



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**ESTUDO DO USO DE BARRAS DE TRANSFERÊNCIA  
DE COMPRIMENTOS REDUZIDOS EM PAVIMENTOS  
RÍGIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**Eng. Civil Fábio Gonçalves dos Reis  
Orientador: Prof. Ph.D. Gilson Natal Guimarães**

**Goiânia**

2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO USO DE BARRAS DE TRANSFERÊNCIA  
DE COMPRIMENTOS REDUZIDOS EM PAVIMENTOS  
RÍGIDOS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

**FÁBIO GONÇALVES DOS REIS**

**Orientador:** Prof. Ph.D. Gilson Natal Guimarães

**Dissertação apresentada ao programa  
de pós-graduação em Engenharia Civil  
da EEC/UFG para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Civil.**

**Área de concentração:**

Estruturas e Materiais

**Goiânia**

2009

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

R375e            Reis, Fábio Gonçalves dos.  
                  Estudo do uso de barras de transferência de comprimentos reduzidos em pavimentos rígidos de concreto autoadensável [manuscrito] / Fábio Gonçalves dos Reis. – 2009.  
                  254 f. : il., color., quads, tabs., grafs.

Orientador: Prof. PhD. Gilson Natal Guimarães.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

Bibliografia: f. 169-172.

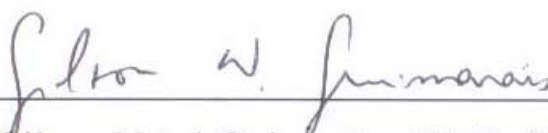
Inclui lista de tabelas, figuras, quadros, abreviaturas e símbolos.  
Apêndices.

1. Pavimentos de Concretos 2. Concreto Autoadensável 3. Barras de transferência I. Guimarães, Gilson Natal II. Universidade Federal de Goiás, **Escola de Engenharia Civil**. III. Título.

CDU: 666.982

# FÁBIO GONÇALVES DOS REIS

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 de junho de 2009,  
pela Banca Examinadora constituída pelos professores:**



---

Prof. Gilson Natal Guimarães, Ph.D. (UFG)

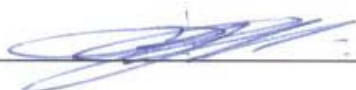
(ORIENTADOR)



---

Prof. Ronaldo Barros Gomes, Ph.D. (UFG)

(EXAMINADOR INTERNO)



---

Prof. Dr. Rodrigo Gustavo Delalibera (UFG – Catalão)

(EXAMINADOR EXTERNO)

## **DEDICATÓRIA**

*À Deus pela conquista.*

*À minha mãe pelo amor aos seus filhos.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter permitido mais esta conquista tão valiosa em minha vida, por ter iluminado meus caminhos profissionais e acadêmicos e por ter me acompanhado nos momentos de maior dificuldade deste trabalho.

Ao professor Gilson pela sua dedicação em orientar este trabalho, seus valiosos conselhos acadêmicos e profissionais, sua objetividade e paciência que foram fundamentais para que este trabalho fosse concluído. Agradeço sua compreensão quanto às dificuldades profissionais e acadêmicas apresentadas no decorrer desta pesquisa.

Ao professor Ronaldo, que sempre será um exemplo de dedicação à pesquisa e valorização dos profissionais da Engenharia Civil. A todos os funcionários e professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil (CMEC).

A minha mãe, que me auxiliou desde o início desta jornada, me ajudando de todas as formas que lhe fosse possível e aos familiares e amigos que indiretamente contribuíram.

Aos amigos Ariovaldo, David e Poliana, que demonstraram um grande companheirismo neste curso, e que proporcionaram momentos de alegria e descontração mediante as dificuldades apresentadas no decorrer da pesquisa. Agradeço também a Lara e Camila, que foram de fundamental importância na execução dos ensaios e aos colegas Elisandra e Eulher que contribuíram muito com sua experiência adquirida no mestrado.

Ao CNPq e a FUNAPE que contribuíram financeiramente com uma bolsa de estudos que foi de grande importância para que pudesse cursar o mestrado e realizar os ensaios experimentais.

