



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia


Priscilla Formoso da Cunha

**Dimensionamento e análise numérica de
pisos industriais de concreto**

Rio de Janeiro
2013

Priscilla Formoso da Cunha

Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Bird Burgos

Rio de Janeiro

2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C972 Cunha, Priscilla Formoso da.
Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto / Priscilla Formoso da Cunha. - 2013.
342fl.

Orientadora: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares.
Coorientador: Rodrigo Bird Burgos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Pisos de concreto – Dissertações. I. Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 692.522

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

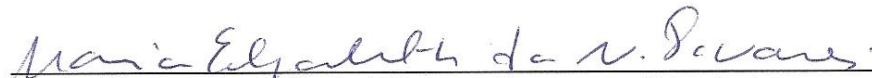
Priscilla Formoso da Cunha

Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 28 de junho de 2013.

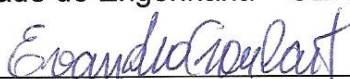
Banca Examinadora:




Profa. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares – Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Rodrigo Bird Burgos – Coorientador
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Evandro da Silveira Goulart
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Rio de Janeiro

2013

DEDICATÓRIA

A Deus por permitir mais essa vitória e a minha amada família pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade, sabedoria e auxílio nos momentos difíceis.

A minha mãe (Jussara), a minha irmã (Nathália) e aos meus avós (Mathias e Marlene) pelo amor e incentivo.

A minha orientadora, professora doutora Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares, pela dedicação para o desenvolvimento deste trabalho e confiança.

Ao meu coorientador, professor doutor Rodrigo Bird Burgos, pela paciência e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor doutor Evandro da Silveira Goulart, pela parceria na produção dos artigos científicos apresentados na XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural e no 54º Congresso Brasileiro de Concreto (CBC), organizado pelo Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON).

Aos professores doutores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários da secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV), do LABBAS e do Departamento de Estruturas e Fundações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo profissionalismo.

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo companheirismo, em especial, ao Rafael Rangel Barboza pela constante troca de conhecimentos ao longo de todo curso.

Aos meus colegas da Fundação Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Rio de Janeiro (DER – RJ) pela compreensão.

À FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo apoio financeiro.

“Confia no Senhor de todo o teu coração e não te estribes no teu próprio entendimento. Reconhece-o em todos os teus caminhos, e Ele endireitará as tuas veredas.”

Provérbios de Salomão: 3:5-6.

RESUMO

CUNHA, Priscilla Formoso da. *Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto*. 2013. 342 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Os pisos industriais devem atender aos critérios de segurança, funcionalidade e durabilidade das estruturas de concreto. A fim de analisar o desempenho de placas de concreto apoiadas sobre base elástica quando submetidas a ações diretas e indiretas, foram elaborados diversos modelos analíticos e empíricos. Com o avanço tecnológico e o advento de *softwares* desenvolvidos através de processos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF), a aplicação desses modelos foi facilitada. Este trabalho aborda os métodos de cálculo existentes e utilizados na execução dos projetos estruturais de pisos industriais de concreto.

Palavras-chave: Estruturas de concreto armado; Pisos industriais de concreto; Análise numérica.

ABSTRACT

CUNHA, Priscilla Formoso da. *Design and numerical analysis of concrete industrial floors*. 2013. 342 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

The industrial floors must meet the criteria of security, functionality and durability of concrete structures. In order to analyze the performance of concrete slabs supported on elastic foundation when subjected to direct and indirect actions, were developed several analytical and empirical models. With advances in technology and the advent of software developed by numerical processes such as finite element method, the application of these models was facilitated. This paper presents the calculation methods used in the implementation of structural designs of concrete industrial floors.

