

Pavimentos Estruturalmente Armados para Aeroportos



Instituto Brasileiro de Telas Soldadas

Pavimentos Estruturalmente Armados para Aeroportos



São Paulo, 2004

Autor:

Públio Penna Firme Rodrigues

Engenheiro Civil

Diretor da LPE Engenharia e Consultoria

Consultor Técnico do Instituto Brasileiro de Telas Soldadas

1º Edição

R esumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar o pavimento estruturalmente armado para aeroportos, baseado nos trabalhos desenvolvidos por Anders Lösberg e adaptados às nossas condições. Apresenta um retrospecto dos seus trabalhos experimentais e as vantagens do emprego de estruturas mais delgadas podem proporcionar, tanto técnicas como econômicas e principalmente na preservação dos recursos naturais.

S umário

1 - INTRODUÇÃO	08
2 - O TRABALHO PIONEIRO DE LÖSBERG	09
3 - DIMENSIONAMENTO DO PEA	14
4 - EXPERIÊNCIA BRASILEIRA	16
5 - CONCLUSÃO	17
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18

01 Introdução

Os pavimentos de concreto apresentam vantagens em aeroportos devido principalmente a sua grande durabilidade e são encontrados nas áreas de estacionamento de aeronaves de praticamente todos os aeroportos de médio e grande porte do Brasil.

Grande parte desses pavimentos é constituída por estruturas de concreto simples, que apresentam algumas limitações com relação ao tamanho das placas e controle da fissuração.

Modernamente temos visto experiências bem sucedidas com estruturas de concreto protendido, como as pistas do aeroporto do Rio de Janeiro, os pátios de estacionamento dos aeroportos de Curitiba e Porto Alegre, caracterizando-se pela baixa espessura da placa e elevado espaçamento entre as juntas.

Entretanto, há mais um tipo de pavimento que também é muito apropriado para aeroportos, que é o estruturalmente armado, que foi empregado com grande sucesso no aeroporto de Estocolmo, funcionando com excelente desempenho por mais de 30 anos, que será citado no item seguinte.

Pouco divulgado e talvez por isso tenha ficado relegado a um segundo plano, embora na Suécia dos anos 40 e 50 tenha sido o mais empregado em aeródromos civis e militares, os pavimentos estruturalmente armados aos poucos vêm recobrando seu lugar na pavimentação, com expressivas obras na área industrial e aeroportos privados.

A fim de homogeneizar a linguagem, existem basicamente três tipos de pavimentos que empregam armaduras: pavimento com armadura distribuída, pavimento continuamente armado e pavimento estruturalmente armado.

- O mais comum é o pavimento com armadura distribuída, cuja única função é controlar a fissuração do concreto.
- O segundo tipo, muito popular nos EUA e em alguns países da Europa é o continuamente armado, que se caracteriza por não apresentar juntas de retração e o pavimento acaba ficando com fissuras igualmente espaçadas e com abertura máxima calculada em projeto.
- Finalmente, temos o pavimento estruturalmente armado, objeto deste trabalho, que apresenta armadura positiva para a absorção dos momentos fletores, podendo ou não apresentar armadura negativa para o controle das fissuras por retração hidráulica.

Ao contrário do pavimento simples, o pavimento estruturalmente armado pode ser dimensionado com placas de dimensões bastante superiores, bastando para isso estabelecer uma taxa de armadura compatível com as suas dimensões.



Outro ponto fundamental para a sua adoção é relativo às questões ambientais, por consumir consideravelmente menores volumes de matéria prima - como os agregados - do que os pavimentos flexíveis e os pavimentos de concreto simples.

Seu outro insumo, o aço, é predominantemente produzido com sucata de ferro, contribuindo também para a limpeza ambiental.

Sob o ponto de vista de comportamento estrutural, o PEA - pavimento estruturalmente armado - é bastante similar aos protendidos:

- São bastante delgados;
- As deformações são compatíveis;
- As tensões geradas na sub-base são similares.

Dessa forma, é perfeitamente possível o emprego dos seus fundamentos concernentes a esses aspectos-chave no dimensionamento do PEA, já que estão bem mais difundidos e suficientemente experimentados.

