



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDO COM
AGREGADO RECICLADO E SUA VIABILIDADE TÉCNICA DE
APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO**

Ânderson Henrique Pretto

Lajeado, dezembro de 2017



Ânderson Henrique Pretto

**CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDO COM
AGREGADO RECICLADO E SUA VIABILIDADE TÉCNICA DE
APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Lajeado, dezembro de 2017

Ânderson Henrique Pretto

**CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND PRODUZIDO COM
AGREGADO RECICLADO E SUA VIABILIDADE TÉCNICA DE
APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO RÍGIDO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau em bacharel em Engenharia Civil:

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos -
orientador
Universidade do Vale do Taquari -
UNIVATES

Prof. Ms. Carolina Becker Porto Fransozi
Universidade do Vale do Taquari -
UNIVATES

Prof. Ms. Matheus Lemos Nogueira
Universidade de Caxias do Sul

Lajeado, dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais, Roseli e Eloy pois eles são os responsáveis pela pessoa que me tornei. Mãe, obrigado por tudo, sua força e determinação são a base da minha vida. Pai, obrigado por sempre acreditar em mim e pelo auxílio no trabalho, sua ajuda foi fundamental.

Aos meus irmãos, Mariana e Vítor, dedico este trabalho e todo meu amor. Mana, você sempre foi e sempre será um exemplo para mim. Mano, com você me reinventei, acreditei e passei a ver o que antes não era possível, dizer que te amo é pouco para representar o que você é para mim, te carregar no colo e te ver crescer, são as maiores conquistas da minha vida.

Muito obrigado ao meu orientador, professor João Rodrigo. Sua forma de guiar este trabalho, direcionando as ideias, dando-me autonomia para tomada de decisões e seu profundo conhecimento me inspiraram. O orgulho e alegria de concluir este trabalho representam o quanto fui feliz com você ao meu lado, meus sinceros agradecimentos.

Um obrigado especial para as pessoas que me auxiliaram na parte prática do trabalho, são eles: Betinho Rodrigues, grande amigo que cedeu seu veículo para transporte do material, ao senhor Enson Schmitt, que humildemente abriu as portas da sua empresa e disponibilizou para uso o seu britador. Ao pessoal do LATEC, Marcelo, Rodrigo, Viane e Lucas pelo auxílio durante a realização das atividades práticas.

Por fim, obrigado a toda minha família e amigos, vocês foram muito importantes para mim ao longo deste trabalho.

Nunca quero ser
O que quero ser,
Pois há sempre alguma coisa
Que ainda quero ver.

A vida é ingrata
Nessa hora e nesse lugar,
Mas não quero achar que sei
A saída para escapar.

Sempre existe uma montanha
Com panorama estupendo,
E algo a aprender
Que nunca fiquei sabendo.

Até que meus dias se findem,
Ainda há muito para ver;
Por isso prossigo
Disposto a crescer.

Art Linkletter

RESUMO

Com o intuito de criar uma solução para os problemas de extração de recursos naturais e deposição de entulho, esta pesquisa apresenta um estudo teórico-prático sobre as propriedades de resistência e características de um concreto de cimento Portland, produzido com agregado reciclado de concreto (ARC), em substituição aos agregados convencionais. Objetivou-se, através de ensaios laboratoriais, demonstrar que resíduos de um antigo pavimento de concreto de cimento Portland detêm propriedades para tornarem-se matéria-prima em uma nova camada de revestimento de pavimento rígido, por meio do método de dimensionamento da PCA/84, proposto por DNIT (2005). A produção do resíduo partiu da confecção do concreto referência produzido com a determinação de um traço ideal, em que se utilizou o Diagrama de Dosagem desenvolvido pelo IPT/EPUSP. Aos 7 dias, ensaiou-se mecanicamente o concreto referência quanto à resistência à tração na flexão, resultando em $f_{ct,f} = 3,82$ MPa. Ainda, ensaiou-se quanto à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e módulo de elasticidade para fins de comparação. Após, triturou-se o concreto através de um britador de mandíbula para transformá-lo em ARC. Buscando avaliar qual o melhor percentual de substituição de ARC na mistura do concreto, produziu-se, mantendo o mesmo traço de referência, três famílias de concreto com quantidades diferentes de ARC no traço, sendo, R1, R2 e R3. Verificou-se, através de ensaios mecânicos, que o concreto R3, contendo 100% de ARC graúdo e 50% de ARC miúdo em sua composição, apresentou os melhores resultados de resistência à tração por compressão diametral, com idade de 7 dias. Após essa verificação, produziu-se novamente o concreto R3, o qual foi submetido a ensaios, aos 7 dias, para verificação da resistência à tração na flexão, resultando em $f_{ct,f} = 3,14$ MPa, e também resistência à tração por compressão diametral, compressão simples e módulo de elasticidade. Por fim, comparou-se os resultados de resistência dos concretos referência e R3 e dimensionou-se, para cada situação, a placa do pavimento rígido. Nesse sentido, o pavimento rígido dimensionado com o resultado de resistência à tração na flexão do concreto R3 originou uma placa $H = 32$ cm e o dimensionamento com a aplicação dos resultados do concreto referência resultou em uma espessura de placa de revestimento $H = 28$ cm.

Palavras-chave: Pavimento rígido. ARC. Reciclagem de pavimentos.

ABSTRACT

In order to create a solution to the problems of natural resources extraction and debris deposition, this study presents a theoretical-practical study on the resistance and characteristics of a Portland cement concrete made with recycled concrete aggregate (RCA), replacing conventional aggregates. The objective of this study was to demonstrate that residues from an old Portland cement concrete pavement have properties to become raw material for a new layer of rigid pavement, using the PCA/84 design method, proposed by DNIT (2005). The residues production begins from the confection of a reference concrete sample through the determination of an ideal mix design using the dosage diagram developed by IPT/EPUSP. After curing for 7 days the reference concrete sample was mechanically tested for flexural tensile strength resulting in $f_{ct, f} = 3.82$ MPa, it was also tested for tensile strength by diametral compression, compression strength and modulus of elasticity for comparison and then crushed through a jaw crusher to turn it into RCA. In order to evaluate the best percentage of RCA substitution in the concrete mix, three concrete families with different amounts of RCA in the design, R1, R2 and R3 were produced using the same mix design reference, and it was verified through mechanical tests that concrete R3, containing 100 % of coarse RCA and 50% of fine RCA in its composition showed the best results of tensile strength by diametrical compression with age of 7 days of cure. After this verification, R3 concrete was again produced, at this time being called R3 and tested at 7 days of cure for verification of flexural tensile strength, resulting in $f_{ct, f} = 3.14$ MPa, diametral compression, simple compression and modulus of elasticity. Lastly, the strength results for the reference concrete sample and for the R3 concrete were compared and a project design of rigid pavement was performed for each concrete. The rigid pavement designed with the result of tensile strength of the R3 concrete resulted in a wearing course 32 centimeters thick while the one designed with the use of the results for the reference concrete resulted in a wearing course with 28 centimeters

Keywords: Rigid pavement. RCA. Pavement Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esforços solicitantes na estrutura do pavimento	24
Figura 2 – Distribuição de tensões em pavimentos rígidos	25
Figura 3 – BT e BL em uma placa de concreto	30
Figura 4 – Pavimento de concreto simples.....	31
Figura 5 – Agregado reciclado de concreto.....	42
Figura 6 – Ensaio de granulometria dos agregados	53
Figura 7 – ARC, brita 1	56
Figura 8 – ARC, areia média	56
Figura 9 – Britador de mandíbula	57
Figura 10 – Fluxograma das atividades propostas	63
Figura 11 – Materiais para confecção do concreto referência.....	69
Figura 12 – Moldagem e cura dos corpos de prova	73
Figura 13 – Ensaio de consistência.....	75
Figura 14 – Ensaio de resistência à tração na flexão	78
Figura 15 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	79
Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	54
Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	54
Gráfico 3 – Relação entre resistência à compressão X água/cimento	67
Gráfico 4 – Relação entre traço unitário X água/cimento	67
Gráfico 5 – Comparativo entre resistência à tração na flexão do concreto referência obtidos aos 7 e 28 dias.....	74
Gráfico 6 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral de R1, R2 R3, aos 7 dias	85
Gráfico 7 – Resultados de resistência característica à tração por compressão diametral do concreto de referência e R3 aos 7 dias	87
Gráfico 8 – Estimativa de resistência à tração na flexão entre concretos a partir dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias	88
Gráfico 9 – Curva tensão X deformação específica de R3 e concreto referência obtidos com os resultados do ensaio à compressão aos 7 dias.....	91
Gráfico 10 – Comparativo entre resistência à tração na flexão de R3 e concreto referência obtidos aos 7 dias.....	92
Gráfico 11 – Comparativo entre resistências à tração na flexão dos concretos	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Camadas e materiais de um pavimento em CCP	28
Quadro 2 – Características dos concretos nos estados fresco e endurecidos	33
Quadro 3 – Diferenças nas propriedades do concreto reciclado comparadas ao concreto com agregado natural, utilizando a mesma relação água/cimento e 100% de substituição de agregado	43
Quadro 4 – Efeitos do ARC sobre as propriedades mecânicas do concreto.....	44
Quadro 5 – Efeito do ARC no concreto fresco	44
Quadro 6 – Efeito do ARC no concreto endurecido.....	45
Quadro 7 – Classes de concreto	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planilha para dimensionamento de pavimento rígido	61
Tabela 2 – Determinação do teor ideal de argamassa e características do concreto para o traço 1,0:3,5	65
Tabela 3 – Quantificação dos traços	66
Tabela 4 – Quantificação de materiais	71
Tabela 5 – Concretos reciclados	72
Tabela 6 – Valores obtidos com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (continua)	83
Tabela 6 – Valores obtidos com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (conclusão)	84
Tabela 7 – Valores obtidos de R3 e concreto referência com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias	86
Tabela 8 – Valores estimados de resistência à tração na flexão aos 7 dias	88
Tabela 9 – Valores obtidos de R3 e concreto referência com os resultados de resistência à compressão aos 7 dias	89
Tabela 10 – Valores de módulo de elasticidade de R3 e concreto referência obtidos com os resultados do ensaio à compressão aos 7 dias	90
Tabela 11 – Valores de resistência à tração na flexão de R3 e concreto referência obtidos aos 7 dias	92
Tabela 12 – Aplicação do concreto referência para dimensionamento de um PCS ..	94
Tabela 13 – Aplicação do concreto R3 para dimensionamento de um PCS	95

ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Porcento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
Art.	Artigo
BL	Barra de Ligação
BT	Barra de Transferência
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CBR	California Bearing Ratio
CCP	Concreto de Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado com Rolo
cm	Centímetro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Cimento Portland
CPs	Corpos de prova
CV	Concreto Convencional
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ERS	Estrada de domínio do estado do Rio Grande do Sul

ES	Especificação de Serviço
EUA	Estados Unidos da América
f_c	Resistência à compressão individual de cada um dos corpos de prova
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
f_{ct}	Resistência de cálculo do concreto à tração
$f_{ct,f}$	Resistência de cálculo do concreto à tração por flexão
$f_{ct,sp}$	Resistência de cálculo do concreto à tração por compressão diametral
FHWA	Federal Highway Administration
f_t	Resistência à tração individual de cada um dos corpos de prova
H	Espessura
k	Coeficiente de recalque
kg	Quilograma
LATEC	Laboratório de Tecnologias da Construção
m	Metro
m^3	Metros cúbicos
ME	Método de Ensaio
mL	Mililitros
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
n°	Número
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PCA	Pavimento de Concreto Armado
PCA	Portland Cement Association
PCAC	Pavimento de Concreto com Armadura Contínua
PCPM	Pavimento de Concreto Pré-moldado
PCPRO	Pavimento de Concreto Protendido
PCS	Pavimento de Concreto Simples
pH	Concentração de hidrogênio
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PRO	Procedimento
RCC	Resíduos de Construção Civil

RCD	Resíduos de Construção e Demolição
tf	Toneladas-força
WT	Whitetopping
WTUD	Whitetopping ultradelgado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa da pesquisa	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Limitações da pesquisa	20
1.4 Estrutura da pesquisa	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Pavimento rígido	22
2.1.2 Função do pavimento	23
2.1.3. Classificação das estruturas dos pavimentos	24
2.1.4. Camadas e materiais empregados no pavimento de concreto	25
2.1.4.1. Revestimento	26
2.1.4.2. Bases e sub-base	26
2.1.4.3. Reforço do subleito	27
2.1.4.4. Subleito	27
2.1.5 Tipos de Pavimentos de concreto	29
2.1.5.1 Pavimento de concreto simples - PCS	29
2.1.6 Características do concreto para PCS	31
2.1.6.1 Propriedades do concreto no estado fresco	33
2.1.6.2 Propriedades do concreto no estado endurecido	35
2.1.7 Caracterização mecânica do concreto	36
2.1.8 Características dos materiais para concreto de PCS	36
2.1.8.1 Cimento	36

2.1.8.2 Agregado.....	37
2.1.8.3 Água de amassamento	38
2.1.8.4 Aditivos	38
2.2 Resíduos sólidos.....	39
2.2.1 Resíduos da construção civil	40
2.2.2 Propriedades dos agregados reciclados de concreto	41
2.2.3 Propriedades dos concretos contendo agregado reciclado	43
2.2.4 Dosagem do concreto contendo agregado reciclado	47
2.3 Estudos com incorporação de agregado reciclado de concreto em pavimento rígido	48
2.3.1 Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (LEITE, 2001) ..	48
2.3.2 Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento Portland para pavimentação (BARBOSA JÚNIOR, 2008).....	49
2.3.3 Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas (TSENG, 2010).....	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 Materiais.....	52
3.1.1 Agregado.....	52
3.1.2 Cimento	57
3.1.3 Água de amassamento	57
3.2. Métodos.....	58
3.2.1 Método de dimensionamento do revestimento pela PCA - 1984.....	58
3.2.2 Aplicação prática dos resultados	62
3.2.3 Programa experimental.....	62
3.2.3.1 Método de dosagem.....	63
3.2.3.2 Confecção do concreto de referência	68
3.2.3.3 Confecção do concreto com agregado reciclado	69
3.2.3.4 Confecção do concreto reciclado de melhor desempenho	72
3.2.4 Corpos de prova	73
3.2.5 Cura	73
3.2.6 Ensaio propostos para análise do concreto	74
3.2.7 Procedimento de análise dos dados	81
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	83
4.1 Ensaio de tração na compressão diametral.....	83
4.2 Resistência à tração por compressão diametral	84
4.3 Resistência à tração por flexão - estimada	87

4.4 Ensaio de resistência à compressão.....	89
4.5 Módulo de elasticidade.....	89
4.6 Ensaio de tração na flexão	92
4.5 Dimensionamento de pavimento rígido	93
4.5.1 Pavimento rígido dimensionado com o concreto referência	93
4.5.2 Pavimento rígido dimensionado com o concreto reciclado.....	95
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS.....	99
ANEXOS	104

1 INTRODUÇÃO

A construção civil, em comparação a outras atividades, é aquela que mais impõe-se sobre o meio ambiente, que serve de fonte e deposição dos produtos gerados. Isto é, mais precisamente, recursos naturais são extraídos, processados e posteriormente descartados no meio ambiente (MYERS, 2016). Sabe-se que o concreto necessita de elevado controle tecnológico e de execução devido aos variados materiais empregados na sua composição. Antigamente, os grandes fracassos no Brasil, em obras de pavimentos rígidos, conforme Balbo (2009), eram causados principalmente pela falta desses cuidados, que, na maioria das vezes, era consequência da carência de mão de obra especializada.

Sabe-se também que obras vinculadas à infraestrutura rodoviária são classificadas como sendo de grande porte, ou seja, necessita-se de maquinário pesado, número considerável de pessoas e, principalmente, grande volume de materiais. Sendo que os mesmos são produzidos, posteriormente descartados e, com frequência, depositados em locais impróprios, segundo Martins (2012). Nesse sentido, o impacto ambiental causado é extremamente elevado, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), o concreto é o produto industrializado mais utilizado pela sociedade.

Com o intuito de gerenciar esses produtos de descarte e outros gerados pela sociedade, o Governo brasileiro, por meio da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabeleceu a Lei n. 307, de 5 de julho de 2002. Dentro de suas especificações, de uma forma geral, os produtos descartados oriundos de construções são classificados como sendo resíduo de construção civil (RCC). Para Mehta e Monteiro (2014), é crescente a geração de RCC em todo o mundo: dados

comprovam que a União Europeia gerou, em 2009, um valor aproximado de 850 milhões de toneladas desse tipo de resíduo; já em 2003, nos Estados Unidos, o valor chegou a 170 milhões de toneladas.

Visando minimizar esses impactos, tanto da exploração quanto do descarte, buscam-se alternativas sustentáveis. Uma opção pesquisada e utilizada é a aplicação desses resíduos em novos materiais para a composição de pavimentos rígidos e flexíveis. Historicamente, é com o fim da Segunda Guerra mundial que foi alavancada, na Alemanha, a utilização de RCC em novas construções. Inclusive as placas destruídas dos pavimentos de concreto foram trituradas e transformadas em agregados, de modo que novas placas de concreto para pavimentação foram confeccionadas com a utilização desse agregado reciclado Balbo (2009). Segundo Isaia (2005b), o concreto produzido com agregado reciclado pode ter o mesmo padrão de qualidade e custo de confecção semelhante ou até inferior ao concreto de referência. Desse modo, qualquer que seja o seu destino, o uso de concreto contendo material reciclado deve ser incentivado.

1.1 Justificativa da pesquisa

Qualquer obra de engenharia que envolva a utilização de concreto de cimento Portland necessita de elevados cuidados para evitar falhas estruturais. A mecânica dos pavimentos também segue esta premissa. No Brasil, a falta de estudos, pesquisas e adequações de culturas internacionais de forma errônea acabaram gerando resultados negativos, tornando rara a utilização de pavimentos de concreto de cimento Portland em rodovias.

Com as recentes tecnologias e estudos empregados ao concreto de cimento Portland, há um incentivo maior para que sejam realizadas novas obras utilizando o pavimento rígido no Brasil, incluindo aqueles confeccionados com a adição de agregados provenientes da reutilização de placas de pavimentos antigos. Conforme relata Tseng (2010), Porto Alegre e Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul, são localidades com bom potencial para usufruir dessa prática, já que possuem pavimentos de concreto de cimento Portland datados do ano de 1950.

Dessa forma, buscou-se, por meio desta pesquisa, agregar conhecimentos voltados aos pavimentos de concreto de cimento Portland. Com base em ensaios laboratoriais e levantamentos de pesquisas similares, pretende-se incentivar a prática da produção de concreto a partir de agregados reciclados.

1.2 Objetivos

A seguir, apresentam-se os objetivos geral e específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral realizar uma comparação entre concreto confeccionado com agregados naturais e concreto confeccionado com agregados reciclados e a partir dos resultados mecânicos, dimensionar a placa de revestimento do pavimento de concreto simples.

1.2.2 Objetivos específicos

Definiram-se como objetivos específicos da pesquisa:

- a) dosar um traço de concreto de referência para ser empregado em pavimento de concreto simples para uma resistência de tração na flexão de no mínimo 4,0 MPa, analisada aos 7 dias de cura;
- b) analisar, a partir de ensaios em laboratório, as propriedades do concreto fresco e endurecido a fim de garantir a qualidade do pavimento de acordo com as normas de pavimentação vigentes;
- c) utilizar os agregados reciclados na produção de um novo concreto com a mesma composição e traço do concreto de referência;
- d) ensaiar mecanicamente o concreto produzido com agregado reciclado e comparar os resultados com o concreto de referência;
- e) dimensionar um pavimento rígido utilizando o valor de resistência à tração na flexão obtido para os dois concretos: referência e reciclado.

1.3 Limitações da pesquisa

Busca-se, através das limitações da pesquisa, limitar os processos executivos e práticos a fim de obter-se um parâmetro de comparação. Assim sendo, as limitações da pesquisa são:

- a) utilizou-se somente um tipo de cimento para a produção dos concretos;
- b) partiu-se do pressuposto que, teoricamente, o concreto produzido serviria para compor a camada de revestimento de um pavimento;
- c) o valor obtido com o dimensionamento do pavimento rígido serve somente como elemento comparativo;
- d) não foram avaliadas questões financeiras e nem ambientais.

1.4 Estrutura da pesquisa

Para melhor organização dos temas estudados e interpretação dos resultados, estruturou-se esta pesquisa em cinco capítulos. Inicialmente, é apresentada uma introdução, evidenciando a justificativa e os objetivos.

Na sequência, encontra-se a revisão bibliográfica, em que, de uma forma geral, foram explanados assuntos teóricos referentes a pavimentos rígidos, concreto de cimento Portland e seus materiais e, por fim, concretos produzidos com agregados reciclados, além de estudos já realizados com essa técnica.

No terceiro capítulo, denominado Materiais e Métodos, estão descritos os materiais utilizados para a confecção do concreto e suas características. Também estão descritos os métodos de ensaio dos agregados e do concreto. E por fim, apresenta-se o método de dimensionamento de pavimento rígido proposto nesta pesquisa.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a parte experimental e o dimensionamento de dois pavimentos rígidos através da aplicação dos resultados.

Por fim, o quinto capítulo reserva-se à descrição da conclusão, oriunda da

realização do estudo teórico-prático e propostas para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimento rígido

Na infraestrutura de transporte, o pavimento é o alicerce estruturado após a terraplenagem, de acordo com o Manual de Pavimentação IPR/719, elaborado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006). Para Silva (2008), o pavimento é concebido com o intuito de beneficiar o caminho natural, proporcionando aos usuários um deslocamento seguro e com mais rapidez, necessidades que perduram por inúmeras gerações e povos.

2.1.1 Histórico dos pavimentos rígidos

Responsáveis pelo desenvolvimento das sociedades, é de conhecimento desde os povos antigos que estradas ou rodovias sofrem degradação ao longo do tempo, necessitando de reparos ou soluções duráveis que influenciem e facilitem o tráfego (BALBO, 2007).

Uma solução encontrada a essas circunstâncias são os pavimentos compostos de concreto de cimento Portland. De acordo com Balbo (2009), a origem desse pavimento é quase que simultânea à criação dos automóveis, no século XIX. Pesquisas creditam a *Main Street*, na cidade de Bellefontaine, em Ohio, nos EUA, como o primeiro local onde foi confeccionado, no ano de 1891, um pavimento em concreto de cimento Portland. Ainda segundo o autor, países europeus, como

Alemanha e Suíça, assim como os EUA, na América do Norte, executaram inúmeras estradas e rodovias em pavimento de concreto, tornando-os referências no assunto, inclusive para obras de pavimentos de concreto realizadas no Brasil.

No Brasil, os pavimentos de concreto foram executados consideravelmente até meados de 1950. A primeira obra foi concluída em 1926 e encontra-se no estado de São Paulo, no antigo Caminho do Mar, entre Riacho Grande e Cubatão. Além do estado de São Paulo, outras obras de pavimento de concreto foram construídas em vários estados brasileiros, como Rio de Janeiro, Pernambuco, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul entre outros (BALBO, 2009).

Recentemente, o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER-RS) (CUNHA NETO, 2017), em vista da execução da duplicação da ERS-118, que é pavimentada em concreto de cimento Portland, utilizou uma técnica pioneira no país para triturar as placas do revestimento sem prejudicar as camadas inferiores. O objetivo principal dessa técnica é utilizar o resíduo gerado como agregado na composição do novo pavimento.

Como visto, importantes obras rodoviárias no Brasil e no mundo são executadas em pavimento de concreto. Portanto, esse método rodoviário merece uma atenção especial, pois, se executado com um controle de qualidade, representa uma excelente rodovia, agregando características que outros tipos de pavimento não conferem. Assim sendo, a seguir serão discutidas as peculiaridades dos pavimentos com foco nos compostos por concreto de cimento Portland.