A REALMIX pelo suporte à pesquisa com o fornecimento de concreto e ao Laboratório Carlos Campos Consultoria que executou os ensaios de caracterização do concreto.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	<i>IX</i>
LISTA DE TABELAS.....	<i>XVI</i>
LISTA DE SIGLAS.....	<i>XX</i>
LISTA DE SÍMBOLOS.....	<i>XXII</i>
RESUMO.....	<i>XXV</i>
ABSTRACT.....	<i>XXVI</i>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>01</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	01
1.2 - PAVIMENTO DE CONCRETO .....	02
1.2.1 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLES.....	03
1.3 - JUSTIFICATIVA.....	06
1.4 - OBJETIVOS DA PESQUISA .....	07
1.5 - ESTRUTURA DO TRABALHO .....	08
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>09</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>09</b>
2.1 - INTRODUÇÃO .....	09
2.1.1 – DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO .....	12
2.2 - DIMENSIONAMENTO DAS JUNTAS .....	16
2.3 - MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS NAS JUNTAS .....	20
2.4 - PESQUISAS SOBRE PAVIMENTOS .....	29
2.4.1 - RODRIGUES (2003) .....	29
2.4.2 - COSTA (2004) .....	30
2.4.3 - SILVA (2005).. .....	30
2.4.4 - TERTULIANO (2005).....	31
2.4.5 - FLEURY (2005).....	33
2.4.6 - OLIVEIRA (2008) .....	34
2.4.7 - RODRIGUES (2008) .....	38

2.4.8 - PESQUISAS INTERNACIONAIS.....	44
2.5 - CONCRETO AUTOADENSÁVEL .....	50
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>56</b>
<b>DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....</b>	<b>56</b>
3.1 - INTRODUÇÃO .....	56
3.2 - MODELO EXPERIMENTAL .....	56
3.2.1 - MATERIAIS .....	58
3.2.2 - INSTRUMENTAÇÃO.....	62
3.2.3 - CONSTRUÇÃO E PREPARAÇÃO DAS PLACAS .....	66
3.2.4 - ESQUEMA DE ENSAIO.....	68
3.2.4.1 – BASE DE BORRACHA.....	68
3.2.4.2 – APLICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA CARGA .....	70
3.2.5 - PREPARAÇÃO DO ENSAIO.....	72
3.2.6 - EXECUÇÃO DO ENSAIO.....	74
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>75</b>
<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1 - INTRODUÇÃO .....	75
4.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	75
4.2.1 - CONCRETO .....	75
4.2.2 - AÇO .....	76
4.2.3 – BASE DE BORRACHA .....	77
4.3 - RESULTADO DOS ENSAIOS DOS PAVIMENTOS .....	78
4.3.1 – FISSURAÇÃO.....	78
4.3.2 – MODOS DE RUPTURA.....	80
4.3.3 - CARGA ATUANTES.....	84
4.3.4 - CARGA X DESLOCAMENTO .....	85
4.3.5 – CARGA APLICADA X CARGA NA BASE.....	92
4.3.6 - CARGA X DEFORMAÇÃO NO AÇO.....	98
4.3.7 - CARGA X DEFORMAÇÃO NO CONCRETO.....	110
4.3.8 – CARGA X DESLOCAMENTO.....	111

<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>124</b>
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>124</b>
5.1 - INTRODUÇÃO .....	124
5.2 – CARGA DE FISSURAÇÃO, ESCOAMENTO E MÁXIMA DE TRANSFERÊNCIA .....	124
5.2.1 – CARGA DE FISSURAÇÃO ( $P_{fiss}$ ) .....	125
5.2.2 – CARGA DE ESCOAMENTO ( $P_y$ ) .....	126
5.2.2.1 – INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DA JUNTA SERRADA .....	129
5.2.3 – CARGA DE TRANSFERÊNCIA ( $P_{trans}$ ) .....	132
5.3 – RELAÇÕES ENTRE OS PAVIMENTOS.....	133
5.3.1 – EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DA JUNTA.....	133
5.3.2 – EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA REAÇÃO NA BASE.....	137
5.3.3 – CARGA X DEFORMAÇÃO NAS BARRAS.....	138
5.3.4 – DESLOCAMENTO VERTICAL DA JUNTA.....	142
5.3.5 – DESLOCAMENTO VERTICAL DO PAVIMENTO.....	145
5.3.6 – CARGA X DEFORMAÇÃO NO CONCRETO.....	150
5.3.7 – REAÇÕES NA CAMADA DE BORRACHA.....	150
 <b>CAPÍTULO 6.....</b>	 <b>165</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>165</b>
6.1 - INTRODUÇÃO .....	165
6.2 – CONCLUSÕES.....	165
6.3 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	168
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>169</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>173</b>
<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>173</b>
A.1 - DESLOCAMENTO VERTICAL E EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO .....	173
A.2 - CÉLULAS NA BASE DE BORRACHA E EFICIÊNCIA EM FUNÇÃO DA REAÇÃO NA BASE .....	185

A.3 - LEITURA NOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA NO AÇO.....	197
A.4 - LEITURA NOS EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA NO CONCRETO.....	209
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>222</b>
<b>DEMAIS GRÁFICOS.....</b>	<b>222</b>
B.1 - CARGA X DEFORMAÇÃO NO CONCRETO.....	222

