

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO *ANDROID* PARA ESTIMATIVA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO SIMPLES PELO MÉTODO PCA/1984

Matheus Chirolli
Leonardo Soares
Liseane Padilha Thives
Luciana Rohde

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

Os pavimentos rígidos vêm se consolidando como uma alternativa viável em áreas urbanas, principalmente em corredores de ônibus e vias de tráfego elevado. Os pavimentos rígidos apresentam vantagens em relação aos pavimentos flexíveis, como um menor custo de manutenção e vida útil mais elevada. No entanto, o custo inicial de implantação, a necessidade de mão-de-obra qualificada, além da falta de tradição em nosso país tem contribuído para o baixo índice de aplicação em comparação com os pavimentos flexíveis. Outro fator a ser considerado é a metodologia de dimensionamento adotada pelo Departamento de Infraestrutura de Transportes (DNIT), cujo procedimento é antigo e moroso. Outros métodos foram desenvolvidos no Brasil, porém a metodologia do DNIT é a referência em nível federal. Esse trabalho visa facilitar o dimensionamento de pavimentos de concreto simples, por meio do desenvolvimento de um aplicativo de celular do tipo *Android*. O aplicativo contempla o método adotado pelo DNIT, preconizado pela *Portland Cement Association* de 1984 (PCA/84). Foram introduzidas as equações utilizadas no dimensionamento, que representam os ábacos do método. Foi dimensionada uma estrutura de pavimento de concreto simples hipotética para comparar os resultados obtidos pelo aplicativo com o calculado pelo método da PCA/84. Como resultado obteve-se a mesma espessura para o pavimento, com uma diferença de 11,9% no consumo à fadiga e de 15,5% no consumo à erosão. O uso do aplicativo se mostrou como uma ferramenta útil que pode ser usada em estudos preliminares para a obtenção da espessura requerida a partir do tráfego e materiais. Considera-se ainda, que o uso do aplicativo pode ser atrativo na didática de dimensionamento de pavimentos de concreto simples.

ABSTRACT

Rigid pavements have been steady as a viable alternative in urban areas, especially in bus lanes and high traffic roads. These type of pavements present advantages over flexible ones, such as lower maintenance costs and longer service life. However, the initial cost, the necessary skilled labor, and the lack of tradition in our country have contributed to the low application rate compare to flexible pavements. Another factor to consider is the methodology design adopted by the Department of Transport Infrastructure (DNIT), whose procedure is old and time-consuming. Other methods were developed in Brazil, but DNIT methodology is the federal reference. This work aims to facilitate the design of simple concrete pavements by developing an Android mobile application. The application includes the method adopted by DNIT, standardized by the Portland Cement Association in 1984 (PCA/84). The design equations, which in PCA/84 method are represented by abacus and tables, were introduced in the mobile application. A hypothetical simple concrete pavement structure was designed in order to compare the results obtained by the app with that calculated by the PCA/84 method. As a result, the same thickness was obtained for the concrete plates, with a difference of 11.9% in fatigue consumption and 15.5% in erosion consumption. The app has proved to be a useful tool that can be used in preliminary studies to obtain the required thickness from traffic and materials. It is also considered that the use of the application can be attractive in the didactics of simple concrete pavement design.

1. INTRODUÇÃO

Desde 1892, quando o primeiro pavimento de concreto foi implantado nos Estados Unidos da América, a tecnologia de execução e de dimensionamento evoluiu para atender demandas e necessidades atuais e futuras. Os avanços são resultado de contribuições de pesquisadores e de órgãos rodoviários. Ao longo dos anos, o pavimento de concreto sofreu alterações em relação aos métodos de dimensionamento, tipos de estruturas e meios construtivos.

Os principais tipos de pavimentos rígidos são: de concreto simples (PCS), de concreto armado (PCA), de concreto com armadura contínua (PCAC), de concreto protendido (PCPRO), de concreto pré-moldado (PCPM), *whitetopping* (WT) e *whitetopping* ultradelgado, (WTUD), (BALBO, 2014).

No Brasil este tipo de pavimento representa uma pequena parcela das rodovias pavimentadas, sendo a sua aplicação principal é em corredores de ônibus de cidades, em rodovias de tráfego elevado e em regiões de relevo montanhoso. Loturgo (2005) acrescenta que os pavimentos de concreto são indicados para vias utilizadas por veículos pesados e em locais sujeitos a derramamento de óleos e combustíveis. Além disto, os pavimentos de concreto apresentam elevado desempenho e vida útil, sendo projetados para 20 anos ou mais.

Relativamente ao dimensionamento, ressalta-se que o método de dimensionamento adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), desenvolvido na década de 1980 e estabelecido pela *Portland Cement Association* (PCA/1984), além de antigo, é trabalhoso e moroso. O método, baseado em tabelas e ábacos, necessita ser atualizado e não é atrativo ao usuário.

No Brasil, diversos autores têm estudado e apresentado modelos atualizados para o cálculo de pavimentos de concreto (Balbo e Rodolfo, 1998; Rodolfo e Balbo, 2000; Rodolfo e Balbo, 2008_A; Rodolfo e Balbo, 2008_B), porém, o método preconizado pelo DNIT ainda é o PCA/84.

A Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB) do município de São Paulo preconiza através do documento Instrução de Projeto 07/2004 (IP – 07/2004) diretrizes para projeto e dimensionamento de pavimentos de concreto simples. A IP – 07/2004 apresenta uma metodologia de cálculo mais atualizada de dimensionamento que leva em consideração os valores de diferenciais térmicos para as placas de concreto, modelos de fadiga desenvolvidos no Brasil para materiais nacionais e fator de calibração laboratório-campo (PMSP, 2004).

