

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO NO ESTUDO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

Albert Willian Faria.¹

Resumo

Este artigo tem por objetivo o estudo do comportamento global de pavimentos intertravados de peças pré-moldadas de concreto. Apesar da diversidade de vantagens que este tipo de pavimento apresenta em relação aos demais há poucos estudos principalmente no que se refere ao seu comportamento global. O comportamento de pavimentos intertravados sujeitos a cargas aplicadas através de prensas hidráulicas é similar ao verificado em pavimentos do tipo flexível, no entanto, o estudo do comportamento global do pavimento intertravado por meio de prensas hidráulicas tem se mostrado dispendioso e limitado. Diversas prensas, de custo unitário elevado, são colocadas em pontos distintos do pavimento e a faixa a ser avaliada é limitada pelo comprimento da viga de apoio da prensa. Assim o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um importante instrumento para o estudo do comportamento global do pavimento intertravado de peças de concreto. Através dele pode-se chegar a conclusões importantes a respeito da distribuição de tensões e deformações em diversos pontos do pavimento. Além disso, o MEF permite lidar com materiais que apresentam módulo de elasticidade não linear, ou seja, dentro do regime plástico, permitindo deste modo a geração de um modelo cujos elementos suportam maiores solicitações e comportamento mais próximo do real.

Palavras-chave: Pavimento intertravado; Elementos finitos; Análise global.

60º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 25 a 28 de julho de 2005 - Belo Horizonte MG.

¹ - Mestrando da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU - MG).

1 INTRODUÇÃO

A cobertura do terreno com a colocação de pedras em estado natural foi a origem dos pavimentos e por volta de 3000 A.C., foram construídos pavimentos de pedra em Creta na Grécia. O pavimento surgiu da necessidade de se ter vias duráveis, que permitissem o trânsito rápido e seguro em qualquer época do ano. Já em 500 A.C., Roma havia desenvolvido pavimentos com bases granulares estabilizadas e camadas de rolamento feitas de pedra. O surgimento dos veículos de transporte trouxe a necessidade de se ter uma superfície mais uniforme e com mais conforto de rolamento.

Devido às dificuldades de extração, produção artesanal, desconforto, geração de níveis elevados de ruídos, baixa capacidade estrutural e ao aperfeiçoamento das máquinas vibro-compressoras, inicia-se após a Segunda Guerra Mundial o desenvolvimento tecnológico das peças pré-moldadas de concreto na Alemanha e na Holanda.

O pavimento de peças pré-moldadas de concreto é um pavimento adequado para estacionamentos, vias de acesso, desvios ou rodovias de tráfego leve e preferencialmente urbano. É constituído por peças pré-moldadas de concreto, com diversas formas, colocadas justapostas e rejuntadas. Na década de 70 aparece no Brasil esta tecnologia, e nesta mesma década ocorre um grande avanço tecnológico em sua forma de produção, surgindo diversos tipos, dimensões, cores e formas de assentamento das peças intertravadas.

2 METODOLOGIA

Inicialmente foram definidas as características geométricas do problema, através da escolha do tipo de bloco intertravado, sua altura e forma de assentamento. Definindo-se o tipo de solo do subleito e o tipo de tráfego sobre o pavimento foram obtidas as características geométricas da base. Estabelecidas então, as condições geométricas e de contorno do modelo, o tipo de elemento e solicitações, foram posteriormente encontradas as máximas tensões e deslocamentos do pavimento intertravado através do software Ansys e comparadas posteriormente com as recomendações encontradas na literatura.

Características geométricas do modelo

A norma DNER-ES 327/97 apresenta os procedimentos que devem ser adotados na construção de pavimentos intertravados de peças pré-moldadas de concreto, incluindo as condições de execução, inspeção, proteção ambiental e critérios de medição.

Existem diversos formatos de peças pré-moldadas de concreto no mercado. As peças pré-moldadas usadas neste trabalho são as de formato retangular com dimensões 200x100x80mm.

Definidas as características geométricas dos blocos de concreto, determinam-se suas constantes de resistência dos materiais: coeficiente de Poisson de 0.4, e módulo de elasticidade não linear ilustrado na Figura 1. A resistência característica estimada à compressão, recomendada pela NBR 9781 e NBR9780, de blocos submetidos ao tráfego de veículos pesados é de 35MPa.

