.05.2016	65	Trecho experimental 01
RCD-R 07	06.09.2016	69	Trecho experimental 02

Fonte: A autora.

Como as coletas do material aconteceram em uma época na qual a usina de reciclagem não estava operando diariamente, optou-se pela coleta nas pilhas britada mais recentemente, tomando-se o cuidado de remover a camada superficial que estavam sujeitas a intemperes. A Figura 41 apresenta a coleta de RCD-R para caracterização do material.

Figura 41 – Coleta da amostra de RCD-R na pilha.



Fonte: A autora.

Após serem transportadas para a Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, as amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e quarteadas em amostras representativas (Figura 42). Durante esse processo, foram tomados os devidos cuidados para não serem perdidas as partes mais finas do material. Em seguida, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos para facilitar seu manuseio (Figura 43). Essa etapa seguiu as recomendações das normas NBR 6457 – “Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização” (ABNT, 1986a) e NBR 6508 – “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica” (ABNT, 1984b).

Figura 42 – Secagem da amostra ao ar.



Fonte: A autora.

Figura 43 – Acondicionamento das amostras em sacos plásticos após o quarteamento.



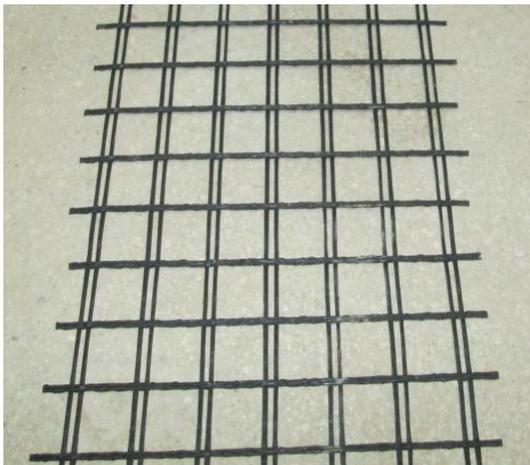
Fonte: A autora.

3.1.2 Geogrelhas

Foram empregados 02 (dois) tipos de geossintéticos: i) geogrelha de poliéster (PET) de alta tenacidade e de baixa fluência, com revestimento protetor polimérico (Figura 44); e ii) geogrelha de polipropileno (PP), biaxial flexível, bidirecionais, fabricada a partir de

filamentos de polipropileno de alta tenacidade e baixa fluência, o que confere elevadas resistências e baixas deformabilidades (Figura 45). Esses produtos são usualmente empregados como elementos de reforço em estradas não pavimentadas. As propriedades básicas das geogrelhas utilizadas, segundo o fabricante, estão apresentadas nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Figura 44 – Geogrelha de PET.



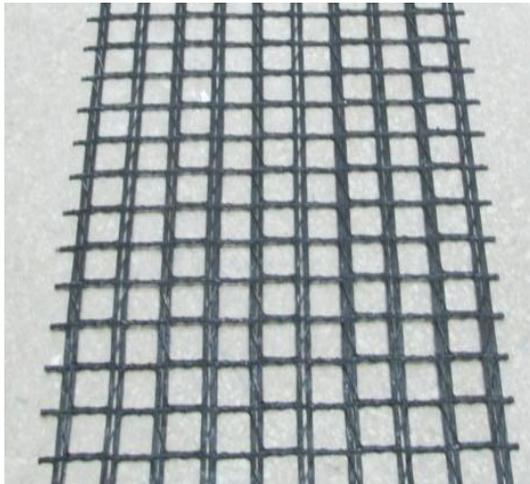
Fonte: A autora

Tabela 12 – Especificações técnicas da geogrelha de poliéster (PET).

CARACTERÍSTICA DO PRODUTO	VALORES
Abertura da malha	25 x 25 mm
Resistência à tração – direção longitudinal	≥ 35 kN/m
Resistência à tração – direção transversal	≥ 20 kN/m
Módulo de rigidez a 5% deformação	≥ 350 kN/m
Deformação na resistência nominal	≤ 10 %

Fonte: O fabricante.

Figura 45 – Geogrelha de PP.



Fonte: A autora.

Tabela 13 – Especificações técnicas da geogrelha de polipropileno (PP).

CARACTERÍSTICA DO PRODUTO	VALORE
Abertura da malha	15 x 15 mm
Resistência à tração – direção longitudinal	≥ 15 kN/m
Resistência à tração – direção transversal	≥ 24 kN/m
Módulo de rigidez a 2% deformação	≥ 400 kN/m
Deformação na resistência nominal	≤ 10 %

Fonte: O fabricante.

Dentro do objetivo de comparar o desempenho dos (02) dois tipos de geogrelhas utilizadas, e verificando que os valores de resistência à tração na direção transversal estão mais próximos entre si: 20 kN/m, para a geogrelha (PET), e 24 kN/m, para a geogrelha (PP). Cada corpo de prova foi cortado com dimensões de 200 mm de largura e 1200 mm de comprimento e adotado o sentido transversal para realização dos ensaios de tração.

3.2 Métodos adotados na caracterização do RCD-R

Como o presente trabalho aborda uma proposta de aplicação de RCD-R em obras geotécnicas, as amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização de solos. Para isso, foram consultados os procedimentos prescritos nas seguintes normas:

- NBR 6457/86 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 7181/84 – Solos – Análise granulométrica;
- NBR 6508/84 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;
- NBR 6459/84 – Solo – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/84 – Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de compactação;
- NBR 9895/87 – Solo – Índice de suporte Califórnia;
- NBR 7185/86 – Determinação da massa específica aparente, “*in situ*”, com emprego do frasco de areia;
- DNER-ME 398 – Agregados – Índice de Degradação após compactação Proctor (ID_p).

No ensaio de compactação foi utilizado o cilindro de CBR (*California Bearing Ratio*), conforme recomendação da NBR 7182 (ABNT, 1986b), devido ao fato do material não passar integralmente na peneira 4,8mm. Foi empregada a energia de Proctor Normal para os ensaios de compactação e ensaio de CBR, sem reuso de material, devido à necessidade avaliar a solitação do material de aterro no geossintético e pelo fato do aumento da energia de compactação realizar mais quebra dos grãos de RCD-R.

Para a avaliação da degradação dos grãos provocada pela compactação com energia de Proctor Normal, foi utilizada a metodologia adotada por Jiménez (2011) que utiliza o índice de degradação (ID_p) estabelecido para agregados de rocha naturais, a qual consiste na determinação do deslocamento médio da curva granulométrica da amostra degradada pelo ensaio de compactação em relação à amostra inicial.

Para a determinação do CBR, as amostras foram compactadas nas referidas umidades ótimas e imersas durante 96 horas com leituras efetuadas em intervalos de 24 horas para medir a

possível expansão do material. Posteriormente, os corpos de provas foram ensaiados com prensa manual com capacidade de carga de 2.008 kgf, pressão de 0,104 kgf/cm² a uma velocidade de 1,27 mm/min.

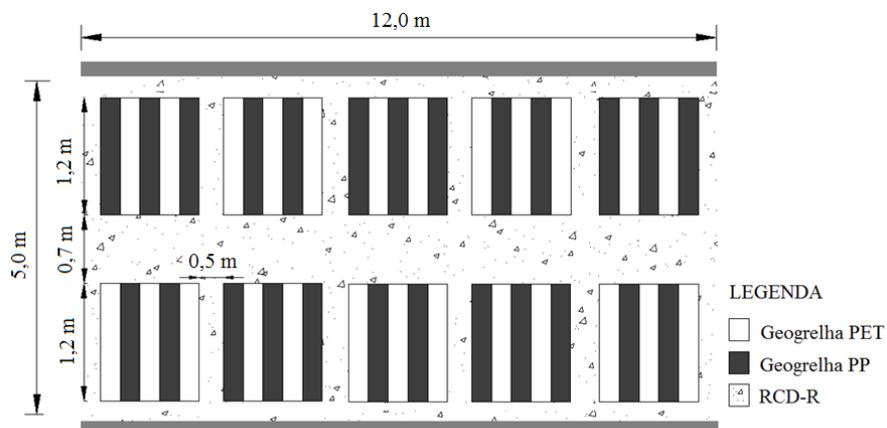
3.3 Descrição dos Trechos Experimentais

Três trechos experimentais foram instalados numa área da usina de reciclagem de RCD, localizada em Camaragibe-PE, considerando-se os métodos construtivos empregados na execução de estradas não pavimentadas. O carregamento cíclico foi aplicado por meio do trânsito de caminhões.

- i) trecho experimental 01 (executado no dia 27 de maio de 2016): avaliar o dano mecânico (instalação e carregamento) causado pela “compactação” com escavadeira e placa vibratória e posterior tráfego de caminhões;
- ii) trecho experimental 02 (executado no dia 06 de setembro de 2016): avaliar o dano mecânico (instalação e carregamento) causado pela compactação com rolo compactador e posterior tráfego de caminhões;
- iii) trecho experimental 03 (executado no dia 06 de setembro de 2016): avaliar o dano químico, decorrente do contato do RCD-R, em amostras de geogrelhas submetidas a dano mecânico (dano de instalação – rolo compactador).

A planta baixa dos trechos experimentais 01 e 02 é apresentada na Figura 46. O trecho experimental 03 foi construído com dimensões de 2,5 m por 3,5 m, em planta.

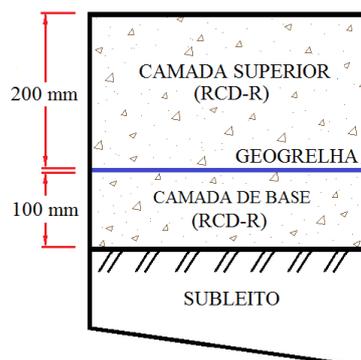
Figura 46 – Planta baixa do trecho experimental de estradas não pavimentadas.



Fonte: A autora.

A seção dos três trechos experimentais foi formada por um subleito de solo natural e duas camadas estruturais compostas por RCD-R: uma camada base (100 mm) e uma camada superior (200 mm) que esteve exposta aos desgastes. Entre as camadas de RCD-R foram dispostos corpos de provas de geogrelhas. O esquema das seções com suas devidas espessuras estão ilustrados na Figura 47.

Figura 47 – Seção do trecho experimental de estradas não pavimentadas.



Fonte: A autora.

No total, 50 (cinquenta) amostras de geogrelha foram submetidas a danos e comparadas a 10 (dez) amostras virgens. A Tabela 14 apresenta o quantitativo de amostras do estudo.

Tabela 14 – Quantidade de amostras de geogrelha.

DANO INVESTIGADO	MÉTODO EMPREGADO	QUANTIDADE DE AMOSTRA	
		Geogrelha (PET)	Geogrelha (PP)
Amostras virgens.	[Não se aplica]	5	5
Mecânico (instalação).	Trecho experimental 01: sem carregamento, exumada no mesmo dia.	5	5
Mecânico (instalação).	Trecho experimental 02: sem carregamento, exumada no mesmo dia.	5	5
Mecânico (instalação e carregamento cíclico).	Trecho experimental 01: com carregamento.	5	5
Mecânico (instalação e carregamento cíclico).	Trecho experimental 02: com carregamento.	5	5
Químico em amostras danificadas.	Trecho experimental 03: sem carregamento, exumada depois de 42 dias.	5	5
TOTAL		30	30

Fonte: A autora.

O procedimento padrão adotado para a execução do experimento de campo seguiu as seguintes etapas:

- i) escavação do trecho experimental (12,0 m de comprimento; 5,0 m de largura; e 0,30 m de profundidade) com emprego da escavadeira (Figura 48);

Figura 48 – Escavação do trecho experimental 01.



Fonte: A autora.

- ii) compactação e regularização da superfície do subleito, com prévio umedecimento do subleito, mediante: a passagem da escavadeira (e auxílio da caçamba) (Figura 49) e placa vibratória (Figura 50), para o trecho 01; ou compactação por rolo compactador (Figura 51), para os trechos 02 e 03;

Figura 49 – Compactação do subleito e regularização da superfície com escavadeira (trecho 01).



Fonte: A autora.

Figura 50 – Compactação do subleito com placa vibratória (trecho 01).



Fonte: A autora.

Figura 51 – Compactação do subleito com rolo compactador (trecho 02).



Fonte: A autora.

- iii) lançamento e espalhamento do RCD-R da camada base (100 mm de espessura) (Figura 52), sem umedecimento do RCD-R, uma vez que o mesmo já estava úmido;

Figura 52 – Espalhamento do RCD-R na camada base.



Fonte: A autora.

- iv) compactação e regularização da superfície da camada base (100 mm de espessura), mediante: a passagem da escavadeira (e auxílio da caçamba) (Figura 53) e placa vibratória (Figura 54), para o trecho 01; ou compactação por rolo compactador (Figura 55), para os trechos 02 e 03;

Figura 53 – Compactação e regularização da superfície da camada de base com escavadeira (trecho 01).



Fonte: A autora.

Figura 54 – Compactação da camada de base com placa vibratória (trecho 01) .



Fonte: A autora.

Figura 55 – Compactação da camada de base com rolo compactador (trecho 02).



Fonte: A autora.

- v) disposição dos corpos de prova de geogrelhas no trecho experimental 01 (Figura 56) e no trecho experimental 02 (Figura 57);

Figura 56 – Corpos de prova de geogrelha dispostos (trecho 01).



Fonte: A autora.

Figura 57 – Corpos de prova de geogrelha dispostos (trecho 02).



Fonte: A autora.

- vi) Lançamento (Figura 58) e espalhamento manual (Figura 59) do RCD-R da camada superior (0,20 m de espessura);

Figura 58 – Lançamento do RCD-R.



Fonte: A autora.

Figura 59 – Espalhamento manual do RCD-R da camada superior.



Fonte: A autora.

- vii) coleta de amostras de RCD-R para caracterização dos materiais utilizado nos trechos experimentais (Figura 60);

Figura 60 – Coleta da amostra de RCD-R.



Fonte: A autora.

- viii) compactação e regularização da superfície da camada superior (200 mm de espessura), mediante: a passagem da escavadeira (e auxílio da caçamba) (Figura 61) e placa vibratória (Figura 62), para o trecho 01; ou compactação por rolo compactador (Figura 63), para os trechos 02 e 03;

Figura 61 – Compactação e regularização da superfície da camada superior com escavadeira (trecho 01).



Fonte: A autora.

Figura 62 – Compactação da camada superior com placa vibratória (trecho 01) .



Fonte: A autora.

Figura 63 – Compactação da camada superior com rolo compactador (trecho 02).



Fonte: A autora.

- ix) determinação da massa específica aparente *in situ* com emprego do frasco de areia (Figura 64) e determinação da umidade com *speed test* (Figura 65);

Figura 64 – Determinação da massa específica.



Fonte: A autora.

Figura 65 – Determinação da umidade.



Fonte: A autora.

- x) exumação dos corpos de prova de geogrelhas (Figura 66).

Figura 66 – Exumação das geogrelhas.



(a)

Fonte: A autora.



(b)

No cenário de investigação do dano químico – trecho experimental 03 – as amostras de geogrelhas (Figura 67) foram submetidas a danos de instalação com um rolo compactador (Figura 68) – seguindo o procedimento padrão realizado no trecho experimental 02. Posteriormente, essas amostras foram mantidas enterradas por um período de 42 dias, sem exposição a carregamento cíclico. Como o período de exposição das amostras foi curto, o experimento foi realizado a título de curiosidade.

Figura 67 – Disposição dos corpos de provas de geogrelhas (trecho 03).



Fonte: A autora.

Figura 68 – Compactação da camada superior (trecho03).



Fonte: A autora.

As especificações técnicas dos equipamentos utilizados na compactação estão apresentadas nas Tabelas 15 a 17.