2.1.2 Função do pavimento

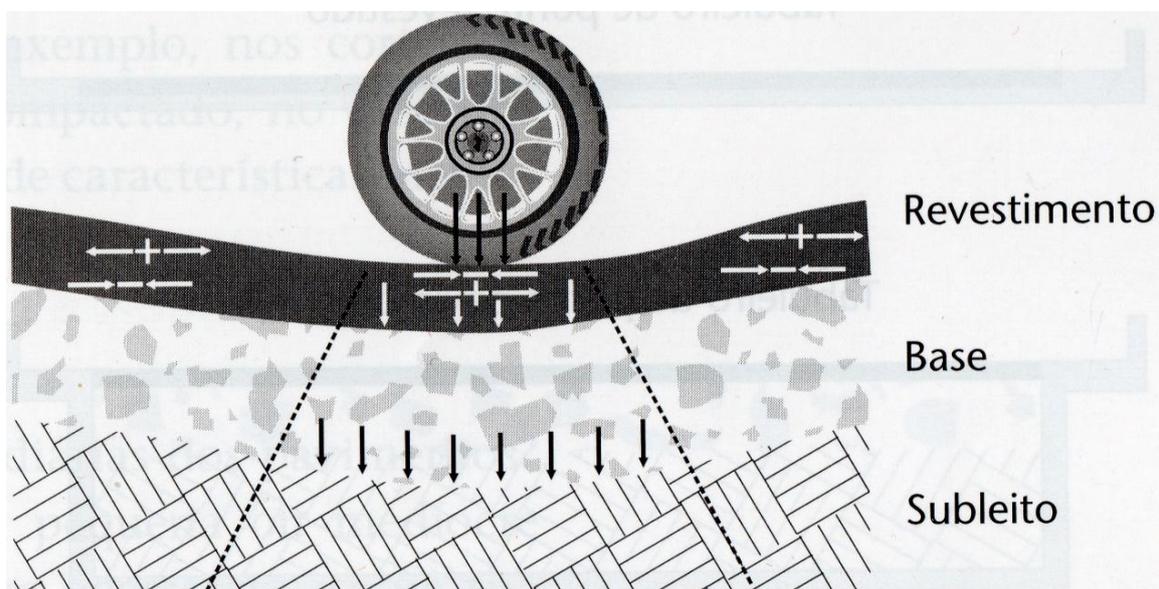
O pavimento tem a função de receber e dissipar as cargas atuantes ao longo da sua estrutura, oferecendo ao usuário conforto, economia e segurança, uma vez que possui uma superfície durável, que resiste aos esforços de desgaste (DNIT, 2006). Conforme Balbo (2007, p. 16), “seleciona-se e dimensiona-se um pavimento em função do tráfego e das condições ambientais, além das questões de economia e disponibilidade de materiais, sempre presentes”.

As tensões nos pavimentos são geradas por veículos e também pelo

ambiente. Dessa forma, conclui-se que a carga é momentânea, ou seja, pode ser aplicada de forma alternada ou contínua, de forma que o grau de intensidade das repetições e a sua magnitude apresente variações (BALBO, 2007).

A aplicação desses esforços gera tensões solicitantes no pavimento, nos sentidos horizontal e vertical. As ações de sentido vertical originam solicitações de compressão e de cisalhamento, enquanto que as horizontais se resumem a esforços de tração e confinamento de materiais, conforme Figura 1.

Figura 1 – Esforços solicitantes na estrutura do pavimento



Fonte: Balbo (2007, p. 35).

Baseiam-se estes princípios na composição do pavimento, visto que sua estrutura é construída sobre a superfície final de terraplenagem e formada a partir da união de diferentes camadas com dimensões limitadas, cujas espessuras são calculadas de acordo com as características dos materiais que a compõem. Conforme Bernucci et al. (2006, p. 337), “o comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento”.

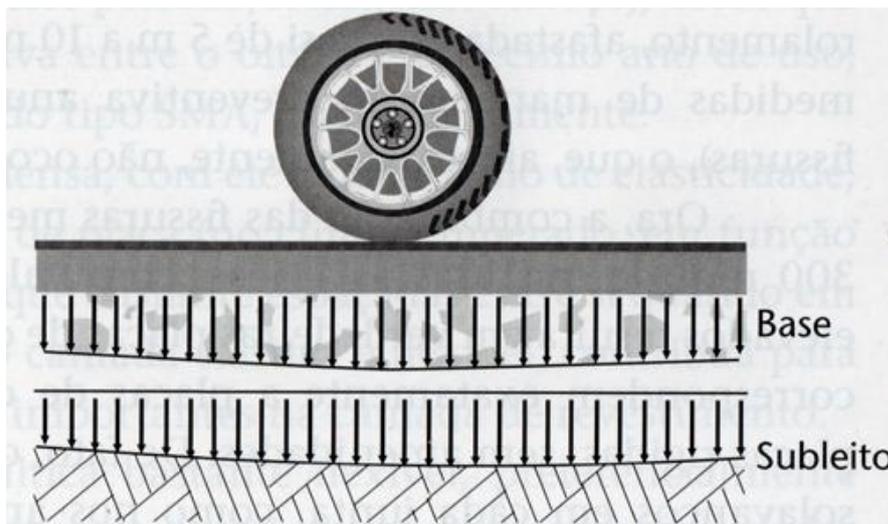
2.1.3. Classificação das estruturas dos pavimentos

Classifica-se a infraestrutura rodoviária conforme os tipos de pavimentos, ou

seja, a nomenclatura da estrutura origina-se de duas maneiras: de acordo com a composição de materiais ou segundo o comportamento mecânico (BALBO, 2007). Entretanto, adverte-se que não é adequado definir a nomenclatura de um pavimento com a utilização de somente um dos termos, devido ao fato de que um pavimento se estrutura em diversas camadas (SENÇO, 2007).

O pavimento rígido é assim denominado devido às propriedades da estrutura de revestimento, que absorvem praticamente todos os esforços horizontais, transformando-os em pressões verticais bem distribuídas e aliviadas ao longo da seção (BALBO, 2007). A Figura 2 apresenta o comportamento mecânico de pavimentos rígidos.

Figura 2 – Distribuição de tensões em pavimentos rígidos



Fonte: Balbo (2007, p. 47).

2.1.4. Camadas e materiais empregados no pavimento de concreto

Neste tópico, serão abordadas as camadas possíveis de um pavimento, com enfoque na descrição das particularidades da camada de revestimento de concreto do pavimento.

2.1.4.1. Revestimento

O revestimento é a camada aparente da rodovia que deve resistir aos esforços oriundos do tráfego e variações climáticas, sendo estes processos causadores de patologias através de desintegração e decomposição (SILVA, 2008). Sua idealização parte da elaboração de uma camada com materiais de características impermeáveis, que concedem uma superfície de rolamento confortável, através de uma seção plana; segura, com uma superfície rugosa, proporcionando aderência ao sistema pneu-pavimento; e resistente à deterioração, conservando a estrutura (SENÇO, 2007).

O revestimento de pavimento de concreto denomina-se, genericamente, pavimento de concreto de cimento Portland (CCP). Aliada a esta terminologia, estão os diversificados tipos de pavimentos de CCP, que receberão uma nomenclatura característica de acordo com os materiais empregados, como, por exemplo, a presença de aço ou não no composto de concreto (ISAIA, 2005b). Os tipos de revestimentos de CCP serão abordados mais adiante, no capítulo 2.1.5.

Bernucci et al. (2006) e DNIT (2006) consideram que o pavimento rígido é estruturado, basicamente, em duas camadas, o revestimento e a sub-base. Isso porque a qualidade do revestimento em resistir aos esforços e sua espessura equivalem à camada de base, já a sub-base detém as mesmas propriedades de uma sub-base de pavimentos asfálticos. Quando se faz necessário, aplica-se um reforço do subleito. Entretanto, conforme Balbo (2007), essa conclusão é equivocada, pois as bases têm funções estruturais e drenantes, principalmente quando compostas por material granular, bem como pelo fato de que a identificação da camada de sub-base seria dificultada caso houvesse necessidade de dividi-la em duas camadas.

2.1.4.2. Bases e sub-base

Bases e sub-base, estruturalmente, têm a mesma obrigação que as outras camadas, ou seja, dissipar os esforços à medida que se aprofunda no terreno e

auxiliar na drenagem subsuperficial (BALBO, 2007). Tecnicamente, a estrutura do pavimento é composta pelo revestimento e pela base, cabendo ao projetista dividir a base em sub-base e reforço do subleito (SENÇO, 2007). No entanto, o Manual de Pavimentos Rígidos IPR/714, elaborado pelo DNIT (2005), desconsidera a camada de base do pavimento rígido, pois a placa de concreto passa a ter a função de revestimento e base, sendo a seção composta somente pelo subleito, sub-base e revestimento.

Com relação à sub-base de um pavimento rígido, considera-se uma camada pouco espessa, que normalmente figura entre o revestimento de concreto e o subleito. Suas funções, de acordo com DNIT (2005, p. 71), são:

- a) uniformizar o suporte disponível ao longo da faixa do pavimento;
- b) evitar os efeitos das mudanças excessivas de volume dos solos do subleito;
- c) eliminar a ocorrência do fenômeno de bombeamento de finos plásticos, porventura presentes no solo de fundação, quando da presença de água em excesso e cargas pesadas (DNIT, 2005, p. 71).

2.1.4.3. Reforço do subleito

Adota-se o reforço do subleito como opção de camada somente sobreposta ao subleito, visto que sua utilização é viável técnica e economicamente quando a qualidade de seus materiais estiver, por exemplo, dividida entre sub-base e o subleito. Ou seja, o material empregado no reforço do subleito não deve ser melhor que o da sua camada superior (sub-base) e nem pior do que o subleito (DNIT, 2006).

Aplica-se reforço do subleito em pavimentos rígidos somente em casos de exceção. Seu uso não é comum devido às propriedades do revestimento em absorver praticamente todos os esforços (SENÇO, 2007).

2.1.4.4. Subleito

O subleito é de fundamental importância ao pavimento, pois é o terreno de fundação e serve de suporte para dimensioná-lo (DNIT, 2005). Constitui-se o

subleito de “material natural consolidado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado e compactado, no caso dos aterros” (BALBO, 2007, p. 37). Considera-se, também, subleito um aterro confeccionado acima de um corte que não detém propriedades aceitáveis para um subleito (BALBO, 2007).

Salienta-se que, como o subleito pode ser composto de material natural, contendo particularidades do local, deve-se ter cuidado com as alterações dos tipos de terrenos e suas propriedades, principalmente quando surgem solos inconsistentes, ou seja, expansivos, do tipo que variam bruscamente de volume conforme a umidade presente e caracterizados por camadas espessas de argila mole (DNIT, 2005).

Estruturalmente, sabe-se que o subleito é o alicerce do pavimento; por conseguinte, é a camada que receberá as cargas já minoradas pela estrutura. Sua função é de dispersar definitivamente essas solicitações para o meio. Assim, deve-se considerar subleito somente os extratos mais próximos da superfície de sua camada, pois as pressões atuantes são mínimas com o avanço da profundidade, podendo ser desconsideradas (SENÇO, 2007).

Por fim, o Quadro 1 apresenta um resumo das camadas de um pavimento de CCP e os materiais aplicáveis em cada situação.

Quadro 1 – Camadas e materiais de um pavimento em CCP

Denominação	Materiais aplicáveis
Revestimento	Concreto simples, concreto armado, concreto protendido, concreto compactado com rolo, blocos de concreto pré-fabricados, placas pré-moldadas de concreto
Base	Brita graduada simples, macadame hidráulico, mistura solo-agregado, solo-cimento, brita graduada tratada com cimento, concreto compactado com rolo, concretos asfálticos
Sub-base	Brita graduada simples, mistura solo-agregado, macadame hidráulico
Reforço do subleito	Solo importada, solo melhorado com cimento
Subleito	Solo natural ou importado

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Isaia (2005b, p. 1299).

2.1.5 Tipos de Pavimentos de concreto

Define-se pavimento de concreto a estrutura em que o revestimento é executado com diversificadas maneiras de manipulação e elaboração do concreto. Os tipos de pavimentos de concreto, de certa forma, distinguem-se de acordo com adoção de armadura ou não na sua composição estrutural (BALBO, 2009).

Os pavimentos de concreto sem armadura denominam-se pavimento de concreto simples (PCS), *whitetopping* (WT) e *whitetopping* ultradelgado (WTUD), sendo que o *whitetopping* também pode ser executado com armadura, da mesma forma que os pavimentos de concreto armado (PCA), pavimentos de concreto com armadura contínua (PCAC), pavimentos de concreto protendido (PCPRO) e os pavimentos de concreto pré-moldado (PCPM) (BALBO, 2009).

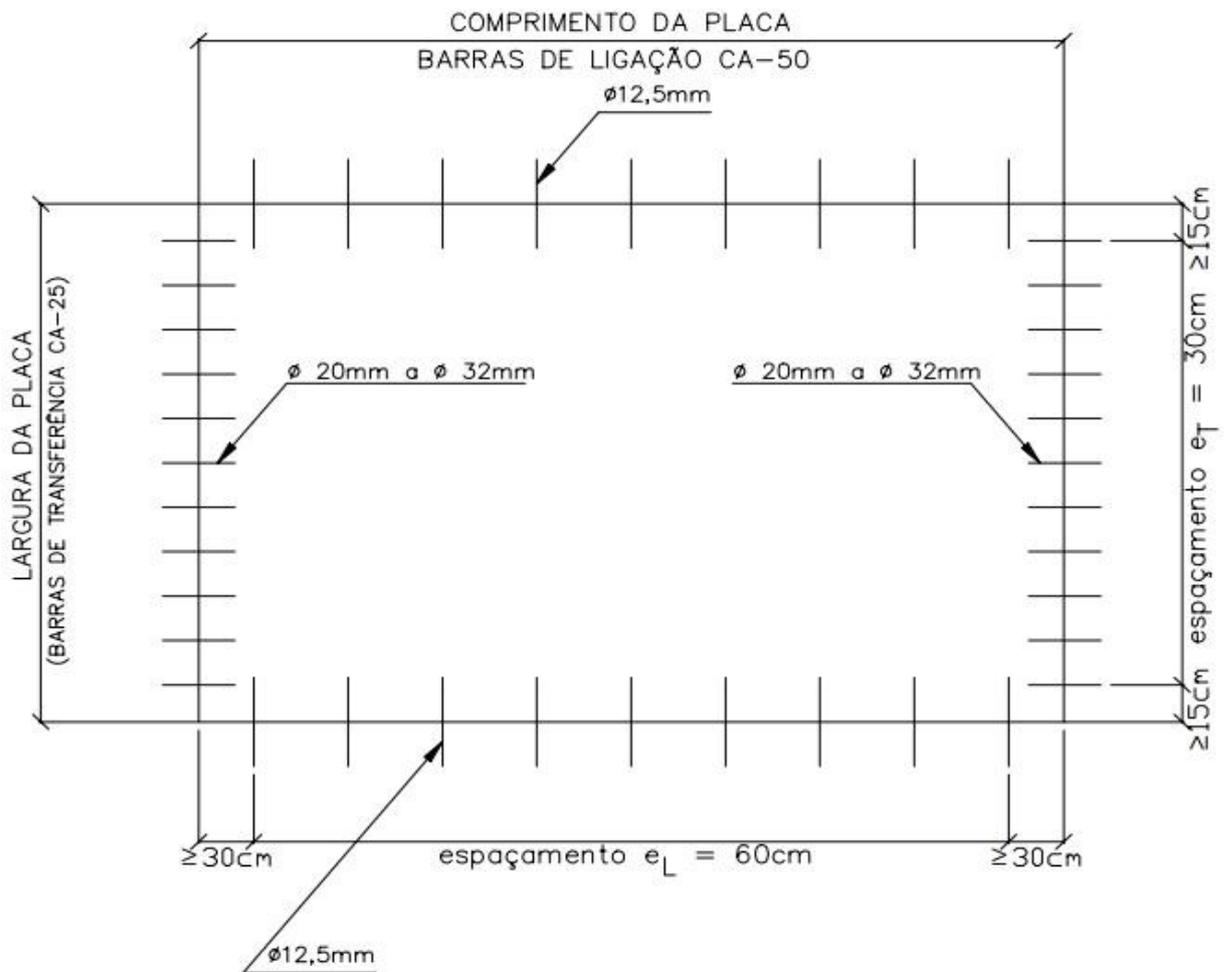
2.1.5.1 Pavimento de concreto simples - PCS

De acordo com Balbo (2009), os pavimentos de concreto simples caracterizam-se por não possuir armadura com fins estruturais em suas placas de concreto moldadas *in loco* e apresentar barras de transferência e ligação. Pode-se utilizar, como revestimento, um concreto convencional (CV), concreto de alto desempenho (CAD) ou concreto compactado com rolo (CCR) ao realizar a concretagem.

Com o intuito de direcionar a fissuração por retração hidráulica, ou seja, fissuração que ocorre devido à secagem do concreto, é realizada serragem das juntas longitudinais e transversais, com um espaçamento de 4,5 a 6 m. No encontro transversal entre placas, utilizam-se barras de transferência (BT) de carga em juntas. Quando a junta for de contração, metade do comprimento da barra deverá ser lubrificada para garantir a movimentação entre placas. A opção pela utilização das BT dependerá do método de dimensionamento do revestimento. Ademais, com o objetivo de evitar o deslocamento horizontal no encontro das placas, utilizam-se barras de ligação (BL), dado que elas são amarradas e permanecem totalmente aderidas ao concreto (BALBO, 2009).

A Figura 3, elaborada pela Prefeitura Municipal de São Paulo, IP - 07/2004, ilustra a disposição e os tipos de BT e BL que podem ser utilizadas para fazer a ligação entre placas (SÃO PAULO, 2004).

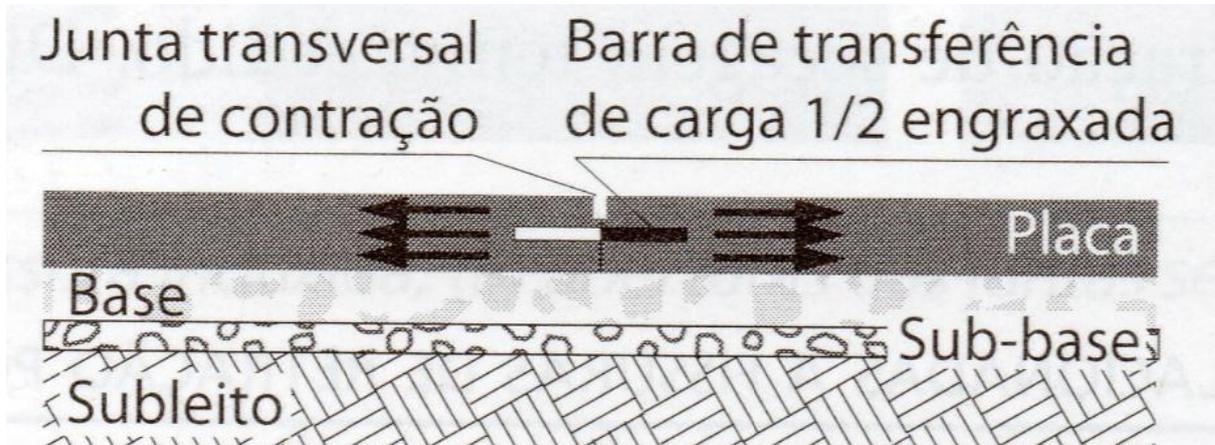
Figura 3 – BT e BL em uma placa de concreto



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Prefeitura Municipal de São Paulo IP-07 (2004, p. 35).

Estruturalmente, em alguns casos, além do revestimento em CCP, da base e do subleito, adiciona-se uma sub-base assente sobre o subleito. Para evitar a propagação de fissuras, pode-se utilizar entre o revestimento e a base, uma manta ou lona plástica e, em determinadas circunstâncias, emulsão asfáltica sobre a base cimentada para auxiliar na cura da base (BALBO, 2009). A Figura 4 ilustra a seção transversal de um PCS.

Figura 4 – Pavimento de concreto simples



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Balbo (2009, p. 177).

De acordo com Balbo (2009), o fato de a estrutura não possuir armadura estrutural responsabiliza somente a placa de concreto simples a resistir à fadiga resultante das fissuras oriundas dos esforços e tensões atuantes, inclusive as deformações de tração na flexão. Portanto, admite-se, para fins de cálculo, dimensionamento e estrutura, que o concreto atue em seu regime elástico, sendo sua principal característica a resistência à tração na flexão.

2.1.6 Características do concreto para PCS

Define-se concreto como um material aplicado em construções, derivado de uma combinação controlada de diferentes materiais que tenham a capacidade de unir-se e formar um único compósito. Para tal finalidade, aplica-se um material aglomerante (cimento), um ou mais materiais inertes (agregados) e água. A associação quantificada desses materiais, relacionados com o cimento, para formação do concreto e determinação de sua resistência denomina-se traço (AMBROZEWICZ, 2012).

Inicialmente, o concreto fresco deve ser plástico, característica necessária para que possa ser manuseado e posteriormente aplicado onde quer que seja o destino final. Após a aplicação, o fluído solidifica-se por meio das reações do aglomerante e da água, devendo ser durável às solicitações a que foi projetado (BAUER, 2008).

A justificativa da popular utilização do concreto em obras de engenharia pode ser simplificada em três fatores. O primeiro é a capacidade de o material resistir à água, tornando-o ideal para construção de estruturas para controle, armazenamento e transporte de água. Já o segundo fator motivante deve-se à trabalhabilidade inicial do concreto; dado que sua plasticidade é favorável à aplicação em fôrmas, pode-se realizar obras arrojadas com diferentes formas e tamanhos. Por último, a terceira razão é relativa ao material empregado no concreto: seus componentes são considerados, em geral, de baixo custo e fáceis de encontrar em qualquer lugar do mundo, tornando-os acessíveis para utilização em obras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo DNIT (2005), a norma DNIT-054/2004-PRO é a responsável pelo estudo do traço, caracterização dos materiais e ensaios no concreto destinado à pavimentação. Dentre as especificações da referida norma, destacam-se os procedimentos e as normas que devem ser seguidos a fim de caracterizar os componentes do concreto usados para fins de estudo do traço de cimento, agregados, água e aditivos. Visto isso, ressalta-se a importância da classificação de cada material.

Com relação aos concretos utilizados em pavimentos, confeccionados a partir da seleção dos materiais, DNIT-054/2004-PRO (DNIT, 2004b) define que é necessário ter uma resistência à tração na flexão ensaiada por meio do método proposto pela NBR 12142 (ABNT, 2010) e resistência à compressão obtida pelo ensaio indicado pela NBR 5739 (ABNT, 2007), devendo o valor da resistência à compressão ser utilizado somente quando houver relações confiáveis entre este e a resistência à compressão.

Tendo em vista a qualidade do concreto empregado na pavimentação, Balbo (2009) elencou as principais características que os concretos devem apresentar em seus estados fresco e endurecido, atentando para as possíveis causas de patologias caso não sejam efetuados os devidos controles. O Quadro 2 ilustra essa observação.

Quadro 2 – Características dos concretos nos estados fresco e endurecidos

Estado do concreto	Características	Motivo de controle	Consequências deletérias possíveis
Fresco	Trabalhabilidade	Compatibilidade com o processo construtivo	Inúmeras imperfeições estruturais e mesmo geométricas
	Segregação / exsudação	Qualidade superficial	Lamelação, textura inadequada
	Retração plástica	Evitar fissuras de superfície	Degradação estrutural
Endurecido	Retração de secagem	Evitar fissuras de contração não programadas	Ruptura precoce
	Resistência estática	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
	Módulo de elasticidade	Adequação ao projeto estrutural	Estados de tensão não previstos
	Resistência à fadiga	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
	Porosidade / permeabilidade	Percolação de água	Empenamento higrométrico, reação álcali-agregados, corrosão de armadura
	Expansão térmica	Efeitos relacionados a cargas ambientais	Empenamento não controlado
	Abrasividade	Qualidade superficial	Perda de qualidade funcional

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Balbo (2009, p. 64).

2.1.6.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Em uma breve definição, Ambrozewicz (2012) caracteriza um concreto fresco como sendo o produto gerado a partir da mistura de seus componentes. De acordo com Bauer (2008) e Isaia (2005a), um concreto fresco deve fornecer condições de transporte, lançamento e adensamento da mistura, sem que haja perda de coesão do compósito, uma vez que é com base nesses parâmetros que se forma um concreto endurecido com característica homogênea. Desse modo, Neville e Brooks (2013) salientam que é preciso criar condições de produção e de disposição nas fôrmas que não permitam a separação dos constituintes do concreto (segregação). Isso porque a consistência e a trabalhabilidade do material são importantes na determinação do grau de adensamento, que, por sua vez, garantirá as propriedades exigidas do concreto endurecido.