Keywords: Reinforced concrete structures; Industrial concrete floors; Numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Primeiro pavimento rodoviário de concreto de cimento <i>Portland</i> (Silva, 2008 e http://www.maymarking.com - consulta realizada em junho de 2012)	29
Figura 1.2 – Rodovia Caminho do Mar (São Paulo) (http://www.sempretops.com - consulta realizada em junho de 2012)	32
Figura 1.3 – Rodovia dos Imigrantes (São Paulo) (http://www.novomilenio.inf.br - consulta realizada em junho de 2012)	33
Figura 1.4 – Rodoanel Mário Covas (São Paulo) (http://www.wikipedia.org – consulta realizada em junho de 2012).	34
Figura 1.5 – Seção tipo: Pavimento de concreto simples (Balbo, 2009)	37
Figura 1.6 – Seção tipo: Pavimento de concreto simples com armadura distribuída (Rodrigues et al., 2006)	39
Figura 1.7 – Tela eletrossoldada de aço CA – 60 (http://www.ibts.org.br – consulta realizada em junho de 2012)	39
Figura 1.8 – Seção tipo: Pavimento de concreto estruturalmente armado (Rodrigues et al., 2006).....	41
Figura 1.9 – Seção tipo: Pavimento de concreto protendido (Rodrigues et al., 2006).....	43
Figura 1.10 – Execução de piso industrial em concreto protendido (Senefonte e Barros, 2012)	44
Figura 1.11 – Seção transversal: Pavimento de concreto reforçado com fibras (Rodrigues et al., 2006).....	45
Figura 1.12 - Concreto reforçado com fibras de aço (Rodrigues, s.d.).....	47
Figura 1.13 – Pista experimental: <i>Whitetopping</i> (http://sites.poli.usp.br – consulta realizada em junho de 2012)	50
Figura 1.14 – <i>Whitetopping</i> ultradelgado: Sistema de moldagem sobreposta (A) e encaixada (B) (Balbo, 2009).....	51
Figura 1.15 - Seção Tipo: Piso industrial de concreto, Rodrigues (s.d.).....	56
Figura 2.1 - Série padrão de peneiras (a) e curva granulométrica (b) (http://www.wikipedia.org – consulta realizada em junho de 2012)....	60

Figura 2.2 -	Ensaio de sedimentação (http://www.wikipedia.org – consulta realizada em junho de 2012).....	61
Figura 2.3 –	Limites de Atterberg (http://www.wikipedia.org – consulta realizada em junho de 2012).....	62
Figura 2.4 –	Aparelho de Casagrande para determinação do limite de liquidez (LL) (http://www.wikipedia.org – consulta realizada em junho de 2012)	62
Figura 2.5 –	Gráfico n.º de golpes x umidade para determinação do LL (Ortigão, 2007)	63
Figura 2.6 –	Ensaio para determinação do limite de plasticidade (LP) (Ortigão, 2007)	63
Figura 2.7 –	Gráfico de Plasticidade (Rodrigues e Cassaro, 1999)	64
Figura 2.8 –	Ilustração do ensaio de SPT	70
Figura 2.9 –	Prensa para ensaio de Índice de Suporte Califórnia (http://www.dtt.ufpr.br - consulta realizada em agosto de 2012)	74
Figura 2.10 –	Sub-base granular (a) e detalhe de sub-base granular compactada (b) (http://www.pisosindustriais.com.br – consulta realizada em julho de 2012)	80
Figura 2.11 –	Detalhe da base/sub-base de BGTC (http://www.martinslanna.com.br - consulta realizada em julho de 2012).....	86
Figura 2.12 –	Detalhe da base de CCR (http://www.cimentoitambe.com.br - consulta realizada em julho de 2012)	88
Figura 3.1 –	Ensaio de abatimento (Cerqueira, 2010)	99
Figura 3.2 -	Retração plástica (Holland, 2005 apud Balbo, 2009)	101
Figura 3.3 –	Posicionamento da fissura de retração induzida (Balbo, 2009) (continua)	104
Figura 3.3 –	Posicionamento da fissura de retração induzida (Balbo, 2009) (conclusão).....	105
Figura 3.4 –	Plano de concretagem (Rodrigues, 2006).....	110
Figura 3.5 –	Espaçadores: Metálico – caranguejo (a); Metálico – treliça (b) e Plástico (c) (http://www.masterbuild.com.br - consultas realizadas em dezembro de 2012)	111
Figura 3.6 –	Equipamento: <i>Laser Screed</i> (Rodrigues, 2006)	114

