



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA BARRA DE TRANSFERÊNCIA E DO
TIPO DE CONCRETO**

**Eng^o. Civil Juliano Rodrigues da Silva
Orientador: Prof. Ph. D. Gilson Natal Guimarães**

**GOIÂNIA, GO - BRASIL
MARÇO DE 2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA BARRA DE TRANSFERÊNCIA E DO
TIPO DE CONCRETO**

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Orientador:

Prof. Gilson Natal Guimarães, Ph. D.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração:

Estruturas e Materiais de Construção

Goiânia, GO - Brasil
Março de 2010

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)**

SILVA, Juliano Rodrigues.

Estudo Experimental de Pavimentos de Concreto: Influência da Posição da Barra de Transferência e do Tipo de Concreto/ Juliano Rodrigues da Silva – Goiânia, 2010.

250f.: il., color., figs., tabs., grafs.

Orientador: Gilson Natal Guimarães

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.

Bibliografia: f. 168-174.

Inclui listas de figuras, de tabelas, de abreviaturas e de símbolos.

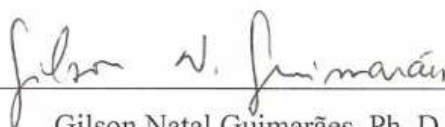
Apêndices.

1. Juntas (Engenharia) – Mecanismos de transferência 2. Pavimentos de concreto 3. Fibras metálicas I. Guimarães, Gilson Natal. II. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil III. Título.

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO:
INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA BARRA DE TRANSFERÊNCIA E DO
TIPO DE CONCRETO**

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Dissertação de Mestrado submetida ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, defendida e aprovada em 12 de março de 2010, pela banca examinadora constituída pelos professores:



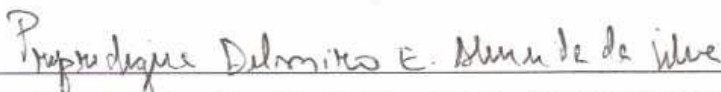
Gilson Natal Guimarães, Ph. D. (UFG)

(ORIENTADOR)



Ronaldo Barros Gomes, Ph. D. (UFG)

(EXAMINADOR INTERNO)



Prepredigna Delmiro Elga Almeida da Silva, D. Sc. (COPPE/UFRJ-DNIT)

(EXAMINADORA EXTERNA)

Goiânia
Março de 2010

“Não abandones a sabedoria, e ela te guardará; ama-a, e ela te conservará.”
Provérbios 4:6

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e disposição para concluir mais esta etapa de estudos.

Ao professor Gilson Natal Guimarães pelas oportunidades e valiosas dicas em minha breve experiência como docente universitário, pela orientação, pela paciência e seu grande profissionalismo no começo, meio e fim deste trabalho, meu sincero obrigado professor!

Ao professor Ronaldo Barros Gomes, pelo apoio, colaboração, profissionalismo e suas sugestões profissionais. Levo boas lembranças para minha vida profissional.

Aos demais professores da Universidade Federal de Goiás, pelo apoio nestes dois anos de caminhada do Curso de Mestrado em Engenharia Civil.

As empresas: REALMIX – Concreto e Argamassa; CARLOS CAMPOS, IMPERCIA S.A e FURNAS S/A pela colaboração nos ensaios e materiais desta pesquisa.

A secretaria do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da UFG nas pessoas dos Funcionários Mário Rosa e Tancredo Elvis;

Aos bons amigos que fiz durante o curso de mestrado;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq e o Programa Nacional de Cooperação Acadêmica, PROCAD, pelo apoio financeiro;

Aos meus amigos do dia-a-dia, aos que estão distantes e a todos os meus familiares e em especial minha querida tia/madrinha/comadre Sônia A. Godoy, meu obrigado pela força.

Um agradecimento especial aos meus companheiros José Ricardo de Oliveira, Maguett Wendely Martins e Bruno da Silva Godoy pela ajuda árdua e trabalhosa na execução dos diversos ensaios realizados entre 2008 e 2009 no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Goiás. A participação de vocês foi essencial para a conclusão desta pesquisa.

A minha querida irmã Lilian Rodrigues e seu esposo Jez William pela ajuda, amparo e pelas conversas de incentivo em minha carreira e vida pessoal.

A minha jovem e bela Graciela pelo seu doce amor, incentivo e paciência.

Aos meus queridos Mestres da vida, FRANCISCO E ADEMILDA, pelo amor e carinho nesses longos anos!

Ao meu pequenino e amado filho **GABRIEL** que mesmo nos obstáculos do nosso destino, do nosso tão distante convívio, permanece com seu sorriso lindo e sincero; saiba sempre que o papai te ama muito!

Finalmente agradeço a cada contribuinte brasileiro, que além de mim, com o pagamento de seus tributos permitiu que eu realizasse meus estudos de mestrado em uma universidade pública federal e saibam que o fiz com muita dedicação, esmero e carinho.

Meu sincero obrigado a todos!

DEDICATÓRIA

A todos que continuam acreditando no meu sonho!

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 – HISTÓRICO.....	01
1.2 – O PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES DE CIMENTO PORTLAND	03
1.3 – JUSTIFICATIVA.....	06
1.4 – METODOLOGIA.....	06
1.5 – OBJETIVO DA PESQUISA.....	07
1.6 – ESTRUTURA DO TRABALHO.....	08
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	09
2.1 – INTRODUÇÃO.....	09
2.2 – JUNTAS EM PAVIMENTOS DE CONCRETO.....	09
2.2.1 – Tipos de Juntas.....	09
2.2.2 – Espaçamento das juntas.....	11
2.2.3 – Patologias em juntas.....	12
2.2.4 – Dispositivos de transferência de carga.....	12
2.2.5 – Transferência de carga entre pavimentos.....	13
2.2.6 – Eficiência das Juntas.....	16
2.2.7 – Métodos de dimensionamento dos pavimentos de concreto.....	17
2.3 – FIBRAS.....	18
2.3.1 – Antecedentes históricos das fibras.....	18
2.3.2 – Tipos de fibras.....	20
2.3.3 – Propriedades mecânicas das fibras de aço.....	22
2.3.4 – O compósito e a interação entre a fibra-matriz.....	25
2.3.5 – Propriedades do concreto reforçado com fibras.....	27
2.4 – CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	28
2.4.1 – Ensaio do Concreto autoadensável.....	29
2.5 – PESQUISAS RELACIONADAS A PAVIMENTOS DE CONCRETO.....	35
2.6 – PESQUISAS RELACIONADAS AO CISALHAMENTO DUPLO.....	44
2.6.1 – Cisalhamento.....	44
2.6.2 – Cisalhamento de peças de concreto com adição de fibras.....	45
2.6.3 – Pesquisas sobre cisalhamento duplo.....	46

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.1 – INTRODUÇÃO.....	51
3.2 – DETALHAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.2.1 – Detalhes construtivos das peças de concreto.....	52
3.2.2 – Especificações e características das placas e dos blocos.....	54
3.2.3 – Materiais utilizados.....	56
a) Concreto autoadensável.....	56
b) Concreto convencional.....	57
c) Barras de transferência.....	58
d) Fibras metálicas.....	59
3.2.4 – Instrumentação.....	59
3.2.5 – Preparação das Fôrmas.....	62
3.2.6 – Concretagem.....	65
3.2.7 – Corte das juntas.....	70
3.2.8 – Cura úmida e desforma dos pavimentos e blocos de concreto.....	71
3.3 – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	72
3.3.1 – Preparação da base de borracha.....	72
3.3.2 – Preparação do ensaio do coeficiente de recalque.....	73
3.3.3 – Ensaio de caracterização mecânica do concreto.....	75
3.3.4 – Aplicação de Força.....	76
3.3.5 – Realização dos experimentos das placas de concreto.....	78
3.3.6 – Realização dos experimentos nos blocos de concreto.....	82
CAPÍTULO IV – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	85
4.1 – INTRODUÇÃO.....	85
4.2 – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	85
4.2.1 – Caracterização do concreto.....	85
4.2.2 – Caracterização das Barras de Transferência.....	86
4.2.3 – Camada de borracha da base.....	87
4.3 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS PLACAS.....	89
4.3.1 – Fissuração das placas.....	89
4.3.2 – Modos de ruptura das placas.....	91
4.3.3 – Forças atuantes nas placas.....	96

4.3.4 – Força aplicada x Deslocamento das juntas.....	97
4.3.5 – EXTENSOMETRIA.....	103
a) Deformação do concreto.....	103
b) Deformação do aço.....	109
4.3.6 – Força aplicada x Reação na base de borracha.....	113
4.3.7 – Deslocamentos verticais das placas.....	118
4.4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS BLOCOS DE CISALHAMENTO	
DUPLO.....	124
4.4.1 – Formas de ruptura dos blocos de cisalhamento duplo.....	126
4.4.2 – Força aplicada x Deslocamento dos blocos.....	127
CAPÍTULO V – ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	131
5.1 – INTRODUÇÃO.....	131
5.2 – FORÇAS NAS PLACAS.....	131
5.2.1 – Força de Fissuração.....	131
5.2.2 – Forças de transferência.....	132
5.2.3 – Força de escoamento das barras de transferência.....	133
5.2.4 – Força máxima.....	133
5.3 – EFICIÊNCIA DAS JUNTAS.....	134
5.3.1 – Eficiência em função das forças aplicadas.....	134
5.3.2 – Eficiência em função da reação da base de borracha.....	139
5.3.3 – Deformação.....	141
5.3.4 – Deslocamento vertical das juntas.....	142
5.4 – RELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS PLACAS E DOS BLOCOS	148
5.5 – REAÇÕES NA PLACA DE BORRACHA.....	149
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	164
6.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	164
6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
APÊNDICE A.....	175
APÊNDICE B.....	182
APÊNDICE C.....	222

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Comportamento mecânico de um pavimento a) rígido (b) flexível.....	04
Figura 1.2	Junta desprotegida.....	04
Figura 1.3	Junta protegida.....	05
Figura 1.4	Comportamento do pavimento em diferentes condições climáticas.....	05
Figura 2.1	Junta longitudinal.....	10
Figura 2.2	Junta transversal.....	10
Figura 2.3	Junta de expansão.....	11
Figura 2.4	Distribuição de esforços nas barras de transferência.....	16
Figura 2.5	Propriedades mecânicas das fibras.....	23
Figura 2.6	Mecanismo do reforço das fibras de aço.....	23
Figura 2.7	Concentração de tensões para um concreto sem e com reforço de fibras.....	26
Figura 2.8	Ensaio de espalhamento.....	31
Figura 2.9	Ensaio do funil.....	32
Figura 2.10	Caixa L.....	34
Figura 2.11	Modelo de Westergaard.....	35
Figura 2.12	Deslocamentos verticais na borda de placas.....	36
Figura 2.13	Modelo de Mannava, Bush e Kukreti.....	37
Figura 2.14	Detalhe das placas ensaiadas (a) vista superior (b) corte transversal.....	39
Figura 2.15	Eficiência da junta na fase 1.....	40
Figura 2.16	Forças de cisalhamento em um bloco de concreto.....	44
Figura 2.17	Diagrama Tensão x Deslocamento em ensaios de transferência de cisalhamento em corpos-de-prova de concreto simples com adição de fibras (a) deslocamento vertical; (b) deslocamento horizontal (lateral).....	45
Figura 2.18	Corpo-de-prova para cisalhamento duplo.....	46
Figura 2.19	Corpo-de-prova para cisalhamento com plano cortante.....	47
Figura 2.20	Análise numérica (a) malha de elementos finitos (b) visualização de abertura na junta carregada.....	48
Figura 2.21	Detalhe do corpo-de-prova.....	48
Figura 3.1	Vista em planta da placa de concreto.....	52
Figura 3.2	Vista em corte lateral da placa de concreto.....	52
Figura 3.3	Corte frontal da placa a) 45 mm da base b) 60 mm da base.....	53
Figura 3.4	Trechos frontais das placas para simulação de um pavimento real.....	53
Figura 3.5	Detalhe da junta serrada sem barra de transferência.....	53
Figura 3.6	Posicionamento da barra a 45 mm da base.....	54