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição dos carregamentos nos pavimentos (Fonte: <a href="http://www.pavement.com">www.pavement.com</a> ) .....	01
Figura 1.2 - Mecanismo de funcionamento do pavimento de concreto simples (Fonte: Revista <i>Téchne</i> 2005).....	03
Figura 1.3 – Patologia no pavimento por não utilização da barra de transferência (Fonte: Revista <i>Téchne</i> 2005).....	04
Figura 1.4 – Operário posicionando as chapas na junta do pavimento (Fonte: Walker & Holland 1998).....	05
Figura 1.5 – Chapa tipo retangular (Fonte: Walker & Holland 1998).....	05
Figura 1.6 – Chapa tipo diamante (Fonte: Walker & Holland 1998).....	06
Figura 2.1 – Pavimento de concreto protendido com disposição das cordoalhas engraxadas. (Fonte: <a href="http://www.pisosindustriais.com.br">http://www.pisosindustriais.com.br</a> ).....	09
Figura 2.2 – Fibras utilizadas em pavimentos. (a) Sintética. (b) Metálica. (Fonte: <a href="http://www.portaldoconcreto.com.br/index.php?pagina=fibra">http://www.portaldoconcreto.com.br/index.php?pagina=fibra</a> ).....	10
Figura 2.3 – Pavimento com concreto compactado com rolo. (Fonte: <a href="http://www.portaldoconcreto.com.br/index.php?pagina=rolados">http://www.portaldoconcreto.com.br/index.php?pagina=rolados</a> ).....	11
Figura 2.4 – Sistema <i>Whitetopping</i> . (Fonte: <a href="http://www.whitetopping.com/Construction/construction_placement.asp">http://www.whitetopping.com/Construction/construction_placement.asp</a> ). ....	11
Figura 2.5 – Elementos que compõem a base de um pavimento de concreto. (Fonte: Soluções Belgo – Pavimento de Concreto Armado).....	12
Figura 2.6 – Classificação dos materiais utilizados no melhoramento da sub-base. (Fonte: DNIT 2006).....	14
Figura 2.7 – Comportamento do pavimento em diferentes condições climáticas.....	15
Figura 2.8 – Juntas de contração. (a) Transferência de esforços unicamente pelo intertravamento dos agregados. (b) Transferência de esforços pelas barras de aço (Fonte: Huang 1993).....	17
Figura 2.9 – Junta de expansão (Fonte: Huang 1993).....	18
Figura 2.10 – Junta tipo macho-fêmea. (Fonte: Huang 1993).....	19
Figura 2.11 – Tipos de elementos de transferência de esforços. (a) Barra com seção circular. (b) Barra com seção quadrada. (Fonte: Oliveira 2008).....	21

Figura 2.12 – Tipos de elementos de transferência de esforços. (a) Chapa com formato retangular. (b) Chapa com formato circular (disco metálico). (Fontes: Oliveira 2008, Rodrigues 2008).....	21
Figura 2.13 – Deformação da barra de transferência sob carregamento (Fonte: Huang 1993).....	27
Figura 2.14 – Transferência de carga na junta (Fonte: Huang 1993).....	28
Figura 2.15 – Posição dos esforços de cisalhamento máximo e mínimo (Fonte: Huang 1993).....	29
Figura 2.16 - Vista superior do ensaio da camada de borracha. Fonte: Oliveira (2008).....	36
Figura 2.17 - Gráfico da tensão x deslocamento para obtenção do coeficiente de recalque. Fonte: Fleury (2005) e Oliveira (2008).....	36
Figura 2.18 – Durômetro da marca <i>Shore</i> “A”. (Fonte: Rodrigues 2008).....	40
Figura 2.19 – Gráfico da Dureza X Amostra. (Fonte: Rodrigues 2008).....	41
Figura 2.20 – Ensaio de deformação permanente à compressão sobre deformação constante e compressão. (Fonte: Rodrigues 2008).....	42
Figura 2.21 – Relação entre a deflexão e o diâmetro das barras. (Fonte: Teller e Cashfl 1958).....	46
Figura 2.22 – Relação entre a deflexão e o comprimento da barra. (Fonte: Teller e Cashfl 1958).....	47
Figura 2.23 – Relação entre a deflexão da barra e a largura da abertura da junta. (Fonte: Teller e Cashfl 1958).....	48
Figura 2.24 – Concretagem com concreto convencional. (Fonte: Nunes 2001).....	51
Figura 2.25 – Concretagem com concreto autoadensável. (Fonte: The European Guidelines for Self Compacting Concrete 2005).....	51
Figura 2.26 – Utilização do concreto autoadensável em estruturas pré-moldadas. (Fonte: The European Guidelines for Self Compacting Concrete 2005).....	52
Figura 3.1 – Dimensões das peças ensaiadas (unidades em milímetros).....	57
Figura 3.2 – Identificação das peças ensaiadas.....	58
Figura 3.3 – Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos.....	60
Figura 3.4 – Ensaio de Trabalhabilidade. (a) Espalhamento do tronco de cone. (b) Fluidez. (c) Caixa L.....	60
Figura 3.5 – Ensaio do abatimento do tronco de cone.....	61
Figura 3.6 – Posição dos deflectômetros e dos LVDTs (unidades em milímetros).....	62