De acordo com Ambrozewicz (2012), a capacidade do concreto fresco em fluir determinará a consistência da mistura, sendo que, quase exclusivamente, é a quantidade de água da mistura que interfere na proporção da deformação relacionada à carga aplicada. Para Mehta e Monteiro (2014), consistência é simplesmente a capacidade de o concreto escoar, e a coesão é a capacidade do concreto em não sofrer à exsudação e à segregação.

Segundo Neville (2016), determina-se a consistência de concretos fresco em canteiros de obra através da medida de abatimento de um tronco de cone (*slum test*), ensaio prescrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998b). Ambrozewicz (2012) descreve o ensaio da seguinte forma: “o concreto fresco é compactado em uma fôrma e, após a sua retirada da fôrma, este sofre um abatimento, cuja medida em centímetros é usada como valor comparativo da consistência”.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), esse ensaio é, geralmente, utilizado em todo o mundo, devido ao fato de que seus equipamentos e principalmente o método de ensaiar são relativamente simples, o que facilita sua aplicação em concretos frescos a cada betonada. No entanto, os autores salientam que o método não indica a trabalhabilidade e não se deve utilizá-lo para determinação de consistência de concretos muito fluidos ou muito secos.

Para Isaia (2005a), existem fatores que afetam e limitam a trabalhabilidade do concreto fresco. A partir da variação unificada ou conjunta de fatores, como consumo de água, agregados, consumo de cimento, relação água/cimento, agregado/cimento, adições e aditivos, serão prejudicadas a fluidez e a coesão da mistura, afetando, por conseguinte, a trabalhabilidade. Já os fatores limitantes ocorrem durante a concretagem, como as técnicas de execução e as características geométricas da estrutura.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o sucesso de qualquer obra está diretamente relacionado com a trabalhabilidade do concreto fresco. Sua importância é tanta que, embora as técnicas de cura e dosagem sejam corretamente aplicadas, as características de durabilidade e resistência não serão alcançadas se a mistura não for lançada e adensada adequadamente.

2.1.6.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

Segundo Bauer (2008), o concreto endurecido, apesar de estar em contínua evolução, é vulnerável ao meio a que está exposto, gerando, dessa forma, modificações em suas características. De acordo com Isaia (2005a), os principais elementos do concreto são a interação entre os agregados e a pasta de cimento, pois a relação entre os dois componentes pode resultar em diversas modificações nas características mecânicas, elásticas, físicas e químicas.

Para Mehta e Monteiro (2014), a capacidade do concreto em resistir aos esforços de compressão é o principal fator condicionante à sua utilização, sendo que o concreto apresenta resistências à tração e à flexão menor em comparação à compressão. Neville (2016) concorda com a importância da resistência à compressão do concreto, pois é a partir dessa característica que se tem ideia da sua qualidade ao relacioná-la com a qualidade da pasta de cimento. Entretanto, vale ressaltar que características de durabilidade e de permeabilidade podem ser exigidas com um caráter de maior importância em certas situações.

A durabilidade das estruturas de concreto, segundo Bauer (2008), está relacionada com a intensidade da agressividade a que o elemento está exposto durante sua vida de serviço. Assim, a deterioração será maior ou menor dependendo das situações de exposição e do ambiente, de modo que é possível ocorrer uma total desagregação da estrutura. Entretanto, ações preventivas na seção degradada ou local afetado podem corrigir o problema, garantindo à estrutura mais tempo de sobrevivência.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a deterioração do concreto por processos físicos e químicos relaciona-se com a sua permeabilidade. A água, ingrediente que faz parte do concreto desde sua concepção, é também um fator degradante devido a sua ação entre os poros presentes na estrutura; logo, um concreto com baixa porosidade será mais impermeável. Atende-se a essa circunstância com medidas de controle, como o consumo de cimento apropriado, a baixa relação água/cimento e o correto processo de adensamento e cura.

Conforme Neville (2016), o teor da porosidade, importante parâmetro para a

resistência do concreto, está diretamente relacionado com a relação água/cimento e o adensamento da mistura, visto que as duas ações são responsáveis pela formação do volume de vazios. Portanto, é a quantidade do volume de vazios que determinará a resistência do concreto endurecido.

2.1.7 Caracterização mecânica do concreto

Para Neville (2016), quando objetiva-se analisar um concreto, deve-se ter conhecimento dos diversificados métodos de ensaios disponíveis e suas influências, principalmente quando deseja-se determinar certas propriedades. De acordo com o autor, há duas maneiras gerais de classificar os ensaios em concretos: os ensaios mecânicos destrutivos e ensaios não destrutivos. Os dois principais objetivos dessas verificações são o controle da qualidade e a conformação com as especificações dos concretos.

Segundo Isaia (2005a), a caracterização mecânica define-se pela quantificação, por meio de equipamentos, da força necessária para provocar a ruptura do concreto. Ou seja, determina-se a tensão que representa a resistência do compósito através da última aplicação suportada pelo material antes de entrar em colapso. Segundo Isaia (2005a) e Mehta e Monteiro (2014), a capacidade do material de aguentar as ações atuantes sobre sua estrutura sem que se rompa é definida como resistência do concreto.

Os principais parâmetros de resistência do concreto são as resistências à compressão e a resistência à tração, visto que, em certas situações, essas ações podem estar empregadas em um mesmo elemento estrutural, além de permitirem o surgimento e a associação de outras (ISAIA, 2005a).

2.1.8 Características dos materiais para concreto de PCS

2.1.8.1 Cimento

A norma do DNIT 050/2004-EM (DNIT, 2004a) apresenta as exigências a que devem atender os cimentos utilizados em pavimentos de concreto. Respeitadas

devidas condições, pode-se optar por qualquer tipo de cimentos para compor o concreto de pavimentos. No entanto, atenta-se para a possibilidade de fissuras e custos envolvidos caso a opção seja por um cimento não adequado. Desse modo, cimentos que conferem aos concretos um ganho de resistência gradual em um maior período de tempo, tem-se mostrado uma boa alternativa para evitar esses problemas (DNIT, 2005).

2.1.8.2 Agregado

De acordo com Neville (2016), prejudica-se a resistência do concreto quando, em sua composição, estão presentes agregados com propriedades não desejáveis, tornando-o assim uma mistura não durável e prejudicada em sua função estrutural. Atrelada a essa afirmação, DNIT (2005) salienta que quaisquer agregados destinados à composição de concretos para pavimentação devem ser analisados.

Esta análise se faz necessária, pois a existência dos materiais deletérios inviabiliza a utilização do agregado na composição do concreto. Deve-se, também, complementar ao processo de aceitação a divisão por granulometria dos agregados, cuja avaliação deverá ser individual, de acordo com as normativas discriminadas a seguir pelo DNIT (2005, p. 22):

a) Material Rochoso

- absorção e massa específica (NBR 9937);
- abrasão Los Angeles (NBR 6465);
- esmagamento (NBR 9938).

b) Pedregulhos

- granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura (NBR 7217);
- teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR 7218);
- absorção e massa específica (NBR 9937);
- teor de material pulverulento (NBR 7219);
- índice de forma (NBR 7809);
- abrasão Los Angeles (NBR 6465);
- esmagamento (NBR 9938);
- teor de partículas leves (NBR 9936);
- 10% de finos (DNER-ME 96/98).

c) Agregados Miúdos

- granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura (NBR 7217);
- teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR 7218);
- massa específica e absorção (NBR 9776);
- teor de material pulverulento (NBR 7219);

- teor de impurezas orgânicas húmicas (NBR 7220);
- teor de partículas leves (NBR 9936) (DNIT, 2005, p. 22).

Aceita-se a adoção, em concretos para pavimentação de rodovias e estradas, os agregados que estiverem dentro desses padrões.

2.1.8.3 Água de amassamento

A água de amassamento de concreto para pavimentação segue os mesmos padrões de avaliação e limitações de qualquer água utilizada em concretos de obras convencionais. Visando a obtenção requisitos de qualidade da água para amassamento de concretos voltados à pavimentação, seguem as normas especificadas pelo DNIT (2005):

- a) NBR 12654 – Água de Amassamento – Coleta de Amostra para Ensaios;
- b) DNIT 036/2004 – ME – Água de Amassamento – Ensaios Químicos – Método de Ensaio;
- c) DNIT 037/2004 – ME – Água de Amassamento – Ensaios Comparativos – Método de Ensaio.

2.1.8.4 Aditivos

De acordo com Bauer (2008), aditivo é um produto aplicado ao concreto com a finalidade de qualificar ou minimizar os seus defeitos, conferindo ao compósito determinadas características ou reforçando-as. Entretanto, sua aplicação pode surtir efeitos positivos e negativos, ou seja, o ganho da qualidade pode gerar outra deficiência. O autor sugere a aplicação do aditivo em quantidades pequenas na betoneira, antes ou durante a confecção do concreto, adicionando-o no processo de mistura.

Já Neville (2016) define aditivo de maneira mais clara, afirmando que é um produto químico, em formato sólido ou líquido, que, em regra, representa uma quantidade máxima de 5% (em casos específicos essa quantidade pode ser maior) em relação à massa do cimento.

Os aditivos específicos utilizados para confecção do concreto para pavimentação seguem as ideias de Balbo (2009) e DNIT (2005), que concordam com a importância da utilização dos aditivos plastificantes, que são responsáveis por reduzir a água na mistura. Balbo (2009) acrescenta a utilização dos retardadores e aceleradores de pega; DNIT (2005), o uso de incorporadores de ar em concretos para fins de pavimentação.

2.2 Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são definidos como a expressão que representa o que se conhece por lixo, ou seja, restos de certa atividade que não são mais desejáveis. Emprega-se a expressão resíduos sólidos em substituição à lixo, inclusive em normas, pois seu significado possibilita um entendimento sobre as ações de reaproveitamento, reutilização ou reciclagem dos materiais descartados (BARROS, 2012).

Para a NBR 10004 (ABNT, 2004a), resíduos sólidos são todos aqueles encontrados nos estados sólidos e semissólidos, originários de atividades diversas, quais sejam, doméstica, hospitalar, comercial, industrial, agrícola, de serviços e de varrição, todos oriundos de sistemas de tratamento de água e certos líquidos.

Para Barros (2012), a gerência dos resíduos sólidos parte do princípio do seu conhecimento. Isso porque, para que possa ser corretamente acondicionado, coletado, transportado e, finalmente, depositado ou tratado, deve-se saber de suas características físicas, químicas e/ou biológicas. Ainda de acordo com a autora,

A origem dos resíduos auxilia na atribuição de responsabilidades, assim como na tomada de decisão pelas escolhas nas diversas etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos, perante as esferas federal, estadual e municipal de regulamentação do setor (BARROS, 2012, p. 17).

Com o intuito de gerenciar esses resíduos, o governo brasileiro criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal n. 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Dentre uma de muitas atribuições à PNRS, em seu art. 13, constata-se a classificação dos resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade. No inciso I, alínea h, encontra-se a classificação dos resíduos da

construção civil, que são descritos como: “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”.

2.2.1 Resíduos da construção civil

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução n. 307 (CONAMA, 2002), busca gerenciar, por meio de diretrizes, critérios e procedimentos, os resíduos da construção civil com o intuito de minimizar os impactos ambientais, sendo que aos olhos da resolução mencionado, o gerador dos resíduos são os principais agentes atuantes. Nesse sentido, são aplicados aos responsáveis os princípios de não geração, redução, reciclagem e reutilização.

Segundo a Resolução (CONAMA, 2002), resíduos da construção civil são:

Art. 2 [...].

I - [...] 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.

No meio técnico, alguns autores como Mehta e Monteiro (2014), Balbo (2009), John e Agopyan (2000) e Angulo (2000) utilizam a denominação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), quando se referem aos resíduos de construção civil (RCC). Para Angulo (2000), a denominação RCD, diferentemente de outros termos, assemelha-se com sua origem, ou seja, nas construções e em sua posterior demolição. Portanto, neste trabalho, será atribuída a denominação RCD em referências aos resíduos de construção civil.

Conforme citado na Resolução n. 307 (CONAMA, 2002), deve-se fazer uso da reciclagem dos RCD, ação considerada técnica e ambientalmente viável, visto que, segundo John e Agopyan (2000), é baixo o potencial de contaminação a partir da prática de reciclagem. Para Barros (2012), existe um potencial de utilização dos RCD devido às diversificadas formas de reciclagem e reaproveitamento. Dentre os exemplos referenciados pela autora, destaca-se sua transformação em agregados

que podem ser aplicados em concretos para pavimentação.

Com relação aos agregados, em seu art. 3, inciso I, alínea “a”, a Resolução do CONAMA n. 307/2002 (CONAMA, 2002) classifica em classe A os agregados produzidos de resíduos oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, que podem ser reutilizados e reciclados ou dispostos em aterros de classe A.

Com relação à aplicação dos agregados classificados como classe A em pavimentação, Motta (2005) conclui que essa pode ser uma prática vantajosa, pois pavimentos de concreto necessitam de grandes volumes de agregados, que podem ser utilizados com suas diferentes granulometrias. Saliencia-se que, quando aplicado em concretos, deve-se ter uma restrição maior quanto à granulometria dos agregados.

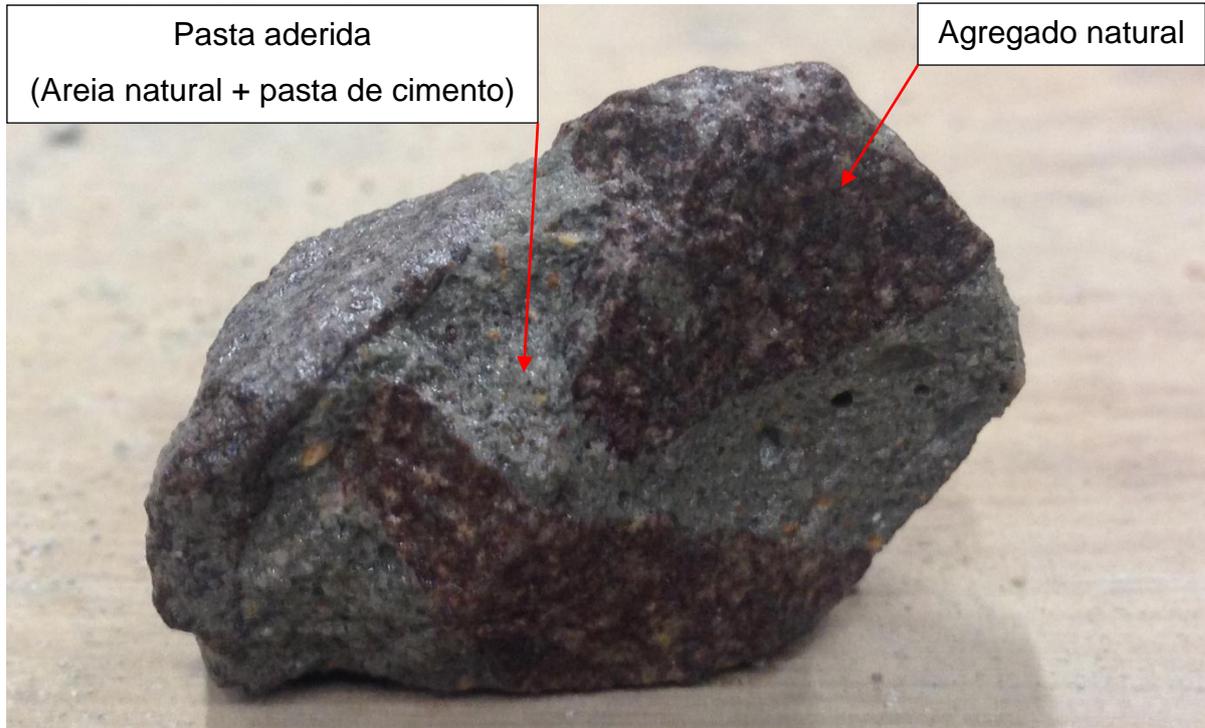
2.2.2 Propriedades dos agregados reciclados de concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2014), obtém-se o agregado reciclado pelo processo de britagem e peneiramento do RCD com os mesmos equipamentos que são utilizados para o processamento dos agregados naturais. Nesse contexto, os resíduos de concreto são os materiais utilizados para a produção dos agregados reciclados de concreto ARC. De acordo com os autores, devido a essa procedência, os ARC apresentam algumas diferenças de propriedades em relação aos agregados naturais. Essa modificação deve-se à argamassa e à pasta de cimento que estão aderidas ao agregado natural (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Sturtevant (2007), o processamento de britagem determina a quantidade de pasta aderida ao agregado natural, de modo que, quanto menor ela for, menos poroso será o ARC. Assim sendo, deve-se optar por um modelo de britagem que remova o máximo possível de pasta aderida.

Em um estudo comparativo sobre britadores com essa finalidade, Tseng (2010) comprovou que os modelos de britagem por britador de mandíbula e britador de impacto, produzem ARC semelhantes. A Figura 5 ilustra um ARC.

Figura 5 – Agregado reciclado de concreto



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), deve-se ressaltar a importância e a necessidade de evitar ARC com alto grau de porosidade, pois, conseqüentemente, suas propriedades apresentarão menor densidade e resistência à abrasão quando submetido ao ensaio de Abrasão Los Angeles, maior absorção de água e superfície mais rugosa. Por fim, os autores salientam sobre a possibilidade de serem afetadas as propriedades dos concretos produzidos com ARC quem detêm essas características.

Em vista disso, agregados reciclados que se destinam a concretos com finalidade em obras de pavimentação devem ser certificados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2004b). A norma em questão apresenta alguns requisitos necessários para os ARC e sugere, também, a execução de análise granulométrica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), além de uma pré-molhagem dos agregados graúdos e miúdos.

2.2.3 Propriedades dos concretos contendo agregado reciclado

Como mencionado anteriormente nesta revisão, a resistência é a propriedade do concreto de maior relevância para técnicos da área de construções. Mencionou-se, também, que a porosidade do concreto é um fator que prejudica a resistência através de uma relação inversa, ou seja, quanto mais poros, menos resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os Quadros 3, 4, 5 e 6 representam estudos comparativos entre as propriedades dos concretos produzidos com agregado reciclado e dos concretos convencionais, produzidos com agregado natural.

Quadro 3 – Diferenças nas propriedades do concreto reciclado comparadas ao concreto com agregado natural, utilizando a mesma relação água/cimento e 100% de substituição de agregado

Resistência à compressão	Redução em até 25%
Resistência à tração direta e na flexão	Redução em até 10%
Módulo de elasticidade	Redução em até 45%
Retração por secagem	Aumento em até 70%
Fluência	Aumento em até 50%
Absorção de água	Aumento em até 50%
Profundidade de carbonatação	Similar
Resistência ao congelamento e degelo	Reduzida
Penetração de cloretos	A mesma ou ligeiramente aumentada
Abatimento	O mesmo ou ligeiramente reduzido

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Marinkovi et al. apud Mehta e Monteiro (2014, p. 287).

Quadro 4 – Efeitos do ARC sobre as propriedades mecânicas do concreto

Propriedades	Possibilidades de mudanças esperadas de misturas similares usando agregados virgens	
	Utilização de agregado graúdo reciclado	Utilização de agregado graúdo e miúdo reciclados
Resistência à compressão	5% a 24% menor	15% a 40% menor
Variação da resistência	maior	maior
Módulo de elasticidade	10% a 33% menor	25% a 40% menor
Fluência	30% a 60% maior	30% a 60% maior
Resistência à tração	10% menor	10% a 20% menor
Permeabilidade	200% a 500% maior	200% a 500% maior
Coeficiente de expansão	Menor que o esperado para o uso de agregados graúdos	Menor que o esperado para o uso de agregados graúdos
Peso específico	5% a 10% menor	5% a 10% menor

Fonte: Adaptado pelo autor com base em FHWA (2007, texto digital).

Quadro 5 – Efeito do ARC no concreto fresco

Propriedades	Possibilidades de mudanças esperadas de misturas similares usando agregados virgens	
	Utilização de agregado graúdo reciclado	Utilização de agregado graúdo e miúdo reciclados
Demanda de água	Maior	Muito maior
Retração por secagem	20% a 50% maior	70 a 100% maior
Trabalhabilidade	Menor	Menor

Fonte: Adaptado pelo autor com base em FHWA (2007, texto digital).

Quadro 6 – Efeito do ARC no concreto endurecido

Propriedades	Possibilidades de mudanças esperadas de misturas similares usando agregados virgens	
	Utilização de agregado graúdo reciclado	Utilização de agregado graúdo e miúdo reciclados
Taxa de corrosão	Maior	Maior
Resistência ao gelo-degelo	Varia de acordo com a porosidade	Varia de acordo com a porosidade
Carbonatação	65% maior	65% maior
Resistência aos sulfatos	Depende da mistura	Depende da mistura

Fonte: Adaptado pelo autor com base em FHWA (2007, texto digital).

Percebe-se que, nos dois estudos apresentados pelos Quadros 3 e 4, a resistência à tração foi a propriedade mecânica que teve a menor variação, enquanto que o módulo de elasticidade de concretos com ARC foi a propriedade que teve a maior redução em relação ao concreto convencional. Para Tseng (2010), essas variações são favoráveis à utilização de concretos com ARC em pavimentos, pois o compósito apresenta uma boa resistência à tração e um módulo de elasticidade reduzido. Segundo Cordeiro (2013), em seu estudo sobre ARC graúdos na composição de concretos, a variação do módulo de elasticidade está condicionada à resistência do concreto, ou seja, quanto maior a resistência do concreto, maior a diferença entre os módulos de elasticidade dos concretos naturais e os que contêm ARC.

Sobre a resistência à tração, Leite (2001) conclui, através de ensaio de tração por compressão diametral e tração na flexão, que a redução da resistência à tração se relaciona com a dimensão dos agregados reciclados, ou seja, agregados com dimensões maiores tendem a ser mais frágeis devido a suas constituições.

Sobre a trabalhabilidade de concretos com ARC para pavimentação, segundo FHWA (2007), aconselha-se uma substituição de ARC miúdos de, no máximo, 30% ao agregado miúdo natural. Cita-se, ainda, que aditivos podem ser utilizados para melhorar a trabalhabilidade, ou o ARC pode ser umedecido antes da sua aplicação na mistura do concreto.

Para (Cordeiro 2013), a trabalhabilidade do concreto reciclado é prejudicada em virtude das propriedades do ARC. O fator água/cimento é afetado devido a essas circunstâncias, pois as misturas são mais secas. Segundo Tseng (2010) e (Cordeiro 2013), é necessário um maior consumo de cimento para se obter os parâmetros de resistência mecânica.

Para Neville (2016), concretos contendo ARC terão uma maior porosidade e absorção e menor massa específica quando comparados com concretos compostos por agregados naturais. Justifica-se essa definição uma vez que o ARC possui aderido em sua constituição argamassa envelhecida.

Com relação ao concreto fresco produzido com ARC, Neville (2016) cita que propriedades, como trabalhabilidade, consistência, retração por secagem, módulo de elasticidade e relação água/cimento, são afetadas quando a opção é pela utilização de ARC e potencializadas quando este é utilizado como agregado graúdo e miúdo. No estado endurecido, de acordo com o autor, reduz-se a resistência à compressão do concreto quando confeccionado com agregados miúdos de ARC em substituição ao agregado miúdo natural.

Entretanto, Vasques e Gonçalves (apud MEHTA; MONTEIRO, 2014) afirmam que concretos com quantidades de 20% ou menos de ARC em substituição ao agregado natural não representam modificações nas propriedades mecânicas do concreto produzido. Também, de acordo com a normatização do Deutsches Institut für Normung-DIN apud Mehta e Monteiro (2014), não há diferença entre as propriedades dos concretos contendo ARC e concretos convencionais compostos por até 40% de ARC.

Visto isso, algumas justificativas são citadas por Neville e Brooks (2013, p. 400) com relação aos ARC e as propriedades dos concretos produzidos com esse material:

- Por o ARC ser constituído em parte por argamassa velha, a massa específica do concreto produzido com ARC é menor que a do concreto produzido com agregado convencional.
- Pela mesma razão, o concreto produzido com ARC tem maior porosidade e absorção.
- A resistência à compressão potencial do novo concreto é governada principalmente pela resistência do concreto velho, desde que o agregado miúdo seja proveniente de britagem de rocha ou areia natural de boa

qualidade (NEVILLE; BROOKS, 2013, p. 400).

Por fim, para Neville (2016), um dos principais destinos do ARC são projetos de pavimentação, de modo que o projetista deve ter ciência das reduções que o agregado pode gerar nas propriedades dos concretos. Uma forma compensatória a essa redução é adotar uma espessura maior para a camada de concreto do pavimento, de acordo com FHWA (2007).