Figura 3.7	Posicionamento da barra a 60 mm da base.....	54
Figura 3.8	Nomenclatura utilizada nas placas de concreto.....	55
Figura 3.9	Exemplo da nomenclatura utilizada.....	55
Figura 3.10	Barras de transferência com diâmetro de 16 mm e 500 mm de comprimento.	58
Figura 3.11	a) Pentes com fibras da marca Dramix b) Fibras com 60 mm de comprimento.....	59
Figura 3.12	Deflectômetro.....	60
Figura 3.13	Posição dos deflectômetros sobre a placa de concreto.....	60
Figura 3.14	Posição dos deflectômetros dos blocos de concreto.....	61
Figura 3.15	Extensômetro elétrico de resistência a) para o aço b) para o concreto.....	61
Figura 3.16	Soldagem do extensômetro.....	61
Figura 3.17	Colagem do extensômetro.....	61
Figura 3.18	Posicionamento dos extensômetros na barra de transferência.....	62
Figura 3.19	Sistema de aquisição de dados da marca KYOWA.....	62
Figura 3.20	Perspectiva da fôrma metálica para confecção das placas de concreto.....	63
Figura 3.21	Aplicação de desmoldante.....	63
Figura 3.22	Detalhes de preparação das fôrmas.....	63
Figura 3.23	Fôrmas prontas para concretagem.....	64
Figura 3.24	Detalhe das fôrmas de cisalhamento duplo.....	64
Figura 3.25	a) fôrma, b) detalhe da armação e c) dimensões da armação.....	65
Figura 3.26	Fôrmas para ensaio de cisalhamento duplo.....	65
Figura 3.27	Concreto autoadensável.....	66
Figura 3.28	Concreto convencional.....	66
Figura 3.29	Concreto convencional com fibras.....	66
Figura 3.30	Blocos de cisalhamento duplo.....	66
Figura 3.31	Ensaio do “ <i>Slump Flow Test</i> ”.....	68
Figura 3.32	“Ensaio do Funil”.....	68
Figura 3.33	Ensaio da Caixa “L”.....	69
Figura 3.34	Preparação para ensaios.....	69
Figura 3.35	Ensaio do Tronco de cone.....	70
Figura 3.36	Concretagem dos corpos-de-prova a) Cilíndricos e b) Prismáticos.....	70
Figura 3.37	Marcação da junta.....	71
Figura 3.38	Corte da junta.....	71
Figura 3.39	Cura úmida das placas de concreto.....	71
Figura 3.40	Desforma.....	72
Figura 3.41	Transporte da placa.....	72

Figura 3.42	Posicionamento das células de carga no interior da base de borracha.....	73
Figura 3.43	Posicionamento das células.....	73
Figura 3.44	Argamassa de assentamento.....	73
Figura 3.45	Detalhes em planta da base metálica.....	74
Figura 3.46	Ensaio do coeficiente de recalque com utilização da base metálica.....	75
Figura 3.47	Ensaio à compressão simples dos corpos-de-prova.....	75
Figura 3.48	Ensaio de tração diametral.....	76
Figura 3.49	Tração na flexão.....	76
Figura 3.50	Ensaio do Módulo de elasticidade.....	76
Figura 3.51	Células de carga, atuador, apoio e viga de reação.....	77
Figura 3.52	Detalhe lateral do equipamento de reação.....	77
Figura 3.53	Leitoras das células de carga.....	78
Figura 3.54	Atuador mecânico.....	78
Figura 3.55	Detalhes do pórtico de reação.....	79
Figura 3.56	Posição dos deflectômetros.....	80
Figura 3.57	Ligação das barras ao terminal de aquisição de dados.....	80
Figura 3.58	Detalhe da aplicação da força sobre a placa de concreto.....	80
Figura 3.59	Detalhe esquemático do corte lateral da placa com aplicação de força.....	80
Figura 3.60	Vista frontal do ensaio.....	81
Figura 3.61	Perspectiva de todo o aparato de ensaio.....	81
Figura 3.62	Detalhe do bloco de cisalhamento duplo.....	82
Figura 3.63	Içamento do bloco.....	82
Figura 3.64	a) Base inferior b) Base superior e c) Posicionamento simétrico do bloco.....	83
Figura 3.65	Aparato de ensaio do cisalhamento duplo.....	84
Figura 4.1	Gráfico Tensão x Deformação para barras $\phi = 16,0$ mm.....	87
Figura 4.2	Corpo-de-prova da borracha: (a) estado inicial; (b) depois de comprimido....	88
Figura 4.3	Curvas do Coeficiente de recalque, k_1 , k_2 e k_3	88
Figura 4.4	Fases de fissuração da placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	90
Figura 4.5	Fissuração final na placa 01-P _{CA} -SB-SF.....	90
Figura 4.6	Fissuração final na placa 02-P _{CA} -B16-H45-SF.....	90
Figura 4.7	Fissuração final na placa 03-P _{CA} -B16-H60-SF.....	90
Figura 4.8	Fissuração final na placa 04-P _{CC} -SB-SF.....	91
Figura 4.9	Fissuração final na placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	91
Figura 4.10	Fissuração final na placa 06-P _{CC} -B16-H60-SF.....	91
Figura 4.11	Fissuração final na placa 07-P _{CC} -SB-F25.....	91
Figura 4.12	Fissuração final na placa 08-P _{CC} -B16-H45-F25.....	91

Figura 4.13	Fissuração final na placa 09-P _{CC} -B16-H60-F25.....	91
Figura 4.14	1º Modo de Ruptura.....	92
Figura 4.15	2º Modo de Ruptura.....	93
Figura 4.16	3º Modo de Ruptura.....	93
Figura 4.17	4º Modo de Ruptura.....	94
Figura 4.18	5º Modo de Ruptura.....	94
Figura 4.19	Detalhe do levantamento da borda da placa.....	95
Figura 4.20	Força aplicada x Deslocamento (01-P _{CA} -SB-SF).....	99
Figura 4.21	Força aplicada x Deslocamento (02-P _{CA} -B16-H45-SF).....	99
Figura 4.22	Força aplicada x Deslocamento (03-P _{CA} -B16-H60-SF).....	100
Figura 4.23	Força aplicada x Deslocamento (04-P _{CC} -SB-SF).....	100
Figura 4.24	Força aplicada x Deslocamento (05-P _{CC} -B16-H45-SF).....	101
Figura 4.25	Força aplicada x Deslocamento (06-P _{CC} -B16-H60-SF).....	101
Figura 4.26	Força aplicada x Deslocamento (07-P _{CC} -SB-F25).....	102
Figura 4.27	Força aplicada x Deslocamento (08-P _{CC} -B16-H45-F25).....	102
Figura 4.28	Força aplicada x Deslocamento (09-P _{CC} -B16-H60-F25).....	103
Figura 4.29	Posicionamento dos extensômetros na superfície da placa.....	104
Figura 4.30	Posicionamento dos extensômetros EDX e EDY sobre a placa de concreto...	104
Figura 4.31	Força aplicada x Deformação do concreto (01-P _{CA} -SB-SF).....	105
Figura 4.32	Força aplicada x Deformação do concreto (02-P _{CA} -B16-H45-SF).....	105
Figura 4.33	Força aplicada x Deformação do concreto (03-P _{CA} -B16-H60-SF).....	106
Figura 4.34	Força aplicada x Deformação do concreto (04-P _{CC} -SB-SF).....	106
Figura 4.35	Força aplicada x Deformação do concreto (05-P _{CC} -B16-H45-SF).....	107
Figura 4.36	Força aplicada x Deformação do concreto (06-P _{CC} -B16-H60-SF).....	107
Figura 4.37	Força aplicada x Deformação do concreto (07-P _{CC} -SB-F25).....	108
Figura 4.38	Força aplicada x Deformação do concreto (08-P _{CC} -B16-H45-F25).....	108
Figura 4.39	Força aplicada x Deformação do concreto (09-P _{CC} -B16-H60-F25).....	109
Figura 4.40	Força aplicada x Deformação do aço (02-P _{CA} -B16-H45-SF).....	110
Figura 4.41	Força aplicada x Deformação do aço (03-P _{CA} -B16-H60-SF).....	110
Figura 4.42	Força aplicada x Deformação do aço (05-P _{CC} -B16-H45-SF).....	111
Figura 4.43	Força aplicada x Deformação do aço (06-P _{CC} -B16-H60-SF).....	111
Figura 4.44	Força aplicada x Deformação do aço (08-P _{CC} -B16-H45-F25).....	112
Figura 4.45	Força aplicada x Deformação do aço (09-P _{CC} -B16-H60-F25).....	112
Figura 4.46	Posição das Células de carga C1, C2, C3 e C4.....	113
Figura 4.47	Força aplicada x Reações na base (01-P _{CA} -SB-SF).....	114
Figura 4.48	Força aplicada x Reações na base (02-P _{CA} -B16-H45-SF).....	114