Figura 3.7 – Deflectômetro digital da marca Mitutoyo.....	63
Figura 3.8 – LVDT.....	63
Figura 3.9 – (a) Extensômetros elétricos de resistência para o aço. (b) Extensômetros elétricos de resistência para o concreto. (c) Sistema de aquisição de dados.....	63
Figura 3.10 – Posição dos extensômetros elétricos de resistência na barra de aço (unidades em centímetros).....	64
Figura 3.11 – Barras de aço após instrumentação.....	65
Figura 3.12 – Esquema do posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência na placa de concreto (unidades em milímetros).....	65
Figura 3.13 – Extensômetros elétricos de resistência posicionados na placa de concreto..	66
Figura 3.14 – Formas preparadas para a concretagem.....	66
Figura 3.15 – Momento da concretagem das placas.....	67
Figura 3.16 – Momento de corte da junta.....	67
Figura 3.17 – Células posicionadas na base de borracha.....	68
Figura 3.18 – Posição das células de carga na base de borracha (unidades em milímetros).....	69
Figura 3.19 – Células de carga posicionadas na base de borracha.....	69
Figura 3.20 – Células de carga posicionada entre o atuador e a viga de reação.....	70
Figura 3.21 – Esquema de ensaio (vista lateral).....	71
Figura 3.22 – Esquema de ensaio (vista frontal).....	71
Figura 3.23 – Viga de reação atirantada.....	72
Figura 3.24 – Esquema de ensaio montado.....	72
Figura 3.25 – (a) Argamassa espalhada na base. (b) Placa posicionada para a instrumentação.....	73
Figura 3.26 – Ensaio montado.....	74
Figura 4.1 – Tensão x deformação da barra de transferência. Fonte: Fleury (2005).....	77
Figura 4.2 – Estágios de evolução da fissura na região da junta do pavimento P-CA-B-16-50.....	78
Figura 4.3 – Forma convencional de fissuração. (Vista lateral do pavimento).....	79
Figura 4.4 – Forma de fissuração dos pavimentos P-CA-B-10-20 e P-CA-B-16-20. (a) Vista lateral do pavimento. (b) Vista em planta do pavimento.....	79
Figura 4.5 – Comportamento do pavimento quando submetido ao carregamento.....	80

Figura 4.6 – Esmagamento do concreto na região da junta.....	81
Figura 4.7 – Ruptura por separação das placas.....	81
Figura 4.8 – Carga X Deslocamento P-CA-SB.....	86
Figura 4.9 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-20.....	87
Figura 4.10 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-30.....	87
Figura 4.11 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-40.....	88
Figura 4.12 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-50.....	88
Figura 4.13 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-20.....	89
Figura 4.14 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-30.....	89
Figura 4.15 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-40.....	90
Figura 4.16 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-50.....	90
Figura 4.17 – Carga X Deslocamento P-CC-B-10-40.....	91
Figura 4.18 – Carga X Deslocamento P-CC-B-10-50.....	91
Figura 4.19 - Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-SB.....	93
Figura 4.20 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-10-20.....	93
Figura 4.21 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-10-30.....	94
Figura 4.22 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-10-40.....	94
Figura 4.23 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-10-50.....	95
Figura 4.24 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-16-20.....	95
Figura 4.25 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-16-30.....	96
Figura 4.26 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-16-40.....	96
Figura 4.27 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CA-B-16-50.....	97
Figura 4.28 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CC-B-10-40.....	97
Figura 4.29 – Carga Aplicada X Carga na Base P-CC-B-10-50.....	98
Figura 4.30 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-10-20.....	99
Figura 4.31 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-10-20.....	100
Figura 4.32 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-10-30.....	100
Figura 4.33 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-10-30.....	101
Figura 4.34 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-10-40.....	101
Figura 4.35 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-10-40.....	102
Figura 4.36 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-10-50.....	102
Figura 4.37 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-10-50.....	103
Figura 4.38 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-16-20.....	103