Na literatura existem diversos *softwares* para o dimensionamento de pavimentos rígidos como, por exemplo, PCAWIN, SDU.Pave.R e Belgo (Kııcı e Tiğdemir, 2017). No entanto, não são gratuitos e se apresentam difíceis do ponto de vista de uso. Além disto, podem apresentar algumas divergências em relação ao preconizado pelas normativas brasileiras.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um aplicativo *Android* para o dimensionamento de estruturas de pavimentos de concreto simples, de acordo com o método PCA/84 preconizado pelo DNIT (BRASIL, 2005).

De acordo com Balbo (2014), os pavimentos de concreto simples (PCS) não armados são constituídos de placas de concreto moldadas *in situ* cujas juntas transversais e longitudinais são feitas por meio de serragem algumas horas após a moldagem do concreto. A estrutura do pavimento é composta pelas placas assentes sobre um sistema de apoio da base (eventualmente sobre uma sub-base) e do subleito. Outras literaturas consideram a camada de base como sendo sub-base (YODER e WITCZAK, 1975, DNIT, 2005).

Balbo (2014) considera que vários tipos de concreto podem se empregados na construção das placas, ou seja, concreto convencional (CCV), concreto de alta resistência (CAD) e concreto compactado com rolo (CCR). No PCS, barras de transferência de carga (BTC) em aço são

posicionadas nas juntas transversais, de forma que as cargas aplicadas sobre a placa têm seus efeitos aliviados pela presença das BTC. A não existência das BTC é um fator limitante no dimensionamento dos PCS, uma vez que influenciam o comportamento da estrutura. Na ausência das BTC, a junta serrada deve fazer “ponte” de distribuição de esforços entre placas contíguas por meio do faceamento de agregados na face vertical fissurada. Nas juntas longitudinais são montadas barras de ligação (BL) com a função de evitar o deslocamento horizontal relativo entre placas lateralmente dispostas. A transferência de carga é auxiliada feita pelo intertravamento dos agregados nas laterais das juntas. A Figura 1 ilustra uma estrutura de PCS com BTC e a Figura 2 apresenta os elementos constituintes de um PCS.

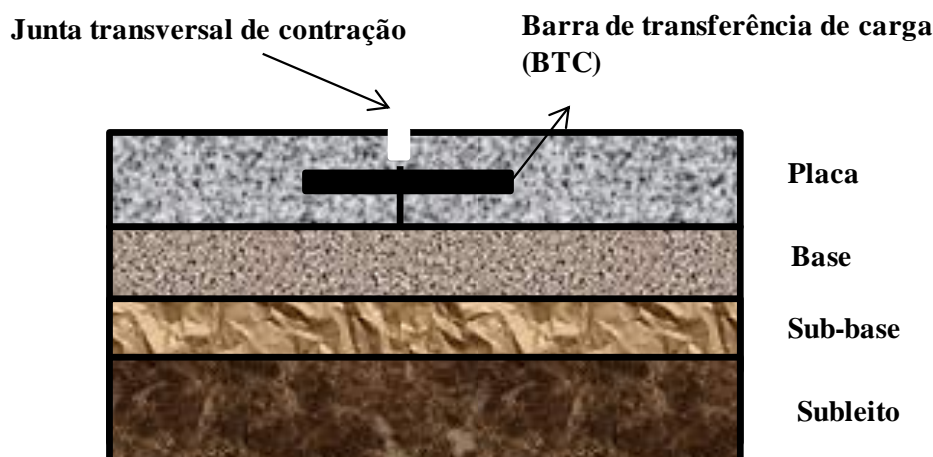


Figura 1: Estrutura de um PCS (Adaptado de Balbo, 2014)

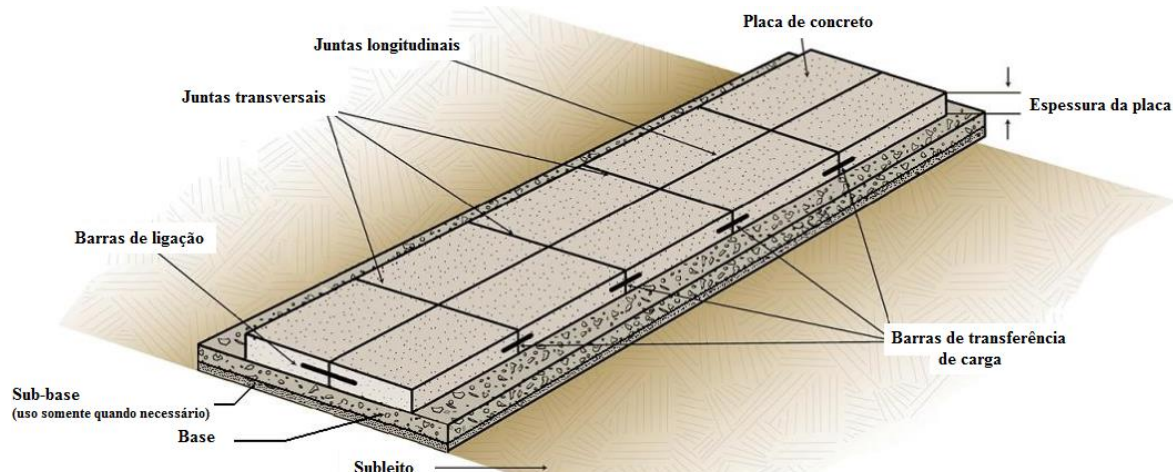


Figura 2: Elementos constituintes de um PCS (Adaptado de CALTRANS, 2008)

Os seguintes materiais são recomendados para uso em camadas de base ou sub-base pelo método PCA/84: solo cimento, solo cal, concreto compactado com rolo, brita graduada e mistura asfáltica. Devido à elevada rigidez e elevado módulo de elasticidade, a grande parcela da capacidade da estrutura é suportada pela placa de concreto e pequena parcela é distribuída para as demais camadas. Assim, pequenas variações na resistência das camadas inferiores têm pequena influência na capacidade estrutural do pavimento (YODER e WITCZAK, 1975, DNIT, 2005). Por outro lado, Balbo (2014) complementa que o método PCA/84 é omissivo quanto aos efeitos estruturais relativos às variações térmicas.

2. DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO PCA/84

O método PCA/84 introduziu conhecimentos e processos obtidos nas áreas de cálculo de tensões, construção e gerência, projeto geométrico e, acrescentou novos enfoques, modificando o método anterior PCA/66 (BRASIL, 2005). O dimensionamento é baseado no consumo de resistência à fadiga e nos danos causados por erosão, de modo que essas duas condições atinjam um valor máximo de 100% ou próximo, mas inferior a esse. O dimensionamento dos PCS é realizado através de tabelas e ábacos próprios, levando em conta fatores de segurança em relação ao tráfego, presença ou não de barras de transferência e a existência ou não de acostamento de concreto (SENÇO, 1997, BALBO, 2009). Outros parâmetros necessários são: período de projeto; taxa de crescimento do tráfego; resistência do concreto; tipo e espessura da base e Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito.

A resistência à tração na flexão do concreto é obtida através de ensaios em laboratório padronizado de acordo com a norma ASTM C78/C78M (ASTM, 2018). Na fase de estudos preliminares é possível adotar o valor da resistência à tração na flexão como sendo 10% do valor da resistência à compressão. Nesses sistemas o concreto é responsável pela resistência aos esforços de tração impostos ou cargas dinâmicas e estáticas de veículos e cargas ambientais. Balbo (2009),

A ruptura por fadiga ocorre devido a um processo de microfissuração progressiva da estrutura de um material, que degrada aos poucos sua microestrutura amorfa ou cristalina, alcançando o ponto da fratura da peça estrutural, sendo evidenciada por uma ou mais superfícies de ruptura. Esse fenômeno ocorre em condições de tensões ou deformações com valores inferiores à tensão ou deformação de ruptura (BALBO, 2009).

As Equações 1, 2 e 3 são utilizadas no método PCA/84 para o cálculo do número de repetições admissíveis, considerando a tensão aplicada e a resistência à tração.

Para a relação entre tensões $\frac{\sigma_{eq}}{S_c} \geq 0,55$ adota-se a Equação 1:

$$\log N_f = 11,737 - 12,077 * \left(\frac{\sigma_{eq}}{S_c} \right) \quad (1)$$

Para a relação entre tensões $0,45 < \frac{\sigma_{eq}}{S_c} < 0,55$ utiliza-se a Equação 2:

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{\frac{\sigma_{eq}}{S_c} - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2)$$

Para a relação entre tensões $\frac{\sigma_{eq}}{S_c} < 0,45$ é usada a Equação 3:

$$N_f = \text{Ilimitado} \quad (3)$$

em que σ_{eq} : tensão equivalente [MPa];

S_c : resistência característica do concreto à tração na flexão [MPa];

N_f : número de repetições admissíveis.

No Brasil foram desenvolvidos modelos atualizados e com consideração de variações térmicas para o clima nacional para o dimensionamento de PCS. Os principais estudos são os seguintes:

- Rodolfo e Balbo (1998) – modelo para PCS sem barras de transferência com base cimentada;
- Rodolfo e Balbo (2000) – modelo para o método da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2004) para PCS com BT e empenamento térmico;

- Rodolfo e Balbo (2008) – modelo para PCS com BT, base de CCP não aderida e empenamento térmico e modelo para PCS com BT, base granular e empenamento térmico.

Erosão é a perda de material do topo da camada imediatamente inferior à placa de concreto, devido à ação da água e da passagem de cargas pesadas e pode ocorrer também nas laterais da placa (PITTA, 1998). As consequências da erosão se manifestam na forma de deformações verticais críticas, especialmente nas bordas e nos cantos longitudinais livres das placas. Como resultado, ocorrem degraus nas juntas transversais, bombeamento de finos e formações de vazios sob a placa. Balbo (2009) ressalta que a avaliação da ruptura por erosão é desnecessária quando do emprego de bases cimentadas.

O subleito é caracterizado pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC). Com base na teoria do líquido denso, o método fornece valores do coeficiente de reação do subleito (k_{subleito}) em relação ao valor do ISC. A presença da camada de base contribui na resistência da estrutura, para a qual, em função do tipo e espessura, o método fornece tabelas do coeficiente de reação (k_{base}). Em conjunto, o subleito e a base apresentam um coeficiente de reação do sistema (k_{sist}), também indicado nas tabelas do método.

No cálculo do tráfego são considerados os eixos simples e os eixos em tandem duplo e triplo (classes de carga). Estabelecida uma taxa de crescimento para o período de projeto, calcula-se a projeção para cada carga e classe de tráfego, que resulta no número de solicitações previstas. No método da PCA/84, o tráfego é considerado em função dos efeitos das cargas por eixo na intensidade das tensões de tração na flexão e, desta forma, nas relações entre o módulo de ruptura do concreto e as tensões (DNIT, 2006). São ainda estabelecidos fatores de segurança em função do tipo de via (Tabela 1).

Tabela 1: Fatores de segurança para o tipo via (DNIT, 2004)

Tipo de via	Fator
Estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetida a tráfego leve de pesados	1,0
Rodovias e vias urbanas, submetidas a tráfego de caminhões pesados	1,1
Autoestradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou elevado volume de pesados	1,2
Pavimentos que necessitam de um desempenho acima do normal	Até 1,5

A lei de Miner do dano acumulado é usada no método para avaliar o consumo à fadiga, cuja curva de fadiga está implícita nos ábacos. A parcela da resistência à fadiga não consumida por uma determinada classe de carga estará disponível para uso por outras cargas. O dano total é a soma final dos consumos individuais da resistência à fadiga. O consumo total admissível é de 100%. O dano à erosão não pode ser previsto nem medido pelo modelo de fadiga. Neste caso, a consideração de existência ou não de acostamentos de concreto e a presença ou não de barras de transferência são adotados para avaliar o consumo à erosão. O consumo total admissível não pode ser superior a 100%. O empenamento do concreto não é considerado no dimensionamento, porém analisado no projeto geométrico.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada foi desenvolvida em duas etapas, cujos fluxogramas estão apresentados nas Figuras 3 e 4. Na primeira etapa (Figura 3) um pavimento hipotético de concreto simples foi dimensionado de acordo com método PCA/84 (BRASIL, 2005). O dimensionamento do pavimento pelo método da PCA/84 foi realizado por meio de tentativas

de espessura da placa.