Tabela 15 – Especificações técnicas da escavadeira.

PESO OPERACIONAL (kN)	PRESSÃO SOBRE O SOLO (kN/m²)
210	40.000

Fonte: O fabricante.

Tabela 16 – Especificações técnicas da placa vibratória.

PESO (kg)	FORÇA CENTRÍFUGA (kN)	FREQUÊNCIA (Hz)	PROFUNDIDADE DE COMPACTAÇÃO (mm)
120	20	98	Até 300

Fonte: O fabricante.

Tabela 17 – Especificações técnicas do rolo compactador.

PESO (kg)	FORÇA CENTRÍFUGA (kN)	FREQUÊNCIA (Hz)	PROFUNDIDADE DE COMPACTAÇÃO (mm)	VIBRAÇÃO POR MINUTO (VPM)
1200	15	68	150 a 300	4000

Fonte: O fabricante.

3.4 Descrição de fatores externos

Os trechos experimentais 01 e 02 foram submetidos a carregamento cíclico causado pelo tráfego de caminhões (Figura 69).

Figura 69 – Tráfego de caminhões sobre o trecho experimental.



Fonte: A autora.

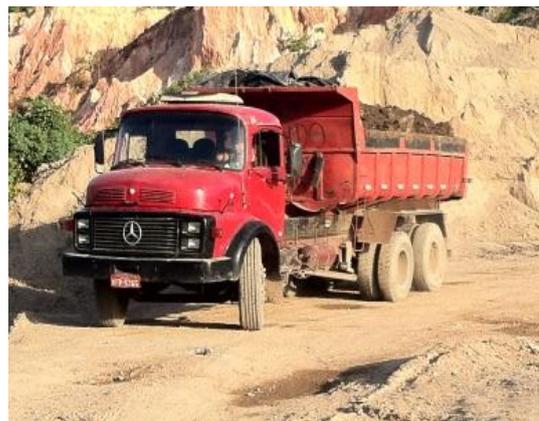
Observou-se que 2 (dois) tipos de caminhão passaram pelos trechos experimentais: i) caminhão com eixo simples e rodas duplas (Figura 70) e ii) caminhão com eixo tandem duplo (Figura 71) nas rodas traseiras.

Figura 70 – Caminhão eixo simples rodas duplas.



Fonte: A autora.

Figura 71 – Caminhão tandem duplo.



Fonte: A autora.

Cada caminhão passou 02 (duas) vezes pelos trechos experimentais, sendo uma vez vazio e outra vez carregado com RCD. Os números de ciclos e tipos de caminhões foram acompanhados por meio dos relatórios da balança da usina de reciclagem. Como a balança não calculava o peso por eixo, mas o peso total dos veículos foi adotado os Fatores de

Veículos (FV), fornecidos pelo DNIT (2010), expostos na Tabela 18, para cálculo dos efeitos de dano do carregamento cíclico, considerando os veículos vazios e com carga máxima.

Tabela 18 – Fatores de veículos DNER PRO 159/85 (AASHTO).

COMPOSIÇÃO	PESO TOTAL (t)	FATORES DE VEÍCULOS (FV)	
		Vazio	Carga máxima
ESRS + ESRD	16,0	0,103	2,722
ESRS + ETD	23,0	0,129	1,970

Fonte: modificado do DNIT (2010).

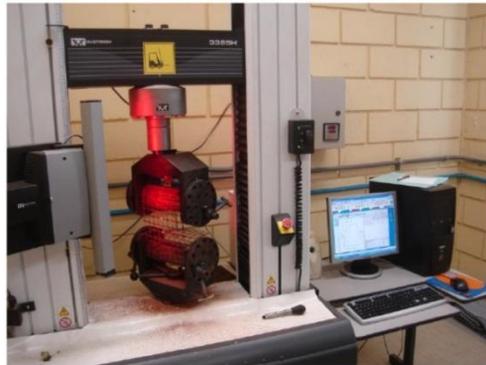
Os fatores de veículos vazios foram determinados pelo DNIT (2010) ao considerar as taras de cada tipo de veículo e a distribuição das cargas (peso próprio) por eixo para as condições mais desfavorável. Os fatores de veículos para carga máxima consistem na soma dos Fatores de Equivalência de Carga (FEC) de cada eixo do caminhão – por meio das equações apresentadas na Tabela 6, no item 2.2.3 –, considerando que as cargas por eixo são as máximas permitidas pela legislação brasileira.

Além disso, foram recolhidas as informações climatológicas (as precipitações e temperaturas) do local onde os experimentos foram construídos a partir da estação meteorológica mais próxima, localizada em Camaragibe-PE. Segundo a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), o nordeste brasileiro é caracterizado por possuir duas estações bastante distintas: uma chuvosa e outra seca. Isso se deve ao fato da região possuir dois tipos de variabilidade de clima e não apresentar mudanças relevantes de temperatura e outras variáveis meteorológicas ao longo do ano. A Região Metropolitana do Recife (RMR) possui variações de precipitação que vão de 180 mm até 1044 mm e temperaturas médias anuais de 25°C.

3.5 Ensaio de tração à faixa larga

A caracterização do efeito dos danos mecânicos (instalação e carregamento) e químico no comportamento mecânico das geogrelhas foi investigada por meio de ensaios de tração não confinada – ensaios de curto prazo – e, em seguida, calculado os fatores de redução de resistência. As amostras de geogrelha foram ensaiadas no Laboratório de Geossintéticos, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP) (Figura 72). Para a obtenção dos valores de referência, amostras virgens também foram ensaiadas sobre as mesmas condições de ensaio.

Figura 72 – Ensaio de resistência à tração à faixa larga (EESC-USP).



Fonte: Santos (2011).

Para a definição dos intervalos de confiança dos valores médios e consideração da ocorrência de danos nos demais cenários, foi adotada a metodologia proposta por Santos (2011), a qual determina um intervalo de confiança por meio da Distribuição de Student, utilizada para inferências estatísticas, particularmente, quanto o desvio padrão da população não é conhecido, e o tamanho da amostra é inferior a 30 ($n < 30$).

A metodologia adotada por Santos (2011) implica em:

- i) determinar a média (F_0) dos valores de resistência das amostras virgens;
- ii) definir o intervalo de confiança, para F_0 , a partir dos valores de resistência obtidos com as amostras virgens;
- iii) determinar as médias dos valores de resistência para cada um dos demais cenários de dano (F_i);
- iv) verificar se F_i encontra-se contido no intervalo de confiança de F_0 – valores de F_i dentro do intervalo de confiança de F_0 representariam incertezas sobre a repercussão dos danos dentro da margem de confiabilidade adotada e, nesse caso, assume-se um valor de fator de redução igual a 1,0; valores de F_i fora do intervalo de confiança de F_0 representariam ocorrência de dano;
- v) havendo dano, efetua-se o cálculo do fator de redução a partir dos valores de F_0 e F_i .

Os intervalos de confiança serão calculados pela Equação 3.1.

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n}} \quad (3.1)$$

onde: t : variável aleatória da Distribuição de Student; \bar{X} : média amostral; μ : média populacional; s : desvio padrão amostral; n : número de amostras.

4 RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

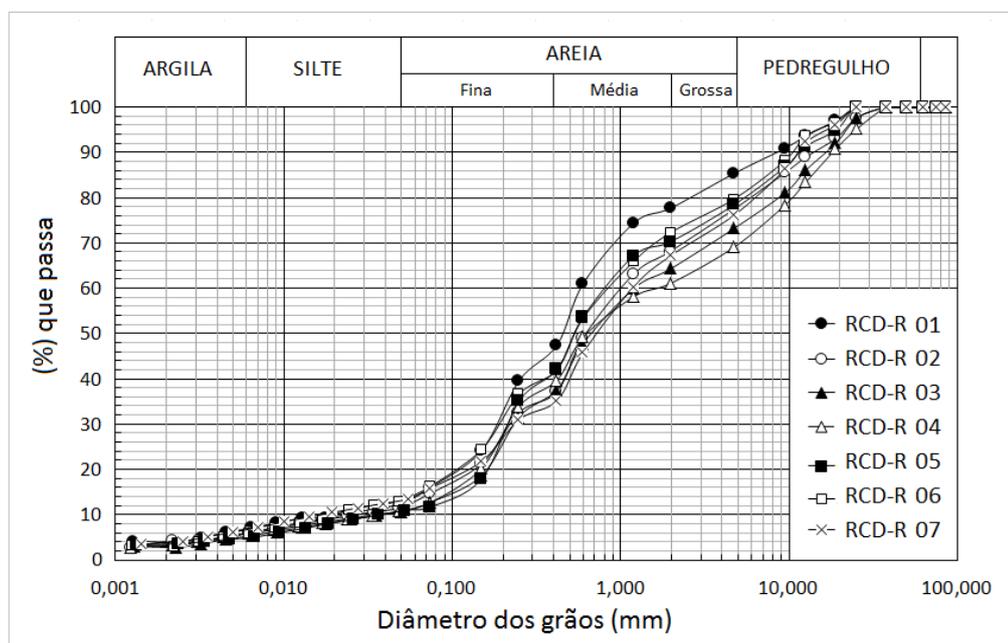
Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises: i) da caracterização geotécnica do RCD-R para fins de uso como material de aterro em estradas não pavimentadas; ii) e da degradação mecânica e química dos elementos de reforço – geogrelhas de poliéster e polipropileno. Para isso, foram calculados os fatores de redução de resistência: i) dos danos de instalação, para cada cenário de compactação; ii) dos danos do carregamento cíclico; e iii) do dano químico em amostras danificadas mecanicamente.

4.1 Caracterização do RCD-R

4.1.1 Análise Granulométrica

As curvas granulométricas revelaram que as amostras de RCD-R possuem curvas de distribuição semelhantes (Figura 73), representando que o processo de beneficiamento adotado pela usina de reciclagem segue um padrão de produção desse tipo de material.

Figura 73 – Curvas granulométricas obtidas para as amostras de RCD-R.



Fonte: A autora

Os RCD-R misto coletados na usina recicladora da RMR podem ser classificados como uma areia com pedregulho (Tabela 19).

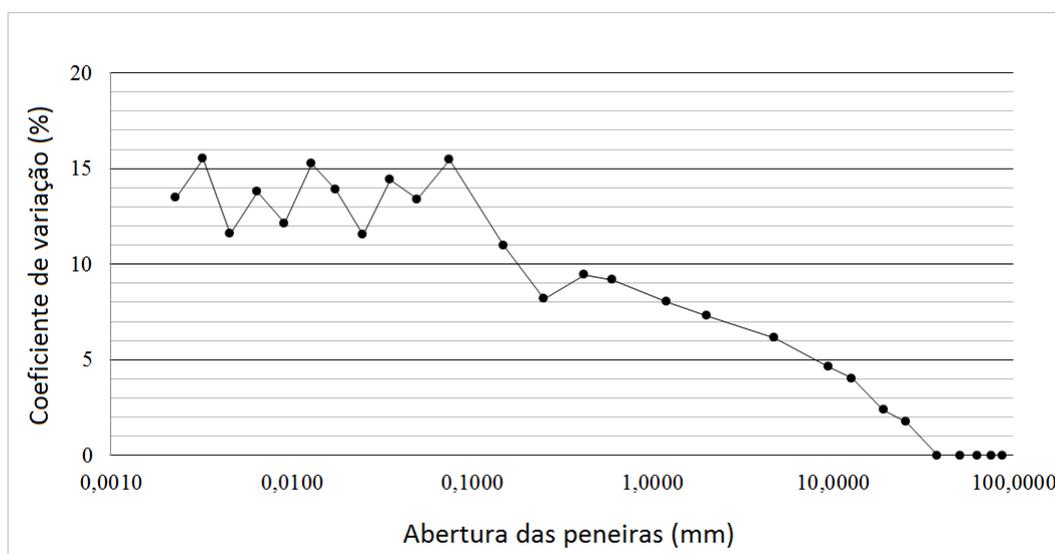
Tabela 19 – Participação média das frações de partículas na curva granulométrica média do RCD-R.

CLASSIFICAÇÃO	MÉDIA (%)
Pedregulho	31,20
Areia grossa	17,32
Areia média	23,65
Areia fina	15,39
Silte	3,24
Argila	9,21

Fonte: A autora.

Por meio da análise dos valores dos coeficientes de variação (CV) dos percentuais passantes de material em função das aberturas das peneiras (Figura 74), é possível observar que, de forma geral, os valores de CV diminuem à medida que aumentam as dimensões dos agregados. Este comportamento também foi observado por Santos (2007).

Figura 74 – Coeficientes de variação em função da dimensão dos grãos do RCD-R.



Fonte: A autora

O RCD-R misto apresentou dimensão máxima característica menor que 63 mm em todas as amostras; coeficiente de uniformidade (C_u) maior que 15 (quinze) e coeficientes de curvatura (CC) entre 01 (um) e 03 (três); exceto pela amostra de RCD-R 04, com CC igual a 0,7 (Tabela 20). De forma geral, de acordo com a NBR 15115 – “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos” (ABNT, 2004e), o RCD-R pode ser caracterizado como não uniforme e bem graduado.

Tabela 20 – Resultados das características granulométricas do RCD-R.

CLASSIFICAÇÃO	Cu	CC	% que passa na peneira nº 40
RCD-R 01	24	2,4	47,5
RCD-R 02	34	1,7	37,2
RCD-R 03	72	2,3	35,2
RCD-R 04	42	0,7	39,8
RCD-R 05	20	1,4	42,2
RCD-R 06	43	2,4	43,8
RCD-R 07	37	1,2	37,7
Média	38,86	1,73	40,49
C.V. (%)	40,44	35,76	9,80

Fonte: A autora.

A respeito do teor de material passante na peneira de abertura igual a 0,42 mm (nº 40), os resultados ficaram muito próximos do exigido pela NBR 15115 (ABNT, 2004e) nas amostras de RCD-R 02, 03 e 04; entretanto, as amostras de RCD-R 01, 05 e 06, não atenderam os requisitos, estando acima de 40%, provavelmente por serem composta por mais solo quando comparados com as demais.

4.1.2 Limites de Consistência

Todas as amostras ensaiadas de RCD-R não apresentaram limite de liquidez e índice de plasticidade (não plástica). O que representa um ponto positivo visto que a utilização desse material não deve apresentar parcela de resistência coesiva, sendo recomendado o uso de materiais granulares. Segundo Santos (2011), os procedimentos clássicos utilizados para identificação e classificação de solos são baseados em sua granulometria e suas características plásticas. Porém, o autor também ressalta a importância de considerar outras análises, uma vez que existem divergências entre os resultados obtidos em ensaios e no comportamento observado em obras.

4.1.3 Massa específica dos sólidos

As amostras de RCD-R misto apresentaram um valor médio de massa específica dos sólidos igual a 2,641 g/cm³, com coeficiente de variação de 3,35%. A Tabela 21 apresenta os resultados encontrados para a massa específica dos sólidos das amostras ensaiadas.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de massa específica dos sólidos.