02 O Trabalho Pioneiro de Lösberg

Anders Lösberg foi um engenheiro sueco com especialidade em estruturas, tendo sido professor e chefe do departamento de estruturas de concreto na Chalmers University of Technology em Gotenburgo - Suécia e que dedicou muitos anos de pesquisa ao dimensionamento de placas de concreto armado apoiadas em meio elástico, voltado notadamente ao emprego de pavimento aeroportuário, tendo sido responsável pelo dimensionamento de diversas unidades civis e militares.

Sua pesquisa teórica e experimental culminou com a defesa de sua tese de doutorado em 1961 (1), que posteriormente foi publicada com diversos aperfeiçoamentos e voltados à divulgação dos seus estudos ao meio técnico (2).

Como principal referência ao seu trabalho no meio aeroportuário estão as pistas do Aeroporto de Estocolmo, Arlanda, que foram dimensionadas como estruturalmente armadas empregando apenas armadura inferior e placas de até 50m de comprimento (3), como a estrutura apresentada na figura 1.

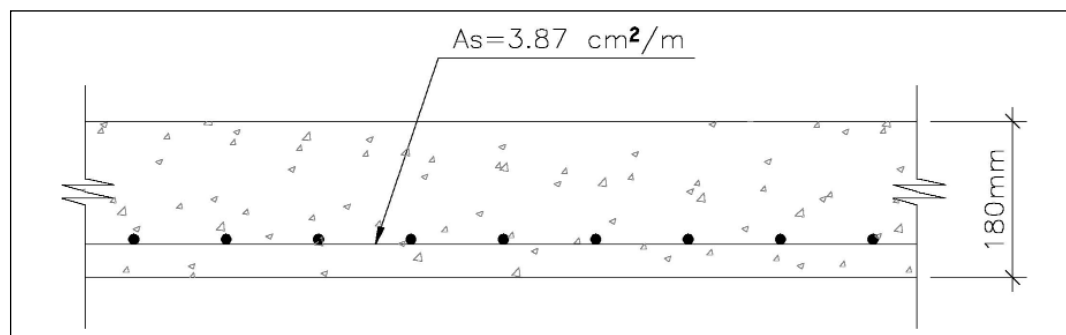


Figura 1 Seção típica do Aeroporto de Estocolmo (3)

A armadura era formada por tela de aço soldada, \varnothing 8mm cada 130mm, produzida com aço similar ao nosso CA-60. Essas pistas estiveram em operação por mais de 30 anos, com excelente comportamento estrutural e de rolamento.

Talvez pelo fato de Lösberg ter se dedicado, após a década de 1960, intensamente às estruturas de concreto armado, acabou não deixando seguidores na área dos pavimentos e seu método acabou ficando no esquecimento, tendo sido resgatado a partir de 1980 para o emprego no dimensionamento de pavimentos industriais e rodoviários empregando reforços de telas soldadas ou fibras de aço.

Como especialista em concreto, Lösberg considerava que tensões de tração deveriam ser combatidas com o emprego de armaduras adequadamente posicionadas, cuja taxa, quando apropriada, deveria permitir a fissuração do concreto com aberturas que não comprometeriam a sua durabilidade.

Complementarmente, essas mesmas armaduras iriam manter eventuais fissuras, principalmente aquelas não provenientes do carregamento, como as de retração hidráulica ou térmicas, ficassem suficientemente fechadas permitindo a transferência de cargas e aumentando a durabilidade do pavimento, fato que não ocorre no pavimento simples.

Com essa finalidade, as armaduras não estruturais foram largamente estudadas na Inglaterra em diversas pistas experimentais submetidas ao tráfego rodoviário e descritos por Croney (4) demonstrando que a vida útil do pavimento pode ser significativamente incrementada apenas pela manutenção das fissuras suficientemente fechadas.

Em seus estudos, Lösberg considerou que o pavimento estaria sendo submetido à tensões de origem térmica, que produziam também o empenamento, e aos momentos gerados sob a carga de roda.

Neste caso, o pico das tensões ocorre imediatamente abaixo do centro do carregamento – considerado como circular de raio c/ℓ proporcional à relação c/ℓ , onde ℓ é o raio de rigidez da placa:
$$M = Pf (c/\ell) \quad (3)$$

Observando a figura 2, que mostra a distribuição dos momentos para dois níveis de carregamento e conhecendo a natureza frágil da ruptura do concreto, que praticamente não apresenta deformações plásticas, força ao dimensionamento da placa de concreto simples pelo pico dos momentos, levando a espessuras elevadas de placas. Como agravante temos que quanto mais espessa é a placa, maiores são os momentos gerados.

