



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CARLOS EDUARDO DA NÓBREGA ALMEIDA

APLICAÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
ESTUDO DE CASO DO TERMINAL ANTÔNIO BEZERRA – FORTALEZA, CE

FORTALEZA

2014

CARLOS EDUARDO DA NÓBREGA ALMEIDA

APLICAÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
ESTUDO DE CASO DO TERMINAL ANTÔNIO BEZERRA – FORTALEZA, CE.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A445a Almeida, Carlos Eduardo da Nóbrega.
Aplicação de pavimentos de concreto : estudo de caso do Terminal Antônio Bezerra - Fortaleza, Ce / Carlos Eduardo da Nóbrega Almeida. – 2014.
90 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
1. Pavimento rígido. 2. Terminal rodoviário. 3. Dimensionamento de pavimentos. 4. Concreto rolado. I. Título.

CDD 620

CARLOS EDUARDO DA NÓBREGA ALMEIDA

APLICAÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
ESTUDO DE CASO DO TERMINAL ANTÔNIO BEZERRA – FORTALEZA, CE.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dsc. Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dsc. Deividi da Silva Pereira (Avaliador externo)
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais Carlos e Ana Lúcia, minhas irmãs Vanessa e Andressa e ao meu cunhado-irmão Igor, pelo amor, pelo carinho, pela paciência e pelo apoio incondicional apresentado durante todas às minhas escolhas e decisões.

À Galvão Engenharia por toda a formação profissional contemplada durante a faculdade e por acreditar no meu potencial durante os estágios realizados nestes três anos.

Ao professor Jorge Soares pela orientação e colaboração neste trabalho. Sou grato pela atenção e palavras de motivação durante o processo. Agradeço aos professores Deividi Pereira e Suelly Barroso por gentilmente aceitarem participar da banca avaliadora.

À professora Verônica pelos ensinamentos, conselhos e suporte durante o ano desta monografia.

À Paloma Verçosa por toda a força, os conselhos, as ideias divididas, a ajuda e por estar comigo nos tempos difíceis transformando pensamentos desanimadores em momentos de motivação.

Ao Samuel Torquato e à Angela Saggin que foram peças fundamentais para a conclusão deste trabalho servindo de apoio nos momentos mais críticos.

Aos meus amigos de curso que ao longo desses cinco anos sempre estiveram ao meu lado, ajudando-nos mutuamente em trabalhos, nos estudos para as provas e escolhas profissionais. Vivenciamos ótimos momentos juntos ao longo desse período, sejam nas salas de aula, no Banco, no Tchan e até mesmo na derrota do 7x1. Espero que possamos continuar com essa amizade tão bem formada.

Enfim, um dos maiores ganhos deste trabalho foi reconhecer mais uma vez como estou rodeado de pessoas boas que irão estar comigo em momentos de alegria e, principalmente, nos momentos de dificuldade.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre o projeto executivo adotado no Terminal do Antônio Bezerra e os estudos técnicos de referência da tecnologia empregada. As características de execução e os materiais adotados na obra são descritos e considerados para a análise realizada nesta investigação. A espessura da placa de concreto foi avaliada por meio de dois métodos distintos: PCA (1994) e AASHTO (1993). Ambos os métodos apresentam resultados utilizando os mesmos parâmetros de material, carga e tráfego. Estes resultados são comparados às características do projeto real. A metodologia do trabalho formou-se a partir do levantamento de dados de tráfego e de cargas junto aos órgãos responsáveis pela operação do Terminal. Visitas realizadas durante a execução evidenciaram os modelos de execução adotados para a realização do projeto. Após investigação de campo, foram realizados os dimensionamentos das espessuras de placas de concreto, utilizando solo-brita e concreto rolado como materiais de subbase. Os resultados foram comparados e o estudo mostrou que o método PCA solicita um acréscimo de 5% na espessura da placa em relação ao projeto executivo, enquanto o método da AASHTO implicou num acréscimo de 20%. Um comparativo de custo, englobando todas as camadas do pavimento, foi realizado expondo a redução de 4,5% no custo devido ao uso de concreto rolado em substituição ao uso de solo-brita. Este decréscimo é devido à redução da espessura da placa de concreto em 10,5%. O estudo serve de proposta preliminar para o dimensionamento de pavimentos de concreto em futuros terminais urbanos na cidade de Fortaleza, tendo como referência o Terminal Antônio Bezerra que é o primeiro a ser reformado com esta tecnologia.

Palavras-chaves: Pavimento Rígido. Terminal Rodoviário. Dimensionamento de Pavimentos. Concreto Rolado.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study between the executive project adopted in the Terminal Antonio Bezerra and technical studies on the technology employed. Performance characteristics and materials adopted in the project are described and considered for analysis. The thickness of the concrete slab is determined by two different methods: PCA (1994) and AASHTO (1993). Both methods assume similar material parameters, loads and traffic. These results are compared to the actual design parameters used in practice. The paper methodology was developed from collecting traffic and load data from the companies that run the Terminal operation. Visits during the execution exposed the pavement models adopted for the project. After field investigation, the concrete slab design using granular material and rolled-compacted concrete as subbase materials was performed. The results were compared and indicated that the PCA method requests a 5% increase in the slab thickness in relation to the executive project, whilst the AASHTO method resulted in a 20% increase. A cost investigation, involving the pavement layers was accomplished and has shown a 4.5% reduction in cost due to the use of rolled-compacted concrete instead of granular material for the base layer. This decrease is due to a 10.5% reducing on the concrete slab thickness. The study serves as a preliminary proposal for the concrete pavement design in future urban terminals in Fortaleza, taking the Terminal Antonio Bezerra, the first to be renovated with the technology, as a reference.

Key words: Rigid Pavement. Bus Station. Pavement Project. Rolled-Compacted Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta de terminais em Fortaleza	2
Figura 2 - Pavimento Terminal Antônio Bezerra	2
Figura 3 - Deformação permanente (trilha de roda)	3
Figura 4 - Tempo gasto nos deslocamentos nas cidades brasileiras.....	5
Figura 5 - Distribuição das tensões no solo	7
Figura 6 - Aplicação de peças pré-moldadas de concreto.	8
Figura 7 - Execução do CCR.....	11
Figura 8 - Placa de concreto simples	12
Figura 9 - Placa de concreto simples com barra de transferência	13
Figura 10 - Placa e concreto com armadura distribuída descontínua	13
Figura 11 - Placa de concreto estruturalmente armado	14
Figura 12 - Execução da serragem das juntas.....	15
Figura 13 - Vista corte da junta de placas	16
Figura 14 - Junta com barra de transferência x junta sem barra de transferência	16
Figura 15 - Detalhe de uma junta de expansão.....	17
Figura 16 - Empenamento diurno.....	18
Figura 17 - Empenamento noturno.....	18
Figura 18 - Posição das barras de transferência	19
Figura 19 - Uso de mantas geotêxtil para processo de cura	20
Figura 20 - Fissura por falta de controle na cura	21
Figura 21 - Prova de carga estática.....	22
Figura 22 - Posicionamento de cargas aplicadas na placa.....	23
Figura 23 - Relação entre tensões e o número de aplicações pelo método PCA.....	25
Figura 24 - Posição de cargas aplicadas	27
Figura 25 - Fluxograma de procedimento adotado pelo MEPDG.....	31
Figura 26 - Modelo de ônibus urbano de Fortaleza.....	35
Figura 27 - Nomograma: análise de fadiga em função do fator de fadiga	41
Figura 28 - Nomograma: análise de erosão (com acostamento de concreto).....	42
Figura 29 - Aplicação do concreto com uso de régua vibratória.....	45
Figura 30 - Ensaio de tração na flexão	45
Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	46
Figura 32 - Diagrama de esforços solicitantes.....	46

Figura 33 - Equipe de terraplenagem regularizando materiais de fundação	48
Figura 34 - Imprimação da área de estacionamento do Terminal Antônio Bezerra.....	49
Figura 35 - Projeto executivo de dimensão da placa	50
Figura 36 - Execução de frisagem do pavimento de concreto do Terminal	50
Figura 37 - Projeto Terminal – Detalhe da junta de expansão	51
Figura 38 - Projeto Terminal – Detalhe da junta transversal.....	51
Figura 39 - Projeto Terminal – Detalhe da junta longitudinal.....	52
Figura 40 - Disposição das barras de ligação no Terminal do Antônio Bezerra.....	52
Figura 41 - Placa de concreto simples	53
Figura 42 - Camada de concreto compactado a rolo	54
Figura 43 - Pavimentadora de concreto	54
Figura 44 - Nivelamento do concreto	55
Figura 45 - Inserção de barras de transferência.....	55
Figura 46 - Pista de concreto Anel Viário	56
Figura 47 - Estrutura do pavimento de concreto de Cimento Portland calculada segundo o método PCA/84	63
Figura 48 - Estrutura do pavimento de concreto de Cimento Portland calculada segundo o método AASHTO	65
Figura 49 - Nomograma de fadiga executado para dimensionamento para $h = 20$ cm	76
Figura 50 - Nomograma de erosão executado para dimensionamento para $h = 20$ cm.....	77
Figura 51 - Nomograma de fadiga executado para dimensionamento para $h = 21$ cm	78
Figura 52 - Nomograma de erosão executado para dimensionamento para $h = 21$ cm.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de material em kg/m ³ de concreto.....	10
Tabela 2 - Resistência a compressão dos corpos de prova (MPa).....	10
Tabela 3 - Dimensões barras de transferência.....	12
Tabela 4 - Fator de confiabilidade.....	29
Tabela 5 - Ocupação do veículo por tipo de cenário.....	35
Tabela 6 - Proporção de viagens x cenário de operação.....	36
Tabela 7 - Histórico de transporte do Terminal Antônio Bezerra 2013-2014.....	37
Tabela 8 - Relação volume por faixa em relação ao total.....	38
Tabela 9 - Fator de equivalência por faixa de peso.....	39
Tabela 10 - Fadiga - Eixo simples com acostamento.....	40
Tabela 11 - Fator de erosão eixo simples com barra de transferência e com acostamento de concreto.....	42
Tabela 12 - Coeficiente de recalque para solos granulares.....	44
Tabela 13 - Taxa de ocupação de passageiros x peso eixo traseiro.....	57
Tabela 14 - Taxa de crescimento linear do tráfego.....	58
Tabela 15 - Projeção de tráfego por peso de eixo.....	59
Tabela 16 - Equivalência de operações.....	59
Tabela 17 - Método PCA para H = 20 cm.....	61
Tabela 18 - Método PCA para H = 21 cm.....	62
Tabela 19 - Número de repetições admissíveis pelo método AASHTO.....	64
Tabela 20 - Fator de fadiga e de erosão para subbase concreto rolado (K=120MPa/m).....	66
Tabela 21 - Resultado de consumo com uso de concreto rolado.....	66
Tabela 22 - Custo do pavimento com uso de solo brita e concreto compactado a rolo.....	67
Tabela 23 - Quadro resumo.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CNI	Confederação Nacional da Indústria
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ETUFOR	Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza
MEPDG	Mechanist-Empirical Pavement Design Guide
SEINF	Secretaria de Infraestrutura do Município de Fortaleza
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará
PCA	Portland Cement Association
USDOT	United States Department of Transportation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problema.....	4
1.2	Questões de Pesquisa.....	4
1.3	Justificativa.....	5
1.4	Objetivo Geral	6
1.5	Objetivos Específicos	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Conceitos de Pavimentação.....	7
2.2	Características do Pavimento de Concreto de Cimento Portland.....	8
2.2.1	Concreto Convencional.....	9
2.2.2	Concreto de Alto Desempenho	9
2.2.3	Concreto Compactado a Rolo	10
2.2.4	Classificação de Pavimentos de Concreto	11
2.3	Juntas.....	14
2.4	Armaduras no Pavimento de Concreto.....	17
2.4.1	Barras de Transferência e de Ligação	17
2.5	Patologias em Pavimentos de Concreto	19
2.6	Fundação do Pavimento	21
2.7	Métodos de Dimensionamento de Pavimentos de Concreto	22
2.7.1	Método da Portland Cement Association (PCA)	23
2.7.2	Método da AASHTO	28
2.7.3	Método Mechanist-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG).....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Considerações Iniciais.....	33
3.2	Investigação de Campo	33
3.3	Projeto do Estudo de Caso.....	34
3.3.1	Cargas	34
3.3.2	Tráfego.....	36
3.3.3	Determinação da Espessura da Placa.....	40
3.4	Caracterização dos materiais	44
3.4.1	Fundação	44

3.4.2	Concreto	44
4	Caracterização do Estudo de Caso	48
4.1	Terminal Antônio Bezerra.....	48
4.2	Obra Quarto Anel Viário.....	52
5	RESULTADOS.....	57
5.1	Carga	57
5.2	Tráfego	58
5.2.1	Tráfego Distribuído por Carga (Método PCA).....	58
5.2.2	Tráfego Equivalente em Eixo Padrão (Método AASHTO).....	59
5.3	Método PCA.....	60
5.4	Método AASTHO	63
5.5	Definição da Estrutura da Placa	65
5.6	Análise com Subbase de Concreto Rolado.....	66
5.7	Análise de Custos	67
5.8	Análise e Discussões	67
6	Conclusões e Sugestões	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICE.....	76

1 INTRODUÇÃO

Marcado como um país que possui uma característica de transporte focado em rodovias, o Brasil é dependente de um bom nível de infraestrutura da malha viária para que outros setores da economia possam desempenhar os seus papéis no sistema. O uso de pavimento flexível tradicional pode, em algumas situações, gerar dificuldades em termos da gestão da qualidade devido à necessidade de constantes manutenções, criando um cenário favorável à adoção de alternativas, que podem envolver o uso de modificadores para o asfalto ou outras técnicas como os pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland (DIAS, 2003). Esses pavimentos são constituídos de uma camada de concreto, que desempenha tanto a função de revestimento como de base, e de uma camada de subbase, que possui o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do subleito e servir de plataforma para a execução da placa de concreto. Devido à alta rigidez da placa de concreto, o carregamento promovido pelos eixos dos veículos é distribuído em uma grande área no solo. No pavimento rígido, a placa apresenta a maior parte da capacidade estrutural; enquanto no pavimento flexível a importância estrutural é distribuída pelo revestimento, base e subbase (HUANG, 2004).

Adotando uma cultura de evolução nos métodos de construção, os projetos de infraestrutura no Estado do Ceará têm procurado satisfazer indicadores técnicos e econômicos, sugerindo tecnologias mais duráveis e de menor custo final. A solução do uso de pavimentos de concreto de cimento Portland no Estado tornou-se uma possibilidade com os projetos de mobilidade urbana envolvendo o fluxo de veículos pesados, dentre eles os ônibus urbanos.

Desde a criação de um sistema de transporte urbano baseado em terminais regionais na cidade de Fortaleza, uma oportunidade para essa alternativa de solução de pavimentação foi originada. A princípio, os terminais foram executados com pavimentos de blocos intertravados, entretanto os resultados apresentaram desgastes na camada superficial e exigiram constantes manutenções, levando a conflitos com o tráfego local devido às intervenções durante as constantes restaurações do pavimento. Logo, não satisfazendo o perfil de pavimento duradouro e de baixa manutenção, um novo modelo de pavimento passou a ser executado nessas áreas de intenso uso, especificamente placas de concreto com dimensões de 3,5 m por 6 m e espessura de 20 cm. O modelo do Terminal Antônio Bezerra é o pioneiro dentre os sete terminais de Fortaleza e o seu resultado poderá ser decisivo para uma futura propagação dessa tecnologia construtiva para os demais terminais (Figura 1).

Figura 1 - Planta de terminais em Fortaleza



Fonte: ETUFOR (2012)

Apresentando um modelo diferenciado de pavimentação, o projeto do Terminal Antônio Bezerra introduz um modelo de placas de concreto armado. Os terminais pertencentes ao padrão antigo apresentam a estrutura de pavimento com paralelepípedos. A Figura 2 ilustra as características de cada modelo.

Figura 2 - Pavimento Terminal Antônio Bezerra



(a) Pavimento com blocos intertravados (Fonte: Seinfra, 2014)



(b) Pavimento com placas de Concreto (Fonte: Autor, 2014)

A solução adotada é comumente utilizada em aeroportos, pátios portuários e terminais industriais. A opção se enquadra em ambientes com intenso fluxo de veículos pesados. Vias de terminais de ônibus possuem características peculiares em relação ao comportamento dos veículos dentro destas áreas. A alta frequência de frenagem e partida de ônibus exige uma melhor estrutura e segurança da superfície, pois nos pavimentos asfálticos é comum a ocorrência de deformações permanentes conhecidas como trilhas de roda, demonstrado na Figura 3 (BALBO, 2009).

Figura 3 - Deformação permanente (trilha de roda)



Fonte: GEWEHR (2013)

No presente trabalho, será realizada a análise do dimensionamento da estrutura e dos critérios de tomada de decisão implantados durante o projeto investigado. Fatores como o estudo do tráfego, a caracterização da carga e diferentes métodos de dimensionamento serão considerados. Além da investigação do estudo de caso, uma segunda obra que utiliza

pavimento de concreto de Cimento Portland foi visitada para complemento do estudo. A obra do Quarto Anel viário de Fortaleza é apresentada devido a sua importância em relação às obras de pavimentos no estado. Com base nisso, o foco do presente trabalho de monografia é comparar o projeto executivo do Terminal Antônio Bezerra, localizado em Fortaleza, Ceará, com métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos disponíveis na literatura.

1.1 Problema

A solução do Pavimento de Concreto de Cimento Portland não costuma ser apresentada nas obras de infraestrutura do Estado do Ceará, comparativamente a outras regiões do país e do mundo. A referida solução é particularmente compatível com obras como os terminais rodoviários, pelas características de tráfego pesado com intensa aceleração e desaceleração. Este Projeto de Graduação considera o problema da pouca divulgação e do uso inadequado de métodos de projeto para esta tecnologia de pavimentação como um ponto de partida para o presente estudo.

O uso indevido da tecnologia proporciona uma falsa imagem da solução abordada e traz resultados distintos dos esperados pelo poder público. Diante do cenário citado, pretende-se apresentar as metodologias capazes de projetar um pavimento que proporcione resistência às cargas oriundas do fluxo de veículos, conforto aos usuários do sistema de transporte público e segurança para a operação dos terminais. Fatores como a investigação do tráfego, referenciando a intensidade de carga, tipo de eixo e frequência, são essenciais para o projeto das placas de concreto. A relação entre as cargas solicitantes pelo fluxo projetado e as cargas admissíveis pelo pavimento dimensionado deve apresentar concordância de valores, pois esta relação influencia na vida útil do pavimento.

Dessa forma, examinar métodos e propor um dimensionamento que se adeque às realidades dos Terminais Rodoviários em Fortaleza motivam o projeto a tomar forma em um contexto prático direcionado a um projeto real.

1.2 Questões de Pesquisa

- ✓ O dimensionamento adotado pelo projeto executivo do Terminal em estudo segue alguma norma específica, nacional ou internacional?