Figura 4.39 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-16-20.....	104
Figura 4.40 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-16-30.....	104
Figura 4.41 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-16-30.....	105
Figura 4.42 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-16-40.....	105
Figura 4.43 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-16-40.....	106
Figura 4.44 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CA-B-16-50.....	106
Figura 4.45 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CA-B-16-50.....	107
Figura 4.46 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CC-B-10-40.....	107
Figura 4.47 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CC-B-10-40.....	108
Figura 4.48 – Carga X Deformação no Aço da barra 1 do P-CC-B-10-50.....	108
Figura 4.49 – Carga X Deformação no Aço da barra 2 do P-CC-B-10-50.....	109
Figura 4.50 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-16-40.....	111
Figura 4.51 – Posição dos deflectômetros (unidades em milímetros).....	112
Figura 4.52 – Carga X Deslocamento P-CA-SB.....	113
Figura 4.53 – Carga X Deslocamento P-CA-SB. (Anterior à fissuração).....	113
Figura 4.54 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-20.....	114
Figura 4.55 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-20. (Anterior à fissuração).....	114
Figura 4.56 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-30.....	115
Figura 4.57 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-30. (Anterior à fissuração).....	115
Figura 4.58 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-40.....	116
Figura 4.59 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-40. (Anterior à fissuração).....	116
Figura 4.60 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-50.....	117
Figura 4.61 – Carga X Deslocamento P-CA-B-10-50. (Anterior à fissuração).....	117
Figura 4.62 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-20.....	118
Figura 4.63 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-20. (Anterior à fissuração).....	118
Figura 4.64 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-30.....	119
Figura 4.65 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-30. (Anterior à fissuração).....	119
Figura 4.66 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-40.....	120
Figura 4.67 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-40. (Anterior à fissuração).....	120
Figura 4.68 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-50.....	121
Figura 4.69 – Carga X Deslocamento P-CA-B-16-50. (Anterior à fissuração).....	121
Figura 4.70 – Carga X Deslocamento P-CC-B-10-40.....	122
Figura 4.71 - Carga X Deslocamento P-CC-B-10-40. (Anterior à fissuração).....	122

Figura 4.72 – Carga X Deslocamento P-CC-B-10-50.....	123
Figura 4.73 – Carga X Deslocamento P-CC-B-10-50. (Anterior à fissuração).....	123
Figura 5.1 – Deformação do aço para o pavimento P-CC-B-10-40.....	126
Figura 5.2 – Deformação do aço para o pavimento P-CA-B-16-40.....	127
Figura 5.3 – Distribuição de tensões na seção da junta transversal: (a) Corte esquemático da junta serrada; (b) Tensões atuantes com aderência parcial entre a barra e o concreto; (c) Tensões atuantes com aderência entre a barra e o concreto. Fonte: Oliveira (2008).....	130
Figura 5.4 – Carga X Deformação no Aço P-CA-B-16-50 e P-CC-B-10-40.....	131
Figura 5.5 – Eficiência das peças confeccionadas com concreto autoadensável.....	134
Figura 5.6 – Eficiência das peças confeccionadas com concreto convencional.....	135
Figura 5.7 – Comparação entre a eficiência das peças confeccionadas com diferentes tipos de concreto.....	136
Figura 5.8 – Eficiência das peças confeccionadas com concreto autoadensável.....	138
Figura 5.9 – Gráfico da Deformação X Comprimento da barra (10 mm).....	140
Figura 5.10 – Gráfico da Deformação X Comprimento da barra (16 mm).....	141
Figura 5.11 – Gráfico comparativo da relação $(P/P_{trans})$ x Deslocamento ( $d_L$ ) para os dois tipos de concreto.....	142
Figura 5.12 – Gráfico comparativo da relação $(P/P_{trans})$ x Deslocamento ( $d_L$ ) para diferentes comprimentos de barras de 10 mm.....	143
Figura 5.13 – Gráfico comparativo da relação $(P/P_{trans})$ x Deslocamento ( $d_L$ ) para diferentes comprimentos de barras de 16 mm.....	144
Figura 5.14 – Gráfico comparativo da relação $(P/P_{trans})$ x Deslocamento ( $d_L$ ) para diferentes diâmetros de barras.....	145
Figura 5.15 – Comprimento L para os resultados experimentais. Fonte: Fleury 2005.....	152
Figura 5.16 – Semelhança de triângulos para cálculo de $L_L$ e $L_u$ .....	152
Figura 5.17 – Forças atuantes levando em consideração a disposição triangular. Fonte: Rodrigues 2008.....	153
Figura 5.18 – Forças atuantes levando em consideração a disposição parabólica. Fonte: Rodrigues 2008.....	155
Figura 5.19 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-SB.....	156
Figura 5.20 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-10-20.....	156
Figura 5.21 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-10-30.....	157
Figura 5.22 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-10-40.....	157

