

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**“Comportamento Estrutural de Lajes Pré-Moldadas
Treliçadas com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu”**

JOÃO VICTOR FAZZAN

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
Coorientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Ilha Solteira – SP
Agosto/2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

F287c	Fazzan, João Victor. Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu / João Victor Fazzan. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011 169 f. : il. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área do Conhecimento: Estrutura, 2011 Orientador: Jorge Luís Akasaki Co-orientador: José Luiz Pinheiro Melges Inclui bibliografia 1. Concreto armado. 2. Laje pré-moldada. 3. Resíduo de borracha de pneu. 4. Comportamento estrutural.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ-MOLDADAS TRELIÇADAS COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEU

AUTOR: JOÃO VICTOR FAZZAN

ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA
CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:



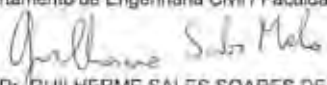
Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. HAROLD DE MAYO BERNARDES

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. BUILHERME SALES SOARES DE AZEVEDO MELO

Departamento de Engenharia Civil / Universidade de Brasília

Data da realização: 22 de agosto de 2011.

*Dedico este trabalho aos meus pais
Lazaro e Ortencia e aos meus irmãos
Zenaide, Alice, Ana, Carlos e Marcos,
pelo incentivo e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esta conquista na minha vida, e por Ele estar sempre à minha frente, conduzindo e iluminando os meus passos. A cada dia reconheço que Tu és o meu maior mestre!

À minha família, por me mostrar que o saber é algo mais que precioso, e por estar sempre ao meu lado para suprir as ausências e ansiedades. Em especial aos meus pais e irmãos, ao qual dedico este trabalho, e também aos cunhados e sobrinhos: Eloísa, Jair, Joceli, Kátia, Ana Laura, João Marcos, José Felipe, Maria Tereza e Luíz Fernando.

Aos meus amigos Bernadete, Daniela, Fabiana, Geferson, Janete, Sonia e Susi e aos amigos do Grupo de Oração e do GOU, que também acreditaram na realização deste projeto.

Também sou eternamente grato ao meu Orientador Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki e ao meu Coorientador José Luiz Pinheiro Melges, que me levaram a entender o quão importante se faz trabalhar com seriedade e competência, além da amizade e profissionalismo compartilhados. Agradeço pelas valiosas contribuições, o que permitiu ampliar meus conhecimentos em materiais de construção civil e estruturas.

Faço meu agradecimento ao professor Jefferson Sidney Camacho, que proporcionou a utilização da estrutura do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – NEPAE. Também aos professores Flávio Sato e Wilson José da Silva, pelos ensinamentos transmitidos para operação do Sistema de Aquisição de Dados, e ao funcionário e colega “Gugu”.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudo.

À empresa Holcim Brasil, pela doação do cimento CPV-ARI Plus utilizado na pesquisa. À empresa REGIGANT – Recuperadora de Pneus Gigantes Ltda, pela doação dos resíduos de borracha de pneu e à Sika do Brasil, pelo fornecimento do aditivo superplastificante.

Ao Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida, pelo fornecimento do agregado miúdo, e à Pedreira Três Fronteiras, pelo fornecimento do agregado graúdo.

À empresa Lajes Artcon, em nome do professor Antonio Anderson da Silva Segantini, pelo fornecimento das lajotas cerâmicas, armações treliçadas e fôrma para concretagem das sapatas das vigotas.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em especial ao engenheiro Flávio Moreira Salles, que colocou à disposição a utilização de equipamentos e apoio técnico necessários para a realização dos ensaios experimentais. Deixo também meus agradecimentos aos funcionários Bertoluci, Branco, Euclides, Flávio, Francisco, Gilmar, Joaquim, Jorge, Lana, Michelin, Sérgio, e Sumie, pelas contribuições nas dosagens de concreto. Aos funcionários Anderson e Pascoalín, pelos ensaios realizados com as armaduras e, por fim, aos funcionários Lourival e Jair, pela competência e disposição para a colagem dos extensômetros das armaduras.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista Cavassano, Gilson, Mário e Ronaldo, pela amizade, apoio e disposição para a realização da montagem e ruptura dos modelos de lajes. Em especial também ao funcionário Gilberto, do Departamento de Física da Universidade Estadual Paulista, pela colagem dos extensômetros no concreto.

Agradeço em especial aos colegas de iniciação científica André, Fernando e Tiago, por ter acompanhado e auxiliado todo o processo de montagem e ruptura dos modelos. Aos colegas de mestrado Angélica, Ederson, Felipe, Rodrigo Francisco, Rodrigo Manera, e aos colegas de iniciação científica Adriana, Diego, Juliana, Leandro, Rodolfo, Rogério, Taís e Vinícius.

Por fim, quero deixar meus agradecimentos aos colegas Ana Paula e Marcos, que contribuíram valiosamente na concepção inicial deste projeto.

*“O verbo de Deus nos céus é fonte de
sabedoria, seus caminhos são os
mandamentos eternos.”*

Eclesiástico 1,5

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2011.

RESUMO

O uso do concreto na elaboração de estruturas de concreto armado está ligado à capacidade das mesmas em resistir aos esforços solicitantes, por meio da aderência que existe entre os materiais aço e concreto. Considerando-se que a maioria dos concretos à base de cimento apresenta uma pequena resistência à tração, se comparada à compressão, algumas alternativas para melhorar o seu comportamento em relação a esse aspecto vem sendo estudadas com sucesso, como, por exemplo, a adição de diversos tipos de fibras. Em outro contexto, a incorporação de resíduos no concreto surge como uma possibilidade para se atenuar impactos ambientais. Um exemplo desses resíduos é o de borracha de pneu, gerado em abundância durante o processo de recauchutagem. Observa-se, no entanto, que a inclusão desse resíduo pode provocar uma diminuição da resistência e do módulo de deformação longitudinal. Atualmente, em muitos casos, a utilização de lajes treliçadas têm sido mais vantajosa que o uso de lajes maciças, tanto do ponto de vista de execução, como do ponto de vista econômico. Para as situações de pequenos e médios vãos, e para cargas não muito elevadas, é possível que as lajes treliçadas não tenham o seu desempenho estrutural muito prejudicado em função da incorporação da borracha no concreto, uma vez que a limitação de sua capacidade resistente não seria dada pelo esmagamento do concreto mas sim pelo alongamento excessivo da armadura. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo a utilização de resíduos de borracha em substituição parcial dos agregados do concreto que compõem a capa e as vigotas de lajes pré-fabricadas treliçadas unidirecionais. No total, foram ensaiados seis modelos, sendo três deles sem adição de borracha e os outros três com substituição de 10% do volume de areia por resíduo. Os modelos de lajes foram instrumentados e ensaiados à flexão aos 28 dias de idade, sendo registrados os deslocamentos verticais, as deformações no concreto e no aço, os padrões de fissuração e os modos de ruptura, permitindo a avaliação do comportamento estrutural dos dois tipos de lajes quando submetidas às solicitações últimas e de serviço.

Palavras-chave: Concreto armado. Laje pré-moldada treliçada. Resíduo de borracha de pneu. Comportamento estrutural.

FAZZAN, J. V. **Structural behavior of lattice joist precast slabs with tire rubber residue addition**. 2011. 169 f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2011.

ABSTRACT

The use of concrete in the manufacture of reinforced concrete structures is related to the ability of this material to resist the loads by the bond that exists between the reinforcement and the concrete. Considering that most of the cement-based concrete has a small tensile strength when compared to compression, some alternatives to improve their behavior in relation to this aspect has been studied successfully, as the addition of several types of fibers, for example. In another context, the incorporation of residues in the concrete emerges as a possibility of attenuating the environment impacts. An example is the tire rubber residue, generated in abundance during the retreading process; however, it is noted that the inclusion of this residue can cause a decrease in the compressive strength and in the module of elasticity. Currently, in many cases, the use of lattice slabs is more advantageous than the use of solid slabs, both in terms of execution, as the economic point of view. For small and medium spans, and for not high loads, it is possible that lattice slabs do not present a bad performance due to the incorporation of rubber into concrete since the limitation of its strength capacity would not be given by the concrete crushing but by the excessive reinforcement strain. Therefore, this work aims to use rubber tire residue as an aggregate in the concrete of the cover and in the concrete of the joist of the lattice precast unidirectional slabs. The residue partially replaced the fine aggregate. In total, six models were tested, being three of them without the rubber addition and the other three with replacement of 10% in the volume of sand per residue. The models were instrumented and tested for flexure at 28 days old, and the vertical displacements, the strains in concrete and in the reinforcement were recorded. The cracking patterns and modes of rupture were also observed, allowing the evaluation of the structural behavior of the two types of slabs when subjected to the Serviceability Limit State and to the Ultimate Limit State.

Keywords: Reinforced concrete. Lattice joist precast slabs. Tire rubber residue. Structural behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vigota pré-moldada treliçada	23
Figura 2.2 - Seção transversal de laje pré-moldada treliçada.....	23
Figura 2.3 – Corte transversal e vista geral de treliça simples	24
Figura 2.4 – Lajes com vigotas pré-moldadas treliçadas.	25
Figura 2.5 – Lajota cerâmica e de poliestireno (isopor).....	26
Figura 2.6 – Execução da capa de concreto de uma laje pré-moldada	27
Figura 2.7 – Seção transversal de lajes pré-moldadas treliçadas.....	28
Figura 2.8 – Dimensionamento das Nervuras – Mesa comprimida e tracionada.....	29
Figura 2.9 – Seção transversal “T” (seção bruta, Estádio I)	30
Figura 2.10 – Seção transversal em forma de “T”, no Estádio II puro	31
Figura 2.11 – Viga de concreto simplesmente apoiada sob ações de serviço.....	32
Figura 2.12 – Ciclo de destinação do pneu.	36
Figura 2.13 – Processo de redução do pneu	37
Figura 2.14 – Relação entre Tensão e Deformação para diferentes conteúdos de borracha....	41
Figura 2.15 – Relação entre resistência à compressão e a relação (água + volume de borracha/cimento).....	44
Figura 2.16 – Perda de massa por ataque químico	45
Figura 2.17 – Seção transversal dos modelos: dimensões em cm e comprimento igual a 210 cm.....	46
Figura 2.18 – Aparato para o ensaio de flexão (a) e esquema estático dos modelos ensaiados, com dimensões em cm (b).....	47
Figura 2.19 – Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos PSR e PCR.....	49
Figura 2.20 – Estado Limite Último: o momento fletor de ruína previsto pela NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança)	50
Figura 2.21 – Estado Limite de Serviço: o momento fletor que provoca a flecha máxima segundo a NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança).....	51
Figura 2.22 – Diagrama de carga x deslocamento (processo incremental).....	53
Figura 2.23 – Elemento Finito – Beam3-2D	54
Figura 2.24 – Seção transversal dos modelos usada nos cálculos (unidades em cm).....	54
Figura 2.25 – Esquema estático dos modelos de lajes pré-moldadas treliçadas	56

Figura 2.26 – Momento x Curvatura.....	58
Figura 2.27 – Modelo P3 (SR), sem resíduo	60
Figura 2.28 – Modelo P3 (CR), com resíduo	60
Figura 3.1 – Resíduos de borracha de pneu no estado natural	72
Figura 3.2 – Agitador de peneiras utilizado na separação dos resíduos de borracha	72
Figura 3.3 – Borracha grossa.....	73
Figura 3.4 – Borracha média	73
Figura 3.5 – Borracha fina.....	74
Figura 3.6 – Sistema de Aquisição de Dados.....	78
Figura 3.7 – Diagrama de dosagem de concretos.....	79
Figura 3.8 – Planilha utilizada para dosagem dos traços de concreto	82
Figura 3.9 – Seção transversal dos modelos (dimensões em cm)	86
Figura 3.10 – Perfil longitudinal dos modelos (dimensões em cm)	87
Figura 3.11 – Seção transversal das fôrmas para vigotas treliçadas.....	89
Figura 3.12 – Fôrma metálica utilizada na moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas ...	89
Figura 3.13 – Espaçadores plásticos para posicionamento da armadura	90
Figura 3.14 – Ancoragem da armadura adicional.....	90
Figura 3.15 – Moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas	91
Figura 3.16 – Desmoldagem e cura das vigotas pré-moldadas treliçadas.....	91
Figura 3.17 – Nivelamento do piso.....	92
Figura 3.18 – Fôrma utilizada para montagem dos modelos	93
Figura 3.19 – Montagem dos modelos.....	94
Figura 3.20 – Posicionamento da última fileira de lajotas cerâmicas.....	94
Figura 3.21 – Posicionamento dos ganchos e da armadura de distribuição.....	95
Figura 3.22 – Concretagem – lançamento, adensamento e acabamento.....	95
Figura 3.23 – Cura durante 7 dias.....	96
Figura 3.24 – Posicionamento dos extensômetros – Armação Treliçada e Armadura Adicional	96
Figura 3.25 – Fixação do extensômetro elétrico na armação treliçada e armadura adicional..	97
Figura 3.26 – Posicionamento dos extensômetros elétricos no concreto (dimensões em cm).	97
Figura 3.27 – Aplicação do extensômetro elétrico na superfície da capa de concreto	98
Figura 3.28 – Esquema estático dos modelos (dimensões em cm).....	98
Figura 3.29 – Esquema geral de ensaio.....	99

Figura 3.30 – Transporte e posicionamento dos modelos.....	99
Figura 3.31 – Fixação dos perfis metálicos.....	100
Figura 3.32 – Posicionamento dos Cilindros Hidráulicos, Células de Carga e Rótulas	100
Figura 3.33 – Posicionamento dos Relógios Comparadores.....	101
Figura 3.34 – Ensaio de ruptura dos modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 - CE	101
Figura 4.1 – Lançamento, adensamento e acabamento dos modelos com resíduo	105
Figura 4.2 – Seção transversal dos modelos (unidades em cm)	111
Figura 4.3 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PC 01 - SE.....	114
Figura 4.4 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PR 01 - SE.....	115
Figura 4.5 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PC 02 - CE	115
Figura 4.6 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PR 02 - CE	116
Figura 4.7 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PC 03 - CE	116
Figura 4.8 – Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelo PR 03 - CE	117
Figura 4.9 – Comparação do Momento x Flecha/Vão – Modelos PC 01 – SE e PR 01 - SE	119
Figura 4.10 – Comparação do Momento x Flecha/Vão – Modelos PC 02 – CE e PR 02 - CE	120
Figura 4.11 – Comparação do Momento x Flecha/Vão – Modelos PC 03 – CE e PR 03 - CE	120
Figura 4.12 – Posicionamento dos extensômetros elétricos na armadura.....	124
Figura 4.13 – Extensômetros elétricos no concreto – Modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE e PC 03 - CE	125
Figura 4.14 – Extensômetros elétricos no concreto – Modelo PR 03 – CE.....	125
Figura 4.15 – Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelo PC 02 - CE	126
Figura 4.16 – Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelo PC 02 - CE	126
Figura 4.17 – Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelo PR 02 - CE	127
Figura 4.18 – Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelo PR 02 - CE	127
Figura 4.19 – Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelo PC 03 - CE	128
Figura 4.20 – Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelo PC 03 - CE	128
Figura 4.21 – Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelo PR 03 - CE	129
Figura 4.22 – Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelo PR 03 - CE	129
Figura 4.23 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelos PC 03 – CE e PR 02 – CE	131

Figura 4.24 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE	132
Figura 4.25 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE	132
Figura 4.26 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelos PC 03 – CE e PR 02 – CE.....	134
Figura 4.27 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE.....	134
Figura 4.28 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE	135
Figura 4.29 – Representação dos valores experimentais das deformações do aço e do concreto em relação aos domínios de cálculo.....	136
Figura 4.30 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida – Modelos PC 03 – CE e PR 02 – CE	137
Figura 4.31 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida – Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE	138
Figura 4.32 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE	138
Figura 4.33 – Comparação da profundidade da Linha Neutra – Modelos PC 03 – CE e PR 02 – CE.....	140
Figura 4.34 – Comparação da profundidade da Linha Neutra – Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE.....	141
Figura 4.35 – Comparação da profundidade da Linha Neutra – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE	141
Figura 4.36 – Comparação das Curvaturas ($1/r$) – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE.....	143
Figura 4.37 – Comparação do Momento Fletor x Relação Flecha/Vão – Modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE.....	144
Figura 4.38 – Fissuras – Modelo sem resíduo.....	145
Figura 4.39 – Fissuras – Modelo com resíduo	145
Figura 4.40 – Comparação do padrão de fissuração e abertura de fissuras das nervuras	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características geométricas da seção transversal “T” bruta, no estádio I.....	30
Tabela 2.2 – Dosagem dos concretos usados nos modelos de lajes	48
Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios usados para caracterizar os concretos.....	48
Tabela 2.4 – Características físicas da lajota cerâmica	48
Tabela 2.5 – Características físicas do aço usado como armadura de distribuição, posicionado na capa da laje.....	48
Tabela 2.6 – Características da treliça – aço CA-60.....	48
Tabela 2.7 – Características geométricas dos modelos.....	54
Tabela 2.8 – Características mecânicas utilizadas no método de Branson	56
Tabela 2.9 – Características mecânicas utilizadas no método CEB 90-discretizado.....	59
Tabela 2.10 – Valores dos momentos fletores referentes às situações correspondentes aos Estados Limites Último e em Serviço	60
Tabela 2.11 – Exemplos de altas resistências iniciais obtidas com o uso de aditivos superplastificantes.....	63
Tabela 3.1 – Caracterização do cimento CP V-ARI Plus	67
Tabela 3.2 – Caracterização do cimento CP II Z 32.....	68
Tabela 3.3 – Caracterização do agregado miúdo – Classificação: Areia Média	69
Tabela 3.4 – Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1	71
Tabela 3.5 – Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu	73
Tabela 3.6 – Caracterização do resíduo de borracha de pneu	75
Tabela 3.7 – Características da treliça	76
Tabela 3.8 – Caracterização da lajota cerâmica	77
Tabela 3.9 – Características do aço	77
Tabela 3.10 – Composição final dos traços TC – ARI e TC – Z 32.....	82
Tabela 3.11 – Composição final dos traços com resíduo.....	84
Tabela 4.1 – Ensaio dos traços de concreto – Modelos PC 01 – SE e PR 01 - SE.....	106
Tabela 4.2 – Ensaio dos traços de concreto – Modelos PC 02 – CE e PR 02 - CE.....	107
Tabela 4.3 – Ensaio dos traços de concreto – Modelos PC 03 – CE e PR 03 - CE.....	108
Tabela 4.4 – Características geométricas dos modelos.....	111
Tabela 4.5 – Dados para cálculo do Momento Resistente e Carga de Ruptura.....	113
Tabela 4.6 – Características mecânicas – Método de Branson	113