Figura 3.7 – Equipamento: Rodo de corte (Rodrigues, 2006)	117
Figura 3.8 – Equipamento: Acabadora superficial (Rodrigues, 2006)	119
Figura 4.1 – Modelos de Winkler: Fundação rasa + subleito (a) e Placa + subleito (b) (Balbo, 2009)	125
Figura 4.2 – Reação do terreno de fundação: Modelo de Winkler x Modelo solo real (Balbo, 2009)	125
Figura 4.3 – Esforços solicitantes por unidade de comprimento de placa quando em flexão, Balbo (2009)	129
Figura 4.4 – Representação do raio de rigidez relativa (Oliveira, 2000)	132
Figura 4.5 – Posições de configurações de carregamentos analisadas por Westergaard (1926) (Oliveira, 2000)	133
Figura 4.6 – Empenamento da placa de concreto: Variação dia/noite (Oliveira, 2000).....	140
Figura 4.7 – Valores dos coeficientes de tensão C_x e C_y de Bradbury (Rodrigues et al., 2006).....	142
Figura 4.8 – Empilhadeiras dotadas de rodames pneumáticos: Eixo de rodagem simples (a); Eixo de rodagem dupla (b)	144
Figura 4.9 – Eixo de rodagem simples (a) e Eixo de rodagem dupla (b) (Rodrigues <i>et al.</i> , 2006	145
Figura 4.10 – Estoque de paletes em estanterias (Revista <i>Logweb</i> , 2010)	149
Figura 4.11 – Estoque de paletes diretamente sobre o piso (Revista <i>Logweb</i> , 2010)	154
Figura 4.12 – Carga uniformemente distribuída: Momento negativo no corredor (Rodrigues, s.d.).....	155
Figura 4.13 – Coeficientes de atrito para diversas condições de apoio (Rodrigues et al., 2006).....	158
Figura 5.1 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso I.....	239
Figura 5.2 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso II – a.....	239
Figura 5.3 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso II – b.....	240
Figura 5.4 – Análise dos resultados - Momento fletor máximo ($M_{máx}$): Caso III.....	240

Figura 5.5 – Análise dos resultados: Momento fletor negativo máximo ($M_{máx}^-$).....	244
Figura 5.6 – Análise dos resultados: Momento fletor positivo máximo ($M_{máx}^+$)	244
Figura 5.7 – Análise dos resultados: Momento fletor máximo – Direção longitudinal da placa	246
Figura 5.8 – Análise dos resultados: Momento fletor máximo – Direção transversal da placa	246
Figura 5.9 – Análise dos resultados – Tensão de tração máxima: Caso I	253
Figura 5.10 – Análise dos resultados – Tensão de tração máxima: Caso II – a.....	253
Figura 5.11 – Análise dos resultados – Tensão de tração máxima: Caso II – b.....	253
Figura 5.12 – Análise dos resultados – Tensão de tração máxima: Caso III	254
Figura 5.13 – Análise dos resultados – Deflexão máxima: Caso I	259
Figura 5.14 – Análise dos resultados – Deflexão máxima: Caso II	259
Figura 5.15 – Análise dos resultados – Deflexão máxima: Caso III	259

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Autoestradas: Alemanha x Suíça (1930 a 1960), (Balbo, 2009) (continua)	30
Tabela 1.1 – Autoestradas: Alemanha x Suíça (1930 a 1960), (Balbo, 2009) (conclusão).....	31
Tabela 1.2 – Dimensões máximas da placa de concreto não armada, PCA (2001)	37
Tabela 1.3 – Classificação dos pisos industriais de concreto quanto à escola, Cristelli (2010).....	54
Tabela 2.1 – Série padrão de peneiras: Abertura da malha (Ortigão, 2007)	60
Tabela 2.2 – Diâmetro das partículas (Rodrigues et al., 2006).....	60
Tabela 2.3 – Expansão <i>versus</i> plasticidade (Rodrigues et al., 2006)	64
Tabela 2.4 – Classificação dos solos de acordo com a ASTM (continua)	65
Tabela 2.4 – Classificação dos solos de acordo com a ASTM (conclusão).....	66
Tabela 2.5 – Nomenclatura USC (Chodounsky e Viecili, 2007).....	66
Tabela 2.6 – Classificação dos solos de acordo com o sistema USC (Chodounsky e Viecili, 2007).....	67
Tabela 2.7 – Classificação dos solos de acordo com o sistema HRB (adotado pela AASHTO)	67
Tabela 2.8 – Classificação USC versus classificação HRB (Chodounsky e Viecili, 2007).....	68
Tabela 2.9 – Quadro comparativo entre solos de comportamento laterítico e saprolítico (Chodounsky e Viecili, 2007)	69
Tabela 2.10 – Resistência à penetração (Chodounsky e Viecili, 2007)	71
Tabela 2.11 – Correlação: Tipo de solo x Capacidade de suporte (<i>k</i>),	75
Tabela 2.12 – Tipos de sub-base (Chodounsky e Viecili, 2007)	79
Tabela 2.13 – Granulometria da brita graduada (DNER in Rodrigues et al., 2006) ..	79
Tabela 2.14 – Módulos resilientes de materiais para sub-base de pavimentos de concreto (Rodrigues et al., 2006).....	81
Tabela 2.15 – Faixa granulométrica recomendável para sub-bases de BGTC.....	84
Tabela 2.16 - Dados sobre bases e sub-bases do tipo CCR (Trichês, 1994)	87
Tabela 3.1 – Exigências químicas do cimento (ABCP, 2002).....	92