Como alternativa a esses problemas, Lösberg propôs a introdução de uma armadura positiva nas duas direções próxima à base da placa de concreto, permitindo a fissuração do concreto e uma natural redistribuição dos esforços não ficando restrita apenas ao ponto de maior carregamento (figura 2).

Nesta figura, as curvas A e B representam a distribuição dos momentos de acordo com a teoria da elasticidade para cargas altas e baixas, considerando área de carregamento circular, enquanto a curva C mostra a distribuição dos momentos quando a placa de concreto armado entra no estágio plástico, ocorrendo o princípio de escoamento da armadura; é nesta fase que o pavimento armado de fato começa a comportar-se como tal.

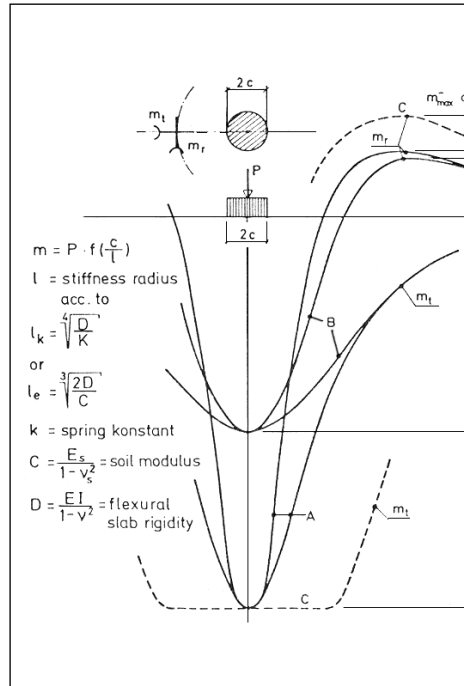


Figura 2
Distribuição aproximada dos momentos fletores

Como resposta natural à deformação da placa surge um momento negativo, bem menor que o positivo, que precisa ser combatido pela resistência à tração na flexão do concreto. Quando o pavimento armado é submetido a carregamentos crescentes e o aço atinge o seu limite de escoamento, a redistribuição dos momentos positivos com o incremento das fissuras inferiores irá progredindo até que o momento negativo ultrapasse a capacidade do concreto, definindo se então a ruptura do pavimento (figura 3).

Em seu trabalho, Lösberg desenvolveu uma série de ábacos de dimensionamento que permitem a obtenção da soma dos momentos fletores m – positivo – e m' , que ocorre no topo da placa, em função da carga aplicada, raio de rigidez da placa de concreto e raio da área de contato, que são apresentadas nas figuras 4 a 6. As demais tensões atuantes, como as de retração e as térmicas, geradas pelo empenamento são calculadas pelas formas clássicas.

O conceito da soma de momentos empregado nos ábacos pode ser questionado para o cálculo do momento positivo, que é uma consideração similar à empregada em vigas contínuas, onde a armadura negativa é capaz promover um alívio nos momentos positivos, proporcional aos momentos negativos absorvidos.