Tabela 4.7 – Resultados dos momentos de fissuração calculados e experimentais.....	118
Tabela 4.8 – Momento fletor experimental e obtido pelo método de Branson, para o Estado Limite de Serviço.....	121
Tabela 4.9 – Resultados dos momentos de ruptura calculados e experimentais	123
Tabela 4.10 – Nomenclatura dos extensômetros elétricos da armadura	124
Tabela 4.11 – Análise das deformações no concreto e na armadura para o Estado Limite de Serviço.....	137
Tabela 4.12 – Deformações no concreto e na armadura comprimida para o Estado Limite de Serviço.....	139
Tabela 4.13 – Análise da profundidade da Linha Neutra para o Estado Limite de Serviço ..	142
Tabela 4.14 – Dimensões aproximadas das fissuras registradas – Modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 - CE	147

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Considerações Iniciais	18
1.2	Importância do Tema.....	19
1.3	Objetivo Geral.....	19
1.4	Objetivos Específicos	19
1.5	Apresentação do Trabalho	21
2	Revisão Bibliográfica.....	22
2.1	Lajes Pré-Moldadas Treliçadas	22
2.1.1	Considerações Iniciais	22
2.1.2	O Sistema Treliçado	22
2.1.3	Direção das Nervuras	25
2.1.4	Armadura Complementar	26
2.1.5	Material de Enchimento.....	26
2.1.6	Capa de Concreto	26
2.1.7	Análise Estrutural.....	27
2.1.7.1	Dimensionamento à Flexão	28
2.1.7.2	Cálculo de Deslocamentos (Flechas)	29
2.1.8	Qualidade Estrutural de Lajes Pré-Moldadas Treliçadas	33
2.2	Resíduos de Borracha de Pneu.....	34
2.2.1	Aspectos Gerais da Reciclagem	34
2.2.2	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP)	35
2.2.3	O Processo de Trituração/Redução dos Pneus e suas Aplicações	36
2.2.4	Argamassas com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu	39
2.2.5	Concretos com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu	40
2.3	Pesquisas realizadas na UNESP – Campus de Ilha Solteira.....	46
2.3.1	Dissertação de Trigo (2008)	46
2.3.2	Dissertação de Santos (2009).....	52
2.3.2.1	Branson.....	55
2.3.2.2	Branson - discretizado	56
2.3.2.3	Estádios I e II - discretizado	56

2.3.2.4	CEB 90 - discretizado.....	57
2.3.2.5	Análise dos resultados	59
2.3.2.6	Conclusões	60
2.4	Aditivos Superplastificantes	62
2.4.1	Generalidades.....	62
2.4.2	Características Físico-Químicas e Princípio de Funcionamento	62
2.4.3	Aplicações de Aditivos Superplastificantes.....	63
3	Programa Experimental.....	65
3.1	Materiais e Equipamentos.....	65
3.2	Caracterização dos Materiais	65
3.2.1	Cimento	66
3.2.2	Agregado Miúdo	68
3.2.3	Agregado Graúdo.....	70
3.2.4	Resíduo de Borracha de Pneu	72
3.2.5	Água.....	76
3.2.6	Aditivo Químico.....	76
3.2.7	Armação Treliçada	76
3.2.8	Lajota Cerâmica	76
3.2.9	Vergalhões	77
3.2.10	Instrumentação e Obtenção dos Dados.....	77
3.3	Estudo das Composições dos Concretos	78
3.3.1	Métodos de Dosagem	78
3.3.1.1	Método de Dosagem de Concreto IPT/EPUSP.....	78
3.3.1.2	Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho	79
3.3.2	Traços de Concreto.....	80
3.3.2.1	Concreto sem Adição de Resíduo de Borracha (Controle ou Referência)	81
3.3.2.2	Concreto com Adição de Resíduo de Borracha	83
3.3.3	Procedimentos Aplicados às Composições dos Concretos.....	84
3.3.3.1	Determinação da Massa Compactada Unitária (MUCm).....	84
3.3.3.2	Mistura.....	84
3.3.3.3	Outras Caracterizações dos Concretos	85
3.4	Definições Gerais dos Modelos Ensaçados.....	86
3.4.1	Definição das Dimensões	86

3.4.2	Definição dos Modelos.....	87
3.4.3	Definição das Armaduras	88
3.5	Descrição da Preparação dos Ensaios	88
3.5.1	Vigotas Pré-Moldadas Treliçadas	88
3.5.2	Modelos de Lajes Treliçadas	91
3.5.2.1	Nivelamento do Piso e Execução das Fôrmas	91
3.5.2.2	Montagem, moldagem, adensamento e cura.....	93
3.5.2.3	Extensômetros Elétricos	96
3.5.2.4	Procedimentos de Ensaio e Instrumentação.....	98
4	Apresentação e Discussão dos Resultados	103
4.1	Concretos	103
4.1.1	Concreto sem Adição de Resíduo (Controle ou Referência).....	103
4.1.2	Concreto com Adição de Resíduo de Borracha	103
4.1.3	Resultados dos Traços de Concreto	105
4.1.4	Análise dos Resultados dos Traços de Concreto	108
4.2	Ensaio dos Modelos de Lajes Pré-Moldadas Treliçadas.....	110
4.3	Dimensionamento dos Modelos de Lajes Pré-Moldadas Treliçadas	111
4.3.1	Cálculo do Momento de Ruptura ou Momento Resistente.....	112
4.3.2	Previsão da Flecha Imediata	113
4.4	Análise dos Resultados das Lajes – Momento Fletor x Flecha/Vão	113
4.5	Análise dos Resultados das Lajes – Momento Fletor x Deformação.....	123
4.6	Análise da Profundidade da Linha Neutra.....	139
4.7	Análise da Curvatura (1/r)	142
4.8	Análise do Padrão de Fissuração	144
5	Considerações Finais e Conclusões	148
6	Referências	153
	Anexo	163

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A partir do início do século XX, o Brasil vem se notabilizando pela execução de estruturas de concreto, que se destacam no cenário mundial. Além disso, diversas pesquisas têm sido feitas no sentido de ampliar as possibilidades de uso do concreto mediante o emprego de outros materiais em sua constituição, que, por sua vez, lhe proporcione novas propriedades.

Para construções residenciais e industriais de pequeno e médio porte (casas, sobrados e pequenos edifícios), o sistema de lajes com nervuras pré-fabricadas tem sido mais utilizado, quando comparado ao uso de lajes maciças.

As lajes pré-moldadas são compostas geralmente por elementos pré-moldados (trilho ou treliça), lajotas (normalmente cerâmicas) e uma “capa de concreto” moldada no local da obra, possibilitando, dessa forma, a redução do peso próprio e facilidade nas execuções.

Considerando-se que consumo excessivo dos materiais empregados nas construções pode provocar o esgotamento de algumas reservas naturais, a utilização de alguns materiais alternativos, como as fibras naturais ou sintéticas, pode representar uma boa alternativa para diversificar e aumentar a oferta de materiais, além de contribuir na redução do aparecimento de fissuras originadas pela retração plástica do concreto.

Dentre os materiais alternativos, a borracha reciclada de pneu inservível apresenta propriedades técnicas que podem ser interessantes para seu uso em aplicação como agregado ao concreto. O concreto produzido com borracha reciclada de pneu pode apresentar características físicas, mecânicas e ambientais que possibilitam o seu uso na construção civil.

Dessa forma, a utilização de resíduos de borracha de pneu na produção de lajes com vigotas pré-moldadas treliçadas pode ser uma forma de contribuir para o desenvolvimento sustentável, na necessidade mundial de preservação do meio ambiente.

1.2 Importância do Tema

Um dos vários problemas que a humanidade enfrenta no início do século XXI é a dificuldade da destinação correta dos resíduos. Grandes quantidades de pneus de aviões, de caminhões e de carros são descartadas quando os mesmos se tornam inservíveis, ou seja, quando não têm mais condições de serem reformados (ADHIKARI et al. apud KAMIMURA, 2002).

O aumento do acúmulo de pneus inservíveis está diretamente relacionado com a fragilidade da legislação e a falta de incentivo à reciclagem, o que tem conduzido às crises dos aterros sanitários e aos problemas de saúde pública.

No Brasil, atualmente tem-se dado atenção quanto aos programas de habitação popular, em função do grande déficit habitacional que o país possui. Portanto, existe a possibilidade de se aumentar a velocidade da construção de unidades habitacionais, sem, no entanto, gerar prejuízos ao ambiente, fazendo uso de materiais de construção ecologicamente corretos.

Grande quantidade de pesquisas tem indicado o uso potencial dos materiais cimentícios com adição de resíduo de borracha de pneu em aplicações sem função estrutural. Entretanto, pouco se tem estudado sobre materiais à base de cimento com adição de resíduos em elementos estruturais.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento estrutural de modelos de lajes pré-moldadas treliçadas unidirecionais, utilizando resíduos de borracha de pneu resultante do processo de recauchutagem, em substituição parcial do agregado miúdo do concreto que compõe a capa das lajes e as sapatas das vigotas pré-moldadas treliçadas.

1.4 Objetivos Específicos

Este trabalho teve como objetivo específico contribuir para a continuidade do trabalho de Trigo (2008) nos seguintes aspectos:

- estudar um outro método de dosagem visando obter, para os modelos sem e com resíduo de borracha de pneu, resistências à compressão próximas entre si, sem um aumento significativo do consumo de cimento decorrente da inclusão do resíduo de borracha no concreto, mediante o uso de aditivo superplastificante. No trabalho de Trigo (2008), que não usou aditivos, para os modelos sem e com resíduo de borracha de pneu, os consumos de cimento foram de, respectivamente, 319 kg/m^3 e 377 kg/m^3 , correspondendo ambos a uma resistência prevista, para o concreto da capa, da ordem de 20 MPa aos 28 dias de idade. Já neste trabalho, os consumos foram de, respectivamente, 342 kg/m^3 e 360 kg/m^3 , tendo sido prevista uma classe de resistência da ordem de 25 MPa, para evitar nos ensaios que algum modelo pudesse ter resistência média inferior a 20 MPa;
- ao contrário de Trigo (2008), que usou CP II E 32, neste trabalho, adotou-se o cimento CP II Z 32, por ser o mais disponível na região noroeste do Estado de São Paulo. Destaca-se que por ocasião da realização do trabalho de Trigo (2008), ainda não estava sendo comercializado o CP II Z 32;
- inserir o resíduo de borracha tanto na elaboração do concreto da capa como na confecção do concreto das sapatas dos modelos com resíduo, complementando o trabalho de Trigo (2008) que usou resíduo apenas na capa;
- inserir armadura adicional de flexão para avaliar o comportamento de elementos com maior taxa de armadura, uma vez que no trabalho de Trigo (2008) a área de aço efetivamente utilizada ficou bem próxima da área mínima exigida no item 17.3.5.2.1 da NBR 6118:2003;
- verificar se a inclusão do resíduo de borracha, no início ou no final da mistura, pode influenciar nos valores dos deslocamentos verticais (flechas), das deformações e da resistência última dos modelos. Em Trigo (2008) o resíduo de borracha foi inserido no final da mistura e foram observadas maiores flechas para os modelos com resíduo, indicando modelos mais flexíveis com relação à flexão.

1.5 Apresentação do Trabalho

A pesquisa foi dividida em 6 capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta a introdução do tema abordado, os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo engloba uma revisão bibliográfica, com destaque ao dimensionamento de lajes pré-moldadas treliçadas, às propriedades dos resíduos de borracha de pneu e suas aplicações em materiais cimentícios.

O terceiro capítulo aborda a caracterização dos materiais empregados e a descrição detalhada da montagem e do ensaio experimental dos modelos.

Os resultados das propriedades dos concretos e dos ensaios de ruptura dos modelos são apresentados no quarto capítulo, bem como a análise dos resultados obtidos.

As conclusões e considerações finais são apresentadas no capítulo 5.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as referências.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lajes Pré-Moldadas Trelaçadas

2.1.1 Considerações Iniciais

A atual necessidade de racionalização do setor da construção civil tem proporcionado a utilização cada vez mais efetiva dos elementos pré-fabricados. Nesse contexto, surgiu a laje formada por vigotas trelaçadas.

Ela surgiu na Europa a mais de 30 anos, visando contribuir com a evolução dos sistemas construtivos de lajes. Na região nordeste do Estado de São Paulo, a percussora das lajes pré-fabricadas foram, até o final da década de 70, as lajes nervuradas moldadas no local, com elementos de enchimento compostos de lajotas cerâmicas de pequena altura. Depois do advento das lajes com nervuras do tipo trilho, e, após a importação das primeiras máquinas de eletrosoldagem, lançou-se no Brasil a laje com armaduras trelaçadas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004, p.2).

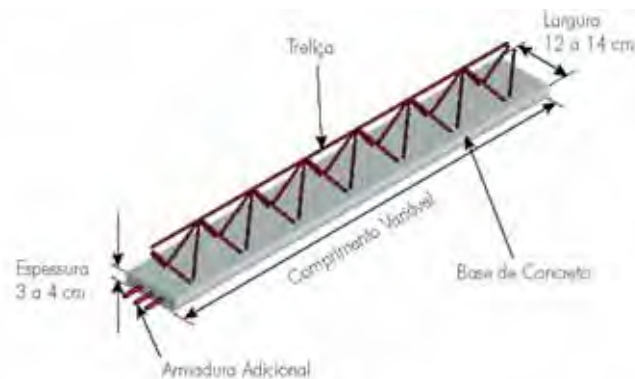
Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2004), algumas vantagens podem ser enumeradas quanto à utilização de lajes pré-moldadas com vigotas trelaçadas em relação às lajes maciças de concreto armado:

- considerando igualdade de vãos e sobrecargas, possuem menor peso-próprio, com conseqüente alívio sobre as fundações;
- dispensam o uso de fôrmas, considerando que os elementos pré-moldados e os elementos de enchimento desempenham esse papel;
- proporcionam sensível redução do escoramento das lajes, pois o elemento pré-moldado possui capacidade portante capaz de reduzir as linhas de escoras.

2.1.2 O Sistema Trelaçado

A laje treliçada é uma laje nervurada construída a partir do emprego de elementos pré-fabricados do tipo treliça (Figura 2.1). Esse elemento pré-fabricado, também chamado de vigota treliçada, é formado pela associação de uma treliça simples a uma sapata inferior de concreto. Seu processo de montagem se inicia com a compra da armadura treliçada pronta, sendo feita posteriormente a concretagem do elemento inferior de concreto (sapata), em fôrma metálica. Caso seja necessário, além da armadura da treliça imersa na sapata, armaduras adicionais também podem ser aí posicionadas.

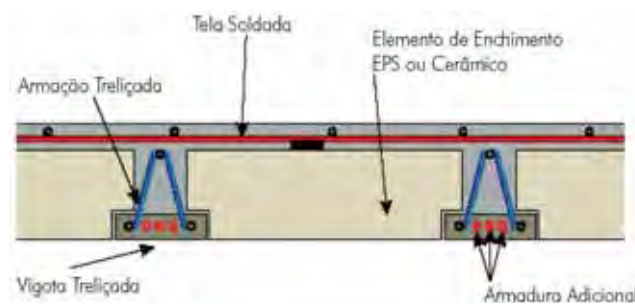
Figura 2.1 - Vigota pré-moldada treliçada



Fonte: Belgo (2010)

Deste modo, a laje treliçada é composta por nervuras principais resistentes, por elementos leves de enchimento colocados entre as nervuras, e por uma capa superior de concreto que, juntamente com as nervuras principais, vai formar a seção transversal resistente à flexão, como ilustra a Figura 2.2. Devido à perfeita solidarização entre o elemento treliçado e o concreto lançado em obra, a estrutura resultante pode ser considerada como uma estrutura monolítica (CAIXETA, 1998).

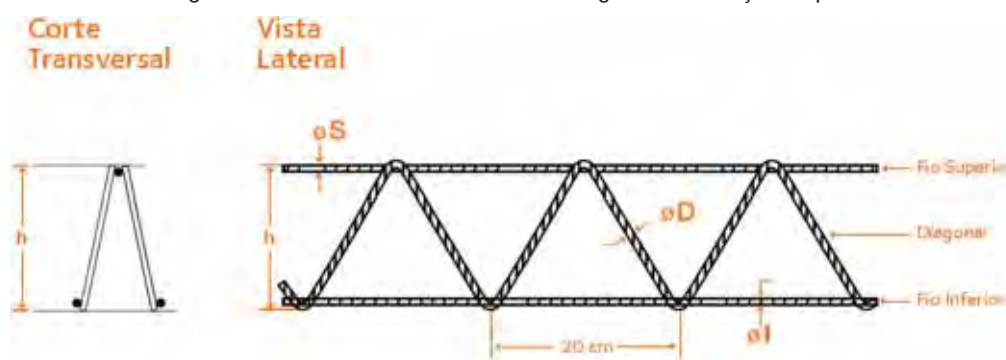
Figura 2.2 - Seção transversal de laje pré-moldada treliçada



Fonte: Belgo (2010)

A treliça utilizada na vigota é fabricada com aço CA-60 e tem como principal função armar a seção de concreto. Trata-se de uma estrutura em forma tridimensional piramidal, sendo caracterizada por dois banzos (superior e inferior) ligados por diagonais (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Corte transversal e vista geral da treliça simples



Fonte: Belgo (2010)

A união do fio superior aos inferiores é feita por meio de um processo automático, empregando-se fios trefilados por eletrofusão (eletrosolda), prescrito na norma NBR 14862 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002). O fio do banzo superior, além de garantir rigidez à vigota, pode ainda colaborar como armadura resistente ao momento fletor negativo após a retirada dos escoramentos, e também como armadura de compressão durante a montagem e concretagem da laje. Seu diâmetro varia de 6 mm a 8 mm. O banzo inferior (armadura positiva) tem a finalidade de resistir aos esforços de tração ocasionados pelos momentos fletores positivos que atuam na laje, e é constituído por fios de aço paralelos longitudinalmente na base do concreto, variando de 4,2 mm a 8 mm de diâmetro entre os fabricantes. Já as barras diagonais, também denominadas sinusóides, são formadas por dois fios laterais com as funções principais de combater as tensões de cisalhamento, promover uma perfeita coesão entre o concreto do elemento pré-moldado e o concreto de capeamento e interligar as barras do banzo superior ao inferior. Esta é composta por fios com diâmetros de 4,2 mm a 5,0 mm, e têm espaçamento regular de 200 mm. A altura h da treliça varia de 80 mm a 300 mm para alguns fabricantes.