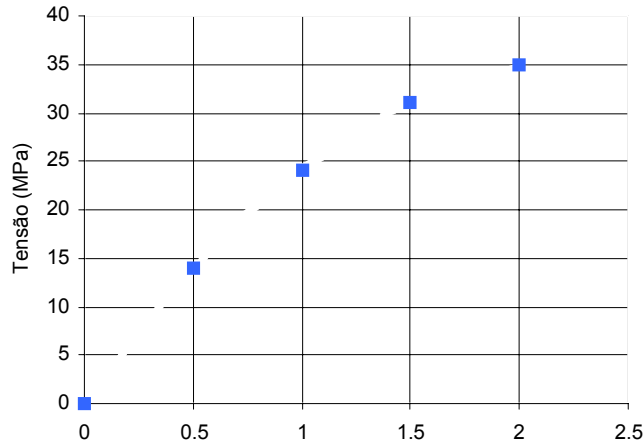


Figura 1. Diagrama Tensão x Deformação do bloco pré-moldado e do meio fio.

Existem diversos tipos de formas de assentamento de peças pré-moldadas do tipo retangular. Como mostra na Figura 2, a seguir, o tipo de assentamento escolhido foi o de fileira a fim de simplificar o modelo.

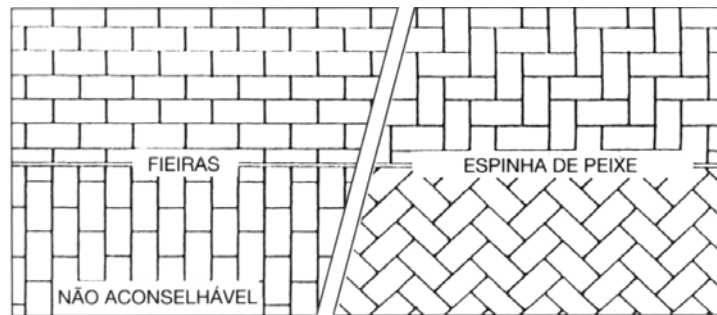


Figura 2. Tipos de assentamento de blocos pré-moldados, com o tráfego na vertical.

O mapa do Brasil apresentado da Figura 3 fornece as principais ocorrências de solos utilizados na pavimentação. De acordo com este mapa, o solo escolhido para compor o subleito foi o do tipo argiloso.



Figura 3. Solos tropicais utilizados em pavimentação.

Como o módulo de elasticidade dos solos varia de acordo com o tipo de solo, existem tabelas que relacionam o tipo de solo em função do seu correspondente Standard Penetration Test (SPT). Um subleito do tipo argiloso com consistência média, segundo HACHICH et al [1998], apresenta SPT igual a 5, módulo de elasticidade linear de 5MPa e coeficiente de Poisson de 0,4.

Entre a camada do subleito e a camada de blocos pré-moldados existe uma camada que contribui para a capacidade estrutural do pavimento, conhecida como base. Dentre os tipos de base mais comuns, o tipo escolhido foi a de concreto rolado e, na definição da espessura desta base, adotou-se o método americano da Associação de Cimento Portland (PCA), que é o método mais utilizado no Brasil.

No método PCA algumas considerações tiveram que ser adotadas para o dimensionamento da base de concreto:

- Trafego médio semanal composto por um caminhão pesado com eixo simples de rodas duplas de 8,2tf por eixo;
- Solicitações semanais do caminhão iguais a 14 (duas por dia – ida e volta);
- Número total de semanas em um ano: 52;
- Período de projeto do pavimento intertravado igual a 15 anos;
- Número total de solicitações durante o período de projeto: 10920.
- Índice de Suporte Califórnia (CBR) do subleito de 5% (Solo argiloso de consistência média). Um solo com CBR = 100% é considerado de máxima resistência.
- Rodovia da Classe IB (rodovia com pista simples, demanda superior a 200 vpd [veículo por dia], velocidade de projeto de 100km/h e relevo considerado plano).
- Largura da pista de rolamento: 3,60m.

O PCA aplicado ao dimensionamento da base de concreto é feito de acordo com as considerações anteriores e através do uso da tabela a seguir:

Tabela 1. Espessura total das camadas de base e sub-base para pavimentos solicitados por veículos de linha.