2.2.4 Dosagem do concreto contendo agregado reciclado

Concretos contendo ARC apresentam uma redução de resistência mecânica. Nesse sentido, Tseng (2010) cita possíveis alternativas aplicadas ao concreto para evitar essa perda. A utilização de sílica ativa, cinza volante e adição de fibras durante a dosagem, além de uma cura rápida, são, de acordo com a autora, maneiras de tornar o concreto reciclado mais resistente.

Segundo FHWA (2007), o processo de mistura e dosagem dos concretos contendo agregado reciclado pode ser realizado da mesma forma no caso de concretos com agregados naturais. Contudo, deve-se atentar para o consumo de água que varia de acordo com a porcentagem de agregados reciclados que serão utilizados.

Nessa perspectiva, Tseng (2010) sugere a utilização de água para compensar a quantidade absorvida pelos agregados e a pré-molhagem dos materiais. De acordo com FHWA (2007), pode-se necessitar de uma quantidade maior de cimento para se chegar a determinados valores de resistência.

Uma resposta para esse maior consumo de cimento encontra-se no estudo realizado por Levy (2001), em que foram realizados ensaios com agregado reciclado de concreto e alvenaria. Concluiu-se que o formato lamelar dos grãos provoca maior travamento entre os agregados na etapa de mistura; por conseguinte, para que seja mantida a trabalhabilidade, necessita-se de mais pasta de cimento, que funcionará como lubrificante, mantendo a consistência desejada.

2.3 Estudos com incorporação de agregado reciclado de concreto em pavimento rígido

2.3.1 Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (LEITE, 2001)

Em um estudo avaliativo, Leite (2001) verificou as propriedades dos agregados de resíduos de construção e demolição e dos concretos produzidos com esse material. Para tanto, executaram-se diversificados ensaios relacionados ao fator água/cimento e utilização de agregados graúdos e miúdos reciclados na mistura dos concretos. Assim sendo, avaliou-se a influência dos agregados no estado fresco e endurecido dos concretos e realizaram-se relações entre resistências mecânicas. Para algumas determinações, a autora fez uso de modelagem matemática.

Dentre as inúmeras conclusões de Leite (2001), destacam-se as limitações das normas para determinação de propriedades de agregados naturais que não se aplicam em agregados reciclados. A NBR 9937 (ABNT, 1987c) não é viável para determinar a massa específica do agregado graúdo reciclado, de modo que a autora utilizou um método descrito por Neville (1995). A execução dos ensaios para agregados naturais, prescritos pela NBR 9777 (ABNT, 1987b) e NBR 9937 (ABNT, 1987c), não representaram resultados satisfatório para o teor de absorção de água por parte dos agregados graúdos e miúdos reciclados. Portanto, para a seguinte determinação, a autora propôs um método de absorção de água.

Sobre a trabalhabilidade, Leite (2001) não obteve resultados satisfatórios quando executado o ensaio de abatimento de tronco de cone NBR 7223 (ABNT, 1982) para determinar a consistência do concreto com agregado reciclado. Para a autora, o formato dos agregados dificulta essa medida, pois causa um travamento entre os grãos.

Leite (2001) determinou uma taxa de absorção de 50% do total da água em apenas 30 minutos para os agregados graúdos e miúdos, em um ensaio de 24 horas. Ou seja, é nas primeiras horas que ocorrem o maior percentual de absorção.

Esse fator, segundo a autora, relaciona-se com o tamanho das partículas, ou seja, quanto menor as partículas do agregado reciclado, mais rápida sua absorção. Assim sendo, conclui-se que os concretos com agregados reciclados necessitam de mais água.

Com relação às propriedades mecânicas do concreto, Leite (2001) relaciona os resultados encontrados com a porosidade, tanto dos agregados quanto do concreto. Os resultados obtidos confirmaram a Lei de Abrams: quanto maior o fator água/cimento, menor a resistência.

Sobre a resistência à tração na flexão, segundo Leite (2001), sempre diminuirá, mesmo com diferentes combinações de agregados reciclados devidamente misturados. Para concretos ensaiados à tração por compressão diametral, o fator representativo a esse ensaio é a relação água cimento. A autora chegou a resultados superiores de resistência à tração por compressão diametral em concretos com agregados reciclados, comparando-os a concretos de referência produzidos com agregados naturais. Por fim, como já mencionado, Leite (2001) conclui que concretos reciclados solicitados à tração sofrem uma redução de resistência de acordo com a dimensão dos grãos empregados na mistura.

Realizando comparações, a relação resistência à tração com resistência à compressão, segundo Leite (2001), é determinada pela resistência à compressão, que causa uma redução na relação f_t/f_c à medida que seu valor de resistência aumenta. Vale ressaltar que esse fator é maior quando se utilizam agregados reciclados.

Por fim, conclui-se que, de acordo com Leite (2001), resíduos de construção e demolição são aplicáveis em concretos, pois os ensaios realizados apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, deve-se ter cautela quanto ao fator água/cimento com utilização de agregado graúdo e miúdo reciclado.

2.3.2 Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento Portland para pavimentação (BARBOSA JÚNIOR, 2008)

Barbosa Júnior (2008) realizou, em seu estudo, um comparativo de

agregados reciclados oriundos de blocos de concreto com agregados cerâmicos, objetivando verificar as propriedades dos concretos produzidos com esses materiais e sua utilização em obras de pavimentação.

Segundo Barbosa Júnior (2008), os variados métodos de dosagens resultam normalmente nas mesmas quantidades de materiais para produção do concreto. Também não há reduções consideráveis de resistências para os concretos produzidos com os referidos agregados em comparação ao agregado natural. Sobretudo, os ensaios com material cerâmico representaram um desempenho considerável de resistência quando ensaiados em um período de dois anos. Assim como Tseng (2010), para Barbosa Júnior (2008), a quantidade excessiva de água absorvida pelos agregados justifica o ganho de resistência em um maior período de tempo.

Portanto, Barbosa Júnior (2008) conclui que é viável a utilização dos agregados reciclados em concretos para pavimentação, desde que seja controlada sua utilização, evitando-se uma mistura com agregados de comportamentos diferentes.

2.3.3 Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas (TSENG, 2010)

No trabalho elaborado por Tseng (2010), foram comparados agregados reciclados de concreto produzidos por dois processos de britagem diferentes, e a importância desse processo na determinação das características dos agregados, além de analisar as propriedades do concreto confeccionado com esses materiais.

Segundo Tseng (2010), os agregados produzidos pelos britadores de mandíbula e de impacto resultaram em agregados semelhantes; portanto, segundo a autora, o uso do britador de impacto para esse fim não se justifica devido ao custo elevado.

Tseng (2010) considera que algumas normas não se aplicam a agregados reciclados da mesma forma que são propostas para caracterização de agregados

naturais. Uma normativa que se enquadra nessa afirmação é a NBR 9776 (ABNT, 1987a), utilizada para a determinação da massa específica aparente.

Por fim, de acordo com Tseng (2010), ensaios demonstraram que ocorre uma queda de resistência mecânica e do módulo de elasticidade do concreto, a proporções constantes de absorção de água pelos agregados reciclados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais utilizados na confecção do concreto e os métodos de ensaios laboratoriais para a obtenção da resistência mecânica dos concretos, bem como o procedimento empregado para dimensionar o pavimento rígido.

3.1 Materiais

Neste item, descrevem-se os agregados, o cimento e água utilizada para confecção do concreto estudado nesta pesquisa. As características desses materiais são de extrema importância, pois é a partir deles que foi realizada a dosagem do concreto para atingir a resistência desejada. Todos os testes laboratoriais, dosagens e ensaios, foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC), da Universidade do Vale do Taquari - Univates, localizada no município de Lajeado/RS.

3.1.1 Agregado

Para a produção do concreto de referência, os agregados graúdos e miúdos utilizados são aqueles encontrados na região do Vale do Taquari. Com relação ao teor de umidade desses materiais, utilizou-se agregado graúdo com umidade ambiente e agregado miúdo secado em estufa a aproximadamente 105 °C por 24

horas e, posteriormente, estocado em um recipiente fechado até a sua utilização, caracterizando-o, dessa forma, como seco.

Para controle e aceitação dos agregados, realizou-se a classificação granulométrica através do ensaio de peneiramento proposto pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Posteriormente, confeccionou-se a partir dos resultados a curva granulométrica e verificou-se o potencial de utilização deste, como material para concreto, de acordo com as faixas específicas apresentadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A Figura 6 ilustra a realização do ensaio de granulometria com auxílio de mesa vibratória.

Figura 6 – Ensaio de granulometria dos agregados

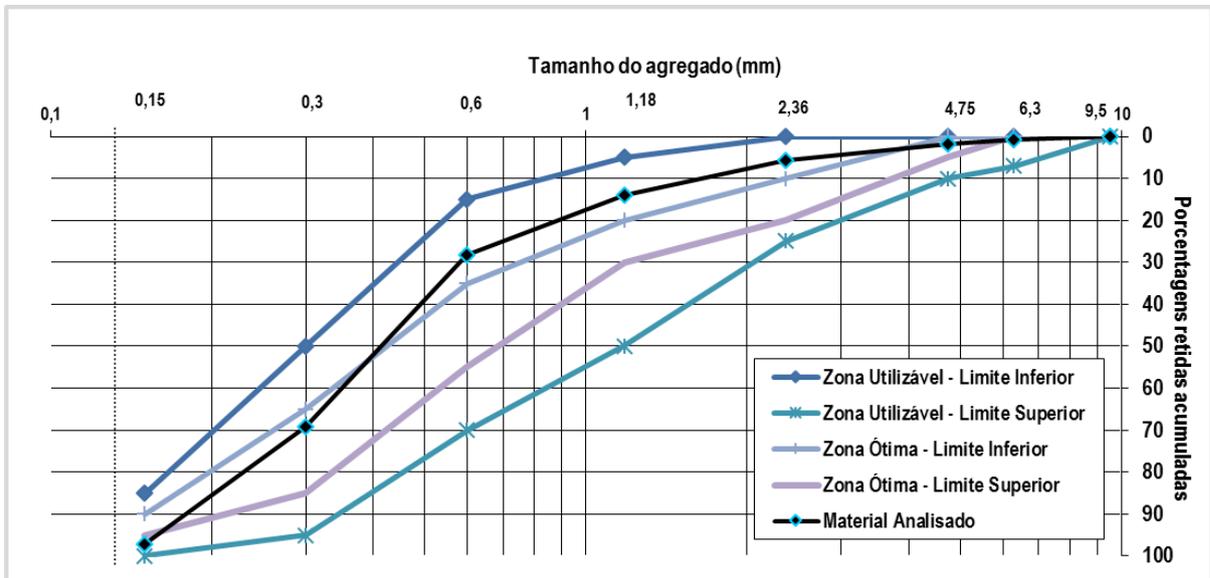


Fonte: Do autor (2017).

Após o agitação das peneiras, anotou-se a quantidade de material retida em cada uma das malhas utilizadas, quais sejam: 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", #4, #8, #16,

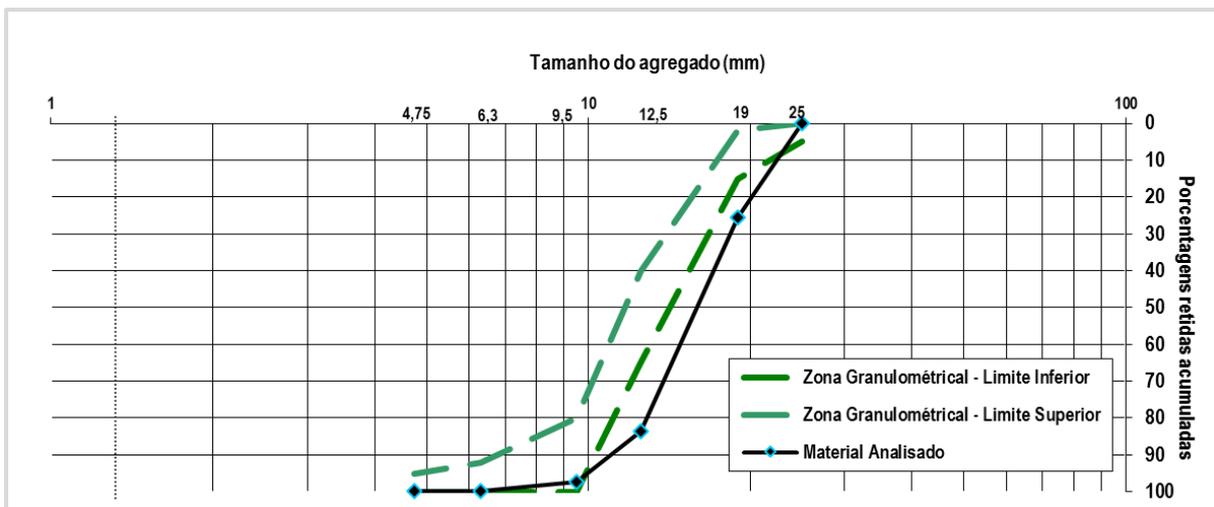
#30, #50 e #100. Os Gráficos 1 e 2 apresentam as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo naturais obtidas pelo ensaio de peneiramento.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Do autor (2017).

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Do autor (2017).

Percebe-se, através do Gráfico 1, que o agregado miúdo fornecido encontra-se fora da zona ótima de utilização, mas entre os limites utilizáveis. Ou seja, apesar de o agregado miúdo estar dentro do limite utilizável permitido pela NBR 7211 (ABNT, 2009), este ensaio demonstra que o material não apresenta boas condições

de utilização como ingrediente de concreto. Caso seja necessário produzir concreto com um maior rigor tecnológico a partir desse agregado, deve-se realizar a correção da granulometria, entretanto, como objetiva-se obter um elemento comparativo entre materiais, não realizou-se esta correção.

Com relação à curva granulométrica do agregado graúdo apresentada no Gráfico 2, percebe-se que este encontra-se fora dos limites utilizáveis. Isto é, sua utilização como ingrediente do concreto não é aceita pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Como opção para produção de concreto a partir desse agregado, deve-se realizar a correção da granulometria, entretanto, a correção não foi realizada devido as mesmas considerações propostas para o agregado miúdo, justificadas no parágrafo anterior.

O concreto com finalidade de comparação, por sua vez, foi produzido com os agregados reciclados do concreto de referência. Os materiais foram obtidos por meio de um processo primário de britagem dos corpos de prova do concreto de referência, citados anteriormente, que produziram agregados graúdos e miúdos. Estes foram estocados em sacos e utilizados com umidade ambiente, sem passar por um processo de secagem ou umidade prévia.

Além disso, os agregados foram peneirados e separados conforme sua fração granulométrica, com o intuito de reproduzir a curva granulométrica dos agregados naturais. O objetivo desta prática foi de separar, de acordo com sua granulometria, o ARC, já que o processo primário de britagem produziu agregados com dimensões variadas. Posteriormente, utilizou-se essas frações em massa para realizar a correta substituição quantitativa dos agregados naturais, mantendo-se a curva granulométrica dos agregados que foram utilizados no concreto de referência. As Figuras 7 e 8 apresentam as frações de brita 1 e areia média produzidas com os agregados reciclados, respectivamente.

Figura 7 – ARC, brita 1



Fonte: Do autor (2017).

Figura 8 – ARC, areia média



Fonte: Do autor (2017).

A britagem foi executada através de britador de mandíbula e o processo foi realizado em um britador externo de propriedade de uma empresa privada, conforme Figura 9.

Figura 9 – Britador de mandíbula



Fonte: Do autor (2017).

3.1.2 Cimento

Quanto ao aglomerante hidráulico para a produção dos concretos, utilizou-se cimento Cimpor CP V – ARI (Alta Resistência Inicial). A preferência por usar somente um tipo de cimento se dá devido à sua característica de cura, que permite um ganho de resistência inicial maior do que outras famílias.

3.1.3 Água de amassamento

Para a moldagem do concreto e correção do abatimento, utilizou-se água tratada para consumo público e fornecida pela empresa CORSAN.

3.2. Métodos

Este tópico apresenta os métodos aplicados a fim de se atingir os objetivos propostos nesta pesquisa. O primeiro subitem relata brevemente o método de dimensionamento de um PCS, pois é dessa forma que, supostamente, aplica-se o concreto com agregado reciclado. Após, apresenta-se o programa experimental da pesquisa.

3.2.1 Método de dimensionamento do revestimento pela PCA - 1984

Um dos métodos de dimensionamento de pavimentos de concreto simples abordado pelo DNIT (2005) foi elaborado pela *Portland Cement Association* (PCA), no ano de 1984. O método de dimensionamento da PCA/84 consiste na determinação de alguns parâmetros e da estimativa de carga por eixos da rodovia, referentes ao projeto rodoviário.

DNIT (2005) apresenta um roteiro completo para o dimensionamento de pavimentos de concreto simples: o projetista deve definir alguns parâmetros e outros são obtidos através do cálculo proposto. Visto isso, é cabível diferenciar os parâmetros que devem ser definidos anteriormente daqueles que serão calculados através do método da PCA/84, bem como apresentar o modo de determinar a espessura da placa de revestimento (DNIT, 2005).

Segundo DNIT (2005), os parâmetros que devem ser definidos na etapa de projeto são:

- a) tipo de acostamento;
- b) adoção ou não de barras de transferência;
- c) resistência à tração na flexão do concreto;
- d) coeficiente de recalque (k), definido através de ensaio DNIT 055/2004 ME (DNIT, 2004c), ou com relação ao CBR;
- e) estimativa da espessura H da placa;
- f) fator de segurança;
- g) tráfego esperado para cada nível de carga.

O tráfego esperado e o fator de segurança se relacionam com base no cálculo do número de eixos totais por classe de carga que atuarão durante o período de projeto da rodovia (vida útil).

Já os parâmetros definidos na etapa de cálculo, considerando-se todas as cargas por eixos em (tf), são:

- a) tensão equivalente para eixo simples, eixo tandem duplo e eixo tandem triplo, de acordo com o tipo de acostamento adotado no projeto (ANEXOS A e B);
- b) fator de erosão, determinado com base nas tensões equivalentes dos eixos simples, tandem duplo e tandem triplo, relacionados com o tipo de junta e o tipo de acostamento (ANEXOS C e D);
- c) fator de fadiga, a partir da divisão da tensão equivalente pela resistência à tração na flexão do concreto;
- d) repetições admissíveis para análise de fadiga (ANEXO E), determinadas através da relação entre fator de fadiga e as cargas dos eixos simples e eixos tandem duplo. Ressalta-se que, além dos eixos simples relacionados, consideram-se também os eixos tandem triplo como sendo de três eixos simples, cada um com um terço da carga total;
- e) repetições admissíveis para análise de erosão (ANEXO F), calculadas através da relação entre fator de erosão e as cargas dos eixos simples, ou eixos tandem triplo, e eixos tandem duplo, considerando-se o tipo de acostamento;
- f) consumo de fadiga, expresso em porcentagem, para análise de fadiga, em que se divide o número de repetições esperada pelo número de repetições admissíveis para fadiga;
- g) consumo de erosão, também expresso em porcentagem, para análise de fadiga, determinado pela divisão do número de repetições esperadas pelo número de repetições admissíveis para erosão.

Após a determinação, para cada tipo de carga, de todos esses parâmetros relacionados com os eixos simples, eixos tandem duplo e eixos tandem triplo, verifica-se se a espessura H da placa estimada anteriormente é compatível, de acordo com os seguintes passos:

- a) soma-se o total do consumo de fadiga para análise de fadiga (dos eixos simples, eixos tandem duplo e eixos tandem triplo, de todas as cargas atuantes);
- b) soma-se o total do consumo de fadiga para análise de erosão (dos eixos simples, eixos tandem duplo e eixos tandem triplo, de todas as cargas atuantes);
- c) verifica-se se o total da porcentagem do consumo de fadiga para análise de fadiga se aproxima dos 100%;
- d) verifica-se se o total da porcentagem do consumo de fadiga para análise de erosão se aproxima dos 100%.

Caso a análise por fadiga e/ou análise por erosão apresentarem uma soma maior do que 100%, as condições não serão atendidas, de modo que deve-se realizar o cálculo novamente, adotando uma espessura maior. Caso a análise por fadiga e/ou análise por erosão apresentarem valores próximos a 0%, as condições serão atendidas; no entanto, o revestimento estará superdimensionado. Por isso, o ideal é a adoção de espessuras que representam as duas ou, pelo menos, uma das somas das variáveis muito próximas a 100% (DNIT, 2005).

A Tabela 1 apresenta uma planilha já preenchida com exemplo de dimensionamento, conforme DNIT (2005).

Tabela 1 – Planilha para dimensionamento de pavimento rígido

Espessura-tentativa: 25 cm Juntas com BT: sim não
 K_{st} 100 MPa/m Acostamento de concreto: sim não
 Resistência característica à tração na flexão 4,8 Mpa Período de projeto 20 anos
 Fator de segurança de cargas, F_{sc} 1,2

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x F_{sc} (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixos Simples			(8) Tensão equivalente 1,14		(10) Fator de Erosão 2,72	
			(9) Fator da fadiga 0,238			
< 5	6,0	3.270.843	ilimitado	-	ilimitado	-
5 - 6	7,2	203.804	ilimitado	-	ilimitado	-
6 - 7	8,4	290.488	ilimitado	-	ilimitado	-
7 - 8	9,6	238.118	ilimitado	-	21.200.000	1,1
8 - 9	10,8	242.715	ilimitado	-	8.500.000	2,9
9 - 10	12,0	310.404	ilimitado	-	4.000.000	7,8
10 - 11	13,2	282.267	ilimitado	-	2.500.000	11,3
11 - 12	14,4	242.438	ilimitado	-	1.430.000	17,0
12 - 13	15,6	206.645	ilimitado	-	825.000	25,0
13 - 14	16,8	65.889	6.000.000	1,1	555.000	11,9
14 - 15	18,0	39.296	750.000	5,3	365.000	10,8
15 - 16	19,2	5.565	227.000	2,5	265.000	2,1
Eixos Tandem Duplos			(11) Tensão equivalente 0,99		(12) Fator de erosão 2,89	
			(13) Fator de fadiga 0,206			
< 13	15,6	182.532	ilimitado	-	24.500.000	0,7
13 - 14	16,8	5.565	ilimitado	-	13.000.000	-
14 - 15	18,0	12.243	ilimitado	-	7.500.000	0,2
15 - 16	19,2	12.243	ilimitado	-	5.100.000	0,2
16 - 17	20,4	17.808	ilimitado	-	3.400.000	0,5
17 - 18	21,6	30.051	ilimitado	-	2.700.000	1,1
18 - 19	22,8	23.373	ilimitado	-	1.800.000	1,3
19 - 20	24,0	17.808	ilimitado	-	1.300.000	1,4
20 - 21	25,2	17.808	ilimitado	-	970.000	1,8
21 - 22	26,4	12.243	ilimitado	-	750.000	1,6
22 - 23	27,6	5.565	ilimitado	-	700.000	0,8
23 - 24	28,8	5.565	ilimitado	-	460.000	1,2
Eixos Tandem Triplos			(14) Tensão equivalente 0,99		(15) Fator de erosão 2,89	
			(16) Fator de fadiga 0,206			
< 24	9,6	30.051	ilimitado	-	3.000.000	1,0
24 - 26	10,4	17.808	ilimitado	-	2.100.000	0,8
26 - 28	11,2	12.243	ilimitado	-	1.500.000	0,8
28 - 30	12,0	18.921	ilimitado	-	900.000	2,1
TOTAL				8,90%	TOTAL	105,4%

Fonte: DNIT (2005, p. 100).

Nesse exemplo, observa-se que o consumo de fadiga para a análise de erosão, na coluna 7, ultrapassou o total de 100% para a determinada espessura, atingindo um valor de 105,4%. Portanto, nesse caso, deve-se realizar uma nova tentativa de cálculo, com a adoção de uma espessura maior (DNIT, 2005).

