

Rodoanel Metropolitano de São Paulo: Estudo de Caso Empregando Critério de Dimensionamento Desenvolvido no Brasil

*Tatiana Cureau Cervo**

*José Tadeu Balbo***

Resumo

O Brasil tem adotado o método de dimensionamento para pavimentos de concreto simples da *Portland Cement Association* (PCA). Porém, em 2004, a Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP) publicou o primeiro critério para projetos de pavimentos de concreto simples, desenvolvido com base em pesquisas realizadas no Brasil, contudo considerando ainda o modelo de ruptura por fadiga da PCA (1984). O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de caso empregando o critério para projetos de pavimentos de concreto simples publicado pela PMSP e, juntamente, utilizando os resultados de uma pesquisa sobre a resistência à fadiga de um concreto de cimento Portland para pavimentos, o que permitiu a construção de modelo de ruptura por fadiga para material tipicamente empregado em obras de pavimentação em São Paulo. Os resultados sugerem o emprego de estudos com concretos nacionais para supressão de modelos importados que não representam de forma adequada o comportamento de misturas locais.

1 Introdução

A inexistência de um critério de dimensionamento apropriado às estruturas de pavimentos de concreto no Brasil, que dedique uma atenção especial ao fenômeno da fadiga ao qual ficam sujeitas as camadas de maior rigidez, impulsionou um gradativo interesse na busca de um maior conhecimento e esclarecimento do comportamento mecânico de pavimentos de concreto.

Com relação à resistência à fadiga do material, que tem sido empregada como critério de ruptura mais racional para dimensionamento de pavimentos de concreto (relacionado ao surgimento de fissuras), as normas brasileiras não fazem menção no que diz respeito aos pavimentos, que são submetidos a tensões de tração na flexão. Assim, restam como referências sobre o assunto consultas a trabalhos realizados no exterior ou a documentos brasileiros fundamentados em experiências internacionais, que em muitos aspectos diferem das condições típicas existentes no Brasil para os concretos de cimento Portland.

Um método oficial de dimensionamento de pavimentos de concreto simples foi desenvolvido em

2004 no Brasil pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP), a partir de resultados de diversos experimentos, ensaios e análises mecanicistas realizadas pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos da USP, adotando-se ainda o critério de ruptura por fadiga da PCA (1984). Até então, indiscutivelmente, sempre se adotou (e ainda se adota) o método de dimensionamento desenvolvido em 1966 e revisto em 1984 pela *Portland Cement Association* (PCA).

O critério de dimensionamento de pavimentos da PMSP passou a adotar, a partir do ano de 2005, o modelo de resistência à fadiga desenvolvido no Brasil por Cervo (2004), existindo, com isto, um método de dimensionamento de pavimentos de concreto genuinamente brasileiro.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de caso desenvolvendo o dimensionamento à fadiga do pavimento de concreto do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, por meio da utilização de cargas reais presentes em pista e, juntando-se a isto, verificar de forma comparativa o modelo brasileiro de ruptura por fadiga para o concreto convencional proposto por Cervo (2004) e o modelo à fadiga apresentado pela *Portland Cement Association* (PCA, 1984).

* Profa. Dra. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

** Prof. Dr. Universidade São Paulo – USP.

2 Modelo Internacional de Dimensionamento de Pavimentos de Concreto (PCA, 1984)

O método de dimensionamento de pavimentos de concreto que vem sendo utilizado no Brasil, embora não oficial, o ET-97 "Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84", em sua segunda edição, que foi publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 1996, apresenta algumas dúvidas e questionamentos com relação ao desenvolvimento do método, aos materiais e dosagem utilizados e às condições de ensaio adotadas. O que se tem certeza com relação ao método proposto é que foi apresentado, primeiramente, em 1966 e revisto em 1984 pela *Portland Cement Association* (PCA, 1984) nos Estados Unidos da América, prescrevendo um modelo de ruptura por fadiga para o concreto. Assim, tal método se assume como válido no Brasil, sem mínimo questionamento, que é o modelo de fadiga proposto há cerca de 40 anos pela PCA.