Número de solicitações do eixo-padrão	Espessura total das camadas de base e sub-base (cm)														
	CBR do subleito(%)														
	2	2,5	3	3,5	4	5	6	8	10	15	20				
1x10 ³	1000	26	21	17	Mínimo de 15cm										
2x10 ³	2000	29	24	20								17			
4x10 ³	4000	33	27	23								19	17		
8x10 ³	8000	36	30	25								22	19		
1x10 ⁴	10000	37	31	26	23	20	15								
2x10 ⁴	20000	41	34	29	25	22	17								
4x10 ⁴	40000	44	37	32	28	24	19	15							
8x10 ⁴	80000	48	40	35	30	27	21	17							
1x10 ⁵	100000	49	41	36	31	27	22	17							
2x10 ⁵	200000	52	44	38	34	30	24	19							
4x10 ⁵	400000	56	47	41	36	32	26	21							
8x10 ⁵	800000	59	51	44	39	34	28	23	15						
1x10 ⁶	1000000	60	52	45	39	35	28	23	16						
2x10 ⁶	2000000	64	55	47	42	38	30	25	17						
4x10 ⁶	4000000	68	58	50	45	40	33	27	19						
8x10 ⁶	8000000	71	61	53	47	42	35	29	20						

Assim, conclui-se que, a espessura da base de concreto deve ser de 15cm, que é a espessura mínima permitida para um subleito com CBR de 5% e número de solicitações do eixo padrão de aproximadamente 1×10^4 , de acordo com MADRID et al [1999].

Como a base utilizada é de concreto rolado, adotou-se um coeficiente de Poisson de 0,4 e módulo de elasticidade não linear de acordo com a figura a seguir.

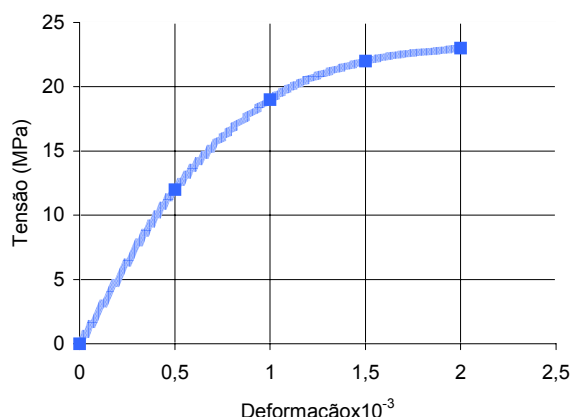


Figura 4. Diagrama tensão-deformação da base de concreto.

Para o trânsito de pedestres, o meio fio moldado “in loco” segundo MADRID et al [1999], deve ter uma largura de 15cm e 45cm de altura, de modo que 15cm penetrem na base. O meio fio, do tipo pré-moldado, apresentou o mesmo coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade não linear das peças constituintes do pavimento intertravado.

As peças pré-moldadas do pavimento intertravado foram assentadas em um colchão de areia com espessura uniforme e igual a 4cm e, entre as peças pré-moldadas há um rejunte de areia de 2cm, necessário na redução da percolação de água sobre o pavimento e para que haja o bom funcionamento mecânico do pavimento. O módulo de elasticidade linear, da areia de rejunte e de assentamento, adotado é igual a 20MPa e o coeficiente de Poisson de 0,4.

Modelagem do problema

Definidas as características geométricas e as constantes da resistência dos materiais, partiu-se para a modelagem do problema através da utilização do software Ansys, que utiliza como método aproximado de solução o Método dos Elementos Finitos (MEF).

No MEF o meio contínuo é dividido em elementos fictícios de dimensões finitas, ligados entre si por pontos nodais que se assemelham a articulações sem atrito. O conjunto de elementos que compõem o meio contínuo é chamado malha.

Este estudo foi considerado como um problema de estado plano de deformações para simplificar o modelo tri-dimensional e assim ser possível adotar um modelo mais simples do tipo bi-dimensional.

O tipo de elemento escolhido para a modelagem do problema foi o Plane 42, ilustrado na Figura 5, apresentando o modelo um número total de 10160 elementos com 10528 nós, como ilustrado na Figura 6.