3.2.2 Aplicação prática dos resultados

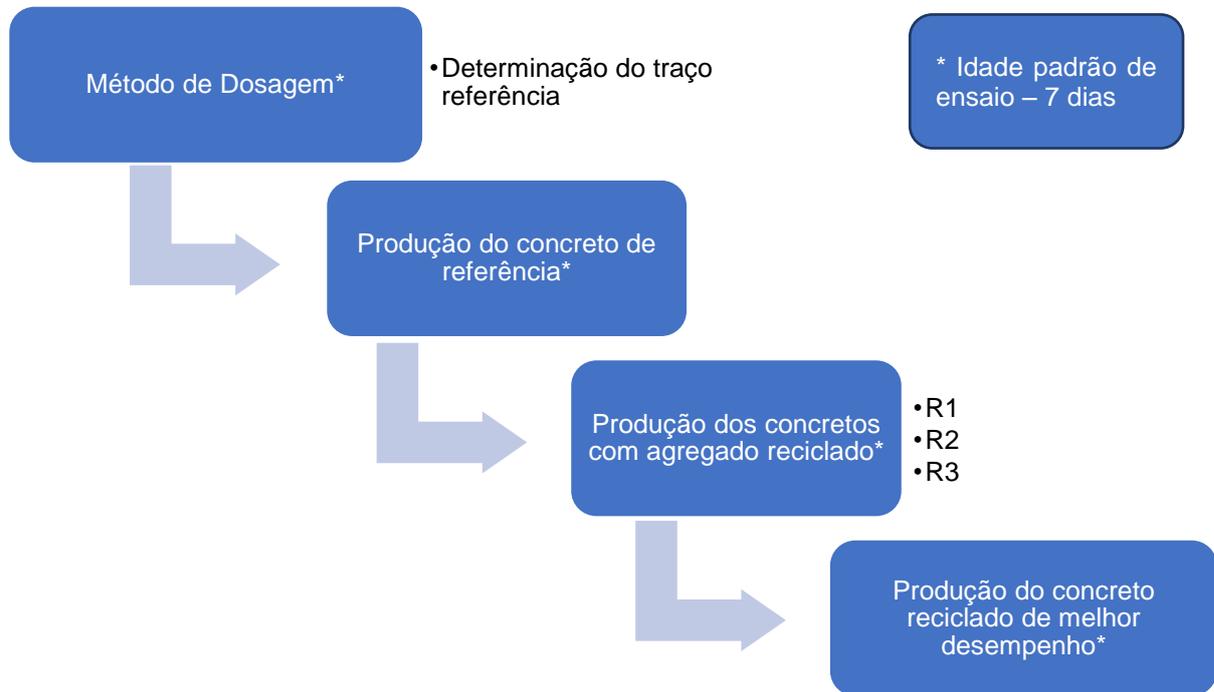
Com a obtenção dos valores característicos de resistência à tração na flexão do concreto de referência e do concreto reciclado, que apresentou o melhor resultado, dimensionaram-se duas camadas de pavimento rígido, sendo uma camada de revestimento para cada tipo de concreto. A metodologia aplicada baseou-se na norma de dimensionamento da PCA/84, mantendo-se os mesmos parâmetros do exemplo proposto por DNIT (2005), que foi revisado nesta bibliografia no tópico 3.2.1, exceto o valor de resistência à tração na flexão.

Portanto, utilizou-se, para as duas situações, a mesma carga por eixo, tipo de acostamento e juntas de ligação entre placas, bem como a mesma característica do subleito, período de projeto e fator de segurança de carga. Ademais, obteve-se o dimensionamento através de tentativa e erro da variação da espessura, conforme sugere o método e o roteiro de dimensionamento proposto.

3.2.3 Programa experimental

Baseado em atividades práticas realizadas em laboratório, este programa experimental seguiu uma série de processos em que foram usados os resultados finais para realizar uma comparação entre concreto de referência e concreto produzido com ARC. Para melhor entendimento do procedimento, a Figura 10 expõe um fluxograma das atividades.

Figura 10 – Fluxograma das atividades propostas



Fonte: Do autor (2017).

3.2.3.1 Método de dosagem

Com o intuito de determinar um traço ideal para a confecção de todos os concretos utilizados neste trabalho, de modo que estes apresentem características para serem empregados em uma camada de revestimento de pavimento rígido e se encaixem nas normas vigentes, DNIT-054/2004-PRO (DNIT, 2004b) define que: deve-se ter uma consistência para concretos plásticos, medida através do abatimento no ensaio do tronco de cone NBR NM 67 (ABNT, 1998b), de $70 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$; uma relação água/cimento variável entre 0,40 e 0,56; dimensão máxima do agregado entre $\frac{1}{5}$ e $\frac{1}{4}$ da espessura da placa, sendo que não se aceitam dimensões de agregados graúdos superiores a 50 mm.

Seguindo essas premissas, fez-se uso do método de dosagem IPT/EPUSP, em que aplica-se um diagrama de dosagem, apresentado por Helene e Terzian (1993). Sua formação parte do princípio da correlação entre três fatores: resistência mecânica do concreto, relação água/cimento, quantificação unitária de materiais

(traço) e consumo do cimento. Ressalta-se que o traço é determinado a partir da interpolação ou, em últimos casos, extrapolação de um abatimento fixado que atenda à resistência ou propriedade que se deseja.

Esse método baseia-se na utilização de três traços de concreto e um abatimento fixo através do *slump test*. Portanto, utilizou-se os traços 1,0:2,0; 1,0:3,5 e 1,0:5,0 e um abatimento de 7 ± 1 . Esses teores foram escolhidos com base na necessidade de um concreto com alta resistência. O abatimento foi assim determinado, pois é usualmente utilizado em pavimentos de concreto de cimento Portland, de acordo com DNIT (2005).

Com os parâmetros determinados, dosou-se o concreto com traço 1,0:3,5. O cálculo das quantidades de materiais foi baseado em um teor de argamassa de 45%, mantendo fixo o agregado graúdo em 20 kg. Ainda, reservou-se uma quantidade de água hipotética para realizar a moldagem do concreto. Dessa forma, iniciou-se o traço em massa com uma quantidade de materiais de 8,081:8,283:20. O processo de moldagem seguiu as seguintes etapas:

- a) pesagem dos materiais;
- b) umedecimento da betoneira;
- c) inserção total do agregado graúdo;
- d) inserção na betoneira de uma quantidade mínima de água, capaz de umedecer todo o agregado;
- e) adição total do cimento;
- f) adição total do agregado miúdo;
- g) adição de água à mão livre, inserindo o suficiente para dar trabalhabilidade à mistura.

Após, desligou-se a betoneira e observou-se o concreto passando a colher sobre a massa, para ver se esta apresentava um acabamento. A massa, então, demonstrava um baixo teor de argamassa e excesso de vazios, necessitando de um acréscimo de 2% de argamassa com a adição de um pouco de água. Assim, sucedeu-se com acréscimos de 2% até chegar-se a um teor de argamassa de 51%, sendo que, nesse estado, a massa apresentava acabamento e coesão.

Na sequência, realizou-se o ensaio de abatimento *slump test*. O ensaio

demonstrou um concreto pouco plástico com um baixo abatimento, necessitando o acréscimo de água. Para a aceitação do concreto, realizou-se o processo de adição de água e o ensaio de abatimento até chegar-se ao abatimento de 7 ± 1 . Após chegar-se a esse resultado, pesou-se o restante da água. Por fim, com a aceitação do concreto, moldou-se 3 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm para verificação da resistência à compressão aos 7 dias. A Tabela 2 apresenta as adições de materiais até a determinação do teor de argamassa ideal e as características do concreto produzido.

Tabela 2 – Determinação do teor ideal de argamassa e características do concreto para o traço 1,0:3,5

Teor de argamassa (%)	Traço unitário (1:a:p)	Quantidade de cimento (kg)		Quantidade de "areia média" (kg)		Quantidade de "brita 1" (kg)	Quantidade de água (kg)	Relação a/c
		Massa total	Acréscimo na mistura	Massa total	Acréscimo na mistura			
45	1:1,03:2,48:3,5	8,081		8,283		20,00	*	
			0,305		1,067			
47	1:1,12:2,39:3,5	8,386		9,350		-	*	
			0,329		1,151			
49	1:1,21:2,3:3,5	8,715		10,501		-	*	
			0,356		1,245			
51	1:1,30:2,22:3,5	9,070		11,746		-	3,60	0,397
Características do concreto								
Teor de argamassa adotado (%)						51		
Massa específica do concreto fresco (kg/m ³)						2329,94		
Abatimento (cm)						6,5		
Consumo por m ³ de concreto								
Cimento (kg)						475,80		
Água (L)						188,85		

Fonte: Do autor (2017).

Para a moldagem dos traços 1:2 e 1:5, utilizou-se diretamente o teor de argamassa de 51% com a quantificação dos materiais em massa, partindo da fixação do agregado graúdo em 20 kg e uma quantidade de água hipotética para realização das moldagens. A ordem de inserção dos materiais na betoneira para a realização da mistura seguiu-se de acordo com o primeiro traço, conforme já descrito acima.

Dessa forma, quando se observava uma plasticidade e consistência na massa de concreto, era realizado o ensaio de abatimento. Caso o resultado não fosse o

esperado, adicionava-se um pouco de água e misturava-se novamente, repetindo o processo até a aceitação dos concretos, ou seja, o alcance de um abatimento de 7 ± 2 cm. Após, pesava-se o restante da água para posterior averiguação da relação água/cimento. Por fim, para cada traço, foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm a fim de verificar a resistência à compressão aos 7 dias.

A Tabela 3 apresenta a quantificação dos materiais quanto aos traços utilizados para a confecção da curva de dosagem e posterior determinação do traço referência.

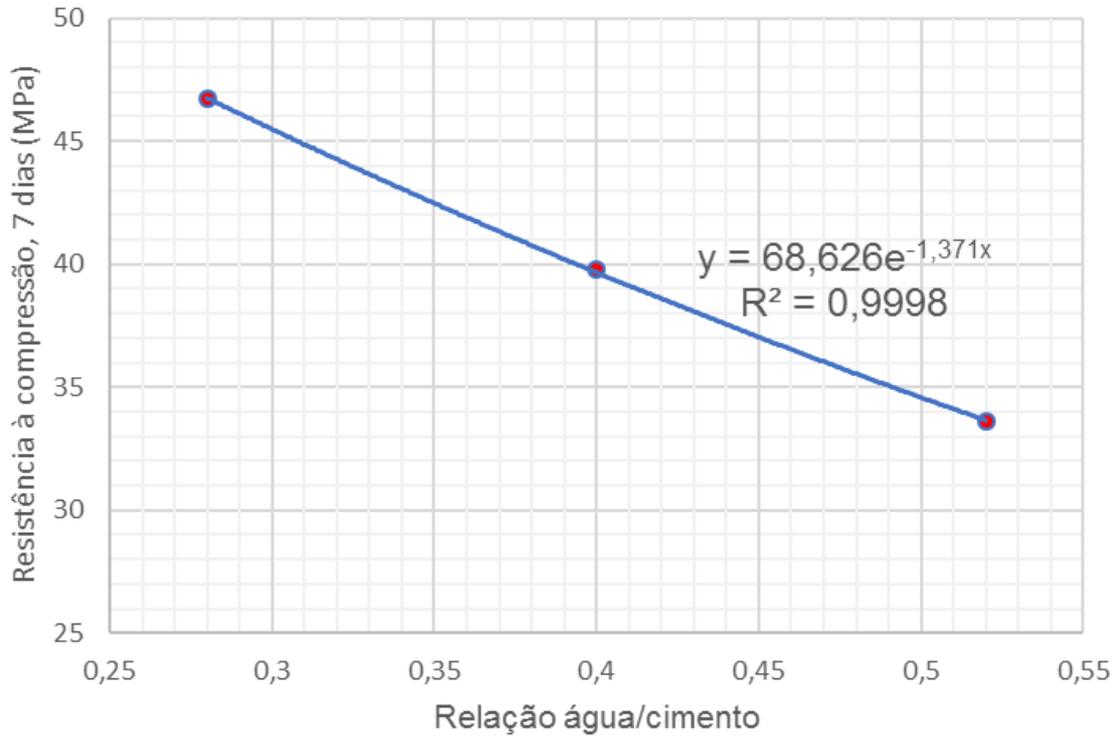
Tabela 3 – Quantificação dos traços

Traço em massa	1:m	1:2	1:3,5	1:5
	1:a:p	1:0,53:1,47	1:1,3:2,21	1:2,06:2,94
Teor de argamassa	%	51	51	51
Agregado graúdo convencional	kg	20	20	20
Agregado miúdo convencional	kg	7,211	11,746	14,014
Cimento	kg	13,605	9,07	6,803
Água	kg	3,763	3,6	3,556
Aditivo	ml	-	-	-
Relação a/c		0,28	0,4	0,52
Abatimento tronco de cone (NBR NM 67)	cm	5,5	6,5	6
Resistência à compressão efetiva simples aos 7 dias	MPa	46,7	39,76	33,61

Fonte: Do autor (2017).

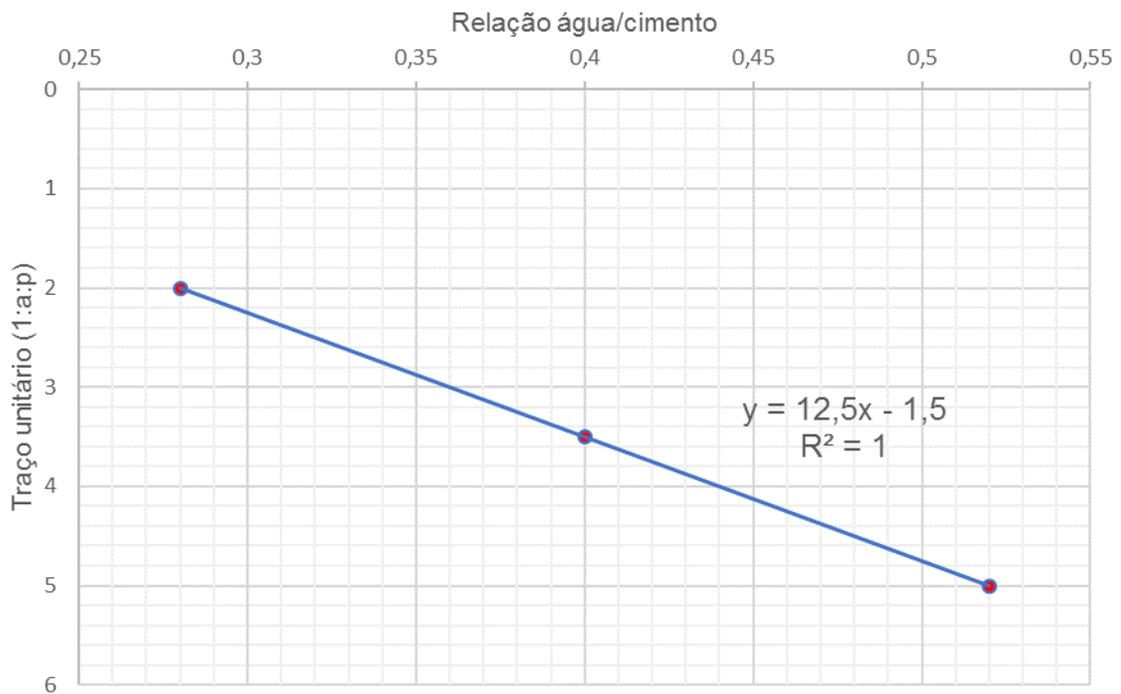
Os resultados expressos foram obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão dos 9 corpos de prova confeccionados, sendo 3 de cada traço. A partir destes, determinou-se a curva de dosagem para a relação, resistência à compressão *versus* a/c e traço unitário *versus* a/c. Os Gráficos 3 e 4 ilustram as duas partes do diagrama necessárias para a determinação do traço.

Gráfico 3 – Relação entre resistência à compressão X água/cimento



Fonte: Do autor (2017).

Gráfico 4 – Relação entre traço unitário X água/cimento



Fonte: Do autor (2017).

Com a utilização dos Gráficos 3 e 4, determinou-se o traço padrão, ou seja, definiu-se uma resistência à compressão de 35 MPa e rebateu-se os pontos, resultando no traço unitário de 1,0:4,6, com um fator água cimento de 0,48.

3.2.3.2 Confeção do concreto de referência

Com o intuito de simular uma camada de revestimento de pavimento rígido que, posteriormente, serviu como material para britagem, necessitou-se confeccionar o concreto denominado de referência a partir da determinação do traço de referência em 1:4,6, obtido através dos resultados do Diagrama de Dosagem, expostos no tópico 3.2.2.1.

Nessa etapa, seguiu-se o traço em massa com um teor de argamassa de 51%, tornando, assim, o traço unitário em 1:1,86:2,74:0,48. O procedimento de mistura seguiu-se conforme passo a passo descrito na etapa de moldagem, com exceção da quantidade de água, que, nesse caso, foi pré-determinada em 0,48, com relação ao cimento e adicionada em sua metade após a inserção do agregado graúdo e totalmente após a inserção de todos os materiais na betoneira. Ao final da adição de água desejada, misturou-se o concreto por mais alguns minutos e realizou-se o *slump test*, constatando-se o abatimento necessário, portanto a aceitação do concreto.

Foram confeccionados aproximadamente 380 litros de concreto em quatro etapas, divididas em dois dias, repetindo-se o processo descrito no parágrafo anterior. O material foi empregado na moldagem de 46 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm. Dessa quantidade, 8 corpos de prova foram utilizados para ensaios de verificação aos 7 dias, sendo que 5 destinaram-se ao ensaio para determinação do módulo de elasticidade e resistência à compressão e 3 para delimitação da resistência à tração por compressão diametral. O restante da produção serviu como material para britagem. Além disso, foram produzidos 24 corpos de prova prismáticos 15 x 15 x 50 cm, sendo que 3 foram separados para verificação mecânica de resistência à tração na flexão aos 7 dias, 3 para verificação mecânica aos 28 dias e o restante serviu como material para britagem. A Figura 11 ilustra uma quantidade dos materiais utilizados para a confecção do concreto referência.

Figura 11 – Materiais para confecção do concreto referência



Fonte: Do autor (2017).

3.2.3.3 Confecção do concreto com agregado reciclado

Com o concreto de referência britado, iniciou-se a etapa de confecção do concreto contendo agregado reciclado. Para tanto, produziu-se três concretos com agregado reciclado diferentes, R1, R2 e R3, mantendo-se o mesmo traço referência e o mesmo teor de argamassa de 51% nas três situações. A particularidade entre cada concreto deve-se à diferença nas porcentagens de substituição do agregado convencional pelo ARC, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 – Classes de concreto

Concretos estudados	Agregado graúdo	Agregado miúdo	Máximo diâmetro do agregado graúdo (mm)
Referência	Convencional (100%)	Convencional (100%)	25
R1	Reciclado (100%)	Convencional (100%)	25
R2	Reciclado (100%)	Convencional (75%) + Reciclado (25%)	25
R3	Reciclado (100%)	Convencional (50%) + Reciclado (50%)	25

Fonte: Do autor (2017).

Para a correta substituição dos agregados naturais pelos reciclados conforme cada classe, utilizou-se como já exposto no tópico 3.1.1, a curva granulométrica do agregado convencional. Dessa forma, substituiu-se, de acordo com o concreto reciclado em questão, a quantidade de agregado natural pelo reciclado, atentando para cada fração retida na peneira correspondente.

Para exemplificar, o agregado graúdo foi substituído totalmente nos três casos. Portanto, multiplicou-se a quantidade de agregado graúdo suficiente para a produção do concreto pela porcentagem retida em cada peneira, resultando, assim, na quantidade em massa de que necessitou cada fração. A Tabela 4 expõe as quantidades de materiais utilizadas para a produção de 5 corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm de cada traço.

Tabela 4 – Quantificação de materiais

TRAÇOS		R1	R2	R3
CIMENTO (kg)		3,274	3,274	3,274
AGREGADO MIÚDO (kg)				
Convencional		6,090	4,567	3,045
Reciclado		-	1,522	3,045
Quantidade de miúdo reciclado				
	Peneira (cm)	Retido (kg)		
	6,3	0,70%	0,011	0,021
	4,8	1,16%	0,018	0,035
	2,4	4,28%	0,065	0,130
	1,2	7,77%	0,118	0,237
	0,6	12,80%	0,195	0,390
	0,3	35,90%	0,546	1,093
	0,15	34,03%	0,518	1,036
	Fundo	3,20%	0,049	0,097
	TOTAL	99,82%	1,520	3,039
AGREGADO GRAÚDO (kg)				
Convencional		-	-	-
Reciclado		8,971	8,971	8,971
Quantidade de graúdo reciclado				
	Peneira (cm)	Retido (kg)		
	25	0,00%	0,000	0,000
	19	25,62%	2,298	2,298
	12,5	57,96%	5,199	5,199
	9,5	13,88%	1,245	1,245
	6,3	2,48%	0,223	0,223
	4,75	0,00%	0,000	0,000
	Fundo	0,00%	0,000	0,000
	TOTAL	99,94%	8,966	8,966
ÁGUA (kg)		1,572	1,572	1,572
A/C		0,48	0,48	0,48
Abatimento (cm)		7±2	7±2	7±2

Fonte: Do autor (2017).

Com a quantificação dos materiais, o processo de mistura dos três concretos contendo agregado reciclado foi executado da mesma forma que o concreto de referência; entretanto, como utilizou-se os ARC em umidade ambiente, corrigiu-se o abatimento com a adição de água nas três ocasiões. Alertado por FHWA (2007) e exposto no tópico 2.2.4, esperava-se essa adição de água, pois ao usar o mesmo processo de mistura do concreto referência, a porosidade dos ARC causou uma

maior absorção. A Tabela 5 apresenta as características dos três concretos após a moldagem.

Tabela 5 – Concretos reciclados

		R1	R2	R3
	1:a:p	1,0:1,86:2,74	1,0:1,86:2,74	1,0:1,86:2,74
Teor de argamassa	% em massa	0,51	0,51	0,51
Agr. gráúdo convencional	kg	-	-	-
Agr. gráúdo reciclado	kg	8,971	8,971	8,971
Agregado miúdo total	kg	6,090	6,090	6,090
Areia média LATEC	kg	6,090	4,567	3,045
Reciclado	kg	-	1,522	3,045
Cimento	kg	3,274	3,274	3,274
Água	kg	1,864	1,872	1,905
Água traço 0,48		1,572	1,572	1,572
Água adicional		0,292	0,300	0,333
a/c bruta		0,569	0,572	0,582
a/c estimada		0,48	0,48	0,48
Abatimento do tronco de cone NBR (7223)	(cm)	6,50	7,50	6,50
Massa específica do concreto fresco	kg/m ³	2288,65	2202,70	2174,06
Consumo de cimento por m ³ de concreto	kg	450,75	433,82	428,18

Fonte: Do autor (2017).

3.2.3.4 Confeção do concreto reciclado de melhor desempenho

Com o resultado dos ensaios de R1, R2 e R3, produziu-se 3 corpos de prova prismáticos de 15 x 15 x 50 cm e 8 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm a partir do concreto que apresentou melhor desempenho entre os três. O processo de quantificação dos materiais e mistura seguiu os mesmos passos descritos no tópico anterior 3.2.2.3 e os corpos de prova foram ensaiados aos 7 dias. Destaca-se que os 3 prismas foram ensaiados para determinação da resistência à tração na flexão; e, do total de cilindros, 5 foram ensaiados para verificação do módulo de elasticidade e resistência à compressão e 3 foram ensaiados para verificação da resistência à tração por compressão diametral.

3.2.4 Corpos de prova

Foram moldados, ao todo, 27 corpos de prova prismáticos, dois quais 6 serviram para ensaio e rompimento aos 7 dias e 3 aos 28 dias. As dimensões por unidade são de 15 x 15 x 50 cm, gerando um volume de 0,0113 m³ de concreto por prisma. Também foram moldados 78 corpos de prova cilíndricos, sendo que 15 serviram para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e 19 foram utilizados para o ensaio à compressão, em que se obtiveram resultados de módulo de elasticidade e resistência à compressão. As dimensões dos corpos de prova são de 10 x 20 cm, representando um volume de 0,0016 m³ de concreto por cilindro. Passadas 24 horas da confecção dos corpos de prova, estes foram desmoldados e passaram por um processo de cura úmida até serem rompidos.

3.2.5 Cura

Os corpos de prova foram moldados e curados no LATEC, seguindo as orientações da norma NBR 5738 (ABNT, 2015b). A Figura 12 apresenta o processo de moldagem de alguns corpos de prova e seu armazenamento em câmara úmida. A idade para análise dos concretos é de 7 dias, com o objetivo de obter-se uma resistência final à tração na flexão de 4,0 MPa.