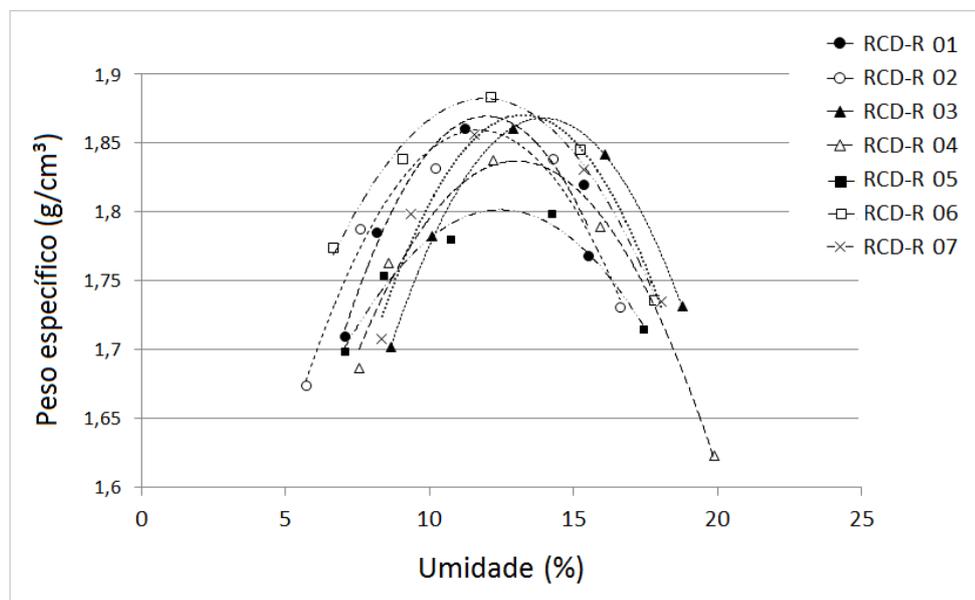
AMOSTRA	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)
RCD-R 01	2,645
RCD-R 02	2,731
RCD-R 03	2,523
RCD-R 04	2,745
RCD-R 05	2,515
RCD-R 06	2,715
RCD-R 07	2,616
Média	2,641
C.V. (%)	3,35

Fonte: A autora.

4.1.4 Compactação

Os ensaios de compactação revelaram um valor médio de massa específica seca máxima de 1,855 g/cm³, com coeficiente de variação de 1,39%; e um valor médio de umidade ótima de 12,62%, com coeficiente de variação de 6,09%. A Figura 75 apresenta as curvas de compactação das amostras de RCD-R misto na energia de Proctor Normal. Os pesos específicos máximos ($\gamma d_{m\acute{a}x}$) e as umidades ótimas (w_{ot}) estão expressos na Tabela 22.

Figura 75 – Curvas de compactação das amostras de RCD-R.



Fonte: A autora.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de compactação.

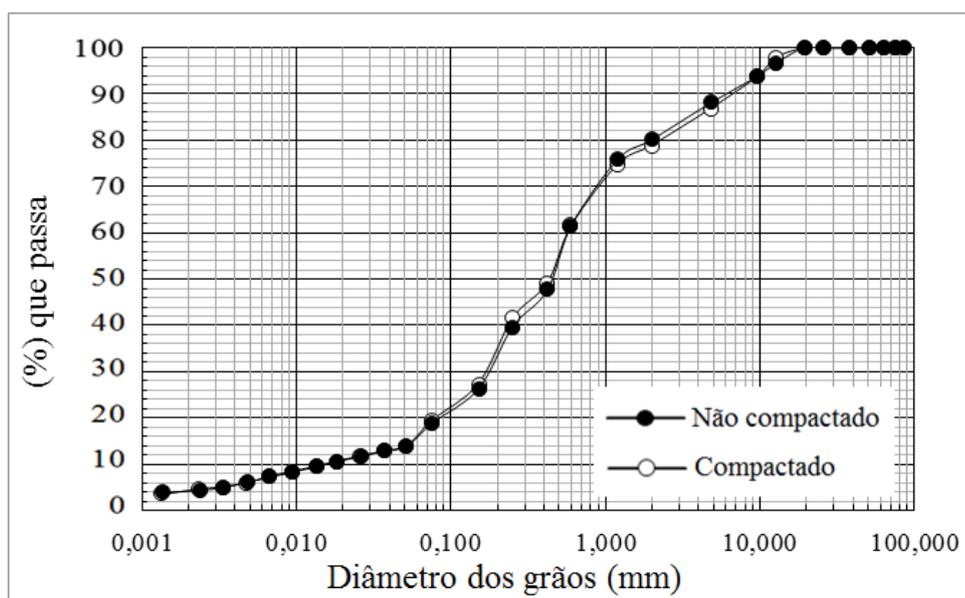
AMOSTRA	w_{ot} (%)	$\gamma d_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)
RCD-R 01	11,98	1,869
RCD-R 02	11,70	1,859
RCD-R 03	13,96	1,868
RCD-R 04	13,02	1,837
RCD-R 05	12,47	1,801
RCD-R 06	11,92	1,882
RCD-R 07	13,26	1,871
Média	12,62	1,855
C.V. (%)	6,09	1,39

Fonte: A autora.

4.1.5 Efeito da compactação na granulometria das amostras ensaiadas

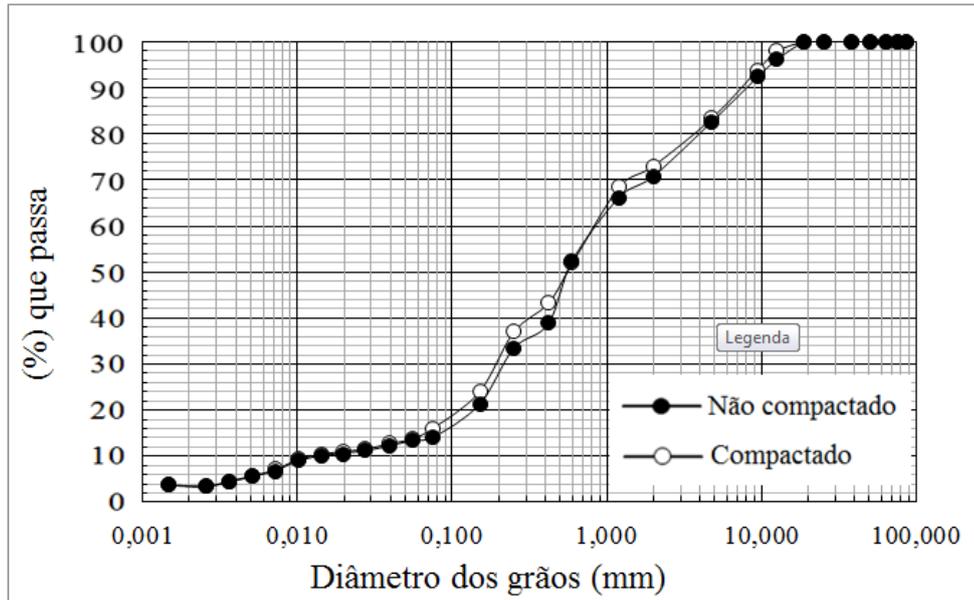
Para a análise dos efeitos de compactação na granulometria do RCD-R, foram realizadas análises granulométricas de amostras virgens (não compactadas) e amostras que já haviam sido submetidas ao ensaio de compactação. As Figuras 76 a 80 apresentam os resultados das granulometrias das amostras de RCD-R.

Figura 76 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 01.



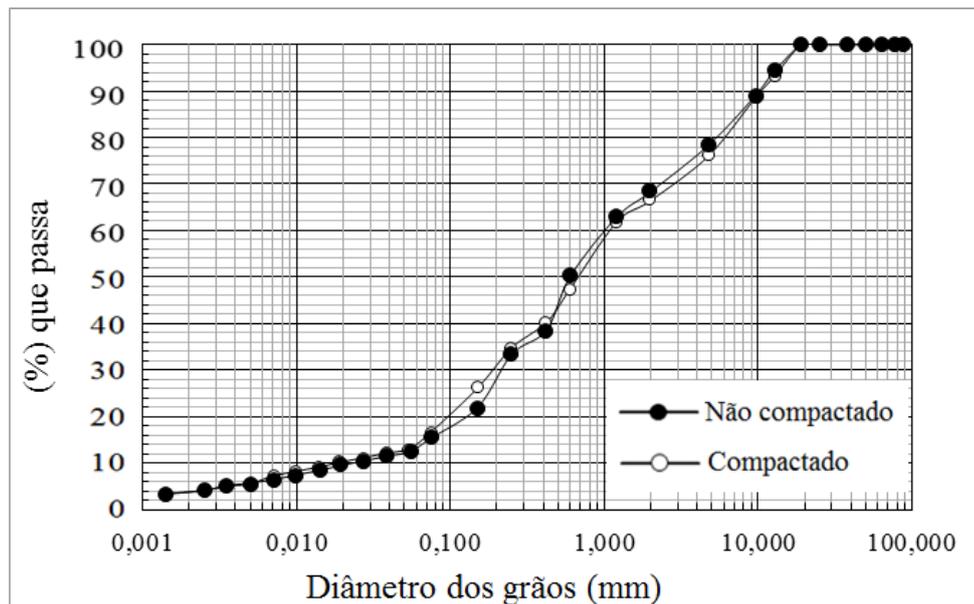
Fonte: A autora.

Figura 77 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 02.



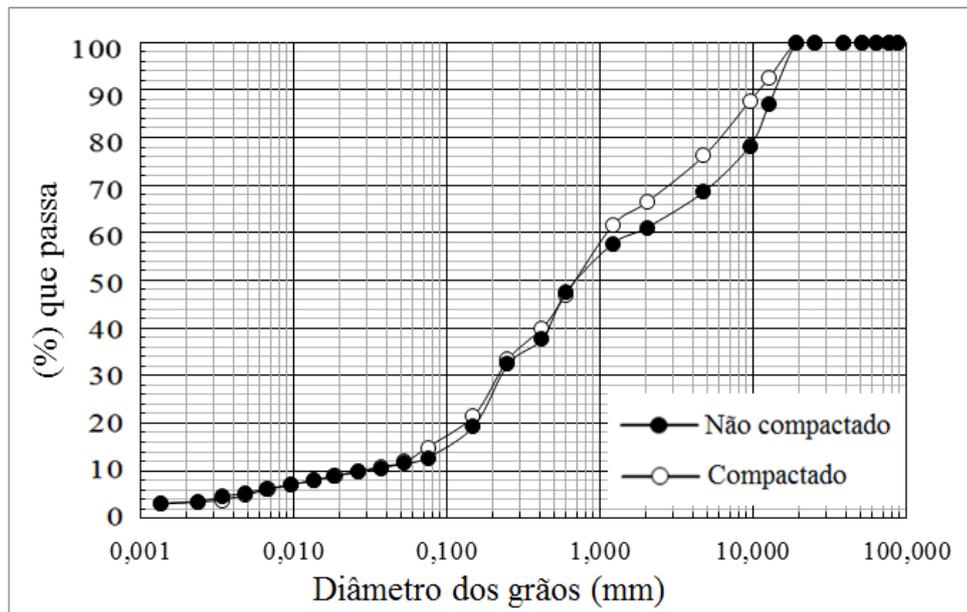
Fonte: A autora.

Figura 78 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 03.



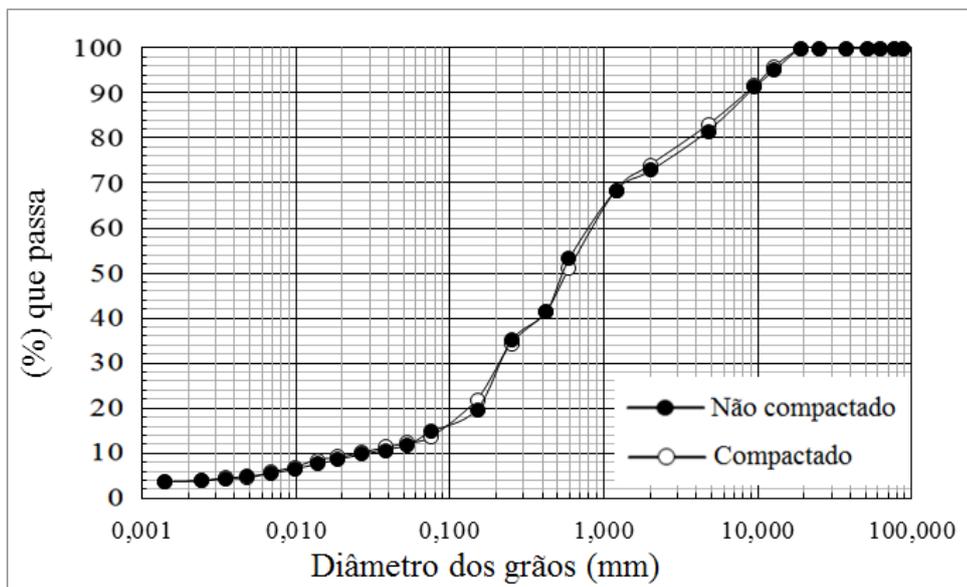
Fonte: A autora.

Figura 79 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 04.



Fonte: A autora.

Figura 80 – Efeito do ensaio de compactação na amostra de RCD-R 05.



Fonte: A autora.

A análise dos gráficos e do índice de quebra após a compactação (ID_p) (Tabela 23) revelou que a compactação com energia Proctor Normal não alterou significativamente a granulometria das amostras após a compactação, com ID_p médio de 2,13% para uma umidade média de 11,47%.

Tabela 23 – Índice de quebra após o ensaio de compactação (Proctor Normal).

AMOSTRA	w (%)	ID _p (%)
RCD-R 01	11,24	0,94
RCD-R 02	10,20	2,17
RCD-R 03	12,92	1,53
RCD-R 04	12,23	5,35
RCD-R 05	10,74	0,68
Média	11,47	2,13
C.V. (%)	8,62	79,10

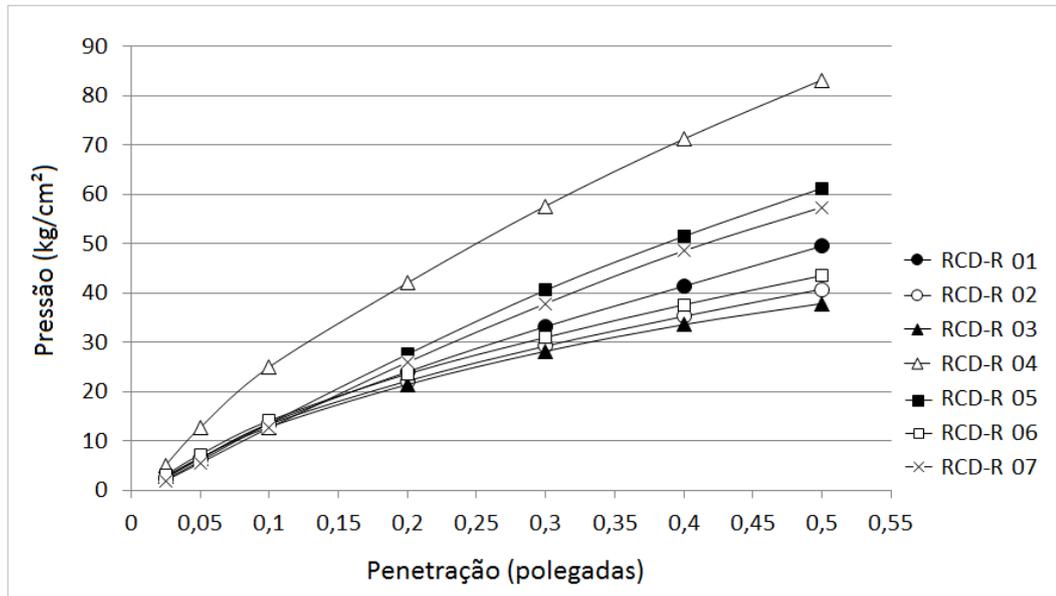
Fonte: A autora.

A amostra de RCD-R 04 apresentou maior valor quando comparado aos demais, com ID_p de 5,35%, muito semelhante aos resultados de Jiménez (2011). Este fato ocorreu, provavelmente, por essa amostra possuir uma granulometria constituída de maior número de material graúdo. De forma geral, o RCD-R misto apresenta-se como um material resistente à energia de Proctor Normal.