Figura 5.23 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-10-50.....	158
Figura 5.24 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-16-20.....	158
Figura 5.25 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-16-30.....	159
Figura 5.26 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-16-40.....	159
Figura 5.27 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CA-S-16-50.....	160
Figura 5.28 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CC-S-10-40.....	160
Figura 5.29 – Gráfico $R_u$ Teórico x $R_u$ Experimental – P-CC-S-10-50.....	161
Figura B.1 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-SB.....	222
Figura B.2 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-10-20.....	223
Figura B.3 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-10-30.....	223
Figura B.4 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-10-40.....	224
Figura B.5 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-10-50.....	224
Figura B.6 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-16-20.....	225
Figura B.7 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-16-30.....	225
Figura B.8 – Carga X Deformação no Concreto do P-CA-B-16-50.....	226
Figura B.9 – Carga X Deformação no Concreto do P-CC-B-10-40.....	226
Figura B.10 – Carga X Deformação no Concreto do P-CC-B-10-50.....	227

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correlação entre valores de CBR e k do subleito.....	13
Tabela 2.2 – Adequação do diâmetro da barra com a espessura do pavimento.....	24
Tabela 2.3 – Recomendações de diâmetros e comprimentos para barras de transferência.....	25
Tabela 2.4 – Características das placas ensaiadas (Silva 2005).....	31
Tabela 2.5 – Características das placas ensaiadas (Tertuliano 2005).....	32
Tabela 2.6 – Características das peças ensaiadas (Fleury 2005).....	33
Tabela 2.7 – Características das peças ensaiadas (Oliveira 2008).....	35
Tabela 2.8 – Variáveis adotadas na pesquisa (Rodrigues 2008).....	39
Tabela 2.9 – Variáveis adotadas por Teller e Cashfl.....	44
Tabela 3.1 – Características das peças ensaiadas.....	58
Tabela 3.2 – Traço do concreto Autoadensável.....	59
Tabela 3.3 – Traço do concreto Convencional.....	59
Tabela 4.1 – Caracterização do concreto Autoadensável (corpo-de-prova cilíndrico).....	75
Tabela 4.2 – Caracterização do concreto Convencional (corpo-de-prova cilíndrico).....	76
Tabela 4.3 – Caracterização do concreto Autoadensável (corpo-de-prova prismático).....	76
Tabela 4.4 – Caracterização do concreto Convencional (corpo-de-prova prismático).....	76
Tabela 4.5 – Critérios de parada dos ensaios e modo de ruptura.....	84
Tabela 4.6 – Comportamento das peças ensaiadas.....	85
Tabela 4.7 – Deformações máximas do aço.....	110
Tabela 5.1 – Comparação entre as cargas das peças ensaiadas.....	124
Tabela 5.2 – Deslocamentos verticais da extremidade dos pavimentos para as três cargas de referência (Lado carregado).....	146
Tabela 5.3 – Deslocamentos verticais da extremidade dos pavimentos para as três cargas de referência (Lado não carregado).....	147
Tabela 5.4 – Deslocamentos verticais da extremidade dos pavimentos para as três cargas de referência para diferentes comprimentos de barras (diâmetro 10 mm).....	148
Tabela 5.5 – Deslocamentos verticais da extremidade dos pavimentos para as três cargas de referência para diferentes comprimentos de barras (diâmetro 16 mm).....	148
Tabela 5.6 – Deslocamentos verticais da extremidade dos pavimentos para as três cargas de referência para diferentes tipos de concreto.....	149

Tabela 5.7 – Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado para uma carga de 75kN.....	162
Tabela 5.8 – Resultantes teóricas e experimentais atuantes no lado não carregado para uma carga de 165kN.....	162
Tabela A.1 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-SB (30/05/2008).....	173
Tabela A.2 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-10-20 (03/06/2008).....	174
Tabela A.3 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-10-30 (09/06/2008).....	175
Tabela A.4 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-10-40 (12/06/2008).....	176
Tabela A.5 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-10-50 (16/06/2008).....	177
Tabela A.6 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-16-20 (19/06/2008).....	178
Tabela A.7 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-16-30 (23/06/2008).....	179
Tabela A.8 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-16-40 (26/06/2008).....	180
Tabela A.9 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CA-B-16-50 (29/06/2008).....	181
Tabela A.10 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CC-B-10-40 (15/09/2008).....	183
Tabela A.11 – Leitura dos deflectômetros e eficiência na peça P-CC-B-10-50 (08/09/2008).....	184
Tabela A.12 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-SB.....	185
Tabela A.13 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-10-20.....	186
Tabela A.14 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-10-30.....	187
Tabela A.15 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-10-40.....	188
Tabela A.16 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-10-50.....	189
Tabela A.17 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-16-20.....	190
Tabela A.18 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-16-30.....	191
Tabela A.19 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-16-40.....	192