Figura 12 – Moldagem e cura dos corpos de prova

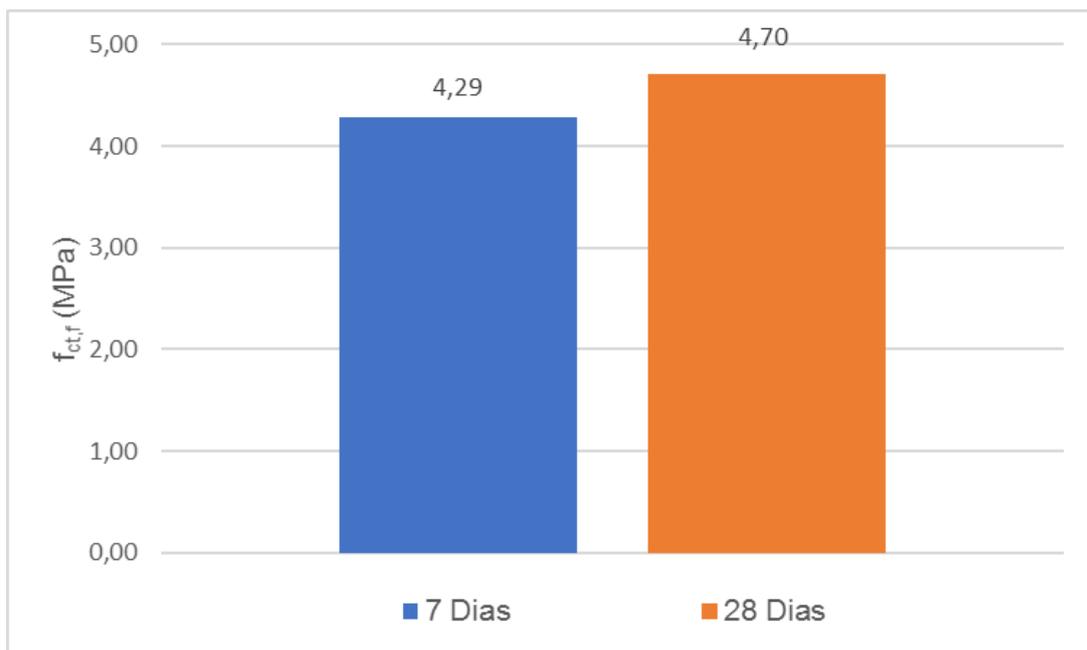


Fonte: Do autor (2017).

Para justificar a realização dos ensaios mecânicos somente aos 7 dias,

ensaiou-se o concreto referência quanto à resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias. Dessa forma, foi possível verificar o ganho de resistência durante esse período. O Gráfico 5 apresenta um comparativo com o valor médio de resistência à tração na flexão das duas idades de cura do concreto referência.

Gráfico 5 – Comparativo entre resistência à tração na flexão do concreto referência obtidos aos 7 e 28 dias



Fonte: Do autor (2017).

Através do Gráfico 5, percebe-se que o $f_{ct,f} = 4,29$ MPa aos 7 dias representam 91,28 % dos $f_{ct,f} = 4,70$ MPa aos 28 dias. A proximidade entre os valores obtidos são resultados da utilização do cimento CP V – ARI, devido a sua propriedade de ganho de resistência nas primeiras idades. Portanto, a partir dos resultados, optou-se por realizar todo o programa experimental com a idade de cura e rompimento dos concretos aos 7 dias, visto que os valores obtidos estariam muito próximos, gerando, assim, ganho de tempo.

3.2.6 Ensaios propostos para análise do concreto

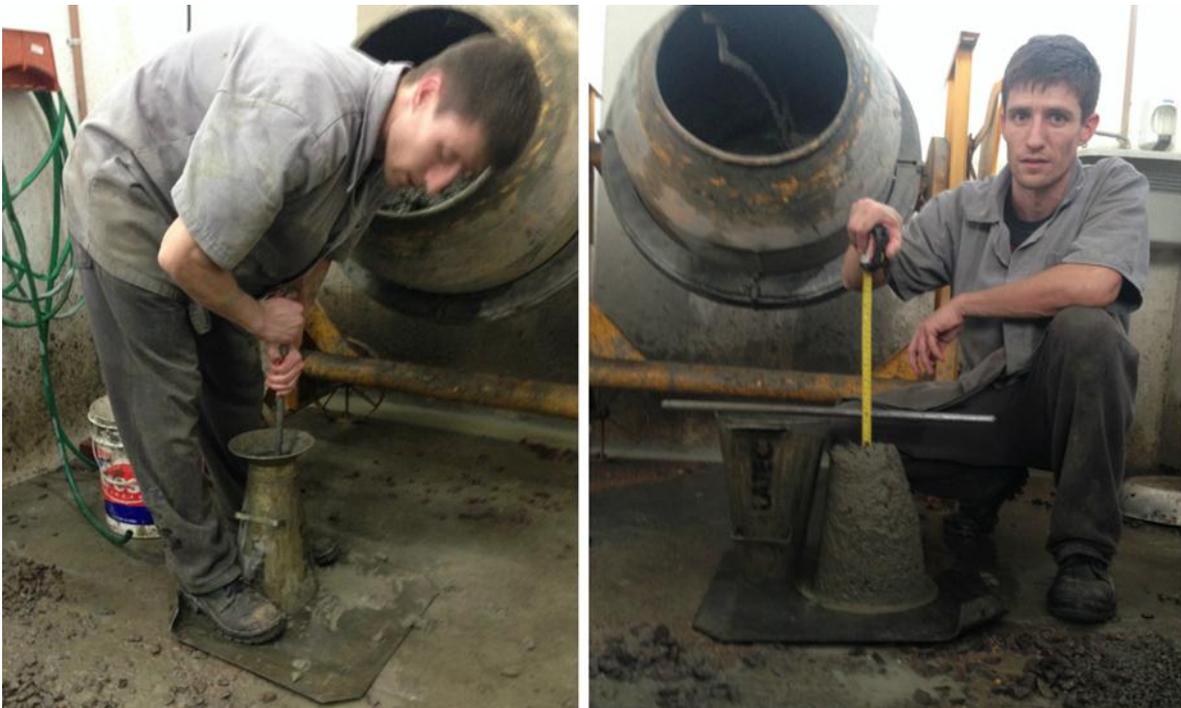
Os ensaios realizados foram determinantes para obtenção de valores de resistência à tração na flexão e à tração por compressão diametral, além de valores

de resistência do concreto à compressão simples e a relação tensão-deformação através do módulo de elasticidade simples, sendo que os corpos de prova foram confeccionados simultaneamente à concretagem. Portanto, foram realizados nesta pesquisa os seguintes ensaios:

a) Consistência

Utiliza-se o ensaio de abatimento de tronco de cone para obter-se as relações de trabalhabilidade do concreto e sua aceitação. O abatimento define a proporção de água/cimento da mistura, obedecendo ao traço desejado. Esse ensaio, fundamentado na norma NBR NM 67 (ABNT, 1998b), foi realizado em todo o programa experimental, simultaneamente ao processo de produção do concreto de referência e do concreto contendo ARC. A Figura 13 ilustra duas etapas do processo: o adensamento da massa fresca e a verificação do abatimento do tronco de cone.

Figura 13 – Ensaio de consistência



Fonte: Do autor (2017).

b) Resistência à compressão - f_c

No Brasil, a NBR 5738 (ABNT, 2015b) padroniza os procedimentos quanto à confecção dos corpos de prova a serem ensaiados. Já a NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece os procedimentos para realização dos ensaios à compressão (ISAIA, 2005a).

Para realização do ensaio à compressão, os corpos de prova foram produzidos a partir dos mesmos lotes de concreto confeccionados para a determinação do ensaio de tração na flexão. Esse parâmetro foi exclusivamente determinado para se obter resultados comparativos entre tipos concreto, visto que sua determinação não é obrigatória em projetos de pavimentos de concreto. As atividades foram realizadas obedecendo à NBR 5738 (ABNT, 2015b); os rompimentos, à NBR 5739 (ABNT, 2007).

c) Resistência à tração por flexão - $f_{ct,f}$

Sabe-se que o valor da resistência à tração é o parâmetro de controle e dimensionamento da espessura de pavimentos de concreto simples através do método da PCA/84. Por isso, foram seguidas a NBR 12142 (ABNT, 2010), que determina os procedimentos para se obter a tração na flexão de corpos de prova prismáticos; a NBR 5738 (ABNT, 2015b), que define os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova; e, para complementar, a NBR 12655 (ABNT, 2015a), que estipula o procedimento do preparo, controle e recebimento de concreto de cimento Portland.

Para ruptura do concreto à tração, podem ser exercidas duas forças nos terços da viga ou somente uma força no centro, localizada no meio do vão (ISAIA, 2005a). Segundo Mehta e Monteiro (2014), após a ruptura do corpo de prova, deve-se observar o plano de fissuração da viga para determinação da resultante por cálculo. Se a ruptura ocorrer entre a superfície tracionada no terço médio do vão, adota-se a seguinte fórmula:

$$f_{(ct,f)} = M/W = (F * l)/(b * h^2) \quad (1)$$

Em que:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão;

F= carga máxima;

l = comprimento do vão;

b = largura do corpo de prova;

h = altura do corpo de prova.

Segundo Isaia (2005a), caso o plano de ruptura estiver fora desse padrão, mas não superando 5% do comprimento do vão, utiliza-se a fórmula descrita abaixo. No caso dos ensaios em que o concreto rompe com mais de 5% do vão, estes devem ser descartados.

$$f_{(ct,f)} = (3 * F * \alpha)/(b * h^2) \quad (2)$$

Em que:

α = distância média entre a linha da ruptura e o apoio mais próximo medido na superfície de tração da viga.

Esse ensaio destrutivo deve ser realizado obrigatoriamente para obter-se um parâmetro do concreto utilizado no dimensionamento da placa de revestimento do pavimento. Dessa forma, após o processo de dosagem, que seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2015b) e a posterior aceitação dos concretos através do ensaio de abatimento, foram moldados corpos de prova prismáticos, que foram rompidos com a determinada idade de cura, seguindo a NBR 12142 (ABNT, 2010). A Figura 14 ilustra o ensaio realizado em corpos de prova prismáticos para determinação de resistência à tração na flexão.

Figura 14 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Do autor (2017).

d) Resistência à tração por ensaios à compressão diametral - $f_{ct,sp}$

Elaborado pelo professor e pesquisador brasileiro Fernando Luiz Lobo Carneiro, no ano de 1943, o ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) é normatizado pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Sua concepção parte da ruptura de corpos de prova cilíndricos, que possuem as mesmas dimensões dos corpos de prova padrão utilizados no ensaio de compressão, 10 x 20 cm. Calcula-se a resistência à tração por compressão diametral pela Equação 3:

$$f_{(ct,sp)} = (2 * F) / (\pi * d * h) \quad (3)$$

Em que:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral;

F = carga máxima;

d = diâmetro do cilindro;

h = altura do cilindro.

Resistência mecânica à tração por compressão diametral é um ensaio destrutivo que serviu, neste trabalho, para fins de comparação entre resistências. Dessa forma, após o processo de dosagem, que seguiu a NBR 5738 (ABNT, 2015b) e a posterior aceitação dos concretos através do ensaio de abatimento, foram moldados os corpos de prova cilíndricos, que foram rompidos com a determinada idade de cura conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). A Figura 15 ilustra o ensaio realizado em corpos de prova cilíndricos para determinação de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 15 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Do autor (2017).

e) Módulo de elasticidade

É um ensaio destrutivo que visa à determinação do módulo de elasticidade. Embora sua determinação não seja obrigatória para pavimentos de concreto, foi importante para comparar os dois tipos de concreto produzidos, visto que seus resultados podem definir algumas conclusões sobre as propriedades dos concretos.

A determinação do módulo de elasticidade foi simultânea aos ensaios de compressão, dado que, como são utilizados praticamente os mesmos equipamentos, foram analisados os mesmos corpos e prova. As determinações foram realizadas obedecendo à NBR 8522 (ABNT, 2008), que abrange o módulo estático de elasticidade à compressão. A Figura 16 ilustra a realização simultânea do ensaio de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade.

Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade



Fonte: Do autor (2017).

3.2.7 Procedimento de análise dos dados

Segundo Isaia (2005a), nos resultados finais de resistência, o mesmo concreto pode apresentar corpos de prova com diferentes valores, sendo diversos os motivos para a ocorrência de disparidade. Dessa forma, é necessário admitir uma resistência característica (f_{ck}), ou seja, um único valor que representará a média de todo o lote ensaiado. Para tanto, faz-se uso de estatística, em que:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 * s \quad (4)$$

Sendo:

f_{ck} = resistência característica à compressão;

f_{cm} = resistência média do lote;

1,65 = área de distribuição normal em que 95% dos corpos de prova representam um $f_c < f_{ck}$;

s = desvio padrão.

Dessa forma, utilizou-se da mesma relação estatística para determinação da resistência característica à tração na flexão ($f_{ct,f}$) e resistência característica à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). Os resultados serviram de base para a determinação da resistência à tração (f_{ct}), que é o parâmetro utilizado para dimensionamento de pavimentos segundo a PCA/84. Por fim, com o intuito de verificar a homogeneidade dos dados obtidos, utilizou-se o coeficiente de variação que, segundo a descrição de Virgillito (2017, p. 82), “é uma medida relativa de dispersão. Mede a porcentagem que o valor do desvio-padrão representa em relação à média da distribuição de frequências”.

Outro método utilizado na determinação dos dados foi o de relações entre ensaios. Segundo Isaia (2005a), na falta de realização dos ensaios experimentais, algumas relações podem ser feitas para determinação da resistência à tração. Dessa forma, devido à incompatibilidade da realização de ensaios para obtenção da resistência à tração do concreto, pois este não se encontrava disponível no LATEC,

baseou-se na NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica relações entre as resistências à tração na flexão e tração por compressão diametral para determinação da resistência à tração, onde:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (5)$$

$$f_{ct} = 0,7 f_{ct,f} \quad (6)$$

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Seguindo os procedimentos apresentados no capítulo anterior, foi possível obter os resultados desejados para a pesquisa. Neste capítulo, apresentam-se os resultados e suas devidas análises.

4.1 Ensaio de tração na compressão diametral

Apresentam-se, na Tabela 6, os resultados obtidos com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, que foi usado como elemento comparativo entre os diferentes tipos de concreto.

Tabela 6 – Valores obtidos com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (continua)

Concreto	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de ruptura média (MPa)	Desvio padrão	Resistência característica $f_{ct,sp}$ (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	3,24	3,23	0,10066	3,06	3,12
	3,12				
	3,32				
R1	2,11	2,04	0,2816	1,58	13,80
	2,28				
	1,73				
R2	2,28	2,20	0,19287	1,88	8,77
	2,34				
	1,98				

Tabela 6 – Valores obtidos com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (conclusão)

Concreto	Tensão de ruptura	Tensão de ruptura média	Desvio padrão	Resistência característica $f_{ct,sp}$ (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	2,37				
R3	2,35	2,39	0,0553	2,30	2,31
	2,45				

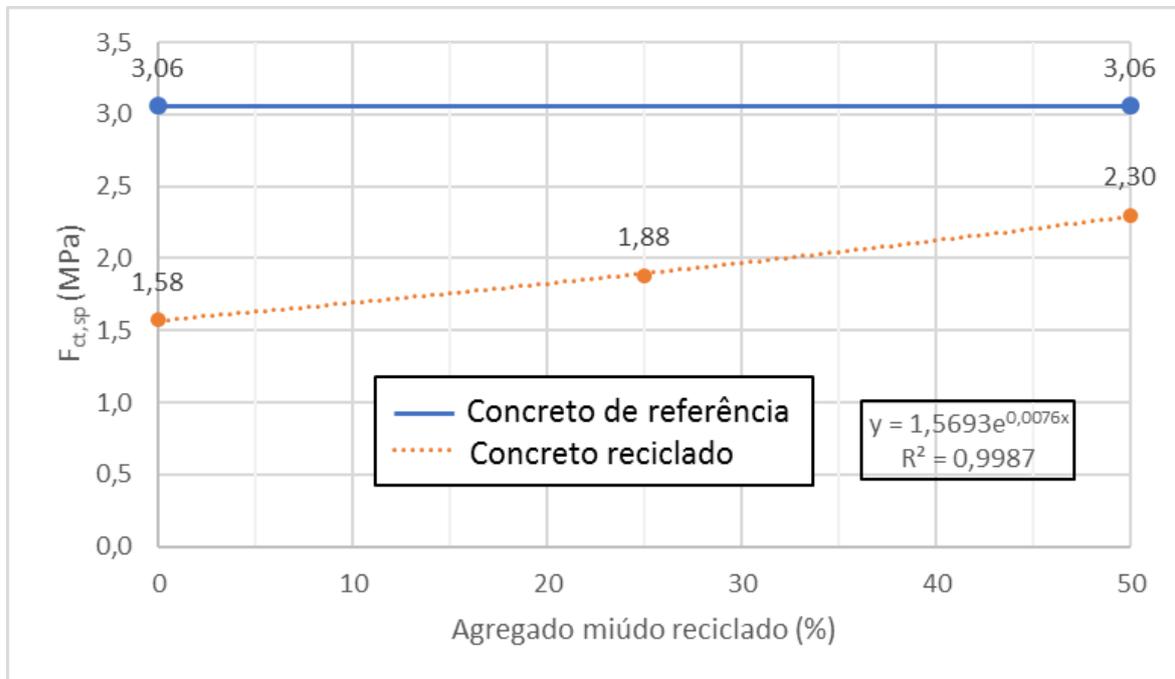
Fonte: Do autor (2017).

Observa-se através da Tabela 6 que o concreto R1 apresentou um coeficiente de variação de 13,80%, o que representa a maior variação entre as amostras, entretanto, estando abaixo dos 20% de variação, considera-se o ensaio confiável e utilizável.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

A partir do Gráfico 6, apresentam-se os valores de resistência à tração por compressão diametral característica dos três concretos reciclados. Os resultados serviram para determinar o concreto que mostrou melhor desempenho em função da porcentagem de substituição de ARC miúdo, tendo como base o valor de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência.

Gráfico 6 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral de R1, R2 R3, aos 7 dias



Fonte: Do autor (2017).

Através do Gráfico 6, é possível observar que concretos contendo agregado reciclado sofrem uma queda de resistência quando comparados com o concreto referência. Também, percebe-se uma tendência linear de ganho de resistência para os concretos contendo ARC, relacionada com a quantidade de ARC miúdo no traço e representada pela reta R^2 , que correlaciona a resistência à tração por compressão diametral com a porcentagem de agregado miúdo. Dessa forma, considera-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois não houve disparidade.

Portanto, com os valores de R1, R2 e R3, foi possível determinar qual o concreto que apresentou o melhor resultado. Nesse caso, foi o concreto reciclado R3, com um valor de $f_{ct,sp} = 2,30$ MPa, cuja composição é 100% de agregado graúdo reciclado e 50% de agregado miúdo reciclado. Entretanto, conforme FHWA (2007) e Tseng (2010), concretos que possuem ARC graúdo e miúdo tendem a ter uma menor resistência à tração do que concretos confeccionados somente com ARC graúdo em substituição ao natural. Por conseguinte, os resultados obtidos apresentaram o contrário, ou seja, a medida que aumentou-se a porcentagem de ARC miúdo na mistura, mais resistente tornou-se o concreto, relacionando-se com

as três famílias de concreto reciclado.

Uma justificativa a essa variação pode ser dada devido ao período de cura adotado para os concretos e à quantidade de cimento ainda não hidratada, visto que o cimento pode ter continuado a reagir após o concreto ter sido transformado em agregado reciclado. Por isso, o concreto com maior porcentagem de agregado miúdo tornou-se o melhor entre R1, R2 e R3.

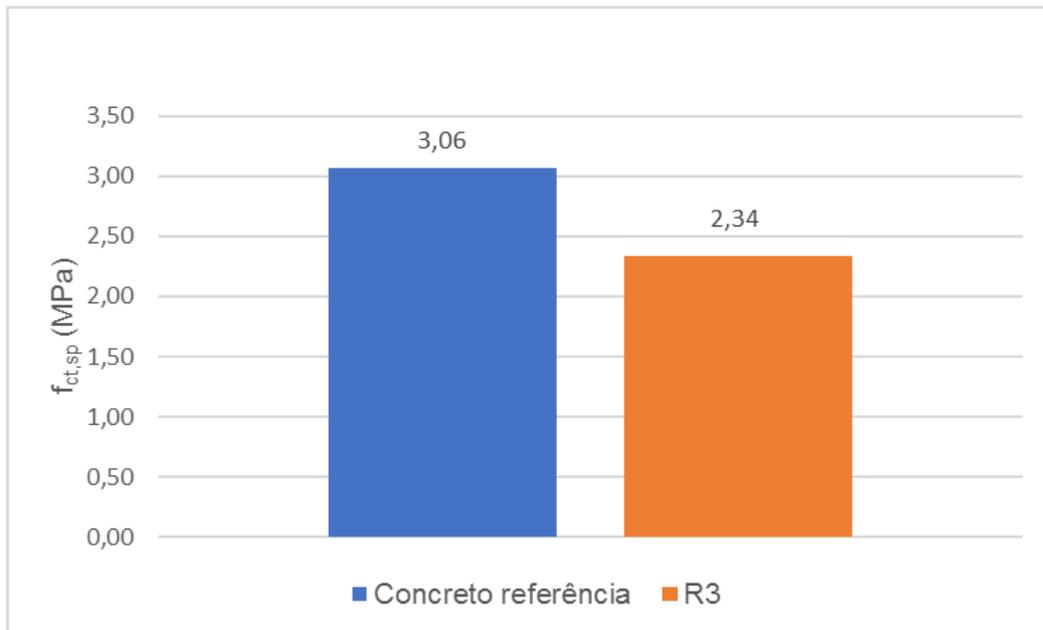
Assim sendo, reproduziu-se novamente o concreto R3, pois foi aquele que apresentou o melhor resultado entre concretos reciclados. Dessa forma, foi possível comparar o concreto de referência com o concreto R3. A Tabela 7 apresenta os valores do concreto de referência e do R3, enquanto o Gráfico 7 compara os dois tipos de concreto.

Tabela 7 – Valores obtidos de R3 e concreto referência com os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

Concreto	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão de ruptura média (MPa)	Desvio padrão	Resistência característica $f_{ct,sp}$ (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Diferença entre concretos (%)
Referência	3,24	3,23	0,10066	3,06	3,12	23,60
	3,12					
	3,32					
R3	2,82	2,62	0,17319	2,34	6,60	
	2,49					
	2,57					

Fonte: Do autor (2017).

Gráfico 7 – Resultados de resistência característica à tração por compressão diametral do concreto de referência e R3 aos 7 dias



Fonte: Do autor (2017).

Observa-se, através da Tabela 7 e do Gráfico 7, que o concreto R3 apresentou uma redução de resistência de 23,60 % se comparado ao concreto de referência. Portanto, o resultado está além do previsto para perda de resistência quando utiliza-se ARC graúdo e miúdo, que, conforme salienta FHWA (2007), pode variar de 10 a 20%.