- ✓ Qual método de dimensionamento apresentará uma solução com o menor custo?
- ✓ Qual a influência dos diferentes materiais de subbase (solo-cimento, concreto rolado, material granular) no projeto em termos econômicos e na execução?
- ✓ O modelo de concreto adotado no projeto executivo atende aos requisitos de resistência para as cargas solicitadas no período de projeto?

1.3 Justificativa

Atualmente a expansão econômica do país requer investimentos na área de infraestrutura para os centros urbanos. Tais investimentos são justificados devido às grandes metrópoles brasileiras estarem com padrões de mobilidade urbana abaixo da qualidade desejada pela população. Um estudo encomendado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) expõe que 28% dos brasileiros consideram a qualidade do transporte público péssimo ou ruim e uma parcela de 24% dos entrevistados passa mais de 1 hora em seus deslocamentos diários, como pode ser analisado na Figura 4. Mais um fator influente é a abrangência do serviço público, no qual 44% dos entrevistados não fazem uso do transporte público devido à indisponibilidade para o usuário realizar seu deslocamento (CNI, 2011).

Figura 4 - Tempo gasto nos deslocamentos nas cidades brasileiras



Fonte: CNI (2011)

O transporte por ônibus é considerado o principal modo de transporte público em Fortaleza, logo representa uma ampla parcela dos indicadores de qualidade do serviço de transporte. A má condição da infraestrutura dos terminais influi nos custos operacionais do

sistema através do aumento do desgaste de peças e pneus, diminuindo a vida útil dos carros e aumentando o tempo de viagem no perímetro dos terminais. Assim, um novo projeto necessita apresentar resultados que reduzam os custos no curto e no longo prazo.

Propondo atingir uma melhora no sistema, um plano previamente estabelecido auxilia no sucesso do projeto. Um planejamento bem elaborado contempla as variáveis de projeto, incluindo levantamento de tráfego na via e caracterização dos materiais adotados. A correta execução das técnicas construtivas promove um desempenho duradouro do pavimento. Ações suplementares, como políticas de eficiência na operação e conservação auxiliam na redução da manutenção do equipamento.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a aplicação da tecnologia de pavimento de concreto de Cimento Portland através do estudo do projeto e dimensionamento utilizado no Terminal de Ônibus Antônio Bezerra. O pavimento de concreto será avaliado a fim de encontrar uma opção ideal a partir de fatores levados em conta no processo de tomada de decisão como custo, segurança, método de execução e resistências físicas em longo prazo.

1.5 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar a concordância do projeto em execução com estudos técnicos adotados pela *Portland Cement Association (PCA)* e pela *American Association of State Highway e Transportation Officials(AAHTO)*;
- ✓ Dimensionar e comparar os resultados do dimensionamento pelos métodos da *Portland Cement Association* e da *American Association of State Highway and Transportation Officials*;
- ✓ Comparar a influência no custo entre os modelos utilizados, apresentando gastos com as placas de concreto e subbases;
- ✓ Verificar a influência de dimensões de placa entre os diferentes tipos de pavimentos de concreto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

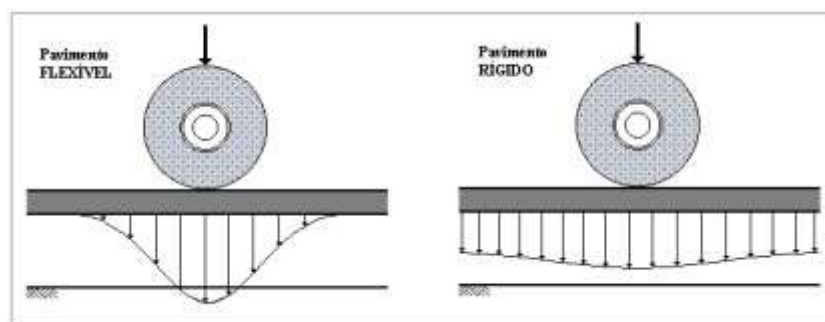
2.1 Conceitos de Pavimentação

O pavimento de concreto exerce a função de resistir as cargas atuantes na placa de concreto durante o período de projeto do pavimento. A estrutura requer o controle de qualidade a fim de identificar possíveis riscos de ruína da placa. As deformações em cada camada do pavimento devem ser verificadas a fim de controlar os riscos de ruptura do pavimento (BALBO, 2003).

Os pavimentos são comumente classificados em dois grupos: pavimentos rígidos, que apresentam uma camada de revestimento em concreto de Cimento Portland, e pavimentos flexíveis, com materiais betuminosos na sua camada de revestimento. Em meio as definições clássicas, um aspecto que diferencia os dois tipos de pavimentos é a variação do comportamento da sua estrutura quanto à deformação. O pavimento flexível apresenta uma maior e mais expressiva deformação elástica (CRONEY & CRONEY, 1997).

A diferença de comportamento pode ser avaliada através da reação das estruturas em relação aos esforços atuantes no pavimento. Em placas de concreto, o material apresenta uma rigidez superior ao revestimento betuminoso, resultando em uma propagação mais abrangente das tensões causadas pelas cargas aplicadas no domínio da placa. O efeito induz uma distribuição mais uniforme das pressões verticais entre a placa e o solo. Em contraposição, o revestimento asfáltico apresenta características de transmissão de cargas concentradas, resultando em pressões verticais de maior intensidade nas regiões carregadas. A diferença de transmissão de esforços verticais para as camadas inferiores pelo pavimento de concreto resulta em uma mitigação das cargas nas subcamadas. A Figura 5 apresenta a distribuição das tensões no solo nos dois tipos de pavimento.

Figura 5 - Distribuição das tensões no solo para pavimentos flexível e rígido



Fonte: Balbo (2005)

2.2 Características do Pavimento de Concreto de Cimento Portland

O pavimento rígido é composto por uma camada de rolamento elaborada com concreto de Cimento Portland. A camada superficial pode apresentar diferentes modelos como peças pré-moldadas ou peças com produção *in loco*, como indica a Figura 6.

Figura 6 - Aplicação de peças pré-moldadas de concreto.



(a) Aplicação de concreto pré-moldado (Fonte: Arquivo U.S.D.T., 2009)



(b) Aplicação de concreto *in loco* no Terminal Antônio Bezerra (Fonte: AUTOR, 2014)

As placas são assentadas sobre uma camada de apoio constituindo a base que possui a função de receber as cargas absorvidas pela placa de concreto e repassar para o subleito. Diferentes tipos de concreto são empregados na produção das placas, como o concreto convencional, o concreto de alta resistência e o concreto compactado com rolo, descritos a seguir.

2.2.1 Concreto Convencional

O concreto convencional é utilizado com maior frequência nas obras da construção civil, não apresentando uma característica especial, devendo ser lançado em fôrmas por métodos convencionais, que envolvem ferramentas comuns em canteiros como gericas, guias, entre outras. Por ser amplamente utilizado nas obras de construção civil, esse tipo de concreto apresenta vantagens em relação aos demais devido à forte presença no mercado, proporcionando fácil acesso e custo competitivo nos insumos. Ele pode ser produzido para lançamento direto ou através de bombeamento.

O concreto convencional consiste da mistura de cimento, agregado e água cuja resistência à compressão varia entre 10 e 40 MPa. As misturas mais utilizadas apresentam uma relação água/cimento (a/c) em torno de 0,55, levam Cimento Portland CII e os agregados utilizados podem ter granulometria contínua ou descontínua, variando com o uso.

2.2.2 Concreto de Alto Desempenho

O Concreto de Alto desempenho (CAD) apresenta resistência à compressão superior a 40 MPa. Os meios de incremento da resistência são baseados em uma dosagem com aumento da quantidade de cimento e a busca em atingir uma baixa relação água/cimento no traço do concreto. Além de apresentar uma alta resistência, o CAD possui características como baixa permeabilidade, menor consumo de agregados, entre outras (SILVA, 2010). Essa tecnologia é empregada em obras variadas de infraestrutura que exigem um comportamento acelerado do concreto. A rapidez em atingir essa alta resistência proporciona a opção em executar obras em menores prazos e liberar trechos recuperados em um menor espaço de tempo (SANCHES *et al.*, 2001).

Em geral, o CAD apresenta a relação água/cimento (a/c), entre 0,25 e 0,40, o que torna necessário o uso de aditivos superplastificantes, de forma a proporcionar uma trabalhabilidade satisfatória. O acréscimo dos aditivos proporciona características que vão além da elevada resistência, como agregar a durabilidade, esbeltez e também uma redução no custo da obra (MEHTA, 1994).

Em concretos de alto desempenho, a resistência à tração na flexão apresenta resultados entre 7,5 a 10 MPa após os 28 dias. Há exemplos de traço com a capacidade de atingir resistências superiores a 40 MPa em apenas três dias. Nas Tabelas 1 e 2 a seguir,

apresentam-se diferentes modelos de traços realizados em um programa experimental por ANDRADE *et al.* (2004), no qual foram utilizados micro sílica e metacaulim, além de aditivos superplastificantes.

Tabela 1- Consumo de material em kg/m³ de concreto.

Traço	1	2	3	4
Cimento (kg)	527,00	484,84	484,84	484,84
Microsílica em pó (kg)	0,0	29,92	0,0	0,0
Microsílica líquida (kg)	0,0	0,0	37,4	0,0
Metacaulim (kg)	0,0	0,0	0,0	35,56
Areia (kg)	581,2	581,2	581,2	581,2
Brita (kg)	1034	1034	1034	1034
Água (L)	175	175	156	175
Aditivo polifuncional (kg)	3,68	3,60	3,52	3,64
Aditivo SP (kg)	5,27	5,14	5,03	5,20

Fonte: Andrade *et al.* (2004)

Tabela 2 - Resistência à compressão dos corpos de prova (MPa)

Traço	Materiais	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Traço 1	Cimento/Areia/Brita/Super Plastificante/Aditivo polifuncional	48,0	56,7	57,4	62,3
Traço 2	Cimento/Areia/Brita/Super Plastificante/Aditivo polifuncional / Microsílica em pó	45,1	56,0	59,7	68,9
Traço 3	Cimento/Areia/Brita/Super Plastificante/Aditivo polifuncional / Microsílica líquida	44,0	56,1	59,0	67,0
Traço 4	Cimento/Areia/Brita/Super Plastificante/Aditivo polifuncional / Metacaulim	41,0	50,0	55,0	64,0

Fonte: Andrade *et al.* (2004)

2.2.3 Concreto Compactado a Rolo

O Concreto Compactado a Rolo (CCR) é um concreto de baixa umidade inicial, que apresenta a trabalhabilidade de compactação com rolos compressores. Pode ser adotado em estruturas de barragens e na área de pavimentação. É utilizado como base ou subbase para as placas de concreto (AOKI, 2009).

O traço do CCR apresenta um baixo consumo de cimento, normalmente variando entre 80 a 120 kg/m³, tornando-o uma opção a preço acessível em comparação a outros tipos

de base. Esta quantidade de cimento reduz sensivelmente os problemas com retração térmica, tendo assim resistência entre 10 MPa e 20 MPa. A quantidade de água é um fator decisivo que sua dosagem influi na execução do serviço, ilustrado na Figura 7. A umidade utilizada situa-se no intervalo de 5 a 10%. Em um traço com alta umidade, o rolo pode ter problemas na compactação com matérias aderindo à máquina (AOKI, 2009).

Figura 7 - Execução do CCR



Fonte: Arquivo Galvão Engenharia (2013)

A execução diverge em alguns pontos em relação ao método tradicional. O transporte do material é feito por meio de caminhões basculantes de 10m³ a 12m³. O espalhamento e o nivelamento do material despejado são executados por equipamentos dotados de lâmina frontal como motoniveladoras ou *bulldozers*. A dimensão e a capacidade do equipamento de espalhamento são compatibilizadas com a produção das frentes de serviço e potência do rolo. A compactação do material é executada com rolo vibratório liso com peso estático entre 6 e 15 tf, influenciando diretamente na quantidade de passadas para atender a densidade desejada (KREMPEL & ANDRIOLO, 2008).

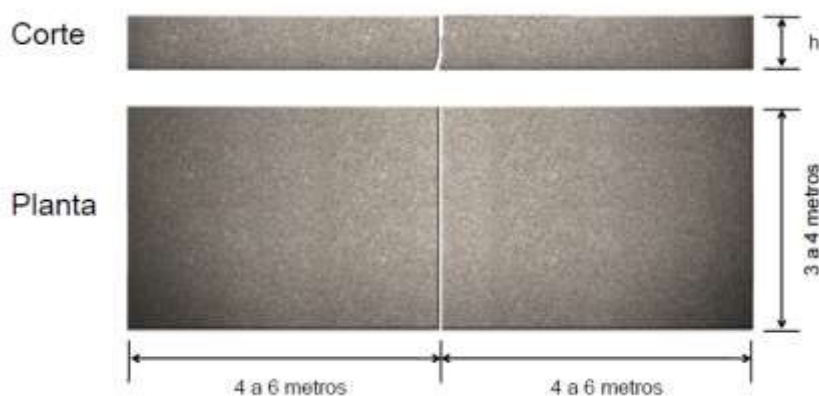
2.2.4 Classificação de Pavimentos de Concreto

Além de apresentar diferentes tipos de concreto, o pavimento pode apresentar modelos de placas distintos. De acordo com a PCA (1984), os pavimentos de concreto podem ser classificados a partir da existência ou não de barras de transferência em casos de modelos sem armaduras. Em pavimentos armados, as placas podem apresentar armaduras estruturais, cordoalhas e armaduras não estruturais. Os tipos de placas são caracterizados a seguir.

2.2.4.1 Placas de concreto simples

O modelo não apresenta as barras de transferência entre as placas, que possuem dimensões entre 4 e 6 metros de comprimento, conforme demonstrado na Figura 8. No encontro das placas, a transferência de esforços é feita pelo entrosamento dos agregados de cada placa.

Figura 8 - Placa de concreto simples



Fonte: ABCP (2007)

2.2.4.2 Placas de concreto simples com barra de transferência

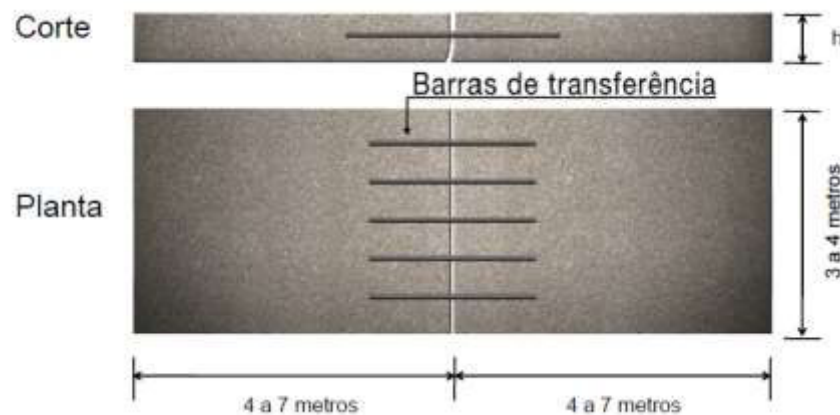
A inserção da barra de transferência difere este modelo do anterior. As barras são localizadas nas juntas transversais conforme demonstra a Figura 9, e têm a função de transferir as cargas entre as placas, aumentando assim a capacidade do pavimento de resistir às tensões e às deformações. O uso de barras de transferência permite um maior comprimento das placas, atingindo até 7 metros. O dimensionamento das barras está relacionado à espessura da placa, como indicado na Tabela 3. As barras são discutidas mais adiante em seção específica.

Tabela 3 - Dimensões barras de transferência

Espessura da Placa (cm)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
até 17	20	460	300
17,5 a 22,0	25	460	300
22,5 a 30,0	32	460	300
>30,0	40	460	300

Fonte: Balbo (2009)

Figura 9 - Placa de concreto simples com barra de transferência

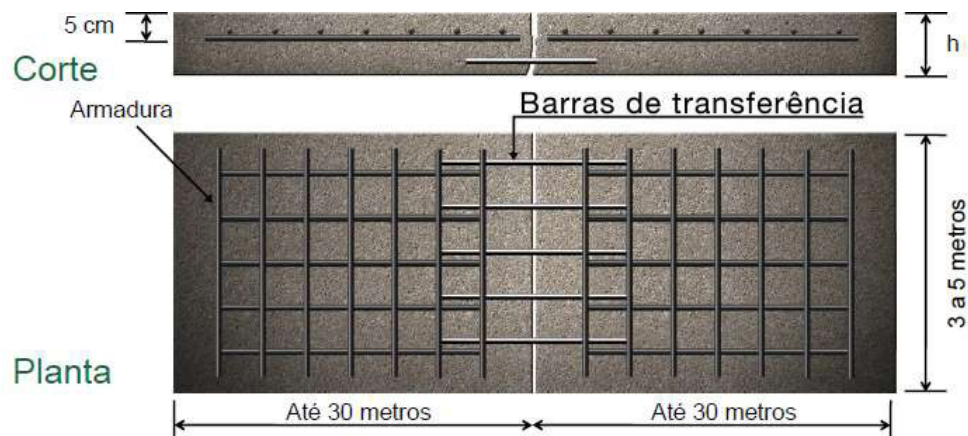


Fonte: ABCP (2007)

2.2.4.3 Placas com armadura distribuída descontínua

O modelo de placas armadas apresenta, além da inserção das barras de transferência, uma armadura distribuída até as juntas transversais da placa. A armadura distribuída não contribui na função estrutural da placa e tem a função de minimizar fissuras. A malha pode ser composta de barras amarradas no local da obra, entretanto é mais comum a aplicação de telas soldadas composta por barras de aço CA-60 soldadas industrialmente, cujo diâmetro varia entre 4,2 e 10 mm. As placas podem apresentar comprimentos de até 30 metros conforme indicado na Figura 10 (BALBO, 2009).

Figura 10 - Placa e concreto com armadura distribuída descontínua

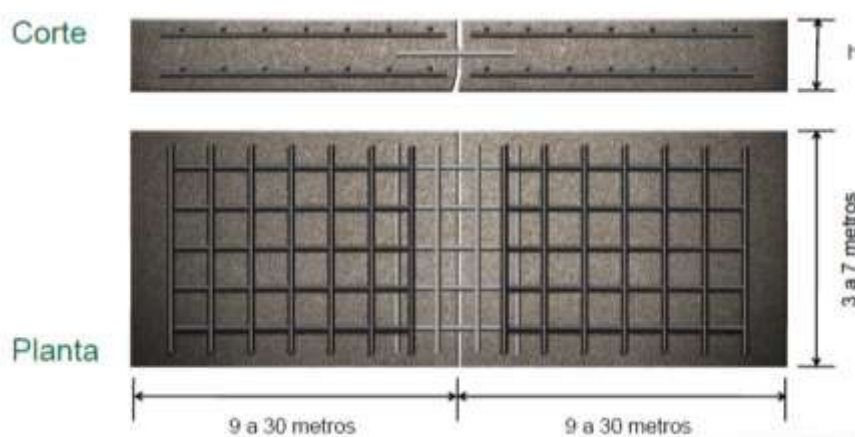


Fonte: ABCP (2007)

2.2.4.4 Placas de concreto estruturalmente armado

Neste caso, a placa apresenta duas linhas de armadura: uma é posicionada na parte superior da placa e a outra na parte inferior. A linha inferior possui a função de combater as tensões de tração provocadas pelo carregamento, enquanto a superior possui a função de inibir fissuras. A armadura segue o padrão do modelo anterior, em que se adotam telas soldadas cujo diâmetro das barras varia entre 4,2 a 10 mm. O comprimento das placas varia de 9 a 30 metros e a largura, de 3 a 7 metros. O modelo é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Placa de concreto estruturalmente armado



Fonte: ABCP (2007)

A inserção da armadura influencia diretamente na espessura da placa, em casos de armaduras estruturais, e também no espaçamento das juntas. Os métodos variam na utilização de armaduras convencionais e cordoalhas protendidas a fim de aperfeiçoar o dimensionamento das placas e buscar um resultado mais eficiente. A concepção dos projetos é desenvolvida relacionando o modelo de pavimento adotado a partir da necessidade de desempenho da placa.