Tabela A.20 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CA-B-16-50.....	193
Tabela A.21 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CC-B-10-40.....	195
Tabela A.22 – Leitura das células de carga e eficiência na peça P-CC-B-10-50.....	196
Tabela A.23 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-10-20.....	197
Tabela A.24 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-10-30.....	198
Tabela A.25 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-10-40.....	200
Tabela A.26 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-10-50.....	201
Tabela A.27 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-16-20.....	202
Tabela A.28 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-16-30.....	203
Tabela A.29 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-16-40.....	204
Tabela A.30 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CA-B-16-50.....	205
Tabela A.31 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CC-B-10-40.....	207
Tabela A.32 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no aço na peça P-CC-B-10-50.....	208
Tabela A.33 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-SB .....	209
Tabela A.34 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-10-20.....	210
Tabela A.35 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-10-30.....	211
Tabela A.36 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-10-40.....	212
Tabela A.37 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-10-50.....	214

Tabela A.38 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-16-20.....	215
Tabela A.39 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-16-30.....	216
Tabela A.40 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-16-40.....	217
Tabela A.41 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CA-B-16-50.....	218
Tabela A.42 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CC-B-10-40.....	219
Tabela A.43 – Leitura dos extensômetros elétricos de resistência no concreto na peça P-CC-B-10-50.....	220

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Association
ACPA	American Concrete Pavement Association
ASTM	American Society for Testing Materials
B	Presença de barra de transferência no pavimento
BT	Barra de transferência
CBR	Índice de Suporte Califórnia
C	Célula de carga posicionada na base de borracha
CA	Concreto Autoadensável
CC	Concreto Convencional
CP	Cimento Portland
CP	Corpo de Prova
D	Deflectômetro
DER	Departamento de Estradas e Rodagens
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EEC	Escola de Engenharia Civil
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ISCP	International Society for Concrete Pavements
JS	Junta Serrada
LN	Linha Neutra
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PCA	Portland Cement Association
P	Pavimento
SB	Ausência de barra de transferência no pavimento

UFG            Universidade Federal de Goiás  
UNICAMP      Universidade Estadual de Campinas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{2,3}$	Área da célula de maior diâmetro, C2 ou C3
$A_{1,4}$	Área da célula de menor diâmetro, C1 ou C4
$a/c$	Relação água cimento
$\beta$	Rigidez relativa da barra dentro do concreto
$C_c$	Tensão de compressão no concreto
$C_s$	Tensão de compressão no aço
$c$	Constante referente à forma de distribuição da reação
$C'_{1,4}$	Carga corrigida na célula C1 ou C4
$C_{1,4}$	Carga obtida na leitura da célula C1 ou C4
$C_L$	Resultante da soma das cargas nas células C1 e C2
$C_u$	Resultante da soma das cargas nas células C3 e C4
$D_i$	Dureza inicial dos lençóis de borracha
$D_f$	Dureza final dos lençóis de borracha
$d$	Diâmetro da barra
$d$	Deslocamento vertical do pavimento
$d_L$	Deslocamento da junta no lado carregado
$d_u$	Deslocamento da junta no lado não carregado
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto
$E$	Extensômetro elétricos de resistência posicionado na barra de transferência
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias
$E$	Eficiência da junta
$E_d$	Módulo de elasticidade do aço
$\epsilon_y$	Deformação de escoamento do aço
$\epsilon_{s-máx}$	Máxima deformação do aço obtida no ensaio
$F$	Força aplicada no ensaio
$f_b$	Tensão de suporte
$f_c$	Resistência média à compressão do concreto
$f_{c28}$	Resistência média à compressão do concreto aos 28 dias
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ct}$	Resistência média à tração por compressão diametral
$f_{ct28}$	Resistência média à tração por compressão diametral aos 28 dias