4.3 Resistência à tração por flexão - estimada

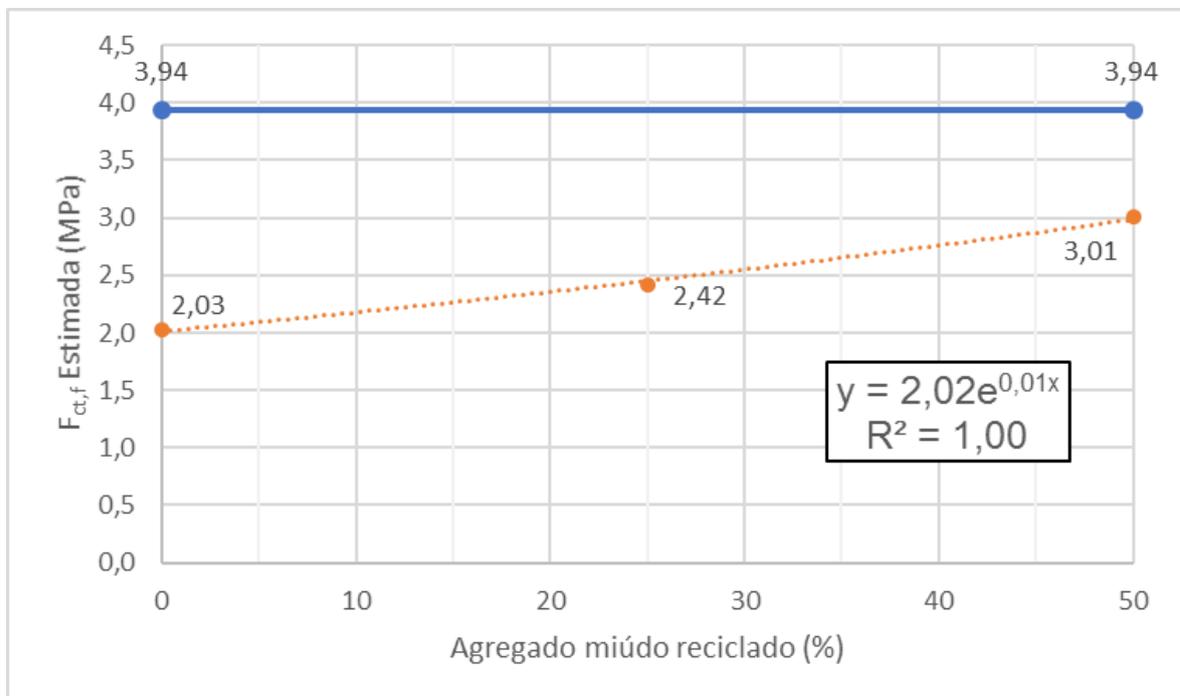
Com base nas equações 5 e 6 expostas no tópico 3.2.7, fez-se uma relação com os resultados de resistência à tração por compressão diametral para determinar uma estimativa da resistência à tração por flexão dos concretos estudados. O Gráfico 8 ilustra os valores estimados para resistência à tração na flexão com relação à porcentagem de substituição de ARC miúdo.

Tabela 8 – Valores estimados de resistência à tração na flexão aos 7 dias

Concreto	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ - (estimada) (MPa)
Referência	3,06	3,94
R1	1,58	2,03
R2	1,88	2,42
R3	2,34	3,01

Fonte: Do autor (2017).

Gráfico 8 – Estimativa de resistência à tração na flexão entre concretos a partir dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias



Fonte: Do autor (2017).

Percebe-se, através da Tabela 8, que os valores encontrados estão abaixo do esperado, ou seja, não foi atingida a resistência à tração por flexão esperada de 4,0 MPa. Os baixos valores de resistência encontrados podem ser justificados, pois não utilizou-se qualquer aditivo para realizar a mistura e moldagem dos concretos. Desse modo, a opção por fazê-lo somente com água tornou a relação água/cimento elevada, o que diminuiu a resistência.

4.4 Ensaio de resistência à compressão

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão dos concretos de referência e R3, sendo que realizou-se essa verificação mecânica somente como elemento comparativo entre concretos.

Tabela 9 – Valores obtidos de R3 e concreto referência com os resultados de resistência à compressão aos 7 dias

Concreto	Tensão de ruptura MPa	Tensão de ruptura média MPa	Desvio padrão	Resistência característica (f_{ck}) MPa	Coefficiente de Variação (%)	Diferença entre concretos (%)
Referência	33,94	34,95	1,6325	32,26	4,67	21,14
	37,12					
	35,16					
	35,67					
	32,86					
R3	29,12	27,39	1,1810	25,44	4,31	
	28,06					
	26,24					
	26,82					
	26,69					

Fonte: Do autor (2017).

Na Tabela 9, apresentam-se os valores de resistência à compressão encontrados aos 7 dias. Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão demonstram uma redução para o concreto que contém agregado reciclado. De acordo com FHWA (2007), concretos contendo ARC graúdo e miúdo em sua composição, podem sofrer uma redução de resistência à compressão que varia entre 14 a 40%. Portanto, com a redução de 21,14% de resistência à compressão entre concretos, considera-se os resultados satisfatórios.

4.5 Módulo de elasticidade

Os valores encontrados para o módulo de elasticidade do concreto referência e R3 encontram-se dispostos na Tabela 10.

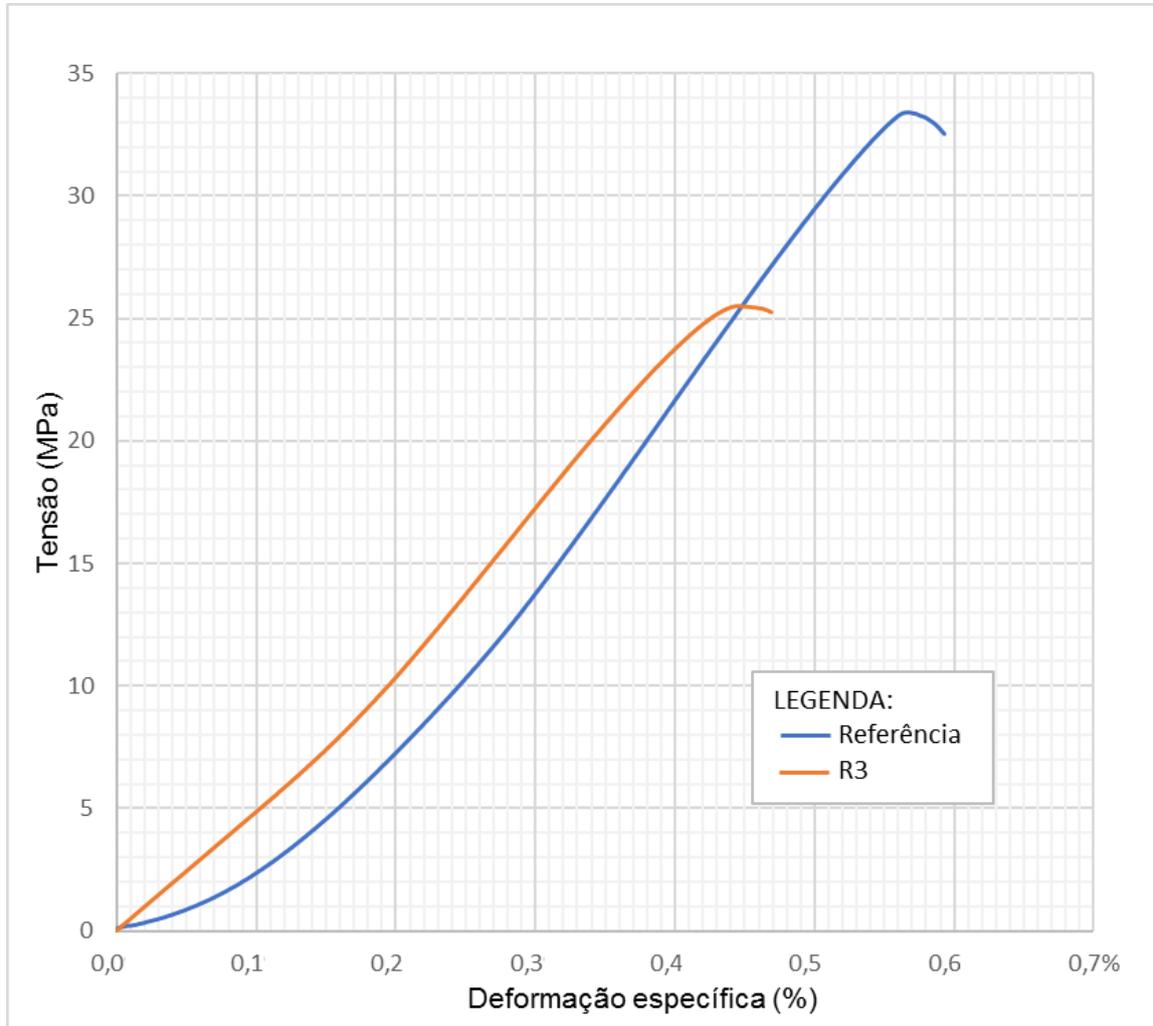
Tabela 10 – Valores de módulo de elasticidade de R3 e concreto referência obtidos com os resultados do ensaio à compressão aos 7 dias

Concreto	Módulo de elasticidade (GPa)	Média do módulo (GPa)	Diferença entre concretos (%)
Referência	28,39	28,9	18,37
	31,07		
	27,24		
R3	22,79	23,59	
	24,81		
	23,17		

Fonte: Do autor (2017).

Através da Tabela 10, observa-se uma redução de 18,37% no valor médio do módulo de elasticidade de R3 comparado com o valor médio de módulo do concreto de referência. Segundo Mehta e Monteiro (2014), essa redução pode chegar até a 45% quando substitui-se totalmente os agregados do concreto por ARC. No entanto, FHWA (2007) limita a redução no módulo de elasticidade entre 25 a 40% quando utiliza-se ARC graúdo e miúdo. O Gráfico 9, por sua vez, ilustra a composição do módulo através da relação entre a tensão e a deformação dos concretos.

Gráfico 9 – Curva tensão X deformação específica de R3 e concreto referência obtidos com os resultados do ensaio à compressão aos 7 dias



Fonte: Do autor (2017).

Ressalta-se que, mesmo não estando dentro do limite de variação de redução de módulo proposto FHWA (2007), considera-se o valor do módulo de elasticidade do concreto R3 aceitável, pois pavimentos de concreto simples necessitam de valores altos para o módulo de elasticidade, visto que não possuem barras de aço para resistir aos esforços, conferindo a responsabilidade exclusivamente ao concreto, conforme salienta Balbo (2009). Portanto, considerando-se que o concreto de referência é o antigo pavimento e R3 é o novo pavimento, a variação de módulo abaixo do esperado estaria a favor do projeto estrutural.

4.6 Ensaio de tração na flexão

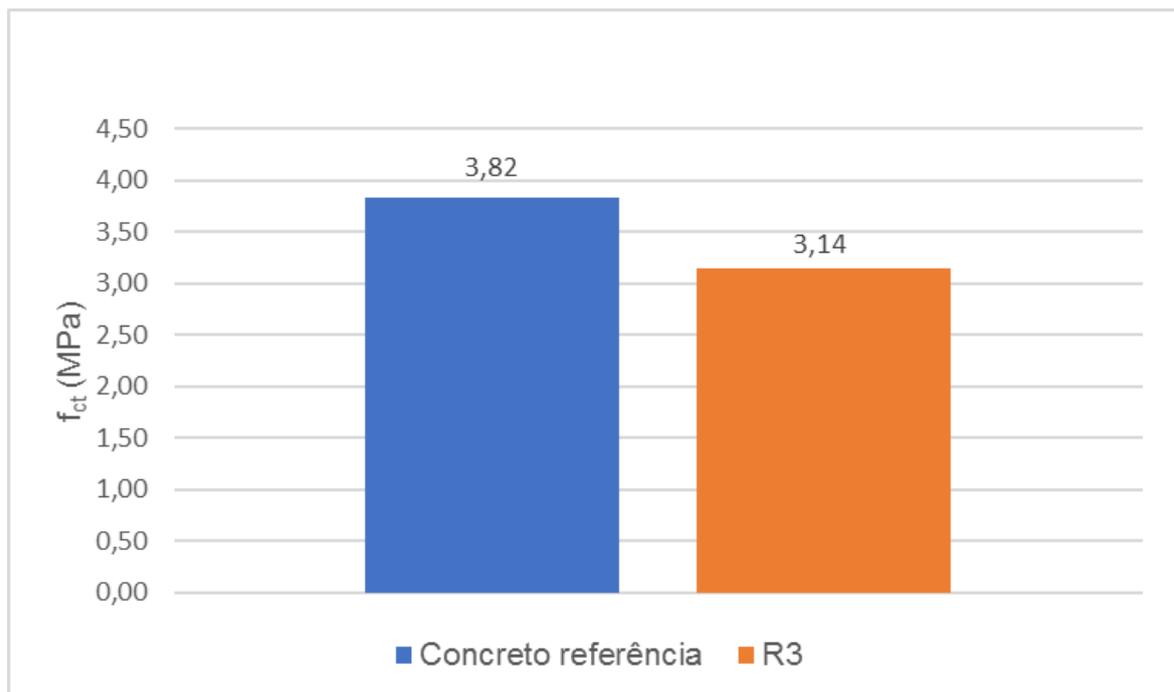
Os valores obtidos com a realização do ensaio de tração na flexão para os concretos de referência e R3 estão expostos na Tabela 11. Já o Gráfico 10 ilustra um comparativo entre resistências características à tração na flexão do concreto de referência e R3.

Tabela 11 – Valores de resistência à tração na flexão de R3 e concreto referência obtidos aos 7 dias

Concreto	Tensão de ruptura MPa	Tensão de ruptura média MPa	Desvio padrão	Resistência característica (f_{ctk}) MPa	Coefficiente de Variação (%)	Diferença entre concretos (%)
Referência	4,26	4,29	0,2810	3,82	6,55	17,86
	4,02					
	4,58					
R3	3,38	3,49	0,2139	3,14	6,12	
	3,74					
	3,36					

Fonte: Do autor (2017).

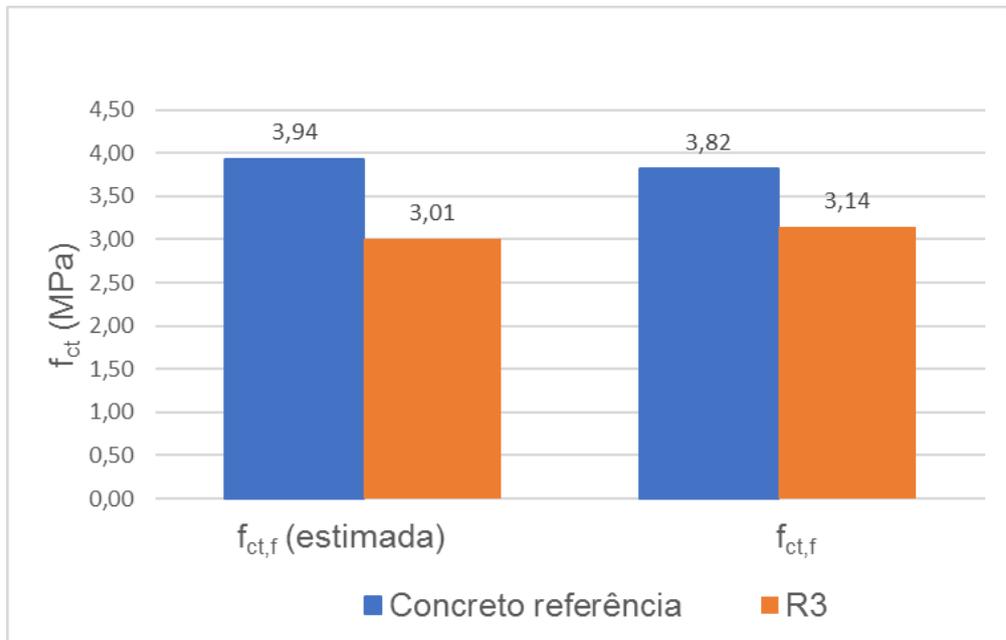
Gráfico 10 – Comparativo entre resistência à tração na flexão de R3 e concreto referência obtidos aos 7 dias



Fonte: Do autor (2017).

Com a determinação final do valor de resistência à tração na flexão dos concretos de referência e R3, comparou-se os valores com a estimativa realizada anteriormente (Gráfico 11).

Gráfico 11 – Comparativo entre resistências à tração na flexão dos concretos



Fonte: Do autor (2017).

Através do Gráfico 11, observa-se que a resistência $f_{ct,f} = 3,14$ MPa do concreto R3 superou a inicial estimativa realizada para sua classe, que era de $f_{ct,f} = 3,01$ MPa. A resistência $f_{ct,f} = 3,82$ MPa do concreto referência foi ligeiramente inferior à sua resistência estimada de $f_{ct,f} = 3,94$ MPa. Portanto, a pouca variação entre as resultantes certifica os ensaios realizados e a relação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

4.5 Dimensionamento de pavimento rígido

4.5.1 Pavimento rígido dimensionado com o concreto referência

A Tabela 12 apresenta o dimensionamento de um PCS supondo-se a utilização do valor de resistência à tração na flexão do concreto referência, como material para camada de revestimento, utilizando-se o método da PCA/84.

Tabela 12 – Aplicação do concreto referência para dimensionamento de um PCS

Espeçsura tentativa:	28 cm	Juntas com BT:	sim___ não_ <u>X</u>
K_{sb} :	100 MPa/m	Acostamento de concreto:	sim___ não_ <u>X</u>
Resistência característica à tração na flexão:	3,82 MPa	Período de projeto:	20 anos
Fator de segurança de cargas, Fsc:	1,2		

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Carga por eixo (tf)	Cargas por eixo X Fsc	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixo simples			(8) Tensão equivalente= 0,98		(10) Fator de Erosão= 2,59	
		(9) Fator de fadiga= 0,26				
<5	6	3270843	ilimitado		ilimitado	
5 - 6	7,2	203804	ilimitado		ilimitado	
6 - 7	8,4	290488	ilimitado		ilimitado	
7 - 8	9,6	238118	ilimitado		80.000.000,00	0,00
8 - 9	10,8	242715	ilimitado		21.000.000,00	0,01
9 - 10	12	310404	ilimitado		10.000.000,00	0,03
10 - 11	13,2	282267	ilimitado		6.000.000,00	0,05
11 - 12	14,4	242438	ilimitado		3.100.000,00	0,08
12 - 13	15,6	206645	1.900.000,00	0,11	1.900.000,00	0,11
13 - 14	16,8	65889	420.000,00	0,16	1.200.000,00	0,05
14 - 15	18	39296	130.000,00	0,30	810.000,00	0,05
15 - 16	19,2	5565	45.000,00	0,12	570.000,00	0,01
Eixo Tandem Duplos			(11) Tensão equivalente= 0,86		(12) Fator de Erosão= 2,79	
		(13) Fator de fadiga= 0,23				
<13	15,6	182532	ilimitado		50.200.000,00	0,00
13 - 14	16,8	5565	ilimitado		20.400.000,00	0,00
14 - 15	18	12243	ilimitado		10.450.000,00	0,00
15 - 16	19,2	12243	ilimitado		8.500.000,00	0,00
16 - 17	20,4	17808	ilimitado		4.800.000,00	0,00
17 - 18	21,6	30051	ilimitado		3.700.000,00	0,01
18 - 19	22,8	23373	ilimitado		3.000.000,00	0,01
19 - 20	24	17808	ilimitado		2.100.000,00	0,01
20 - 21	25,2	17808	ilimitado		1.600.000,00	0,01
21 - 22	26,4	12243	ilimitado		1.100.000,00	0,01
22 - 23	27,6	5565	ilimitado		950.000,00	0,01
23 - 24	28,8	5565	ilimitado		700.000,00	0,01
Eixo Tandem Triplo			(14) Tensão equivalente= 0,64		(15) Fator de Erosão= 2,82	
		(16) Fator de fadiga= 0,17				
<24	9,6	30051	ilimitado		9.000.000,00	0,00
24 - 26	10,4	17808	ilimitado		4.000.000,00	0,00
26 - 28	11,2	12243	ilimitado		2.850.000,00	0,00
28 - 30	12	18921	ilimitado		1.900.000,00	0,01
TOTAL				69,2%	TOTAL	48,6%

Fonte: Do autor (2017).

Através da Tabela 12, chegou-se a uma espessura de revestimento de 28 cm, com a utilização do valor de f_{ct} do concreto referência, para atender à análise por fadiga e erosão. A espessura obtida não apresentou uma grande variação em relação ao exemplo simulado, proposto por DNIT (2005), uma vez que, no exemplo da norma, o pavimento está superdimensionado, considerando-se somente a análise por fadiga, fator que se relaciona com a característica de resistência f_{ct} do concreto. As planilhas e ábacos utilizados no cálculo encontram-se em anexos A, B, C, D, E e F.

4.5.2 Pavimento rígido dimensionado com o concreto reciclado

A Tabela 13 apresenta o dimensionamento do PCS, supondo-se a utilização do valor obtido de resistência à tração na flexão do concreto R3 como material para camada de revestimento, utilizando-se o método da PCA/84.

Tabela 13 – Aplicação do concreto R3 para dimensionamento de um PCS

Espessura tentativa:	32,00 cm	Juntas com BT:	sim___ não <u>X</u>
K_{sb} :	100,00 MPa/m	Acostamento de concreto:	sim___ não <u>X</u>
Resistência característica à tração na flexão:	3,14 MPa	Período de projeto:	20 anos
Fator de segurança de cargas, Fsc:	1,20		

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)						
Carga por eixo (tf)	Cargas por eixo X Fsc	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSÃO	
			nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixo simples			(8) Tensão equivalente= 0,80		(10) Fator de Erosão= 2,43	
(9) Fator de fadiga= 0,25						
<5	6,00	3270843,00	ilimitado			
5 - 6	7,20	203804,00	ilimitado			
6 - 7	8,40	290488,00	ilimitado			
7 - 8	9,60	238118,00	ilimitado			
8 - 9	10,80	242715,00	ilimitado			
9 - 10	12,00	310404,00	ilimitado		60.000.000,00	0,01
10 - 11	13,20	282267,00	ilimitado		24.500.000,00	0,01
11 - 12	14,40	242438,00	ilimitado		10.100.000,00	0,02
12 - 13	15,60	206645,00	5.000.000,00	0,04	6.250.000,00	0,03
13 - 14	16,80	65889,00	580.000,00	0,11	3.600.000,00	0,02
14 - 15	18,00	39296,00	185.000,00	0,21	2.750.000,00	0,01
15 - 16	19,20	5565,00	59.000,00	0,09	1.800.000,00	0,00
Eixo Tandem Duplos			(11) Tensão equivalente= 0,74		(12) Fator de Erosão= 2,66	
(13) Fator de fadiga= 0,24						
<13	15,60	182532,00	ilimitado		ilimitado	
13 - 14	16,80	5565,00	ilimitado		82.000.000,00	0,00
14 - 15	18,00	12243,00	ilimitado		45.000.000,00	0,00
15 - 16	19,20	12243,00	ilimitado		34.500.000,00	0,00
16 - 17	20,40	17808,00	ilimitado		20.000.000,00	0,00
17 - 18	21,60	30051,00	ilimitado		13.500.000,00	0,00
18 - 19	22,80	23373,00	ilimitado		9.000.000,00	0,00
19 - 20	24,00	17808,00	ilimitado		6.000.000,00	0,00
20 - 21	25,20	17808,00	ilimitado		4.100.000,00	0,00
21 - 22	26,40	12243,00	ilimitado		3.000.000,00	0,00
22 - 23	27,60	5565,00	ilimitado		2.600.000,00	0,00
23 - 24	28,80	5565,00	ilimitado		1.950.000,00	0,00
Eixo Tandem Triplo			(14) Tensão equivalente= 0,56		(15) Fator de Erosão= 2,69	
(16) Fator de fadiga= 0,18						
<24	9,60	30051,00	ilimitado		18.900.000,00	0,00
24 - 26	10,40	17808,00	ilimitado		15.000.000,00	0,00
26 - 28	11,20	12243,00	ilimitado		10.000.000,00	0,00
28 - 30	12,00	18921,00	ilimitado		4.350.000,00	0,00
TOTAL				46,2%	TOTAL	14,1%

Fonte: Do autor (2017).

Através da Tabela 13, observa-se que, com a utilização do f_{ct} do concreto R3, necessitou-se de uma espessura de 32 cm para atender aos parâmetros de análise

de fadiga e erosão. Para esse caso, a espessura dimensionada apresentou uma variação excessiva em relação ao exemplo proposto por DNIT (2005). O resultado encontrado deve-se ao baixo valor de resistência f_{ct} do concreto R3. As planilhas e ábacos utilizados no cálculo encontram-se em anexos A, B, C, D, E e F.

Portanto, analisando o pavimento dimensionado, verificou-se que, para o exemplo aplicado dos resultados obtidos no laboratório, o concreto de referência necessitou de 28 cm de espessura do revestimento enquanto o reciclado precisou de 32 cm. Assim, uma vez que a resistência do concreto reciclado foi 17,86% inferior ao de referência, aquele precisou de 4 cm a mais de revestimento no pavimento rígido para compensar a queda de resistência, ou seja, a espessura aumentou em 14,28%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a finalização deste estudo, pode-se chegar às seguintes conclusões: o dimensionamento realizado considerando o $f_{ct,f} = 3,14$ MPa do concreto reciclado, representou uma espessura final do pavimento de 32 cm, estando dentro do permitido para aplicação de projeto, conforme especifica DNIT (2005). Destaca-se que a referida norma não estipula um valor fixo, mas sim supõe parâmetros de resistência à tração na flexão para concretos aceitáveis entre 4,0 e 5,0 MPa, sendo o ideal 4,5 MPa aos 28 dias.