2.3 Juntas

As juntas podem ser definidas como “detalhe construtivo, que deve permitir as movimentações de retração e dilatação do concreto e a adequada transferência de carga entre placas contíguas, mantendo a planicidade, assegurando a qualidade do piso e conforto do rolamento” (CALDA, 2007). Representando os pontos mais frágeis do sistema de pavimento

de concreto, as regiões periféricas das placas concentram as manifestações patológicas de natureza estrutural.

Objetivando-se a mitigação de rachaduras e trincas da estrutura rígida do pavimento, as juntas são projetadas para absorver movimentação estrutural da placa (CALDA, 2007). Existe uma grande variedade de juntas que podem ser aplicadas no pavimento de concreto, entretanto, o Manual do DNIT (2005) indica: junta transversal, junta longitudinal, junta de expansão e junta de construção.

As juntas transversais devem ser serradas em uma profundidade entre $1/4$ e $1/3$ da espessura total da placa de concreto com o auxílio de uma serra de disco de diamantes. As serragens das juntas, demonstradas na Figura 12, impõem um controle de retração da massa de concreto fresco durante o processo de cura. Outro método utilizado é a introdução de um perfil metálico na fase fresca do concreto. A abertura ou espessura da junta deve obedecer à ordem das dimensões do agregado utilizado na mistura concreto, tendo um mínimo de 3 mm e um máximo de 10 mm. Usualmente, os projetos indicam a abertura de 6 mm (CALDA, 2007).

Figura 12 - Execução da serragem das juntas



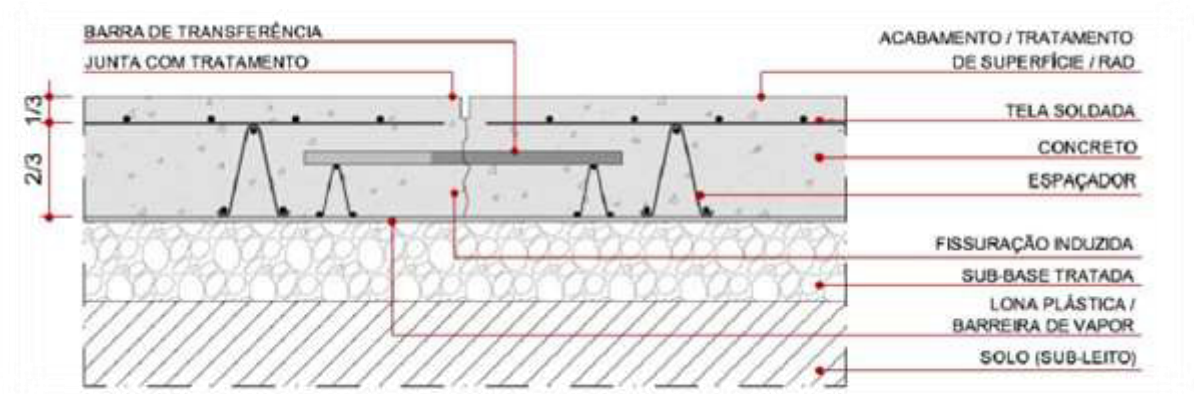
Fonte: Revista Techne (2012)

Em casos de serragem de juntas, um plano de corte deve ser realizado a fim de apresentar um controle sobre a execução do serviço. O procedimento de serragem é apresentado na norma DNIT 047/2004 – ES. A norma indica que a abertura das juntas deve ser realizada no prazo de 6 a 48 horas após o término da concretagem. O alinhamento dos cortes deve ser apurado por pontos topográficos estabelecidos nas duas extremidades da pista.

A junta serrada promove uma fissuração com geometria definida em período de

projeto, garantindo o funcionamento estrutural da placa e a manutenção do nível estético do pavimento (JUNIOR, 2007). Os cortes estabelecem a zona de fissuração da placa devido à retração hidráulica da massa fresca, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Vista corte da junta de placas



Fonte: ABCP (2007)

As estruturas de concreto estão sujeitas a deformações causadas pela variação de temperaturas no ambiente, carregamentos estáticos e retração plástica do concreto. As deformações podem apresentar a expansão ou a retração da placa resultando em um risco de ocorrer trincas nas peças devido às características do material. As juntas são atribuídas a fim de controlar o aparecimento de rachaduras, trincas e danos à placa. A seguir, a Figura 14 apresenta o trabalho das juntas nos modelos com e sem barra de transferência.

Figura 14 - Junta com barra de transferência x junta sem barra de transferência



Fonte: ABCP (2007)

As juntas de expansão (ou dilatação) são utilizadas para isolamento no encontro de diferentes estruturas. Esse tipo de junta é comumente encontrado em obras de arte como viadutos e pontes e sua função é proporcionar o livre trabalho entres as placas na direção

confrontante da estrutura, pois, em caso de contato, os materiais podem ser prejudicados. Em casos de placas com dimensões acima de 18 metros ou de condições climáticas que apresentam temperatura abaixo de 4°C, a American Concrete Pavement Association indica a aplicação da solução para o melhor desempenho do pavimento. O corte da junta de expansão é preenchido por um material selante no topo protegendo o pavimento de possíveis infiltrações. A Figura 15 expõe o posicionamento do corpo de apoio (Tarucel) na junta e que serve de regulador de profundidade na aplicação de materiais selantes no topo do corte.

Figura 15 - Detalhe de uma junta de expansão



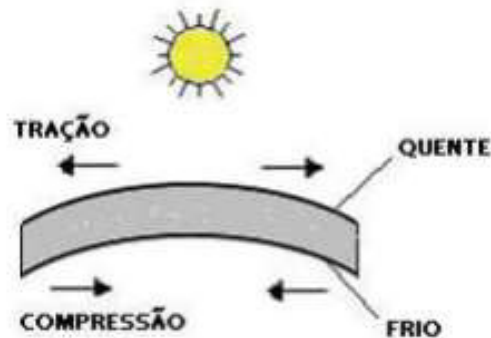
Fonte: VBRASIL (2014)

2.4 Armaduras no Pavimento de Concreto

2.4.1 Barras de Transferência e de Ligação

As barras de transferência denominam as peças que nas regiões de bordo das placas, transferem as cargas dos veículos entre as diferentes placas. A existência das barras proporciona uma ancoragem entre as placas favorecendo uma resistência solidária em relação ao efeito de empenamento das placas de concreto, que acontece a partir de variações volumétricas do concreto e de esforços assimétricos. As variações volumétricas podem ocorrer devido à diferença de temperatura e de umidade. Durante o dia, o calor do sol aquece a parte superior da placa causando, assim, uma expansão em relação à face inferior, logo ocorre um empenamento para baixo nos bordos, conforme indica a Figura 16 (CALDA, 2007).

Figura 16 - Empenamento diurno



Fonte: Calda (2007)

No período noturno ocorre o inverso. A ausência do sol promove uma perda de calor instantânea na superfície da placa, enquanto a parte inferior apresenta uma mudança de temperatura mais lenta. Logo, o topo é contraído por apresentar uma temperatura mais baixa que a parte inferior conforme demonstra a Figura 17 (CALDA, 2007).

Figura 17 - Empenamento noturno



Fonte: Calda (2007)

A aproximação da carga no bordo da placa gera um esforço de cisalhamento na seção transversal da junta. A privação do uso das barras de transferência induz que os esforços de cisalhamento sejam resistidos pelo entrosamento dos agregados da placa. No decorrer do uso, a capacidade de resistência diminui, causando um desnivelamento entre as placas. Fator este que ocasiona o surgimento de trincas e quebras nas regiões de extremidades da placa (BALBO, 2009).

As barras de transferência são posicionadas na linha neutra das placas e alinhadas em paralelo com a superfície da camada conforme demonstra a Figura 18. O aço empregado

nas barras é do tipo CA-25 com superfície lisa, permitindo futuras movimentações entre o concreto e a barra no exercício da função de transmitir a carga entre as placas. Além da característica de superfície lisa, a barra é revestida com graxa em sua metade para assim apresentar menor aderência com a placa (RODRIGUES, 2006).

Figura 18 - Posição das barras de transferência



Fonte: Autor (2014)

As barras de ligação são adotadas em juntas longitudinais no propósito de unir as placas localizadas lado a lado. O uso ocorre em vias de fluxo canalizado como em projetos rodoviários em que os veículos se movimentam em uma única direção. As barras são constituídas de aço nervurado com a finalidade de unir e enrijecer as placas dispostas na direção perpendicular ao fluxo. Ao contrário das barras de transferência, as barras de ligação não necessitam ser pintadas ou engraxadas, pois é de função própria ter aderência com as duas placas para exercer sua função (BALBO, 2009).

2.5 Patologias em Pavimentos de Concreto

Os pavimentos de concreto apresentam baixa taxa de manutenção em relação ao pavimento flexível. Apesar de ter um desempenho superior, qualquer pavimento está sujeito à deterioração ou degradação durante seu período de uso. As falhas no revestimento do pavimento podem ser evidenciadas através de fissuras, trincas e rachaduras na placa.

As principais causas de fissuras e falhas nos pavimentos de concreto podem ser divididas em quatro temas (WEISS & OZYLDIRIM, 2007):

- ✓ Carga: equívoco de engenharia quanto à investigação das cargas previstas no projeto;
- ✓ Projeto: falhas em relação ao posicionamento das juntas e interferências que provoquem mudanças no dimensionamento das placas;
- ✓ Execução: equívocos quanto à serragem das juntas, posicionamento das barras de transferência e cura do concreto;
- ✓ Ambiental: drenagem inadequada, expansão térmica do concreto e empenamento térmico da placa de concreto.

O modo de execução das placas de concreto é a causa mais comum referente às falhas da estrutura do pavimento rígido. A sequência executiva deve ser planejada com o foco em mitigar possíveis danos futuros na estrutura (BALBO, 2009). Fatores como:

- ✓ Execução de juntas, atingindo a profundidade solicitada e no período correto, retarda o surgimento de fissuras na placa;
- ✓ O acompanhamento da dosagem do concreto reflete no comportamento da estrutura durante a execução influenciando na velocidade de cura e atingimento da resistência desejada;
- ✓ O processo de cura das placas de concreto é usualmente realizado por cura química ou manta geotêxtil umedecida conforme indicado na Figura 19. A cura exige atenção do executor em relação à quantidade de produto químico utilizado e o momento a ser aplicado. Falhas no processo executivo acarretam no surgimento de fissuras variadas como demonstrado na Figura 20.

Figura 19 - Uso de mantas geotêxtil para processo de cura



Fonte: Autor (2014)

Figura 20 - Fissura por falta de controle na cura



Fonte: Balbo (2009)

Problemas de fissura causados por fatores ambientais são justificados por falhas originadas na fase de projeto ou no processo executivo. Retração plástica, retração por secagem, contração térmica, ação do congelamento, corrosão, ataque por sulfatos, reação álcalis-agregado, podem ser citados como exemplos de causas ambientais (WEISS & OZYLDIRIM, 2007).

2.6 Fundação do Pavimento

Em projetos de pavimentos rígidos, a análise da fundação deve ser detalhada devido à ocorrência frequente de variações bruscas nas características do subleito. Estudos geológicos e geotécnicos são desenvolvidos para identificar a existência de variâncias no solo dentre elas: camadas espessas de argila mole solos expansivos (DNIT, 2005).

Os principais métodos para modelagem de pavimentos de concreto consideram a caracterização do suporte da placa através do coeficiente de recalque (k). O modelo é originalmente proposto por Winkler em 1987 e atribui ao solo característica de molas elásticas não conectadas. Este modelo trabalha a fundação com apoios elásticos isolados, consequentemente não transmitem tensão de cisalhamento. O coeficiente relaciona o deslocamento em um determinado ponto com a pressão conforme indica a Equação 1. (BALBO, 2009)

$$k = \frac{P}{d} \quad (1)$$

Onde:

P = Tensão aplicada em MPa

d = Deslocamento vertical em metros

A determinação do coeficiente de recalque é realizada por meio do ensaio de prova de carga *in situ*. O procedimento é descrito pela norma do DNIT 055/2004 Me – *Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e subbase em projetos e avaliação de pavimentos – Método de ensaio*, indicado na Figura 21.

Figura 21- Prova de carga estática



Fonte: Melo (2013)

2.7 Métodos de Dimensionamento de Pavimentos de Concreto

São descritos a seguir os fundamentos teóricos e a metodologia de cálculo para o dimensionamento de pavimentos de concreto de Cimento Portland. Os métodos abordados são: da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984, da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) de 1993 e do *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) de 2004. O método MEPDG não é utilizado na análise do trabalho, entretanto o mesmo está sendo apresentado na revisão para complemento das informações sobre métodos existentes.

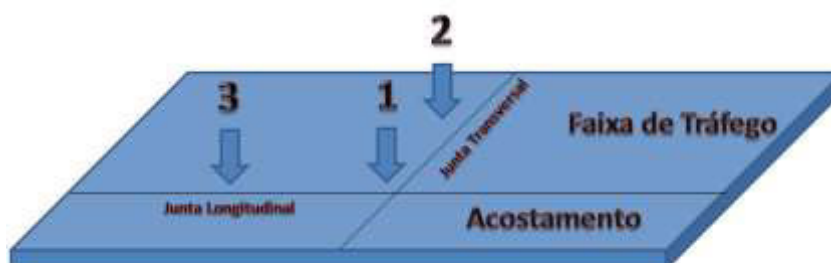
2.7.1 Método da Portland Cement Association (PCA)

O dimensionamento de pavimento de concreto foi abordado pela *PCA* por dois métodos, sendo o primeiro apresentado em 1966 e o segundo em 1984, englobando novos conceitos de dimensionamento adquiridos através da teoria, da análise de desempenho e de pesquisas. Segundo o DNER (1989), os novos conceitos se baseiam nos seguintes pontos:

- ✓ Estudos teóricos clássicos sobre o comportamento de placas de concreto e análises computacionais empregando elementos finitos;
- ✓ Ensaios de laboratório e modelos sobre comportamento e influência de juntas, subbases e acostamentos no desempenho de pavimentos de concreto;
- ✓ Pistas experimentais, especialmente da AASHO (hoje, AASHTO), além de estudos por diversos órgãos rodoviários e aeroportuários;
- ✓ Observação metódica de pavimentos em serviço.

A aplicação de uma análise de tensões e deformações envolve a união entre essas informações para a concepção de um modelo de dimensionamento mecanístico. São considerados no modelo: as características do concreto, as propriedades físicas da fundação, o posicionamento das cargas aplicadas na placa (1-canto, 2-junta transversal ou 3-junta longitudinal), conforme indicado na Figura 22, e o conhecimento do carregamento introduzido ao estudo, expondo os tipos de transmissões nas juntas e bordas das placas (RUFINO, 1997).

Figura 22 - Posicionamento de cargas aplicadas na placa



Fonte: Elaborado pelo Autor

As equações analíticas para obtenção das tensões e deformações da placa de concreto devido às cargas de roda foram desenvolvidas por Westergaard (1924). O estudo de

tensões foi dividido de acordo com a posição da carga: canto, junta longitudinal ou junta transversal. As principais equações que permitem o cálculo das tensões são ilustradas nas equações 2, 3 e 4.

$$\text{Carga no centro da placa:} \quad \sigma = \frac{0,316 \times Q}{h^2} \times \left[\log \left(\frac{l}{b} \right)^4 + 1,069 \right] \quad (2)$$

$$\text{Carga na borda da placa} \quad \sigma = \frac{0,803 \times Q}{h^2} \times \left[\log \left(\frac{l}{b} \right)^4 + 0,666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0,034 \right] \quad (3)$$

$$\text{Carga no canto da placa} \quad \sigma = \frac{3 \times Q}{h^2} \times \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right] \quad (4)$$

Onde:

b = Raio equivalente da seção resistente efetiva $b = (1,6 \times a + h^2)^{0,5} - 0,675 \times h$ (mm);

a = Raio da carga distribuída (mm);

h = Espessura da placa de concreto (mm);

Q = Carga total aplicada sobre área concentrada (N);

l = Raio de rigidez relativa, relação entre o raio de rigidez da placa e o módulo de reação do subleito k ($l = \sqrt[4]{\frac{E \times h^3}{12 \times (1 - \mu^2) \times k}}$).

2.7.1.1 Modelo de Ruína por Fadiga

Esse método baseia o dimensionamento em satisfazer dois critérios de ruptura: fadiga da placa de concreto e ruína da placa por erosão de sua fundação. O critério de fadiga da placa de concreto utiliza a curva de fadiga, que expressa o número admissível de aplicações a um determinado nível de tensão que em norma é expressa pela relação de tensões. Esta relação é a razão entre a tensão de tração à flexão solicitante gerada no concreto devido ao rolamento de uma carga e a resistência característica do concreto utilizada no pavimento (RUFINO, 1997).

$$S = \frac{\sigma_{\text{Max}}}{f_{\text{ct,f}}} \quad (5)$$

Onde:

S = Relação de tensões;

σ_{Max} = Tensão de tração à flexão (MPa);

$f_{ct,f}$ = Resistência característica do concreto (MPa).

Estimando a relação, um número de repetições de carga admissível deve ser considerado, fornecendo um valor limite que, se superado, o concreto romperá por fadiga, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Relação entre tensões e o número de aplicações pelo método PCA



Fonte: Rufino (1997)

O processo de ruptura por fadiga ocorre por um processo de microfissuras progressivas na estrutura do material, danificando a microestrutura da peça provocando fraturas na superfície. A degradação progressiva por fraturas resulta em rupturas superficiais. O fenômeno ocorre devido as repetidas tensões impostas à peça de concreto com níveis abaixo das tensões de resistência do material (BALBO, 2005).

A curva de fadiga adotada pelo método PCA (1966) admite que para uma relação de tensão abaixo de 0,5, o número de cargas admissíveis é ilimitado. A relação matemática obedece a Equação 6 a seguir:

$$N = \frac{(0,9718-S)}{0,08282}, \text{ para } 0,5 > S > 1,0 \quad (6)$$

Onde:

N = Número de repetições;

S = Relação de tensão para ruptura do material.