Figura 4.49	Força aplicada x Reações na base (03- P_{CA} -B16-H60-SF).....	115
Figura 4.50	Força aplicada x Reações na base (04- P_{CC} -SB-SF).....	115
Figura 4.51	Força aplicada x Reações na base (05- P_{CC} -B16-H45-SF).....	116
Figura 4.52	Força aplicada x Reações na base (06- P_{CC} -B16-H60-SF).....	116
Figura 4.53	Força aplicada x Reações na base (07- P_{CC} -SB-F25).....	117
Figura 4.54	Força aplicada x Reações na base (08- P_{CC} -B16-H45-F25).....	117
Figura 4.55	Força aplicada x Reações na base (09- P_{CC} -B16-H60-F25).....	118
Figura 4.56	Posição dos deflectômetros (mm) - (a) em planta (b) corte longitudinal.....	119
Figura 4.57	Força aplicada x Deslocamento vertical (01- P_{CA} -SB-SF).....	119
Figura 4.58	Força aplicada x Deslocamento vertical (02- P_{CA} -B16-H45-SF).....	120
Figura 4.59	Força aplicada x Deslocamento vertical (03- P_{CA} -B16-H60-SF).....	120
Figura 4.60	Força aplicada x Deslocamento vertical (04- P_{CC} -SB-SF).....	121
Figura 4.61	Força aplicada x Deslocamento vertical (05- P_{CC} -B16-H45-SF).....	121
Figura 4.62	Força aplicada x Deslocamento vertical (06- P_{CC} -B16-H60-SF).....	122
Figura 4.63	Força aplicada x Deslocamento vertical (07- P_{CC} -SB-F25).....	122
Figura 4.64	Força aplicada x Deslocamento vertical (08- P_{CC} -B16-H45-F25).....	123
Figura 4.65	Força aplicada x Deslocamento vertical (09- P_{CC} -B16-H60-F25).....	123
Figura 4.66	Força aplicada x Deformação específica do aço na parte superior.....	125
Figura 4.67	Força aplicada x Deformação específica do aço na parte inferior.....	125
Figura 4.68	Detalhe da ruptura do bloco 01- B_{CA} -B16-SF.....	126
Figura 4.69	Ruptura dos blocos a) 01- B_{CA} -B16-SF, b) 02- B_{CC} -B16-SF, c) 03- B_{CC} -B16-SF d) 04- B_{CC} -B16-F25 e e) 05- B_{CC} -B16-F25.....	127
Figura 4.70	Ruptura real a) 01- B_{CA} -B16-SF, b) 02- B_{CC} -B16-SF, c) 03- B_{CC} -B16-SF d) 04- B_{CC} -B16-F25 e e) 05- B_{CC} -B16-F25.....	127
Figura 4.71	Força aplicada x Deslocamento vertical (01 B_{CA} - B16-SF).....	128
Figura 4.72	Força aplicada x Deslocamento vertical (02 B_{CC} - B16-SF).....	128
Figura 4.73	Força aplicada x Deslocamento vertical (03 B_{CC} - B16-SF).....	129
Figura 4.74	Força aplicada x Deslocamento vertical (04 B_{CC} - B16-F25).....	129
Figura 4.75	Força aplicada x Deslocamento vertical (05 B_{CC} - B16-F25).....	130
Figura 5.1	Eficiência entre as barras com alturas de 45 mm e 60 mm da base.....	135
Figura 5.2	Eficiência do concreto autoadensável.....	136
Figura 5.3	Eficiência do concreto convencional.....	137
Figura 5.4	Eficiência do concreto convencional com fibras.....	138
Figura 5.5	Eficiência de todas as placas de concreto.....	139
Figura 5.6	Eficiência de todas as placas de concreto.....	140
Figura 5.7	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas sem barra de transferência.....	143

Figura 5.8	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas com barra na altura de 45 mm	143
Figura 5.9	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas com barra na altura de 60 mm	144
Figura 5.10	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas de concreto autoadensável.....	145
Figura 5.11	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas de concreto convencional.....	145
Figura 5.12	Gráfico F/F_{trans} x Deslocamento para as placas de concreto com fibras.....	146
Figura 5.13	Considerações adotadas para o cálculo das resultantes.....	150
Figura 5.14	Esquema de cálculo do lado carregado.....	150
Figura 5.15	Forças atuantes levando em consideração a reação triangular.....	151
Figura 5.16	Forças atuantes levando em consideração a reação parabólica.....	152
Figura 5.17	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 01- P_{CA} -SB-SF.....	154
Figura 5.18	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 02- P_{CA} -B16-H45-SF.....	155
Figura 5.19	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 03- P_{CA} -B16-H60-SF.....	155
Figura 5.20	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 04- P_{CC} -SB-SF.....	156
Figura 5.21	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 05- P_{CC} -B16-H45-SF.....	156
Figura 5.22	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 06- P_{CC} -B16-H60-SF.....	157
Figura 5.23	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 07- P_{CC} -SB-F25.....	157
Figura 5.24	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 08- P_{CC} -B16-H45-F25.....	158
Figura 5.25	Gráfico de R_L Teórico x R_L Experimental da placa 09- P_{CC} -B16-H60-F25.....	158
Figura 5.26	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 01- P_{CA} -SB-SF.....	159
Figura 5.27	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 02- P_{CA} -B16-H45-SF.....	159
Figura 5.28	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 03- P_{CA} -B16-H60-SF.....	160
Figura 5.29	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 04- P_{CC} -SB-SF.....	160
Figura 5.30	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 05- P_{CC} -B16-H45-SF.....	161
Figura 5.31	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 06- P_{CC} -B16-H60-SF.....	161
Figura 5.32	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 07- P_{CC} -SB-F25.....	162
Figura 5.33	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 08- P_{CC} -B16-H45-F25.....	162
Figura 5.34	Gráfico de R_u Teórico x R_u Experimental da placa 09- P_{CC} -B16-H60-F25.....	163
Figura A.1	Configuração dos modelos dos deslocamentos verticais.....	175
Figura A.2	Forças atuantes consideradas para reação triangular.....	176
Figura A.3	Forças atuantes consideradas para reação parabólica.....	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Diâmetro, comprimento e espaçamento das barras de transferência.....	15
Tabela 2.2	Correlações entre valores de CBR e k do subleito.....	18
Tabela 2.3	Trabalhabilidade dos vários equipamentos do concreto autoadensável.....	30
Tabela 2.4	Variáveis adotadas por Mannava, Bush e Kukreti (1999).....	37
Tabela 2.5	Programa experimental (Eddie, Shalaby e Rizkalla, 2001).....	39
Tabela 2.6	Características das placas de concreto (Tertuliano, 2005).....	41
Tabela 2.7	Características das placas de concreto (Fleury, 2006).....	42
Tabela 2.8	Variáveis da pesquisa de Rodrigues (2008).....	43
Tabela 2.9	Resumo das forças para corpos-de-prova em cisalhamento duplo e placas de concreto.....	49
Tabela 3.1	Características e detalhes dos ensaios das placas de concreto.....	55
Tabela 3.2	Detalhes dos blocos de cisalhamento duplo.....	56
Tabela 3.3	Quantidade de material empregado por m ³ de concreto autoadensável.....	57
Tabela 3.4	Quantidade de material empregado por m ³ de concreto convencional.....	58
Tabela 4.1	Propriedades dos concretos no estado fresco (CA e CC).....	85
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas dos concretos autoadensável, convencional e convencional com fibras.....	86
Tabela 4.3	Valores do coeficiente de recalque da placa.....	89
Tabela 4.4	Modo de ruptura e critério de parada dos ensaios.....	96
Tabela 4.5	Comportamento das placas ensaiadas.....	97
Tabela 4.6	Estágios dos ensaios de cisalhamento duplo.....	124
Tabela 5.1	Comparação entre as forças que atuam nas barras e nas placas de concreto	131
Tabela 5.2	Comparação dos deslocamentos teóricos de Westergaard e experimentais na Força de Fissuração.....	147
Tabela 5.3	Comparação dos deslocamentos teóricos de Westergaard e experimentais na Força de Transferência.....	147
Tabela 5.4	Comparativo entre as forças dos blocos e placas de concreto.....	148
Tabela 5.5	Reações da base do lado não carregado.....	153
Tabela 5.6	Reações da base do lado carregado.....	153
Tabela A.1	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 35 kN).....	178
Tabela A.2	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 50 kN).....	178
Tabela A.3	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 70	

	kN).....	178
Tabela A.4	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 90 kN).....	179
Tabela A.5	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 120 kN).....	179
Tabela A.6	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado carregado (F = 130 kN).....	179
Tabela A.7	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 35 kN).....	180
Tabela A.8	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 50 kN).....	180
Tabela A.9	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 70 kN).....	180
Tabela A.10	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 90 kN).....	181
Tabela A.11	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 120 kN).....	181
Tabela A.12	Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado (F = 130 kN).....	181
Tabela B.1	Leitura dos deflectômetro da placa 01-P _{CA} -SB-SF.....	182
Tabela B.2	Leitura dos deflectômetro da placa 02-P _{CA} -B16-H45-SF.....	183
Tabela B.3	Leitura dos deflectômetro da placa 03-P _{CA} -B16-H60-SF.....	184
Tabela B.4	Leitura dos deflectômetro da placa 04-P _{CC} -SB-SF.....	185
Tabela B.5	Leitura dos deflectômetro da placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	186
Tabela B.6	Leitura dos deflectômetro da placa 06-P _{CC} -B16-H60-SF.....	187
Tabela B.7	Leitura dos deflectômetro da placa 07-P _{CC} -SB-F25.....	188
Tabela B.8	Leitura dos deflectômetro da placa 08-P _{CC} -B16-H45-F25.....	189
Tabela B.9	Leitura dos deflectômetro da placa 09-P _{CC} -B16-H60-F25.....	190
Tabela B.10	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 01-P _{CA} -SB-SF...	191
Tabela B.11	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 02-P _{CA} -B16-H45-SF.....	192
Tabela B.12	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 03-P _{CA} -B16-H60-SF.....	193
Tabela B.13	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 04-P _{CC} -SB-SF....	194
Tabela B.14	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	195

Tabela B.15	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 06-P _{CC} -B16-H60-SF.....	196
Tabela B.16	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 07-P _{CC} -SB-F25.....	197
Tabela B.17	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 08-P _{CC} -B16-H45-F25.....	198
Tabela B.18	Leitura das células de carga na base de borracha da placa 09-P _{CC} -B16-H60-F25.....	199
Tabela B.19	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 02-P _{CA} -B16-H45-SF.....	200
Tabela B.20	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 03-P _{CA} -B16-H60-SF.....	201
Tabela B.21	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	202
Tabela B.22	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 06-P _{CC} -B16-H60-SF.....	203
Tabela B.23	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 08-P _{CC} -B16-H45-F25.....	204
Tabela B.24	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço da placa 09-P _{CC} -B16-H60-F25.....	205
Tabela B.25	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 01-P _{CA} -SB-SF.....	206
Tabela B.26	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 02-P _{CA} -B16-H45-SF.....	207
Tabela B.27	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 03-P _{CA} -B16-H60-SF.....	208
Tabela B.28	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 04-P _{CC} -SB-SF.....	209
Tabela B.29	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 05-P _{CC} -B16-H45-SF.....	210
Tabela B.30	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 06-P _{CC} -B16-H60-SF.....	211
Tabela B.31	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 07-P _{CC} -SB-F25.....	212
Tabela B.32	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 08-	

	P _{CC} -B16-H45-F25.....	213
Tabela B.33	Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto da placa 09- P _{CC} -B16-H60-F25.....	214
Tabela B.34	Leitura dos deflectômetros e extensômetros elétricos do bloco de cisalhamento duplo.....	215
Tabela B.35	Leitura dos deflectômetros e extensômetros elétricos do bloco de cisalhamento duplo.....	216
Tabela B.36	Leitura dos deflectômetros e extensômetros elétricos do bloco de cisalhamento duplo.....	217
Tabela B.37	Leitura dos deflectômetros e extensômetros elétricos do bloco de cisalhamento duplo.....	218
Tabela B.38	Leitura dos deflectômetros e extensômetros elétricos do bloco de cisalhamento duplo.....	219
Tabela B.39	Leitura dos deflectômetros do coeficiente de recalque (Após Placa 03).....	220
Tabela B.40	Leitura dos deflectômetros do coeficiente de recalque (Após Placa 06).....	221
Tabela B.41	Leitura dos deflectômetros do coeficiente de recalque (Após Placa 09).....	221

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ACPA	American Concrete Paviment Association
CA	Concreto Autoadensável
CC	Concreto Convencional
CBR	Califórnia Bearing Ratio
ASTM	American Society for Testing and Materials
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra Estrutura e Transportes
ECS	Epoxy Coated Steel
EDX	Extensômetro da Direita na direção X
EDY	Extensômetro da Direita na direção Y
EEC	Escola de Engenharia Civil
EER	Extensômetro Elétrico de Resistência
EEX	Extensômetro da Esquerda na direção X
EEY	Extensômetro da Esquerda na direção Y
EFNARC	European Federation Specialist Construction Chemical and Concrete Systems
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PCA	Portland Cement Association
PCC	Portland Cement Concrete
SB	Sem Barra
SF	Sem Fibra
SPT	Standard Penetration Test
UEG	Universidade Estadual de Goiás
UFG	Universidade Federal de Goiás

LISTA DE SÍMBOLOS

As grandezas apresentadas pelos símbolos constantes deste trabalho são expressas em unidades do Sistema Internacional (SI).