Portanto, conclui-se que é viável a utilização de concreto de cimento Portland com a utilização de agregados reciclados aplicados à pavimentação, visto que, a redução de resistência do concreto contendo ARC pode ser compensada aumentando-se a espessura da placa de concreto do pavimento, os 4 cm de diferença entre os dimensionamentos considerando o concreto referência e o concreto R3, comprovam este fato.

Também, constatou-se que o ganho de resistência para as classes de concreto contendo diferentes porcentagens de ARC pode ser representado por uma reta que indica a quantidade de ARC miúdo adicionado ao traço. Outra observação deve-se ao fato de que o concreto contendo agregado reciclado de concreto apresentou uma redução de resistência mecânica dentro do esperado e observado nas pesquisas de Tseng (2010), Mehta e Monteiro (2014) e FHWA (2007), sendo que grande parte da redução se deve ao teor de absorção de água dos agregados reciclados, o que resulta em um fator elevado de água/cimento.

Com relação a questões estruturais, o concreto contendo agregado reciclado de melhor desempenho não atingiu a resistência à tração na flexão esperada, inicialmente. Esse fato justifica-se através da primeira etapa realizada, em que se determinou o traço referência fixando-se uma resistência à compressão de 35 MPa, valor considerado baixo.

Por fim, quando se parte para uma abordagem ambiental, muitos aspectos estão envolvidos a fim de que uma ação seja considerada ambientalmente viável. Este trabalho focou-se somente na reciclagem do concreto, visando à conservação de matérias-primas naturais e à geração de uma alternativa para a disposição de resíduos sólidos. Nesse sentido, os resultados obtidos confirmam que é possível utilizar agregado reciclado de concreto para a produção de novos pavimentos, mas essa atividade por si só não representa benefícios ambientais. Para que a atividade proposta gere ganho ambiental e financeiro, outros estudos mais aprofundados e específicos devem ser elaborados. Assim sendo, sugere-se, entre outros, estudos que podem ser realizados no futuro:

- a) realizar um levantamento orçamentário para verificação da viabilidade financeira acerca da utilização de concretos contendo ARC em pavimentos rígidos;
- b) analisar todo o ciclo executivo da atividade para verificação de ganhos ambientais;
- c) realizar o mesmo método de dosagem proposto no trabalho para determinação do traço, baseado em ensaios à tração na flexão;
- d) realizar um estudo semelhante utilizando ARC com diferentes idades de cura para verificação da influência do cimento não hidratado em resultados de resistência de concretos reciclados;
- e) verificar o potencial de utilização de concretos compostos de ARC e materiais alternativos em substituição ao cimento e adições, como cinza de casca de arroz e sílica ativa, além de uma dosagem dos concretos com a utilização de aditivos;
- f) realizar a reconstituição do traço de um antigo pavimento de concreto e verificações de resistência deste através de ensaios alternativos, como esclerometria e extração de testemunhos.

REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 236 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05102005-112833/pt-br.php>>. Acesso em: 7 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

_____. **NBR 15116**: Agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 7223:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 9776:** Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987a.

_____. **NBR 9777:** Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987b.

_____. **NBR 9937:** Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987c.

_____. **NBR NM 67:** Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

_____. **Pavimentos de concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BARBOSA JÚNIOR, Álvaro Sérgio. **Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento Portland para pavimentação.** 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-110139/estudo-da-utilizacao-de-agregado-reciclado-em-mistura-de-concreto-de-cimento-portland-para-pavimentacao>>. Acesso em: 10 maio 2017.

BARROS, Regina Mambeli. **Tratado sobre resíduos sólidos:** gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciências; Minas Gerais: Acta, 2012.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais da construção.** 5. ed. ver. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERNUCCI, L. B.; et al. **Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2006.

BRASIL. **Lei n. 12.305,** de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras

providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 7 maio 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução n. 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 7 maio 2017.

CORDEIRO, L.N.P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/96512>>. Acessado em: 13 maio 2017.

CUNHA NETO, Julio. Duplicação da ERS-118 utiliza tecnologia inédita no Brasil. **Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER**, Porto Alegre, 10 abr. 2017. Disponível em: <<http://www.daer.rs.gov.br/duplicacao-da-ers-118-utiliza-tecnologia-inedita-no-brasil>>. Acesso em: 13 maio 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT 050/2004 – EM: Pavimento rígido – Cimento Portland**. Especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2004a.

_____. **DNIT 054/2004 – PRO: Pavimento rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais**. Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2004b.

_____. **DNIT 055/2004 – ME: Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2004c.

_____. **Manual de pavimentos rígidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

_____. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – FHWA. **Technical Advisory T 5040.37: Use of Recycled Concrete Pavement as Aggregate in Hydraulic-Cement Concrete Pavement**. United States, 2007. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/t504037.cfm>>. Acesso em: 8 maio 2017.

HELENE, Paulo; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993.

ISAIA, Geraldo C. **Concreto: ensino pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005a. v. 1.

_____. **Concreto: ensino pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005b. v. 2.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: SEMINÁRIO – RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo, 2000. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228600228_Reciclagem_de_residuos_da_construcao>. Acesso em: 07 maio 2017.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream_id/45864/000292768.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <http://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Tese_Salomon_Mony_Levy.pdf>. Acesso em: 11 maio 2017.

MARTINS, Flávia Gadelha. **Gestão e gerenciamento de resíduos da construção civil em obras de grande porte: estudos de caso**. 2012. 188 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19102012-093525/pt-br.php>>. Acesso em: 7 maio 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072006-114729/pt-br.php>>. Acesso em: 7 maio 2017.

MYERS, Danny. **Economia das Construções: uma nova abordagem**. 3. ed. Tradução de Bruno Barzellay Ferreira da Costa. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, Adam M. **Properties of Concrete**. 4. ed. London: Longman, 1995.

_____. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

SÃO PAULO (Município). IP 07/2004. **Dimensionamento de Pavimentos de Concreto**. 2004. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20de%20Projeto%20de%20Pavimento%20de%20Concreto.pdf)>

20T%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o/IP_07%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 1 maio 2017.

SENÇO, Wlastemiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. v. 1.

SILVA, Paulo Fernando. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. v. 1.

STURTEVANT, Jeffrey R. **Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of New Hampshire, New Hampshire, 2007. Disponível em <<http://rmrc.wisc.edu/wp-content/uploads/2012/10/Final-Report-PERFORMANCE-OF-RIGID-PAVEMENTS-CONTAINING-RCA.pdf>>. Acesso em: 9 maio 2017.

TSENG, Ester. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas**. 2010. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20102010-164010/pt-br.php>>. Acesso em: 7 maio 2017.

VIRGILLITO, Salvatore Benito. **Estatística Aplicada**. Editora Saraiva, 2017.

ANEXOS

ANEXO A – Tensão equivalente para eixos simples e tandem duplo (MPa), PSAC
(pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																				
	20			40			60			80			100			150			180		
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD			
12	4,30	3,56	3,78	3,01	3,51	2,81	3,31	2,68	3,17	2,57	2,91	2,43	2,74	2,35							
13	3,84	2,33	3,38	2,73	3,14	2,53	2,97	2,40	2,84	2,30	2,61	2,16	2,46	2,08							
14	3,46	2,96	3,05	2,49	2,83	2,29	2,68	2,16	2,56	2,08	2,37	1,94	2,23	1,85							
15	3,14	2,72	2,27	2,29	2,57	2,09	2,44	1,97	2,33	1,88	2,16	1,75	2,04	1,67							
16	2,87	2,52	2,53	2,12	2,35	1,93	2,23	1,81	2,13	1,73	1,97	1,60	1,87	1,52							
17	2,63	2,35	2,33	1,97	2,16	1,79	2,05	1,67	1,96	1,60	1,81	1,47	1,72	1,39							
18	2,43	2,20	2,15	1,84	1,99	1,66	1,89	1,55	1,81	1,48	1,68	1,36	1,59	1,28							
19	2,25	2,07	1,99	1,72	1,85	1,56	1,75	1,45	1,68	1,38	1,56	1,26	1,48	1,19							
20	2,10	1,95	1,85	1,62	1,72	1,46	1,64	1,36	1,56	1,29	1,45	1,18	1,38	1,11							
21	1,96	1,85	1,73	1,53	1,61	1,38	1,52	1,29	1,46	1,22	1,36	1,11	1,28	1,04							
22	1,83	1,75	1,62	1,45	1,50	1,31	1,42	1,22	1,37	1,15	1,28	1,05	1,20	0,98							
23	1,72	1,67	1,52	1,38	1,41	1,24	1,33	1,15	1,28	1,09	1,20	0,99	1,13	0,92							
24	1,62	1,59	1,43	1,31	1,33	1,18	1,25	1,10	1,21	1,04	1,13	0,94	1,07	0,88							
25	1,53	1,52	1,35	1,25	1,26	1,12	1,19	1,05	1,14	0,99	1,07	0,89	1,01	0,83							
26	1,45	1,45	1,28	1,20	1,19	1,07	1,13	1,00	1,08	0,94	1,01	0,85	0,95	0,80							
27	1,83	1,39	1,21	1,15	1,13	1,03	1,07	0,95	1,03	0,90	0,95	0,81	0,90	0,76							
28	1,31	1,34	1,15	1,10	1,07	0,99	1,02	0,91	0,98	0,86	0,90	0,78	0,86	0,73							
29	1,25	1,29	1,10	1,06	1,02	0,95	0,97	0,88	0,93	0,83	0,86	0,75	0,82	0,69							
30	1,19	1,24	1,05	1,02	0,97	0,91	0,92	0,85	0,89	0,80	0,82	0,72	0,78	0,66							
31	1,13	1,20	1,00	0,99	0,93	0,88	0,88	0,81	0,84	0,77	0,78	0,69	0,74	0,64							
32	1,09	1,16	0,96	0,95	0,89	0,85	0,84	0,78	0,80	0,74	0,75	0,67	0,71	0,62							
33	1,04	1,12	0,92	0,92	0,85	0,82	0,80	0,76	0,77	0,71	0,72	0,64	0,68	0,60							
34	1,00	1,08	0,88	0,89	0,81	0,79	0,77	0,73	0,73	0,69	0,69	0,62	0,66	0,58							

ES: Eixos Simples
ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005, p. 101)

ANEXO B – Tensão equivalente para eixos tandem triplos (MPa), PSAC (pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)							
	20	40	60	80	140	180		
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07		
13	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78		
14	2,15	1,83	1,72	1,65	1,58	1,55		
15	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37		
16	1,85	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23		
17	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11		
18	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01		
19	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92		
20	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85		
21	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79		
22	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74		
23	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70		
24	1,18	0,97	0,87	0,80	0,69	0,66		
25	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62		
26	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59		
27	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57		
28	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54		
29	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52		
30	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50		
31	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48		
32	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46		
33	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45		
34	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43		

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT (2005, p. 102).

ANEXO C – Fator de erosão para eixos simples e tandem duplos JSP e PSAC (junta sem barra de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																				
	20			40			60			80			100			150			200		
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD			
12	2,72	3,82	3,69	3,74	3,67	3,69	3,65	3,67	3,64	3,64	3,65	3,63	3,63	3,61	3,59	3,58					
13	3,62	3,75	3,59	3,66	3,57	3,61	3,55	3,59	3,54	3,54	3,57	3,52	3,52	3,52	3,49	3,49					
14	3,53	3,68	3,50	3,59	3,48	3,53	3,46	3,51	3,45	3,45	3,49	3,43	3,43	3,44	3,40	3,41					
15	3,45	3,61	3,41	3,52	3,39	3,46	3,37	3,44	3,36	3,36	3,42	3,34	3,34	3,37	3,31	3,34					
16	3,37	3,55	3,33	3,46	3,31	3,40	3,29	3,37	3,28	3,28	3,35	3,26	3,26	3,30	3,23	3,26					
17	3,30	3,50	3,26	3,40	3,23	3,34	3,21	3,31	3,20	3,20	3,29	3,18	3,23	3,16	3,20						
18	3,23	3,44	3,18	3,34	3,16	3,28	3,14	3,25	3,13	3,13	3,23	3,11	3,17	3,09	3,13						
19	3,17	3,39	3,12	3,29	3,09	3,23	3,07	3,19	3,06	3,06	3,17	3,04	3,11	3,02	3,07						
20	3,11	3,35	3,05	3,24	3,03	3,17	3,01	3,14	3,00	3,00	3,12	2,98	3,05	2,96	3,02						
21	3,05	3,30	2,99	3,19	2,97	3,13	2,95	3,09	2,94	2,94	3,07	2,92	3,00	2,90	2,96						
22	3,00	3,26	2,94	3,15	2,91	3,08	2,89	3,04	2,88	2,88	3,02	2,86	2,85	2,84	2,91						
23	2,94	3,22	2,88	3,11	2,85	3,03	2,83	2,99	2,82	2,82	2,97	2,80	2,90	2,78	2,86						
24	2,90	3,18	2,84	3,07	2,80	2,99	2,78	2,95	2,77	2,77	2,93	2,75	2,86	2,73	2,82						
25	2,86	3,14	2,78	3,03	2,76	2,96	2,73	2,91	2,72	2,72	2,89	2,70	2,82	2,68	2,78						
26	2,81	3,11	2,75	2,99	2,71	2,92	2,69	2,88	2,68	2,68	2,86	2,65	2,71	2,63	2,74						
27	2,77	3,08	2,70	2,96	2,67	2,89	2,64	2,84	2,63	2,63	2,82	2,61	2,75	2,59	2,71						
28	2,73	3,05	2,66	2,93	2,62	2,85	2,60	2,81	2,59	2,59	2,79	2,56	2,71	2,54	2,67						
29	2,70	3,02	2,62	2,90	2,58	2,82	2,56	2,78	2,55	2,55	2,75	2,52	2,68	2,50	2,64						
30	2,66	2,99	2,59	2,86	2,54	2,79	2,51	2,75	2,50	2,50	2,72	2,48	2,64	2,46	2,60						
31	2,63	2,96	2,55	2,83	2,50	2,76	2,48	2,72	2,47	2,47	2,69	2,44	2,61	2,42	2,57						
32	2,59	2,93	2,51	2,81	2,47	2,73	2,44	2,69	2,43	2,43	2,66	2,40	2,58	2,38	2,54						
33	2,56	2,90	2,48	2,78	2,43	2,70	2,40	2,66	2,39	2,39	2,63	2,36	2,55	2,34	2,51						
34	2,53	2,88	2,45	2,75	2,40	2,67	2,37	2,63	2,36	2,36	2,60	2,32	2,52	2,30	2,48						

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005, p. 105).

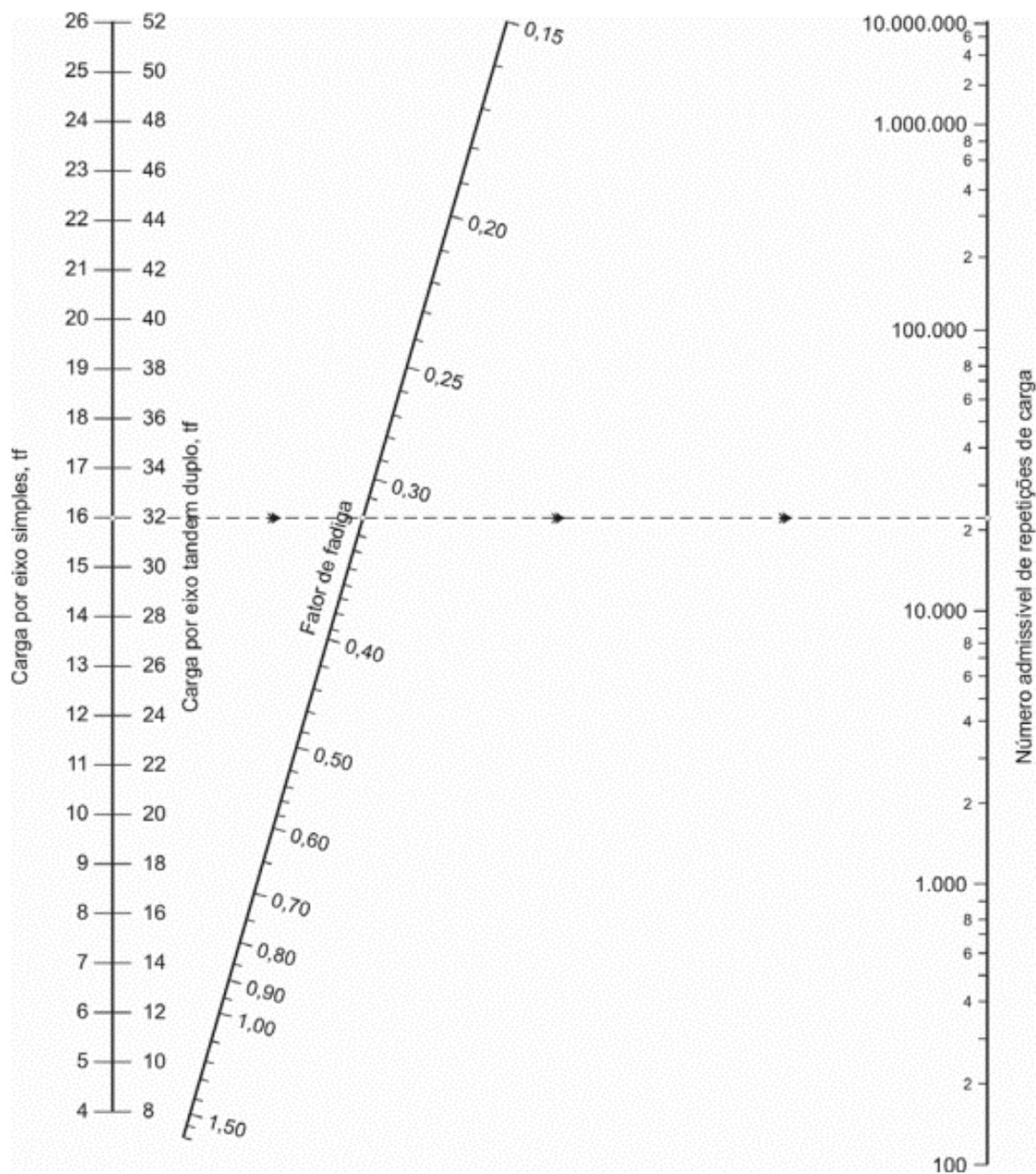
ANEXO D – Fator de erosão para eixos tandem triplos JSP e PSAC (junta sem barra de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)							
	20	40	60	80	140	180	ETT	ETT
12	3,85	3,75	3,70	3,66	3,57	3,53	ETT	ETT
13	3,77	3,68	3,62	3,58	3,50	3,45	ETT	ETT
14	3,70	3,60	3,55	3,51	3,42	3,38	ETT	ETT
15	3,64	3,54	3,48	3,44	3,36	3,32	ETT	ETT
16	3,58	3,47	3,42	3,38	3,29	3,25	ETT	ETT
17	3,52	3,42	3,36	3,32	3,23	3,19	ETT	ETT
18	3,47	3,36	3,30	3,26	3,18	3,14	ETT	ETT
19	3,42	3,31	3,25	3,21	3,13	3,09	ETT	ETT
20	3,37	3,26	3,20	3,16	3,08	3,04	ETT	ETT
21	3,33	3,22	3,16	3,11	3,03	2,99	ETT	ETT
22	3,29	3,18	3,11	3,07	2,99	2,95	ETT	ETT
23	3,25	3,13	3,07	3,03	2,94	2,91	ETT	ETT
24	3,21	3,10	3,03	2,99	2,90	2,86	ETT	ETT
25	3,17	3,06	2,99	2,95	2,87	2,83	ETT	ETT
26	3,14	3,02	2,96	2,91	2,83	2,79	ETT	ETT
27	3,10	2,99	2,92	2,88	2,79	2,75	ETT	ETT
28	3,07	2,96	2,89	2,85	2,76	2,72	ETT	ETT
29	3,04	2,92	2,86	2,81	2,73	2,69	ETT	ETT
30	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65	ETT	ETT
31	2,98	2,87	2,80	2,75	2,66	2,62	ETT	ETT
32	2,96	2,84	2,77	2,72	2,63	2,59	ETT	ETT
33	2,93	2,81	2,74	2,70	2,61	2,57	ETT	ETT
34	2,91	2,81	2,72	2,67	2,58	2,54	ETT	ETT

ETT: Eixos Tandem Triplos
ETT: Eixos Tandem Triplos

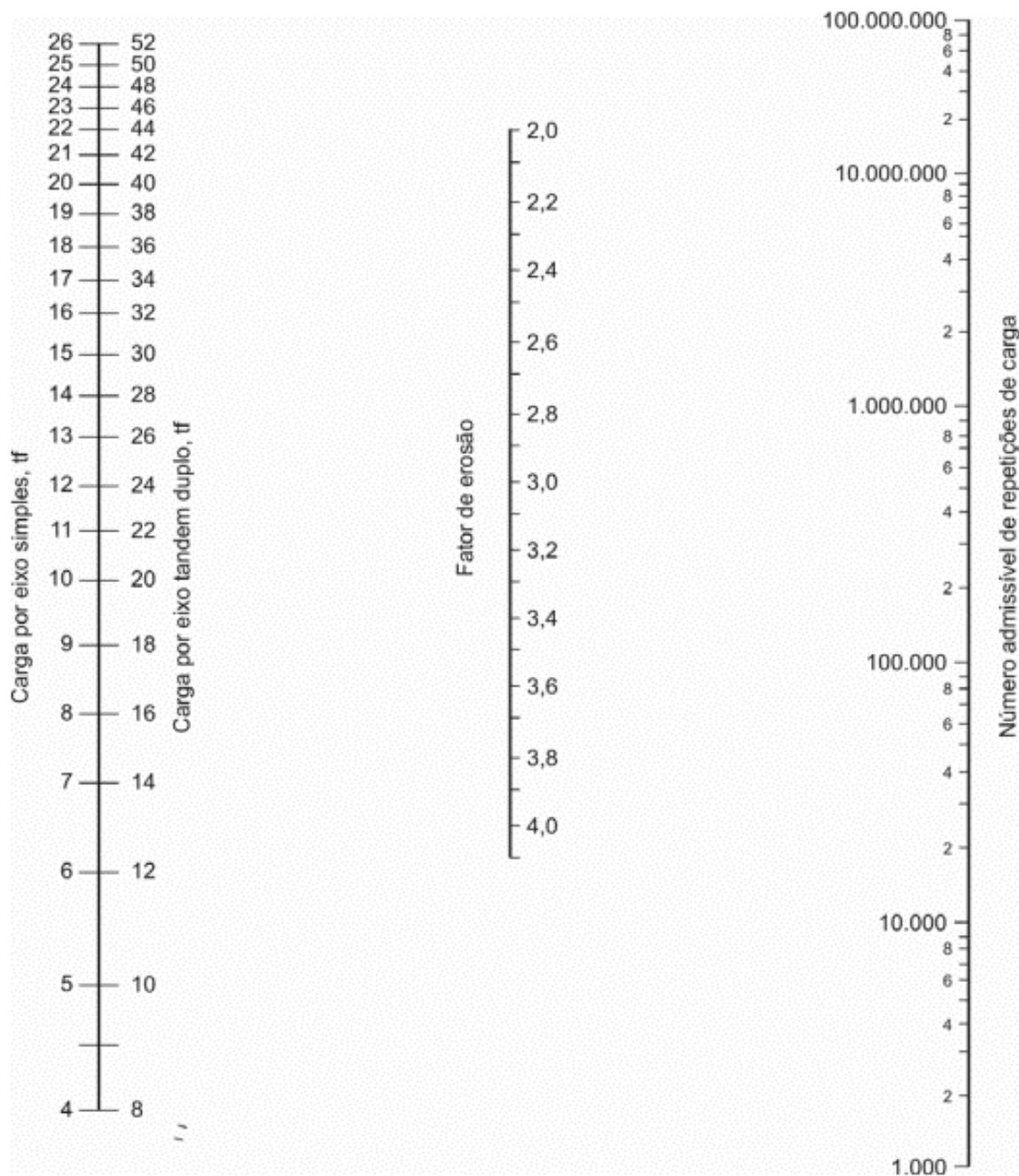
Fonte: DNIT (2005, p. 106).

ANEXO E – Análise de fadiga



Fonte: DNIT (2005, p. 113).

ANEXO F – Análise de erosão



Fonte: DNIT (2005, p. 114).



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09