O modelo de Fadiga da PCA (1984) alterou alguns parâmetros no nível de tensões, reduzindo o número ilimitado de repetições para 0,45 e assim modificou as equações da curva para:

$$N = \frac{(0,9718-S)}{0,08282}, \text{ para } S > 0,55 \quad (7)$$

$$N = \left(\frac{4,2577}{S-0,4325} \right)^{3,268}, \text{ para } 0,55S < 0,45 \quad (8)$$

2.7.1.2 Modelo de Ruína por Erosão

No modelo de ruína adotado a partir de 1984, a erosão é a perda de material localizada na camada de suporte direto da placa de concreto e acostamento. Esse efeito se deve à ação combinada da água e da passagem de cargas com ênfase aos veículos de eixos múltiplos. Os efeitos causados pela erosão são apresentados em forma de deformações verticais nas regiões de canto e bordas das placas de concreto. Ambos os fatores são decorridos pelo bombeamento e a formação de vazios sob a placa ocasiona o escalonamento das juntas transversais ou trincas (RUFINO, 1997).

O critério de erosão correlaciona o desempenho do pavimento a uma determinada taxa de trabalho, aos valores calculados das deformações verticais de canto e à tensão transmitida da placa de concreto para a camada de subbase. O conceito de fator de erosão foi introduzido a fim de medir a relação que uma determinada carga possui em impor uma deflexão no canto. O fator de erosão é definido pelo produto da pressão vertical na interface (p), e a deflexão de canto (w), dividido pelo raio de rigidez relativa (lc) da bacia de deformação (CASTRO, 2003).

Uma expressão analítica para o cálculo do fator de erosão partiu de experimentos nas pistas da AASHO nas quais foram testadas placas de diferentes espessuras sobre diferentes suportes. O número indica que, quanto maior é o fator de erosão, menor será a capacidade do pavimento em absorver repetições de cargas (PACKARD & TAYABJI, 1985):

$$P = 268,7 \times \frac{p \times w}{h} \times k^{0,27} \quad (9)$$

Onde:

P = Fator de Erosão;

p = Pressão vertical exercida na fundação sobre o canto da placa;

w = Deflexão;

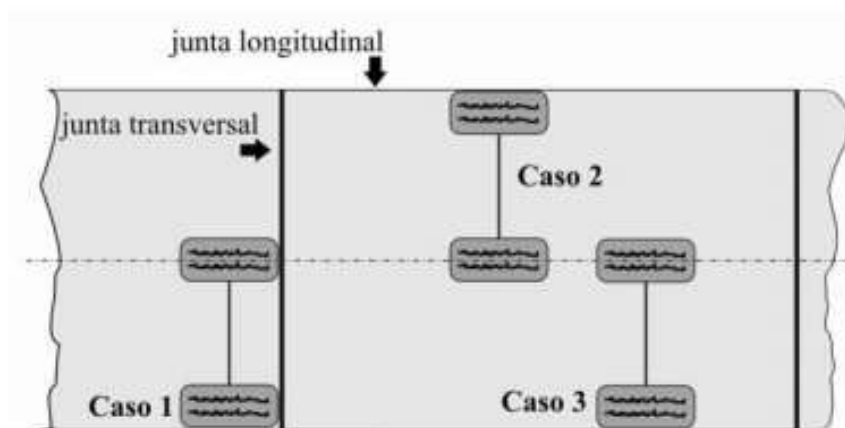
h = Espessura da placa;

k = Coeficiente de recalque.

2.7.1.3 Distribuição do Tráfego

A distribuição das cargas em relação a uma placa de concreto foi analisada para diferentes casos de uso do veículo sobre a placa. A análise apresenta três posições críticas em torno de uma placa de concreto com 3,6 metros de largura (PITTA, 1978). As posições correspondem aos casos demonstrados na Figura 24.

Figura 24 - Posição de cargas aplicadas



Fonte: Rodrigues (2008)

- ✓ Caso I: cargas tangentes à junta transversal, ocorrendo tensão de tração na flexão máxima na fibra inferior da placa e paralelamente à junta transversal;
- ✓ Caso II: eixos posicionados perpendiculares à borda longitudinal externa ocorrendo às tensões máximas de tração na flexão na parte inferior da placa e paralelamente à borda longitudinal;
- ✓ Caso III: assemelha-se ao caso II, entretanto, as rodas externas são posicionadas a 15 cm da borda longitudinal externa.

De acordo com a análise de tensões críticas auxiliada com os ábacos de PICKETT & RAY (1951), o Caso III e o Caso II apresentam tensões maiores em relação ao primeiro caso. Entretanto, correlacionando com a frequência de tráfego em cada faixa o Caso I se torna o mais crítico devido à frequência ser em torno de 99,9% das situações. Utilizando a base apresentada, o método de ruína a fadiga considera a junta transversal como a posição crítica de carga, indicando que a tensão máxima ocorre na região da junta transversal (MACLEOD & MONISMITH, 1982).

O dimensionamento da placa de concreto baseado na resistência à fadiga é calculado com base no levantamento de tráfego da via. Em casos no qual os dados de fluxo de veículos não estejam dispostos para o dimensionamento, o Processo de Carga Máxima pode ser adotado como uma solução simplificada (PITTA, 1990).

2.7.2 Método da AASHTO

O método apresentado foi desenvolvido a partir de testes realizados na pista experimental da AASHTO, localizada no estado de Illinois nos EUA. Os dados coletados durante os testes e técnicas de regressão aplicadas nos experimentos foram base para o modelo de dimensionamento originalmente empírico (RUFINO, 1997).

Em 1993, foi publicada a versão do método de dimensionamento adotada como modelo de referência neste trabalho. O Manual do DNER ressalta a importância de relembrar que o método originou-se em experimentos locais que possuem características específicas que não necessariamente são replicadas em localidades diferenciadas.

O método da AASHTO é baseado em um modelo de serventia para a operação de veículos, o qual apresenta um conceito de serventia a partir do padrão de desempenho do pavimento. Considera-se um nível de serventia inicial desejado ao final da execução da obra e um nível de serventia final referente ao padrão de desempenho no final do período de projeto (AASHTO, 1993).

Baseado em testes experimentais o modelo adota uma série de variáveis com a finalidade de prever os fatores que influenciam no desempenho do pavimento. Inicialmente, o método apresentava um propósito que visava obter a relação da espessura da placa, o número de aplicações de carga e a perda de serventia da camada rolante com o tempo. Entretanto, o modelo somente era aplicável perante condições semelhantes aos da pista de teste localizadas em Illinois, restringindo, assim, a confiabilidade no modelo. Modificações foram feitas no

modelo e a equação foi apresentada no Guia da AASHTO (1993). O modelo apresenta a previsão da quantidade de tráfego que a placa de concreto resiste até atingir o nível de serventia final desejado (AASHTO, 1993).

Tratando-se de um método que utiliza uma equação geral de desempenho com diversos coeficientes e variáveis, os valores adotados representam as características particulares do projeto. Os coeficientes de drenagem (C_d), transferência de carga (J) e de confiabilidade do tráfego são exemplos desta caracterização. O fator de confiabilidade é inserido na equação através do coeficiente de *student*. O desempenho do pavimento é apresentado na formulação através da diferença do desempenho inicial (p_i) e final (p_f) do pavimento, levando em consideração aspectos estruturais, funcionais e de segurança da pista (RUFINO, 1997).

A avaliação em relação à segurança indica o coeficiente de atrito. O caso de desempenho estrutural está relacionado à condição de superfície da placa, na qual se analisa a presença de trincas e bombeamento. O desempenho funcional relaciona a serventia do pavimento em concordância com o fluxo de veículos projetado para o período de projeto (AASHTO, 1993).

A introdução do conceito de probabilidade, através do fator de confiabilidade, considera as incertezas do cálculo e assim pode-se garantir um determinado nível de confiabilidade. De acordo com o guia da AASHTO, o fator varia de acordo com a função da estrada partindo de vias locais até rodovias interestaduais, conforme indica a Tabela 4.

Tabela 4 - Fator de confiabilidade

Classificação Funcional	Nível Recomendado de Confiança (%)	
	Urbanas	Rurais
Via expressa	85-99	80-99,9
Artérias Principais	80-90	75-95
Coletoras	80-95	75-95
Locais	50-80	50-80

Fonte: AASHTO (1993)

O fator de drenagem é abordado nesse método devido à água influenciar o desempenho do pavimento no momento em que a fundação é atingida. Ao se infiltrar através de trincas e juntas, a água traz danos como a redução da resistência do solo e o bombeamento de finos. A qualidade da drenagem é fator determinante na previsão do desempenho do pavimento, assim, introduz-se o coeficiente de drenagem no qual pondera o fator.

O método da AASHTO (1993) relaciona o tráfego direcionando a passagem de veículos com diferentes cargas por eixo para a carga de eixo simples de roda duplas de 8,2 tf. O método simplifica a análise das cargas e restringe em sua formulação ao número N de veículos. Em desenvolvimento de projetos se faz necessário além de coletar informações referentes às cargas por eixo solicitante na via, o cálculo da equivalência dessas diferentes cargas através dos fatores de equivalência.

A análise para o cálculo do número N envolve a definição do perfil de tráfego e uso dos fatores de equivalência. Esse perfil é definido através da caracterização dos eixos por peso e padrão (simples tandem duplo ou triplo). Fatores de Equivalência de Cargas (FEC) são indicados de acordo com a categoria do eixo indicada. O somatório dos valores de FEC e razão dos eixos por faixa em relação ao total (p_i) fornece o Fator de Veículo (FV) (BALBO, 2013):

$$FV = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times FEC_{i,p})}{100} \quad (10)$$

O número de solicitações equivalente utiliza fatores que envolvem uso da via como o fator de sentido (F_s), fator de frota (F_f) e fator de distribuição de frota (F_d) que serão detalhados na seção de métodos (BALBO, 2013). A expressão geral para o cálculo do número de repetições equivalentes para o crescimento linear é representada pela seguinte equação:

$$N = 365 \times VMD \frac{[(1 + P \times t)^2 - 1]}{2 \times t} \times FV \times F_f \times F_s \times F_d \quad (11)$$

Onde:

VMD = Volume médio diário;

P = Período de projeto;

t = Taxa de crescimento linear.

2.7.3 Método Mechanist-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)

Os avanços nas tecnologias de modelagem e habilidades computacionais evoluíram as metodologias de dimensionamento de pavimento para níveis mais precisos. A melhor caracterização dos materiais devido à definição de fatores como: característica de

tráfego, deformações e desempenho de seções, direcionaram o desenvolvimento de um método de dimensionamento mecanicista (KALLOUSH & RODEZNO, 2011).

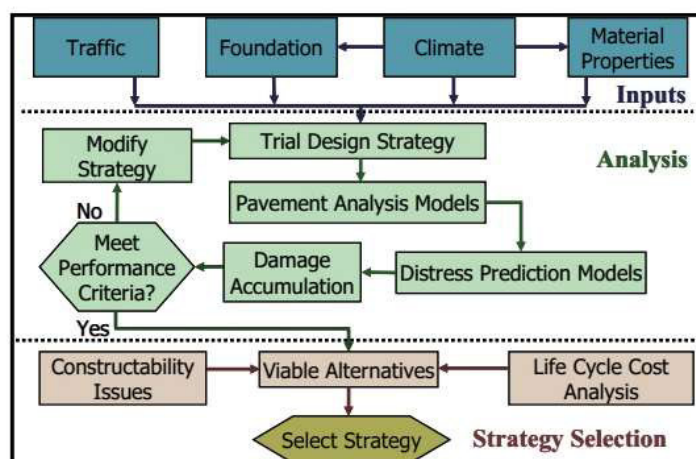
A partir desta necessidade, o modelo computacional denominado de *Mechanist-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) foi desenvolvido com o propósito de utilizar modelos mecanísticos e a base de dados existentes. O programa foi finalizado em 2004 e gerenciado pela AASHTO (KALLOUSH & RODEZNO, 2011).

O modelo é baseado no conceito mecanístico-empírico. Isso resulta em um cálculo inicial de desempenho do pavimento em relação às tensões, deformações e deflexões causadas pelo fluxo de veículos. Além de considerar os efeitos do tráfego, os efeitos climáticos são computados no sistema. A partir do levantamento de respostas do pavimento, o MEPDG utiliza modelos empíricos calibrados para a realidade do campo e relaciona o dano acumulado no decorrer do tempo com os defeitos do pavimento (AASHTO, 2008).

O *software* analisa o tráfego, o clima e o comportamento dos materiais baseado em modelos numéricos que estipulam os danos causados durante o período de projeto do pavimento e apresenta ampla aplicação podendo ser utilizado em pavimentos novos, bem como de reforço, abrangendo os modelos de pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos (PETERLINI, 2006).

O desenvolvimento do método pode ser relacionado através de uma sequência metodológica apresentada no fluxograma da Figura 25. O método é iniciado com a inserção dos dados de entrada passando por uma análise do desempenho de dano do projeto adotado. O resultado dos danos acumulados deve concordar com os critérios do projeto e assim são desenvolvidas as opções de modelos para o caso estudado.

Figura 25 - Fluxograma de procedimento adotado pelo MEPDG



Um interessante aspecto do *software* é a divisão de níveis hierárquicos em consideração ao nível de dados de entradas. O programa divide o uso em 3 níveis (AASHTO, 2008):

- ✓ Nível 1: o nível mais elevado de detalhamento de dados no qual se necessita de dados acurados em relação à caracterização dos materiais e tráfego. Nível indicado para engenheiro-projetista;
- ✓ Nível 2: o nível apresenta flexibilidade em relação aos parâmetros de entrada permitindo a correlação de dados. Um exemplo pode ser a estimativa do subleito através do ensaio de CBR;
- ✓ Nível 3: o programa simula o dimensionamento com valores próprios na falta de dados reais de projeto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Nesta seção é exposta a sequência de atividades desempenhadas nos estudos para alcançar os resultados da pesquisa: definição das cargas, estudo do tráfego, dimensionamento pelos métodos PCA e AASHTO. A metodologia adotada tem um caráter exploratório que requer um estudo preliminar do tema abordado, ou seja, familiarizar-se com o tema que está sendo investigado. O método de pesquisa apresentou as seguintes etapas: investigação de campo (com tratamento dos dados) e estudo de caso.

3.2 Investigação de Campo

O trabalho realizado em campo foi conduzido através de entrevistas com gestores responsáveis pelo projeto em estudo e visitas aos órgãos responsáveis pela obra. O objetivo era buscar informações sobre a análise inicial da problemática do antigo Terminal e os objetivos contemplados no novo projeto. A análise do memorial de cálculo e memorial descritivo do projeto a partir de visitas à Secretaria de Infraestrutura de Fortaleza (Seinf) auxiliou na análise do modelo projetado.

O estudo foi desenvolvido considerando as principais referências ligadas ao tema de pavimento de concreto tais como: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), entre outras instituições públicas e privadas.

A partir do estudo do tema, o projeto executivo do Terminal foi analisado utilizando informações compartilhadas por órgãos responsáveis pela obra e operação do transporte público de Fortaleza. Desenvolvendo a análise junto às normas e conhecimentos técnicos, o dimensionamento foi realizado considerando diferentes fatores nos métodos mecanístico (PCA) e empírico (AASHTO). Os resultados foram comparados expondo os fatores limitantes para cada modelo à ruína e relacionando os custos de execução para as camadas dimensionadas. Estes valores foram baseados em índices de preço unitário da tabela SICRO. A metodologia envolveu visitas à obra em destaque e consultas com profissionais responsáveis pela execução.

Como o estudo de caso escolhido refere-se ao dimensionamento do Pavimento Rígido para o Terminal do Antônio Bezerra, que já possui um projeto executivo em andamento, o resultado gerado pelo projeto será comparado com o utilizado e apresentado como alternativa para avaliações de projetos futuros.

3.3 Projeto do Estudo de Caso

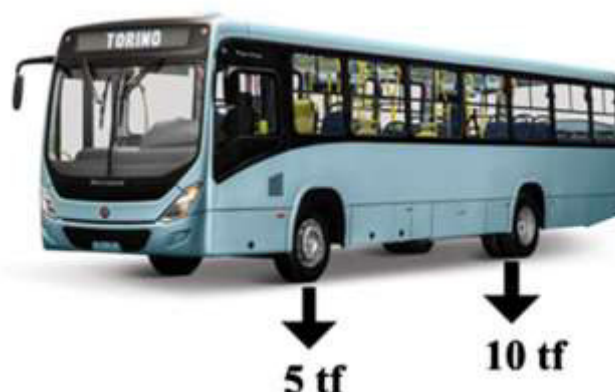
O projeto do Terminal de Integração do Terminal de Ônibus Antônio Bezerra promoveu a reforma geral da estrutura, incluindo a estrutura do pavimento e as plataformas de embarque e desembarque. O modelo de pavimento rígido proposto inclui os corredores internos do terminal e a área de estacionamento, sujeitos ao tráfego de ônibus.

O dimensionamento requer o conhecimento da distribuição de cargas por tipo de eixo. Com isso, se fez necessário o estudo das cargas incidentes na área a ser dimensionada. O Terminal tem um projeto distinto de rodovias nas quais o fluxo é concentrado em faixas e sentidos bem definidos. O caso em estudo contém áreas de fluxo definido como o corredor entre as plataformas de embarque e desembarque, como áreas de fluxo livre como o pátio de estacionamento dos veículos. Visando obter um dimensionamento único, a composição do tráfego considerou o trecho de entrada e saída do Terminal, no qual é estimado o mais crítico.

3.3.1 Cargas

O padrão de veículos utilizado pelo sistema de transporte urbano em Fortaleza não apresenta variações consideráveis, podendo-se adotar um único modelo, simplificando a determinação das cargas no pavimento. O modelo de ônibus utilizado neste trabalho é o Marcopolo Gran Torino 2014 e chassi Mercedes-Benz OF-1519, demonstrado na Figura 26. Este conjunto representa a maior parcela dos veículos que trafegam em Fortaleza atualmente.

Figura 26 - Modelo de ônibus urbano de Fortaleza



Fonte: MARCOPOLLO (2014)

O veículo possui capacidade máxima de 81 passageiros, incluindo os funcionários responsáveis pela operação. O sistema de eixos apresenta um eixo simples na dianteira e um eixo duplo na traseira. O fabricante Marcopolo apresenta a distribuição de pesos como 5.000 kgf para o eixo dianteiro simples de rodagem simples e 10.000 kgf para o traseiro simples de rodagem dupla (Mercedes-Benz, 2014), ou seja, um terço do carregamento é suportado pelo eixo dianteiro e dois terços pelo eixo traseiro.

A operação apresenta cargas por eixo de até 10 tf no caso do eixo traseiro do veículo completamente ocupado. Entretanto, a frota operante apresenta variação no número de passageiros dentro do veículo ao longo do tempo. Uma taxa de ocupação de veículos é considerada a partir do banco de dados do Sindicato das Empresas de Transportes de Passageiros do Estado do Ceará (SINDIONIBUS) a fim de apresentar a real carga dos eixos em função do período do dia conforme ilustra a Tabela 5. O fator de ocupação considera a quantidade de viagens em três diferentes cenários: horário de pico, horário entre picos e operação noturna. Em cada cenário a ocupação de 81, 40 e 8 passageiros, respectivamente, é considerada para o cálculo do peso no eixo (SINDIONIBUS, 2014).