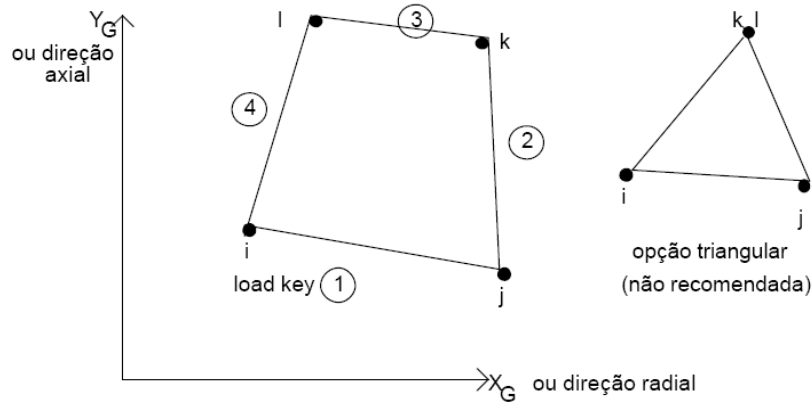


Figura 5. Elemento Plane 42.

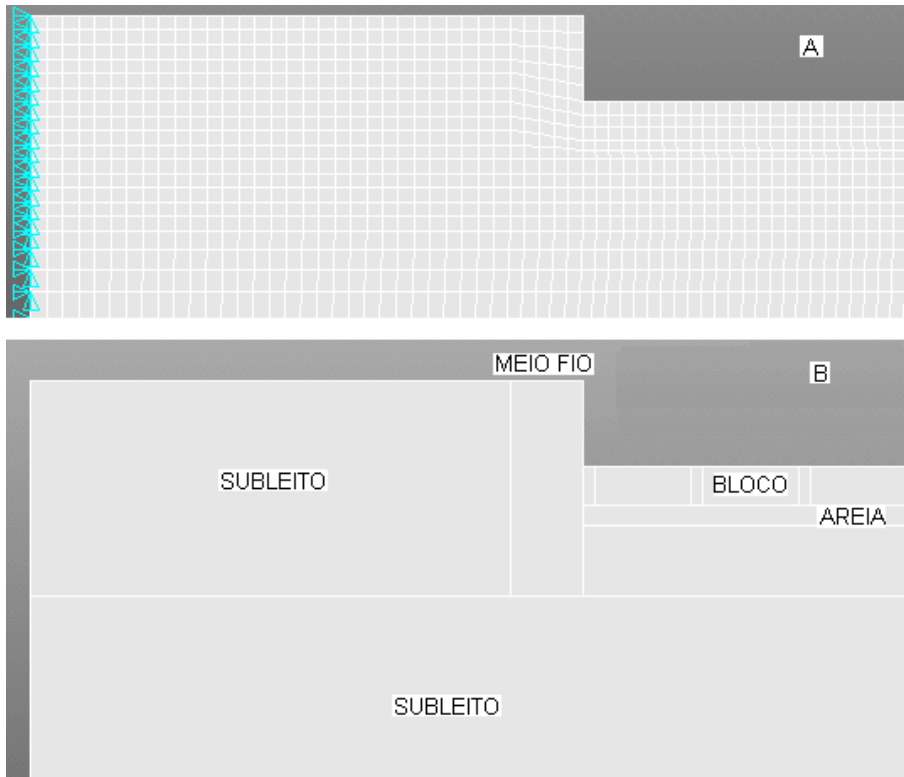


Figura 6. Aplicação da malha (A) no modelo (B) do pavimento intertravado.

Foi criada uma fronteira indeformável ao longo do contorno do modelo através do impedimento dos deslocamentos nas direções X e Y.

Através da pressão de contato exercida pelos pneus e de sua largura foi obtido o carregamento aplicado sobre o pavimento ilustrado na Figura 7.

Como o trem tipo pode variar de posição, este foi localizado na extremidade e na parte central do pavimento por serem as regiões mais críticas.