4.1.6 Índice Suporte Califórnia

Os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia apresentaram um valor médio de CBR de 25%, com coeficiente de variação de 24,99%; e valor médio de expansão de 0,11, com coeficiente de variação de 9,72%. Segundo a NBR 15.115 (ABNT, 2004e), os resultados indicam que o RCD-R misto possui características favoráveis para aplicação em estradas não pavimentadas, dado que apresentou valores de CBR $\geq 12\%$ e expansão $\leq 1\%$, para energia de compactação Proctor Normal. Os resultados do ensaio de CBR estão apresentados na Figura 81 e na Tabela 24. A amostra RCD-R 04 apresentou um valor de CBR maior que as demais, provavelmente devido a uma maior quantidade de material graúdo em sua granulometria o que justificaria a elevação no CBR.

Figura 81 – Gráfico Pressão x Penetração.



Fonte: A autora.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de CBR.

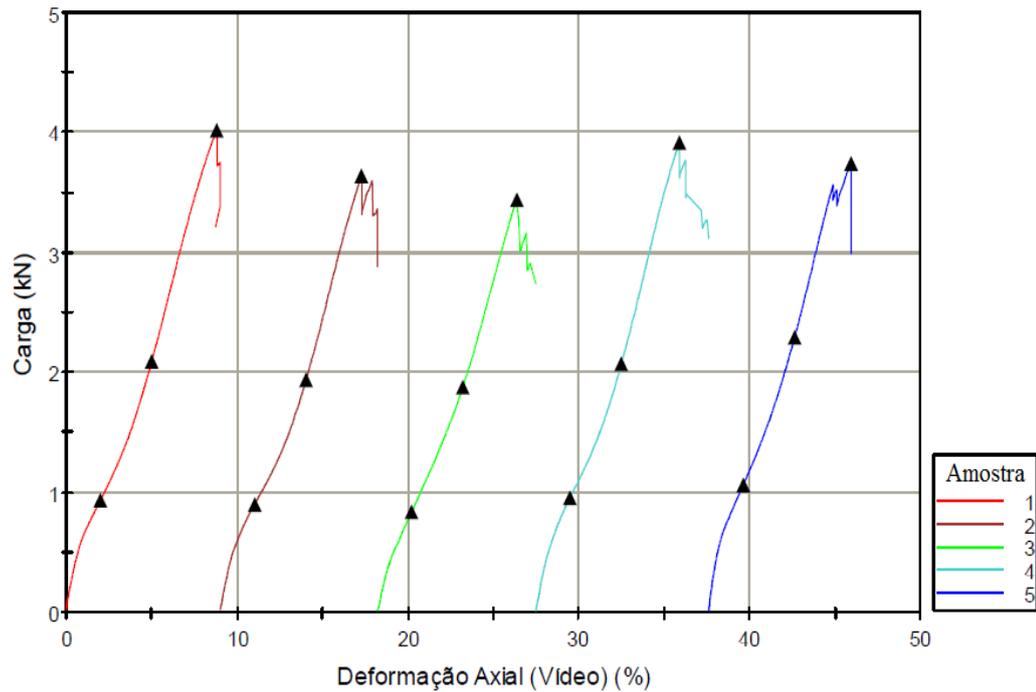
AMOSTRA	CBR (%)	Expansão (%)
RCD-R 01	23	0,10
RCD-R 02	21	0,12
RCD-R 03	20	0,11
RCD-R 04	40	0,11
RCD-R 05	26	0,13
RCD-R 06	22	0,10
RCD-R 07	25	0,10
Média	25	0,11
C.V. (%)	24,99	9,72

Fonte: A autora.

4.2 Análise dos danos mecânicos e químicos nas geogrelhas

Para a análise dos danos mecânicos e químicos foram tomados como valores de referência as resistências à tração isolada das amostras virgens. As curvas de carga versus deformação das amostras virgens, obtidas a partir do ensaio de tração à faixa larga – não confinada – para geogrelhas de poliéster (PET) e polipropileno (PP) estão ilustradas nas Figuras 82 e 83, respectivamente; e os resultados obtidos em cada ensaio estão apresentados nas Tabelas 25 e 26, respectivamente.

Figura 82 – Ensaio de tração, geogrelha de poliéster PET (Virgem).



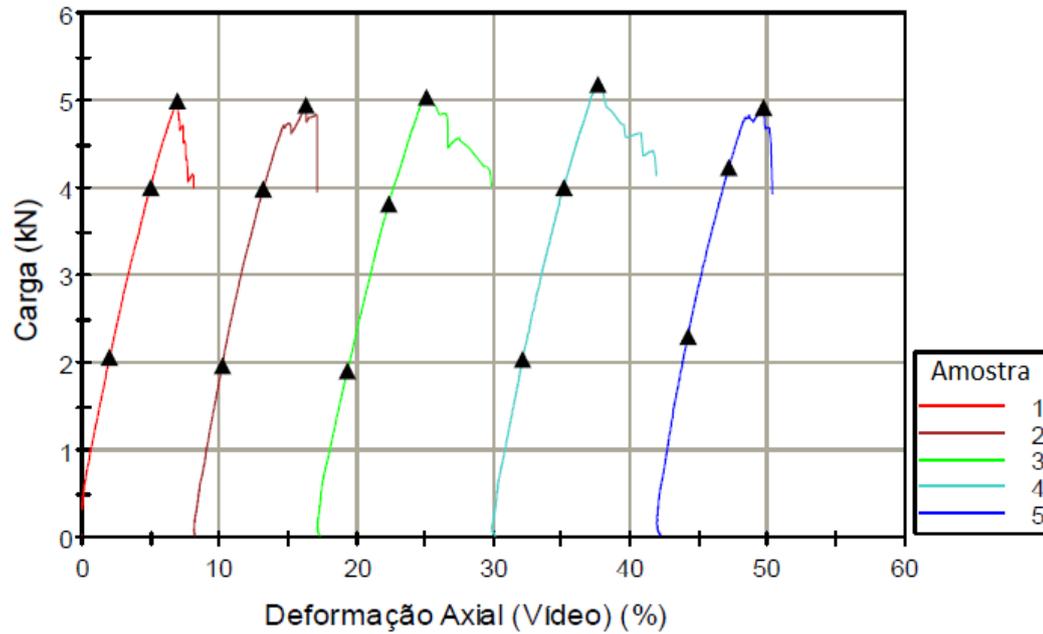
Fonte: A autora.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de tração, geogrelha de poliéster PET (Virgem).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	8,8	4,0	19,51	4,5	10,2
2	8,3	3,6	17,56	4,4	9,3
3	8,1	3,4	16,59	4,1	9,1
4	8,4	3,9	19,02	4,7	10,1
5	8,3	3,7	18,05	5,1	11,1
Média	8,38	3,72	18,15	4,55	9,95
Desvio Padrão	0,23	0,21	1,04	0,35	0,71
CV (%)	2,8	5,7	5,7	7,6	7,1

Fonte: A autora.

Figura 83 – Ensaio de tração, geogrelha de polipropileno PP (Virgem).



Fonte: A autora.

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de tração, geogrelha de polipropileno PP (Virgem).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	6,9	5,0	23,3	9,6	17,4
2	8,1	4,9	23,0	9,2	17,4
3	7,8	5,0	23,4	8,9	13,5
4	7,5	5,2	24,1	9,5	15,9
5	7,5	4,9	22,9	10,7	14,8
Média	7,56	5,00	23,34	9,58	15,80
Desvio Padrão	0,40	0,11	0,42	0,61	1,51
CV (%)	5,3	2,2	1,8	6,4	9,6

Fonte: A autora.

4.2.1 Trecho experimental 01

O trecho experimental 01 foi executado no dia 27 de maio de 2016, seguindo os procedimentos descritos no item 3.2.1, com “compactação” por escavadeira e placa vibratória. Como medida de controle da compactação, foram realizados 3 (três) furos ao final da execução da camada superior para a realização do ensaio de determinação de massa específica aparente *in situ*. A Tabela 27 apresenta os resultados das umidades (w), pesos específicos (γ) e o grau de compactação (G_c) para cada um dos furos. Todos os furos apresentaram resultados de G_c acima de 95%.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de massa específica aparente *in situ* (trecho01).

FURO	w (%)	γ (g/cm ³)	G_c (%)
01	11,10	1,848	98,87
02	11,70	1,790	95,76
03	10,00	1,816	97,15
Média	10,93	1,818	97,26
C.V. (%)	6,44	1,30	1,31

Fonte: A autora.

Posteriormente à execução do trecho, no dia 30 de maio de 2016, foi registrada uma precipitação de 77,8 mm em Camaragibe-PE. E devido ao fato da usina recicladora ser localizada numa área de depressão e por não possuir um sistema de drenagem eficiente para as águas da chuva, observou-se um acúmulo de água na parte inferior da usina e no trecho experimental durante todo o dia de chuva intensa (Figura 84).

No dia seguinte, dia 31 de maio de 2016, o trecho experimental foi liberado para a passagem de veículos, ocorrendo à formação de sulcos de profundidade de 45 a 110 mm, como ilustra a Figura 85. Diante desse cenário, foram exumadas 10 (dez) corpos de provas – 05 (cinco) de poliéster (PET) e 05 (cinco) de polipropileno (PP) – nas extensões onde foram observadas maiores formações de sulcos.

Figura 84 – Chuva no dia anterior ao carregamento.



Fonte: A autora.

Figura 85 – Trilha causada pela passagem de caminhões no trecho experimental 01.



Fonte: A autora.

Foram contabilizados 22 (vinte e dois) caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ESRD) e 3 (três) caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ETD). Cada caminhão passou 02 (duas) vezes pelo trecho experimental, sendo uma vez vazio e outra vez carregado com RCD. A soma total dos fatores de veículos (FV) obtidos para trecho 01, durante 01 (um) dia de carregamento cíclico, foi de, aproximadamente, 68 (Tabela 28). O que significa que a quantidade total de carga por eixo que o pavimento do trecho 01 foi submetido tem o mesmo efeito do que 68 passagens de um eixo padrão (ESRD) carregado com 18.000 lb ou 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

Tabela 28 – Fatores de veículos (trecho 01).

COMPOSIÇÃO	Nº DE CAMINHÕES	FV (vazio + carga máxima)	FV
ESRS + ESRD	22	2,825	62,150
ESRS + ETD	3	2,099	6,297
FV TOTAL			68,447

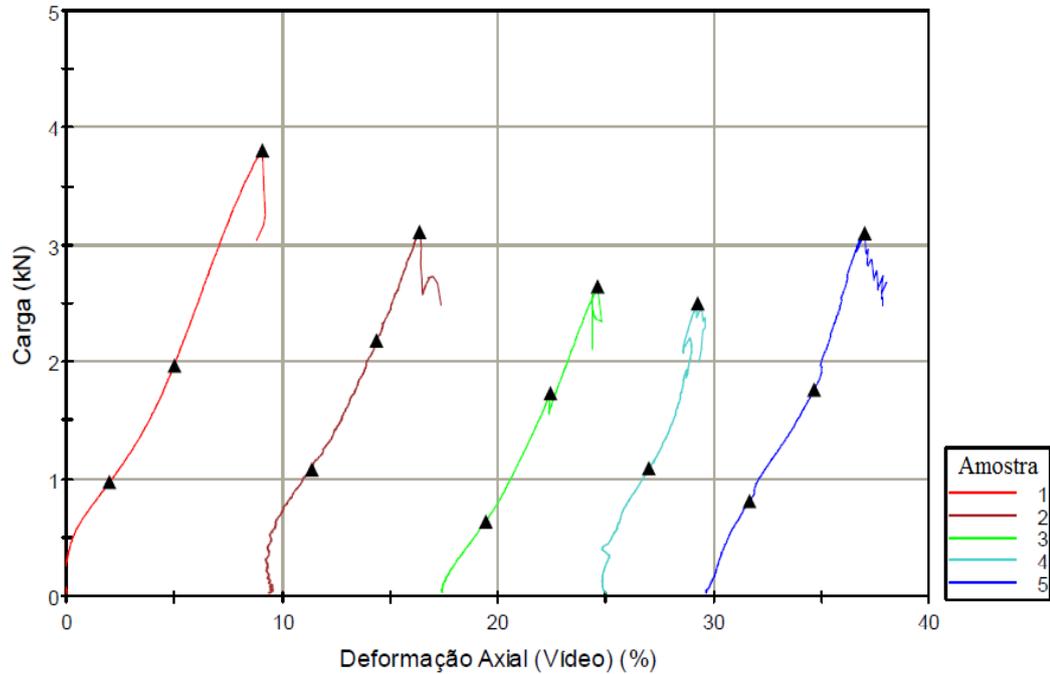
Fonte: A autora.

Como as geogrelhas foram dispostas de maneira que as rodas dos caminhões passassem pelo meio dos corpos de provas, considerou-se que os corpos de provas receberam uma carga estimada equivalente à metade do eixo padrão. Assim, cada corpo de prova de geogrelha foi submetido a uma carga equivalente a, aproximadamente, 34 ciclos de um rodado duplo carregado com 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

As curvas de carga versus deformação obtidas a partir do ensaio de tração à faixa larga – não confinada – para danos mecânicos i) de instalação e ii) de instalação e carregamento estão ilustradas nas Figuras 86 e 87, para geogrelha de poliéster (PET); e nas Figuras 88 e 89, para

geogrelha de polipropileno (PP). As Tabelas 29 a 32 apresentam os respectivos resultados obtidos em cada ensaio.

Figura 86 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).



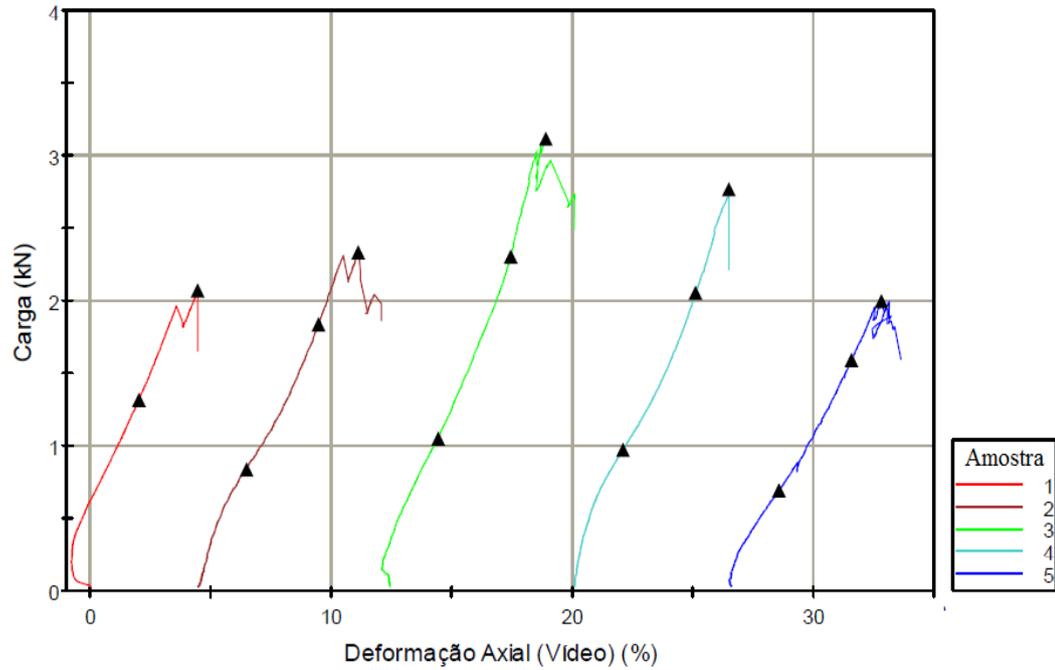
Fonte: A autora.