Tabela 5 - Ocupação do veículo por tipo de cenário

Cenário	Taxa de ocupação (%)	Número de Passageiros
Hora de Pico	100	81
Entre Picos	50	41
Noturno	10	8

Fonte: SINDIONIBUS (2014)

A análise do peso dos veículos em cada cenário utiliza a base de peso médio de 70 kgf por passageiro e do veículo vazio, que apresenta um peso de 9330 kgf. A distribuição de cargas do veículo segue a proporção exposta pelo fabricante, onde 1/3 da carga é direcionada para o eixo dianteiro e 2/3 da carga é direcionada para o traseiro. Disso tem-se que, para o veículo vazio, o eixo dianteiro está carregado em 3110 kgf e o traseiro em 6220 kgf. Logo, o cálculo do peso para cada eixo segue as Equações 12 e 13 (SINDIONIBUS, 2014).

$$PED = 3110 + 81 \times To \times \frac{1}{3} \times 70 \quad (12)$$

$$PET = 6220 + 81 \times To \times \frac{2}{3} \times 70 \quad (13)$$

Onde,

PED = Peso eixo dianteiro;

PET = Peso eixo traseiro;

To = Taxa de ocupação;

81 é a capacidade de passageiros do veículo;

70 é o peso assumido, em kgf, de cada passageiro.

3.3.2 Tráfego

A obtenção da composição de tráfego dentro do Terminal deu-se através de dados apresentados pela Empresa de Transportes Urbanos de Fortaleza (ETUFOR), responsável pela gestão do sistema de transporte urbano dentro do município de Fortaleza. Os dados apresentam o fluxo diário de ônibus que trafegam dentro do Terminal e a quantidade de viagens realizadas em cada cenário conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Proporção de viagens x cenário de operação

Cenário	Proporção de Viagens
Hora de Pico	35%
Entre Picos	61%
Noturno	4%

Fonte: SINDIONIBUS (2014)

O tratamento de dados de tráfego para pavimentos de concreto é realizado a partir do método de dimensionamento adotado. Neste estudo são considerados os métodos da PCA, que requer a consideração do tráfego em termos do número de repetições, tipo de eixo e nível de carga e o método da AASHTO que requer o tráfego transformado para um número de repetições do eixo padrão.

A ETUFOR apresenta os dados por médias anuais, dentre eles, informações como passageiros transportados, viagens executadas e linhas de ônibus que operam no terminal. A Tabela 7 expõe informações dos anos de 2013 e 2014. O uso destes dados foi base para a projeção de tráfego de ambos os métodos.

Tabela 7 - Histórico de transporte do Terminal Antônio Bezerra 2013-2014

Itens	2013	2014
Demanda Transportada por Dia	179.132	191.216
Viagens Programadas por Dia	3.395	3.452
Linhas de Ônibus	44	44

Fonte: ETUFOR (2012)

Assumindo dados da ETUFOR, a evolução do tráfego no Terminal foi projetada para um período de projeto de 30 anos. Um fator de distribuição de 0,5 foi aplicado devido à existência de duas entradas no Terminal. O método adota um crescimento linear do número de viagens calculado a seguir:

$$V_{2014} = V_{2013}[1 + (P - 1) \times t] \quad (14)$$

Onde,

t = Taxa crescimento anual de tráfego;

V_{2014} = Viagens diárias programadas em 2014;

V_{2013} = Viagens diárias programadas em 2013;

P = Intervalo de tempo em anos.

Aplicando-se a taxa de crescimento anual ao volume diário de veículos que trafegam no trecho e adotando período de projeto de 30 anos, encontrou-se o número do tráfego diário de veículos para o ano de 2044. A estimativa do número total de veículos

durante o período de projeto foi calculada a partir do tráfego médio e a projeção dessa média para os 30 anos, conforme demonstrado abaixo:

$$V_m = \frac{V_{2014} + V_{2044}}{2} \quad (15)$$

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (16)$$

Onde:

V_m = Volume médio diário;

V_t = Número total de veículos durante período de projeto.

No caso do dimensionamento baseado no Método da AASHTO, é necessária a transformação de todo o tráfego comercial em um número equivalente de repetições de eixo padrão. Os valores tem relação direta com o número de passagens de um eixo simples de roda dupla equivalente a 80 kN. O cálculo é realizado através de Fatores de Equivalência de Carga. A equivalência relaciona o efeito destrutivo de uma carga real em relação ao efeito da passagem da carga padrão.

O processo de cálculo do número N é baseado na caracterização do tráfego de veículos identificado na via. Exige-se a tabulação das categorias de veículos presentes na via, número de eixos enquadrados nas categorias citadas e a carga apresentada por cada eixo a fim de se estimar o fator de veículo.

O cálculo do número de veículos envolve a porcentagem de eixos tabulados e os valores de fator de equivalência (FEC). As porcentagens dos eixos tabulados foram obtidas a partir da proporção do volume de uma faixa de carga em relação volume total do dia, conforme demonstra a Tabela 8.

Tabela 8 - Relação volume por faixa em relação ao total

Eixo	Período	Passagem de Eixo/Dia	Pi (%)
Traseiro	Hora de Pico	1208	17
	Entre Picos	2106	31
	Noturno	138	2
Dianteiro	Hora de Pico	1208	17
	Entre Picos	2106	31
	Noturno	138	2
Total		6904	100

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Tabela 9 apresenta os intervalos e valores do FEC para cada intervalo indicado. As informações são referentes ao Eixo Simples de Rolagem Simples (ESRS).

Tabela 9 - Fator de equivalência por faixa de peso

Tipo	Carga (t)	FECi
ESRS	< 5	0,1
	5-6	0,2
	6-7	0,4
	7-8	0,8
	8-9	1,5
	9-10	3,0
	10-11	4,5

Fonte: BALBO (2013)

O cálculo do fator de veículo (FV) é realizado a partir do somatório das equivalências de operações (EO). A equivalência de operações é determinada através da porcentagem de cada faixa de eixo multiplicando pelos respectivos fatores de equivalência. A Equação 17 demonstra o desenvolvimento:

$$F_v = \frac{\sum EO}{100} \quad (17)$$

Onde:

$$EO = P_i \times FEC_i.$$

O cálculo do número N envolve outras variáveis de tráfego nas quais os valores são definidos a seguir:

- ✓ Fd: Fator de distribuição de frota por faixa apresenta um percentual de 100% dos veículos, pois utiliza o trecho de acesso do terminal onde todos os veículos trafegam;
- ✓ Fs: Fator de sentido apresenta um percentual de 50% devido ao trecho possuir sentido duplo;
- ✓ Ff: Fator de frota comercial apresenta um percentual de 100% devido à área interna do terminal ser restrita a tráfego de ônibus.

Uma vez definidas as variáveis de tráfego, a expressão para o cálculo do número N pode ser resolvida e assim apresentar o número de eixos equivalentes. Segue a fórmula geral:

$$N = 365 \times \text{VMD} \frac{[(1 + P \times t)^2 - 1]}{2 \times t} \times \text{FV} \times \text{Ff} \times \text{Fs} \times \text{Fd} \quad (18)$$

3.3.3 Determinação da Espessura da Placa

Nesta seção são detalhados os métodos PCA e AASHTO, ambos utilizados para a determinação da espessura da placa neste trabalho. No PCA, inicia-se calculando o número de eixos totais por classe de carga que irão trafegar no pavimento durante o período de projeto. A partir da definição dos volumes de tráfego, parâmetros são definidos para o dimensionamento, sendo eles:

- ✓ Acostamento de concreto;
- ✓ Barras de transferência;
- ✓ Resistência à tração do concreto;
- ✓ Coeficiente de recalque;
- ✓ Fator de segurança.

Utilizando os parâmetros definidos, o procedimento foi dividido na análise da fadiga e na análise da erosão. A análise da fadiga foi realizada através da relação da tensão equivalente e as cargas dos eixos. A tensão equivalente é a tensão de tração na flexão proporcionada pela carga do veículo na borda longitudinal da placa e multiplicada por um fator de equivalência para a carga crítica (PEREIRA, 2003). Utilizando o Manual do DNIT, a tensão pode ser determinada a partir da definição de três fatores: tipo de eixo adotado, espessura da placa de concreto e coeficiente de recalque da fundação. A Tabela 10 indica os valores para as relações citadas.

Tabela 10 - Fadiga - Eixo simples com acostamento

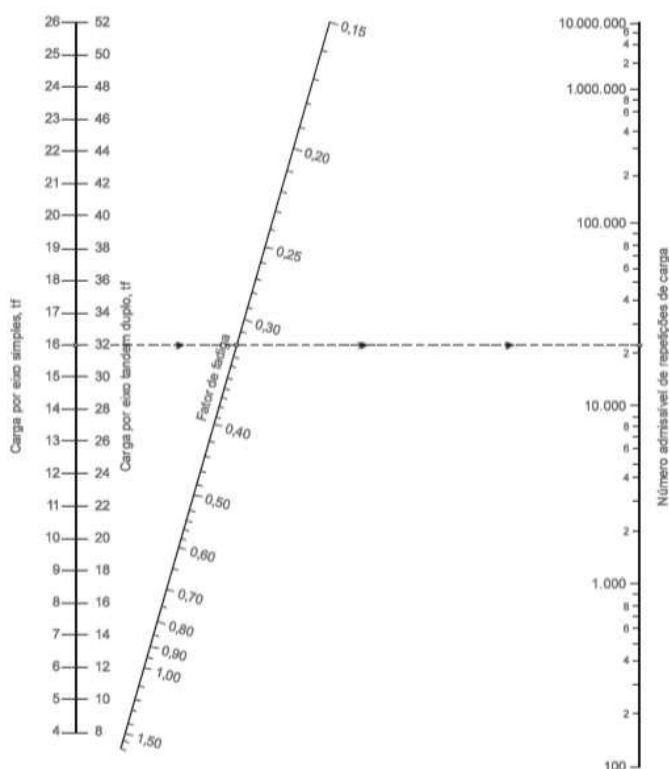
Espessura da Placa (cm)	Coeficiente de Recalque = 53 MPa	
	Tensão Equivalente (MPa)	Fator de Fadiga
18	1,69	0,40
19	1,57	0,37
20	1,47	0,35

21	1,37	0,33
22	1,29	0,31
23	1,20	0,29
24	1,14	0,27

Fonte: DNIT (2005)

Após a determinação do fator de fadiga, foi possível determinar o número admissível de repetições da carga por tipo de eixo utilizando o nomograma apresentado pelo Manual do DNIT e exposto na Figura 27. Este nomograma é aplicado para pavimentos com ou sem acostamento de concreto. Dois dados de entrada são necessários para se estabelecer o número de repetições: o fator de fadiga que representa a tensão equivalente dividida pela resistência à tração na flexão do concreto; e a carga do eixo majorada pelo fator de segurança. Conhecido o número de repetições admissíveis para cada faixa de carga, obteve-se o desempenho do pavimento, cujo número total de eixos deve ser inferior ao valor encontrado.

Figura 27 - Nomograma: análise de fadiga em função do fator de fadiga



Fonte: DNIT (2006)

No caso da avaliação da erosão se faz necessária a determinação do fator de erosão através do quadro apresentado pelo Manual do DNIT (2005). Os quadros dos fatores de erosão do manual são divididos a partir da existência de barra de transferência e de acostamento de concreto, sendo utilizado o caso condizente com o projeto em estudo, como

indicado na Tabela 11. Os dados de entrada são a espessura da placa, 20 cm, e o coeficiente de recalque, 53 MPa/m.

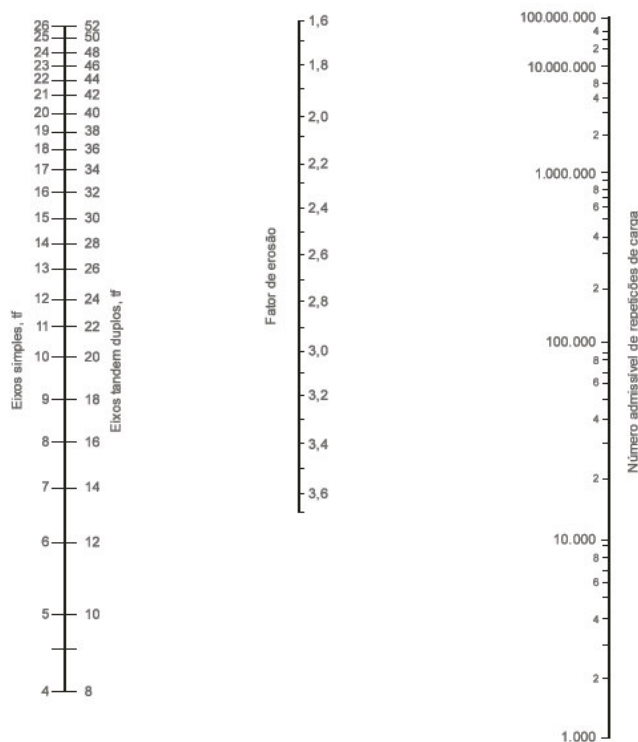
Tabela 11 - Fator de erosão eixo simples com barra de transferência e com acostamento de concreto

Espessura da Placa (cm)	Coeficiente de Recalque = 53 MPa Fator de Erosão
18	2,52
19	2,45
20	2,39
21	2,33
22	2,28
23	2,22
24	2,17

Fonte: DNIT (2005)

Após a determinação do fator de erosão, se fez necessário determinar o número admissível de repetições por faixa de carga, a partir do nomograma indicado na Figura 28. O nomograma apresenta o valor do número admissível a partir da indicação da carga e do fator de erosão.

Figura 28 - Nomograma: análise de erosão (com acostamento de concreto)



Fonte: DNIT (2006)

Na aplicação do método da AASHTO, o cálculo do volume de tráfego é iniciado com a definição do número de eixos padrões para o período de projeto (W_{18}). O número de eixos é calculado conforme a descrição de tráfego descrita anteriormente. A relação de coeficientes da equação de desempenho é definida a partir de valores relacionados às características do projeto. Segue a descrição do método de decisão proposto para cada coeficiente a ser utilizados em acordo com os índices do Guia da AASHTO (1993).

- a) Coeficiente de *student* (Z_R): definido em função da classificação da via e localização entre meio rural e urbano;
- b) Coeficiente de drenagem (C_d): definido a partir da velocidade de escoamento projetada no pavimento;
- c) Erro padrão (S_0): associado às estimativas de tráfego e às previsões de desempenho;
- d) Espessura da placa (H): espessura adotada para o cenário a ser analisado;
- e) Índice de serventia inicial (p_i) e final (p_f): representa a qualidade inicial e final do pavimento almejada, podendo variar de 0,4 a 5.
- f) Coeficiente de transferência de carga (J): definido em função das condições de acostamento, barras de transferência e material de subbase.

Ao definir os coeficientes apresentados, o dimensionamento é realizado com o uso da equação geral de desempenho indicada na Equação 19.

$$\begin{aligned} \log_{10} W_{18} = & Z_R \times S_0 + 7,35 \times \log_{10}(H + 1) - 0,06 + \left(\frac{\log_{10} \frac{(p_i - p_f)}{(4,5 - 1,5)}}{\left(1 + \frac{1,624 \cdot 10^7}{(H + 1)^{8,46}} \right)} \right) \\ & + (4,22 - 0,32 \times p_f) \times \log_{10} \left(\frac{f_{ctmk} \times C_d \times (H^{0,75} - 1,132)}{215,63 \times J \left(H^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0,25}} \right)} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Utilizando os dados de entrada calcula-se o número previsto de repetições totais de carga e, logo, se compara aos valores reais de projeto. O dimensionamento é finalizado ao determinar a espessura que apresente um valor de passagens de eixo acima de requisitado pelo tráfego real da via.

3.4 Caracterização dos materiais

3.4.1 Fundação

A caracterização da fundação envolve a avaliação do desempenho das camadas do subleito e do material utilizado na subbase. Para o desenvolvimento do dimensionamento foi realizada a análise do nível de resistência ao recalque das camadas e do efeito dos reforços, isto é, da rigidez das subcamadas. Construindo um comparativo com o projeto executado pela Secretaria de Infraestrutura de Fortaleza (SEINF), foi escolhido um modelo utilizando um material granular com a mesma espessura. Os valores do coeficiente de recalque são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficiente de recalque para solos granulares

CBR _{subleito} (%)	K _{subleito} (MPa/m)	K Solo Granular h=15 cm (MPa/m)	K Solo Granular h=20 cm (MPa/m)
5	34	42	49
6	38	46	53
7	41	50	56
8	44	53	60
9	47	56	63
10	49	58	65

Fonte: PITTA (1990)

Neste modelo, adotou-se como subbase uma camada de solo-brita de 20 cm de espessura. O material adicionado representa assim um incremento no coeficiente de recalque de 38 MPa/m para 53 MPa/m (DNIT, 2005).

3.4.2 Concreto

O estudo adota as especificações do concreto que foi utilizado na execução do projeto investigado, caracterizado pela resistência à compressão axial de 30 MPa e classificado como um concreto convencional, que apresenta um baixo custo relativo aos outros padrões. A questão da trabalhabilidade foi definida a partir da metodologia de aplicação, sendo adotada pelo Consórcio responsável a régua vibratória, que exige uma fluidez moderada do concreto. A Figura 29 indica o uso da régua na obra do Terminal.

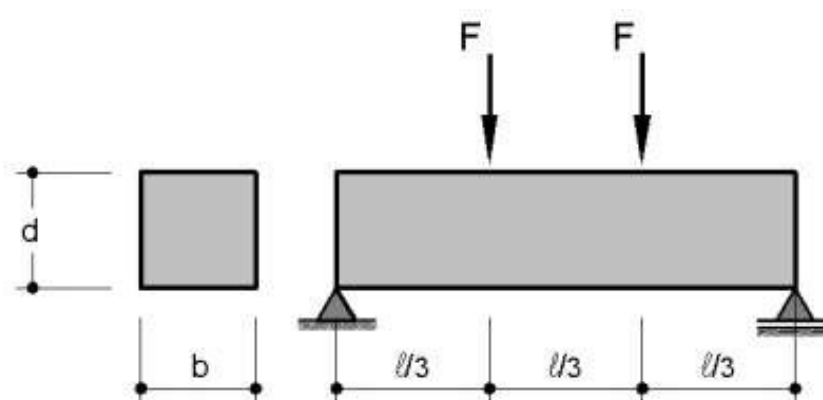
Figura 29 - Aplicação do concreto com uso de régua vibratória



Fonte: Autor (2014)

Enquanto em termos de serviço a fiscalização avalia o desempenho de resistência do concreto à compressão axial, no caso de dimensionamentos de pavimentos de concretos de Cimento Portland, os concretos são dosados para atender a determinadas resistências à tração na flexão. A realização desse ensaio mede a resistência de um corpo de prova com seção prismática a um carregamento em duas seções simétricas, até a ruptura como indicado nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: PINHEIRO et al. (2004)

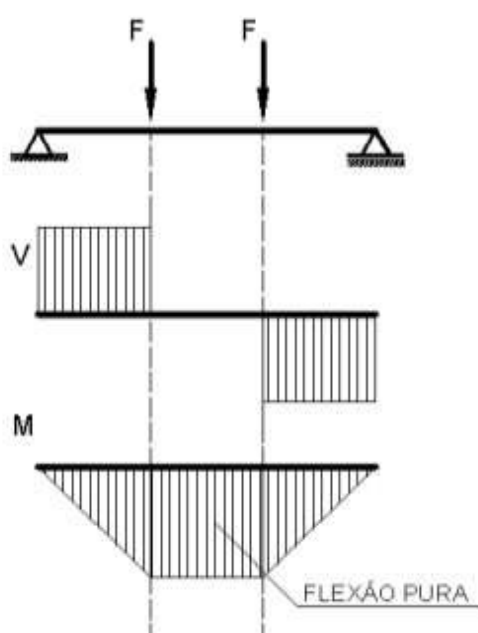
Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: ABCP (2007)

Analisando os diagramas gerados a partir dos esforços no ensaio, percebe-se que na região aonde o momento fletor possui valor máximo, o diagrama indica que o esforço cortante é nulo. Nesse trecho central ocorre a flexão pura, conforme demonstra a Figura 32.