De acordo com a NBR 14862 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002), a armação treliçada pode ser classificada a partir de uma abreviatura que relaciona a sua altura com os diâmetros das armaduras do banzo superior, das diagonais (sinusóide) e do banzo inferior. Por exemplo, a armação treliçada TR 08634 possui 8 cm de altura, barra de 6,0mm de diâmetro no banzo superior, 3,4mm de diâmetro nas diagonais e 4,2mm de diâmetro no banzo inferior.

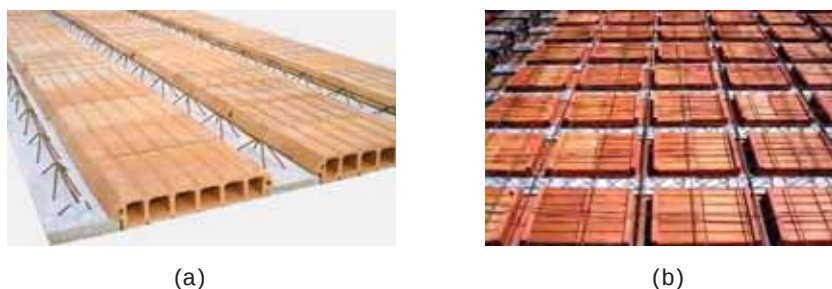
2.1.3 Direção das Nervuras

As lajes pré-moldadas treliçadas podem ter suas nervuras principais tanto em uma direção (lajes unidirecionais) como em duas direções (lajes bidirecionais).

O sistema unidirecional é constituído por nervuras dispostas na direção do menor vão. Além disso, quando submetidos às forças concentradas ou lineares (ações de parede, por exemplo) devem possuir nervuras secundárias transversais perpendiculares às nervuras principais. Já as lajes pré-moldadas bidirecionais possuem nervuras transversais em duas direções ortogonais entre si, sendo constituídas por vigotas pré-fabricadas treliçadas dispostas na direção do menor vão, e por nervuras transversais moldadas *in loco*, com a utilização de elementos em forma de canaleta.

O sistema bidirecional apresenta um comportamento estrutural mais eficiente que as lajes unidirecionais, de modo que o posicionamento das nervuras em duas direções garante reduções nos valores dos esforços e deslocamentos. Consequentemente, é possível reduzir a altura da laje, o volume de concreto e a taxa de armadura. Entretanto, a utilização de lajes unidirecionais é melhor definida para uma relação entre os vãos em direções ortogonais superior a 2. A Figura 2.4 ilustra os tipos de lajes pré-moldadas treliçadas.

Figura 2.4 - Lajes com vigotas pré-moldadas treliçadas



(a) Laje Unidirecional (b) Laje Bidirecional

Fonte: Construir (2011) (a) e Tecnolajes (2011) (b)

2.1.4 Armadura Complementar

Segundo a NBR 14859-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002), admite-se que uma armadura complementar seja adicionada na obra, de acordo com o projeto da laje. Ela pode ser longitudinal, de distribuição, ou superior. A armadura longitudinal é disposta na direção das nervuras e possui a finalidade de aumentar a área de armadura tracionada; a armadura de distribuição é posicionada na capa e disposta nas direções transversal e longitudinal, com a finalidade de distribuir as tensões oriundas de cargas concentradas, controlar a fissuração e diminuir os efeitos da retração do concreto por secagem; a armadura superior, também posicionada longitudinalmente, na capa, ajuda a combater as fissuras e garante a resistência ao momento fletor negativo.

2.1.5 Material de Enchimento

Os materiais de enchimento mais utilizados são os blocos de concreto, os tijolos de cerâmica e o poliestireno (isopor), conforme ilustra a Figura 2.5. Esses materiais possuem, em suas laterais, uma saliência que permite o seu apoio nas vigotas. Sua função é de reduzir o peso-próprio da laje aliviando carga na estrutura. Os materiais de enchimento devem resistir ao peso do concreto no momento da concretagem.

Figura 2.5 - Lajota cerâmica e de poliestireno (isopor)



Fonte: Forni (2005, p.17)

2.1.6 Capa de Concreto

De acordo com a NBR 14859-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002), “capa de concreto” (ou “concreto complementar”) pode ser definida como uma placa superior da laje, cuja espessura é medida a partir da face superior do elemento de enchimento. Além disso, considera-se que o concreto complementar deva ter uma resistência mínima característica à compressão de 20 MPa, aos 28 dias de idade. A Figura 2.6 mostra a execução da capa de concreto de laje pré-moldada treliçada.

Figura 2.6 - Execução da capa de concreto de uma laje pré-moldada



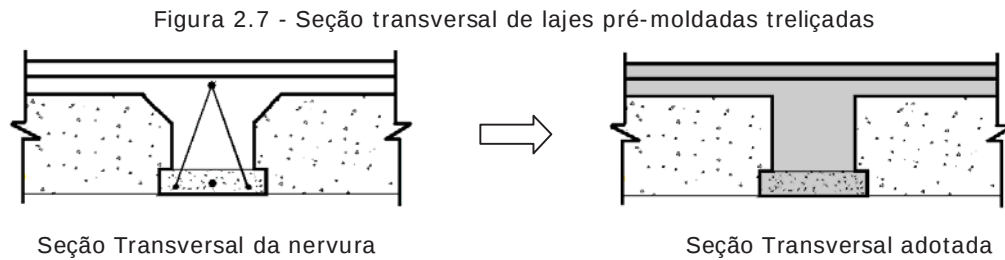
Fonte: Forma e Design (2011)

2.1.7 Análise Estrutural

A análise estrutural permite estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos, em uma parte ou em toda a estrutura. De acordo com o item 14.2.2 da NBR 6118:2003, a análise deve ser feita com um modelo estrutural realista, que permita representar de maneira clara todos os caminhos percorridos pelas ações até os apoios da estrutura e que permita também representar a resposta não linear dos materiais. Com base nesta análise, realizam-se as verificações de Estados Limites Últimos e de Serviço. Os estados limites últimos são aqueles relacionados ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação do uso da estrutura. Os estados limites de serviço, conforme o item 10.4 da NBR 6118:2003, são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, à aparência, ao conforto do usuário e à boa utilização funcional da mesma, seja em relação aos usuários, às máquinas ou aos equipamentos utilizados.

2.1.7.1 Dimensionamento à Flexão

O modelo matemático para o cálculo inicial de uma laje pré-moldada treliçada se baseia no conjunto de vigas simplesmente apoiadas. As nervuras são consideradas vigas paralelas que trabalham praticamente independentes, sendo adotada a seção transversal em forma de “T”, conforme ilustra a Figura 2.7.



Fonte: Fazzan (2011)

Segundo Droppa Júnior (1999), o arranjo das armaduras das lajes é essencialmente definido em função dos esforços de flexão. Para a determinação dos esforços em lajes pré-moldadas simplesmente apoiadas, recomenda-se considerar o máximo valor de momento fletor de uma nervura, utilizando-se da teoria de flexão normal simples de peças de concreto armado. Dependendo da profundidade da linha neutra encontrada, são definidas seções retangulares ou “T”. Para lajes pré-moldadas unidirecionais biapoiadas, pode-se obter o valor do máximo momento fletor positivo atuante nas nervuras através da Equação 2.1:

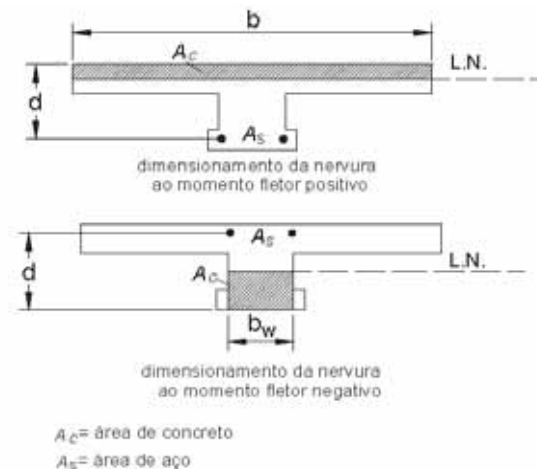
$$M_{\max} = \frac{P \cdot \ell^2}{8} \quad , \quad (2.1)$$

sendo P a carga linear atuante na nervura e ℓ o vão do elemento estrutural.

A área de armadura necessária para resistir ao $M_{\max}$ deverá ser composta pela área dos fios do banzo inferior da armadura treliçada, complementada, se necessário, com uma armadura adicional, posicionadas na sapata da vigota.

Carvalho e Figueiredo Filho (2004) salienta que a seção transversal das lajes pré-moldadas treliçadas resiste melhor aos momentos positivos (aqueles que tracionam a face inferior) que aos negativos, pois a região de concreto disponível junto à borda inferior da laje (região comprimida para momento negativo) é bem menor que a região junto à face superior. De fato, para o dimensionamento da nervura ao momento fletor negativo, exige-se uma maior quantidade de armadura para absorver o mesmo momento fletor, em relação ao dimensionamento da nervura ao momento fletor positivo (Figura 2.8). Além disso, o deslocamento da armadura negativa durante a movimentação dos operários em obras de pequeno porte gera imprecisão no dimensionamento dos momentos fletores negativos (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004, p. 84).

Figura 2.8 - Dimensionamento das Nervuras – Mesa comprimida e tracionada



Fonte: Droppa Júnior (1999, p. 24)

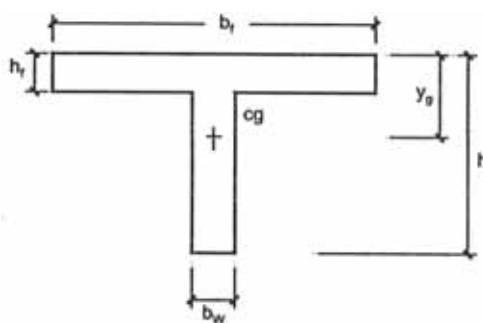
2.1.7.2 Cálculo de Deslocamentos (Flechas)

Para o cálculo das flechas, é necessário considerar o comportamento estrutural da seção transversal baseado no conceito de estádios.

O **Estádio I** está relacionado a uma situação onde a estrutura está sendo solicitada por carregamento de pequena intensidade, de modo que a tensão de tração que atua no concreto não ultrapassa a sua resistência à tração. Neste estágio, pode-se considerar que a estrutura se deforma pouco e as tensões normais que surgem nas seções transversais mais solicitadas são pequenas. Neste caso, considera-se que as tensões são proporcionais às respectivas deformações, valendo portanto a lei de Hooke.

Neste estágio, o momento de inércia da seção transversal pode ser definido como sendo o momento de inércia da seção bruta de concreto armado, desconsiderando-se a presença da armadura. A Tabela 2.1 apresenta as características de uma seção transversal “T” bruta (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Seção Transversal “T” (seção bruta, Estádio I)



Fonte: Adaptada de Carvalho e Figueiredo Filho (2004, p. 178)

Tabela 2.1 - Características geométricas de seção transversal “T” bruta, no estágio I

Área (seção geométrica)	$A_c = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h$
Centro de gravidade	$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g}$
Momento de inércia à flexão	$I_c = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2$

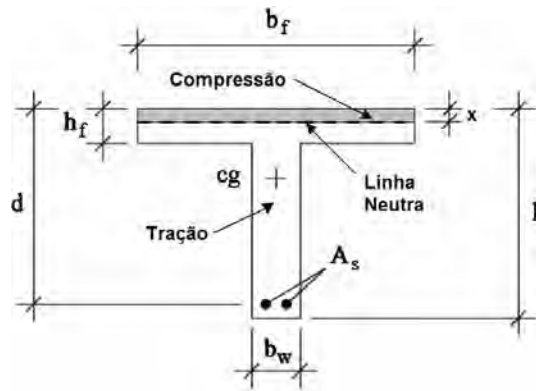
Fonte: Adaptada de Carvalho e Figueiredo Filho (2004)

Com o aumento do carregamento, a maior tensão de tração que atua na seção transversal ultrapassa a resistência do concreto à tração, modificando o seu comportamento, conduzindo-a ao **Estádio II** (estado de fissuração), em que se admite que:

- o concreto não trabalha à tração, sendo esse esforço resistido apenas pela armadura presente abaixo da linha neutra;
- em todos os pontos comprimidos da seção transversal, existe relação linear entre tensão e deformação específica do concreto;
- não existe escoamento do aço nem plastificação do concreto;
- a distribuição das tensões de compressão no concreto é triangular.

No Estádio II puro, as características geométricas são modificadas, sendo necessário calcular a nova posição da linha neutra nesse estágio (x_{II}), mostrada na Figura 2.10. No Estádio II, é necessário realizar a homogeneização da seção, ou seja, transformar a área de aço tracionado em uma área de concreto tracionado equivalente. Essa transformação é feita por meio do termo α_e , que é igual à relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade secante do concreto.

Figura 2.10 - Seção transversal em forma de "T", no Estádio II puro



Fonte: Adaptada de Carvalho e Figueiredo Filho (2004)

Para a situação onde a linha neutra corte a mesa ($x_{II} \leq h_f$), o valor de x_{II} é obtido considerando o momento estático da seção homogeneizada igual a zero, conforme mostrado na Equação 2.2. Para a situação onde a linha neutra corta a alma, recomenda-se a leitura de Carvalho e Figueiredo Filho (2004).

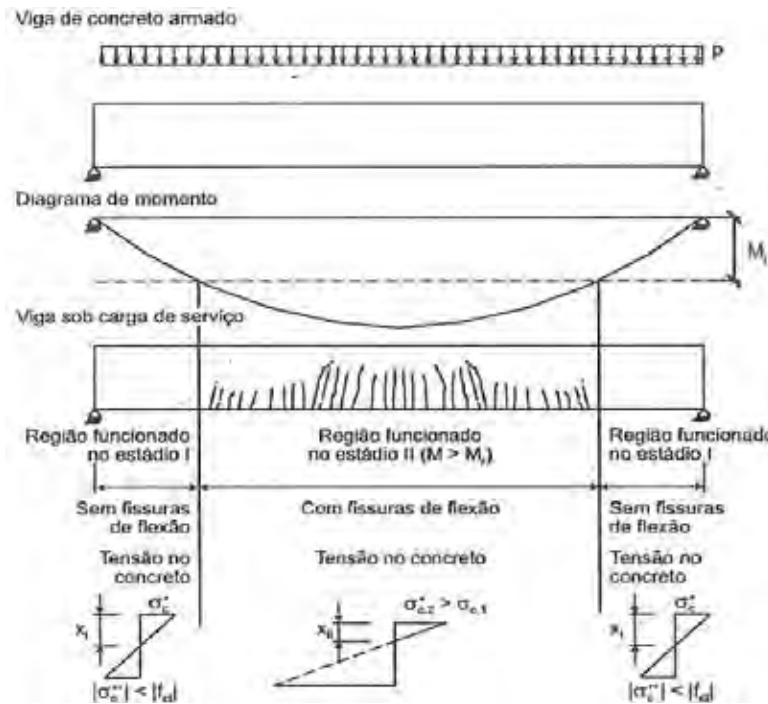
$$m_s = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_e \left[\sum A_{si} \cdot (d_i - x) \right] - b_f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad (2.2)$$

De posse do resultado da posição da linha neutra, é possível calcular o momento de inércia da seção no Estádio II (I_{II}). Na Equação 2.3, tem-se a expressão para o cálculo de I_{II} considerando-se que a linha neutra corte a mesa ($x_{II} \leq h_f$). Para a situação onde a linha neutra corte a alma, recomenda-se a leitura de Carvalho e Figueiredo Filho (2004).

$$I_{II} = b_f \cdot \frac{x^3}{12} + b_f \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2} \right)^2 + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2 \quad (2.3)$$

Conforme mostrado na Figura 2.11, para um elemento fletido, pode-se perceber que nem todas as seções irão trabalhar no Estádio I ou no Estádio II. A separação entre os dois estádios de deformação é definida pelo Momento de Fissuração (M_r), calculado pela Equação 2.4, sendo este o momento fletor capaz de provocar a primeira fissura na peça.

Figura 2.11 - Viga de concreto simplesmente apoiada sob ações de serviço



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2004, p. 174)

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad , \text{ onde} \quad (2.4)$$

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, sendo igual a 1,2 para seções em forma de “T” ou duplo “T” e 1,5 para seções retangulares;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto. No estado limite de deformação excessiva, considera-se que a resistência à tração direta do concreto seja igual à $f_{ct,m}$, dada por $f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$, sendo f_{ck} a resistência característica do concreto à compressão. Os valores de $f_{ct,m}$ e f_{ck} são obrigatoriamente expressos em MPa;

y_t é a distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada da seção transversal.

Portanto, se o momento fletor atuante numa dada seção na peça for menor que o momento de fissuração, considera-se que seção não se encontra fissurada, caracterizando o Estádio I. Entretanto, se o momento fletor atuante for maior que o momento de fissuração, a seção apresenta-se fissurada, comportando-se, deste modo, de acordo com as hipóteses do Estádio II.

Nesse contexto, a NBR 6118:2003, através de um modelo proposto por Branson (1968), apresenta um critério para o cálculo das deformações imediatas em elementos fletidos de concreto armado. O método baseia-se numa ponderação das inércias nos Estádios I (com trechos não fissurados) e Estádio II (com trechos fissurados), ao longo da seção transversal e comprimento das peças, resultando numa inércia média equivalente, I_{eq} .

No item 17.3.2.1.1, a NBR 6118:2003 recomenda que, para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada pela Equação 2.5.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (2.5)$$

onde:

I_c é a inércia da seção íntegra de concreto, desconsiderando a contribuição das barras de aço na seção transversal de concreto armado (homogeneização da seção);

I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II, calculado com $\alpha_e = E_s/E_c$;

M_a é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, sendo o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

2.1.8 Qualidade Estrutural de Lajes Pré-Moldadas Trelaçadas

Segundo Silva (2005), a qualidade e o desempenho estrutural das lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas dependem, em grande parte, de como é desenvolvida cada etapa do método construtivo. Com atenção, deve ser observado o nível e o acerto do piso que serve de apoio para as escoras, a colocação dos escoramentos, o nível dos apoios das vigotas, a colocação das vigotas, dos elementos de enchimento e das armaduras complementares previstas no projeto. Deve-se estar atento quanto à limpeza e umedecimento dos elementos da laje antes da concretagem, instalação dos passadiços para o trânsito de trabalhadores e transporte de concreto, além dos cuidados inerentes ao lançamento, adensamento e cura do concreto complementar, finalizado com a retirada dos escoramentos.

Flório (2004) salienta que, para concretos de granulometria bem definida, bem dosados, bem fabricados e corretamente transportados, a vibração mecânica confere maior resistência à compressão, e com isso maior resistência à flexão, maior resistência à ação do tempo e incrementos na aderência entre o concreto e a armadura.