Tabela 3.2 – Exigências físicas e mecânicas do cimento (ABCP, 2002)	93
Tabela 3.3 – Valores típicos para consideração de concretos secos ou fluidos, Balbo (2009).....	99
Tabela 3.4 – Distância máxima entre espaçadores, Chodounsky e Viecili (2007)	112
Tabela 4.1 – Fadiga do concreto x Fator de segurança (Rodrigues e Cassaro, 1999).....	147
Tabela 5.1 – Momento fletor máximo – $M_{máx}$ (kNxm/m): Resultados teóricos	172
Tabela 5.2 – Esforços e deflexões relativas em uma placa de concreto simples (borda livre), Rodrigues et al. (2006).....	173
Tabela 5.3 – Momentos fletores máximos relativos à M_{ij} : Resultados teóricos	173
Tabela 5.4 – Tensão de tração na flexão máxima – $\sigma_{máx}$ (MPa): Resultados teóricos	174
Tabela 5.5 – Deflexões máximas – $\omega_{máx}$ (mm): Resultados teóricos	176
Tabela 5.6 – Limites para deslocamentos em estruturas de concreto, ABNT NBR 6.118/2007	177
Tabela 5.7 – Limites para deslocamentos segundo ABNT NBR 6.118/2007	177
Tabela 5.8 – Desempenho das juntas de pisos industriais de concreto, Revista Recuperar (setembro/outubro, 2006)	177
Tabela 5.9 – Deflexões máximas relativas à D_{ij} : Resultados teóricos	178
Tabela 5.10 – Momento fletor máximo ($M_{máx}$) [kNxm/m] - Resultados teóricos	232
Tabela 5.11 – Momento fletor máximo ($M_{máx}$) [kNxm] – Resultados modelos unidimensionais	232
Tabela 5.12 – Momento fletor máximo ($M_{máx}$) [kNxm/m] - Resultados modelos bidimensionais	233
Tabela 5.13 – Envoltórias de momento fletor [kNxm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples.....	241
Tabela 5.14 – Envoltórias de momento fletor [kNxm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla (continua)	241
Tabela 5.14 – Envoltórias de momento fletor [kNxm/m] - Resultados modelos unidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla (conclusão).....	242

Tabela 5.15 – Envoltórias de momento fletor [kNxm/m] - Resultados modelos bidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem simples	242
Tabela 5.16 – Envoltórias de momento fletor [kNxm/m] - Resultados modelos bidimensionais: Tráfego de empilhadeira com eixo de rodagem dupla	242
Tabela 5.17 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) [MPa] – Resultados teóricos	248
Tabela 5.18 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) [MPa] – Resultados modelos unidimensionais	249
Tabela 5.19 – Tensão de tração na flexão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) [MPa] – Resultados modelos bidimensionais	249
Tabela 5.20 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados teóricos.....	255
Tabela 5.21 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados modelos unidimensionais	255
Tabela 5.22 – Deflexão máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$) [mm] – Resultados modelos bidimensionais	255