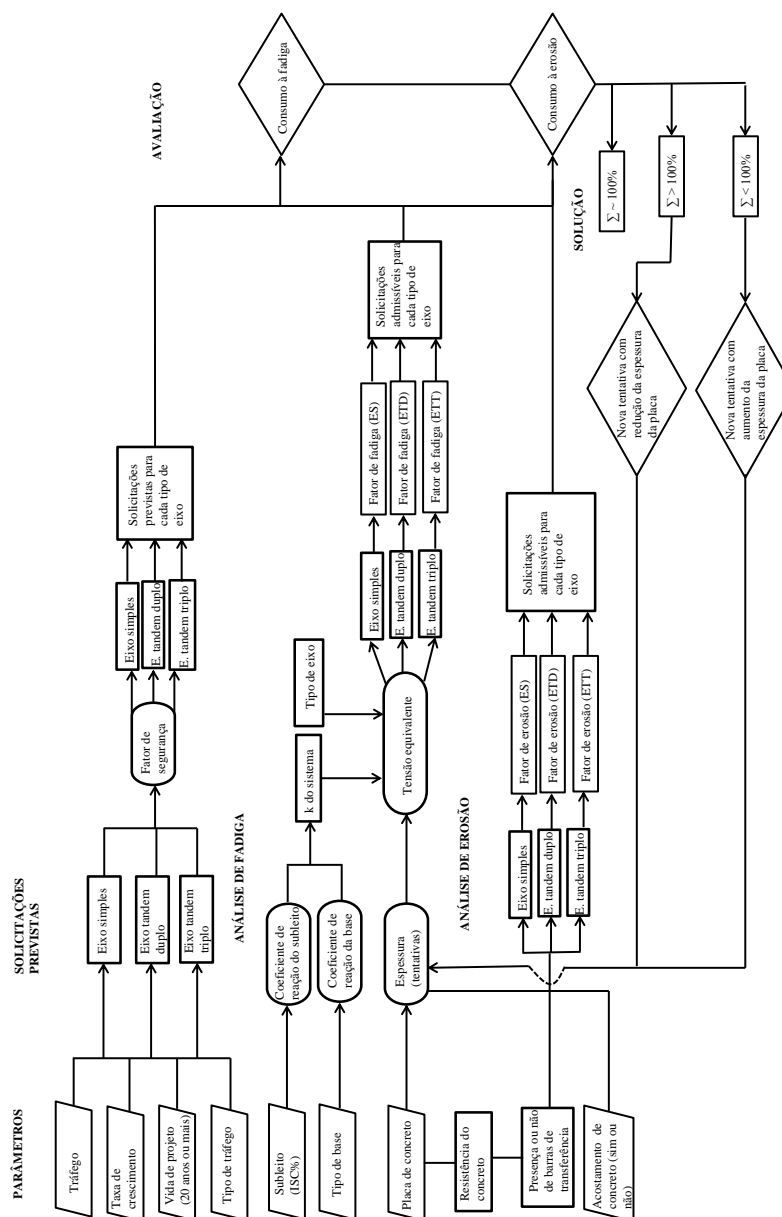


Figura 3: Fluxograma da primeira etapa da metodologia

Na segunda etapa, o fluxograma (Figura 4) apresenta o desenvolvimento do algoritmo para o aplicativo. Na Figura 4, M_e , f_1 , f_2 , f_3 e f_4 representam equações para o cálculo da estrutura, de acordo com Lee e Carpenter, 2001 e estão apresentadas no Anexo. As equações foram obtidas a partir da regressão dos dados apresentados pelas tabelas e ábacos da PCA/84 para obtenção do número de repetições admissíveis. A partir do programa computacional *Android Studio* foi criada uma *interface* para o aplicativo, no qual foram introduzidos os dados necessários para o dimensionamento de um pavimento de concreto simples. O aplicativo foi denominado de *ConcrePav*. O programa foi estabelecido considerando as seguintes opções como dados de entrada para o pavimento:

- Resistência característica do concreto à tração na flexão ($F_{ctM,k}$);
- Tipo de base a ser utilizada;

- Capacidade de suporte (ISC) do subleito;
- Tipo de transmissão de carga entre placas (presença ou não de barras de transferência);
- Presença ou não de acostamento de concreto (AC);
- Taxa de crescimento do tráfego para um período de projeto de 20 anos, podendo ser estabelecido uma vida útil mais elevada.

Como resultado, o aplicativo apresenta uma tela de resultados e um esquema com a respectiva estrutura do pavimento. A justificativa para a adoção deste método, em vez de outros mais modernos e atualizados com o preconizado pela IP – 07/2004 (PMSP, 2004), é por ser adotado pelo DNIT. Neste caso, a não consideração das variações climáticas, por exemplo, se apresenta como uma limitação, bem como o projeto geométrico e o empenamento da placa.