Peixoto apud Flório (2004) analisou diversos modelos compostos por uma nervura com vigotas pré-moldadas treliçadas, sendo analisado o processo de compactação dos concretos. Ficou explícito que os modelos com adensamento mecânico apresentaram menores deformações, em relação aos modelos com adensamento manual. O autor ainda fez um estudo do tipo de cura dos modelos. Foram analisados modelos não curados e modelos curados pelo recobrimento com uma espuma de 40 mm. Os ensaios de flexão puderam indicar valores de resistência muito distintos, para os diferentes métodos de cura, sendo observados, para os modelos sem cura, valores de carga aplicada bem inferiores aos valores obtidos nos modelos curados, para um mesmo deslocamento.

2.2 Resíduos de Borracha de Pneu

2.2.1 Aspectos Gerais

A invenção dos pneumáticos se deu pela contribuição de diversos pesquisadores. De certa forma, inicialmente foi o norte-americano Charles Goodyear quem descobriu e registrou, em 1841, o processo de vulcanização da borracha, dando início a uma nova era na utilização desse material.

Posteriormente, em 1845, R. W. Thomson desenvolveu os pneus de borracha, contribuindo para que, em 1888, o veterinário escocês John Boy Dunlop criasse o pneumático, que era composto de um tubo de borracha com ar sob pressão. Segundo Klick apud Gomes Filho (2007), as contribuições se uniram, transformando-se no pneu com câmara de ar, como se conhece hoje, tendo como características a leveza e a resistência, sendo utilizado, em grande escala, em bicicletas, motocicletas, automóveis, caminhões, entre outros veículos.

Em função da produção em grande escala dos pneumáticos, tem-se constatado que seu descarte vem aumentando a cada ano. De fato, de acordo com Lagarinhos e Tenório (2009), a produção mundial de pneus novos em 2006 foi de 1,353 bilhões em todo o mundo. Já o descarte de pneus usados chega a atingir, anualmente, a marca de quase 1 bilhão de unidades.

Segundo Anip (2011), em 2007, foram produzidos no Brasil 57,3 milhões de unidades de pneus e, apesar da proibição da importação, entraram no País 5,8 milhões de pneus usados, enquanto 19,8 milhões de pneus foram destinados à exportação. Desses números, estima-se que o Brasil descarte 260 mil toneladas de pneus inservíveis anualmente (CEMPRE, 2005).

Segundo Kamimura (2002), a disposição final dos pneus representa um problema de difícil solução. Aliado à sua degradação lenta, o descarte inadequado dos pneus inservíveis em aterros sanitários tem acarretado prejuízos à natureza, justificado pelo fato dos pneus serem combustíveis que queimam em altas temperaturas, além da contribuírem para contaminação dos solos e lençóis d'água e para a proliferação de insetos e roedores.

2.2.2 Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP)

Fundada em 1960, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) congrega todos os fabricantes de pneumáticos e câmaras de ar no território nacional. Em 1999, a ANIP, através da Resolução CONAMA nº 258/1999, criou o programa de coleta e destinação de pneus inservíveis em todo o país, em atendimento às exigências estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pelo Instituto Brasileiro do meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Em 2007, foi fundada a entidade Reciclanip, que cuida exclusivamente das ações de coleta e reciclagem e fortalece as iniciativas realizadas desde 1999, com a instauração do Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. Além disso, a formação de parcerias com os setores público e privado possibilitou a criação de centros de recepção de pneus inservíveis – os chamados “Ecopontos”, sendo estes locais utilizados para recolher e armazenar o material vindo de origens diversas, como borracharias, revendedoras e dos próprios cidadãos.

O ciclo da destinação correta dos pneus inservíveis pode ser visualizado na Figura 2.12, sendo que os objetivos do programa se concentram em:

- utilizar pneus triturados para produção de pó de borracha e artefatos;
- fornecer resíduos para alimentar fornos de cimenteiras;
- destinar materiais para a construção civil em isolamentos térmicos, acústicos e misturas asfálticas;
- promover o seu uso na fabricação de tapetes de automóvel, artefatos de borracha.

Figura 2.12 – Ciclo de destinação do pneu



Fonte: Anip (2007)

2.2.3 O Processo de Trituração/Redução dos Pneus e suas Aplicações

Segundo Pena (2011), o aspecto *Economia* no setor de reforma de pneus é importante quando se menciona a redução de petróleo consumido na fabricação de um pneu. Considera-se que, para fabricar um pneu novo, é preciso aproximadamente 79 litros de petróleo, enquanto que, para reformar o mesmo pneu, são necessários apenas 29 litros.

Aliado aos processos de fabricação com alto grau tecnológico, a fabricação de um pneu novo também requer um consumo elevado de mão de obra e energia. Um dos métodos de reforma dos pneus está no processo de recauchutagem.

O processo de recauchutagem é simples e preserva cerca de 80% da matéria-prima e da energia necessária para a fabricação de um pneu novo (GOMES FILHO, 2007).

Segundo Martins (2005), no processo de recauchutagem é feita a raspagem mecânica do restante da banda de rodagem velha, como ilustra a Figura 2.13, para que a carcaça do pneu fique apta a sofrer efetivamente o processo de recauchutagem (aderência de uma nova banda de rodagem) e então retorne ao uso, tecnicamente como novo. A raspagem mecânica faz com que o restante da banda de rodagem velha transforme-se em pequenas partículas de diversas granulometrias, com formatos variando de alongados (tipo fibra) a granular (tipo pó), sendo denominados de forma geral como resíduos de borracha de pneu.

Figura 2.13 - Processo de redução do pneu



(a) Raspagem do pneu a ser recauchutado e (b) Borracha moída resultante da trituração mecânica

Fonte: (a) Martins (2005, p. 32) e (b) Kamimura (2002, p.61)

No processo de redução em pequenas partículas, com a separação do aço, das fibras e da borracha, todos os componentes são reaproveitáveis. O aço é enviado para siderurgia enquanto a borracha e as fibras possuem outras aplicações (KAMIMURA, 2002).

De acordo com UTEP (2006), os padrões de fabricação das partículas de borracha, para os diversos tipos de aplicações, podem ser:

a) *granulado de borracha de 4 a 7 mm*: utilizado como matéria-prima para a fabricação de produtos de borracha como: tapetes, pallets, coxins automotivos, correias automotivas e industriais, tijolos para queima, alimentação de caldeiras e fornos em geral.

Também pode ser utilizado como complemento para a fabricação de produtos como: tubos, retentores para motores, bombas, encanamentos, mantas de isolamento acústico e térmico, cintas para reboque e levantamento de cargas e sinalização de solo para tráfego;

b) granulado de borracha de 1,5 a 3 mm: utilizado como matéria-prima para a fabricação de produtos de borracha como solados para calçados, pequenos retentores, revestimentos de peças metálicas. Na construção civil, esse resíduo possui inúmeras aplicações tais como pavimentação (misturado com o asfalto), material de enchimento de peso leve, proteção de aterro e encostas em estradas, suporte de base de estrada, sistema de drenagem de gases em aterros sanitários, material para compostagem, isolante térmico e acústico, aditivos para pavimentos asfálticos e pisos esportivos, além do emprego em concretos leves;

c) pó de borracha de 0,3 a 2 mm: utilizada como matéria-prima para a fabricação dos seguintes produtos: adesivos, vinil, lubrificantes para a indústria de plásticos de modo a evitar que peças plásticas colem entre si quando armazenadas, fabricação de peças de borracha, retentores com diâmetro inferior a 0,3 cm, pastilhas e lonas de freio, tintas, tijolos de alta resistência, látex, goma para adesivos, pneus.

Como relataram Lima e Rocha apud Fioriti (2002), a principal propriedade da borracha é sua elasticidade, embora possua outras propriedades também consideradas importantes, como a impermeabilidade, flexibilidade, resistência à abrasão e à corrosão.

Quanto à incorporação de resíduos de borracha de pneu em materiais à base de cimento, TahaMMR et al. apud Ozbay, Lachemi e Sevim (2010) salienta que os pneus inservíveis podem ser reciclados em três tamanhos principais:

- partículas de borracha de pneu em lascas, funcionando como agregado graúdo (tamanho variando entre 13 mm e 76 mm);
- partículas de borracha de pneu em migalha, funcionando como agregado miúdo (tamanho variando entre 0,075 mm e 4,75 mm);
- partículas finas de borracha (tamanho variando entre 0,15 mm e 19 mm).

2.2.4 Argamassas com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu

A incorporação de resíduos de borracha em argamassa resistente, com cimento e areia, foi iniciada por Raghavan, Huynh e Ferraris (1998, p.1748). Os autores, ao ensaiarem corpos de prova de argamassa com adição de resíduos de borracha de pneu à flexão, observaram que os pedaços de borracha tendiam a costurar a fissura, prevenindo a ruína do corpo de prova. Os autores também constataram que a argamassa contendo resíduos apresentou melhor trabalhabilidade que a argamassa sem adição.

Canova, Bergamasco e De Angelis Neto (2007) estudaram uma alternativa para reduzir as fissuras em revestimentos argamassados. Os autores avaliaram argamassas de revestimento com resíduos de pneus inservíveis para o traço 1: 1,5: 9 (em volume) e adição de pó de borracha moída, nas proporções de 0, 6, 8, 10 e 12% do volume de agregado. A argamassa com resíduo apresentou menores incidências de fissuras no revestimento, porém houve reduções no módulo de elasticidade e na resistência, além de observarem um aumento no teor de ar incorporado.

Uygunog̃lu e Topçu (2010) investigaram experimentalmente os efeitos da substituição parcial do agregado fino por resíduos de borracha de pneu na trabalhabilidade e na retração de secagem de argamassas. Foram utilizadas partículas de borracha de 1 mm a 4 mm, para cinco diferentes proporções de substituição de partículas de borracha na areia (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em peso de areia), além do uso de cinza volante (“fly ash”) e do aditivo superplastificante, na proporção de 2% em massa dos materiais cimentícios. A máxima porosidade aparente foi obtida para o maior conteúdo de borracha, indicando o aprisionamento de ar pelas partículas de borracha. O aumento da relação água/cimento e do teor de borracha na mistura também influenciou no aumento substancial da absorção. Em relação ao encolhimento das argamassas, foi observado um aumento deste com o acréscimo do teor de borracha. O aumento da retração total, com o aumento do teor de água, é uma consequência do aumento da porosidade aberta e, portanto, reflete no encolhimento. É bem conhecido na literatura que a retração de secagem do concreto aumenta com o acréscimo da porosidade. Entretanto, com a adição de borracha para 10%, 20% e 30% de partículas, houve uma significativa redução da retração de secagem, durante os primeiros meses.

Turki et al. (2009) observaram que corpos de prova de referência, com 0% de resíduo, apresentavam porosidade uniforme, com diâmetro médio de cerca de 2 μm . Entretanto, para corpos de prova com agregados de borracha, microfotografias revelaram uma heterogeneidade na porosidade, com diâmetros de 3,8 μm a 13,7 μm . Para argamassas com 30% de resíduo, formou-se um espaço vazio na microestrutura de transição entre os agregados de borracha e a matriz de cimento.

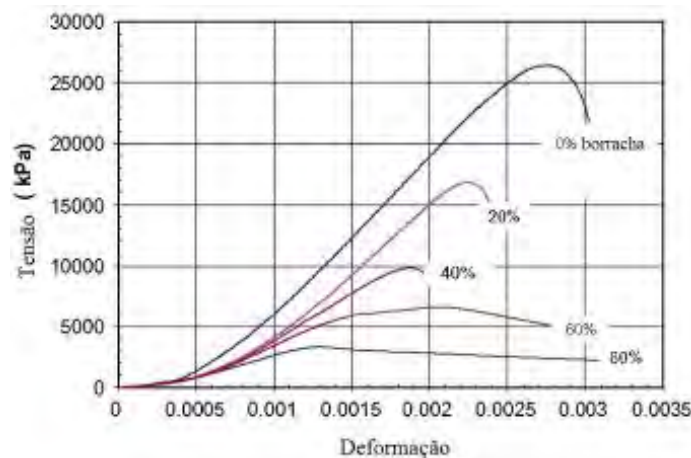
Em estudos mais recentes, Nguyen, Toumi e Turatsinze (2010) analisaram o efeito sinérgico da incorporação de borracha como agregado, juntamente com a adição de fibras metálicas, em argamassas para reparação de estruturas. Os autores fizeram substituições em volume de 20% e 30% em relação aos agregados minerais. Para controlar as fissurações que se desenvolveram no início das aplicações de carga, foram utilizadas fibras de aço, para os consumos de 20, 30, 40 kg/m^3 . O estudo inicial mostrou que, devido à baixa densidade da borracha, tais resíduos foram altamente sensíveis à segregação. A fim de evitar este fenômeno, utilizou-se agente de viscosidade e aditivo superplastificante, a fim de garantir a trabalhabilidade da mistura. Os resultados mostraram que a combinação de agregados de borracha com reforço de fibra apresentou um impacto positivo no comportamento de tensão de ruptura. A capacidade de deformação antes da macrofissuração foi melhorada com a adição de agregados de borracha e esta tendência se enfatizou com o aumento do teor de fibras. A resistência à compressão e módulo de elasticidade do compósito com agregados de borracha não foram sensíveis ao conteúdo de fibras de aço, mostrando redução de ambas as propriedades. Entretanto, foi observado que reforço de fibra tende a contrabalançar o efeito negativo dos agregados de borracha, reduzindo o efeito da queda de resistência à tração.

2.2.5 Concretos com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu

A maioria das pesquisas tem demonstrado que o concreto com adição de borracha possui resistência mecânica inferior ao concreto convencional. Marques et al. (2005) e Lopes et al. (2005) mencionam que, para manter a resistência constante com a adição do elastômero, é necessário aumentar o consumo de cimento, ou seja, diminuir o fator água/cimento. Segundo Lopes et al. (2005), a adição de fibras de borracha acarreta menor prejuízo à resistência mecânica do concreto do que a adição de grãos.

Batayneh, Marie e Asi (2008) avaliaram as principais influências nas propriedades dos concretos frescos e endurecidos decorrentes da utilização de partículas de pneus inservíveis como um substituto na porcentagem de agregados finos (areia). Diferentes porcentagens de adição de resíduos foram escolhidas: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em volume de areia. O tamanho das partículas variou de 4,75 mm a 0,15 mm. Segundo os autores, os resultados limitam a utilização do concreto modificado quando a resistência à compressão é o principal requisito. As análises mostraram que, para um aumento das partículas de borracha até um limite de 40%, foi mantida uma relação linear entre o aumento no teor de borracha e a diminuição da resistência à compressão. Para o conteúdo de borracha entre 40% e 100%, observou-se uma perda máxima de resistência à compressão de até 90%. Também foi observada redução na resistência à tração. De acordo com o diagrama de tensão-deformação (Figura 2.14), para os traços controle e com resíduos até 40%, os modelos se comportaram como um material frágil, em que a energia de fratura foi elástica.

Figura 2.14 - Relação entre Tensão e Deformação para diferentes conteúdos de borracha



Fonte: Batayneh, Marie e Asi (2008, p. 2175)

Contudo, para as duas amostras contendo 60% e 80% de borracha foi observado um comportamento não linear. Esse comportamento é semelhante ao comportamento dos materiais rijos, em que a maioria da energia gerada sobre a fratura é dada como energia plástica. A energia plástica, definida como a quantidade de energia necessária para produzir uma deformação após o limite do comportamento elástico, causou um aumento na capacidade do material para suportar cargas mesmo após a formação de fissuras.

Portanto, Batayneh, Marie e Asi (2008) concluíram que concretos com uma maior percentagem de borracha possuem alta tenacidade.

A queda de resistência à compressão de concretos com adição de resíduo de borracha depende principalmente da qualidade da pasta, aderência entre agregados e pasta, e dureza e densidade dos agregados. Substituindo os agregados naturais mais densos por agregados mais leves, a menor densidade da borracha poderá funcionar como um concentrador de tensão, causando microfissuras da matriz de concreto, levando a uma perda de resistência (KHATIB; BAYOMY, 1999).

Ganjan, Khorami e Maghsoudi (2009), utilizando partículas de borracha em concretos convencionais, realizaram misturas com 5%, 7,5% e 10% de partículas de pneus em substituição ao cimento, e as mesmas proporções de lascas de pneus em substituição aos agregados grossos. Os autores fixaram uma relação água/cimento de 0,5 e utilizaram superplastificante em ambas as misturas, com 0,4% em peso de cimento. As reduções de resistência à compressão se mostraram menores empregando substituições de borracha em pó. Os autores concluíram que, durante a vibração das amostras, as partículas de borracha tenderam a se mover em direção à superfície superior do molde, resultando em uma alta concentração de partículas de borracha na camada superior dos corpos de prova. Eles afirmaram que o módulo de elasticidade do concreto com resíduos está diretamente relacionado ao volume de borracha empregado, de modo que um aumento de substituição dos agregados por borracha causará reduções no módulo de elasticidade.

Zheng, Huo e Yuan (2008) ensaiaram vigas simplesmente apoiadas, elaboradas com concreto com borracha, visando determinar as relações entre amortecimento em pequena deformação e quantidade de partículas de borracha no concreto. A Razão de Amortecimento é o principal parâmetro que representa a propriedade dos materiais na redução de vibrações. As razões de amortecimento de concreto emborrachado aumentaram consideravelmente com o aumento do teor de borracha. No entanto, a relação entre a razão de amortecimento e teor de borracha não se mostrou linear. Zheng, Huo e Yuan (2009) indicaram que o teor ideal de borracha deveria ser inferior a 30% do volume de agregado gráúdo, a fim de obter propriedades estáticas e dinâmicas satisfatórias. Substituições com maiores porcentagens de borracha causaram uma grande redução no módulo de elasticidade do concreto.