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	9,1	3,8	18,54	4,7	9,6
2	7,0	3,1	15,12	5,3	10,6
3	7,2	2,6	12,68	3,1	8,3
4	4,2	2,5	12,20	5,3	-
5	7,3	3,1	15,12	4,0	8,6
Média	6,96	3,02	14,73	4,48	9,28
Desvio Padrão	1,57	0,46	2,25	0,85	0,90
CV (%)	22,6	15,3	15,3	18,9	9,7

Fonte: A autora.

Figura 87 – Ensaio de tração (trecho01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).



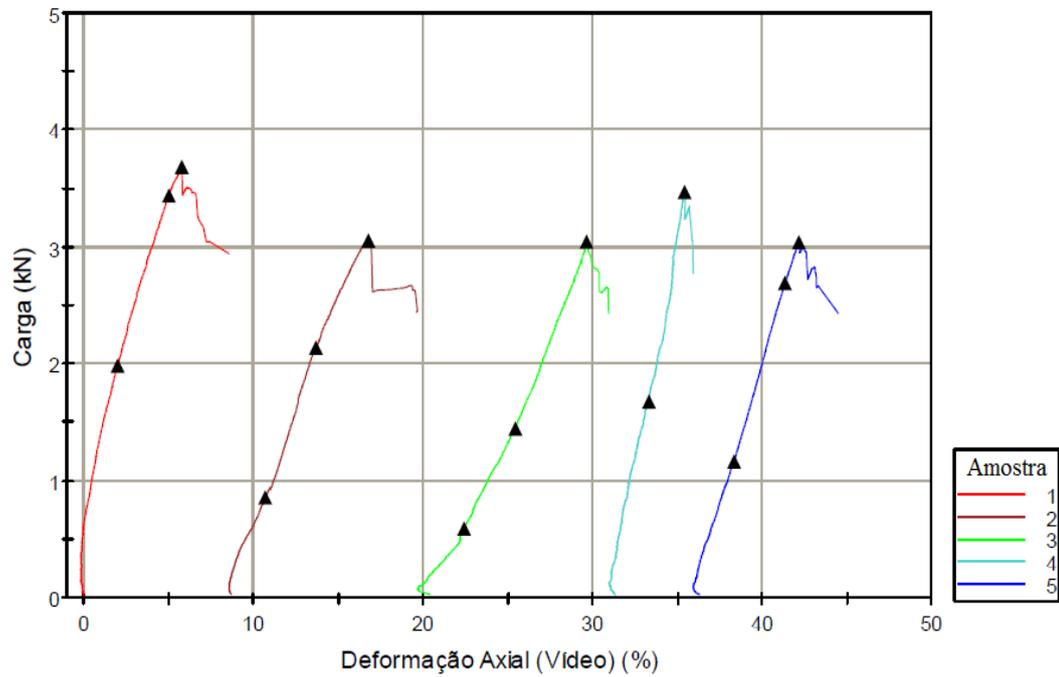
Fonte: A autora.

Tabela 30 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	4,4	2,1	10,24	6,5	-
2	6,6	2,3	11,22	4,1	8,8
3	6,5	3,1	15,12	5,1	11,2
4	6,4	2,8	13,66	4,8	10,1
5	6,2	2,0	9,76	4,4	7,8
Média	6,02	2,46	12,00	4,79	9,49
Desvio Padrão	0,82	0,42	2,06	1,05	1,30
CV (%)	13,6	17,2	17,2	21,9	13,7

Fonte: A autora.

Figura 88 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).



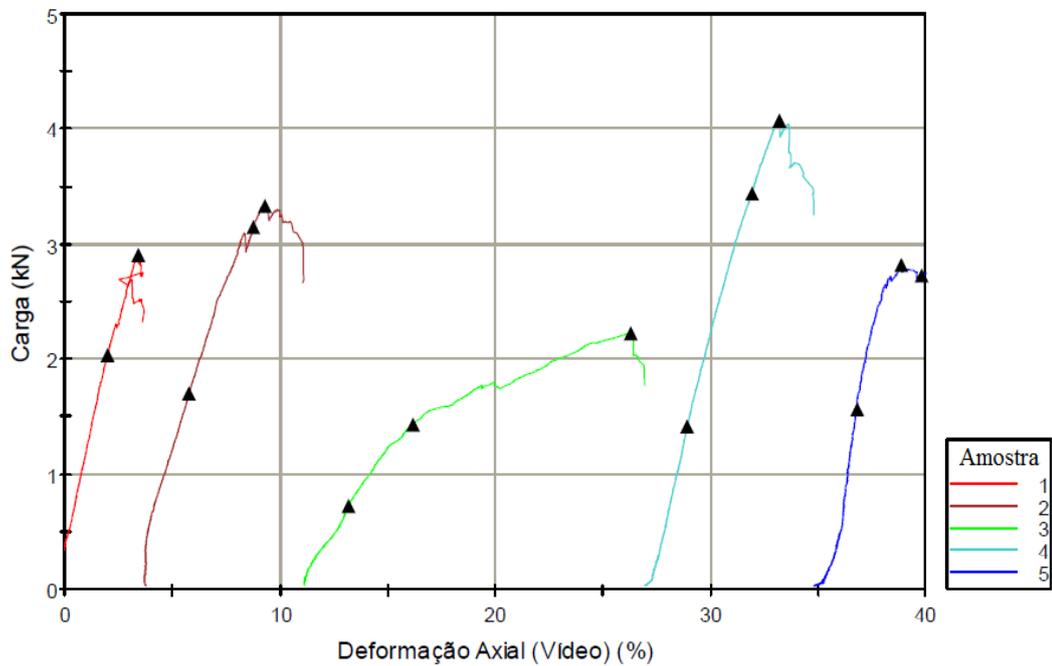
Fonte: A autora.

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	5,8	3,7	17,1	9,2	16,0
2	8,1	3,1	14,2	4,0	10,0
3	9,2	3,0	14,2	2,8	6,8
4	4,1	3,5	16,2	7,8	-
5	5,8	3,0	14,1	5,4	12,5
Média	6,60	3,26	15,16	5,84	11,33
Desvio Padrão	1,82	0,29	1,25	2,36	3,37
CV (%)	27,6	8,8	8,2	40,5	29,8

Fonte: A autora.

Figura 89 – Ensaio de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).



Fonte: A autora.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 01), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	3,4	2,9	13,5	9,5	-
2	5,5	3,3	15,5	7,9	14,7
3	15,1	2,2	10,4	3,4	6,7
4	6,3	4,1	18,9	6,6	16,0
5	4,0	2,8	13,1	7,3	12,7
Média	6,86	3,06	14,28	6,94	12,53
Desvio Padrão	4,25	0,63	2,82	2,01	3,56
CV (%)	61,9	20,5	19,8	29,0	28,4

Fonte: A autora.

4.2.2 Trecho experimental 02

O trecho experimental 02 foi executado no dia 06 de setembro de 2016, seguindo os procedimentos descritos no item 3.2.1, com a compactação por rolo compactador. Como medida de controle de compactação, foram realizados 3 (três) furos ao final da execução da camada superior para a realização do ensaio de determinação de peso específico aparente *in situ*. A Tabela 33 apresenta os resultados das umidades (w), pesos específicos (γ) e o grau de compactação (G_c) para cada um dos furos. Todos os furos apresentaram resultados de G_c acima de 95%.

Tabela 33 – Resultados do ensaio de massa específica aparente *in situ*.

FURO	w (%)	γ (g/cm ³)	G_c (%)
01	10,5	1,816	97,17
02	10,0	1,808	96,71
03	10,5	1,835	98,20
Média	10,33	1,820	97,36
CV (%)	2,28	0,62	0,64

Fonte: A autora.

O trecho experimental 02 foi submetido a 03 (três) dias de carregamento. Nos dias 08 e 09 de setembro de 2016 foi registrada uma precipitação de 0 (zero) mm em Camaragibe-PE, e não foi observando formação de sulcos; porém, no dia 12 de setembro de 2016, foram formados sulcos de profundidade de 45 a 110 mm (Figura 90), em consequência de uma precipitação de 18 mm no dia anterior ao carregamento. Diante desse cenário, foi interrompido o tráfego de caminhões no trecho e exumadas 10 (dez) corpos de provas, sendo 05 (cinco) de poliéster (PET) e 05 (cinco) de polipropileno (PP).

Figura 90 - Trilha causada pela passagem de caminhões no trecho experimental 02.



Fonte: A autora.

Foram contabilizados 39 (trinta e nove) caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ESRD) e 23 (vinte e três) caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ETD). Cada caminhão passou 02 (duas) vezes pelo trecho experimental, sendo uma vez vazio e outra vez carregado com RCD. A soma total dos fatores de veículos (FV) obtidos para trecho 02, durante 03 (três) dias de carregamento cíclico, foi de, aproximadamente, 158 (Tabela 34). O que significa que a quantidade total de carga por eixo que o pavimento do trecho 02 foi submetido tem o mesmo efeito do que 158 passagens de um eixo padrão (ESRD) carregado com 18.000 lb ou 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

Tabela 34 – Fatores de veículos (trecho 02).

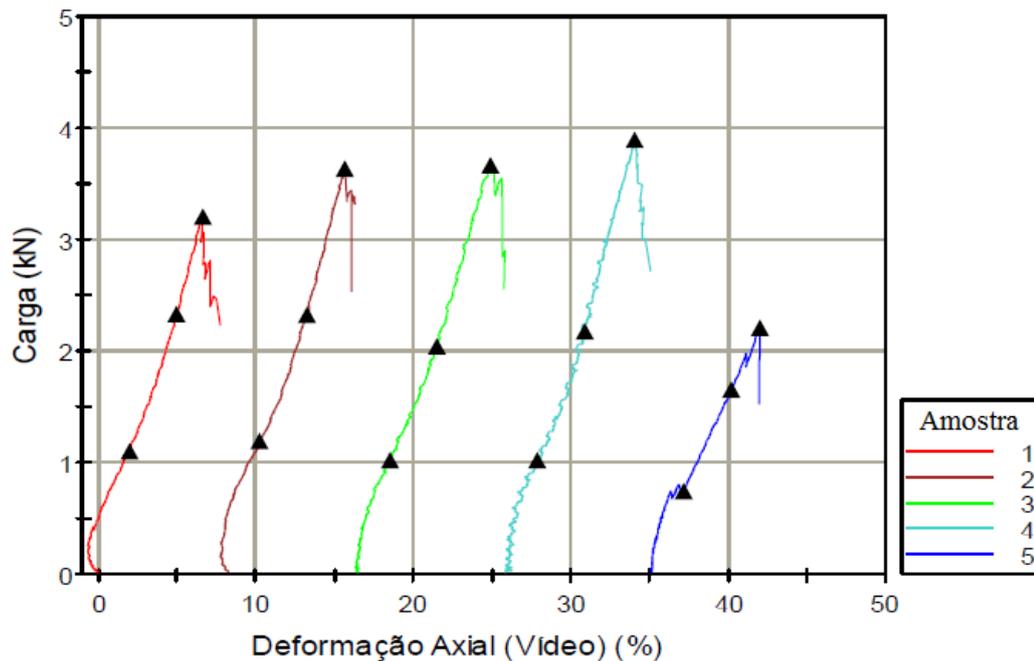
COMPOSIÇÃO	Nº DE CAMINHÕES	FV (vazio + carga máxima)	FV
ESRS + ESRD	39	2,825	110,175
ESRS + ETD	23	2,099	48,277
FV TOTAL			158,452

Fonte: A autora.

Como as geogrelhas foram dispostas de maneira que as rodas dos caminhões passassem pelo meio dos corpos de provas, considerou-se que os corpos de provas receberam uma carga estimada equivalente à metade do eixo padrão. Assim, cada corpo de prova de geogrelha foi submetido a uma carga equivalente a, aproximadamente, 79 ciclos de um rodado duplo carregado com 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

As curvas de carga versus deformação obtidas a partir do ensaio de tração à faixa larga – não confinada – para danos mecânicos i) de instalação e ii) de instalação e carregamento estão ilustradas nas Figuras 91 e 92, para geogrelha de poliéster (PET); e nas Figuras 93 e 94, para geogrelha de polipropileno (PP). As Tabelas 35 a 38 apresentam os respectivos resultados obtidos em cada ensaio.

Figura 91 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).



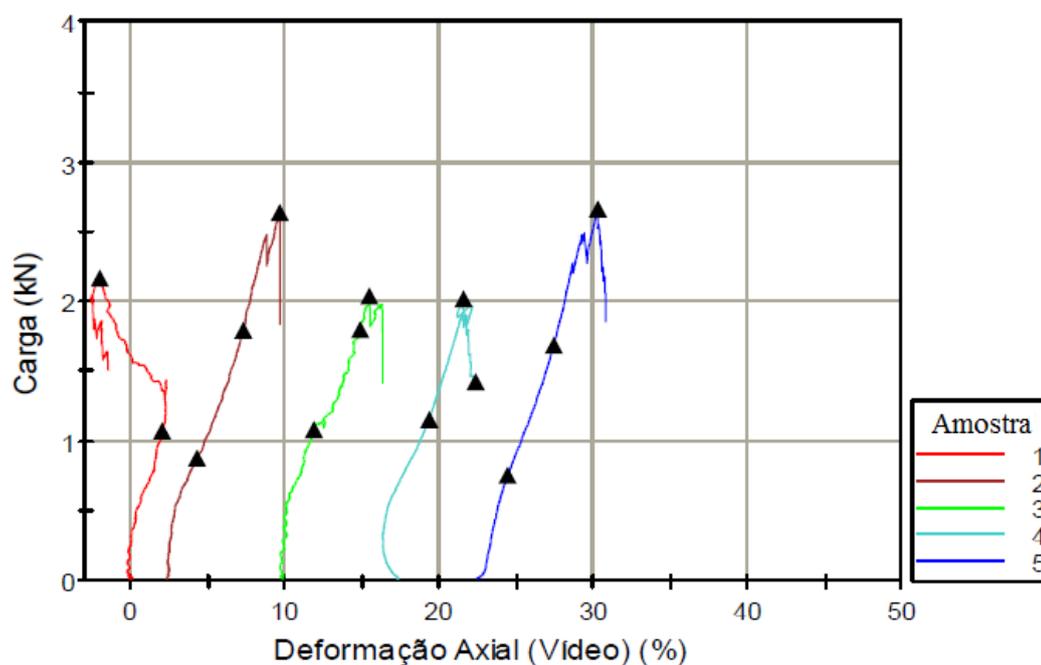
Fonte: A autora.

Tabela 35 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	6,7	3,2	15,6	5,3	11,3
2	7,4	3,6	17,6	5,8	11,3
3	8,4	3,7	17,5	5,1	10,1
4	8,2	3,9	18,1	5,0	10,6
5	6,8	2,2	10,7	3,6	8,0
Média	7,50	3,32	16,20	4,98	10,27
Desvio Padrão	0,70	0,60	2,95	0,72	1,22
CV (%)	9,3	18,2	18,2	14,5	11,9

Fonte: A autora.

Figura 92 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).