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
IBTS	Instituto Brasileiro de Telas Soldadas
ANAPRE	Associação Nacional de Pisos e Revestimento de Alto Desempenho
CAD	Concreto de alto desempenho
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
IBTS	Instituto Brasileiro de Telas Soldadas
NBR	Norma Brasileira
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PTI	<i>Post - Tensioning Institute</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A ou A'	área de contato efetiva dos pneus
A_s	área da armadura
$A_{s,mín}$	armadura longitudinal de flexão mínima
$A_{s,máx}$	armadura longitudinal de flexão inferior máxima
$A'_{s,máx}$	armadura longitudinal de flexão superior máxima
A_{mont}	área dos apoios
$A_{s,ret}$	área de aço da armadura de retração
a	raio da área carregada
a_1	distância indicada na Figura 4.5
B	largura considerada (geralmente igual a 1,00 m)
b	raio corrigido da área carregada
b_w	largura da seção transversal de concreto
CBR	índice de suporte em relação à amostra padrão (Ensaio CBR)
C_{adm}	carga uniformemente distribuída admissível
C_x e C_y	coeficientes de tensão de Bradbury
c	espessura de cobrimento
c_1 e c_2	lados da área retangular de aplicação da força
D	módulo de rigidez da placa de concreto
d	altura útil da seção transversal de concreto
d_1	distância livre entre as barras emendadas
E	módulo de elasticidade longitudinal do concreto (Módulo de Young)
$F.S.$	fator de segurança devido à fadiga
F_{sd}	força atuante de cálculo
f	coeficiente de atrito entre a sub-base e a placa de concreto
f_{bd}	resistência máxima de aderência
f_{cd}	resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{cj}	resistência à compressão do concreto da amostra j
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão
f_{ctd}	resistência de cálculo do concreto à tração
$f_{ct,m}$	resistência à tração na flexão média

$f_{ctM,k}$	resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) do concreto
f_{yd}	resistência de cálculo do aço
f_{yk}	resistência característica do aço
h	espessura da placa de concreto
I_g	momento de inércia da seção não fissurada;
k	módulo de reação do terreno de fundação (subleito)
L	comprimento da placa de concreto
l	raio de rigidez relativa
l_b	comprimento de ancoragem básico
$l_{b,nec}$	comprimento de ancoragem necessário
l_t	comprimento de traspasse
M_1 e M_2	momento fletor máximo do concreto (momento de fissuração do concreto simples)
M_c	momento fletor máximo para carga no canto da placa
M_k	momento atuante
M_y	momento fletor na direção y
m	média entre os lados da área de aplicação da força
N	número de blocos determinados pela carta de influência número 02
P	carga aplicada
P_{cor}	carga do eixo mais carregado minorada
P_{CBR}	pressão que provoca uma dada penetração padrão (Ensaio CBR)
P_{mont}	peso do montante
P_r	carga atuante em uma roda
p	pressão de reação do terreno de fundação (subleito)
p'	pressão unitária de contato aplicada sobre uma placa rígida (Prova de carga)
Q	tensão de trabalho
Q_{cor}	tensão de trabalho minorada
Q_{mont}	tensão de trabalho
q	pressão de enchimento dos pneus
q'	carga externa atuante na superfície da placa de concreto
s	espaçamento entre as rodas
ΔT	gradiente de temperatura
u	perímetro crítico para área retangular

W	largura da placa de concreto
x	distância do ponto de aplicação da carga P ao canto da placa
y_t	distância da linha neutra a fibra mais tracionada.
α_c	coeficiente de dilatação térmica do concreto
α_1	igual a 0,70
α_2	igual a 2,00
γ	constante de Euler
$\gamma_{concreto}$	peso específico do concreto
γ_s	coeficiente de segurança do aço (geralmente, adota-se: 1,15)
∇	operador bidimensional de Laplace
δ	recalque
η_1	igual a 2,25 para barras nervuradas
η_2	igual a 1,00 para situações de boa aderência, como no caso de barras de ligação
η_3	igual a 1,00 para diâmetros inferiores a 32,00 milímetros; para diâmetros maiores que 32,00 milímetros, o valor é dado pela equação a seguir (4.81)
ρ	taxa de armadura de flexão
$\rho_{s,máx}$	taxa máxima de armadura
$\rho_{s,mín}$	taxa mínima de armadura
ρ_x	taxa de armadura de flexão na direção x
ρ_y	taxa de armadura de flexão na direção y
σ_{adm}	tensão de tração admissível do concreto
σ_{apoio}	tensão normal de apoio
$\sigma_{apoio,adm,b}$	tensão normal admissível de apoio para forças de borda ou de canto da
$\sigma_{apoio,adm,i}$	tensão normal admissível de apoio para forças no interior da placa
σ_{bc}	tensão de tração na flexão máxima para carga uniformemente distribuída em área circular na borda da placa
σ_{bsc}	tensão de tração na flexão máxima para carga uniformemente distribuída em área semicircular na borda da placa
σ_c	tensão de tração na flexão máxima para carga o canto da placa
σ_i	tensão de tração na flexão máxima para carga no interior da placa
σ_s	tensão admissível do aço, igual a 2/3 da tensão de escoamento do aço