Figura 32 - Diagrama de esforços solicitantes



Fonte: PINHEIRO et al. (2004)

Os valores encontrados para resistência à tração na flexão $f_{ct,f}$, e a compressão f_{ck} , são relacionados através da resistência média do concreto à tração. Logo é calculada a equivalência nas Equações 20 e 21 (PINHEIRO et al., 2004).

$$f_{ctm} = 0,7 f_{ct,f} \quad (20)$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (21)$$

Onde:

f_{ctm} = Resistência média do concreto a tração;

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

f_{ck} = Resistência característica do concreto a compressão.

Na análise do estudo de caso, foi possível relacionar a resistência à compressão de 30 MPa do concreto executado em campo com a resistência à tração na flexão de 4,2 MPa através das Equações 20 e 21.

4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

4.1 Terminal Antônio Bezerra

O projeto executivo do pavimento de concreto do Terminal Antônio Bezerra foi desenvolvido para suprir as necessidades de tráfego pesado oriundos dos ônibus que operam constantemente com a capacidade máxima de passageiros. A mudança do perfil do pavimento em relação ao anterior é justificada pela exigência de melhores desempenhos em termos de durabilidade e segurança.

O solo encontrado na região é de característica argilosa e os ensaios executados pela Prefeitura de Fortaleza através da Secretaria de Infraestrutura (Seinf) apresentaram valores de CBR igual a 6% para o subleito do terreno. O pavimento é composto por uma camada de subbase de 20 centímetros de espessura de material granular (solo-brita). A Figura 33 demonstra o trabalho de corte e nivelamento do subleito.

Figura 33 - Equipe de terraplenagem regularizando a fundação



Fonte: Autor (2014)

A decisão em relação ao tipo de material utilizado para a camada de subbase teve como diferencial as facilidades de custo e logística do material. Devido à facilidade de acesso aos materiais provindos da demolição do antigo prédio situado no terreno, o fornecedor do material granular solo-brita apresentava proposta diferenciada para o fornecimento do material de base.

Acima da camada de subbase foi executada a imprimação da superfície, consistindo na aplicação de asfalto diluído do tipo CM-30, antes da execução do revestimento apresentando a taxa de aplicação de 1,2 litros/m². A imprimação é executada sobre a superfície da camada de base, sendo a sua principal finalidade a impermeabilização desta camada. Aumentar a coesão da superfície da base, fixar partículas soltas nessa superfície e aumentar as condições de aderência entre esta e a placa de revestimento são algumas funções da imprimação. A Figura 34 expõe a subbase do Terminal após a imprimação executada.

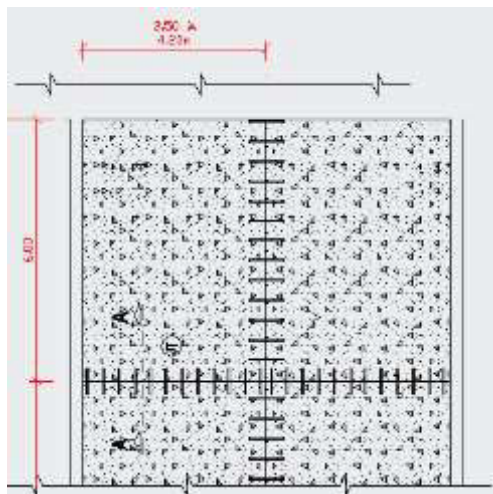
Figura 34 - Imprimação da área de estacionamento do Terminal Antônio Bezerra



Fonte: Autor (2014)

Na camada de rolamento, o projeto apresenta placa de concreto com resistência à compressão axial de 30 MPa, aos 28 dias, verificadas por meio de moldagem *in loco* de corpos de provas. O modelo adotado é o de placa de concreto com armadura distribuída descontínua. A armadura apresenta uma tela soldada nervurada com barras de 5,0 mm de diâmetro e com espaçamento de 10x10 cm posicionada a uma altura de 17 cm da base. A placa de concreto apresenta espessura de 20 cm e dimensões de 3,5 m no sentido longitudinal e 6 m no sentido transversal, conforme demonstrado na Figura 35.

Figura 35 - Projeto executivo de dimensão da placa



Fonte: Arquivo Prefeitura de Fortaleza/Seinf (2014)

A execução do concreto foi realizada com auxílio de régua vibratória devido à facilidade do manuseio. Na fase inicial durante o lançamento do concreto um acabamento inicial liso é realizado pelas régua vibratórias. Após o início do processo de cura, o pavimento recebe a frisagem com uso de vassoura de aço no sentido perpendicular ao fluxo de veículos proporcionando um melhor atrito com o pavimento ao futuro tráfego. O processo de frisagem é demonstrado na Figura 36.

Figura 36 - Execução de frisagem do pavimento de concreto do Terminal

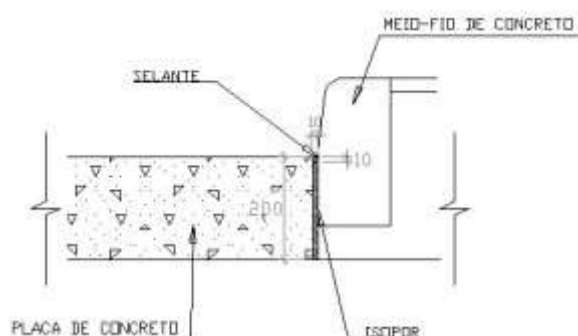


Fonte: Autor (2014)

Procedendo ao acabamento inicial, o processo de execução de juntas é realizado. As juntas do pavimento são serradas em um período de 12 a 16 horas após a realização da

concretagem, esta variação do período existe devido às condições climáticas do dia. O corte possui a profundidade de 70 mm e espessura de 6 mm, em acordo com o especificado pelo projetista e atendendo a solicitação de 1/3 da altura, conforme relatado anteriormente. Nos casos de placas que apresentam encontro com as estruturas de plataforma de embarque, a junta serrada foi substituída por uma junta de expansão, Figura 37, que apresenta um isolamento completo entre a placa de concreto e a plataforma através de um material compreensível. Painéis de isopor com espessura de 10 mm foram utilizados nesses casos.

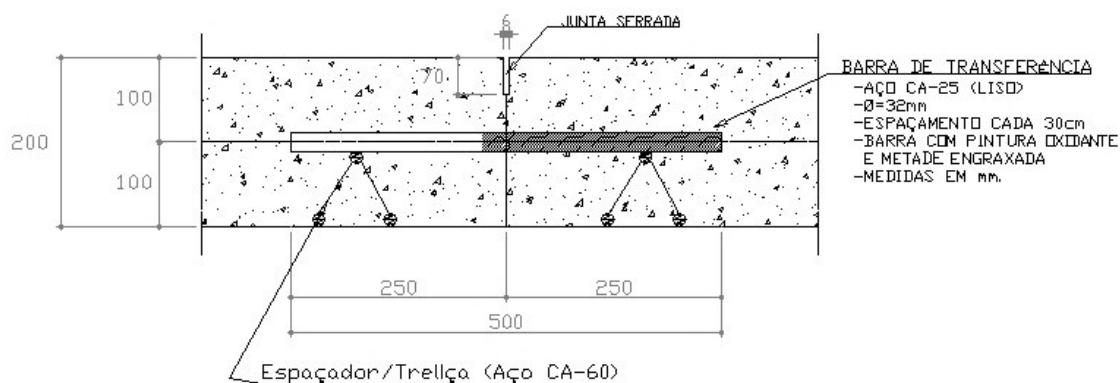
Figura 37 - Projeto Terminal – Detalhe da junta de expansão



Fonte: Arquivo Prefeitura de Fortaleza/Seinf (2014)

A estrutura de concreto possui reforços de aço que elevam a capacidade de tráfego suportada pela estrutura. As juntas transversais, Figura 38, apresentam barras de transferência com peças de diâmetro de 32 mm e espaçamento de 30 cm. Cada barra foi posicionada na linha neutra das placas e, durante a execução do serviço, metade da barra recebeu uma camada de graxa com a finalidade de mitigar o atrito da barra com o concreto. A peça apresenta característica lisa e possui a especificação de aço- CA25.

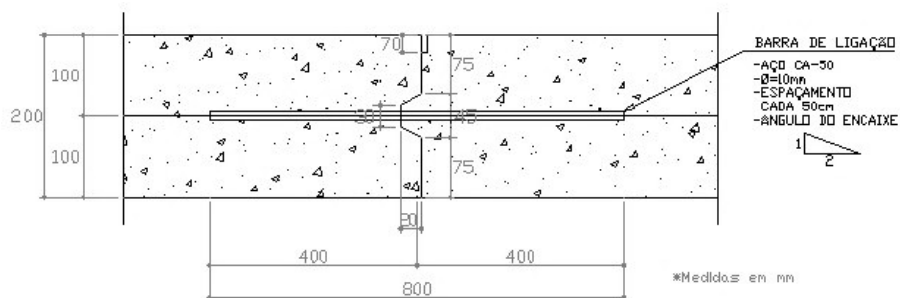
Figura 38 - Projeto Terminal – Detalhe da junta transversal



Fonte: Arquivo Prefeitura de Fortaleza/Seinf (2014)

As juntas longitudinais demonstradas no projeto da obra na Figura 39 possuem barras de ligação com o espaçamento de 50 cm entre todas as peças. A barra possui superfície rugosa, apresentando assim uma função de incremento de atrito entre o aço e o concreto. A peça é de aço CA-50 e possui 80 cm de comprimento e 10 mm de diâmetro.

Figura 39 - Projeto Terminal – Detalhe da junta longitudinal



Fonte: Arquivo Prefeitura de Fortaleza/Seinf (2014)

A Figura 40 demonstra as barras de ligação posicionadas na linha neutra das placas de concreto executada, conforme o corte do projeto.

Figura 40 - Disposição das barras de ligação no Terminal Antônio Bezerra



Fonte: Autor (2014)

4.2 Obra Quarto Anel Viário

Além da investigação realizada no Terminal Antônio Bezerra, apresentam-se também os resultados de uma visita a uma importante obra do estado que está sendo executada em pavimento de concreto de cimento Portland em 2014. Pela importância da obra

para o estado do Ceará e a sua relação com o Projeto de Graduação, entendeu-se que seria importante que constasse neste documento alguns aspectos desta construção em desenvolvimento.

A obra do Quarto Anel Viário de Fortaleza possui uma extensão total de 32,1 km sendo 26,1 km de pavimento rígido e 6 km de pavimento flexível. A obra tem previsão de término para o 07 de Fevereiro de 2015. É considerada importante devido ao fornecimento de infraestrutura para os polos industriais da Região Metropolitana de Fortaleza. O fluxo de veículos pesados é intenso pelas diversas indústrias localizadas na região produzindo assim um fluxo intenso diariamente.

O Projeto envolve a ampliação da pista existente e a construção de uma nova pista adotando uma solução estrutural diferenciada da existente. A obra apresenta um modelo de pavimento rígido com placas de concreto simples de Cimento Portland. A placa utiliza barras de transferência nas juntas transversais e barras de ligação nas juntas longitudinais.

O novo pavimento do Quarto Anel Viário de Fortaleza, apresenta a seguinte estrutura:

- ✓ Placa de concreto simples de Cimento Portland com espessura de 22 e 24 cm (Figura 41). Esta variação existe devido a trechos da via que possuem intensidade de fluxo de veículos variados;
- ✓ Subbase de Concreto Compactado a Rolo com espessura de 15 cm, conforme indica a Figura 42.

Figura 41 - Placa de concreto simples – Anel Viário



Fonte: Autor (2014)

Figura 42 - Camada de concreto compactado a rolo – Ane Viário



Fonte: Autor (2014)

O método de execução das placas diverge em relação ao estudo de caso do Terminal Antônio Bezerra. A obra do Anel Viário utiliza a Pavimentadora de Concreto SP 850 da *Wirtgen* conforme indicado na Figura 43.

Figura 43 - Pavimentadora de concreto – Anel Viário



Fonte: Autor (2014)

A máquina possui função automatizada na completa aplicação do concreto e apresenta produtividade elevada podendo executar 600 metros por dia. As seguintes etapas são desempenhadas pelo equipamento:

- ✓ Nivelamento do concreto (Figura 44);
- ✓ Vibração do concreto ;
- ✓ Inserção das barras de transferência e ligação (Figura 45);
- ✓ Acabamento final superficial.

Figura 44 - Nivelamento do concreto – Anel Viário



Fonte: Autor (2014)

Figura 45 - Inserção de barras de transferência – Anel Viário



Fonte: Autor (2014)

As placas de concreto apresentam dimensões variadas devido a existência das faixas: acostamento, rolamento e segurança. A primeira apresenta largura de 3 metros enquanto as restantes apresentam largura de 4 metros, conforme indica a Figura 46.

Figura 46 - Pista de concreto do Anel Viário



Fonte: Autor (2014)

O concreto utilizado no Quarto Anel Viário apresenta resistência de 4,5 MPa na tração à flexão. O traço de concreto apresenta alta consistência devido ao método utilizar formas deslizantes, assim o material mantém a forma da placa no momento da execução. Após a aplicação do concreto, a etapa de corte de juntas é realizada após 6 horas do término da concretagem. Uma lâmina com espessura de 4 mm realiza um corte com 8 cm de profundidade na placa. Um segundo corte é realizado após a cura total da placa, 28 dias, e inserido logo em seguida a vedação de silicone.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados: carga, tráfego, e os dimensionamentos executados no estudo utilizando os dados coletados em campo. Os métodos apresentados a seguir são os da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984 e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) de 1993. O método utilizado para o dimensionamento do pavimento executado não foi localizado durante a execução deste estudo.

5.1 Carga

O projeto do Terminal considera um único tipo de veículo a trafegar dentro da área restrita. O ônibus apresenta variáveis de carga por eixo dependendo do horário de operação, uma vez que a movimentação de pessoas varia ao longo do dia. O estudo relacionou a ocupação dos passageiros em cada cenário desta operação e o peso do veículo vazio. A Tabela 13 expõe os pesos de cada eixo relacionado a cada cenário.

Tabela 13 - Taxa de ocupação de passageiros x peso eixo traseiro

Período	Viagem/dia	Total (%)	Taxa de Ocupação (%)	Peso Eixo Traseiro (tf)	Peso Eixo Dianteiro (tf)
Hora de Pico	1208	35	100	10,0	5
Entre Picos	2072	60	50	8,1	4,05
Noturno	172	5	10	6,6	3,29

Fonte: Elaborada pelo autor.

A variação de cargas entre os períodos apresenta diferenças representativas, chegando a 51,5% de redução entre o horário noturno e a hora de pico. Estas diferenças apresentam influência direta no dimensionamento. As cargas do eixo dianteiro apresentam baixa relevância quando comparadas com as cargas do eixo traseiro, proporcionando um baixo desgaste do pavimento durante a operação, conforme será mostrado nas seções seguintes.

5.2 Tráfego

Os resultados da projeção do tráfego demonstram informações direcionadas para cada método de dimensionamento. O resultado do tráfego é dividido em duas informações: número de viagens por faixa de peso e número de eixos padrões solicitado no período de projeto.

5.2.1 Tráfego Distribuído por Carga (Método PCA)

A projeção para o método PCA requer informações a respeito de cada intervalo de carga. A taxa de crescimento linear do Terminal é indicada na Tabela 14.

Tabela 14 - Taxa de crescimento linear do tráfego

Itens	2013	2014	Taxa Crescimento Anual (%)
Viagens Programadas por Dia	3.395	3.452	1,68

Fonte: Elaborada pelo autor

Utilizando os dados de entrada expostos, projeta-se o volume médio diário de veículos utilizando as Equações 15 e 16.

- ✓ Período de Projeto (t): 30 anos;
- ✓ Taxa de crescimento (i) linear: 1,68%.

Segue o desenvolvimento do cálculo:

- Tráfego médio diário final (V_{2044}):

$$V_{2044} = 3452[1 + (30 - 1)0,0168] = 5134$$

- Tráfego médio durante período de projeto (V_m):

$$V_m = (5134 + 3452)/2 = 4293$$

- Volume total de veículos período de projeto (V_t):

$$V_t = 365 \times 30 \times 4293 = 4,7 \times 10^7$$

Logo, o volume total é de $4,7 \times 10^7$ veículos durante o período de projeto. A distribuição deste valor em relação às cargas foi relacionada a partir da porcentagem que cada cenário apresenta em analogia ao fluxo total. O fluxo é projetado para a entrada do Terminal que é considerado o trecho crítico. Um fator de distribuição de 50% é aplicado devido à existência de duas vias de entrada no projeto. Segue na Tabela 15 o volume total de projeto classificando cada eixo por peso.