Letras minúsculas

a - Distância ou dimensão

- Distância da aplicação da Força a face da junta

b - Largura

- Base da seção

c - Cobrimento da armadura em relação à face do elemento

cm - centímetros

d - Altura útil

- Deslocamento vertical

d_L - Deslocamento vertical do lado carregado

d_u - Deslocamento vertical do lado não carregado

f - Resistência

f_c - Resistência a compressão do concreto na data do ensaio

f_{c28} - Resistência média a compressão do concreto aos 28 dias

f_{ck} - Resistência característica do concreto aos 28 dias

f_{ct28} - Resistência média a tração do concreto aos 28 dias

f_u - Tensão de ruptura da barra

f_y - Tensão de escoamento da barra

h - Altura

- Espessura do pavimento

k - Coeficiente de recalque

l - Comprimento da barra de transferência

m - Metro

mm - Milímetros

n - Número

q_L - Reação do lado carregado

q_u - Reação do lado não carregado

Letras maiúsculas

A - Área da seção cheia

A_c - Área da seção transversal de concreto

A_s - Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração

C_L - Célula de carga posicionada dentro da borracha do lado carregado

C_u - Célula de carga posicionada dentro da borracha do lado não carregado

D - Deflectômetro

E - Módulo de Elasticidade

E_c - Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias

EI - Rigidez

E_{junta} - Eficiência da junta

E_s - Módulo de elasticidade da barra

F - Força aplicada

F_{fiss} - Força de fissuração das juntas serradas

$F_{máx}$ - Força máxima

F_{trans} - Força de transferência

F_y - Força referente ao escoamento do aço

G_c - Módulo de elasticidade transversal do concreto

I - Momento de inércia para a barra

I_c - Momento de Inércia da seção de concreto

L - Metade do comprimento do pavimento

L_L - Comprimento da laje carregada que estava apoiada na fundação

L_u - Comprimento da laje não carregada que estava apoiada na fundação

R - Reação de apoio

R_L - Resultante da reação da camada suporte no lado carregado

R_u - Resultante da reação da camada suporte no lado não carregado

V_a - Cisalhamento transmitido pelo intertravamento do agregado

V_{ax} - Componente horizontal de V_a

V_{ay} - Componente vertical de V_a

V_{cz} - Cisalhamento na zona de compressão

V_d - Efeito de pino da armadura

V_d - Força cortante de cálculo

Símbolos subscritos

Os símbolos subscritos são apresentados no mesmo tamanho do texto para facilitar a visualização.

c - Concreto

d - Valor de cálculo

e - Equivalente

ef - Efetivo

eq - Equivalente

j - Idade (referente à cura do concreto)

t - Tração

u - Último

x e y - Direções ortogonais

y - Escoamento do aço

Número

0 - Início

- Instante de aplicação da Força

28 - aos 28 dias

Símbolos gregos:

\emptyset - Diâmetro da barra

σ - Tensão considerada

Δ - Deslocamento dos pavimentos

θ - Rotações dos pavimentos

ε - Deformação específica

σ_{adm} - Tensão admissível para o aço

σ_b - Tensão máxima de aderência entre aço e concreto

γ_c - Peso específico do concreto

ϵ_{cu} - Deformação específica de -350.10^{-6} mm/mm

$\epsilon_{s \text{ máx}}$ - Deformação específica máxima para as barras

ϵ_{tu} - Deformação específica de 150.10^{-6} mm/mm

σ_u - Tensão de ruptura do aço

σ_y - Tensão de escoamento do aço

ϵ_u - Deformação específica de ruptura do aço

ϵ_y - Deformação específica de escoamento do aço

ESTUDO EXPERIMENTAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO: INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA BARRA DE TRANSFERÊNCIA E DO TIPO DE CONCRETO

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental do comportamento de juntas transversais em placas de concreto simples, apoiadas sobre uma fundação elástica. Devido às tensões provocadas pelo carregamento e por variações volumétricas das placas, as juntas transversais quando mal executadas podem ocasionar uma redução da eficiência da transferência de esforços, reduzindo assim, a vida útil do pavimento de concreto.

Para que ocorra uma melhor eficiência da transferência dos esforços nas juntas transversais são utilizadas barras de transferência com diâmetro comercial variando de 10 mm a 32 mm e comprimento de 500 mm. Essas barras são posicionadas sob as juntas serradas na altura de $\frac{1}{2}$ da espessura da placa de concreto e posicionadas a cada 300 mm uma da outra.

Esta pesquisa visa verificar a influência das juntas serradas em função do posicionamento das barras de transferência e a influência do uso de concreto simples autoadensável, concreto simples convencional e concreto convencional simples com fibras de aço. O programa experimental constou de ensaios com aplicação de carregamento estático monotônico em nove placas, simulando pavimentos de concreto, com dimensões 2200 mm x 600 mm, dotadas de junta transversal serrada e apoiadas sobre uma camada de borracha. Os ensaios experimentais mostraram que a junta serrada em placas com a presença de barras de transferência tem um desempenho muito melhor do que as placas sem barra de transferência, e que quanto à altura das barras em relação à base, tiveram um melhor desempenho nas barras posicionadas a $\frac{1}{2}$ altura que a 45 mm da base. Os tipos de concreto foram bastante distintos, porém o concreto convencional com fibras se mostrou mais eficiente que os outros dois tipos de concreto, e o concreto convencional se mostrou mais eficiente que o concreto autoadensável, provavelmente em função do intertravamento dos agregados do concreto convencional que são mais solicitados do que os agregados do concreto autoadensável.

Palavras chaves: Juntas transversais, pavimento rígido de concreto, barras de transferência, fibras metálicas.

EXPERIMENTAL STUDY OF CONCRETE PAVEMENTS: INFLUENCE OF TRANSFER BARS AND TYPE OF CONCRETE

ABSTRACT

This work presents an experimental study of the behavior of transverse joints in unreinforced concrete slabs under elastic support. Due to the tensions caused by loads and volumetric variations in the slab, transverse joints when badly executed can cause a efficiency reduction in the shear transfer, thus reducing the useful life of the concrete pavement.

To have a better efficiency in the shear transfer in joints of concrete pavements, 500 mm transfer bars are used with bar diameters varying from 10 mm to 32 mm. These bars are positioned at midheight of the sawed joints spaced at every 300 mm.

This research seeks to verify the influence of the positioning of the transfer bars and the influence of different types of concrete on sawed joints of concrete pavements. Three different types of unreinforced concrete were used: conventional concrete, steel fiber concrete and self-compacting concrete. The experimental program consisted of the application of static monotonic loading in nine concrete plates, simulating concrete pavements, with dimensions 2200 mm x 600 mm, with a sawed joint at midlength supported by an elastic rubber layer. The experimental results showed that joints with transfer bars performed much better than those joints without transfer bars and that bars located at midheight perform better than those bars positioned at 45 mm from the base. The concrete types were quite different, however the steel fiber concrete was shown to be more efficient than the other two concrete types, and the conventional concrete was more efficient than self-compacting concrete, probably because aggregate interlock is better in conventional concrete.

Key words: Transverse joint, concrete pavements, transfer bars and steel fibers.

INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão considerados alguns aspectos sobre o estudo experimental das juntas transversais em pavimentos rodoviários de concreto de Cimento Portland com a utilização de barras de transferência. Serão apresentadas algumas considerações a respeito dos pavimentos de concreto simples e juntas transversais, iniciando com um resumo histórico, detalhes técnicos sobre os pavimentos de concreto simples, bem como a justificativa e a metodologia para a execução deste estudo, o objetivo desta pesquisa experimental e finalizando com a estruturação do trabalho.

Este trabalho experimental aborda a análise do comportamento estrutural de juntas transversais de pavimentos de concreto simples com aplicação de uma carga monotônica em um dos lados da junta. Foram analisadas as juntas serradas em ensaios experimentais de 9 placas de concreto simples autoadensável, convencional e convencional com fibras de aço. As placas possuíam dimensões 600 mm x 2200 mm x 120 mm (largura x comprimento x espessura) e duas barras de transferência no seu interior sob a junta serrada. Essas placas foram apoiadas em camadas de borracha.

1.1 – HISTÓRICO

Os povos Etruscos dominaram a Itália no período compreendido entre 800 a.C. e 350 a.C, e foram os primeiros a construir caminhos específicos com fins de transporte de pessoas e cargas entre as vilas e colônias da época. Muitos dos conhecimentos dos Etruscos sobre a construção de caminhos foi herdado pela civilização romana, pela sua necessidade de conduzir seus exércitos e de escoar suas mercadorias com maior agilidade e rapidez, o que fez com que eles desenvolvessem um sistema de pavimentação mais ordenado para suas vias. As estradas romanas notabilizaram-se por adotar uma arrojada concepção construtiva, procurando sempre respeitar o traçado em linha reta entre dois pontos. A construção da primeira estrada romana teve início formal em 312 a.C., quando o Senado aprovou a construção de 212 km de estrada pavimentada, partindo de Roma até Cápuia, sob a denominação de Via Appia. (SILVA, 2008). Estas estradas eram pavimentadas com um concreto primitivo que utilizava cal misturada com pozolana, e contava com sistema de drenagem para escoamento das águas pluviais.

Apesar dos fantásticos registros históricos de civilizações majestosas que utilizaram vários meios para a execução de pavimentos, foi a partir de 1889, que George W.

Bartholomew propôs o primeiro pavimento de concreto na cidade de Bellefontaine no Estado de Ohio, EUA. Apesar de o primeiro automóvel só ter aparecido dez anos mais tarde, Bartholomew estava convencido que o cimento produzido em seu pequeno laboratório poderia ser usado para criar um pavimento resistente e durável. Dois anos mais tarde, foi concedida a autorização e o primeiro pavimento de concreto da América foi fabricado em 1891. Até então, as estradas eram sujas, pavimentadas com tijolo ou macadamia de baixa qualidade (PCA, 1984).

Até a década de 1950, os pavimentos rígidos foram muito empregados no Brasil e com ótimo desempenho no Estado de Pernambuco, no Estado do Rio de Janeiro (Rio-Teresópolis) e em outros estados do Brasil. A partir desta década, com as implantações das destilarias de petróleo, o emprego do concreto em pavimentação rodoviária foi reduzido (MEDINA e MOTTA, 2005).