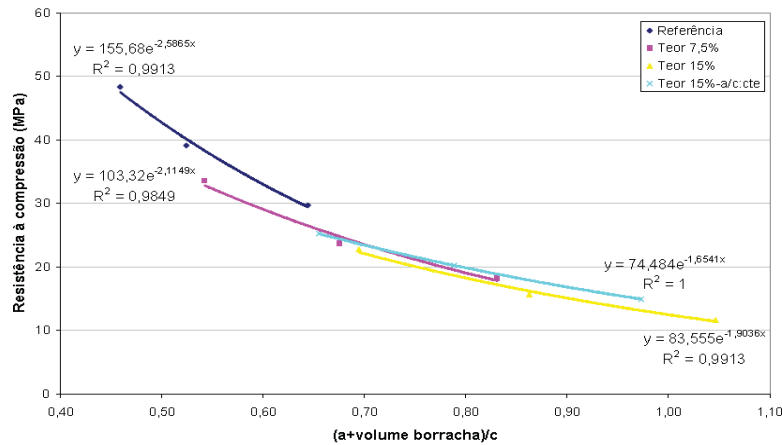
Fioriti (2002) estudou o efeito da incorporação de resíduos de borracha em concretos destinados à confecção de blocos de alvenaria. Foram produzidos blocos de vedação (sem função estrutural), substituindo-se 15%, 20% e 25% de resíduo em volume, e blocos estruturais (com função estrutural), para variações em 10%, 13% e 15% de resíduo em volume. O autor constatou que as dosagens que tiveram um aumento da quantidade de brita, e conseqüentemente uma redução de areia, obtiveram um ganho de resistência melhor.

O comportamento do concreto quando submetido a elevadas temperaturas está diretamente ligado aos materiais que o compõe. Li et al. (2011) estudaram a influência da elevada temperatura em concretos de alta resistência com adição de resíduos de borracha, para substituições de 1%, 2%, 3% e 4%, em relação ao volume de agregado miúdo. A investigação das micrografias do resíduo submetido ao fogo indica que as partículas de borracha podem impedir o lascamento (*spalling*), sendo observada maior resistência ao lascamento para substituições de 1%.

França (2004) estudou a aderência entre o aço e o concreto elaborado sem e com 10% de substituição em volume de agregado miúdo por resíduos de borracha de pneu. Para garantir que os concretos tivessem as mesmas propriedades no estado fresco, o autor fixou a relação água/cimento e o abatimento. O autor observou que o traço com resíduo apresentou um aumento no consumo de cimento de 9,3%: 295,57 kg/m³ para o concreto referência e 325,80 kg/m³ para o concreto com adição de resíduo. Mesmo assim houve uma redução das características mecânicas (tensões de compressão e tração), análogo ao obtido por outros autores que pesquisaram o assunto. De acordo com os ensaios dos tirantes, o aumento do diâmetro da barra aumentou o coeficiente de aderência, que, por sua vez, foi mais expressivo para o concreto referência, se comparado com o concreto com resíduos de pneus.

Giacobbe (2008) usou o Método de Dosagem IPT/EPUSP para verificar se a diminuição da resistência à compressão decorrente do aumento do teor de borracha na mistura é compatível com a curva de Abrams. Na Figura 2.15, pode-se observar que, ao se adicionar o volume de borracha na relação água/cimento, o autor pode concluir que quanto maior for a relação “água/cimento + teor de borracha inserido”, menor será sua resistência à compressão, atendendo assim a teoria de Abrams (1924).

Figura 2.15 - Relação entre a resistência à compressão e a relação (água + volume de borracha/cimento)



Fonte: Giacobbe (2008, p. 76)

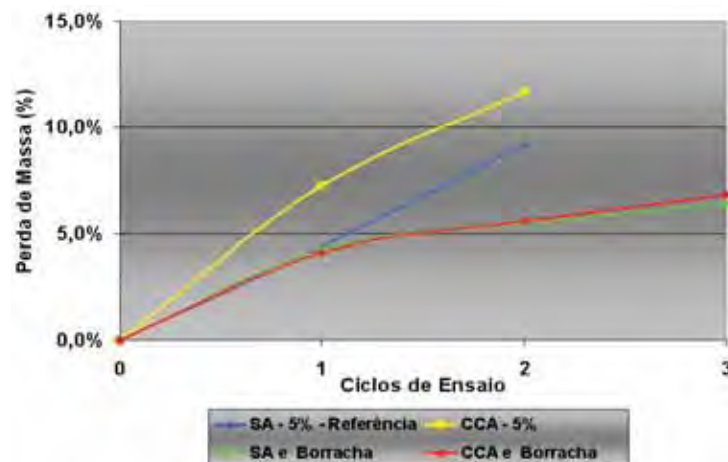
Estudos de concretos autoadensáveis com resíduos de borracha foram feitos por Bignozzi e Sandrolini (2006), nas quais os autores utilizaram 22,2% e 33,3% em volume de borracha de pneus moídos como agregado fino em substituição de areia. Duas faixas de distribuição do tamanho dos grãos foram escolhidas: de 0,5 mm a 2 mm e de 0,05 mm a 0,7 mm. As misturas foram elaboradas utilizando-se aditivo superplastificante e agente modificador de viscosidade. A coesão e a ausência de segregação das misturas foram estimadas visualmente, mostrando que todas as misturas contendo resíduos de pneus tinham boa capacidade de fluxo e boa passagem à presença de obstáculos. É importante salientar que a máxima deformação para alguns traços com borracha ocorreram em torno de 0,5%, quando normalmente concretos convencionais não chegam a ultrapassar de 0,2% a 0,3%. Pode-se concluir que a adição de resíduos de borracha aumentou a deformabilidade do concreto. Após as tensões máximas terem sido atingidas, ciclos de carga/descarga mostraram que as resistências à compressão diminuíram gradualmente, indicando que as amostras não foram totalmente fraturadas devido à presença da borracha, e puderam suportar cargas pós-falha com deformações crescentes em função da adição de resíduos.

Vasconcelos e Akasaki (2010) avaliaram a durabilidade do concreto de alto desempenho (CAD) com adição de resíduo de borracha, sílica ativa (SA) e cinza da casca de arroz (CCA).

Foram feitos ensaios de durabilidade dos concretos, nas quais estes foram submetidos a diversos processos de degradação, como a ação da água, temperatura, sais e solução ácida. O formato alongado do resíduo da borracha de pneu e sua superfície áspera contribuíram para o aprisionamento de bolhas de ar; consequentemente, os traços com a adição de borracha tiveram um aumento na porcentagem de ar incorporado dos concretos (VASCONCELOS; TRIGO, 2009, 2008).

Entretanto, a adição de borracha promoveu queda na absorção, quando comparada com os outros traços sem adição, e não indicou grande variação da absorção entre 7 e 28 dias. A queda de resistência à compressão nos traços dosados com borracha de pneu e sílica ativa foi menor se comparado com o traço contendo borracha de pneu e CCA. No entanto, a adição de borracha contribuiu na contenção do estilhaçamento na ruptura do CAD, sendo verificados menores comprimentos das fissuras longitudinais. Nos ensaios de perda de massa por ataque químico com a utilização de ácido láctico, os traços que tiveram a adição de borracha conseguiram impedir a entrada de agentes agressores mais efetivamente, mostrando sua maior capacidade de impermeabilização. Observa-se que, mesmo após o 3º ciclo de ensaio, os traços contendo borracha não apresentaram diminuição da massa, em relação aos traços do 2º ciclo e sem adição de borracha, como é mostrado na Figura 2.16. O ensaio de abrasão por erosão mostrou que os traços contendo borracha obtiveram as menores perdas de massa superficial, enquanto os mesmos sem essa adição apresentaram maior perda.

Figura 2.16 - Perda de massa por ataque químico



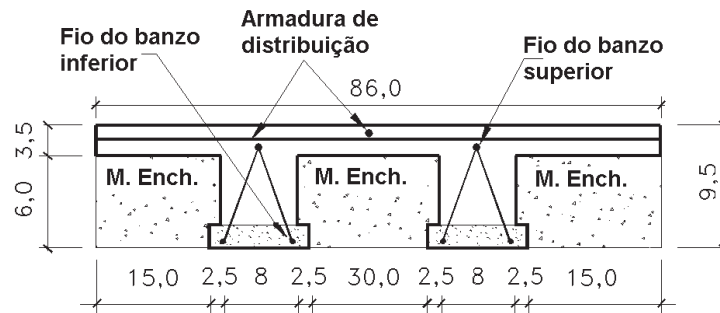
Fonte: Vasconcelos (2009, p. 83)

2.3 Pesquisas realizadas na UNESP – Campus de Ilha Solteira

2.3.1 Dissertação de Trigo (2008)

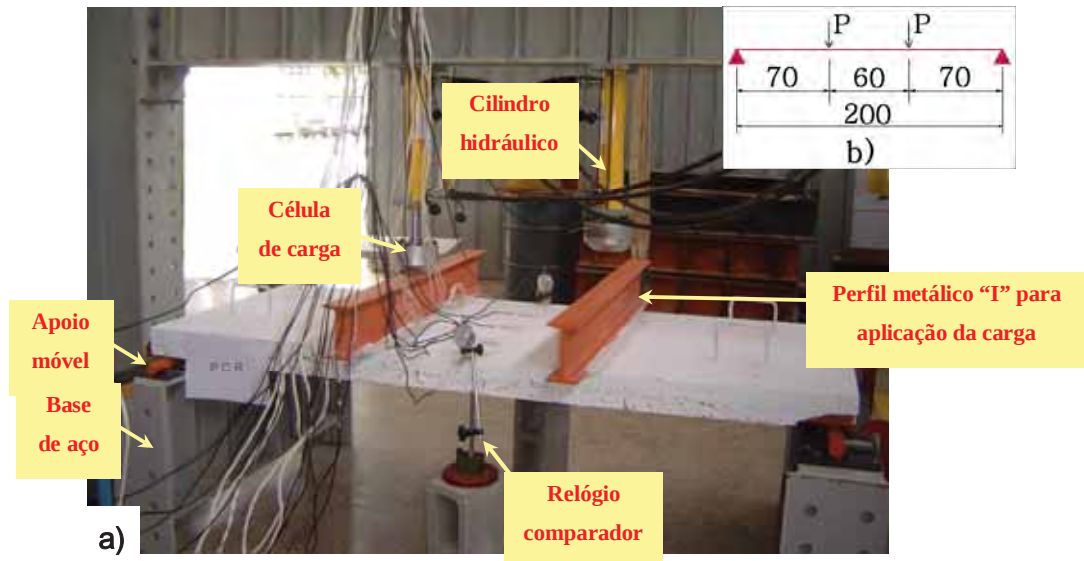
Embora Trigo (2008) tenha ensaiado seis modelos de lajes treliçadas pré-moldadas unidirecionais, sendo três deles com resíduo de borracha de pneu incluído no concreto da capa das lajes, e outros três sem, Trigo et al. (2008) apresenta apenas dois desses modelos, por serem representativos do que aconteceu nos outros. Um deles, com resíduo de borracha de pneu incluído no concreto da capa das lajes, foi denominado PCR, e o outro, sem resíduo, PSR. Ambos foram constituídos por duas vigotas pré-moldadas treliçadas de 210 cm de comprimento, lajotas cerâmicas e capa de concreto. A seção transversal em “T” é mostrada na Figura 2.17. Foram utilizados resíduos de borracha de pneu retidos nas peneiras de abertura 2,38 mm, 1,19 mm e 0,075 mm, em substituição de 10% do volume de agregado miúdo. Os modelos de laje foram ensaiados à flexão pura, aos 28 dias, conforme mostrado na Figura 2.18.

Figura 2.17 - Seção transversal dos modelos: dimensões em cm e comprimento igual a 210 cm



Fonte: Trigo et al. (2008)

Figura 2.18 - Aparato para o ensaio de flexão (a) e esquema estático dos modelos ensaiados, com dimensões em cm (b)



Fonte: Adaptada de Trigo et al. (2008)

A resistência do concreto à compressão requerida para os modelos foi de 20 MPa. Deste modo, foram feitas três diferentes dosagens de concreto denominadas de:

- CSR – E 32: concreto sem resíduo, confeccionado com cimento CP II E 32 e usado na capa dos modelos de lajes;
- CCR – E 32: concreto com resíduo, confeccionado com cimento CP II E 32 e usado na capa dos modelos de lajes. Nesse concreto, 10% do agregado miúdo, em volume, foi substituído por resíduo de borracha;
- CSR – ARI: concreto sem resíduo, confeccionado com cimento CP V ARI Plus e usado nas vigotas treliçadas dos modelos de lajes.

Nas Tabelas 2.2 e 2.3, podem ser observadas, respectivamente, as quantidades de materiais utilizados em cada dosagem experimental e as médias aritméticas dos resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, massa específica e teor de ar incorporado. As características da lajota cerâmica, da armadura de distribuição e da armadura treliçada são apresentadas nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente.

Tabela 2.2 – Dosagem dos concretos usados nos modelos de laje

Traço	Teor de Argamassa (%)	Consumo de Material em kg/m ³					Abatimento (mm)
		Cimento	Brita	Areia	Borracha	Água	
CSR – E 32	53,6	319,1	1060,0	844,5	–	198,0	78,0
CCR – E 32	54,8	377,1	1030,9	734,4	33,5	200,0	79,0
CSR – ARI	53,6	310,6	1054,9	845,9	–	202,0	77,0

Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios usados para caracterizar os concretos

Traço	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
CSR – E 32	27,6	3,4	31,0	2,382	4,1
CCR – E 32	22,5	3,1	27,8	2,299	6,5
CSR – ARI	29,3	3,8	31,5	2,411	3,4

Tabela 2.4 – Características físicas da lajota cerâmica (Fonte: LAJES ARTCON)

Dimensões (altura x largura x comprimento) em cm	Peso unitário (kg)
6 x 20 x 30	3,5

Tabela 2.5 – Características físicas do aço usado como armadura de distribuição, posicionado na capa da laje (Fonte: NBR 7480:1996)

Fio/Barra	Diâmetro (cm)	Peso (kg/m)	Perímetro (cm)	Área (cm ²)	Resistência característica de escoamento (MPa)
4,2 (CA 60)	0,42	0,109	1,32	0,139	600
6,3 (CA 50)	0,63	0,245	1,88	0,312	500

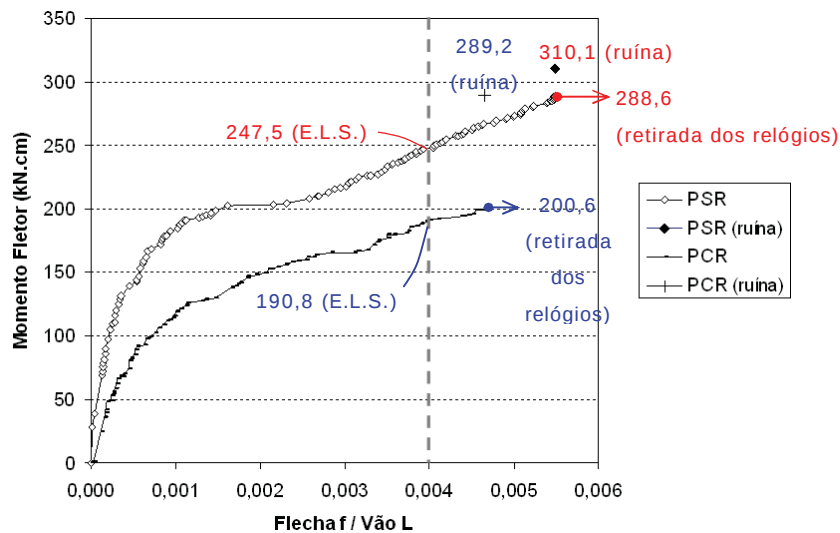
Tabela 2.6 – Características da treliça - aço CA-60 (Fonte: COMERCIAL GERDAU)

Designação Gerdau	Designação NBR 14862/02	Peso (Kg/m)	Altura (cm)	Banzo superior (mm)	Diagonal (mm)	Banzo inferior (mm)
TG 8 L	TR 08644	0,735	8	6,0	4,2	4,2

Os modelos foram ensaiados até o instante em que, embora houvesse tentativa de aplicação de carregamento, o mesmo só apresentava aumento de deformação.

São mostrados, na Figura 2.19, os resultados comparativos entre os modelos de laje sem resíduo de borracha (**PSR**) e com resíduo (**PCR**), considerando-se o valor do deslocamento vertical, representado pela relação flecha/vão, em relação ao momento fletor atuante. Cabe mencionar que as curvas dos modelos PSR e PCR são apresentadas, respectivamente, até os momentos fletores de **288,0 kN.cm** e **200,6 kN.cm**, correspondentes aos instantes em que os relógios comparadores foram removidos, para segurança do equipamento. Embora sem o valor do deslocamento correspondente, incluiu-se também, na Figura 2.19, os valores dos momentos de ruína, para os modelos PSR e PCR, respectivamente, iguais a **310,1 kN.cm** e **289,2 kN.cm**. Observa-se que a inclusão do resíduo provocou uma diminuição da capacidade resistente do modelo da ordem de 7%. Avaliando os resultados experimentais apresentados na Figura 2.19, observa-se que a presença de resíduos no concreto da capa do modelo PCR resultou em valores de flechas superiores aos do modelo PSR, para um mesmo momento fletor.

Figura 2.19 - Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos PSR e PCR

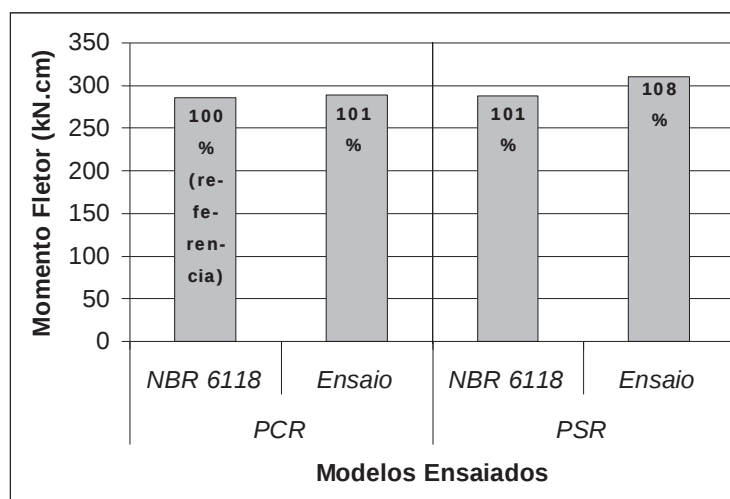


Fonte: Adaptado de Trigo et al. (2008)

Com relação ao estado limite último, a NBR 6118:2003 prevê, para a ruína desses modelos, um comportamento dúctil correspondente ao domínio 2, que, por sua vez, é caracterizado pela deformação no aço igual a 10‰ e deformação no concreto inferior a 3,5‰.