O critério de fadiga do concreto em flexão proposto pela PCA (1984) e por Packard e Tayabji (1985) é similar àquele previamente proposto pela PCA (1966). Uma modificação no número de ciclos de repetições de cargas de 5×10^5 para 10^7 foi realizada para eliminar a descontinuidade na curva anterior que algumas vezes levava a resultados considerados irrealistas pelos autores. Essa alteração no comportamento à fadiga do concreto em flexão determinou um limite de fadiga (o único modelo existente na literatura que sugere um limite de fadiga para pavimentos de concreto).

O número permissível de repetições para uma dada carga no eixo foi determinado baseado na relação entre tensões. Os modelos de fadiga para relações entre tensões superiores a 0,55 e para valores variando entre 0,45 e 0,55 são representados, respectivamente, pelas equações (1) e (2):

$$\log N = 11,78 - 12,11 \left(\frac{\sigma}{f_{ct,f}} \right) \quad (1)$$

$$N = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma}{f_{ct,f}} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2)$$

O modelo propõe um limite de fadiga, assumindo que para relação entre tensões inferiores a 0,45, o

número de repetições de ciclos seria ilimitado, qualquer que fosse a carga geradora daquela tensão.

O método da PCA (1984), entretanto, desconsidera o efeito das tensões de empenamento devido aos gradientes térmicos, sendo comentada a dificuldade e a falta de precisão no cálculo das tensões e deformações que o empenamento acarreta, fato atualmente considerado superado (Severi, 2002).

3 Modelo Brasileiro de Dimensionamento de Pavimentos de Concreto (Cervo, 2004)

Um total de 105 corpos-de-prova foram moldados para determinar a resistência à fadiga em tração na flexão de um concreto convencionalmente empregado em pavimentação no Brasil. Destes, 21 foram empregados para a construção do modelo à fadiga do concreto; seis amostras foram utilizadas para determinar a resistência à tração na flexão estática do material. Os corpos-de-prova foram moldados nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm, tanto para os ensaios dinâmicos à fadiga, quando para os ensaios estáticos.

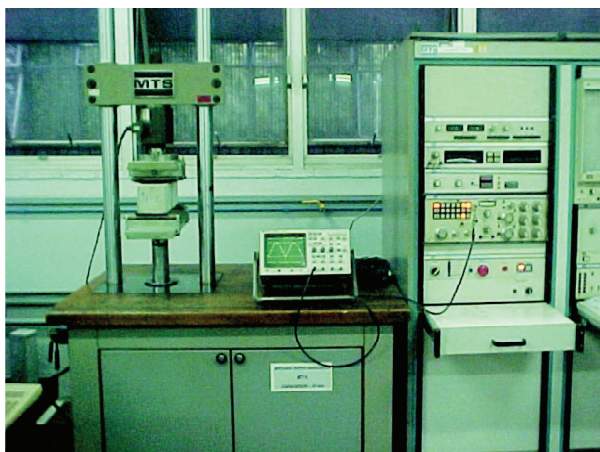
Para a confecção do concreto foi empregado um cimento Portland do tipo CP II E – 40 utilizado no Brasil, que apresentava adição de escória de alto forno em sua composição. Como agregado miúdo foi empregado uma areia quartzosa, rosácea e arredondada de Boituva, com módulo de finura de 1,72 e dimensão máxima característica de 2,4 mm, procedente da Depressão Periférica do Estado de São Paulo. Foram utilizados agregados graúdos do tipo brita 1 e brita 2, com dimensões máximas características de, respectivamente, 19 mm e 25 mm. A brita 1 usada nas moldagens foi um granito oriundo do estado de São Paulo com módulo de finura de 6,66 mm; como brita 2 foi utilizado um agregado calcário procedente de pedreira em Cajamar (SP) com módulo de finura de 7,68. As características do concreto empregado no experimento estão apresentadas na Tabela 1.

Os ensaios à fadiga foram realizados a uma frequência de 10 Hz, objetivando-se determinar a relação entre tensões (RT) que alcançasse 10^5 ciclos e 10^6 ciclos. Outros dois níveis de tensões foram testados para que fosse possível, posteriormente, desenvolver a modelagem à fadiga.