As juntas transversais em pavimentos de concreto foram utilizadas a partir de 1917 e, segundo Teller e Cashel (1958), esse tipo de dispositivo foi utilizado na construção de uma pista de tráfego, entre dois acampamentos militares no Estado da Virgínia nos Estados Unidos. Foram utilizadas barras de transferência de 19 mm de diâmetro em um pavimento de concreto com 6 metros de largura.

Existiam nesse período práticas recomendadas que especificavam as distancias e os valores dos espaçamentos entre as barras de transferência e a espessura das juntas (Teller e Sutherland, 1935). Porém, foi em 1928 que Westergaard, em um estudo analítico sobre a transmissão de forças proporcionada pelas barras de transferência, verificou que somente duas barras próximas à força aplicada (no caso a roda do veículo), eram ativas na transferência de carga. O pesquisador verificou que existia pouca variação na tensão de tração resultante, para espaçamento de 60 cm e 90 cm entre as barras. E essa tensão é produzida na face inferior da placa, diretamente carregada por uma força sobre a junta armada.

Teller e Cashel em 1958 confirmaram os benefícios do uso de barras de maior diâmetro (acima de 19 mm). Essas barras minimizavam os deslocamentos verticais da junta e aumentavam a transferência de carga e reduziam lascamentos e ruína do concreto. Em seus trabalhos os pesquisadores admitiram que, para as barras de seção circular, espaçadas a cada 30 cm e abertura da ranhura de 19 mm, a relação h/ϕ entre a espessura da placa h e o diâmetro da barra ϕ corresponderia a 8.

A pavimentação de rodovias atualmente se mostra como uma das alternativas mais importantes para o desenvolvimento de um país. É através das estradas que ocorre o escoamento da produção e o transporte de pessoas com agilidade, rapidez e segurança.

A NBR 7207 (1982) define pavimento como “uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto a:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- melhorar as condições de tráfego quanto à comodidade e segurança;
- resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.”

Existem dois tipos bem específicos de pavimentos: os flexíveis e os rígidos. Os primeiros são derivados do petróleo e os pavimentos rígidos são pavimentos de concreto compostos de Cimento Portland, que podem ser armados ou não. A diferença estrutural entre esse dois tipos de pavimento é em relação à forma em que os carregamentos são distribuídos sobre o terreno. No caso do pavimento flexível o carregamento aplicado é transmitido de forma mais concentrada, devido à deformação que ocorre na região de contato entre o pavimento e a base de apoio denominada de subleito. Nos pavimentos rígidos ou de concreto, o carregamento transmitido ao solo é distribuído em uma área maior.

1.2 – O PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES DE CIMENTO PORTLAND

O pavimento de concreto simples de Cimento Portland, por não possuir armadura de aço para combater os esforços de tração no concreto, utiliza apenas a eficiência do concreto e as barras de transferência de aço presente nas juntas transversais e longitudinais para suportar os esforços ocasionados pelo tráfego. A carga suportada por esse tipo de pavimento se deve a espessura da placa, onde a tensão gerada pelo momento fletor atuante não deve ultrapassar a tensão de tração na flexão do concreto.

A rigidez e a flexibilidade importam na definição do critério de projeto da estrutura de pavimentos de concreto, o qual pode apresentar comportamentos estruturais diversos. Nas figuras a seguir são ilustradas esquematicamente essa conceituação, do qual se extrai facilmente que nem todos os casos os pavimentos de concreto são propriamente rígidos. Portanto é errôneo o emprego de tal predicado, de forma universal, para descrever qualquer tipo de pavimento de concreto (BALBO, 2005).

Na figura 1.1a, verifica-se a situação em que as pressões transmitidas ao subleito são muito baixas, resultando em deformações totais também pequenas, no detalhe da figura

1.1b, ocorre à situação oposta, onde as respostas estruturais dos pavimentos aportam pressões mais concentradas na fundação e em decorrência, maiores deformações.

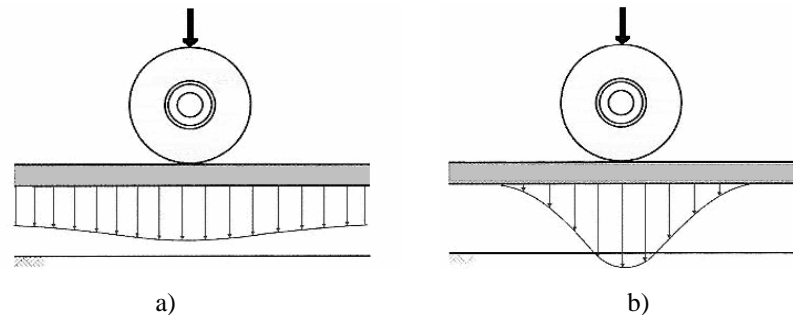


Figura 1.1 – Comportamento mecânico de um pavimento (a) rígido (b) flexível (Balbo, 2005)

A função da camada de revestimento de um pavimento seja ela de concreto ou asfalto é fornecer condições de rolamento confortável, seguro e econômico aos usuários. Porém no pavimento de concreto um dos detalhes construtivos mais importantes são as juntas que devem permitir as movimentações de retração e dilatação do concreto e a adequada transferência de carga entre as placas de concreto, mantendo a planicidade e assegurando a qualidade da pista e ao conforto de rolamento. É importante ressaltar que as juntas devem permitir a “adequada transferência de carga entre placas contíguas”. Pode-se avaliar pela figura 1.2 as condições de trabalho das juntas.

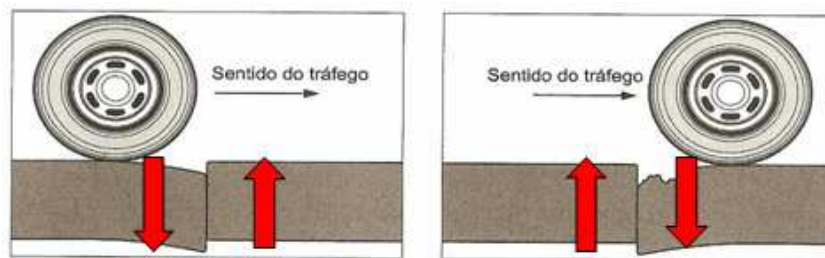


Figura 1.2 – Junta desprotegida (Rodrigues *et. al.*, 2006)

A junta é um importante componente em um pavimento de concreto e neste ponto quando há a adequada transferência de carga através de um dispositivo devidamente dimensionado, preparado e posicionado, tem-se assegurada à vida útil das placas de concreto (Figura 1.3).



Figura 1.3 – Junta protegida (Rodrigues *et. al.*, 2006)

Os pavimentos de concreto de cimento Portland, bem como os de concreto asfáltico, são estruturas bastante complexas, pois além dessas particularidades executivas, eles são constituídos de camadas finitas de materiais com naturezas reológicas em geral bastante distintas, o que leva a uma enormidade de possibilidades de respostas estruturais.

O pavimento possui uma camada extensa de apoio denominada subleito, que deverá estar submetido a pressões compatíveis com sua capacidade de suporte ou de carga.

Por se tratar de uma peça com uma grande superfície de contato, por estar constantemente exposto a variações climáticas e diferentes condições de apoio e carregamento, os pavimentos de concreto apresentam grande suscetibilidade à fissuração localizada, empenamentos e até rupturas por deformações plásticas ou por variações de temperatura.

Segundo Huang (1993) durante o dia quando a temperatura na superfície superior da laje é maior que na inferior, a parte superior tende a expandir e a parte inferior a contrair. No entanto o peso da laje restringe em partes essa expansão e a contração. Os esforços de tração na parte superior fazem com que a parte inferior contraia.

No período noturno, a situação se inverte e quando a temperatura na superfície superior é menor que a da superfície inferior, a parte superior do pavimento tende a contrair e a parte inferior a tracionar. Na figura 1.4 é mostrada esta situação.

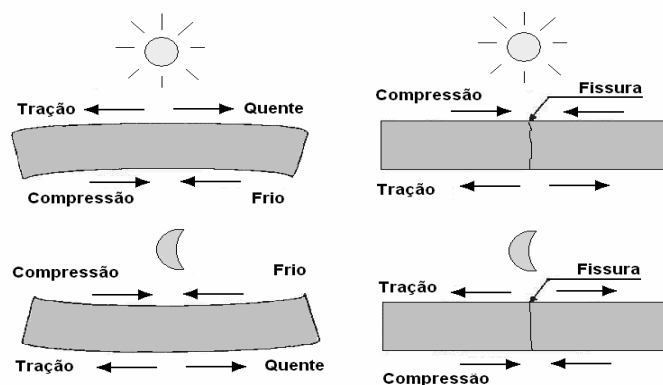


Figura 1.4 – Comportamento do pavimento em diferentes condições climáticas (Pitta, 1998)

Para minimizar os efeitos destas condições prejudiciais aos pavimentos são empregadas às juntas transversais e longitudinais. Tais juntas são caracterizadas como um ponto fraco no concreto, onde possivelmente apareceriam as fissuras e a transferência de carga entre as placas de concreto depende da abertura dessas juntas, tendo grande influência a temperatura na eficiência da transferência de carga.

Com essa visão a proposta do estudo de pavimentos de concreto se torna viável, principalmente a eficiência na transferência de esforços nas juntas transversais de pavimentos de concreto simples, que é um dos pontos importantes no bom funcionamento desse tipo de pavimento evitando as denominadas quebras de canto da placa que ocorrem nas juntas de pavimentos de concreto de Cimento Portland.

1.3 – JUSTIFICATIVA

Como os pavimentos de concreto possuem nas juntas sua maior vulnerabilidade, em função de ser esse ponto o local onde apresenta maiores patologias de natureza estrutural, esta pesquisa tem o interesse de apresentar algumas informações sobre juntas transversais, uma vez que não existem normas específicas, existindo apenas recomendações sobre o projeto e cálculo.

Como no Brasil o estudo sobre o desempenho de juntas de pavimentos em concreto ainda é muito pequeno, existe uma série de análises que podem e devem ser feitas, para que possam servir futuramente como referência para elaboração de uma norma específica para a execução de pavimentos de concreto.

Esta é a oitava pesquisa realizada em pavimentos de concreto, sendo uma linha de pesquisa já consolidada pela Universidade Federal de Goiás (UFG) e que procura através deste trabalho, dar uma pequena contribuição no entendimento do comportamento das juntas transversais em placas de concreto.

1.4 – METODOLOGIA

Nesta pesquisa foram executadas 09 placas de concreto que simularam uma fração de pavimento de concreto simples, com junta ao centro, 03 placas sem barra de transferência para servir de referência e seis placas utilizando barras de transferência de aço CA-25 com 500 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, distantes 30 cm uma da outra.

As peças foram concretadas com dois tipos específicos de concreto, um autoadensável e outro convencional (adensável por vibração mecânica), sendo que o convencional foi dividido em duas partes, uma parte apenas convencional e outro convencional com adição de fibras.