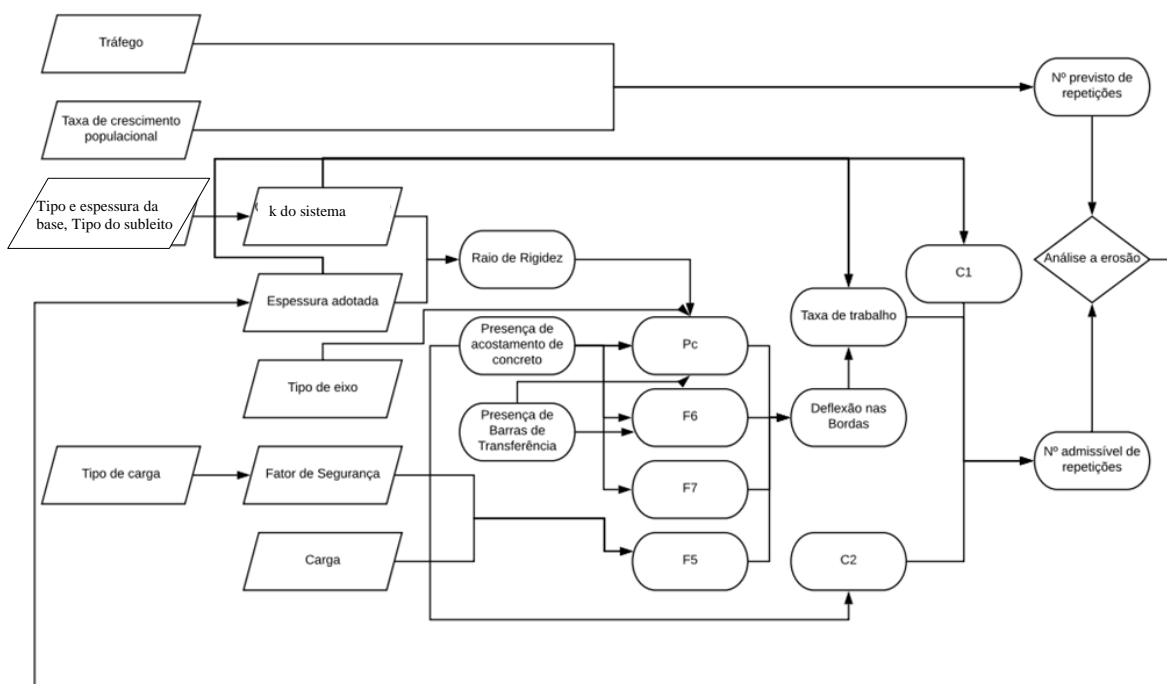


Figura 4: Fluxograma da segunda etapa da metodologia

4. RESULTADOS

4.1. Dimensionamento pelo método da PCA/84

Os dados do tráfego para uma taxa de crescimento adotada foi de 3,5%, e período de projeto de 20 anos. Devido ao elevado volume de caminhões, o fator de segurança adotado foi de 1,2 (Tabela 2). Adotou-se a resistência à tração na flexão do concreto de 4,5 MPa, presença de acostamento de concreto e uso de barras de transferência.

A camada de base escolhida foi granular com espessura de 15 cm, assente sobre um subleito com ISC de 5,5%. Foram realizadas duas tentativas de espessuras da placa com 24 cm e 25 cm. Os resultados do dimensionamento são apresentados na Tabela 3. A Figura 5 ilustra o exemplo da determinação de solicitações admissíveis á fadiga com uso do ábaco do método. Para uma espessura de placa de 24 cm, o limite de 100% foi excedido, assim, a espessura adotada foi de 25 cm.

Tabela 2: Dados do tráfego (repetições por tipo de eixo)

Carga por eixo (tf)	Número de repetições		Carga por eixo (tf)	Número de repetições	
	Eixo Simples	Eixo Tandem Duplo		Eixo Tandem Duplo	Eixo Tandem Triplo
< 6	4.544.085		18	823.994	
7	333.233		19	130.264	
8	1.484.401		20	884.582	
9	302.939		21	275.675	
10	442.291		22	133.293	514.996
11	639.201		23	93.911	772.495
12	702.819		24		730.083
13	336.262	3.938.207	25		854.288
14	442.291	333.233	27		145.411
15	63.617	787.641	28		890.641
16		408.968	29		684.642
17		196.910	30		187.822

Tabela 3: Valores obtidos e consumo à fadiga e à erosão nas tentativas

Parâmetros	Espessura da placa (cm)	
	24	25
<i>Fadiga</i>		
Eixo simples	0,252	0,237
Eixo duplo	0,221	0,212
Eixo triplo	0,168	0,160
<i>Erosão</i>		
Eixo simples	2,18	2,13
Eixo duplo	2,34	2,30
Eixo triplo	2,63	2,42
Consumo à fadiga (%)	134,29	34,84
Consumo à erosão (%)	362,86	61,50

4.2. Dimensionamento por meio do aplicativo ConcrePav

A Figura 6 (a) ilustra a tela inicial do aplicativo, na qual os seguintes dados são inseridos: resistência do concreto; ISC do subleito; taxa de crescimento do tráfego; tipo e espessura da camada de base; coeficiente de segurança; presença ou não de barras de transferência e, presença ou não de acostamento de concreto. A Figura 6 (b) mostra a tela, na qual os dados de tráfego, por tipo de eixo e, para o primeiro ano são introduzidos. A Figura 6 (c) ilustra a tela de resultados.

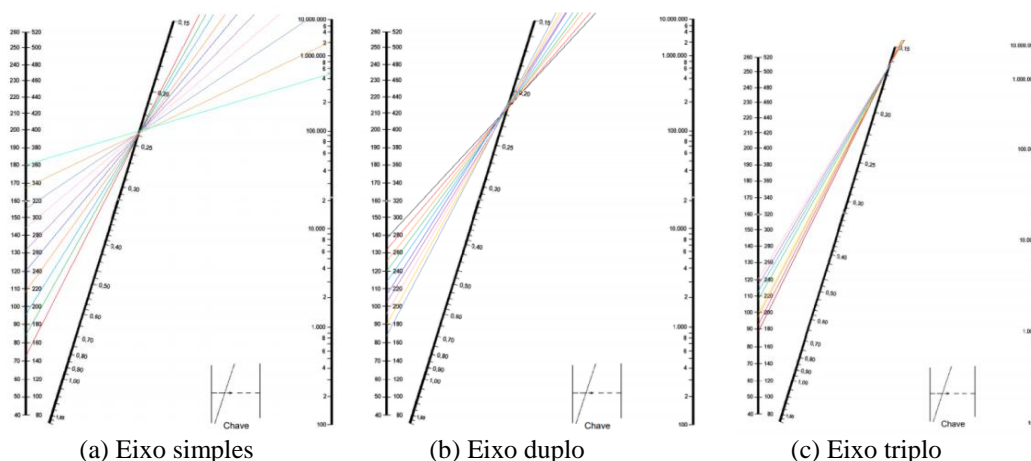


Figura 5: Exemplo da determinação das solicitações admissíveis à fadiga com uso de ábaco