Os ensaios cíclicos em fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica da MTS (Material Test System) com capacidade máxima de 10.000 kN, conforme ilustra a Figura 1. A ruptura dos corpos-de-prova ensaiados à fadiga ocorreu no terço médio do vão, assim como comumente ocorre nos ensaios estáticos em tração na flexão.

Tabela 1 – Características do concreto definitivo empregado no Experimento.

Materiais ou Propriedades	Valores obtidos
Cimento (kg/m ³)	328
Areia (kg/m ³)	691
Brita 1 (kg/m ³)	483
Brita 2 (kg/m ³)	724
Relação a/c	0,553
Plastificante (L/m ³)	1,148
Ar incorporado (%)	2,6
Abatimento (mm)	65
Resistência à tração na flexão (MPa) – 28 dias (cp 400 mm)	4,8

**Figura 1** – Equipamento servo-hidráulico da MTS para ensaios à fadiga.

O modelo à fadiga obtido a partir das relações entre tensões e dos números de ciclos à fadiga é representado pela equação (3) apresentada na sequência onde $\log N$ é o logaritmo do número de ciclos à fadiga, $\sigma_{\max}$ é a tensão máxima aplicada e $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão estática. Este modelo apresentou, para 21 conjuntos de dados, um erro padrão de 0,18 e um coeficiente de determinação R^2 de 0,91:

$$\log N = 25,858 - 25,142 \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_{ct,f}} \right) \quad (3)$$

4 Estudo de Caso: Rodoanel Metropolitano Mário Covas

Com o intuito de desenvolver um dimensionamento à fadiga de pavimento de concreto por meio da utilização de cargas reais presentes em pista e, juntando-se a isto, verificar de forma comparativa o

modelo de ruptura por fadiga para o concreto convencional seco proposto neste estudo e o modelo à fadiga apresentado pela *Portland Cement Association* (PCA, 1984), empregaram-se dados do projeto de dimensionamento original do Rodoanel Metropolitano de São Paulo (Trecho Oeste), utilizados pelo Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA, 1998) que, como a maioria dos pavimentos de concreto de cimento Portland projetados no Brasil, foi dimensionado pelo método estrangeiro acima citado.

Para o cálculo do consumo à fadiga de um pavimento de concreto é necessário conhecer as cargas por eixos simples, eixos tandem duplo e eixo tandem triplo passantes na rodovia a ser dimensionada e também o número de solicitações (número de ciclos à fadiga) previsto, podendo-se posteriormente calcular a tensão equivalente e, então, o número de solicitações admissíveis para uma determinada espessura de placa de concreto, tornando possível verificar o consumo à fadiga total.

O dimensionamento do Rodoanel Metropolitano de São Paulo foi considerado para um pavimento com acostamento de concreto e com barras de transferência de carga para período de projeto de 30 anos, fator de segurança de carga de 1,25, módulo de reação do subleito de 80 MPa/m e resistência à tração na flexão aos 28 dias de 4,5 MPa.

O dimensionamento à fadiga pelo método da PCA (1984) calcula as tensões equivalentes em função das cargas do tráfego, da espessura da placa e do módulo de reação do subleito, sem considerar as tensões devidas a gradientes térmicos. A partir das tensões equivalentes calculadas, é possível determinar o número de ciclos (N) admissíveis para cada eixo existente, utilizando-se as equações (1) e (2), para o caso da tensão ser, respectivamente, superior a 0,55 ou estar entre 0,45 e 0,55; para tensões inferiores a 0,45, N seria ilimitado. O número de solicitações admissíveis também pode ser determinado por meio de um ábaco apresentado pela PCA. Na Tabela 2 estão apresentadas as cargas por eixo, a carga adotada e o número de solicitações previstas em projeto para o Rodoanel.