Pavimentos Estruturalmente Armados para Aeroportos

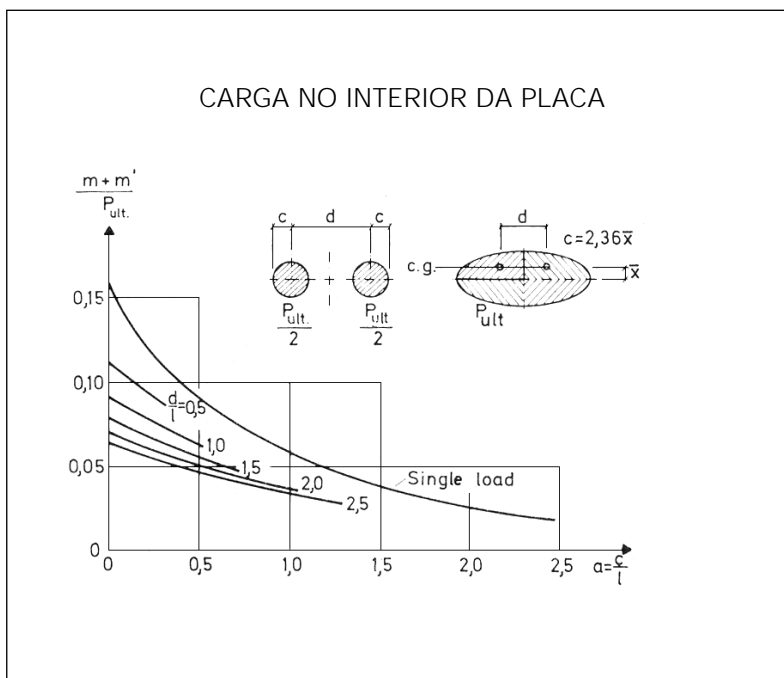
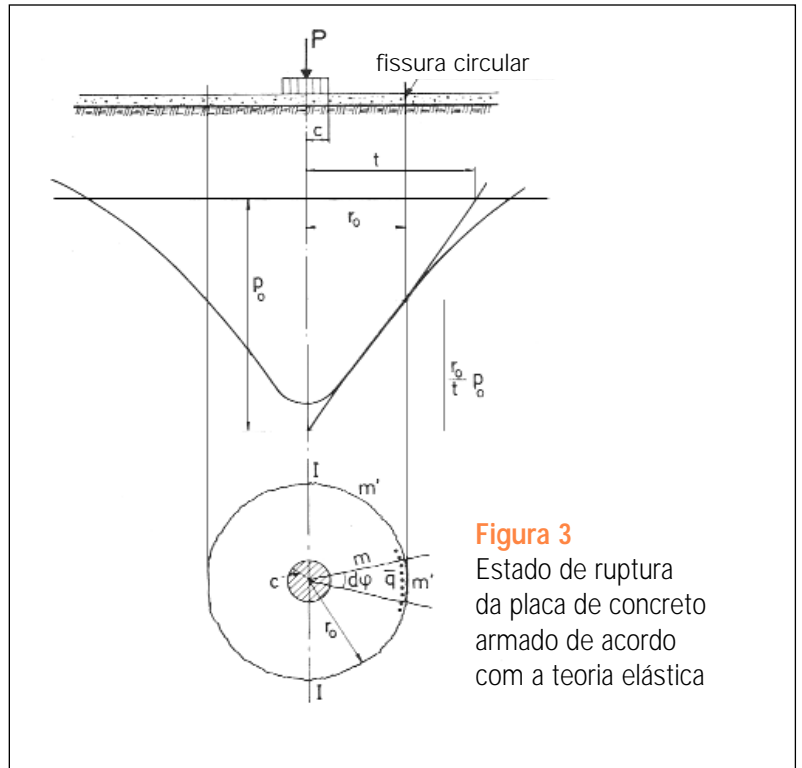