Tabela 15 - Projeção de tráfego por peso de eixo

Eixo	Período	Proporção (%)	Viagem	Peso Eixo (tf)
Traseiro	Hora de Pico	35	8,23E+06	10,00
	Entre Picos	61	1,43E+07	8,85
	Noturno	4	9,40E+05	7,90
Dianteiro	Hora de Pico	35	8,23E+06	5,00
	Entre Picos	61	1,43E+07	4,43
	Noturno	4	9,40E+05	3,95

Fonte: Elaborada pelo autor

5.2.2 Tráfego Equivalente em Eixo Padrão (Método AASHTO)

Aplicando os fatores de equivalência de carga da AASHTO aos dados de tráfego obtidos no estudo de caso, foi obtido a quantidade de eixos equivalentes (80 kN) que o trecho resistirá durante o período de 30 anos do projeto. Os dados da Equivalência de Operações (EO) são expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Equivalência de operações

Eixo	Período	Peso Eixo (tf)	Pi (%)	FECi	EO
Traseiro	Hora de Pico	10	17,5	2,38	41,65
	Entre Picos	8,8	30,5	1,58	48,19
	Noturno	7,9	2,0	1,00	2,00
Dianteiro	Hora de Pico	5,0	17,5	0,17	2,97
	Entre Picos	4,4	30,5	0,03	0,92
	Noturno	3,9	2,0	0,01	0,02
Total					132,1

Fonte: Elaborada pelo autor

O fator de veículo, portanto será:

$$Fv = \frac{95,75}{100} = 0,96$$

Logo, pode-se determinar o número N:

$$N = 365 \times 3452 \frac{[(1 + 30 \times 0,0168)^2 - 1]}{2 \times 0,0168} \times 0,96 \times 1 \times 0,5 \times 1$$

$$N = 31.234.400 \text{ eixos padrões} = 2,27 \times 10^7$$

A determinação do tráfego distribuído pela carga a partir do Método PCA levou a um volume de eixos de $9,4 \times 10^7$ passagens durante o período de projeto. Já na determinação do tráfego equivalente em eixo padrão para o Método da ASSHTO, aplicando-se o fator de equivalência de carga para cada faixa, o número de eixos padrões gerados foi de $2,27 \times 10^7$, 77% abaixo do valor obtido pelo método anterior. Esta redução era esperada devido ao fato de 58% das cargas atuantes no projeto apresentarem cargas inferiores à carga padrão (8,2 tf).

5.3 Método PCA

O Método PCA é baseado na ruína da estrutura através da fadiga da placa decorrente do intenso fluxo de veículos e da erosão da fundação de suporte. Segundo o Manual do DNIT (2005), o presente estudo de caso engloba o dimensionamento de uma placa que irá resistir a veículos apresentando cargas entre 3,29 tf até 10 tf por eixo durante um período de projeto de 30 anos.

A consideração do tráfego no estudo previu um fluxo exclusivo de ônibus dentro do terminal. Utilizando-se o procedimento baseado nas equações PCA, determinou-se um dimensionamento preliminar expondo a análise com a placa de 20 cm. A análise foi realizada calculando o consumo de fadiga e de erosão com auxílio dos nomogramas expostos no Apêndice A. Os valores são apresentados na Tabela 17.

Objetivando criar um dimensionamento que atendesse as condições reais do pavimento, as condições iniciais foram condizentes com o projeto executivo. Os valores de resistência do subleito, fator de segurança, características do acostamento e armadura de transferência de cargas são descritos abaixo:

- ✓ Coeficiente de Recalque: 53 MPa/m;
- ✓ Fator de segurança: 1,2;
- ✓ Acostamento existente de concreto;
- ✓ Adoção de barras de transferência.

Tabela 17 - Método PCA para H = 20 cm

Dimensionamento Caso H = 20 cm						
Espessura (cm)	20	BT	Sim	Tensão Equivalente (MPa)	1,40	
Ksist	53	AC	Sim	Fator de Erosão	2,39	
Fctm,k	4,2	PP	30 anos	Fator de Fadiga	0,33	
Fsc	1,2					
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	N de repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	N de repetições admissíveis	Consumo de Erosão (%)
1	2	3	4	5	6	7
3,29	3,9	705.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
4,05	4,9	14.300.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
5,0	6,0	8.230.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
6,6	7,9	705.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
8,1	9,7	14.300.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
10,0	12	8.230.000	2.000.000	415	9.000.000	91
Total				415	91	

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a influência de ambos os eixos, somente o eixo traseiro, representando a carga de 12 tf, influencia no desgaste da estrutura. Neste caso, o número de passagens das faixas de carga mais pesadas resulta em um consumo por fadiga de 415%, apresentando assim um desgaste bem acima do limite.

Tratando-se de um caso no qual a espessura adotada entra em ruína, um segundo dimensionamento foi gerado utilizando a espessura de 21 cm. Tratou-se as demais variáveis com os mesmos valores. A Tabela 18 ilustra os resultados.

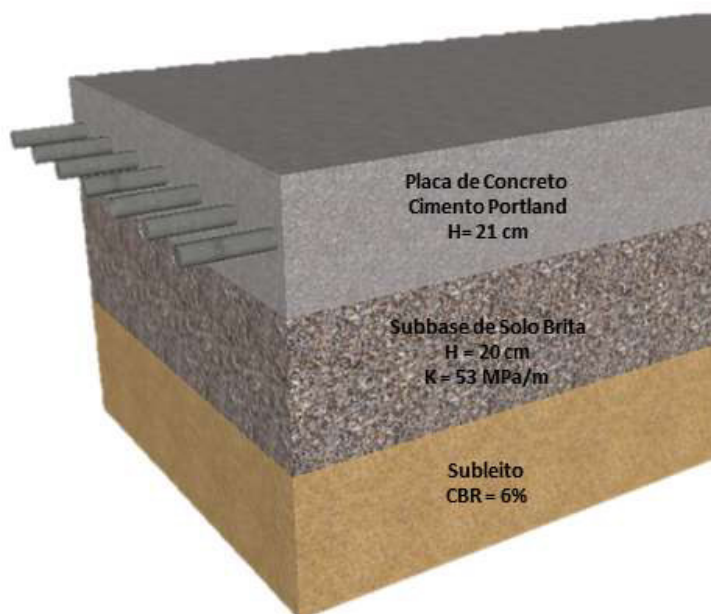
Tabela 18 - Método PCA para H = 21 cm

Dimensionamento Caso H = 21 cm						
Espessura (cm)	22	BT	Sim	Tensão Equivalente (MPa)	1,31	
Ksist	53	AC	Sim	Fator de Erosão	2,32	
Fctm,k	4,2	PP	30 anos	Fator de Fadiga	0,31	
Fsc	1,2					
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	n de repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	N de repetições admissíveis	Consumo de Erosão (%)
1	2	3	4	5	6	7
3,29	3,9	705.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
4,05	4,9	14.300.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
5,0	6,0	8.230.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
6,6	7,9	705.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
8,1	9,7	14.300.000	Ilimitado	0	Ilimitado	0
10,0	12	8.230.000	10.000.000	82,3	18.000.000	45,7
Total				82,3		45,7

Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento da espessura em 1 cm, como exposto na Tabela 17, reduziu o coeficiente de tensão equivalente e diminuiu o fator de erosão, aumentando o número de repetições admissíveis da estrutura. O resultado apresenta um consumo abaixo do limite por fadiga, 82,3%, e um consumo de 45,7% por erosão, logo a espessura atinge um nível satisfatório. Conclui-se que a estrutura do pavimento deve seguir a segunda espessura conforme indica a Figura 47.

Figura 47 - Estrutura do pavimento de concreto de Cimento Portland calculada segundo o método PCA/84



Fonte: Autor (2014)

É perceptível a diferença de influência entre a ruína por fadiga e por erosão devido à carga de 10 tf em um eixo simples, no caso, influenciando diretamente o resultado do dimensionamento da placa. Outro fator a expor é a redução de consumo entre os dois modelos. O consumo por fadiga é reduzido de 415% para 82%, enquanto o consumo por erosão é reduzido de 91% para 45%.

5.4 Método AASTHO

Conforme mencionado anteriormente, este modelo de dimensionamento originalmente empírico baseia-se no desempenho da placa e em métodos de regressão impondo um nível de serventia mínimo. O método baseia o seu cálculo através da projeção de uma placa que obtenha nível de serventia mínima no final do período de uso, atrelando às condições de contorno do projeto. A seguir são apresentados os dados de entrada:

- Número de repetições previsto da carga padrão de 8,2 tf (80,41 kN): $2,27 \times 10^7$;
- Índice de serventia inicial: 4,5;

- Índice de serventia final: 2,5;
- Resistência média atração na flexão do concreto aos 28 dias: 4,2 MPa;
- Módulo de elasticidade do concreto: 30 GPa;
- Coeficiente de reação efetivo da fundação da placa: 53 MPa /m;
- Nível de confiabilidade: 80%;
- Desvio padrão: 0,3;
- Coeficiente de transferência de carga: 2,5;
- Coeficiente de drenagem: 1,25.

Diante da função do pavimento abordado, o estudo de caso recebe o nível de confiabilidade de 80%, similar a um fluxo arterial de um centro urbano. O coeficiente de transferência considera a capacidade do pavimento em transferir a carga entre as placas. Fatores como a existência de barra de transferência, características da subbase e condições do acostamento influenciam no coeficiente de transferência (J). O caso em estudo apresenta barras de transferência, acostamento em concreto e subbase granular, portanto apresenta um coeficiente de transferência de carga igual 2,5.

A espessura da placa foi calculada a partir da Equação 17 de desempenho da AASHTO (1993), que fornece o número admissível de repetições de eixo padrão a partir da pré-seleção da espessura da placa de concreto. Utilizando-se os parâmetros apresentados, foi calculada a quantidade de repetições admissíveis para diversas possibilidades de espessura de placa, conforme indica a Tabela 19.

Tabela 19 - Número de repetições admissíveis pelo método AASHTO

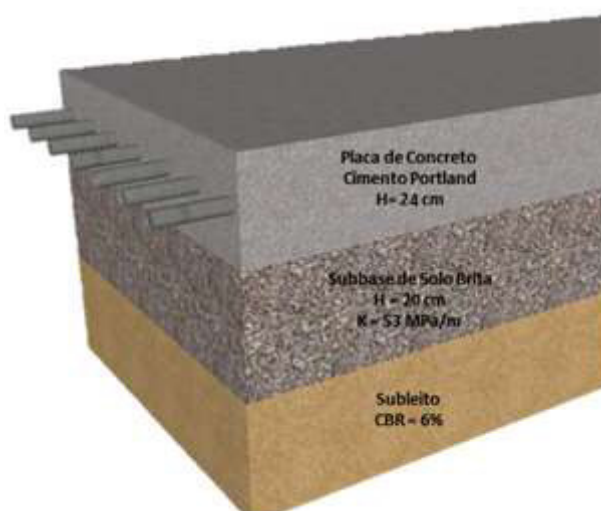
Espessura Placa (cm)	Número de Repetições de eixo padrão admissíveis
20	8,00E+06
21	1,12E+07
22	2,98E+07
23	2,19E+07
24	2,97E+07
25	3,98E+07
26	5,25E+07

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando o número de repetições de eixo padrão, a espessura de 24 cm representa a menor espessura com número de repetições acima do valor de $2,27 \times 10^7$,

considerado o mínimo para o projeto. Logo o método da AASHTO exige que seja adotada a espessura apresentada na Figura 48.

Figura 48 - Estrutura do pavimento de concreto de Cimento Portland calculada segundo o método da AASHTO



Fonte: Autor (2014)

5.5 Definição da Estrutura da Placa

Foram apresentados os dimensionamentos dos seguintes métodos: PCA (1984) e AASHTO (1993). Observa-se uma diferença nos resultados, no qual o método da AASHTO requer uma placa 14,2% mais espessa em relação ao método PCA quando são considerados os mesmos parâmetros de projeto. O modelo AASHTO é, portanto, mais conservador. Entretanto, o método AASHTO leva em conta dados empíricos baseados em trechos norte americanos que podem não se adaptar a realidade do Terminal Antônio Bezerra no Ceará. Dados estes vinculados às condições climáticas e aos materiais empregados quando do desenvolvimento do método nos Estados Unidos.

O comparativo relaciona os resultados obtidos pelos diferentes métodos ao projeto executivo da obra. Conforme mencionado na seção 4 deste trabalho, o pavimento adotado no terminal apresenta subbase com espessura de 20 cm e placa de concreto com espessura de 20 cm. Ao relacionar as espessuras calculadas e as espessuras de projeto, conclui-se que a estrutura deve possuir uma placa com espessura mínima de 21 cm para atender os requisitos do método PCA, expondo assim, que o projeto executado não atende aos métodos estudados neste trabalho.

5.6 Análise com Subbase de Concreto Rolado

Uma terceira simulação foi realizada modificando o material de subbase para concreto rolado. O comparativo de material de subbase foi simulado utilizando as mesmas características de projeto em relação a carga e ao tráfego. O novo cenário adotou um camada de subbase em concreto rolado com espessura de 10 cm, que apresenta um coeficiente de recalque de 120 MPa/m. O dimensionamento pelo método PCA foi adotado como referência para a comparação dos diferentes materiais. A Tabela 20 demonstra os novos valores do fator de fadiga para cada espessura de placa simulada.

Tabela 20 - Fator de fadiga e de erosão para subbase concreto rolado (K=120MPa/m)

Espessura Placa (cm)	Tensão Equivalente, MPa (K=120 MPa/m)	Fator de Fadiga	Fator de Erosão
18	1,41	0,33	2,45
19	1,32	0,31	2,39
20	1,23	0,29	2,33
21	1,15	0,27	2,27

Fonte: DNIT (2005)

Aplicando os fatores coletados em conjunto com o volume de tráfego, foi calculado o desempenho de cada camada. As camadas apresentaram os índices de consumo indicados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultado de consumo com uso de concreto rolado

Espessura (cm)	Consumo por Fadiga (%)	Consumo por Erosão (%)
18	415	290
19	82	94

Fonte: Elaborada pelo Autor

No caso do reforço da subbase com um material mais resistente, o fator mais próximo ao limitante da espessura do pavimento deixou de ser o consumo por fadiga e passou a ser o consumo por erosão. A partir dos resultados demonstrados, a espessura de 19 cm é a opção que apresenta o consumo abaixo de 100%. A substituição da subbase granular por concreto rolado implicou em uma redução de 2 cm na espessura da placa.

5.7 Análise de Custos

A partir dos métodos apresentados, o pavimento do Terminal foi dimensionado utilizando cenários variados. Um levantamento de custos foi realizado baseado nas soluções apresentadas nas seções anteriores para o comparativo financeiro.

Os custos unitários representam o valor da execução do serviço completo por m³. Os valores adotados seguem a tabela da SICRO com data base de 2014 e não incluem a oneração indireta de execução. O resultado financeiro apresenta os valores da execução do m² do pavimento a fim de promover a comparação. A Tabela 22 indica o custo de execução do pavimento em dois cenários: subbase de solo brita e subbase de concreto rolado.

Tabela 22 – Custo por m² do pavimento com uso de solo brita e concreto compactado a rolo

Item	Cenário 1	Cenário 2	Diferença (%)
Base	Solo Brita	Concreto Rolado	-
Espessura	20	10	-
Custo Base	R\$ 6,98	R\$ 10,56	33,9
Tipo de Placa	Simples	Simples	-
Espessura (cm)	21	19	-
Custo Placa	R\$ 74,41	R\$ 67,32	10,5
Custo Total	R\$ 81,39	R\$ 77,88	4,5

Fonte : SICRO (2014)

5.8 Análise e Discussões

O presente trabalho realizou a caracterização do projeto executado no Terminal do Antônio Bezerra e analisou através de diferentes métodos de dimensionamento o pavimento em relação às condições do projeto. A Tabela 23 ilustra a comparação entre as características do pavimento projetado pelos métodos PCA e AASHTO e o projeto de fato executado utilizando os parâmetros apresentados no trabalho.

Tabela 23 - Quadro resumo

Item	Projeto Executivo	PCA 1	AASHTO	PCA 2
Tipo subbase	Solo brita	Solo brita	Solo brita	Concreto Rolado
Espessura subbase (cm)	20	20	20	10
Concreto (MPa)	4,2	4,2	4,2	4,2
Espessura placa de concreto	20	21	24	19
Comprimento placa (m)	3,5	3,5	3,5	3,5
Tipo de placa	Descontinuant e Armado	Concreto Simples	Concreto Simples	Concreto Simples
Período de Projeto (anos)	(-)*	30	30	30
Volume de tráfego (veículos)	(-)*	4,70E+07	4,70E+07	4,70E+07
Custo (R\$)	79,74	81,39	92,02	77,88
Rel. Custo	-2,0%	0	13,0%	-4,5%

Fonte: Elaborada pelo autor

* Os dados de tráfego e período de projeto do pavimento executado não foram localizados no estudo realizado.

Os dimensionamentos foram realizados verificando a concordância do projeto executivo com os parâmetros de carga e tráfego coletados em campo. A análise pelo método PCA da estrutura executada apresenta resultados acima do limite em relação ao consumo por fadiga. Isso indica que a estrutura deverá entrar em ruína antes de atingir os 30 anos de vida. O segundo método apresentou resultado de espessura superior em relação ao executado, solicitando um acréscimo de 20% a espessura.

Objetivando comparar a influência da fundação na estrutura da placa, o estudo simulou o pavimento utilizando concreto rolado como estrutura de subbase. O coeficiente de recalque aumentou 126% empregando uma camada de 10 cm do material. O resultado de espessura da placa apresentou redução de 10,5% comparando os dimensionamentos do mesmo método. Dado que a execução da subbase de concreto rolado apresenta um custo maior em relação ao solo-brita, a análise da escolha de projeto em termos de custo deve contemplar uma visão macro que simule diferentes cenários, a fim de escolher a solução de melhor relação custo benefício. Esta análise deve contemplar o custo de execução de todas as camadas e a execução do serviço pelo Consórcio Responsável.

O tipo de placa utilizada no projeto executivo proporciona um aumento do custo devido a inserção da tela de aço soldada. O resultado esperado é de um maior espaçamento das juntas no pavimento de até 30 metros, entretanto o espaçamento de 3,5 m foi mantido, logo reduzindo a eficiência na execução das juntas. Em projetos futuros, o plano de juntas deve ser revisto a fim de aplicar os benefícios do modelo proposto.

Diante da comparação dos custos apresentados, o projeto executivo representa menor custo, entretanto o modelo não segue a concordância dos dimensionamentos estudados. O modelo AASHTO apresenta maior espessura de concreto, apresentando um acréscimo de 14,2% em relação ao que foi aqui denominado de PCA 1. O uso da subbase de concreto rolado proporciona uma redução de custo de 4% em referência ao modelo com solo brita, entretanto um estudo mais detalhado referente à facilidade de acesso e logística necessária para a execução da base se faz necessário. A proposta do uso do solo brita é adequada devido o projeto possuir abundância do material na obra, levando a um custo reduzido. A proposta apresenta uma camada com espessura reduzida e o uso de um material de acesso diferenciado devido a demolição do antigo Terminal.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado um acompanhamento da execução do pavimento rígido do Terminal Antônio Bezerra. O projeto expõe os benefícios da tecnologia, destacando a baixa manutenção e a capacidade em resistir ao intenso processo de aceleração e desaceleração de veículos pesados no Terminal. O projeto faz parte da iniciativa em requalificar a infraestrutura de transporte público de Fortaleza através de investimentos em frota de ônibus e vias. Durante o estudo, a obra do Anel Viário foi exposta acrescentando ao trabalho uma segunda realidade de obra utilizando pavimento de concreto de Cimento Portland.

O trabalho realizou um estudo exploratório onde foi realizado o levantamento de tráfego e de cargas a fim de se compreender as demandas do projeto em estudo. Destaca-se um estudo comparativo entre os resultados dos dimensionamentos realizados através do método PCA e AASHTO ao modelo adotado pela obra. O comparativo demonstrou que o pavimento executado não seguiu os padrões dos dois modelos adotados, logo sendo necessário rever quais parâmetros de tráfego e cargas foram considerados no dimensionamento.