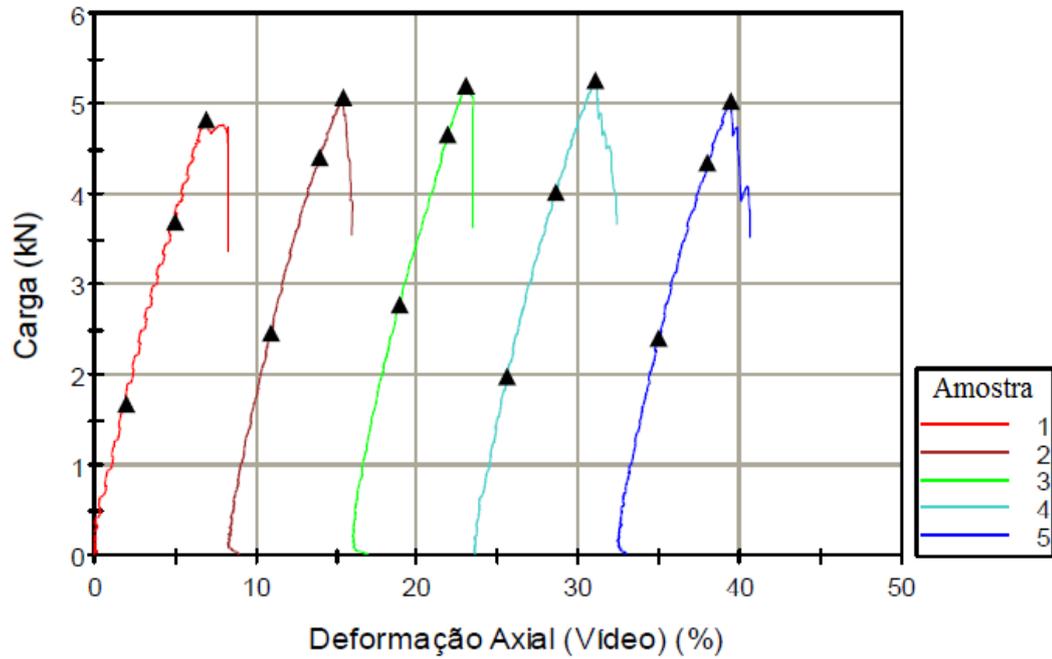
Fonte: A autora.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e carregamento).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	-2,0	2,2	10,7	5,3	-
2	7,3	2,6	12,7	4,2	8,7
3	5,6	2,0	9,8	5,2	8,6
4	4,2	2,0	9,8	5,6	6,9
5	7,8	2,7	13,2	3,7	8,4
Média	4,58	2,30	11,22	4,81	8,15
Desvio Padrão	3,53	0,30	1,45	0,71	0,73
CV (%)	77	12,9	12,9	14,7	8,9

Fonte: A autora.

Figura 93 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).



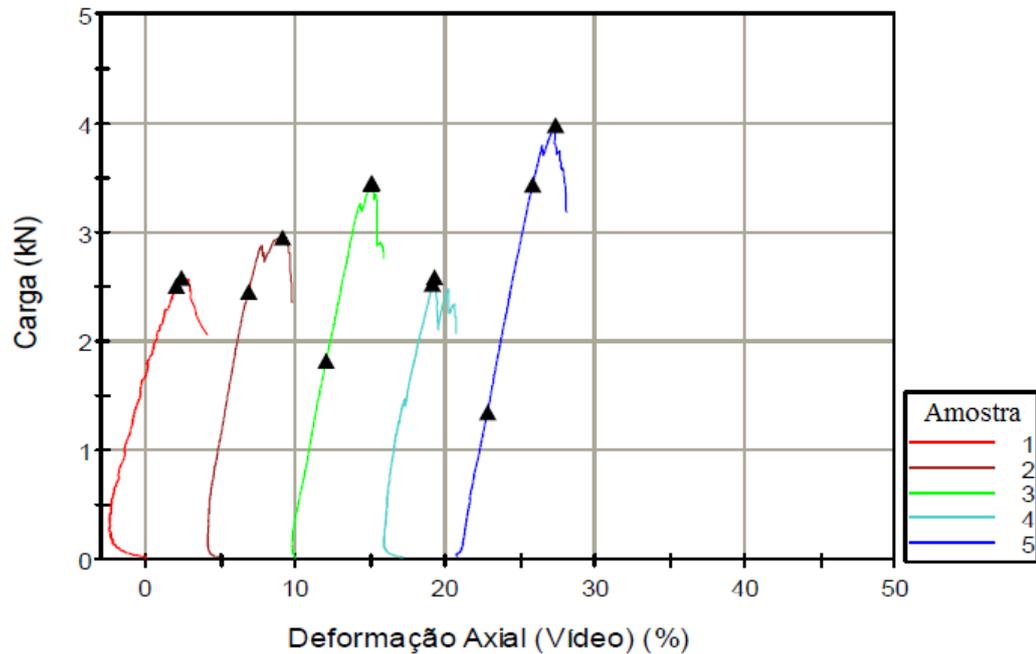
Fonte: A autora.

Tabela 37 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	6,9	4,8	21,9	7,7	16,8
2	6,5	5,1	23,1	11,2	20,0
3	6,1	5,2	23,6	12,6	21,2
4	7,5	5,3	23,9	9,0	18,3
5	6,5	5,0	22,9	11,0	19,8
Média	6,70	5,08	23,08	10,30	19,22
Desvio Padrão	0,47	0,17	0,69	1,73	1,52
CV (%)	7,1	3,4	3,0	16,8	7,9

Fonte: A autora.

Figura 94 – Ensaio de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).



Fonte: A autora.

Tabela 38 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 02), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e carregamento).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	2,4	2,6	11,8	11,4	-
2	4,3	3,0	13,4	11,2	-
3	5,0	3,5	15,7	8,3	15,6
4	2,1	2,6	11,8	11,5	-
5	6,5	4,0	18,1	6,2	15,6
Média	4,06	3,14	14,16	9,72	15,65
Desvio Padrão	1,64	0,54	2,43	2,13	0,05
CV (%)	40,5	17,3	17,2	21,9	0,3

Fonte: A autora.

A deformação expressiva causada nos dois trechos experimentais foi consequência de 2 (dois) agentes externos:

- i) a falta de drenagem – o excesso de chuva no dia anterior ao carregamento cíclico encharcou o solo e diminuiu a capacidade de suporte da estrutura; e
- ii) o tráfego – como os veículos que passaram pelo trecho foram caminhões de transporte de RCD, com valores de carga por eixo elevados, as cargas distribuídas através das rodas dos veículos aplicaram tensões que impõe deformações e ações abrasivas sobre a superfície.

A severidade da extensão das trilhas de rodas formada nos trechos experimentais pode ser classificada como de alta severidade, segundo critérios apresentados por Eaton *et al.* (1987), uma vez que apresentaram profundidades dos sulcos superiores a 75 mm em mais de 30% da área total da superfície do trecho.

Posteriormente à exumação dos corpos de provas de geogrelhas do trecho experimental 02, foi realizada uma regularização do trecho seguindo os seguintes procedimentos: i) nivelamento do trecho com o a parte inferior da pá-carregadeira (Figura 95); ii) adição de novo material de RCD-R (Figura 96); e iii) “compactação” com o auxílio da pá-carregadeira da retroescavadeira (Figura 97).

Figura 95 – Nivelamento do terreno com pá-carregadeira.



Fonte: A autora.

Figura 96 – Adição de novo material de RCD-R



Fonte: A autora.

Figura 97 – Compactação com pá-carregadeira.



Fonte: A autora.

No dia seguinte, o trecho foi liberado para passagem de caminhões por um período de 24 (vinte e quatro) dias úteis. Foram contabilizados 676 caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ESRD) e 330 caminhões com composição de eixos formada por (ESRS + ETD). A soma total dos fatores de veículos (FV) obtidos para trecho 02 após a restauração foi de, aproximadamente, 2.602 (Tabela 39). O que significa que a quantidade total de carga

por eixo que o pavimento foi submetido tem o mesmo efeito do que 2.602 passagens de um eixo padrão (ESRD) carregado com 18.000 lb ou 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

Tabela 39 – Fatores de veículos (trecho 02 após restauração).

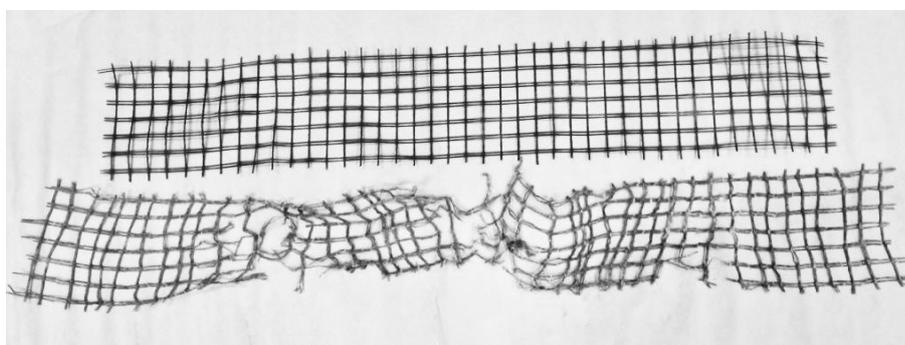
COMPOSIÇÃO	Nº DE CAMINHÕES	FV (vazio + carga máxima)	FV
ESRS + ESRD	676	2,825	1.909,700
ESRS + ETD	330	2,099	692,670
FV TOTAL			2602,370

Fonte: A autora.

Tendo em vista que as geogrelhas estavam dispostas de maneira que as rodas dos caminhões passassem pelo meio dos corpos de provas, considerou-se que os corpos de provas receberam uma carga equivalente à metade do eixo padrão. Assim, cada corpo de prova de geogrelha foi submetido a uma carga equivalente a aproximadamente 1.301 ciclos de um rodado duplo carregado com 82 kN (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de inflação dos pneus.

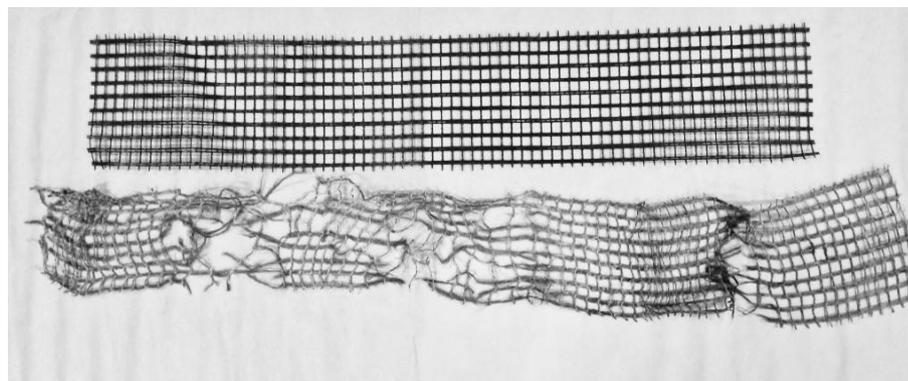
Os corpos de provas exumados após 1.301 ciclos do eixo padrão estabelecido – depois da reconstrução do trecho experimental 02 – foram danificados ao ponto de impossibilitar a execução do ensaio de tração isolada à faixa larga, visto que se apresentaram todos rompidos. As Figuras 98 e 99 ilustram as rupturas dos corpos de provas de geogrelhas de poliéster e polipropileno, respectivamente, após exumação, em comparação com as amostras virgens.

Figura 98 – Geogrelha de poliéster (PET) virgem e danificada (após deformação excessiva do trecho).



Fonte: A autora.

Figura 99 – Geogrelha de polipropileno (PP) virgem e danificada (após deformação excessiva do trecho).

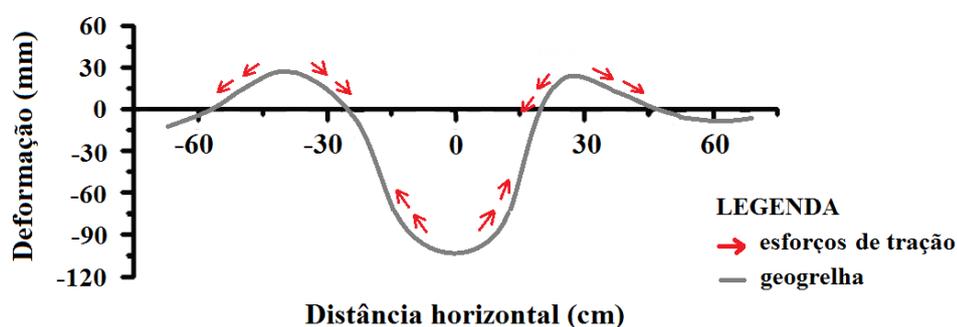


Fonte: A autora.

As rupturas dos corpos de provas ocorreram em consequência da combinação de 3 (três) fatores:

- i) esforços de tração mais efetivos durante a deformação expressiva da estrutura – as geogrelhas apresentaram deformações em formato de “serpente” e 3 (três) pontos foram mais expostos aos esforços de tração, conforme ilustra a Figura 100;
- ii) dano de instalação durante a regularização do trecho experimental, nas geogrelhas que já haviam perdido grande parte de sua resistência inicial; e
- iii) elevadas cargas por eixo, mediante a passagem de caminhões de transporte de RCD, após a reconstrução do trecho.

Figura 100 – Perfil transversal aproximado da deformação verificada em campo e esforços de tração nos corpos de provas de geogrelhas.



Fonte: A autora.

4.2.3 Trecho experimental 03

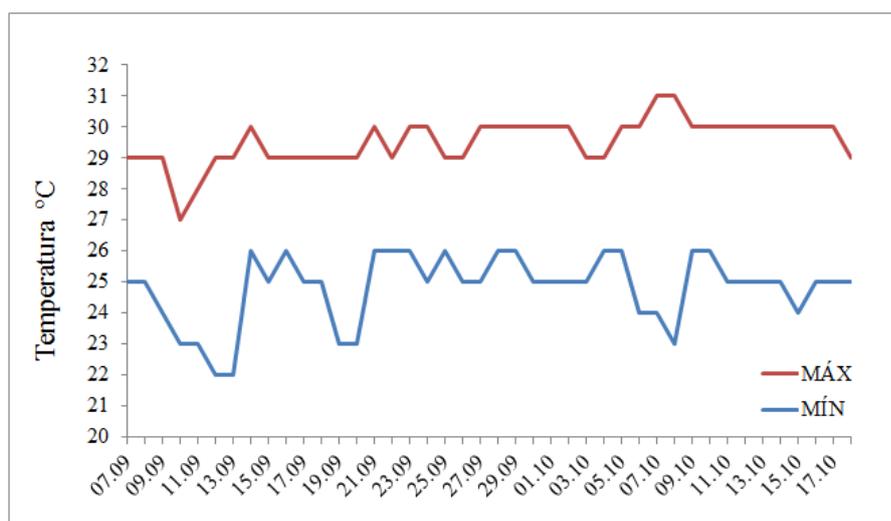
O trecho experimental 03 foi executado no dia 06 de setembro de 2016, seguindo os mesmos procedimentos do trecho experimental 02 (compactação rolo). Em seguida, as amostras foram mantidas enterradas e exumadas após um período de 42 (quarenta e dois) dias. Segundo a APAC, existiram precipitações apenas em 03 (três) dias durante todo o período analisado (Tabela 40). A variação de temperatura apresentada nesse período é exposta na Figura 101.

Tabela 40 – Precipitação durante para o trecho experimental 03.

DIA	PRECIPITAÇÃO (mm)
11.09.2016	18
13.09.2016	5,8
17.10.2016	5,5

Fonte: APAC (2016).

Figura 101 – Variação de temperatura para o trecho experimental 03.



Fonte: Accuweather (2016).

As curvas de carga versus deformação obtidas a partir do ensaio de tração isolada à faixa larga para danos de instalação e químico são ilustradas nas Figuras 102 e 103, para as geogrelhas de poliéster (PET) e polipropileno (PP), respectivamente. As Tabelas 41 e 42 apresentam os respectivos resultados obtidos em cada ensaio.

Figura 102 – Ensaio de tração (trecho 03), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e químico).