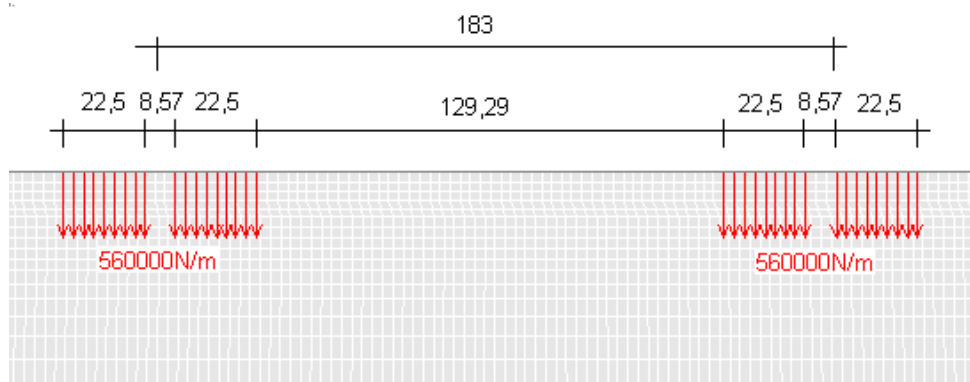


Figura 7. Trem tipo do eixo do padrão aplicado em diferentes posições do pavimento intertravado.

3 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados alcançados através das simulações numéricas estão fornecidos resumidamente nas tabelas a seguir, obtidos para carregamento centrado e em uma das extremidades do pavimento. O critério de resistência adotado para a avaliação da distribuição de tensões do modelo foi o de von Mises.

Tabela 2. Máximas e mínimas tensões normais principais e de von Mises, para carregamento centrado.

	Tensões normais Principais (MPa)			(Mpa)
	S1	S2	S3	von Mises
Nó	166	582	1127	879
Mínimo Valor	0	- 0,571	-18,137	0,033
Nó	1715	1035	6	1715
Máximo Valor	17,967	0,733	0	18,033

Tabela 3. Máximas e mínimas tensões normais principais e de von Mises para carregamento na extremidade.

	Tensões normais Principais (MPa)			(Mpa)
	S1	S2	S3	von Mises
Nó	1	1033	1109	9960
Mínimo Valor	0	-3,660	-15,721	0,001
Nó	1733	1035	38	1733
Máximo Valor	15,510	0,2328	0	15,571

De acordo com as tabelas anteriores, o nó onde ocorre a máxima tensão de von Mises, para carregamento centrado e na extremidade, está localizado na face inferior da base de concreto, no eixo de simetria de um dos pares de rodas conforme ilustrado na Figura 8.

Segundo o critério de von Mises, a máxima tensão encontrada no pavimento intertravado foi de aproximadamente 18MPa, que é inferior a resistência à compressão da peça pré-moldada (35MPa) e da base de concreto (23MPa).

Na Tabela 4, a seguir, encontram-se os valores dos máximos deslocamentos do pavimento provocados pelo carregamento colocado em uma de suas extremidades e em sua região central.

Tabela 4. Máximo deslocamento nas direções X e Y.

Carregamento centrado (cm)			Carregamento na extremidade (cm)	
Direção	Valor	Nó	Valor	Nó
X	0,444	2204	0,857	9504
Y	-3,695	10464	-3,624	65

A máxima deflexão do pavimento foi de aproximadamente 3.7cm, variando muito pouco com a posição da carga. Esta deflexão, segundo MADRID et al [1999], está de acordo com a máxima permitida (4cm) para pavimentos rígidos com número de solicitações do eixo padrão maior que 10000.