Para os modelos **PSR** e **PCR**, os momentos fletores de ruína previstos, com base nas recomendações da NBR 6118:2003, foram praticamente os mesmos, sendo iguais a **288,3 kN.cm** e **286,1 kN.cm**, respectivamente, embora as resistências do concreto à compressão fossem diferentes, sendo iguais, respectivamente, a **27,6 MPa** e **22,5 MPa**. A proximidade dos valores dos momentos resistentes decorre do fato de que a influência da resistência do concreto neste domínio é pequena, uma vez que é a armadura que está com uma deformação limite convencional de 10‰. Observa-se que os valores calculados foram menores que os observados nos ensaios experimentais, iguais a **310,1 kN.cm** e **289,2 kN.cm**, para os modelos PSR e PCR, respectivamente (Figura 2.20). Esta análise não envolve parâmetros estatísticos e nem coeficientes de segurança, tendo a finalidade apenas de indicar que, para as condições específicas deste ensaio, apesar da inclusão do resíduo ter provocado uma diminuição da capacidade resistente do protótipo da ordem de 7%, o mesmo apresentou resistência ligeiramente superior àquela prevista pela NBR 6118:2003. Sendo assim, tem-se como um indicativo que a inclusão do resíduo não afetou o dimensionamento elaborado com base na NBR 6118:2003, sendo, portanto, viável a sua utilização do ponto de vista do comportamento estrutural frente a uma avaliação de sua resistência. Para efeito de comparação, na Figura 2.20, considerou-se como 100% o valor correspondente ao calculado conforme a NBR 6118:2003 para o modelo PCR.

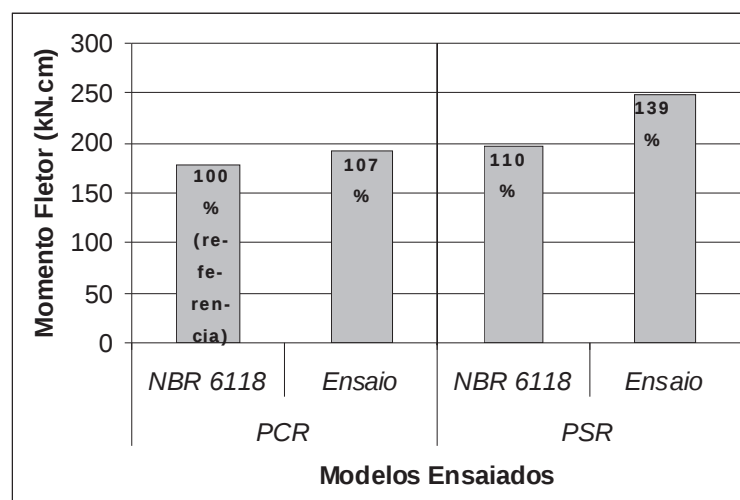
Figura 2.20 - Estado Limite Último: o momento fletor de ruína previsto pela NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança)



Fonte: Adaptado de Trigo et al. (2008)

Com relação ao estado limite de serviço, associado à aceitabilidade sensorial, na limitação visual, a NBR 6118:2003 estabelece um limite para a flecha máxima correspondente ao valor do vão dividido por 250, para elementos apoiados em suas extremidades. Por sua vez, este valor corresponde, na Figura 2.19, a uma relação f/L igual a 0,004. Observando-se os resultados obtidos experimentalmente para os modelos PSR e PCR, fica claro que o momento fletor que provoca esta flecha sofre redução da ordem de 23% ao adicionar os resíduos, uma vez que, para esta relação f/L , os modelos **PSR** e **PCR** estavam submetidos aos momentos fletores de **247,5 kN.cm** e **190,8 kN.cm**, respectivamente. Utilizando-se as recomendações da NBR 6118:2003 para o cálculo da flecha imediata em vigas de concreto armado, os valores dos momentos fletores referentes à flecha limite, para os modelos PSR e PCR, foram, respectivamente, iguais a **195,9 kN.cm** e **177,5 kN.cm** (Figura 2.21). Pode-se observar que, para os dois modelos, a verificação do estado limite de serviço está a favor da segurança, uma vez que a flecha máxima permitida somente seria atingida com momentos fletores maiores que os previstos pela NBR 6118:2003. Ou seja, na prática, os modelos apresentam flechas menores que as calculadas segundo as recomendações da NBR 6118:2003. Para efeito de comparação, na Figura 2.21, considerou-se como 100% o valor correspondente ao calculado conforme a NBR 6118:2003 para o modelo PCR.

Figura 2.21 - Estado Limite de Serviço: o momento fletor que provoca a flecha máxima segundo a NBR 6118:2003 é menor que o observado experimentalmente (a favor da segurança)



Fonte: Adaptado de Trigo et al. (2008)

Nos cálculos referentes ao Estado Limite Último e ao Estado Limite em Serviço foram consideradas apenas as armaduras tracionadas posicionadas nas sapatas, correspondendo, na Figura 2.17, às áreas dos fios do banzo inferior.

Os autores, com base nas condições específicas dos materiais utilizados e dos ensaios realizados, concluíram que:

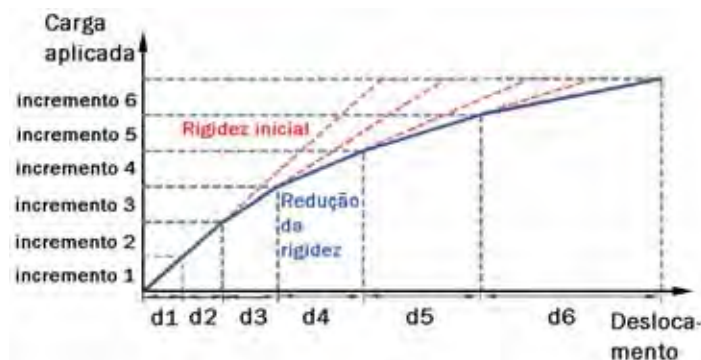
- para que os modelos sem e com resíduo tivessem uma resistência à compressão próxima entre si, a adição de resíduos de borracha de pneu nos concretos provocou um aumento no consumo de cimento da ordem de 18%;
- o fato do resíduo de borracha atuar como vazios dentro do concreto, além de aumentar o teor de ar incorporado na mistura, fez com que o módulo de elasticidade do concreto fosse menor, o que gerou maiores flechas;
- o uso de resíduos de borracha proporciona concretos com menor módulo de elasticidade e maior teor de ar incorporado, propriedades essas que também influenciam na queda da resistência à compressão dos concretos; ainda assim, a utilização do resíduo no concreto da capa de lajes pode ser interessante, já que o aumento no teor de ar incorporado proporciona diminuição na massa específica desse concreto, acarretando em estruturas ligeiramente mais leves;
- utilizando-se a NBR 6118:2003 como uma referência para a análise do comportamento estrutural dos modelos PCR e PSR, pode-se observar que o comportamento estrutural, tanto com relação ao Estado Limite Último, como para o Estado Limite de Serviço, foi considerado satisfatório para os dois modelos. Esta conclusão refere-se às condições específicas dos ensaios realizados, não podendo ser generalizada. Destaca-se que não foi feita nenhuma análise estatística dos resultados e que, para outros domínios de cálculo, novos ensaios devem ser realizados.

2.3.2 Dissertação de Santos (2009)

Santos (2009), com base em diferentes métodos de cálculo, avaliou as flechas imediatas dos modelos de lajes pré-moldadas treliçadas ensaiadas por Trigo (2008). Além da flecha ter sido calculada pela expressão de Branson, indicada pela NBR 6118 (ABNT, 2003), também foram utilizados outros métodos descritos como CEB 90-discretizado, Estádios I e II – discretizado e Branson – discretizado.

Nos métodos “discretizados”, Santos (2009) utilizou o programa computacional ANSYS®, versão 11, de elementos finitos, que permitiu a consideração da aplicação do carregamento de modo incremental. Droppa Junior e El Debs (2001) destacam que o carregamento incremental considera que, em cada etapa de carga, há linearidade entre esforços e deslocamentos. A rigidez de cada elemento finito é atualizada em cada etapa de incremento de carga, sendo esta rigidez definida em função do maior momento fletor que atua neste elemento, relacionado, por sua vez, ao nível de solicitações da etapa anterior. Deste modo, adapta-se o problema não-linear em uma soma de parcelas lineares. Destaca-se que quanto maior for a quantidade de etapas de carregamento, maior será a precisão dos resultados. Santos (2009) adotou 20 etapas de carregamento. A Figura 2.22 representa o exemplo de um gráfico que relaciona a carga ao deslocamento de um determinado elemento estrutural submetido ao processo incremental.

Figura 2.22 – Diagrama de carga x deslocamento (processo incremental)

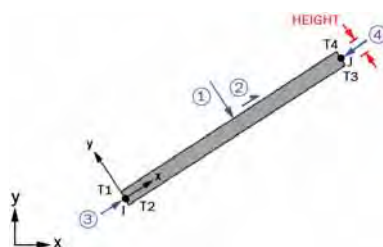


Fonte: Santos et al. (2010)

Observa-se, no exemplo mostrado na Figura 2.22, que o momento de fissuração foi ultrapassado pelo momento atuante após o terceiro incremento de carga, e, conseqüentemente, tem-se uma diminuição da rigidez. Para considerar a não-linearidade entre o carregamento e o deslocamento vertical da viga, ao invés de se considerar uma diminuição do momento de inércia da seção transversal, quando o momento de fissuração fosse atingido, foi feita uma redução no módulo de elasticidade. Este procedimento foi adotado em função de se ter uma maior facilidade de programação na atualização do módulo de elasticidade em relação à atualização do momento de inércia, que envolveria manipulações diretamente na matriz de rigidez da estrutura. Na modelagem realizada por Santos (2009), o modelo da laje foi subdividido em 40 elementos lineares finitos.

O elemento finito usado foi o BEAM3-2D, que é bidirecional, com três graus de liberdade em cada nó, com translação em X e Y, e rotação em torno do eixo Z (Figura 2.23). Para definir as características da seção transversal, são necessários apenas os valores da área, do momento de inércia e da altura da viga.

Figura 2.23 – Elemento Finito – Beam3-2D



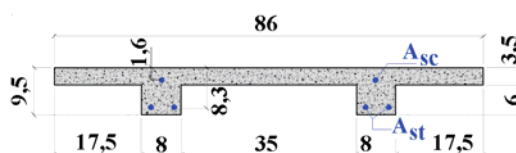
Fonte: ANSYS® (2006)

São mostrados apenas os resultados relativos aos modelos apresentados por Trigo et al. (2008). Na Figura 2.24 e na Tabela 2.7 apresentam-se as características geométricas dos modelos utilizadas nos cálculos.

Tabela 2.7 - Características geométricas dos modelos (Santos et al., 2010)

Características Geométricas	Valores
Área da seção transversal (A_g , em cm^2)	397
Altura (h , em cm)	9,5
Altura útil (d , em cm)	8,3
Altura da mesa (h_f , em cm)	3,5
Posição da armadura comprimida (d' , em cm)	1,6
Largura (b , em cm)	86
Largura da nervura (b_w , em cm)	8
Centro geométrico em y (y_{cg} , em cm)	2,9
Momento de inércia (I_c , em cm^4)	2 237,5
Área de aço total na tração (A_{st} , em cm^2)	0,55
Área de aço total na compressão (A_{sc} , em cm^2)	0,56

Figura 2.24 - Seção transversal dos modelos usada nos cálculos (unidades em cm)



Fonte: Santos et al. (2010)

Os resultados obtidos da análise experimental dos modelos de laje foram carga aplicada e deslocamento vertical da região central. Como a laje foi instrumentada com relógios comparadores após a colocação dos perfis metálicos usados para transferir a carga aplicada pelos macacos hidráulicos à laje, os deslocamentos obtidos estão relacionados somente com a carga aplicada pelos macacos, não se considerando as flechas provocadas pelo peso dos perfis e pelo peso próprio da laje. Nos gráficos apresentados por Santos (2009), ao contrário de Trigo et al. (2008), os gráficos não saem da origem. Pode-se observar que o momento fletor na seção mais solicitada começa a partir de um valor igual a 77 kN.cm, que é justamente referente ao peso próprio do modelo somado ao dos perfis.

Além disso, em Santos (2009), o cálculo do momento de fissuração foi feito com base na resistência da capa e não da sapata, considerando-se, ainda o valor de $f_{ct,m}$, ao invés do valor correspondente ao $f_{ctk,inf}$. O modelo PSR e PCR apresentados por Trigo et al. (2008) são apresentados em Santos et al. (2010) como sendo, respectivamente, os modelos P3 (SR) e P3 (CR).

2.3.2.1 Branson

Para o cálculo da flecha foi utilizada a expressão de Branson (1968), adotada pela NBR 6118:2003, já mostrada na Equação 2.5, no item 2.1.7.2., que define uma rigidez equivalente (EI_{eq}) constante ao longo de todo o elemento estrutural. Deste modo, a flecha imediata foi obtida por meio da Equação 2.6, baseada na teoria da Resistência dos Materiais, para o esquema estático apresentado na Figura 2.25.

$$v_{max} = \frac{P \cdot a (3\ell^2 - 4a^2)}{24 (EI)_{eq}}, \text{ onde} \quad (2.6)$$

v_{max} é o deslocamento máximo (ou flecha) no meio do vão;

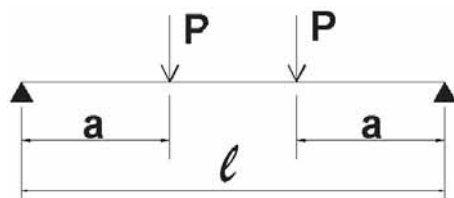
P é a força concentrada aplicada;

a é a distância entre os apoios e as forças concentradas;

ℓ é a distância entre os apoios;

$(EI)_{eq}$ é a rigidez calculada pela expressão da NBR 6118:2003, mostrada na Equação 2.5.

Figura 2.25 - Esquema estático dos modelos de lajes pré-moldadas treliçadas



Fonte: Fazzan (2011)

As características mecânicas utilizadas neste método estão apresentadas na Tabela 2.8, para cada o modelo apresentado por Trigo et al. (2008).

Tabela 2.8 - Características mecânicas utilizadas no método de Branson (Santos et al., 2010)

Parâmetros	Modelos sem resíduo (P3-SR)	Modelos com resíduo (P3-CR)
Resistência à compressão (f_c , em MPa)	27,57	22,54
Resistência à tração axial ($f_{ct,m}$, em MPa)	2,74	2,39
Módulo de elasticidade do concreto (E_c , em GPa)	29,40	26,59
Módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs} , em GPa)	24,99	22,60
Momento de inércia no estágio II (I_{II} , em cm^4)	276,2	302,83
Momento de fissuração (M_f , em kN.cm)	111,4	97,4
Resistência característica do aço (f_{ym} , em MPa)	600	600
Módulo de elasticidade do aço (E_s , em GPa)	210	210

2.3.2.2 Branson - discretizado

Por uma questão de curiosidade do autor, também foi feita a aplicação da expressão de Branson, não mais ao elemento estrutural como um todo, mas aos elementos finitos que o constituem. Neste caso, os recursos do programa computacional ANSYS® tiveram que ser utilizados.

2.3.2.3 Estádios I e II - discretizado

O elemento estrutural de concreto armado, inicialmente, apresenta um comportamento linear em relação aos esforços solicitantes, uma vez que a rigidez da seção transversal permanece constante.

Após o momento de fissuração ser atingido na seção mais solicitada, começa o início do processo de fissuração e ocorre uma diminuição da rigidez nessa seção. O cálculo do momento de inércia após a fissuração do concreto, no Estádio II (I_{II}), e do momento de fissuração (M_f) são determinados através das Equações 2.3 e 2.4, já apresentadas, respectivamente. Destaca-se que a seção transversal do concreto armado, no Estádio II, apresentou o comportamento mecânico de uma seção retangular, embora geometricamente ela tenha um formato de “duplo T”.

Utilizando-se novamente o programa computacional ANSYS®, a definição do valor da rigidez de cada elemento finito foi feita em função do maior momento fletor nele aplicado: se o elemento não estivesse fissurado, o momento de inércia da seção transversal corresponderia à da seção bruta (Estádio I); se o elemento estivesse fissurado, o momento de inércia seria calculado com base nas hipóteses do Estádio II. As características mecânicas utilizadas neste método também estão apresentadas na Tabela 2.8.

2.3.2.4 CEB 90 - discretizado

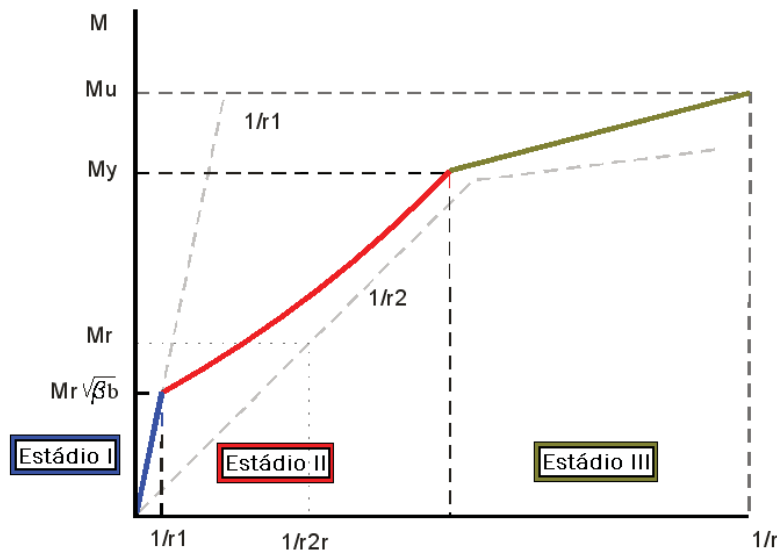
O método do CEB 90 (1993) considera a não-linearidade do elemento estrutural de concreto armado, decorrente do surgimento e ampliação das fissuras, por meio de uma diminuição da rigidez do elemento estrutural, e, conseqüentemente, por meio de uma diminuição do valor do momento de inércia. Este método relaciona a curvatura ($1/r$) de um elemento sob flexão pura ao momento fletor atuante (M), para a determinação da rigidez ($E_c I$) do elemento estrutural, conforme mostrado na Equação 2.7.

$$(1/r) = \frac{M}{E_c I} \longrightarrow E_c I = \frac{M}{(1/r)} \quad (2.7)$$

O método do CEB 90 (1993) considera que o elemento de concreto armado pode, em função da relação entre o momento (M) e a curvatura ($1/r$), trabalhar em três estádios, conforme mostrado na Figura 2.26. No estágio I, o concreto armado abaixo da linha neutra encontra-se íntegro e a rigidez do elemento estrutural é constante; deste modo, tem-se um comportamento linear, onde a deformação do concreto é igual à do aço. Esse estágio termina quando o momento atuante atinge o valor correspondente ao produto do momento de fissuração pela raiz quadrada do coeficiente β_b , tendo início o Estádio II.