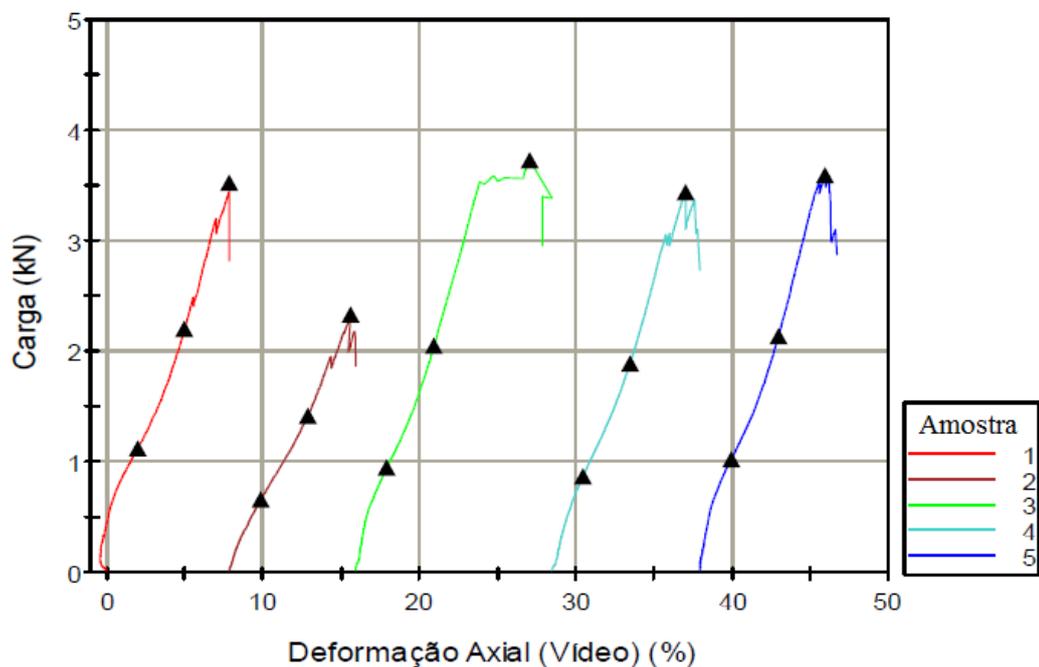
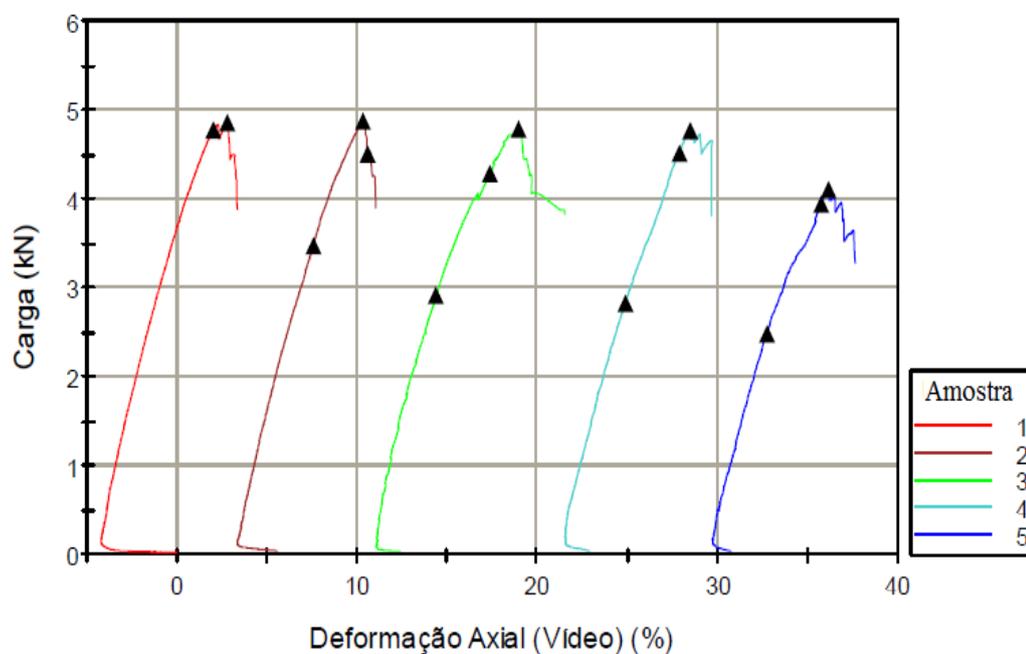


Tabela 41 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 03), geogrelha de poliéster PET (Dano de instalação e químico).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	7,8	3,5	17,1	5,5	10,7
2	7,8	2,3	11,2	3,2	6,9
3	11,1	3,7	18,1	4,7	9,9
4	8,5	3,4	16,6	4,2	9,1
5	8,0	3,6	17,6	5,0	10,5
Média	8,64	3,30	16,10	4,53	9,41
Desvio Padrão	1,26	0,51	2,49	0,77	1,38
CV (%)	14,5	15,5	15,5	16,9	14,7

Fonte: A autora.

Figura 103 – Ensaio de tração (trecho 03), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e químico).



Fonte: A autora.

Tabela 42 – Resultados dos ensaios de tração (trecho 03), geogrelha de polipropileno PP (Dano de instalação e químico).

AMOSTRA	Deformação (%)	Força máxima (kN)	Força/Largura (kN/m)	Força/Largura 2% (kN/m)	Força/Largura 5% (kN/m)
1	2,8	4,9	22,1	21,7	-
2	4,7	4,9	22,2	15,8	20,5
3	6,6	4,8	21,7	13,3	19,5
4	5,6	4,8	21,7	12,9	20,5
5	5,4	4,1	18,7	11,3	17,9
Média	5,02	4,70	21,28	14,98	19,60
Desvio Padrão	1,27	0,30	1,31	3,66	1,06
CV (%)	25,2	6,5	6,1	24,4	5,4

Fonte: A autora.

4.2.4 Fatores de redução de resistência

Para a verificação da ocorrência de danos e cálculo dos respectivos fatores de redução, foram considerados, para cada trecho executado (Tabela 43), os valores médios de resistência à tração isolada à faixa larga das geogrelhas de PET (Tabela 44) e PP (Tabela 45).

Tabela 43 – Resumo dos trechos experimentais executados.

TRECHO	DANO MECÂNICO DE INSTALAÇÃO	CARREGAMENTO CÍCLICO (ciclos)	DANO QUÍMICO (Exposição ao RCD-R)
01	Escavadeira e placa vibratória	34 ¹	N.A.
02	Rolo compactador	79 ¹	N.A.
03	Rolo compactador	N.A.	42 dias

Nota: (1) Eixo simples de rodado duplo (ESRD) com carga de 8,2 tf e 552 kPa de pressão de inflação dos pneus; N.A.: não se aplica.

Fonte: A autora.

Tabela 44 – Resumo dos ensaios de tração isolada à faixa larga da geogrelha PET.

CENÁRIO INVESTIGADO	Força Média (kN/m)	C.V. (%)	Deformação média (%)	C.V. (%)
Virgem	18,15	5,7	8,38	2,8
Dano mecânico (instalação) – trecho 01	14,73	15,3	6,96	22,6
Dano mecânico (instalação e carregamento cíclico) – trecho 01	12,00	17,2	6,02	13,6
Dano mecânico (instalação) – trecho 02	16,20	18,2	7,50	9,3
Dano mecânico (instalação e carregamento cíclico) – trecho 02	11,22	12,9	4,58	77,0
Dano mecânico (instalação) e dano químico – trecho 03	16,10	15,5	8,64	14,5

Fonte: A autora.

Tabela 45 – Resumo dos ensaios de tração isolada à faixa larga da geogrelha PP.

CENÁRIO INVESTIGADO	Força Média (kN/m)	C.V. (%)	Deformação média (%)	C.V. (%)
Virgem	23,34	5,3	7,56	1,8
Dano mecânico (instalação) – trecho 01	15,16	8,2	6,60	27,6
Dano mecânico (instalação e carregamento cíclico) – trecho 01	14,26	19,8	6,86	61,9
Dano mecânico (instalação) – trecho 02	23,08	3,0	6,70	7,1
Dano mecânico (instalação e carregamento cíclico) – trecho 02	14,16	17,2	4,06	40,5
Dano mecânico (instalação) e dano químico – trecho 03	21,28	6,1	5,02	25,2

Fonte: A autora.

Os resultados apresentados nas Tabelas 44 e 45 indicam que as amostras submetidas aos danos mecânicos – de instalação e de instalação e carregamento cíclico – e danos químicos apresentaram redução das forças máximas e das deformações médias em relação às amostras virgens. Além disso, observaram-se maiores valores de coeficiente de variação e, conseqüentemente, maior dispersão dos resultados para as amostras danificadas. De forma geral, as geogrelhas exumadas apresentaram redução da rigidez à tração.

Os valores obtidos de força média das amostras virgens foram próximos aos informados pelo fabricante para geogrelha PET (20 kN/m) e para geogrelha PP (24 kN/m), com perdas de 10% e 3%, respectivamente. Essas perdas podem ter ocorrido durante o manuseio, o armazenamento e/ou transporte dos materiais. Os intervalos de confiança obtidos, com nível de confiança de 95%, para o valor médio das resistências das amostras virgens foram de:

- i) $16,85 \text{ kN/m} < F_0 < 19,44 \text{ kN/m}$, para as geogrelhas PET; e
- ii) $22,82 \text{ kN/m} < F_0 < 23,86 \text{ kN/m}$, para as geogrelhas PP.

Os valores médios de força máxima obtidos nos ensaios com as amostras de geogrelha de PET submetidas aos esforços de instalação revelaram valores fora do intervalo de confiança estabelecido a partir das amostras virgens, o que caracteriza a ocorrência do dano mecânico de instalação. Por outro lado, os resultados dos ensaios das geogrelhas de PP apresentaram valores médios de força máxima com comportamentos distintos: para o trecho 01 (dano mecânico por escavadeira e placa vibratória), observou um valor fora do intervalo de confiança estabelecido, caracterizando a ocorrência do dano; para o trecho 02 (dano mecânico por rolo compactador), o valor obtido mostrou-se dentro do intervalo de confiança estabelecido, caracterizando uma incerteza sobre a ocorrência de danos.

Pode-se concluir que os efeitos da “compactação” por escavadeira e placa vibratória causaram maiores danos de instalação, em relação à compactação por rolo compactador, para ambas geogrelhas estudadas. Os fatores de redução para os danos mecânicos de instalação são apresentados nas Tabelas 46 e 47, para as geogrelhas de PET e de PP, respectivamente.

Tabela 46 – Fatores de redução de resistência para o dano mecânico decorrente do processo de instalação da geogrelha de PET.

DANO MECÂNICO DE INSTALAÇÃO	Força Média (kN/m)	FATORES DE REDUÇÃO
Escavadeira e placa vibratória – trecho 01	14,73	1,23
Rolo compactador – trecho 02	16,20	1,12

Fonte: A autora.

Tabela 47 – Fatores de redução de resistência para o dano mecânico decorrente do processo de instalação da geogrelha de PP.

DANO MECÂNICO DE INSTALAÇÃO	Força Média (kN/m)	FATORES DE REDUÇÃO
Escavadeira e placa vibratória – trecho 01	15,16	1,54
Rolo compactador – trecho 02	23,08	1,00

Fonte: A autora.

Para as geogrelha de PET, os intervalos de confiança obtidos, para o nível de confiança de 95%, a partir do valor médio das resistências das amostras danificadas foram de:

- i) $11,93 \text{ kN/m} < F_0 < 17,53 \text{ kN/m}$, para o trecho 01 – “compactação” por escavadeira e placa vibratória; e
- ii) $12,53 \text{ kN/m} < F_0 < 19,86 \text{ kN/m}$, para o trecho 02 – compactação por rolo compactador.

Mediante os intervalos de confiança estabelecidos, percebeu-se que as amostras de geogrelha de PET, submetidas a carregamentos cíclicos, apresentaram-se valores médios de força máxima com comportamentos distintos: para o trecho 01 (34 ciclos do eixo padrão), observou-se um valor médio dentro do intervalo de confiança; e, para o trecho 02 (79 ciclos do eixo padrão), verificou-se um valor médio fora do intervalo de confiança. Os fatores de redução para os danos mecânicos causados pelo carregamento cíclico são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 – Fatores de redução de resistência para dano mecânico causado pelo carregamento cíclico, geogrelha PET.

DANO	Força Média (kN/m)	FATORES DE REDUÇÃO
Mecânico (carregamento cíclico*) – trecho 01	12,00	1,00
Mecânico (carregamento cíclico**) – trecho 02	11,22	1,44

Nota: (*) 34 ciclos do eixo padrão; e () 79 ciclos do eixo padrão.**

Fonte: A autora.

Para as geogrelhas de PP, os intervalos de confiança obtidos, para o nível de confiança de 95%, a partir do valor médio das resistências das amostras danificadas foram de:

- i) $13,61 \text{ kN/m} < F_0 < 16,713 \text{ kN/m}$, para o trecho 01 – “compactação” por escavadeira e placa vibratória; e
- ii) $22,23 \text{ kN/m} < F_0 < 23,93 \text{ N/m}$, para o trecho 02 – compactação por rolo compactador.

De posse dos intervalos de confiança estabelecidos, percebe-se que as geogrelhas de PP, submetidas ao carregamento de 34 ciclos – trecho 01 – do eixo padrão estabelecido, apresentaram um valor médio de força máxima dentro do intervalo de confiança, o que caracteriza a não ocorrência de danos. Por outro lado, as geogrelhas submetidas ao carregamento de 79 ciclos do eixo padrão estabelecido – trecho 02 – apresentaram um valor médio de força máxima fora do intervalo de confiança, o que caracteriza a ocorrência do dano. Os fatores de redução para os danos mecânicos causados pelo carregamento cíclico são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 – Fatores de redução de resistência para dano mecânico causado pelo carregamento cíclico na geogrelha de PP.

DANO	Força Média (kN/m)	FATORES DE REDUÇÃO
Mecânico (carregamento cíclico*) – trecho 01	14,26	1,00
Mecânico (carregamento cíclico**) – trecho 02	14,16	1,65

Nota: (*) 34 ciclos do eixo padrão; e () 79 ciclos do eixo padrão.**

Fonte: A autora.

Diante dessas análises, pode-se concluir que o incremento do número de ciclos resultou em um maior dano mecânico de curto prazo, para ambas geogrelhas. Ou seja, a maior ocorrência de danos mecânicos resultou em uma menor força média máxima. Vale salientar que, embora

as amostras submetidas a 34 ciclos terem apresentado incertezas sobre a ocorrência de danos – por obterem valores de força média dentro do intervalo de confiança estabelecido –, verificou-se uma considerável queda nos valores médios de força máxima para ambas geogrelhas.

O dano químico foi investigado por meio da verificação de ocorrência de redução “adicional” de resistência das amostras submetidas a danos mecânicos de instalação expostas (enterradas) por um período de 42 dias no RCD-R. Os intervalos de confiança obtidos, para o nível de confiança de 95%, para a média das resistências das amostras submetidas aos danos de instalação para o trecho 03 – compactação por rolo compactador – foram de:

- i) $12,53 \text{ kN/m} < F_0 < 19,86 \text{ kN/m}$, para as geogrelhas PET; e
- ii) $22,23 \text{ kN/m} < F_0 < 23,93 \text{ kN/m}$, para as geogrelhas PP.

O valor médio de força máxima das geogrelhas de PET danificadas pela exposição (enterradas) ao RCD-R apresentaram resultados dentro do intervalo de confiança estabelecido, o que caracteriza incertezas sobre ocorrência de danos. Entretanto, para as geogrelhas de PP, observou-se que o valor médio de força máxima apresentou-se fora do intervalo de confiança, caracterizando que existiu dano químico pela sua exposição ao RCD-R. Os fatores de redução para os danos químicos são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Fatores de redução de resistência para dano químico das geogrelhas de PET e de PP.