Para o cálculo do consumo à fadiga do pavimento de concreto simples do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, utilizando o modelo à fadiga proposto no presente estudo foram aplicados o mesmo período de projeto, fator de segurança, módulo de reação do subleito e resistência à tração na flexão empregados no projeto executivo. Da mesma forma, o cálculo das tensões equivalentes seguiu o mesmo procedimento adotado pela PCA, ou seja, não foram consideradas as tensões devido a gradientes térmicos, uma vez que se pretendia, no presente momento, verificar a resistência à ruptura por fadiga exatamente conforme método da PCA. Assim, o dimensionamento

foi considerado para a condição de construção de túneis, quando não existem tensões causadas por gradientes térmicos.

Após as verificações dos consumos à fadiga pelo método da PCA (1984), no projeto original, chegou-se a uma espessura da placa de concreto de 24 cm que resultou em um consumo por fadiga de 52%. Se a placa fosse reduzida para 23 cm, a resistência à fadiga obtida seria de 130%, o que extrapolaria o percentual de 100% exigido na hipótese de Miner de dano contínuo. Como o critério de ruptura por fadiga é o fator limitante no desempenho de um pavimento de concreto sobre base cimentada, o Rodoanel foi construído com uma espessura de placa de 24 cm.

Para o dimensionamento à fadiga do Rodoanel a partir do modelo brasileiro de ruptura por fadiga proposto por Cervo (2004), utilizou-se a equação (3). Este último autor também propõe um modelo para calibração entre o número de ciclos à fadiga obtido em laboratório e o número de ciclos à fadiga obtido em campo; optou-se, neste trabalho, em verificar o consumo à fadiga do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, por meio do modelo obtido para o concreto, exatamente conforme formulado, mas também se fazendo uma correção deste modelo em função do coeficiente de calibração laboratório-campo encontrado para o modelo não-linear. Esta correção do modelo foi realizada estimando o número de ciclos admissíveis em pista a partir da equação desenvolvida pelo referido autor, resultando na equação (4):

$$N_{\text{Campo}} = \left(\frac{1}{RT} \right)^{-4,20231} \cdot N_{\text{Laboratório}} \quad (4)$$

Empregando-se o modelo proposto por Cervo (2004) para o concreto simples desenvolvido a partir de resistências à tração na flexão aos 28 dias que variaram entre 4,5 e 5,3 MPa, ou seja, que se enquadram na resistência exigida no projeto do Rodoanel Metropolitano de São Paulo, chegou-se a uma espessura da placa de concreto de 18 cm para o modelo obtido (sem correção por meio do coeficiente de calibração), quando o consumo à fadiga foi de 67%. Uma espessura de 19 cm seria necessária quando utilizado o modelo corrigido, conforme calibração laboratório-campo desenvolvida a partir de modelos não-lineares. Neste caso o consumo à fadiga seria de 8%. Caso a espessura deste último fosse diminuída para 18 cm, o consumo à fadiga seria de 144% (superior a 100%).

De acordo com as análises realizadas, é possível confirmar, agora em uma aplicação prática (real), que o modelo proposto no presente estudo se apresenta menos conservador do que o modelo empregado pela PCA (1984). Esta constatação ocorre mesmo quando o modelo proposto neste trabalho para o concreto foi corrigido pelo coeficiente de calibração laboratório-campo.

Estas conclusões são de extrema importância prática, quando muitos órgãos públicos e empresas privadas, apesar de estarem conscientes da neces-

Tabela 2 – Tráfego composto para o trecho Oeste do Rodoanel Metropolitano de São Paulo (DERSA, 1998).