$\sigma_{x,b}$	tensão de tração na borda da placa, devida ao empenamento
$\sigma_{x,i}$	tensão de tração no interior da placa, na direção do comprimento
$\sigma_{y,i}$	tensão de tração no interior da placa, na direção da largura
τ_{Sd}	tensão atuante de cálculo
τ_{Rd}	tensão resistente de cálculo
ν	coeficiente de Poisson do concreto
ϕ	diâmetro da barra de aço
ω	deslocamento (deflexão)
ω_c	deflexão máxima para carga no canto da placa
ω_b	deflexão máxima para carga na borda da placa
ω_{bc}	deflexão máxima para carga uniformemente distribuída em área circular na borda da placa
ω_{bsc}	deflexão máxima para carga uniformemente distribuída em área semicircular na borda da placa
ω_i	deflexão máxima para carga no interior da placa

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	25
1	PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E PISOS INDUSTRIAIS DE CONCRETO	29
1.1	Histórico	29
1.2	Pavimentos rodoviários de concreto no Brasil – Atualidade	34
1.3	Tipos de pavimentos de concreto	36
1.3.1	<u>Pavimentos de concreto simples</u>	36
1.3.2	<u>Pavimentos de concreto simples com armadura distribuída</u>	39
1.3.3	<u>Pavimentos de concreto simples com armadura contínua</u>	40
1.3.4	<u>Pavimentos de concreto estruturalmente armado</u>	41
1.3.5	<u>Pavimentos de concreto protendido</u>	42
1.3.6	<u>Pavimentos de concreto reforçado com fibras</u>	45
1.3.7	<u>Pavimentos de blocos intertravados de concreto</u>	48
1.3.8	<u>Pavimentos de placas de concreto pré-moldadas</u>	49
1.3.9	<u>Whitetopping</u>	50
1.3.10	<u>Whitetopping ultradelgado</u>	51
1.4	Pisos industriais de concreto	53
1.4.1	<u>Introdução</u>	53
1.4.2	<u>Estrutura básica</u>	55
2	TERRENO DE FUNDAÇÃO (SUBLEITO) E SUB-BASES	57
2.1	Terreno de fundação (Subleito)	57
2.1.1	<u>Considerações iniciais</u>	57
2.1.2	<u>Solos</u>	58
2.1.3	<u>Ensaio de caracterização e classificação dos solos</u>	59
2.1.3.1	Ensaio de caracterização dos solos	59
2.1.3.2	Classificação dos solos	65
2.1.4	<u>Investigações geotécnicas</u>	70
2.1.4.1	Sondagem de simples reconhecimento à percussão (SPT)	70
2.1.4.2	Prova de carga	71
2.1.4.3	Índice de suporte Califórnia (ISC)	73
2.2	Sub-bases	75

2.2.1	<u>Conceituação e funções básicas da sub-base</u>	75
2.2.2	<u>Tipos de sub-base</u>	78
2.2.2.1	Sub-bases granulares.....	79
2.2.2.2	Sub-bases estabilizadas.....	81
3	TECNOLOGIA DO CONCRETO APLICADA À CONSTRUÇÃO DE PISOS INDUSTRIAIS	89
3.1	Introdução	89
3.2	Materiais básicos componentes do concreto	90
3.2.1	<u>Cimento <i>Portland</i></u>	90
3.2.2	<u>Adições minerais</u>	94
3.2.3	<u>Agregado</u>	95
3.2.4	<u>Água</u>	96
3.2.5	<u>Aditivos</u>	97
3.3	Propriedades do concreto	98
3.3.1	<u>Concreto fresco</u>	98
3.3.1.1	Trabalhabilidade	98
3.3.1.2	Segregação e exsudação	100
3.3.1.3	Retração plástica.....	101
3.3.2	<u>Concreto endurecido</u>	103
3.3.2.1	Retração hidráulica ou retração por secagem.....	103
3.3.2.2	Retração térmica de hidratação ou climática.....	105
3.3.2.3	Resistência mecânica.....	106
3.3.2.4	Resistência à abrasão	108
3.4	Concretagem dos pisos industriais	109
3.4.1	<u>Assentamento das fôrmas</u>	109
3.4.2	<u>Posicionamento das armaduras</u>	111
3.4.3	<u>Mistura do concreto</u>	112
3.4.4	<u>Lançamento do concreto</u>	113
3.4.5	<u>Adensamento do concreto</u>	114
3.4.6	<u>Acabamento superficial</u>	115
3.4.6.1	Regularização da superfície de concreto.....	116
3.4.6.2	Desempeno da superfície de concreto	117
3.4.6.3	Alisamento superficial.....	118
3.4.7	<u>Cura</u>	119