$f_{if}$	Resistência à tração na flexão
$f_{if28}$	Resistência à tração na flexão aos 28 dias
$h$	Espessura da placa de concreto
$I_d$	Momento de inércia da barra
$L$	Comprimento da barra de transferência
$L_L$	Comprimento do apoio da placa na base de borracha para o lado carregado
$L_u$	Comprimento do apoio da placa na base de borracha para o lado não carregado
$\ell$	Rio de rigidez relativo
$K$	Módulo de suporte da barra
$k$	Coefficiente de recalque da fundação ou módulo de reação
$P$	Pressão transmitida ao subleito
$P$	Carregamento aplicado no ensaio
$P_t$	Carregamento em uma barra
$P_{fiss}$	Carga de fissuração
$P_{fiss (P-CA-SB)}$	Carga de fissuração no pavimento sem barra de transferência
$P_y$	Carga de escoamento
$P_{máx}$	Carga máxima do ensaio
$P_{trans}$	Carga máxima de transferência
$P_{trans (P-CA-SB)}$	Carga máxima de transferência no pavimento sem barra de transferência
$q$	Reação da fundação
$q_L$	Resultante triangular ou parabólica da fundação no lado carregado da placa
$q_u$	Resultante triangular ou parabólica da fundação no lado não carregado da placa
$R^1_{L,teo}$	Resultante teórica do método triangular no lado carregado
$R^1_{u,teo}$	Resultante teórica do método triangular no lado não carregado
$R^2_{L,teo}$	Resultante teórica do método parabólico no lado carregado
$R^2_{u,teo}$	Resultante teórica do método parabólico no lado não carregado
$R_{L,exp}$	Resultante experimental do lado carregado
$R_{u,exp}$	Resultante experimental do lado não carregado
$T_c$	Tensão de tração no concreto
$T_s$	Tensão de tração no aço
$\sigma_b$	Tensão de suporte

$\sigma$	Tensão de escoamento do aço
$\nu$	Coefficiente de Poisson do concreto
$\varnothing$	Diâmetro da barra de transferência
$\theta$	Ângulo de rotação da placa
$Y_0$	Deformação da barra
$w$	Deslocamento vertical da área carregada
$w$	Carregamento aplicado na junta do pavimento
$z$	Largura da junta

## RESUMO

A utilização de pavimentos de concreto simples em rodovias mostra-se como uma valiosa alternativa na obtenção de um pavimento com grande durabilidade e pouca manutenção. Esse tipo de pavimento tem o seu desempenho comprometido com o surgimento de fissuras, principalmente quando as mesmas se apresentam em sua junta, região de maior vulnerabilidade do pavimento de concreto. Dessa forma este trabalho apresenta um estudo da eficiência da junta serrada em pavimentos de concreto simples onde foram ensaiadas onze peças cujas variáveis foram: comprimento da barra de transferência (200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm), diâmetro da barra de transferência (10 mm e 16 mm) e tipo de concreto (convencional e autoadensável). Os ensaios foram realizados com o posicionamento das peças de concreto sobre uma base composta de placas de borracha e aplicada uma carga estática distribuída em um lado da junta por toda sua extensão, sendo interrompido o carregamento somente após a ruptura da peça. Os resultados da pesquisa mostraram que: a utilização de barras de transferência contribui significativamente para a eficiência do pavimento e com o aumento do comprimento e do diâmetro da barra, ocorre uma melhora na eficiência; barras de 10 mm de diâmetro não são compatíveis com pavimentos de concreto de 120mm de espessura, mas as barras de 16 mm apresentam bom desempenho nessa espessura; a utilização de comprimentos reduzidos de barras abaixo de 400 mm não é recomendada; peças de concreto convencional apresentam um melhor desempenho nas juntas, provavelmente em função do melhor intertravamento dos agregados que o concreto convencional desta pesquisa apresentou, quando comparado ao concreto autoadensável; barras de aço de comprimento reduzido não atingem o escoamento, caracterizando uma não utilização completa do aço pois a transferência de esforços foi cessada sem o aço da barra de transferência escoar.

Palavras-chave: Pavimento rígido, concreto autoadensável, eficiência da junta, barra de transferência curta.

## ABSTRACT

The use of concrete pavements in highways is a valuable alternative to obtain a surface with high durability and low maintenance. This type of pavement has the performance compromised by fissures, especially when they occur in the joint with greater vulnerability of the concrete pavement. This work presents a study of the effectiveness of sawed joints in concrete pavements where eleven plates were tested until failure. The variables were: length of circular dowels (200 mm, 300 mm, 400 mm and 500 mm), dowel diameter (10 mm and 16 mm) and type of concrete (conventional and self-compacting). The tests were performed on the concrete plates supported on a base composed of sheets of rubber. A line load was placed on one side of the joint. The test results showed that the use of transfer dowels contributes significantly to the efficiency of the concrete pavements and increasing the length and the diameter of the circular dowels improves efficiency; 10 mm diameter dowels are not compatible with 120 mm thick concrete pavements, but 16 mm dowels bars present good performance; the use of reduced dowel bar lengths below 40 mm is not recommended; pavements with conventional concrete have better performance in the joints due to better aggregate interlocking than the conventional concrete of this search present, when compared the self-compacting concrete; dowels bars with reduced length did not reach yielding, characterizing an incomplete use of steel dowels because the transfer energy its over before the yielding of steel dowels.

Keywords: Rigid pavements, concrete self-compacting, joint efficiency, reduced circular dowel length.