Nesse estágio, inicia-se o processo de formação das fissuras. Com o acréscimo de carregamento, as fissuras ampliam suas aberturas, fazendo com que ocorra uma diminuição da rigidez do elemento estrutural, que, por sua vez, não apresenta mais um comportamento linear. Quando ocorre a formação e ampliação das fissuras, a curvatura é influenciada pelo efeito “tension stiffening”, que são regiões íntegras de concreto tracionado localizadas entre fissuras e que têm uma parcela de contribuição na rigidez do elemento estrutural, diminuindo a sua curvatura. Por fim, no Estádio III, após o momento atuante ultrapassar o valor do momento de escoamento ou de plastificação (M_y), há uma variação sensível da rigidez. O elemento praticamente pára de absorver os esforços e escoar até atingir o momento último (M_u), correspondente à ruína. As formulações para determinar as curvaturas e os momentos podem ser encontradas em Santos (2009) e Droppa Júnior (1999).

Figura 2.26 – Momento x Curvatura



Fonte: CEB-90 (1999), Santos et al. (2010)

Neste caso, o programa computacional calculou a flecha imediata a partir do comportamento dos elementos finitos que subdividiram o protótipo. As características mecânicas utilizadas neste método estão apresentadas na Tabela 2.9.

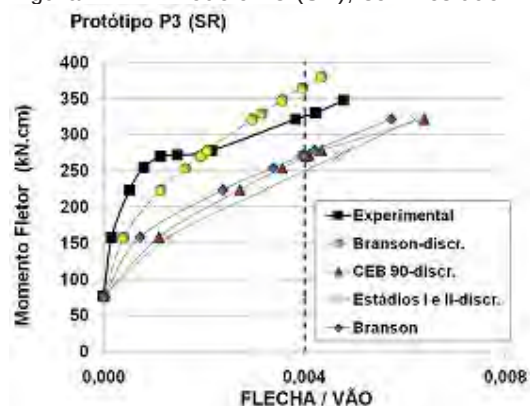
Tabela 2.9 – Características mecânicas utilizadas no método CEB 90 – discretizado

Parâmetros	Modelo sem resíduo P3(SR)	Modelo com resíduo P3(CR)
Resistência média à tração (f_{ctm} , em MPa)	2,81	2,41
Módulo de elasticidade do concreto (E_c , em GPa)	30,15	28,19
Módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs} , em GPa)	25,63	23,96
Momento de inércia no Estádio II (I_{II} , em cm^4)	253,0	274,5
Momento de fissuração (M_r , em kN.cm)	114,0	81,6
Momento de fissuração . $\sqrt{\beta b}$ ($M_r \cdot \sqrt{\beta b}$, em kN.cm)	102,0	73,0
Momento de escoamento do aço ou de plastificação do concreto (M_y , em kN.cm)	268,7	267,7
Momento último (M_u , em kN.cm)	287,5	285,4
Curvatura em M_y ($1/r_y$, em cm^{-1}) $\times 10^{-4}$	4,04	4,07
Curvatura em M_u ($1/r_u$, em cm^{-1}) $\times 10^{-3}$	1,30	1,31
Resistência característica do aço (f_{ym} , em MPa)	600	600
Módulo de elasticidade do aço (E_s , em GPa)	200	200
Domínio de cálculo	2ª	2ª

2.3.2.5 Análise dos resultados

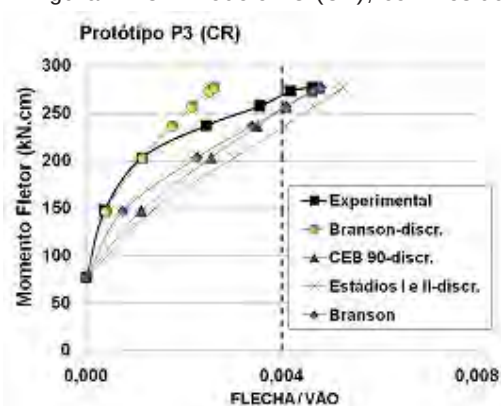
As comparações foram feitas tendo-se como referência um deslocamento igual a $\ell/250$, sendo ℓ o vão teórico do modelo. Este deslocamento, conforme a NBR 6118:2003, está associado a um Estado Limite em Serviço, de aceitabilidade sensorial na limitação visual. Nos gráficos mostrados nas Figuras 2.27 e 2.28, este limite corresponde a uma relação flecha/vão igual a 0,004. Nessas figuras, apresentam-se os gráficos relacionados às flechas experimentais e às calculadas pelos métodos já mencionados. Destaca-se que os relógios comparadores foram retirados antes da ruína dos protótipos, para evitar danos aos equipamentos. A Tabela 2.10 apresenta os valores dos momentos fletores correspondentes ao Estado Limite Último e ao Estado Limite em Serviço.

Figura 2.27 – Modelo P3 (SR), sem resíduo



Fonte: Santos et al. (2010)

Figura 2.28 – Modelo P3 (CR), com resíduo



Fonte: Santos et al. (2010)

Tabela 2.10– Valores dos momentos fletores referentes às situações correspondentes aos Estados Limites Último e em Serviço

		Modelo sem resíduo P3(SR)	Protótipos com resíduo P3(CR)
Estado Limite Último*	Experimental	380,4 (100%)	364,0 (100%)
	Calculado	287,5 (76%)	285,4 (78%)
Estado Limite em Serviço **	Experimental	325,4 (100%)	268,7 (100%)
	Branson	272,8 (84%)	254,6 (95%)
	CEB 90 –discr.	269,8 (83%)	254,3 (95%)
	Estádios I e II	250,2 (77%)	234,6 (87%)
	Branson – discr.	366,6 (113%)	***

Observações:

01) Os valores experimentais foram tomados como sendo as referências para as comparações.

02) * Os valores que correspondem aos momentos de ruína experimentais foram calculados com base no CEB 90, que são praticamente os mesmos obtidos conforme a recomendação da NBR 6118.

03) ** O Estado Limite em Serviço foi definido no instante em que o protótipo atingiu a relação flecha/vão igual a 0,004.

04) *** Valor não calculado por estar muito acima do experimental.

Fonte: Santos et al. (2010)

2.3.2.6 Conclusões

Com relação ao Estado Limite Último, observa-se que os momentos fletores últimos calculados para os modelos sem e com resíduo foram iguais a 76% e 78% dos valores experimentais, em média, respectivamente.

Estes resultados mostram que os valores calculados estão a favor da segurança e a inclusão do resíduo não afetou significativamente a resistência dos modelos. Destaca-se, no entanto, que, na situação de cálculo analisada, relativa ao Domínio 2, o aço escoou com uma deformação correspondente à deformação máxima permitida pela norma (10‰), e o concreto comprimido apresenta uma deformação inferior a 3,5‰, estando, deste modo, pouco solicitado. Para verificar de um modo mais completo a influência da inclusão do resíduo de borracha no comportamento estrutural, outros modelos, com uma maior área de armadura tracionada, precisariam ser ensaiados. Nesse caso, os modelos trabalhariam no Domínio 3, onde o aço continuaria a escoar, mas com deformações menores que a máxima, e o concreto estaria sendo mais solicitado, estando submetido a uma deformação máxima igual a 3,5‰.

Com relação ao Estado Limite em Serviço, definido a partir de uma flecha/vão igual a 0,004, apresentam-se as seguintes conclusões:

- os métodos de Branson e do CEB 90-discretizado apresentaram resultados muito próximos entre si e também foram os que apresentaram os resultados mais próximos dos experimentais, a favor da segurança, correspondentes a 83,5% e 95%, em média, conforme a ausência e a presença de resíduos, respectivamente;
- o método dos Estádios I e II-discretizado apresentou resultados a favor da segurança, correspondentes, em média, para os protótipos sem e com resíduos, iguais a 77% e 87%, respectivamente, tendo sido mais conservador que os métodos de Branson e do CEB 90-discretizado;
- o método de Branson-discretizado apresentou valores contrários à segurança, indicando que a aplicação da formulação diretamente aos elementos finitos resultou em uma estrutura mais rígida do que a real.

Por fim, destaca-se que as conclusões apresentadas são específicas para as condições de ensaio adotadas, servindo apenas para se obter uma ideia do comportamento estrutural mediante a utilização de resíduos de borracha no concreto complementar de lajes pré-moldadas treliçadas.

2.4 Aditivos Superplastificantes

2.4.1 Generalidades

Os aditivos são substâncias que, adicionadas ao concreto, em pequena proporção (não maior que 5%), têm a capacidade de melhorar certas características do concreto nos estados fresco e endurecido. Um dos maiores avanços em tecnologia do concreto tem sido o desenvolvimento de aditivos superplastificantes, pois têm permitido, entre outros, a produção de concretos duráveis, de alta resistência e de concretos fluidos, segundo Hartmann e Helene (2003). Os aditivos superplastificantes permitem a redução do consumo de cimento da mistura, mantendo-se a mesma consistência e resistência à compressão requeridas, o que garante redução nos custos, na retração, fluência e tensões térmicas causadas pelo calor de hidratação do cimento. O efeito dispersante do superplastificante provoca uma melhor distribuição das partículas de cimento e, portanto, uma melhor hidratação do mesmo. Em alguns casos, o superplastificante pode aumentar a resistência inicial do concreto (FREITAS, 2007). Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 298), o aumento de resistências à compressão a um, três e sete dias é especialmente importante na indústria de concreto pré-moldado, onde altas resistências iniciais são necessárias para a reutilização rápida das fôrmas.

2.4.2 Características Físico-Químicas e Princípio de Funcionamento

Segundo Aïtcin apud Melo, Martins e Repette (2009), os superplastificantes são formados por polímeros de cadeias longas, sendo conhecidos como policarboxilatos ou poliacrilatos. Quando os grãos de cimento entram em contato com a água, tendem a flocular, promovendo o aprisionamento de parte da água dentro dos flocos, reduzindo assim a quantidade disponível para a “lubrificação” da pasta de cimento. Para Melo, Martins e Repette (2009), como a principal ação dos aditivos plastificantes e superplastificantes é a de promover a dispersão dos grãos de cimento, destruindo grande parte dos aglomerados de partículas, a água previamente aprisionada nos flocos fica livre.

Deste modo, com o aumento do teor de água efetiva disponível para promover a lubrificação do movimento das partículas, tem-se o aumento da fluidez da pasta sem a necessidade da adição de água à mistura. Este aditivo age reduzindo a quantidade de água necessária (de até 45%) para atingir determinada trabalhabilidade (diminuindo o fator água/cimento) ou aumentando a trabalhabilidade do concreto (mantendo a proporção original do concreto). Dessa forma, a redução da relação água/cimento, em igualdade de plasticidade, propicia a obtenção de altas resistências em função da redução ou até eliminação da fase interface pasta/agregado, além de melhorias no desempenho quando expostas a algumas condições ambientais agressivas que causam deterioração precoce do concreto comum (MEHTA; MONTEIRO; CONCRETO, 2008, p. 298, 2005). A Tabela 2.11 mostra o comportamento de aditivos superplastificantes em concretos convencionais.

Tabela 2.11 - Exemplos de altas resistências iniciais obtidas com o uso de aditivos superplastificantes

Ensaio	Consumo Cimento (kg/m ³)	Relação Água/Cimento	Abatimento (mm)	Resistência à Compressão (MPa)		
				1 dia	7 dias	28 dias
Concreto Referência	360	0,60	225	10	32	45
Concreto de mesma consistência do referência, com 2% de superplastificante em massa do cimento	360	0,45	225	20	43	55
Concreto com mesma relação água/cimento, mas sem superplastificante e menor abatimento	360	0,45	30	16	37	52

Fonte: adaptada de Mehta e Monteiro (2008, p. 298)

2.4.3 Aplicações de Aditivos Superplastificantes

Segundo Melo, Martins e Repette (2009, p. 47), a ocorrência de problemas de incompatibilidade entre o cimento e o aditivo exige que se faça uma avaliação de cada combinação entre cimento e aditivo disponível para uso, já que um aditivo pode agir e interagir diferentemente para cada tipo de cimento. Quiroga e Fowler apud Rodolpho (2007) salienta que a eficiência do aditivo depende do tipo de finos do concreto, sendo a finura do cimento diretamente proporcional com o teor de aditivo nas misturas.

A utilização de dosagens excessivas nas misturas de concreto pode trazer deficiências para o concreto fresco, como a segregação e exsudação, que impedem a capacidade máxima de resistência das misturas, além de um forte retardo de pega e endurecimento, incorporação de ar excessiva à mistura e perda rápida de fluidez.

Deve-se utilizar a menor dosagem possível de aditivo. Entretanto, Mehta e Monteiro (2008, p. 297) definiram que, em comparação aos aditivos redutores de água normais, quantidades relativamente grandes de superplastificantes - até 1% em massa de cimento, podem ser incorporadas nas misturas de concreto sem causar exsudação excessiva e retardamento de pega, apesar da consistência de abatimento ser da ordem de 200 a 250 mm.

A quantidade de aditivo adsorvido depende também do instante no qual ele é incorporado ao sistema cimento/água, sendo menor quando adicionado depois de misturar o cimento com a água, conferindo uma melhora significativa da trabalhabilidade (RIXON; MAILVAGANAM apud MELO; MARTINS; REPETTE, 2009).

Lopes et al. (2006) realizaram um estudo de dosagem de concretos com adição de resíduo de borracha utilizando aditivo superplastificante. Foram analisados os diagramas de dosagens propostos por Helene e Terzian (1993), construídos a partir dos resultados obtidos dos ensaios de compressão axial. Os concretos foram elaborados, substituindo parte do agregado miúdo por resíduos de borracha de pneus (10% em volume) em três granulometrias: resíduos finos, médios e grossos. Os resultados mostraram que o abatimento manteve-se bem próximo, comprovando a eficiência do aditivo utilizado. Além disso, o autor concluiu que a quantidade de aditivo é proporcional ao aumento da relação água/cimento, de forma que essa cresce com o aumento da relação a/c. Isso prova que grandes quantidades de água dificultam a ação do aditivo, considerando que dosagens em excesso trazem efeitos adversos aos concretos. De acordo com os diagramas obtidos, Lopes et al. (2006) observaram que, para concretos com adição de borracha e com uma baixa relação água/cimento, ao se adicionar aditivo, obtém-se resistências finais bem próximas, indiferentemente da granulometria utilizada de borracha.

Fernández (2010), ao estudar o comportamento de argamassas com adição de fibras de borracha de pneu triturado para aplicações na construção civil, verificou que não é possível obter argamassas trabalháveis para as porcentagens de substituição estudadas sem a incorporação de aditivos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do projeto contou com toda a estrutura do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, para a montagem, ruptura e análise estrutural de 6 modelos de lajes, sendo três deles sem adição de resíduo de borracha de pneu, e os outros três elaborados utilizando concretos com 10% de resíduo em relação ao volume do agregado miúdo, juntamente com Laboratório CESP de Engenharia Civil, para estudos de dosagens e propriedades dos concretos utilizados na pesquisa.

3.1 Materiais e Equipamentos

Inicialmente, foram definidos os materiais de estudo, considerando que sua maioria estivesse disponível no próprio município de Ilha Solteira-SP, facilitando sua aquisição. Para a confecção dos modelos foram utilizados cimento, areia, brita, água, resíduo de borracha de pneu, aditivo superplastificante, óleo desmoldante, gesso, fôrma metálica, lajotas cerâmicas, aço para a composição da armadura adicional na sapata e de distribuição, armação treliçada, lonas plásticas, placas de madeira compensada e fôrma de madeira para montagem dos modelos de lajes. Os equipamentos utilizados foram: vibrador de imersão, células de carga e relógios comparadores, extensômetros elétricos, perfis e pórticos metálicos, sistema de aquisição de dados.

3.2 Caracterização dos Materiais

Foram realizados ensaios de caracterização para os materiais Cimento, Areia, Brita e Resíduo de Borracha de Pneu no Laboratório CESP de Engenharia Civil. Informações sobre o aditivo químico, a lajota cerâmica, o aço e a armação treliçada foram obtidas de seus respectivos fabricantes.

3.2.1 Cimento

Os cimentos utilizados foram o CPV-ARI Plus (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) para a confecção das sapatas das vigotas pré-moldadas e o CP II Z 32 (Cimento Portland Composto) para o capeamento das lajes. A utilização do cimento CP V-ARI Plus está relacionada com a economia de tempo no processo de execução das sapatas pré-moldadas, uma vez que o concreto elaborado com este cimento possibilita alta resistência nas primeiras idades. Utilizou-se o cimento CP II Z 32 para o capeamento das lajes, pelo fato de seu emprego ser em larga escala para obras residenciais. Além disso, trata-se do cimento comercialmente vendido na região noroeste do Estado de São Paulo.

Os cimentos utilizados nas composições de concreto foram caracterizados tanto física quanto quimicamente, devendo atender os requisitos especificados pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- Determinação da finura pelo Método de Blaine segundo a NBRNM 76 (ABNT, 1998).
- Determinação do tempo de pega pela NBRNM 65 (ABNT, 2003).
- Massa específica pela NBRNM 23 (ABNT, 2001).
- Resistência à compressão do cimento pela NBR 7215 (ABNT, 1997).
- Análise química segundo a NBR 11578 (ABNT, 1997).
- Especificações para cimento de alta resistência inicial segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991).

Nas Tabelas 3.1 e 3.2, estão os ensaios realizados para os cimentos CPV-ARI Plus e CP II Z 32, respectivamente.