3.4.7.1	Cura inicial.....	119
3.4.7.2	Cura complementar	120
3.4.8	<u>Corte das juntas</u>	121
4	MODELOS ANALÍTICOS E MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	122
4.1	Considerações gerais	122
4.2	Sistema elástico de suporte para placas – Modelo de Winkler (1867)	123
4.2.1	<u>Definições</u>	123
4.2.2	<u>Modelo de Winkler (1867)</u>	123
4.3	Modelos Analíticos	126
4.3.1	<u>Considerações iniciais</u>	126
4.3.2	<u>Modelo analítico de Westergaard - Cargas de veículos</u>	126
4.3.3	<u>Modelo analítico de Bradbury - Determinação de tensões de empenamento</u>	140
4.4	Métodos de dimensionamento para pisos industriais de concreto	142
4.4.1	<u>Método de dimensionamento para pisos industriais de concreto simples e com armadura distribuída</u>	142
4.4.1.1	Método da PCA (<i>Portland Cement Association</i>) – <i>Packard</i> (1976)	142
4.4.1.2	Dimensionamento da armadura de retração ($A_{s,ret}$)	156
4.4.1.3	Método de dimensionamento para pisos industriais de concreto estruturalmente armado.....	160
4.5	Verificações e detalhamento das armaduras – Segundo a ABNT NBR 6.118:2007.....	163
4.5.1	<u>Cálculo das taxas mínima e máxima de armadura</u>	163
4.5.2	<u>Verificação da punção em placas de concreto</u>	165
4.5.3	<u>Detalhamento das armaduras – Cálculo do comprimento de ancoragem</u>	167
5	ANÁLISES NUMÉRICAS	170
5.1	Apresentação	170
5.2	Resultados teóricos: Aplicação do modelo analítico de Westergaard (1926)	171
5.2.1	<u>Momento fletor máximo</u> ($M_{máx}$)	172
5.2.2	<u>Tensão de tração na flexão máxima</u> ($\sigma_{máx}$)	174
5.2.3	<u>Deflexão máxima</u> ($\omega_{máx}$).....	175

5.3	Modelos numéricos	179
5.3.1	<u>Modelos unidimensionais – Ftool versão 3.00</u>	179
5.3.1.1	Modelo I	179
5.3.1.2	Modelo II	185
5.3.1.3	Modelo III	191
5.3.1.4	Modelo IV	197
5.3.2	<u>Modelos bidimensionais – SAP 2.000 versão 14.2</u>	204
5.3.2.1	Modelo I	204
5.3.2.2	Modelo II	211
5.3.2.3	Modelo III	218
5.3.2.4	Modelo IV	225
5.4	Análise dos resultados	232
5.4.1	<u>Momento fletor máximo</u> ($M_{máx}$)	232
5.4.1.1	Carregamento estático (semi- eixo) – Modelo analítico de Westergaard	232
5.4.1.2	Carregamento móvel (eixo) – Tráfego das empilhadeiras	241
5.4.2	<u>Tensão de tração na flexão máxima</u> ($\sigma_{máx}$)	248
5.4.2.1	Carregamento estático (semi- eixo) – Modelos analíticos de Westergaard	248
5.4.3	<u>Deflexão máxima</u> ($\sigma_{máx}$)	254
5.4.3.1	Carregamento estático (semi- eixo) – Modelos analíticos de Westergaard	254
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	261
6.1	Conclusões	261
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	269
	REFERÊNCIAS	271
	ANEXOS A – Figuras e Tabelas	278
	ANEXOS B – Cálculos Estruturais	299
	ANEXOS C – Descrições dos Modelos Numéricos	334