Figura 4
Diagrama de momentos atuantes para carga no interior da placa

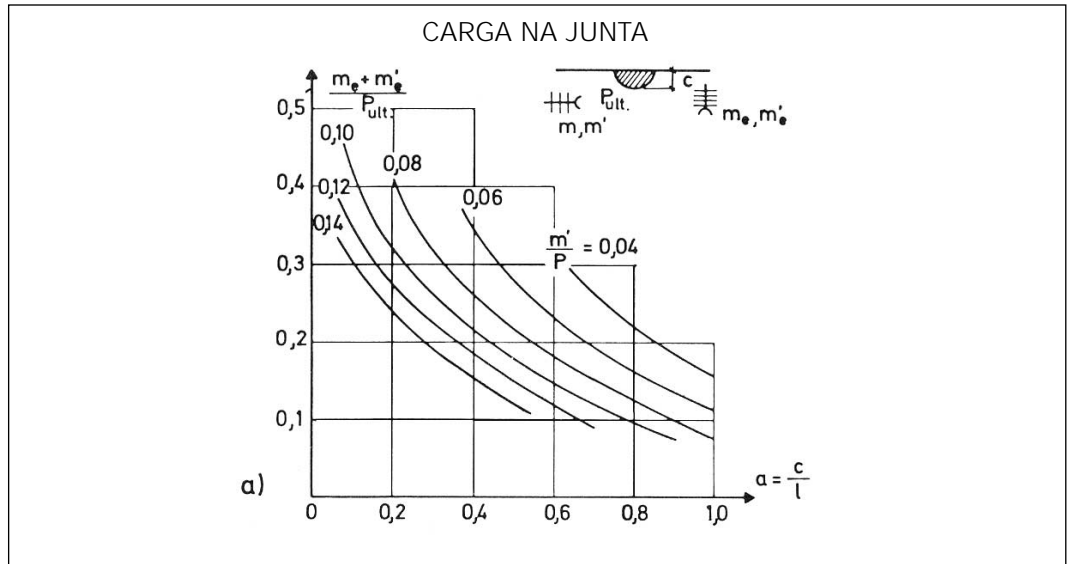


Figura 5 Diagrama de momentos atuantes para carga na junta (com barras de transferência) da placa

Entretanto, ela só é, na nossa opinião, válida apenas quando há armadura negativa que resista a esses momentos, pois caso contrário, quando ocorrer uma fissura na placa de concreto, ele deixará de existir, sobrecarregando os momentos positivos.

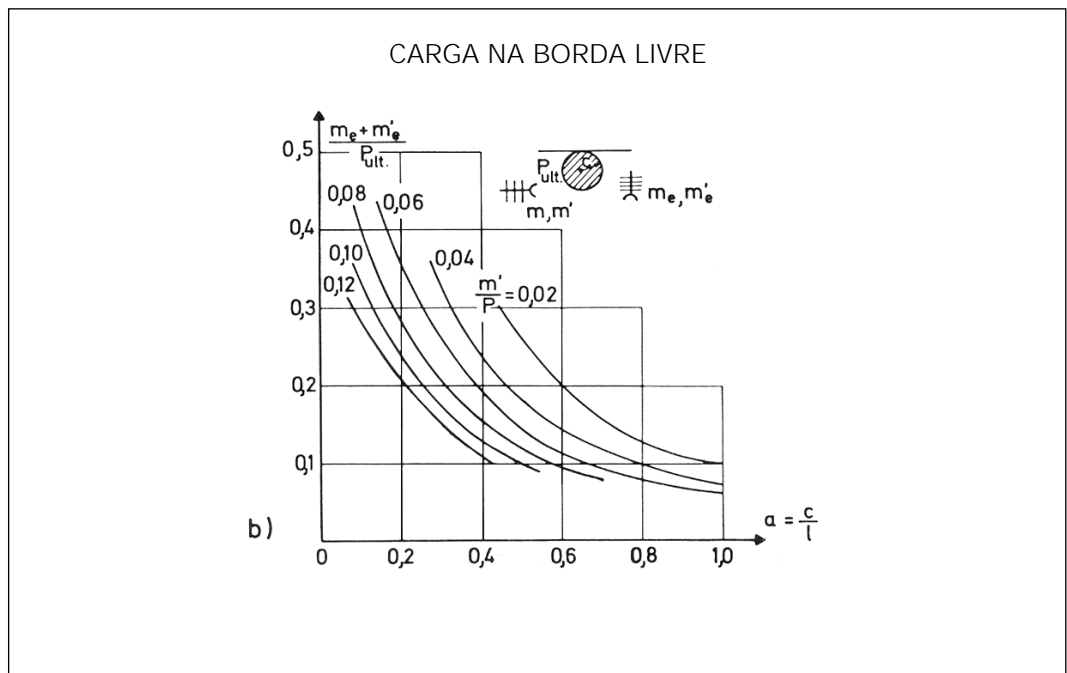


Figura 6 Diagrama de momentos atuantes para carga na borda livre da placa

03 Dimensionamento do PEA

O dimensionamento do PEA pode ser feito com base das fórmulas clássicas de Westergard, pelos diagramas de Lösberg ou pelos programas de elementos finitos. Esses procedimentos permitem o conhecimento do momento fletor atuante e, a partir daí, a determinação das armaduras passa a ser elementar. O cálculo das armaduras pode ser feito com base nos adimensionais (estádio III) k_6 e k_3 (5).

Sob o ponto de vista de cálculo das armaduras, é perfeitamente possível a obtenção de estruturas extremamente delgadas. Consideremos por exemplo o dimensionamento de um pátio de estacionamento para aeronaves 747-400, para determinadas condições de solo, cujos momentos - obtidos com um programa de elementos finitos - são mostradas no quadro 1:

Quadro 1

Momento Atuante x Espessura

h (cm)	M_r (tf x cm/m)
18	358
20	397
22	433
32	590
34	616
36	641



Desse exemplo, vem uma questão crucial: é possível o emprego de estruturas super delgadas desde que as armaduras resistam aos esforços previstos?