O trabalho apresenta a capacidade que um dimensionamento tem de se adequar a realidade na obra em termos de materiais disponíveis e metodologia construtiva selecionada. É recomendado para os próximos terminais urbanos um estudo prévio das características da operação, carga e tráfego, e o uso do método PCA para o dimensionamento das placas devido ao outro modelo explorado, AASHTO, adotar referências empíricas de um local com características bastante distintas de Fortaleza.

É preciso destacar ainda que esta monografia restringiu-se a análise da espessura da placa de concreto utilizando valores de carga e tráfego relativo ao presente cenário do transporte público. A partir da tentativa de dimensionar um pavimento similar ao empregado na obra, outras opções de subbase ou tipo de placa de concreto poderiam ter sido simuladas. Variáveis de tráfego devem ser consideradas em pavimentos futuros devido à mudança do tipo de veículo em sua operação.

Tendo em vista as limitações e dificuldades apresentadas, são sugeridos os seguintes estudos futuros:

- ✓ Analisar o impacto na pavimentação em relação à implantação de ônibus articulados na operação do sistema público de transporte;
- ✓ Realizar acompanhamento do desempenho do pavimento rígido do Terminal durante a vida útil, incluindo medidas de deflexão, bem como de parâmetros funcionais;
- ✓ Realizar o estudo para a escolha do material de subbase objetivando um melhor custo benefício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO, 2008. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Manual of Practice*, Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABCP, 2007. *Curso de Tecnologia de Pavimentos de Concreto*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland.

American Concrete Pavement Association, 1991. *Proper Use of Isolation and Expansion Joints in Concrete Pavements*, Illinois: Concrete Information.

ANDRADE, D. S., SILVA, D. A. A. & GAYER, A. L., 2004. *O comportamento do concreto de alto desempenho com sílica ativa e metacaulim como adições químicas minerais*. Goiânia.

AOKI, J., 2009. *Concreto Compactado a Rolo*. São Paulo: Tempestade Comunicação.

BALBO, J. T., 2003. *Terminologia de Materiais e Pavimentos*, São Paulo.

BALBO, J. T., 2005. *Considerações Básicas sobre Fadiga do Concreto de Cimento Portland*, São Paulo

BALBO, J. T., 2005. *Construção e Pavimentação*. São Paulo: s.n.

BALBO, J. T., 2009. *Pavimentos de Concreto*. São Paulo: Oficinas de Texto.

BALBO, J. T., 2013. *Composição de Tráfego e Cálculo Número N*, São Paulo: Univesidade de São Paulo.

CALDA, A. G., 2007. *Juntas em Pavimentos de Concreto*, São Paulo.

CASTRO, B. A. C. D., 2003. *Fator de Erosão e Fator de Fadiga*, Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

CNI, 2011. *Retratos da Sociedade Brasileira: Locomoção Urbana*, São Paulo: CNI-Ibope.

CRONEY, P. & CRONEY, D., 1997. *Design and Performance of Road Pavement*. 3 ed. s.l.:McGraw-Hill Professional Publishing.

DIAS, C., 2003. *Aplicação do Pavimento Rígido no Trecho Oeste do Rodoanel Mario Covas*, SÃO PAULO.

DNIT, 2004. *Pavimento rígido - Execução de pavimento rígido com equipamentos de pequeno porte - Especificação de serviço Norma DNIT 047/2004 - ES*, Rio de Janeiro: s.n.

DNIT, 2005. *Manual de Pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro : Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

DNIT, 2006. *Manual de Estudos de Tráfego*, Brasília: Ministérios dos Transportes.

ETUFOR, 2014. *Integração no Sistema de Transporte Publico Coletivo de Fortaleza*, Fortaleza: Prefeitura de Fortaleza.

GEWEHR, J., 2013. *Asfalto de Qualidade*. São Paulo.

HUANG, Y. H., 1993. *Pavement Analysis and Design*, New Jersey: Prentice Hall.

HUANG, Y. H., 2004. *Pavements Analysis and Design*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall: ISBN 013-142473-4.

JUNIOR, J. C. S., 2007. *Estudo dos Pavimentos Industriais de Concreto e Projeto de Juntas*, Salvador.

KALOUSH, K. E. & RODEZNO, M. C., 2011. *Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos*, Temp,AZ: ANTT.

KREMPEL, A. F. & ANDRIOLO, F. R., 2008. *Barragens em CCR- Especificações e Técnicas*.

MACLEOD, D. R. & MONISMITH, C. L., 1982. Comparison of Solutions for Stresses in Plain Jointed Portland Cement Concrete Pavements. *Transportation Research Record* 888, pp. 22-30.

MARCOPOLO, 2014. *Marcopolo Gran Torino*. [Online] Available at: http://www.marcopolo.com.br/marcopolo/produtos/produto/novo_torino [Accessed 28 10 2014].

MEHTA, P. K., 1994. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, São Paulo: Pini.

Mercedes-Benz, 2014. *Dados Técnicos OF1519*. [Site]
Disponível: <https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/onibus/onibus-urbano/dados-tecnicos/dados-tecnicos-of-1519.pdf>

[Acessado em 15 07 2014].

PACKARD, R. G. & TAYABJI, S. D., 1985. New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and Street Pavements. *3rd International Conference On Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp. 225-236.

PEREIRA, D. D. S., 2003. *Estudo do Comportamento de Pavimentos de Concreto Simples em Condições de Aderencia Entre Placas de Concreto e Case Cimentada ou Asfáltica*, São Paulo: Universidade de São Paulo.

PETERLINI, P. S., 2006. *Carga por Eixo e Fatores de Veiculos Obtidos em Rodovias Federais Concessionadas do Estado do Paraná*, Florianopolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C. D. & SANTOS, S. P., 2004. *Estrutura de Concreto*. São Paulo: USP.

PITTA, M. R., 1978. *Dimensionamento de pavimentos rodoviários de concreto para o caso de eixos tandem triplos*. São Paulo: ABCP.

PITTA, M. R., 1990. *Dimensionamento do Pavimentos Rodoviários de Concreto*. 9 ed. São Paulo: ET-14.

Revista Techne, 2012. Execução de Juntas Piso de Concreto. *Revista Techne*, p. 05.

RODRIGUES, L. F., 2008. *Juntas em Pavimentos de Concreto: Dispositivo de Transferência de Carga*. São Carlos.

RODRIGUES, P. P. F., 2006. *Pavimentos Industriais de Concreto Armado*. 2 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Telas Soldadas.

RUFINO, D. M. S., 1997. *Estudo dos Procedimentos de Dimensionamento e dos Novos Programas de Análise de Tensão em Pavimentos de Concreto*, Rio de Janeiro.

SANCHES, J. G., FORTES, R. M., NETO, A. Z. & ASSUMPÇÃO, M. S., 2001. *High Performance Concrete Pavement*. Auburn.

SILVA, R. D. N. D., 2010. *Um Estudo Sobre Concreto de Alto Desempenho*, Feira de Santana.

SINDIONIBUS, 2014. *Operação de Ônibus Terminal Antonio Bezerra* [Relatório] (15 09 2014).

U.S. Department of Transportation , 2009. *TechBrief: Precast Prestressed Concrete Pavement for Reconstruction and Rehabilitation of Existing Pavements*. [Online] Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/if09008/index.cfm> [Acessado em 10 Agosto 2014].

WEISS, W. J. & OZYLDIRIM, C., 2007. *Concrete cracking: agency needs, field observations, fundamental material behavior, and modeling*, Washington DC: Transportation Reserach Board.

APÊNDICE - NOMOGRAMAS

Figura 49 - Nomograma de fadiga executado para dimensionamento para $h = 20$ cm

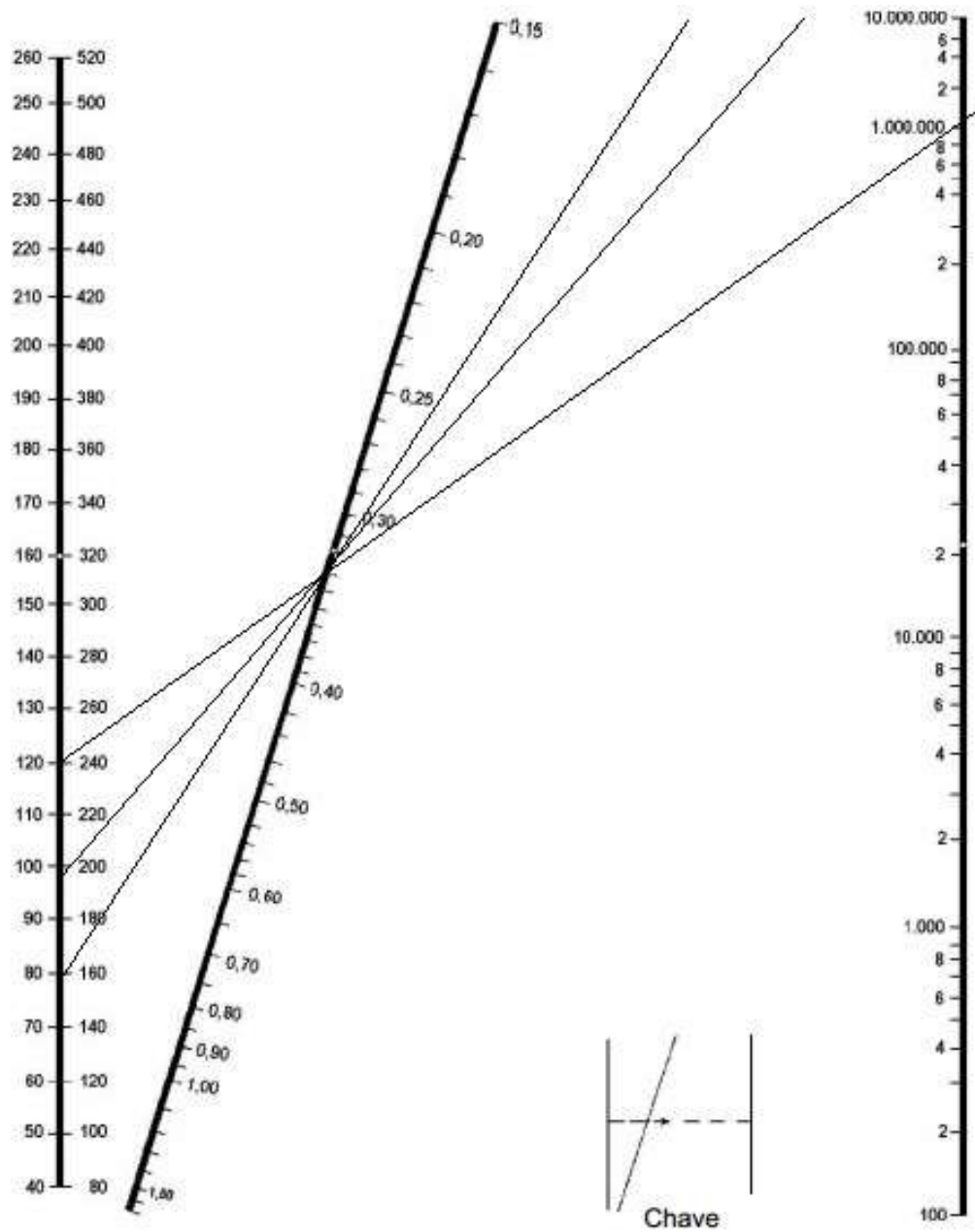


Figura 50 - Nomograma de erosão executado para dimensionamento para $h = 20$ cm

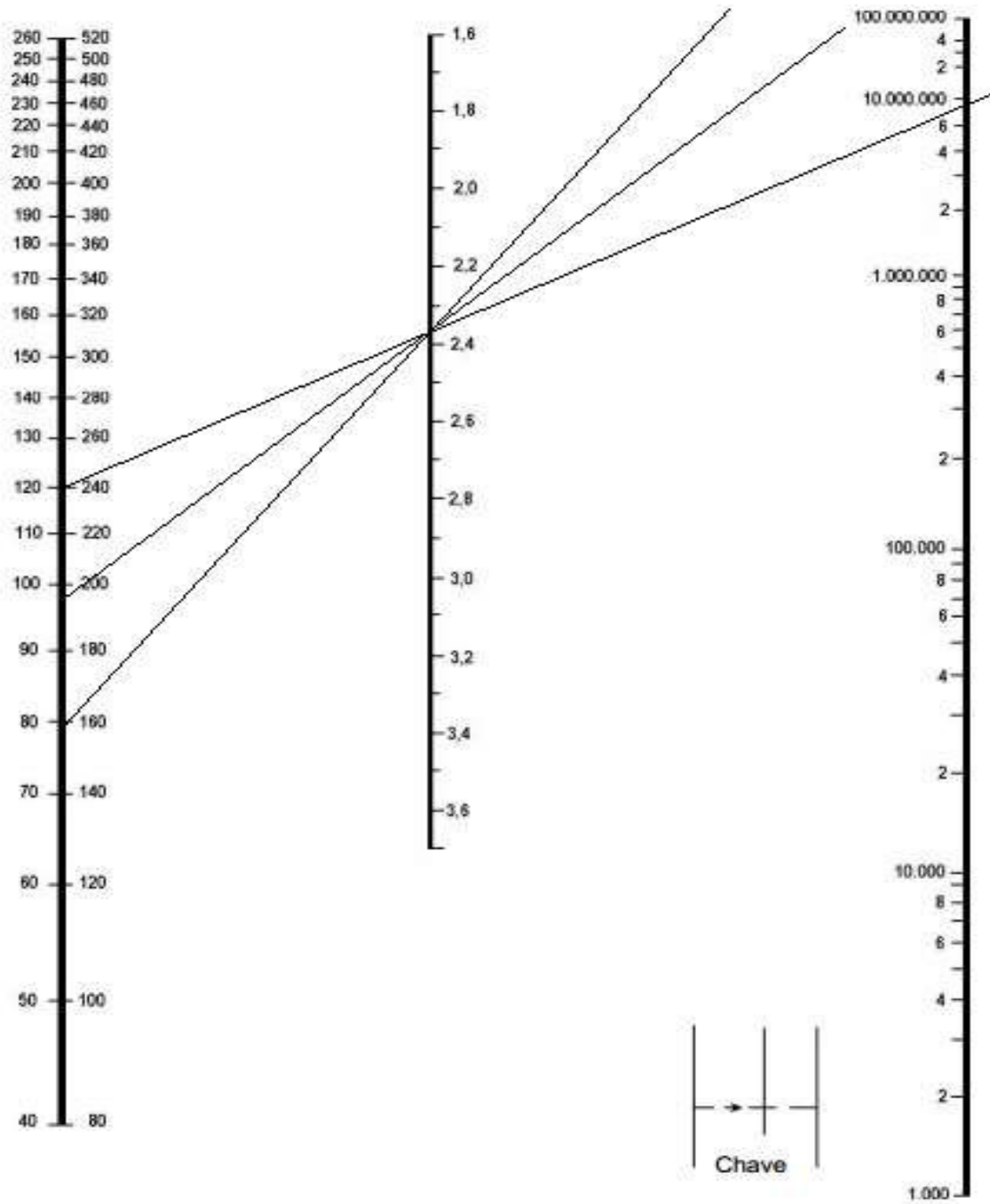


Figura 51 - Nomograma de fadiga executado para dimensionamento para $h = 21\text{ cm}$

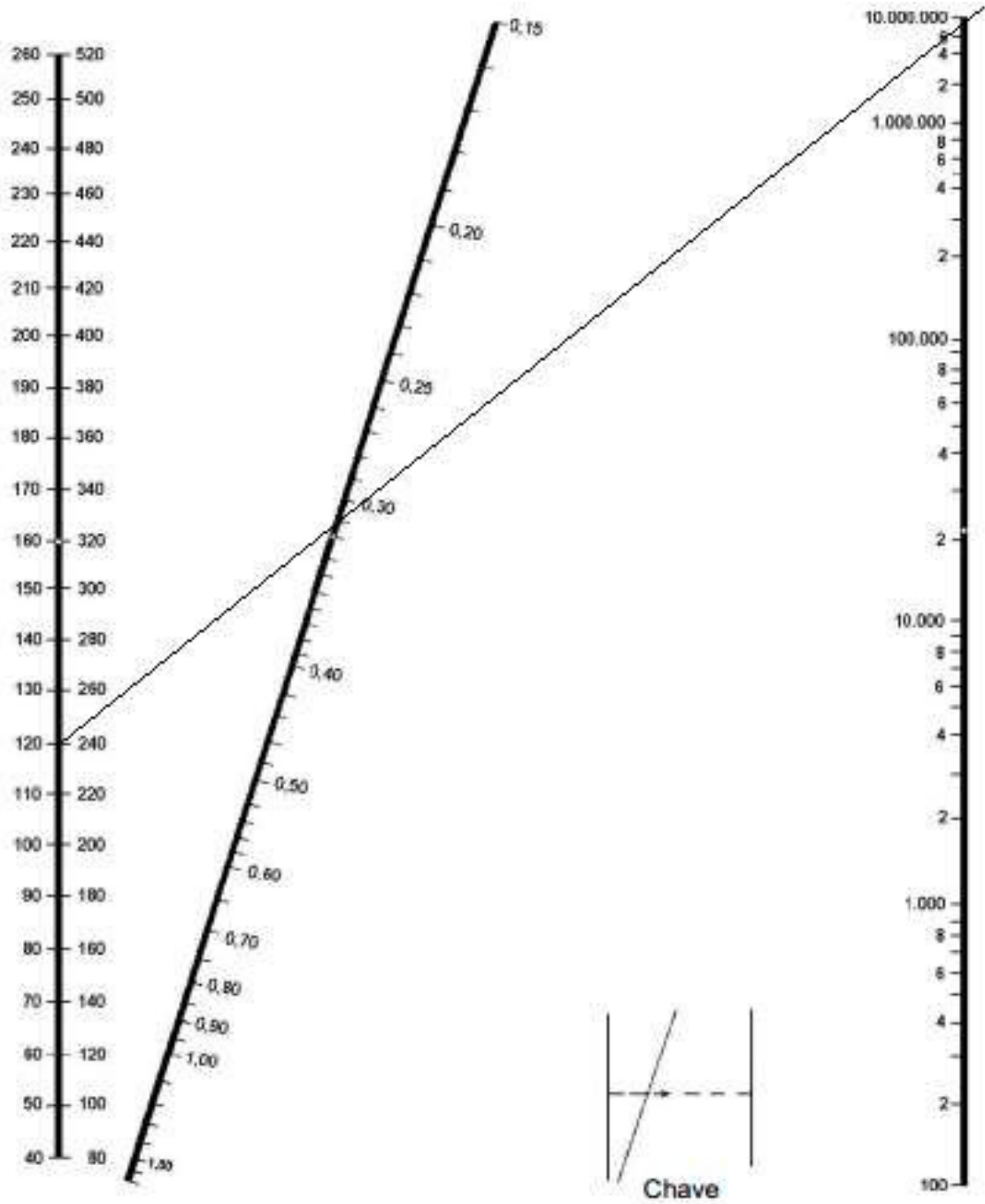


Figura 52 - Nomograma de erosão executado para dimensionamento para $h = 21$ cm