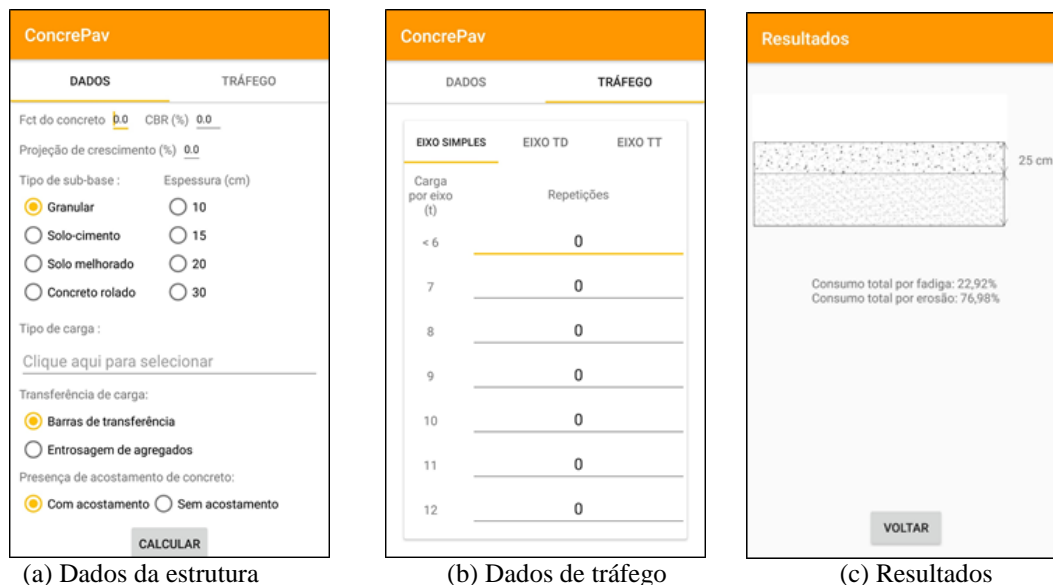


Figura 6: Telas do aplicativo ConcrePav

A Tabela 5 mostra o comparativo entre os resultados do aplicativo ConcrePav e do método PCA/84. Os valores obtidos de consumo à fadiga e à erosão por meio do aplicativo, para uma espessura de placa de concreto de 25 cm, resultaram em 22,92% e 61,50%, respectivamente. Observou-se que os resultados do aplicativo quanto ao consumo total à fadiga e a erosão, em relação ao método da PCA/84 (34,84% para fadiga e 61,50% para erosão) foram considerados próximos, em decorrência de arredondamentos e aproximações, nos dois casos. Obteve-se a mesma espessura do pavimento, com uma diferença entre os resultados pelo método PCA/84 e o aplicativo (*software*) de 11,9% no consumo à fadiga e de 15,5% no consumo à erosão.

Tabela 5: Comparativo entre o aplicativo ConcrePav e o método PCA/84

Parâmetros	ConcrePav	PCA/84
Processo	Automatizado	Iterativo, necessita de várias tentativas
Meio de obtenção dos resultados	Equações	Tabelas e ábacos
Velocidade de obtenção dos resultados	Rápida	Demorada
Possibilidade de comparação de resultados	Sim	Não

Com o aplicativo ConcrePav foi possível calcular a espessura da estrutura de um concreto simples de maneira muito rápida, quando comparado com o método apresentado pela PCA/84. A possibilidade de variação dos dados de entrada, forma rápida, se mostrou vantajoso e atrativo. O aplicativo ainda necessita de aprimoramentos, mas foi o resultado de uma tentativa de tornar os cálculos mais rápidos e promover atratividade de uso.

Durante a realização deste trabalho foram observadas algumas limitações do método da PCA/84, especialmente quanto à diversidade de tabelas com dados diferentes encontradas na literatura (Packard, 1984; Southgate e Deen, 1984; Tayabji e Packard, 1985; BRASIL, 2005) e ábacos sem qualidade devido a repetidas cópias e transcrição do sistema de medidas. Este trabalho Além disto, o aplicativo ainda não considera o empenamento de placas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de dimensionamento de pavimentos de concreto simples utilizado no Brasil foi desenvolvido na década de 1980, com o uso de tabelas e ábacos. Observaram-se dificuldades

de uso, uma vez que diferentes literaturas trazem tabelas com valores distintos e os ábacos possuem variações devido à mudança do sistema de medidas. Além disto, no Brasil já foram desenvolvidas metodologias mais atuais, porém, o método PCA/84 é o preconizado pelo DNIT.

O aplicativo foi desenvolvido com o uso do programa *Android Studio* através da linguagem de programação Java. Devido à dificuldade e impossibilidade de inserção das tabelas e dos ábacos no algoritmo, foram utilizadas equações que os representam.