As placas possuíam as dimensões de 600 mm de largura, por 2200 mm de comprimento e 120 mm de espessura, com uma junta serrada ao centro no sentido do comprimento. Essas medidas foram utilizadas com o objetivo de distribuir as barras de transferência em distâncias de 300 mm uma da outra e 150 mm de distância das bordas no sentido da largura, sendo que caso fossem colocadas uma placa ao lado da outra, essas teriam a mesma distância entre as barras, simulando um pequeno trecho de pavimento rodoviário. O comprimento de 2200 mm adotado permitiu que as placas fossem divididas em duas partes iguais de 1100 mm, não tomando muito espaço para realização dos ensaios e a espessura de 120 mm foi utilizada com referência para análise dos trabalhos anteriores a esta pesquisa.

Os ensaios para análise das juntas serradas foram realizados sobre uma placa de borracha que simulava uma fração da base de apoio da placa de concreto, sobre a placa foram posicionados deflectômetros em pontos específicos para verificar o deslocamento da junta e das faces externas da placa.

Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência para aferir as deformações do concreto e das barras de aço, e sobre essa placa, margeando a junta serrada foi utilizada uma viga de reação posicionada no lado carregado para aplicação de força monotônica estática.

1.5 – OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo desta pesquisa é avaliar, através de um estudo experimental em laboratório, a influência das juntas de pavimentos de concreto em função da eficiência do intertravamento dos agregados e das barras de transferência, a influência que o posicionamento das barras de transferência em relação à vertical exerce na junta e a relação entre o uso do concreto simples autoadensável, concreto simples convencional (concreto adensado por vibração mecânica) e o concreto simples convencional com adição de fibras metálicas.

1.6 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho se compõe de seis capítulos, apresentando inicialmente neste capítulo a introdução ao tema da pesquisa desenvolvida.

O capítulo II é dedicado à revisão bibliográfica, onde se descreve sobre os tipos de juntas, os mecanismos de transferência de carga, os tipos de concreto e as pesquisas já realizadas sobre juntas e blocos de cisalhamento duplo.

No capítulo seguinte é apresentado o programa experimental adotado para a execução dos ensaios de juntas e blocos de concreto.

No capítulo IV são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios das 09 frações de pavimento e dos 05 blocos de concreto, através de gráficos e tabelas.

No capítulo V procede-se a análise dos resultados.

E finalmente, no último capítulo são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTRODUÇÃO

Serão apresentados neste capítulo alguns itens sobre juntas transversais em pavimentos de concreto de cimento Portland, fibras metálicas adicionadas ao concreto, concreto autoadensável, cisalhamento duplo em blocos de concreto e serão expostos os principais trabalhos desenvolvidos ao longo das décadas relacionados a pavimentos, juntas e ao cisalhamento duplo.

2.2 – JUNTAS EM PAVIMENTOS DE CONCRETO

Neste item serão mostrados os tipos de juntas que são detalhes construtivos de pavimentos de concreto que permitem as movimentações de retração e dilatação do concreto e a adequada transferência de carga entre placas contíguas, mantendo a planicidade e assegurando a qualidade do piso e conforto do rolamento.

2.2.1 – Tipos de Juntas

A literatura técnica apresenta três tipos de juntas;

- Junta longitudinal;
- Junta transversal;
- Junta de expansão

Junta longitudinal

Esse tipo de junta é executada na direção do comprimento do pavimento. Podem ser consideradas como junta de construção quando são feitas ao final de um dia de pavimentação ou durante um intervalo na execução entre um trecho e outro do pavimento (Rodrigues *et. al.*, 2006).

A figura 2.1 mostra esse tipo de junta, onde existem barras de transferência para melhor transmitir o carregamento.

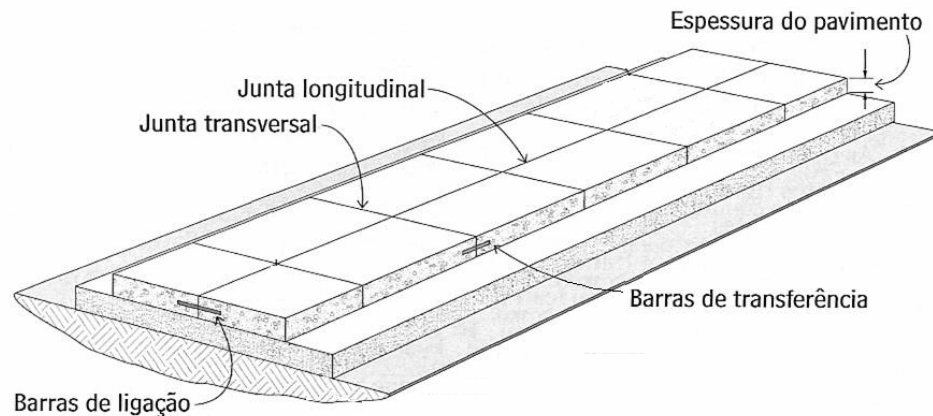


Figura 2.1 – Junta longitudinal (Rodrigues *et. al.*, 2006)

Junta transversal

Esses tipos de juntas são executadas perpendicularmente à linha central do pavimento de concreto (Figura 2.2) e podem funcionar como juntas de construção, mas sua principal função é absorver os esforços provocados pela retração do pavimento.

Devido sua posição, as juntas transversais estão sujeitas ao maior número de movimentos das placas, daí sua grande importância. As juntas transversais são usadas para controle das contrações volumétricas do concreto e evitar a formação de fissuras, através de uma junta formada pelo enfraquecimento de seções pré-definidas geometricamente. Esse procedimento é realizado através de corte ou ranhura pré-moldada na seção do pavimento,

Para a execução da ranhura pré-moldada pode-se utilizar um perfil metálico ou uma ripa de madeira sendo que para executar essa junta é necessário que o concreto esteja no seu estado plástico. A profundidade da ranhura deve ter $1/4$ a $1/6$ da espessura da placa.

Para o corte com serra diamantada a profundidade especificada no trabalho da referida pesquisadora, indica $1/4$ da espessura da placa e abertura de 6 milímetros, respeitando uma profundidade maior que o diâmetro máximo do agregado do concreto.

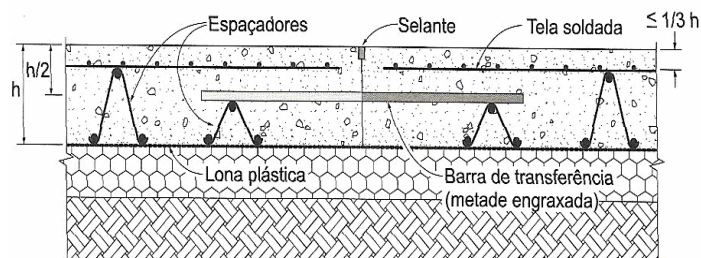


Figura 2.2 – Junta transversal (Loturco, 2005)

Junta de expansão

São usadas no encontro entre as placas do pavimento de concreto e em outras estruturas como pontes e viadutos, ou no encontro de um pavimento novo com um antigo. A junta de expansão permite que o pavimento trabalhe sem a influência das outras estruturas existentes. A Figura 2.3 mostra esse tipo de junta.

Quando é utilizada entre placas, é comum o emprego de barras de transferência sendo necessário prever um capuz, que pode ser de plástico, no final da barra de transferência, com folga aproximada de 20 mm, que permite que a barra se movimente livremente no sentido do deslocamento.

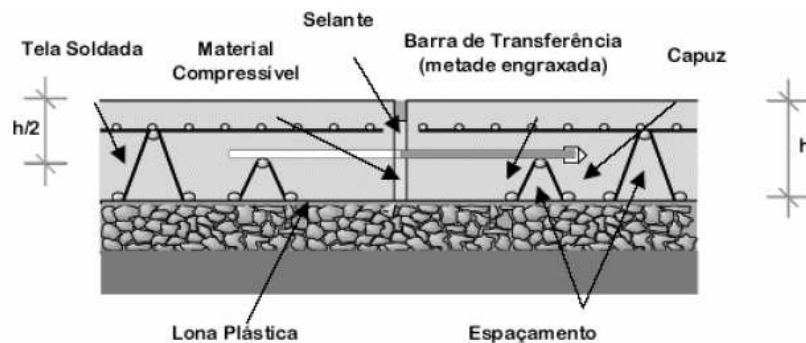


Figura 2.3 – Junta de expansão (Rodrigues e Gasparetto, 2005)

2.2.2 – Espaçamento das juntas

O espaçamento entre juntas de pavimento de concreto varia em função do tipo de pavimento que será utilizado, que pode ser simples, com armadura distribuída ou estruturalmente armado.

O *Department of the Army Corps of Engineers* (1984) define que para melhorar o desempenho do pavimento e que tenha um menor custo, esse pavimento deve ter o menor número de juntas, utilizando assim o maior espaçamento para controlar as fissuras de maneira satisfatória.

Essas fissuras que ocorrem em pavimentos simples podem ocasionar sérios problemas, pois passam a trabalhar como verdadeiras juntas e como não estão seladas deterioram-se rapidamente, necessitando de reparos e recuperação, uma das soluções é cortar uma faixa no local e criar uma nova junta.

De acordo com Rodrigues e Cassaro (1998) para os pavimentos simples o espaçamento recomendado varia de pouco mais de 3 metros para espessuras de 125 mm, até 8 metros quando a espessura for de 250 mm.

Em trabalhos realizados por Pitta (1998) esse pesquisador classifica o espaçamento para juntas transversais em função de alguns fatores, como: o tipo de agregado utilizado, os fatores ambientais, do atrito entre a placa e a camada subjacente e o tipo de tráfego que ocorrerá sobre o pavimento de concreto.

Em função das variações desses fatores a distância adequada entre as juntas transversais, para que a mesma apresente bom desempenho de funcionamento é de 6 metros de distância entre elas.

2.2.3 – Patologias em juntas

As juntas se não forem executadas corretamente ou sua ausência pode gerar algumas falhas em função de deflexões excessivas.

Segundo Harvey *et. al.* (2000) essas falhas podem ser:

- O desnivelamento da junta (“*faulting*”): que é um desnível entre as faces adjacentes dos pavimentos na região das juntas;
- O bombeamento (“*pumping*”) as juntas com grandes deflexões podem bombear o material sob esta região e gerar vazios com a consequente perda de suporte do pavimento.
- As fissuras podem ocorrer em virtude da perda de suporte sob o canto da placa, causados por bombeamento ou desnivelamento ou pela falta de transferência de carga uniforme através das juntas longitudinais, transversais e/ou nos acostamentos.
- Destacamento da superfície do concreto (“*spalling*”) que é a ruptura da espessura do concreto a um metro da junta, sendo necessário o controle das fissuras para que não ocorra o destacamento.

2.2.4 – Dispositivos de transferência de carga

Os dispositivos de transferência são peças utilizadas para transferir cargas entre placas contíguas separadas por juntas e são constituídas geralmente por barras de aço de seção circular ou quadrada, embora existam alguns modelos formados por chapas planas, mas que ainda não são empregadas no Brasil.

O dispositivo de transferência ajuda na acomodação do movimento restringido e mantém a junta em alinhamento. Esse movimento horizontal da junta surge devido aos alongamentos e encurtamentos sofridos pelas placas, que tendem a ser restringidos pelo atrito existente entre o pavimento e a fundação.