Q por eixo (kN)	Q adotada (kN)	Nº solicitações	Q por eixo (kN)	Q adotada (kN)	Nº solicitações	Q por eixo (kN)	Q adotada (kN)	Nº solicitações
Eixo simples			Eixo tandem duplo			Eixo tandem triplo		
150-160	160	53930	240-250	250	0	290-300	300	0
140-150	150	0	230-240	240	0	280-290	290	196159
130-140	140	0	220-230	230	0	270-280	280	1410943
120-130	130	35593	210-220	220	72262	260-270	270	7900085
110-120	120	1092574	200-210	210	0	250-260	260	7001308
100-110	110	9624589	190-200	200	108252	240-250	250	3967070
90-100	100	12144396	180-190	190	571575	230-240	240	1896374
80-90	90	4869033	170-180	180	6789975	220-230	230	1321812
70-80	80	3233295	160-170	170	7269832	210-220	220	1492945
60-70	70	3584501	150-160	160	5590083	200-210	210	1450947
50-60	60	30386168	140-150	150	3838582	190-200	200	1163743
40-50	50	34445515	130-140	140	2386231	180-190	190	520292
30-40	40	23522315	120-130	130	2378167	170-180	180	749405
20-30	30	16834162	110-120	120	2260820	160-170	170	718988
10-20	20	5236155	100-110	110	2525827	150-160	160	639623
< 10	10	0	50-100	100	12308868	100-150	150	2418903
			< 50	50	1220807	50-100	100	2366073
						< 50	50	491815

sidade, em determinadas rodovias, da construção de pavimentos de concreto devido ao elevado fluxo de veículos pesados, optam pela utilização de outros materiais e técnicas, pelo custo de construção superior que o concreto pode apresentar para a pavimentação de um trecho de via. Com a redução da dimensão da espessura da placa de concreto em apenas um centímetro (multiplicado por quilômetros de extensão) já seria patente a redução no custo da obra; considere-se, então, uma redução de quatro ou cinco centímetros.

No entanto, é importante lembrar que para determinar as espessuras de placas acima não foram consideradas as tensões devidas a gradientes térmicos, sempre presentes, com raras exceções, em pavimentos de concreto, quando poderiam ser negligenciados (como é o caso de túneis). Este fato ocorreu para que fosse possível realizar uma análise da resistência à fadiga analogamente às considerações do modelo à fadiga da PCA (1984). Porém, Severi (2002), dentre outros, já confirmou a importância da consideração de tensões devido às cargas que ocorrem pela ação de diferenciais térmicos.

Balbo e Rodolfo (2003) empregando, da mesma forma que o método de cálculo de tensões da PCA (1984), o Método de Elementos Finitos (MEF), barras de transferência de cargas e posicionamento dos eixos examinados sobre a placa de CCP, desenvolveram modelos numéricos para o cálculo, além das tensões devidas ao tráfego, das tensões causadas por ação de gradientes térmicos, verificando-se que na existência de gradientes térmicos positivos e, quanto maior estes diferenciais, maiores seriam as tensões impostas ao pavimento. É importante ressaltar que para diferenciais térmicos nulos, os resultados encontrados pelos autores e aqueles verificados pela PCA são idênticos.

Procedeu-se, então, o dimensionamento à fadiga do Rodoanel Metropolitano de São Paulo considerando os modelos para gradientes térmicos (Severi, 2002) e os modelos de cálculo de tensões combinados, que consideram tanto as tensões devido ao tráfego, quanto aquelas devido a gradientes térmicos (Rodolfo, 2001).

Os modelos desenvolvidos pelos referidos autores foram empregados pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP, 2004), que publicou o primeiro critério oficial nacional de projetos de dimensionamento de pavimentos de concreto simples: "Instrução de Projeto 07 – Dimensionamento de Pavimentos de Concreto". Este método tem como base os modelos desenvolvidos a partir de diferenciais térmicos típicos encontrados em São Paulo (Balbo e Severi, 2002), mantidas as demais condições.

Os resultados mostraram que, quando se emprega o modelo proposto nesta pesquisa para o concreto convencional, obtém-se uma espessura de placa de 26

cm; empregando-se o modelo à fadiga apresentado pela PCA (1984), para mesmas condições de projeto e considerando gradientes térmicos combinados com cargas do tráfego (conforme critério de projeto da PMSP, 2004), obtém-se uma espessura de 29 cm.

A partir destes resultados consegue-se extrair as seguintes observações:

- Pelo fato do Rodoanel ter sido dimensionado à fadiga com base no critério da PCA (1984), que não considera gradientes térmicos, a espessura de placa construída é aquém daquela desejável;
- O modelo à fadiga da PCA (1984) é de fato conservador em relação ao modelo proposto; isto é verificado também no caso de consideração conjunta de cargas do tráfego e diferencial térmico (condição ideal). Neste caso, a espessura da placa resultaria em 29 cm, quando 26 cm seriam suficientes para combater o processo de fadiga ao longo do horizonte de projeto.