O objetivo do trabalho foi desenvolver uma maneira mais simples, didática e atrativa para o dimensionamento dos pavimentos de concreto simples através de um aplicativo para celulares com sistema operacional *Android*. O aplicativo necessita ser complementado de forma que a diferença entre os resultados seja ínfima. O aplicativo se mostrou mais conservador que o método PCA/84, assim, ainda necessita de ajustes. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que o aplicativo resultou em valores próximos e semelhantes aos obtidos através do PCA/84, mas de uma forma rápida e atraente ao usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (2018) *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Third-Point Loading*. American Society for Testing and Materials (ASTM). West Conshohocken, PA, USA.
- Balbo, J. T. (2009) *Pavimentos de Concreto*. Oficina de Textos, 1ª ed. São Paulo, SP, Brasil. ISBN 978-85-86238-90-1.
- Balbo, J. T. (2014) *Pavimentos de Concreto*. Oficina de Textos, 2ª reimpressão. São Paulo, SP, Brasil. ISBN 978-85-86238-90-1.
- BRASIL (2005) *Manual de Pavimentos Rígidos*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. IPR. Publ., 714. 2.ed., 234p. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Brito, L. A. e Graeff, A. G. (2009). *Métodos de Dimensionamento de Pavimentos – Metodologias e seus Impactos nos Projeto de Pavimentos Novos e Restaurações*. Prime Engenharia e Consultoria Ltda. Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA. Disponível em: <http://www.triunfoconcepa.com.br/upload/anexo/57c54874ca4d4ac5.pdf>.
- CALTRANS (2008) *Guide for Design and Construction of New Jointed Plain Concrete Pavements (JPCPS)*. California Department of Transportation. Division of Design. Office of Pavement Design. California, USA.
- Aydın K. e Tığdemir, M. (2017) *User Friendly Software For Rigid Pavement Design*. International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS), v.9, Issue 4, 1-16. <http://dx.doi.org/10.24107/ijeas.335697>
- Lee Y-H. e Carpenter, S. H. (2001) PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, v. 4, nº. 4, 293-300.
- Loturgo, B. (2005) *Pavimento Rígido*. Técnica, Pini, Brasil. Disponível em: <http://technet7.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo286026-1.aspx>.
- Packard, P. E. (1984). *Thickness design for concrete highway and street pavements*. Portland Cement Association, USA.
- Pitta, M. R. (1998) *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método da PCA/84*. 3.ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.
- PMSP (2004) *Dimensionamento de Pavimentos de Concreto IP – 07/2004*. Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras. Prefeitura Municipal de São Paulo, SP, Brasil.
- Rodolfo, M. P. e Balbo, J. T. (1998) *Stress Analysis of Cement Bases on Concrete Pavements*. International Symposium on Concrete Roads. Lisboa, Portugal.
- Rodolfo, M. P. e Balbo, J. T. (2000) *Modelagem de Tensões em Pavimentos de Concreto Submetidos a Gradientes Térmicos e Cargas Rodoviárias*. Congresso de Ensino e Pesquisa em Transporte (ANPET 2000). Gramado, RS, Brasil.
- Rodolfo, M. P. e Balbo, J. T. (2008) *Stress in Concrete Pavements: Models to Compute Stress Considering Tropical Climate Thermal Gradients and Wheel Loads*. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Quebec, Canada.
- Senço, W. (2001) *Manual de Técnicas de Pavimentação*. Editora Pini, vol. 2, 1 ed., 688 p. São Paulo, SP, Brasil.
- Southgate, H. F. e Deen, R. C. (1984) *Thickness Design Procedure for Portland Cement Concrete Pavements*.

Report. Kentucky Transportation Center Research, USA.

Tayabji, S. D. e Packard, R.G. (1985) New PCA design procedure for concrete highways and street pavements – 1984. *Proceedings of Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*. Purdue University, USA.

Tinni, A. (2013). *Introduction to concrete pavements*. Introduction to Concrete Pavements Eesti Betooniühing. Disponível em: <https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2013/03/5-Intro-to-Conc-Pavements-Est.pdf>

Yoder, E. J. e Witzak M. W. (1975). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons, p. 711, USA.

¹Matheus Chirolli (matheuschirolli@hotmail.com)

²Leonardo Soares (leohppyftsoares@gmail.com)

³Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)

⁴Luciana Rohde (l.rohde@ufsc.br)

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Rua João Pio Duarte Silva 204, Córrego Grande, Florianópolis, SC, Brasil.

ANEXO

Análise à fadiga: Cálculo da tensão equivalente aplicada na placa de concreto (Equação A.1):

$$\sigma_{eq} = \frac{6 \cdot M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (A.1)$$

em que M_e depende do tipo de eixo e da presença ou não de acostamento de concreto.

- Eixo simples sem acostamento de concreto (Equação A.2):

$$M_e = -1600 + 2525 * \log(l) + 24,42 * l + 0,204 * l^2 \quad (A.2)$$

- Eixos em tandem sem acostamento de concreto (Equação A.3):

$$M_e = 3029 - 2966,8 * \log(l) + 133,69 * l - 0,0632 * l^2 \quad (A.3)$$

- Eixo simples com acostamento de concreto (Equação A.4):

$$M_e = (-970,4 + 1202,6 * \log(l) + 53,587 * l) * (0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (A.4)$$

- Eixos em tandem com acostamento de concreto (A.5):

$$M_e = (2005,4 - 1780,9 * \log(l) + 99,008 * l) * (0,8742 + 0,01088 * k^{0,447}) \quad (A.5)$$

em que l é o raio de rigidez relativa da base (Equação A.6):

$$l = \left(\frac{E * h^3}{12 * (1 - \mu^2) * k} \right)^{0,25} \quad (A.6)$$

em que E é o módulo de elasticidade do concreto, adotado 4 Mpsi.

μ é o coeficiente de Poisson do concreto, adotado 0,15.

h é a espessura do revestimento em polegadas (*inches*).

k é o coeficiente de recalque da sub-base em pci.

f_1 é um fator de ajuste que relaciona as cargas por eixo e sua respectiva áreas de contato, sendo que a representação dos eixos simples é feita por meio da Equação A.7 e para eixos em tandem pela Equação A.8:

$$f_1 = \left(\frac{24}{CES} \right)^{0,06} * \frac{CES}{18} \quad (A.7)$$

$$f_1 = \left(\frac{48}{CET} \right)^{0,06} * \frac{CET}{36} \quad (A.8)$$

em que CES é a carga do eixo simples e CET é a carga do eixo tandem.

f_2 é um fator de ajuste devido a presença (Equação A.9) ou não (Equação A.10) de acostamentos de concreto:

$$f_2 = 1 \quad (A.9)$$

$$f_2 = 0,892 + \frac{h}{85,71} - \frac{h^2}{3000} \quad (A.10)$$

f_3 é um fator de ajuste que representa o efeito da posição dos caminhões na pista e seu reflexo nas tensões de borda. Considerando que o método PCA/84 adota uma interferência de 6%, assim é adotado como sendo igual a 0,884.

f_4 é um fator de ajuste para consideração da resistência do concreto aos 28 dias, sendo, $f_4 = 0,953$.