DANO	Força Média (kN/m)	FATORES DE REDUÇÃO
Químico (geogrelha PET) – trecho 03	16,10	1,00
Químico (geogrelha PP) – trecho 03	21,28	1,08

Fonte: A autora.

Essa redução “adicional” de resistência apresentada pelas geogrelhas de PP pode ter sido causada pela maior exposição das fibras de polipropileno às substâncias presentes no RCD-R e às variações de temperatura, uma vez que as amostras ficaram enterradas a uma profundidade de apenas 200 mm. Apesar desses resultados revelarem a influência da exposição das geogrelhas ao RCD-R, recomenda-se que estudos mais aprofundados sejam realizados a fim de esclarecer todos os aspectos relacionados com tal influência.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Diante das vantagens técnicas e econômicas que o emprego do resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) pode oferecer, este trabalho propôs investigar e avaliar a degradação de 2 (duas) geogrelhas utilizadas como elementos de reforço de estradas não pavimentadas construídas com RCD-R como material de aterro. Foram construídos trechos experimentais de estrada não pavimentada reforçada a fim de estudar a degradação mecânica e química, em condição de campo, desses elementos de reforço. A caracterização do efeito dos danos no comportamento mecânico das geogrelhas foi estudada por meio de ensaios de tração – ensaios de curto prazo – e cálculo dos fatores de redução de resistência.

5.1 Conclusões

Diante dos resultados obtidos, podem-se apresentar as seguintes conclusões a respeito da caracterização do RCD-R:

- Os resultados da análise granulométrica evidenciaram que o RCD-R estudado pode ser classificado como areia com pedregulho, segunda a ABNT. Para as cinco amostras ensaiadas, observou-se uma pequena variação granulométrica, o que indica que o material foi submetido a um processo de produção padronizada. Verificou-se um aumento dos coeficientes de variação do percentual passante nas peneiras com a diminuição das aberturas da peneira;
- Os limites de consistência revelaram que todas as amostras ensaiadas possuem comportamento não-plástico, o que representa um ponto positivo visto que a utilização desse material não deve apresentar parcela de resistência coesiva;
- Os resultados dos ensaios de compactação (Proctor Normal) apresentaram valores de peso específico máximo médio de 1,855 g/cm³, com coeficiente de variação de 1,39, e umidade ótima média de 12,62%, com coeficiente de variação de 6,09%.
- A análise do índice de quebra revelou que o ensaio de compactação não alterou significativamente a granulometria das amostras de RCD-R analisadas;

- Os resultados do ensaio de CBR indicam que o RCD-R estudado não é expansivo e possui características favoráveis para a sua aplicação em estradas não pavimentadas, apresentando valor médio de CBR de 25% para a umidade de ótica de média de 12,62% (Proctor Normal);

De forma geral, os RCD-R apresentaram excelentes valores de parâmetros geotécnicos e baixa variabilidade, e atendeu as recomendações impostas pelas normas brasileiras para estradas não pavimentadas, podendo ser reciclados por meio de um tratamento simples (triagem e britagem) para criar um material com uma baixa energia incorporada. Para utilizar esses resíduos como materiais de aterro em estradas não pavimentadas reforçadas, alguns fatores de redução de resistência podem ser considerados na concepção de projetos futuros:

- Os fatores de redução de resistência para os danos mecânicos de instalação decorrentes da “compactação” por escavadeira e placa vibratória na execução de trechos experimentais de estradas não pavimentadas construídas com RCD-R como material de aterro foram de 1,23 e 1,54, para as geogrelhas de poliéster e de polipropileno, respectivamente;
- Os fatores de redução de resistência para os danos mecânicos de instalação causados pela compactação por rolo compactador na execução de trechos experimentais de estradas não pavimentadas construídas com RCD-R foram de 1,12 e 1,0, para as geogrelhas de poliéster e de polipropileno, respectivamente;
- Os fatores de redução de resistência para os danos mecânicos causados pelo tráfego de caminhões equivalente a 34 ciclos de um eixo padrão estabelecido (eixo simples de rodado duplo - ESRD), utilizando os RCD-R como materiais de aterro, foram de 1,0, para ambas as geogrelhas, em relação às amostras danificadas pela instalação. Apesar da análise do fator de redução de resistência revelar a não ocorrência de dano mecânico devido ao carregamento cíclico, observou-se uma redução considerável nos valores médios de força máxima;
- Os fatores de redução de resistência para danos mecânicos causados pelo tráfego de caminhões equivalente a 79 ciclos do eixo padrão estabelecido, utilizando os RCD-R como materiais de aterro, foram de 1,44 e 1,63 para as geogrelhas de poliéster e de polipropileno, respectivamente, em relação às amostras danificadas pela instalação;

- Os fatores de redução de resistência devidos a danos químicos causados pela exposição de amostras danificadas ao contato com o RCD-R, por um período de 42 dias, foram de 1,0 e 1,08, para geogrelhas de poliéster e de polipropileno, respectivamente, em relação às amostras danificadas pela instalação.

Os resultados aqui apresentados são considerados específicos para as condições de campo apresentadas no trabalho e pesquisas adicionais são fortemente aconselhadas a fim de entender melhor os fatores que afetam o desempenho de geogrelhas em estradas não pavimentadas que empreguem materiais alternativos de baixo custo, e assim, estimular o desenvolvimento sustentável, aumentar as taxas de reciclagem de RCD no país e prover à sociedade estradas com melhores condições de operação.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Fundamentado nos resultados e conclusões obtidas nesta dissertação, sugere-se para pesquisas futuras sobre o emprego de materiais alternativos em estradas não pavimentadas reforçadas:

- Caracterizar as amostras de RCD-R durante um maior intervalo de tempo com a finalidade de avaliar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos e, assim, sugerir técnicas de processamento que permita a produção um material mais homogêneo, com menor consumo de energia e, conseqüentemente, menor energia incorporada;
- Realizar uma caracterização química detalhada dos RCD-R e avaliar as condições ideais de operação desses resíduos sem risco de lixiviação;
- Utilizar RCD-R com diferentes materiais de composição – em trechos experimentais – a fim de comparar os respectivos danos de instalação e, assim, entender os seus fatores de influência;
- Utilizar diferentes tipos de geossintéticos em trechos experimentais construídos com RCD-R como material de aterro e comparar seus fatores de redução de resistência;

- Variar a posição de instalação dos elementos de reforço dentro do material de aterro de RCD-R, para identificar qual posição oferece o menor dano de instalação possível, dentro da área de deformação lateral máxima;
- Expor as geogrelhas a um maior número de ciclos a fim de investigar a sua influência na tendência da degradação dos elementos de reforços; e
- Realizar uma análise econômica e social do emprego do RCD-R como material de aterro em estradas não pavimentadas reforçada a fim de viabilizar esse tipo de estrutura.

REFERÊNCIAS

ACCUWEATHER. Condições meteorológicas de Camaragibe. Ano 2016. Disponível em: <http://www.accuweather.com/pt/br/camaragibe/34948/november-weather/34948>. Acesso em: 20 de novembro de 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1972.

AGRELA, F.; BARBUDO, A.; RAMÍREZ, A.; AYUSO, J.; CARVAJAL, M. D.; JIMÉNEZ, J. R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 58, p. 98-106, 2012.

ALBANO, J. F. **Efeito dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. 2005. 192f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. São Paulo, 2015.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo, 2014.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. São Paulo, 2013.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. São Paulo, 2012.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011**. São Paulo, 2011.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986a.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b.

_____. **NBR 7185**: Determinação da massa específica aparente, “*in situ*”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986c.

- _____. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. **NBR 10318**: Geossintéticos – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 15.112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.
- _____. **NBR 15.113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.
- _____. **NBR 15.114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.
- _____. **NBR 15.115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.
- _____. **NBR 15.116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004f.
- BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010a.
- _____. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010b.
- BEARDEN, J.; LABUZ, J. **Interim report: fabric for reinforcement and separation in unpaved roads**. 1997. 73f. Department of Transportation, University of Minnesota. Minnesota, 1997.
- BJERREGAARD, M. Demolition waste: are we doing our best? **Waste and Resource Management**, v. 161, p. 45-49, 2008.
- CARNEIRO, A. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife**. 2005. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.
- CARNEIRO, A. P.; BURBOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Projeto Entulho Bom. **EDUFBA/Caixa Econômica Federal**, v. 1, p. 190-227, 2001.
- CARNEIRO, J. R. C. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – A importância da incorporação de aditivos químicos**. 2009. 534f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Brasília, 2001.

_____. **Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004.** Brasília, 2004.

_____. **Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011.** Brasília, 2011.

_____. **Resolução nº 448, de 18 de janeiro de 2012.** Brasília, 2012.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. **Manual básico de estradas e rodovias vicinais: Volume I – Planejamento, projeto, construção e operação.** 2012. 224f. São Paulo, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 398/99: Índice de degradação após compactação Proctor (ID_p).** Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 159/85: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.** Rio de Janeiro, 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. **Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas coordenação geral de planejamento e programa de investimentos.** 2007. 14f. v1.1. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Projeto básico de engenharia para adequação e duplicação de rodovia na travessia urbana de Nova Rosalândia - TO.** 2010. 128f. v 1. Rio de Janeiro, 2010.

_____. Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. **Quadro de Fabricantes de veículos.** 2012. Rio de Janeiro, 2012.

_____. Coordenação de Planejamento. Rio de Janeiro, 2015.

DURÃO, V.; CAIXINHAS, J.; OSÓRIO-PETERS, S.; BOER, E. D.; WILLIAMS, I. D.; CURRAN, T.; PERTL, A. Zero-waste networks in construction and demolition in Portugal. **Waste and Resource Management**, v. 167, p. 153-68, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES – GEIPOT. **Relatório Intermediário: Resultados e análises preliminares – Pesquisa ICR.** Brasília, D.F., 1977.

EATON, R. A.; GERARD, S.; DATTILO, R. S. A method for rating unsurfaced roads. **Transportation research record 1106**, v. 02, p. 34-42, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE – GEIPOT. **Relatório Intermediário: Resultados e análises preliminares – Pesquisa ICR.** Brasília, Distrito Federal, 1977.

GIROUD, J. P.; HAN, J. Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. I. Development of design method. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, p. 775-786, 2004.

GIROUD, J. P.; NOIRAY, L. Geotextile Reinforced Unpaved Road Design. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, p. 1233-1254, 1981.

GIROUD, J. P.; AH-LINE, C.; BONAPARTE, R. Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids. **Polymer grid reinforcement**, v. 1, p. 116-127, 1984.

GÓNGORA, I. A. G. **Utilização de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: influência do tipo de reforço e do material de aterro**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2011.

_____. **Estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos: influência de propriedades físicas e mecânicas do reforço**. 2015. 96f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2015.

GREENWOOD, J. H. The effect of installation damage on the long-term design strength of a reinforcing geosynthetic. **Geosynthetics International**, v. 9, p. 247-258, 2002.

GUSMÃO, A. D. **Manual de gestão dos resíduos da construção civil**. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 2008.

HOSSEINI, M. R.; RAMEEZDEEN, R.; CHILESHE, N.; LEHMANN, S. Reverse logistics in the construction industry. **Waste Management & Research**, v. 33, p. 499-514, 2015.

HUFENUS, R.; RÜEGGER, R.; FLUM, D.; STERBA, I. J. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, p. 401-424, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Rio de Janeiro, 2016

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2011.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; GALVÍN, A.P.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F. Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 34-43, 2012.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113f. Tese (Doutorado de livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

KAY, D.; BLOND, E.; MLYNAREK, J. Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue. In: 57 Canadian Geotechnical Conference, 2004, Queber. **Anais...** Queber: SAGEOS, 2004. p. 01-14.

LATHA, G. M.; NAIR, A. M.; HEMALATHA, M. S. Performance of geosynthetic in unpaved roads. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 4, p. 337-349, 2010.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LEITE, F. C.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2972-2979, 2011.

MEKKAWY, M. M.; WHITE, D. J.; SULEIMAN, M. T.; JAHREN, C. T. Mechanically reinforced granular shoulders on soft subgrade: laboratory and full scale studies. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, p. 149-160, 2011.

MIRANDA, L. F. R. Panorama das usinas de reciclagem de RCD no Brasil: A pesquisa setorial abrecon 2013. **Pesquisa Setorial da Reciclagem de Resíduos da Construção**, v. 1, p. 1-20, 2013.

MOTTA, R. D. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NUNES, K. R. A. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. 2009. 276f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F.; VALLE, R. A. Reserve logistics in the Brazilian construction industry. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 3717-3720, 2009.

ODA, S. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. 1995. 186f. Dissertação (Mestrado em Transporte) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1995.

PALMEIRA, E. M.; ANTUNES, L. G. S. Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 547-558, 2010.

PAULA, A. M.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Alguns resultados de ensaios de fluência à tracção de geossintéticos. **Geotecnia**, v. 116, p. 39-64, 2009a.

PAULA, A. M. V.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Efeito da danificação durante a instalação no comportamento mecânico de longo prazo de uma geogrelha tecida em PET. In: 3º Seminário Português sobre Geossintéticos, 2009b, Coimbra. **Anais...** Coimbra: FCNAUP, 2009b. p. 319-329.

PEREIRA, A. M. **Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado**. 1985. 330f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1985.

PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Synergisms between laboratory mechanical and abrasion damage on mechanical and hydraulic properties of geosynthetics. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 50-63, 2015.

PINTO, C. S. **Curso básico de macânica dos solos em 16 aulas**. 3rd ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

RECIFE. **Lei nº 17.072**, de 04 de janeiro de 2005. Estabelece as diretrizes e critérios para o Programa de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, 2005.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD-R) em estruturas de solos reforçados**. 2007. 173f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

_____. **Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino**. 2011. 214f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2011.

SCHENEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 130f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; MACHADO, C. C. Influência do tráfego de veículos comerciais em rodovias vicinais não pavimentadas: estudo de caso aplicado à VCS 346, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 35, p. 539-545, 2011.

SOUTSOS, M.; FULTON, M. Recycling of demolition waste in Merseyside. **Construction Materials**, v. 169, p. 54-66, 2015.

SUN, X.; HAN, J.; KWON, J.; PARSONS, R. L.; WAYNE, M. H. Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. **Geotextiles and Geomenbranes**, v. 43, p. 440-449, 2015.

THORMARK, C. A low energy building in a life cycle - its embodied energy, energy needs for operation and recycling potential. **Building and Environment**, v. 37, p. 429-435, 2002.

TREYBIG, H. J.; VON QUINTUS, H. L. Equivalency factor analysis and prediction for triple axles – Report BR2/1 – Austin. **Research Engineers**, Texas, 1976.

VEGAS, I.; IBAÑEZ, J. A.; SAN JOSÉ, J. T.; URZELAI, A. Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. **Waste Management**, v. 28, p. 565-574, 2008.

VEGAS, I.; IBAÑEZ, J. A.; LISBONA, A.; SÁEZ DE CORTAZAR, A.; FRÍAS, M. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2674-2682, 2011.

VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Damage induced by recycled construction and demolition wastes on the short-term tensile behaviour of two geosynthetics. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 64-75, 2015.

WATTS, G. R. A.; BLACKMAN, D. I.; JENNER, C. G. The performance of reinforced unpaved sub-bases subjected to trafficking. **Transport Research**, v. 1, p.261-266, 2004.

YEUNG, A. T. Construction and demolition materials management in Hong Kong. **Municipal Engineer**, v. 161, p. 43-49, 2008.