Já a deformação sofrida verticalmente pelo pavimento é definida pelo DNER 35 (1989) em sua terminologia rodoviária como deflexão em consequência de aplicação de força sobre o pavimento. No uso de barras de transferência o importante é que a barra tenha uma superfície lisa, onde possa deslizar dentro do concreto.

As barras de transferência possuem seção circular e são produzidas com aço de baixo teor de carbono, de acordo com a Norma ASTM A36 (1997) é um aço que possui resistência mecânica média, com o limite de escoamento estimado em $f_y > 250$ MPa e um limite de ruptura f_u entre 400 a 550 MPa. De acordo com a NBR 8800 (2007), as propriedades mecânicas do aço são: Módulo de Elasticidade Tangente $E_s = 205.000$ MPa e coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ para o aço estrutural.

Sua principal aplicação é nos pisos de concreto, para distribuir as cargas entre as placas adjacentes. Nesta situação costuma-se engraxar metade da barra para garantir perfeito deslizamento por ocasião de variações volumétricas do piso (MORAIS e MORAES REGO, 2005)

As barras lisas de seção circular, que são utilizadas em juntas transversais, são utilizadas comercialmente no Brasil para a execução de pavimentos de concreto, possuem comprimento nominal de 500 mm e diâmetro variando de 10 mm a 32 mm. Estas barras por serem lisas não aderem ao concreto o que permite a movimentação das placas, sendo por isso necessário, no período de execução, engraxar um dos lados da barra para permitir essas movimentações dentro do concreto. Nas juntas longitudinais são utilizadas barras de ligação que evitam as movimentações laterais e possibilitam a transferência de carga pelo intertravamento dos agregados. O tipo de barra mais utilizado para as juntas longitudinais são barras de aço nervuradas do tipo CA-50.

2.2.5 – Transferência de carga entre pavimentos

Para o dimensionamento e especificações do pavimento de concreto existem tabelas relacionando a espessura do pavimento com o diâmetro da barra, porém segundo (Rodrigues e Cassaro, 1998) ocorrem discrepâncias nestas informações.

O projeto de um sistema de transferência de carga por barras nas juntas para o pavimento de concreto inclui a seleção da barra com o diâmetro apropriado, carregamento aplicado e localização da barra.

De acordo com Buch e Zollinger (1996), esses três fatores têm uma grande influência na pressão e carregamento que a barra impõe a sua volta. O aumento dessa pressão causa a deterioração desse concreto resultando no desprendimento da barra e eventual desnivelamento da junta, podendo com isso causar a perda de eficiência da junta.

Pitta (1998) recomenda que para resistir à força de atrito entre a junta considerada e a borda livre da placa mais próxima, o cálculo do dispositivo de ligação é realizado através da Equação 2.1 abaixo.

$$A_s = \frac{j \cdot t \cdot \gamma \cdot h}{100 \cdot S} \quad (2.1)$$

Onde:

- A_s é a área de aço considerada por metro de junta, em cm^2/m ;
- j é a distância entre a junta considerada e a borda livre mais próxima a ela, em m;
- t é o coeficiente de resistência entre a placa e o subleito ou sub-base, geralmente 1,5;
- γ_c é peso específico do concreto, igual a 24000 N/m^3 ;
- h é a espessura da placa em m;
- S é a tensão admissível do aço.

Para o cálculo do comprimento, segundo Pitta (1998), para a garantia da aderência necessária é feito considerando-se a tensão máxima de aderência aço-concreto de 2,45 MPa. Nesse cálculo é utilizada a Equação 2.2.

$$l = \frac{1}{2} \left(\frac{S \cdot \phi}{\sigma_b} \right) + 7,5 \quad (2.2)$$

Existem estudos que alegam que as barras de aço podem causar severa deterioração ao pavimento de concreto devido à expansão do aço durante o processo de corrosão. As barras de fibra de vidro são uma alternativa livre de manutenção e corrosão que pode estender a vida útil do pavimento (EDDIE, SHALABY, RIZKALLA, 2001).

De acordo com Rodrigues e Cassaro (1998) as barras de transferência precisam ser milimetricamente posicionadas, para garantir o mecanismo da transferência de cargas. Elas devem trabalhar com pelo menos uma extremidade não aderida, para permitir que nos movimentos contrativos da placa ela deslize no concreto, sem gerar tensões prejudiciais. O conjunto de barras deve estar paralelo entre si, tanto no plano vertical como horizontal, e concomitantemente ao eixo da placa.

Existem diferentes tabelas que fornecem os valores do diâmetro e do espaçamento entre as barras de transferência, em função da espessura da placa de concreto. Uma dessas tabelas foi elaborada por Pitta (1998) que especificam alguns desses parâmetros na tabela 2.1 abaixo. Porém, outros parâmetros como o coeficiente de recalque da fundação, a elasticidade da placa e a abertura da junta também influenciam no dimensionamento das barras de transferência.

Tabela 2.1 – Diâmetro, comprimento e espaçamento das barras de transferência

Espessura da placa (mm)	Bitola (ϕ)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
até 170	20	460	300
175 - 220	25	460	300
225 - 300	32	460	300
Maior que 300	40	460	300

Fonte: Pitta (1998)

De acordo com Yoder e Witczak (1975) as barras de transferência têm os seus desempenhos ditados por dois parâmetros principais: o espaçamento e o diâmetro das barras. Secundariamente, é função também da abertura da junta.

As tensões atuantes nas barras de transferência estão ligadas à espessura da placa através do raio de rigidez relativo l que é dado pela equação 2.3 abaixo.

$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}} \quad (2.3)$$

Onde:

- E é o módulo de elasticidade do concreto (kgf/cm^2)
- h é a espessura da placa de concreto (cm^2)
- ν é o coeficiente de Poisson do concreto, tomado como 0,15
- k é o coeficiente de recalque da fundação ($\text{kgf/cm}^2/\text{cm}$)

Porém a influência da carga ocorrerá até uma distância de 1,8 vezes o raio de rigidez relativo. Portanto, quanto maior, mais barras estarão repartindo o esforço aplicado. Esse detalhe é mostrado na figura 2.4 abaixo.

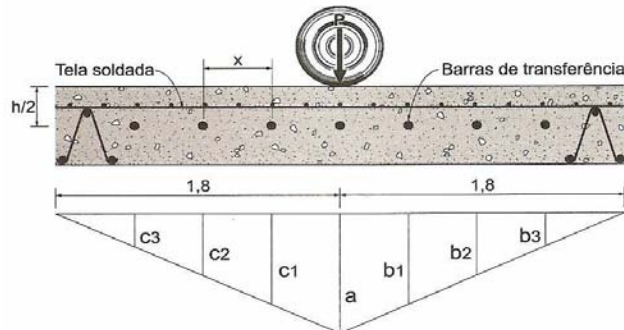


Figura 2.4 – Distribuição de esforços nas barras de transferência (Rodrigues *et. al.*, 2006)

2.2.6 – Eficiência das Juntas

O desempenho das juntas é medida através da eficiência da junta usada pela Associação Americana de Pavimento de Concreto (ACPA). A eficiência é o parâmetro comumente utilizado para verificar se a transferência de esforços está ocorrendo de forma satisfatória. Esta eficiência é estimada através dos deslocamentos verticais da junta em relação aos dois lados da placa, o lado carregado e o lado não carregado.

De acordo com Rodrigues *et. al.* (2006) a eficiência da junta irá depender do trabalho em conjunto com o concreto, que é o elo fraco do conjunto, a resistência mecânica do aço acaba tendo efeito secundário.

A equação 2.4, elaborada pela ACPA - *American Concrete Pavement Association* (1991), é utilizada no cálculo desta eficiência.

$$E = \frac{(2 \times d_u)}{(d_u + d_L)} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde:

E = Eficiência da junta (%);

d_u = Deslocamento da junta no lado não carregado (mm);

d_L = Deslocamento da junta no lado carregado (mm).

A ACPA recomenda um valor mínimo de 75% de eficiência para as juntas, com isso, para uma junta ser considerada eficiente terá que transmitir no mínimo 75% dos esforços do lado carregado para o lado não carregado das placas de concreto.

2.2.7 – Métodos de dimensionamento dos pavimentos de concreto

O dimensionamento de pavimentos de concreto é baseado na atuação das cargas sobre as placas de concreto, sendo estas placas apoiadas sobre uma base elástica.

Westergaard (1926) publicou pela primeira vez a análise de uma laje de concreto apoiada em subleito, que constitui a base de praticamente todos os métodos de cálculo dos pavimentos rígidos, ele propôs em suas pesquisas equações para o cálculo de tensões de tração na flexão nas placas submetidas a esforços provenientes de carga unitária, com base na Teoria Clássica de Placas Isótropas (medianamente espessas). Essas equações desenvolvidas por Westergaard não previam a existência de transferência de cargas em juntas de placas de concreto simples (BULL e SINGH, 1990).

Os métodos de cálculo mais utilizados são o método da AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Official* (1993) e da PCA - *Portland Cement Association* (1984). O método da AASHTO é baseado em equações empíricas obtidas da análise de ensaios realizados na rodovia de teste da própria associação.

O método da PCA é baseado em estudos realizados por Westergaard, ensaios em laboratórios, análises computacionais, ensaios da pista experimental da AASHTO e observações realizadas em pavimentos em serviço.

Nessas considerações o contato com o solo desse tipo de estrutura é uma constante, sendo o comportamento do mesmo um fator primordial para o bom funcionamento do pavimento (REIS, 2009).

No dimensionamento é importante a investigação da capacidade de suporte do subleito que é a última camada de suporte das cargas atuantes em um pavimento rígido ou flexível. A determinação da capacidade de suporte pode ser determinada pelo Módulo de Reação de Westergaard ou Coeficiente de Recalque, apresentado na equação 2.5 abaixo.

$$k = \frac{P}{w} \quad (2.5)$$

Onde:

k = Módulo de reação ou coeficiente de recalque (N/mm³);

P = Pressão transmitida ao subleito (N/mm²);

w = Deslocamento vertical da área carregada (mm).

O valor do coeficiente de recalque pode ser estimado pelo ensaio de prova de carga estática, seguindo as normas DNER 35 (1989) e NBR 6489 (1984), onde se carrega uma placa metálica de 750 mm de diâmetro assentada sobre a sub-base ou subleito. Na impossibilidade de realização deste ensaio é possível correlacionar os valores do coeficiente de recalque com o Índice de Suporte Califórnia (CBR). A tabela 2.2 fornecida por Pitta (1998) estabelece esta correlação.

Tabela 2.2 – Correlação entre valores de CBR e k do subleito.

CBR (%)	k (N/mm ³)	CBR (%)	k (N/mm ³)
3	0,024	12	0,053
4	0,030	13	0,054
5	0,034	14	0,056
6	0,038	15	0,057
7	0,041	16	0,059
8	0,044	17	0,060
9	0,047	18	0,061
10	0,049	19	0,062
11	0,051	20	0,063

Fonte: Pitta (1998).

A sub-base se faz necessária para que se tenha um melhoramento do suporte do subleito com conseqüente aumento do coeficiente de recalque (k).