Lösberg acreditava que era possível e fez inclusive trechos experimentais de pistas bastante arrojadas, com apenas 8cm de espessura, mas que acabaram apresentando muitos problemas executivos.

Hoje sabemos que a rigidez do pavimento deve ser governada por uma deformação máxima admissível, que para aeroportos pode ser tomada no centro da placa (para pavimentos considere-se a deformações de borda livre).

O valor dessas deformações podem ser, por exemplo, função do solo ou mesmo emprestado dos valores sugeridos para os pavimentos protendidos (6), que é de 1,5mm para carga no interior da placa; o ACI recomenda que, para o caso de pavimentos rodoviários, a deformação de borda livre não deve ser superior a 0,75mm.

A validade desse critério é que o pavimento protendido apresentará rigidez semelhante ao armado, em função das espessuras finais.

Outro critério que pode ser emprestado desse mesmo trabalho é relativo ao coeficiente de recalque mínimo admissível, cerca de 80MPa/m.

Na verdade, devemos observar que a seção de concreto armado irá trabalhar fissurada e que, portanto, haverá uma redução no seu momento de inércia, proporcional à taxa de armadura ρ (porcentagem da área de aço em relação à de concreto).

Essa redução irá implicar em uma diminuição do raio de rigidez e consequentemente do momento fletor atuante. Por outro lado irá aumentar as deformações.

Lösberg propôs que esse efeito pode ser representado pelo emprego de um coeficiente α , função do produto $\rho \cdot n$, onde ρ é a taxa da armadura e n é a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto, podendo ser considerada igual a 7,5, cujos valores podem ser tomados pela seguinte expressão:

$$\alpha = -0,0018(n \cdot \rho)^2 + 0,0852(n \cdot \rho) + 0,0134$$

O valor de α assume uma importância grande no controle das deformações da placa e pode ser controlado pela taxa de armadura empregada, fazendo com que – para os pavimentos armados – a rigidez da placa não seja governada apenas pela sua espessura, mas considerada em conjunto com o aço empregado.

O α nada mais é do que a relação entre os momentos de inércia crítico, obtido com a seção fissurada (considerando o limite de utilização do aço) e o momento de inércia da seção íntegra:

$$\alpha = \frac{I_{crit}}{I_g}$$

O momento de inércia da seção fissurada, também denominado por momento de inércia equivalente – I_e – pode assumir uma ampla faixa de valores variando entre o da seção não fissurada até o crítico, podendo ser obtido pela expressão:

$$I_e = \left(\frac{M_{crit}}{M_a} \right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{crit}}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{crit} \leq I_g$$

onde,

- M_{crit} é o momento máximo resistido pelo concreto ou, em outras palavras, o momento de fissuração do concreto simples:

$$M_{crit} = \frac{(f_{ctM,k}) I_g}{y_t}$$

I_g é o momento de inércia da seção não fissurada e y_t a distância da linha neutra à fibra mais tracionada.

- M_a é o momento atuante.
- I_{crit} é o momento de inércia da seção fissurada:

$$I_{crit} = \frac{b \cdot x^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (d - x)^2$$

sendo b a largura da seção, x a altura da seção comprimida, n a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto (tomado como 7,5), A_s a seção de aço e d a altura útil da peça (altura nominal menos o comprimento da armadura).

O valor ℓ_e deve ser empregado no cálculo do raio de rigidez da placa de concreto armado (ℓ_e), que de maneira simplificada é :

$$\ell_e = \sqrt[4]{\frac{E \cdot I_e}{(1-\mu^2) \cdot k}}$$

Esse valor pode então ser aplicado no cálculo dos momentos atuantes empregando-se as fórmulas clássicas de Westergard, formulações de Lösberg ou outras expressões.

No caso do cálculo por programas de elementos finitos, a consideração da fissuração da seção pode ser efetuada pelo emprego de um módulo de elasticidade real pelo coeficiente $\alpha_e = \frac{\ell_e}{l_g}$

O controle das deformações do pavimento armado passa a ser feito não apenas pela espessura da placa, mas também pela variação da taxa de armadura. Esse fato é particularmente interessante no caso de pavimentos rodoviários, onde a frequência dos carregamentos pode ser muito elevada.