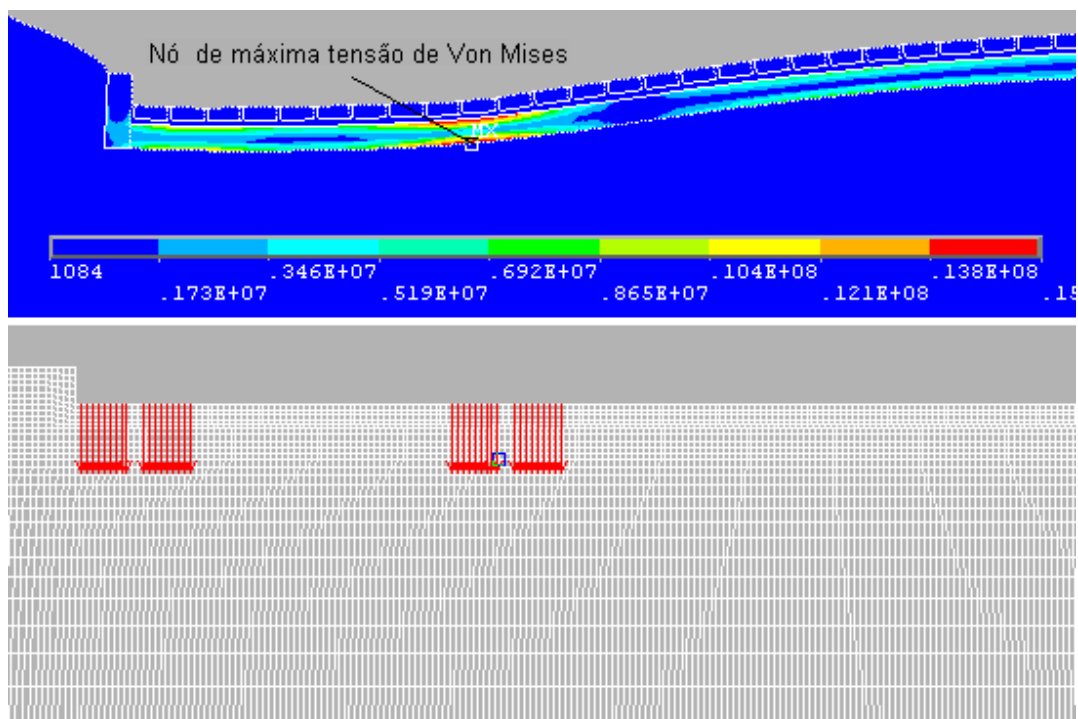


Figura 8. Nó com máxima tensão de von Mises para carregamento na extremidade.

Conforme os valores encontrados, pode-se utilizar uma base, ou blocos, com menor resistência mecânica, ou então, de menor espessura. Ambas as alternativas levam a uma redução de custos do pavimento. Podemos concluir também que o comportamento do pavimento intertravado com peças pré-moldadas está mais relacionado às características de sua base do que de seus blocos pré-moldados. O adequado dimensionamento da base é obtido através de um bom conhecimento do subleito e do número de solicitações do eixo padrão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANDRADE, W. R. *Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo, ensaios e propriedades*. São Paulo: Editora PINI, 1997.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO. *Anais da 27ª reunião anual de pavimentação*. Teresina: ABPV, 1993. v.1.
- 3 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ES 288/97 *Sarjetas e valetas de drenagem*. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- 4 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ES 327/97 *Pavimento com peças flexíveis de concreto*. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- 5 HACHICH, W.; FALCONI, F. F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, S. C.; NEIJAMA, S. *Fundações: teoria e prática*. 2.ed. São Paulo: Editora PINI., 1998.
- 6 KNAPTON, John. *The Nature and Classification of Bedding Sand*. - Washinton: BIBM, 1993 - P.v.
- 7 MADRID M., Germán Guillermo. *Construção de pavimentos de blocos de concreto pré-moldados; trad. Por Hans Roman Edmund Bucher*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1999.
- 8 MEDINA, Jacques. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.
- 9 MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Editora PINI, 1997.
- 10 SCHIEL, R.F. *Introdução à Resistência dos Materiais*. São Paulo: Harper & Row do Brasil Ltda, 1984.
- 11 SENÇO, W. *Manual de técnicas de pavimentação*. São Paulo: [s.n] , 1997.

FINITE ELEMENT METHOD APPLIED IN THE STUDY OF CONCRETE BLOCK PAVEMENTS

Albert Willian Faria.¹

Abstract

This paper objective studying about the global behavior of an interlocked pavement of its concrete preformation parts. The advantages of that pavement are various but there are very few knowledge and searches about their mainly about its global behavior. An interlocked pavement subjected to loads applied through hydraulical presses behaves like a flexible pavement.

However, searching and studying about its global behavior has been expensive and limited because it requires a lot of raised cost presses. Then they are but on different pavement points and the area to be analyzed is limited by the length of support beam of the press. Thus, the Finite Element Method (FEM) is a mechanism to study the global behavior of interlocked pavement of concrete parts. Its lead us to very important conclusions about both deformation and tension distribution in various pavements points. Moreover, the FEM allows us deal with materials that present Elasticity modulus non-linear, i.e., into plastic regimen. Then it origins a behavior model whose elements can get abide harder loads with a more realistic behavior.

Key-words: Interlocked pavements; Finite element; Global analysis.

60th Annual Congress of the ABM of July, 25 to 28 of 2005 – Belo Horizonte – MG.

¹- Master degree in Mechanic Engineering of Universidade Federal de Uberlândia (UFU).