Ainda, é importante ressaltar que seria conveniente efetuarem-se mais ensaios à fadiga com o concreto à tensão constante e à tensão variável, que resultassem em modelos à fadiga que pudessem ser correlacionados, resultando em uma calibração entre modelo à tensão constante e modelo à tensão variável. Desta forma ter-se-ia um parâmetro importante para o dimensionamento à fadiga de pavimentos de concreto, não se esquecendo de que, mesmo assim, seria necessário considerar as tensões impostas pelo tráfego, espessura do pavimento e condições exigidas em projeto para se efetuar a escolha de qual dos modelos seria mais adequado para cada caso.

Diante dos estudos e das reflexões realizadas, torna-se evidente a necessidade incondicional da realização de estudos específicos de fadiga para concretos a serem empregados em grandes obras rodoviárias. Ora, o custo de tais estudos seria insignificante diante dos recursos orçamentários empenhados em tais obras.

5 Conclusões

A partir das análises realizadas foi possível estabelecer as seguintes conclusões principais:

- É de extrema importância considerar os materiais, cargas e clima existentes em cada localidade, anteriormente à determinação do modelo à fadiga mais adequado a ser empregado para o dimensionamento da rodovia a ser construída.

- O modelo à fadiga proposto por Cervo (2004), desenvolvido de acordo com os materiais e necessidades existentes no Brasil, apresenta-se menos conservador do que o modelo atualmente empregado neste país (que é aquele da PCA).
- Em um estudo de caso real verificou-se a possibilidade de redução da espessura da placa de até 5 cm, quando empregado o modelo proposto ao invés do modelo atualmente utilizado.
- Fica evidente a necessidade da realização de estudos específicos de fadiga para concretos a serem empregados em grandes obras rodoviárias; quando o custo de tais estudos seria insignificante diante dos recursos orçamentários empenhados em tais obras.

6 Referências

- Associação Brasileira de Cimento Portland. (1996). **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método da PCA/84**. ET-97, São Paulo.
- Balbo, J. T.; Rodolfo, M. P. (2003). **Modelagem de tensões em pavimentos de concreto com base aderida e diferenciais térmicos**. In: Anais do Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, XVII ANPET, v. 1, p. 323-334, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T.; Severi, A.A. (2002). **Thermal gradients in concrete pavements in tropical environment: an experimental appraisal**. Journal of the Transportation Research Board, TRB 1809, v.1809, p.12-22, Washington, D.C.
- Cervo, T. C. (2004). **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Desenvolvimento Rodoviário S.A. - DERSA (1998). **Dimensionamento do pavimento de concreto de cimento Portland**. Rodoanel Metropolitano de São Paulo. Trecho Oeste. VETEC Engenharia S/C Ltda, MD – 15.00.000 – P00/503, São Paulo.
- Packard, R.G.; Tayabji, S. D. (1985). **New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements**. In: Proceedings of the 3th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. Purdue University, pp. 225-236, West Lafayette.
- Portland Cement Association (1966). **Thickness design for concrete pavements**. IS 010.03P. Skokie, Illinois.
- Portland Cement Association. (1984). **Thickness design for concrete highway and street pavements**. EB 109.01P, Illinois.
- Prefeitura do Município de São Paulo. (2004). **Instruções de Projeto. Revisão e atualização das normas de pavimentação**. Portaria 084/SIURB G/04. Diário Oficial do Município de São Paulo, ano 49, nº 113, pp. 62-74, São Paulo.
- Rodolfo, M. P. (2001). **Análise de tensões em pavimentos de concreto com base cimentada e sujeitos a gradientes térmicos**. Dissertação (mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Severi, A. A. (2002). **Estudo dos gradientes térmicos em pavimentos de concreto de cimento Portland no ambiente tropical**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.