04 Experiência brasileira

A experiência brasileira com pavimentos estruturalmente armados surgiu pela necessidade da construção de pavimentos rígidos com custos mais competitivos, inicialmente para a iniciativa privada, em áreas com circulação de veículos pesados com frequência superior a $N = 5 \times 10^7$ solicitações de eixo padrão; esse primeiro pavimento, que atende a uma indústria cervejeira no interior da Bahia, foi construído há cerca de 7 anos, com apenas 14 cm de espessura e sub-base granular.

Dessa primeira experiência, constatou-se que os custos eram competitivos e buscou-se ampliar mais o seu estudo e foi construída no Paraná, no municíio de Balsa Nova, em trecho experimental com 1,5 km de extensão, que na realidade forma um acesso entre as duas pistas da BR 277, que recebe caminhões com cargas superiores às permitidas pela legislação que transportam calcário para uma fábrica de cimento. Esse pavimento foi executado com 16 cm de espessura, armadura dupla e sub-base de concreto compactado com solo (CCR) com 10 cm de espessura, estando em operação a mais de 5 anos com excelente desempenho.

A essas experiências somam-se diversas outras cuja descrição neste trabalho não é apropriada, mas que vêm contribuindo para a consolidação do sistema.

No setor aeroportuário, a primeira experiência foi realizada na construção de um pátio de estacionamento de aeronaves de um hangar de manutenção, na cidade de São Carlos (SP), destinado a receber aeronaves do porte do Airbus A330, que apresenta espessura de 20 cm, armadura dupla (telas soldadas) e espaçamento de juntas de até 15 m.

Como a área destina-se prioritariamente à manutenção de aeronaves, foi considerado o A330 com carga máxima de 170 *tf*. A obra foi concluída em 2001, englobando também a ampliação do pátio de estacionamento de aeronaves do aeroporto de São Carlos, executado com o mesmo sistema.

05 Conclusão

O pavimento estruturalmente armado passa a ser uma excelente alternativa aos pavimentos tradicionais, principalmente quando a oferta de agregados de boa qualidade não são disponíveis na região da obra.

Como sabemos, a resistência à tração na flexão do concreto é fortemente dependente da natureza dos agregados e em diversas regiões brasileiras, principalmente no norte do país são praticamente inexistentes.

Como no pavimento armado o concreto trabalha exclusivamente à compressão, é perfeitamente possível o emprego de agregados como o seixo rolado, arenitos, basaltos e outros que apresentam baixo desempenho no concreto simples.

As armaduras fornecem extrema versatilidade permitindo que nas regiões mais solicitadas, como as juntas ou bordas livres possam, quando necessário, serem reforçadas com armaduras complementares.

Finalmente, o fato de permitir estruturas delgadas, apresenta baixo consumo de agregados possibilitando obras de custo muito competitivo frente a outras estruturas e o emprego das telas soldadas facilita a sua execução, mesmo quando são empregados equipamentos de grande porte, possibilitando placas com mais de 200 m², reduzindo as juntas de construção e serradas, normalmente o ponto mais frágil do pavimento.

Referências Bibliográficas

- (1) **Lösberg, Anders:** *Structurally Reinforced Concrete Pavements.* Chalmers Tekniska. Hogshola, Götherburg, 1960
- (2) **Lösberg, Anders:** *Design Methods for Structurally Reinforced Concrete Pavements.* Chalmers Tekniska Hogshola Handlingar, Götherburg, Sweden, 1961
- (3) **Lösberg, Anders:** *Pavement Slabs on Grade with Structurally Active Reinforcement.* ACI Journal, dec. 1978
- (4) **Croney, Paul, Croney, David:** *The Design and Performance of Road Pavements.* 3ª Edition, McGraw-Hill, N.Y., 1997
- (5) **Rodrigues, Públio P.F., Pitta, Márcio Rocha:** *Pavimentos de Concreto.* Revista Ibracon nº 19, São Paulo, 1997
- (6) **American Concrete Institute:** *Recommendations for Designing Prestressed Concrete Pavements.* ACI 325.7R-88. USA, 1988