Deve ser projetada com o objetivo de se obter uma característica uniforme para toda área de apoio do pavimento. Com o conhecimento da capacidade de suporte do subleito adota-se a espessura e o tipo de material a ser empregado na sub-base, sendo os materiais mais comuns a camada de brita, solo-cimento, solo melhorado com cimento e concreto rolado.

2.3 – FIBRAS

2.3.1 – Antecedentes históricos das fibras

As fibras são materiais de construção civil cuja utilização já ocorria no Antigo Egito, como nos reportam as Sagradas Escrituras. “Naquele mesmo dia o Faraó deu esta ordem aos inspetores do povo e aos capatazes: não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico dos tijolos”.

Historicamente, utilizam-se fibras para armar materiais quebradiços desde os tempos antigos. Palhas foram usadas para armar tijolos secos ao sol, crinas de cavalo para armar estuques e, mais recentemente, amianto para uso em cimento Portland (MANUAL DE WHITETOPPING, 1999).

No início dos anos de 1960, foram realizados estudos nos Estados Unidos usando fibras plásticas no concreto com ou sem armadura de barras de aço ou malhas de fios. Muitas experiências estão sendo conduzidas nos EUA desde o início de 1950.

E as aplicações do concreto armado com fibras têm ocorrido desde a metade de 1960 para estradas e pisos, materiais refratários e manufaturados de concreto (MANUAL DE WHITETOPPING, 1999)

Atualmente as fibras vêm sendo aplicada em grande parte da construção civil com em telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de concreto como túneis e pavimentos.

Para Figueiredo (2000) as fibras de aço podem ser classificadas como fibras de alto módulo, em virtude de sua alta resistência mecânica. Logo podem ser consideradas como fibras destinadas ao reforço primário do concreto, ou seja, não se destinam ao mero controle de fissuração.

A utilização de fibras no concreto é de grande interesse tecnológico, mesmo em estruturas convencionais de concreto armado, onde, em conjunto com o concreto de elevado desempenho aumenta a competitividade do material, quando comparado com outras tecnologias como a das estruturas de aço por exemplo. (MINDESS, 1995).

No Brasil, as fibras começaram a ser utilizadas a partir da década de 90, data que também começou a surgir pesquisas com adição de fibras, têm se empregado muito a utilização das mesmas em pisos, pavimentos e radiers apoiados diretamente sobre o solo.

O princípio básico da adição das fibras é melhorar uma matriz frágil, ou seja, concreto sem fibras, aumentando a resistência do material, através da transferência de tensão através das fissuras, inibindo a abertura das fissuras, pelo efeito de “costura” das fissuras. Esse fato de inibir a abertura das fissuras pode se levar, a princípio, à conclusão do combate à fissuração do concreto. No entanto, além do controle da fissuração, o material apresenta capacidade de se deformar absorvendo carga, aumentando assim a ductilidade da peça.

Em seguida, falaremos sobre os tipos de fibras, os mecanismos de transferência de tensão, mecanismo de atuação das fibras e sobre a tenacidade causada pela adição das fibras ao concreto.

2.3.2 – Tipos de fibras

Na primeira metade da década de 90, o Brasil passou a contar com as fibras de aço produzidas a partir de fios trefilados de alta resistência que são adequadas à execução dos pavimentos industriais.

Com essas fibras veio também critério de dimensionamento que permitem extrair deste material toda a sua potencialidade estrutural. Podemos até dizer que a chegada das fibras de aço promoveu uma verdadeira revolução na engenharia de pavimentação industrial, pois abriu para nós toda a metodologia de dimensionamento empregada na Europa, possibilitando o aperfeiçoamento das técnicas de projeto de outros tipos de pavimento, notadamente o armado.

Hoje temos também outros tipos de fibras de alto módulo disponíveis como, por exemplo, a fibra de vidro. Também devem chegar, num futuro próximo, as fibras plásticas de alto módulo.

As fibras podem ser sintéticas e orgânicas (polipropileno ou carbono), sintéticas e inorgânicas (aço ou vidro), naturais e orgânicas (celulose) ou naturais e inorgânicas (asbesto ou amianto).

Abaixo são descritas nos itens de a a c os três tipos mais usuais de fibras utilizadas em peças de concreto, tanto para reforço como para melhorar algumas propriedades mecânicas do concreto.

a) Fibras de aço

As fibras de aço são utilizadas largamente em nível mundial, e no Brasil já estão sendo comercializadas através de três fabricantes distintos. Possuem elevados valores de resistência aos esforços mecânicos e alto módulo de elasticidade. São encontradas em diversas formas, diâmetros e comprimentos. Tem grande campo de aplicação em pré-fabricados, concreto projetado, pavimentos aeroportuários e rodoviários, pisos industriais, entre outros. Seus comprimentos variam de 12 mm a 65 mm e podem ser revestidas para evitar oxidação ou produzidas a partir do aço galvanizado ou inoxidável.

Geralmente, estas fibras possuem deformações ao longo de todo o seu comprimento (fibras onduladas) ou somente nas extremidades, formando ganchos. Tais deformações têm a finalidade de melhorar o comportamento da fibra com relação à aderência, através de ancoragem mecânica.

Para Pinto Júnior & Cárnio (1998), a matriz do compósito pode ser constituída de concreto convencional ou de alto desempenho. Na dosagem de uma matriz de concreto para confecção de um compósito com fibras, deve-se observar muito a trabalhabilidade da mistura. Na prática não se utilizam as fibras mais indicadas em função do fator de forma, mas em função de um concreto melhor trabalhável, ou seja, de melhor facilidade de mistura.

É complacente ressaltar que o concreto reforçado com fibras de aço não se comporta como o concreto armado. Não se trata de comparar o concreto armado com o concreto reforçado com fibras de aço, o processo de cálculo apresenta particularidades de plasticidade que é aplicado apenas parcialmente no concreto armado. No tocante a pavimento e pisos a adição de baixos teores de fibras, resulta em um aumento muito pouco significativo de suas resistências à compressão e à tração, sendo assim a matriz fissura com mesmo nível de tensão e deformação do que quando armada, portanto nesse caso pode se aplicar o conceito de cálculo do concreto armado ao concreto reforçado com fibras de aço. (PINTO JÚNIOR & CÁRNIO, 1998).

No caso da nossa pesquisa as fibras de aço são mais eficientes do que outros tipos de fibras, graças a sua alta resistência à tração, maior módulo de elasticidade e grande capacidade de aderência à matriz que a envolve.

b) Fibras de polipropileno

Fibras de polipropileno são muito usadas para reduzir a fissuração devida à retração plástica (ocorre no concreto ainda mole). As fibras de polipropileno são, por isso, muito usadas em estruturas de contenção de água, como em Estações de Tratamento de Água e Esgotos, galerias e paredes de canais.

O polipropileno, muito usado nas fibras para o concreto, é um polímero de alta resistência química e de alta resistência a solventes. As fibras de polipropileno são fabricadas em forma de fibrilas retangulares ou de mono-filamentos cilíndricos.

Segundo Figueiredo (2000) as fibras de polipropileno tendem a apresentar uma limitadíssima capacidade de reforços, quando o módulo de elasticidade da matriz é maior do que o das fibras. Atualmente, os cimentos com aceleradores de pega e redutores de água, propiciam um alto ganho de resistência inicial, e em paralelo, alto módulo de elasticidade. Com isto, as fibras de baixo módulo só têm possibilidade de atuarem como reforço, apenas num curto espaço, após o lançamento, onde a cura bem feita garante excelentes resultados.

As fibras de nylon e de polietileno são fibras de baixo módulo, o que restringe a sua utilização ao controle de fissuração quando as matrizes possuem baixo módulo de elasticidade, como é o caso da retração plástica, nas argamassas.

c) Fibras de carbono

As fibras de carbono são produzidas pela oxidação e carbonização de um precursor orgânico que pode ser o piche, um subproduto do petróleo, o PAN (*polyacrylonitrile*) e o rayon.


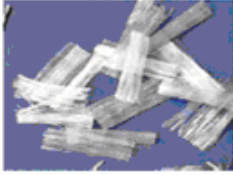
No processo de fabricação a fibra precursora passa por um tratamento de estabilização ao ar com temperaturas entre 200°C e 300°C, sendo depois submetida a temperaturas elevadas da ordem de 1500°C a 3000 °C. Nessas temperaturas, a grande maioria das fibras sintéticas irão se derreter ou se vaporizar. Isso não acontece, no entanto, com certas fibras, como o acrílico, por exemplo, que mantém a sua estrutura molecular mesmo após a carbonização, ficando os átomos de carbono alinhados ao longo das fibras originais.

O agrupamento desses filamentos é que vai proporcionar excelentes propriedades mecânicas que são alteradas em função das temperaturas atuantes no processo de fabricação dos filamentos.

2.3.3 – Propriedades mecânicas das fibras de aço

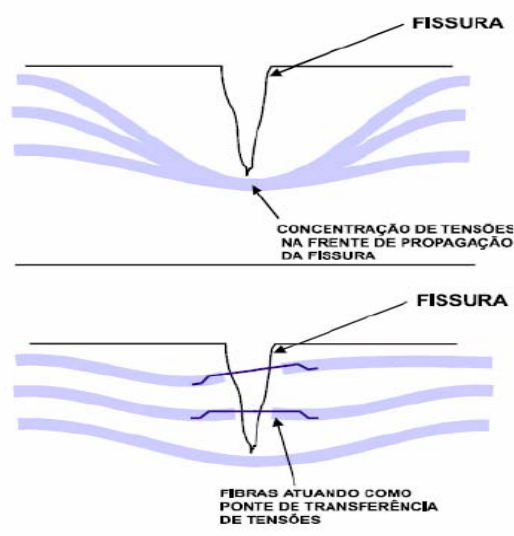
As matrizes de concreto sem o reforço das fibras apresentam comportamento frágil, com baixa capacidade portante e baixas deformações quando submetidas a esforços de tração, praticamente não apresentam deformações plásticas.

No caso de pisos a maioria dos concretos empregados com fibras incorpora baixos teores de consumo de fibras, o que resulta em um aumento muito pouco significativo de suas resistências à compressão e à tração (Figura 2.5). Desta forma, a matriz fissa com o mesmo nível de tensão e de deformação do que quando armada.

Tipo de fibra	Resistência a tração MPa	Módulo de elasticidade GPa	Alongamento último %
<p>Aço</p> 	1000	205	30 %
<p>Polipropileno</p> 	140 a 700	3,5 a 4,8	15 %
<p>Carbono</p> <p><i>As mais resistentes, porém as mais caras. Usadas em alguns tipos de pré-fabricados.</i></p>	2500 a 3000	380	0,5 a 0,7 %

2.5 – Propriedades mecânicas das fibras (Figueiredo, 2005)

O reforço com fibras descontínuas e aleatórias distribuídas na matriz possui função principal de controlar a propagação de fissuras no concreto, alterando o seu comportamento mecânico, após a ruptura da matriz. Melhora consideravelmente a capacidade de absorção de energia do concreto, ou seja, sua tenacidade, transformando um material frágil em dúctil. Isto ocorre porque as fibras criam pontes de transferência de tensões através das fissuras, preservando certa capacidade portante das tensões, conforme se pode ver na Figura 2.6.

2.6 - Mecanismo do reforço das fibras de aço (Nunes *et. al.*, 1997)