Avaliação:

- A partir da verificação da tensão equivalente, o número de repetições admissíveis (N_f) que se baseia na relação entre a tensão equivalente e a resistência a tração do concreto (S_c), é calculado através das Equações 1, 2 e 3;
- Para cada carga e tipo de eixo é calculado número de repetições admissíveis pela utilizada a lei de Miner. De acordo com a Lei de Miner, o somatório das relações entre o número de repetições previstas e o número de repetições admissíveis para cada carga e tipo de eixo não deve passar de 100%. Caso o somatório seja maior que 100% , diminui-se a espessura da placa e o procedimento é refeito.

Análise à erosão: Cálculo da deflexão nas bordas (δ_{eq}), Equação A.11:

$$\delta_{eq} = \frac{p_c}{k} * f_5 * f_6 * f_7 \quad (A.11)$$

em que p_c depende do tipo de eixo e pela presença ou não de barras de transferência e acostamento de concreto.

- Eixo simples, sem barras de transferência e sem acostamento de concreto (Equação A.12):

$$p_c = 1,571 + \frac{46,127}{l} + \frac{4372,7}{l^2} - \frac{22886}{l^3} \quad (A.12)$$

- Eixos em tandem, sem barras de transferência e sem acostamento de concreto (Equação A.13):

$$p_c = 1,847 + \frac{213,68}{l} - \frac{1260,8}{l^2} + \frac{22989}{l^3} \quad (A.13)$$

- Eixo simples, sem barras de transferência e com acostamento de concreto (Equação A.14):

$$p_c = 0,5847 + \frac{65,108}{l} + \frac{1130,9}{l^2} - \frac{5245,8}{l^3} \quad (A.14)$$

- Eixos em tandem, sem barras de transferência e com acostamento de concreto (Equação A.15):

$$p_c = 1,47 + \frac{102,2}{l} - \frac{1072}{l^2} + \frac{14451}{l^3} \quad (A.15)$$

- Eixo simples, com barras de transferência e sem acostamento de concreto (Equação 16):

$$p_c = -0,3019 + \frac{128,85}{l} + \frac{1105,8}{l^2} + \frac{3269,1}{l^3} \quad (A.16)$$

- Eixos em tandem, com barras de transferência e sem acostamento de concreto (Equação 17):

$$p_c = 1,258 + \frac{97,491}{l} + \frac{1484,1}{l^2} - \frac{180}{l^3} \quad (A.17)$$

- Eixo simples, com barras de transferência e com acostamento de concreto (Equação A.18):

$$p_c = 0,018 + \frac{72,99}{l} + \frac{323,1}{l^2} + \frac{1620}{l^3} \quad (A.18)$$

- Eixos em tandem, com barras de transferência e com acostamento de concreto (Equação A.19):

$$p_c = 0,0345 + \frac{146,25}{l} - \frac{2385,6}{l^2} + \frac{23848}{l^3} \quad (A.19)$$

f_5 é um fator de ajuste que relaciona as cargas por eixo e sua respectiva áreas de contato, sendo que a representação dos eixos simples é feita por meio da Equação A.20 e para eixos em tandem pela Equação A.21:

$$f_5 = \frac{CES}{18} \quad (A.20)$$

$$f_5 = \frac{CES}{36} \quad (A.21)$$

f_6 é um fator de ajuste, de modo que, para placas sem barras de transferência e sem acostamento de concreto o cálculo é feito pela Equação A.22; para placas sem barras de transferência e com acostamento de concreto pela Equação A.23 e, para placas com barras de transferência pela Equação A.24:

$$f_6 = 0,95 \quad (A.22)$$

$$f_6 = 1,001 - \left(0,26363 - \frac{k}{3034,5}\right)^2 \quad (A.23)$$

$$f_6 = 1 \quad (A.24)$$

f_3 é um fator de ajuste para o efeito da posição dos caminhões nas tensões de borda, sendo adotados os valores 0,896 para placas sem acostamento de concreto e 1 para placas com acostamento de concreto.

- Com a deflexão nas bordas é possível calcular a taxa de trabalho. A taxa de trabalho é calculada pela Equação A.25:

$$P = 268,7 * \frac{k^{1,27} * \delta_{eq}^2}{h} \quad (A.25)$$

- Para o cálculo de número admissível de repetições para a análise a erosão utiliza-se a Equação A.26 para $C_1 * P > 9$ e a Equação A.27 para $C_1 * P \leq 9$:

$$\log N_e = 14,524 - 6,777 * (C_1 * P - 9)^{0,103} - \log C_2 \quad (A.26)$$

$$N_e = \text{ilimitado} \quad (A.27)$$

em que C_1 é um valor de ajuste para bases estabilizadas dado pela Equação A.28 e, C_2 é um valor de ajuste para pavimentos sem acostamento de concreto, sendo dado pela Equação A.29 para pavimentos sem acostamento de concreto e pela Equação A.30 para pavimentos com acostamento de concreto:

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h}\right)^2 \quad (A.28)$$

$$C_2 = 0,06 \quad (A.29)$$

$$C_2 = 0,94 \quad (A.30)$$

Avaliação: A partir do comparativo de consumo entre as repetições previstas e admissíveis, avalia-se se a espessura adotada inicialmente atende aos requisitos do método. Caso o contrário, nova espessura é adotada e o procedimento de cálculo é repetido.