Tabela 3.1 - Caracterização do cimento CP V-ARI Plus
 Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP

Referência			C-012.2010	Especificações NBR 5733	
Amostra			---		
Carta			---		
Data da coleta			08.04.10	min.	máx.
Finura Peneira 200 (% retida)			0,05	-	6,0
Finura Peneira 325 (% retida)			0,58	-	-
Superfície específica Blaine (cm²/g)			4490	3000	-
Densidade aparente (g/cm³)			0,99	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,14	-	-
Água de consistência da pasta	gramas		160	-	-
	(%)		32,00	-	-
Início de pega (h:min)			01:58	01:00	-
Fim de pega (h:min)			03:13	-	10:00
Expansão em autoclave (%)			0,553	-	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		13.04.10	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	37,9	24,0	-
		07 dias	39,6	34,0	-
		28 dias	51,5	---	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		4,50	-	4,5
	Insolúveis		0,85	-	1,0
	SiO ₂		18,21	-	-
	Fe ₂ O ₃		3,16	-	-
	Al ₂ O ₃		6,18	-	-
	CaO		62,31	-	-
	MgO		0,65	-	6,5
	SO ₃		2,81	-	3,5
	Na ₂ O		0,19	-	-
	K ₂ O		0,72	-	-
	Equivalente Alcalino		0,67	-	-
	Cal livre em CaO		2,05	-	-

Tabela 3.2 - Caracterização do cimento CP II Z 32
 Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP

Referência			C-011.2010	Especificações	
Amostra			---	NBR 5736/NBR 11578	
Carta			---		
Data da coleta			08.04.10	min.	máx.
Finura Peneira 200 (% retida)			0,53	-	12,0
Finura Peneira 325 (% retida)			3,98	-	-
Superfície específica Blaine (cm²/g)			4298	2600	-
Densidade aparente (g/cm³)			1,09	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,12	-	-
Água de consistência da pasta	gramas		140	-	-
	(%)		28,00	-	-
Início de pega (h:min)			02:34	01:00	-
Fim de pega (h:min)			03:34	-	10:00
Expansão em autoclave (%)			0,577	-	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		12.04.10	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	18,8	10,0	-
		07 dias	23,7	20,0	-
		28 dias	32,3	32,0	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		5,79	-	6,5
	Insolúveis		5,48	-	16,0
	SiO ₂		20,10	-	-
	Fe ₂ O ₃		3,07	-	-
	Al ₂ O ₃		5,18	-	-
	CaO		56,88	-	-
	MgO		5,81	-	6,5
	SO ₃		3,16	-	4,0
	Na ₂ O		0,13	-	-
	K ₂ O		0,76	-	-
	Equivalente Alcalino		0,62	-	-
	Cal livre em CaO		2,31	-	-

3.2.2 Agregado Miúdo

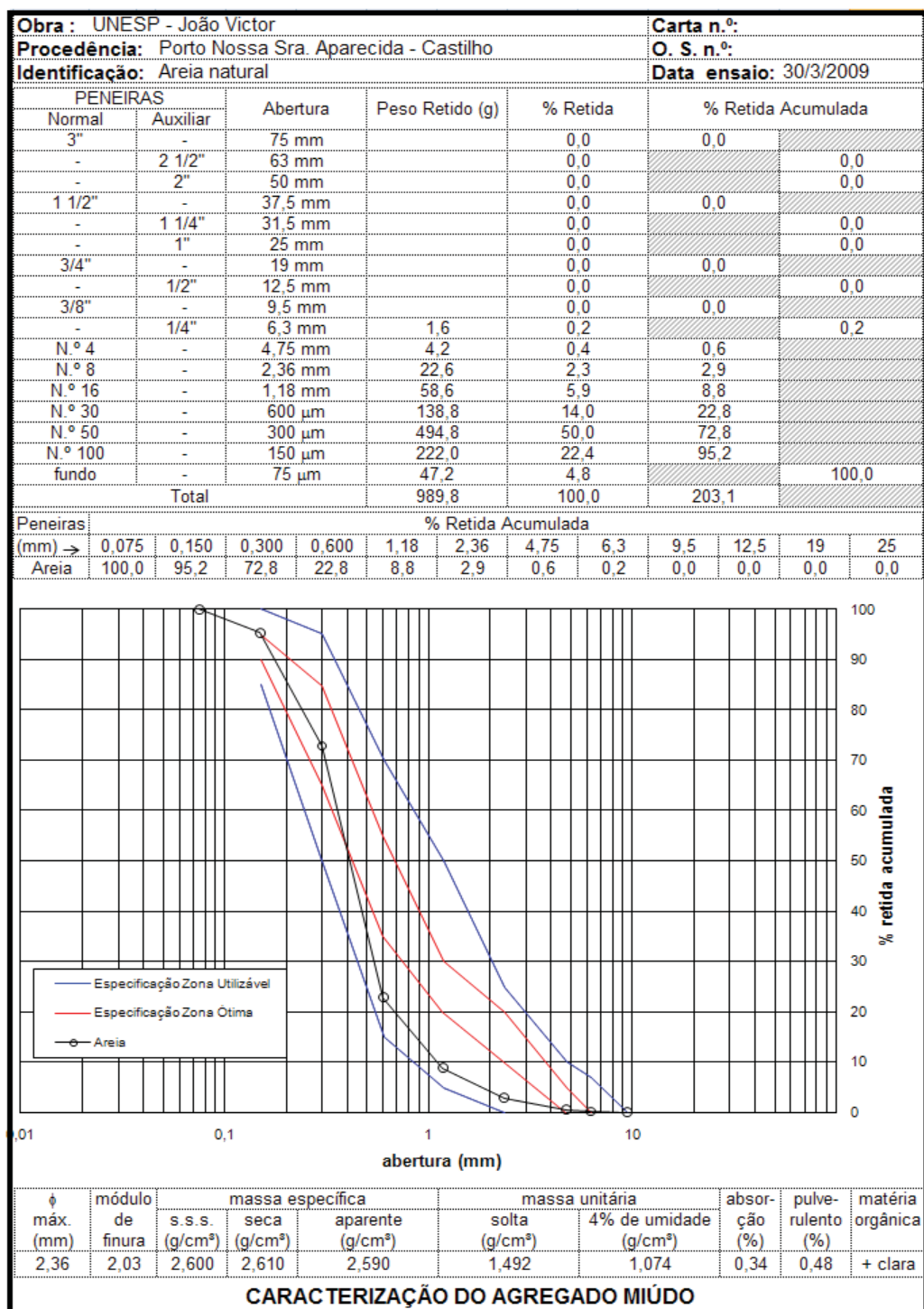
O agregado miúdo usado foi a areia natural, sendo que esta passou pelos seguintes ensaios de caracterização conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- Composição granulométrica pela NBRNM 248 (ABNT, 2003).
- Teor de materiais pulverulentos pela NBR 46 (ABNT, 2003).
- Massa específica e massa específica aparente pela NBRNM 52 (ABNT, 2009).
- Absorção de água pela NBRNM 30 (ABNT, 2001).
- Teor de matéria orgânica pela NBRNM 49 (ABNT, 2001).

A Tabela 3.3 mostra os ensaios de caracterização que foram realizados para o agregado miúdo.

Tabela 3.3 - Caracterização do agregado miúdo – Classificação: Areia Média

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP



3.2.3 Agregado Graúdo

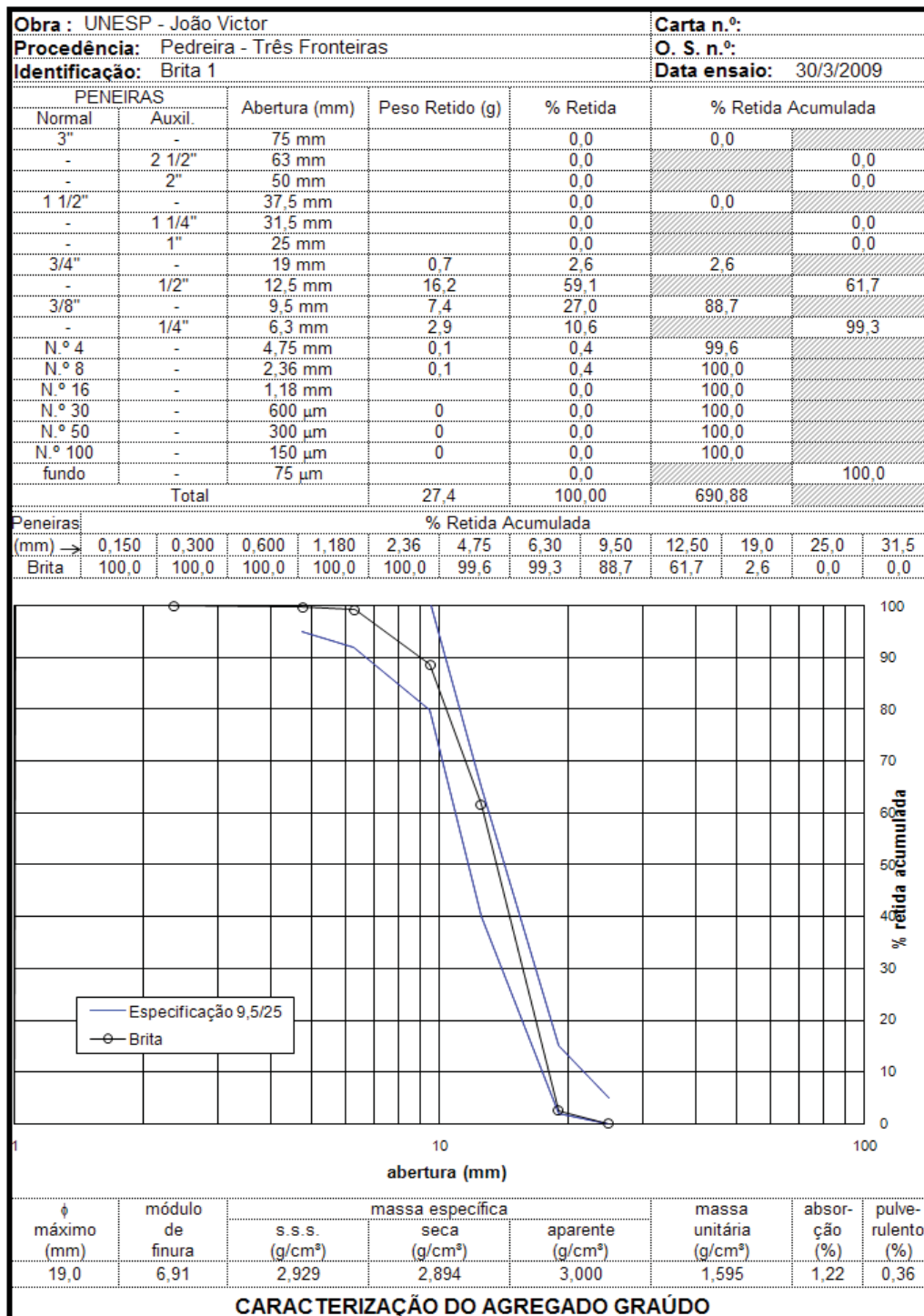
Utilizou-se como agregado graúdo a brita de origem basáltica conhecida como brita 1, conforme sua granulometria comercial. Os ensaios de caracterização realizados de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) foram:

- Composição granulométrica segundo a NBRNM 248 (ABNT, 2003).
- Massa unitária pela NBRNM 45 (ABNT, 2006).
- Massa específica, massa específica aparente seguindo as recomendações da NBRNM 53 (ABNT, 2009).
- Absorção de água pela NBRNM 30 (ABNT, 2001).
- Quantidade de materiais pulverulentos, segundo NBR 7218 (ABNT, 2010).

A Tabela 3.4 mostra os ensaios de caracterização que foram realizados para o agregado graúdo.

Tabela 3.4 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP



3.2.4 Resíduo de Borracha de Pneu

Foram empregados resíduos de borracha de pneu fornecidos por uma empresa recauchutadora situada na cidade de Ilha Solteira - SP. Após o recebimento do material, impurezas como fios de nylon e fios de aço foram retirados (Figura 3.1). Baseado em estudo de Trigo (2008), para a confecção dos concretos que irão compor os modelos de lajes treliçadas, foi selecionada uma faixa granulométrica do resíduo a ser utilizado através de um processo de peneiramento classificatório. Assim, determinou-se um jogo de peneiras (Figura 3.2) de modo a separar os resíduos de borracha de pneus em faixas granulométricas bem definidas, apresentando inclusive fácil distinção visual.

Figura 3.1 - Resíduos de borracha de pneu no estado natural



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 3.2 - Agitador de peneiras utilizado na separação dos resíduos de borracha



Fonte: Fazzan (2011)

A Tabela 3.5 apresenta o jogo de peneiras utilizado, as porcentagens obtidas para cada faixa de resíduo e suas respectivas denominações. Com o intuito de se aproveitar o máximo de resíduo possível, optou-se pelo descarte de apenas 1,7% do material, correspondente às partículas maiores.

Tabela 3.5 - Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu

Classificação Granulométrica do Resíduo de Borracha de Pneu				
Peneiras Normais e Auxiliares		Resíduo de borracha de pneu		
Denominação da ABNT	Abertura (mm)	% Retida	Denominação do Trabalho	Observação
1/4"	6,3	1,7	B. Muito Grossa	Não utilizada
N.º 8	2,38	27,8	Borracha Grossa	Utilizada
N.º 16	1,19	32,8	Borracha Média	Utilizada
Fundo	0,075	37,7	Borracha Fina	Utilizada

De acordo com as denominações fornecidas pela Tabela acima, caracterizam-se as faixas granulométricas visualizadas nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.

- Borracha Grossa: possuem forma alongada (tipo fibra), apresentando comprimentos máximos por volta de até 30 mm e espessura de 2 a 3 mm.

Figura 3.3 - Borracha grossa



Abertura 4,76mm

Abertura 2,38mm

Fonte: Fazzan (2011)

- Borracha Média: também de formato alongado (tipo fibra), contudo com comprimento em sua maioria inferior a 10 mm e espessura em torno de 1 mm.

Figura 3.4 - Borracha média



Fonte: Fazzan (2011)

- Borracha Fina: apresentam forma granular (tipo pó).

Figura 3.5 - Borracha fina



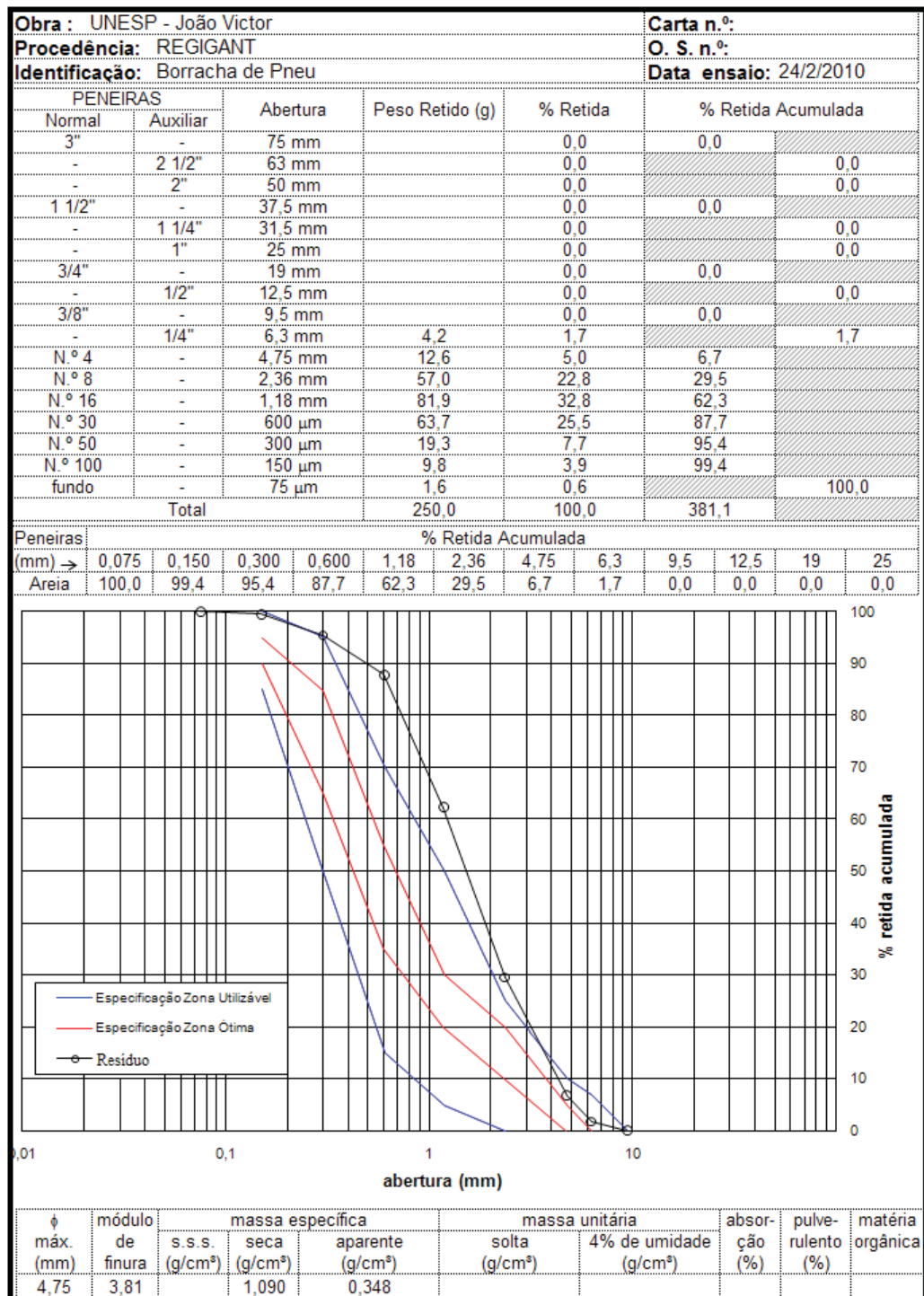
Fonte: Fazzan (2011)

Para a caracterização dos resíduos de borracha de pneu, foram realizados os seguintes ensaios preconizados pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- análise granulométrica NBRNM 248 (ABNT, 2003). Realizou-se o ensaio com apenas 250 gramas do material, em função da grande diferença de massa específica entre a borracha de pneu e os demais agregados;
- determinação da massa específica pela NBR NM 52 (ABNT, 2009). O ensaio foi realizado com álcool, pois a densidade da borracha de pneu é muito próxima à da água;
- massa unitária seguindo a NBRNM 45 (ABNT, 2006).

A Tabela 3.6 mostra os resultados de caracterização do resíduo de borracha de pneu. Pode-se observar que apenas 15% de resíduo apresenta granulometria de areia grossa, enquanto o restante apresenta granulometria superior à da areia grossa.

Tabela 3.6 - Caracterização do resíduo de borracha de pneu



3.2.5 Água

Utilizou-se água de abastecimento público da cidade de Ilha Solteira-SP.

3.2.6 Aditivo Químico

O aditivo químico utilizado na pesquisa foi um Superplastificante à base de policarboxilato, com o intuito de reduzir a relação água/cimento das misturas com resíduo de pneu e, conseqüentemente, aumentar a resistência à compressão dos concretos com borracha. Trata-se de um aditivo líquido de pega normal de terceira geração para indústria de pré-moldados, concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto auto-adensável (CAA). Segundo dados fornecidos pelo fabricante, o aditivo possui massa específica de 1,10 kg/l, para dosagens de 0,5% a 1,5% em relação ao peso de cimento.

3.2.7 Armação Treliçada

Para a armação treliçada, foram utilizados fios de 6,0 mm (fio do banzo superior) e 4,2 mm (fios do banzo inferior e sinusóide), sendo confeccionada em aço CA-60 nervurado. Suas características se encontram na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Características da treliça

Fonte: COMERCIAL GERDAU

Designação Gerdau	Designação NBR 14862/02	Peso (Kg/m)	Altura (cm)	Diâmetros (mm)		
				Banzo superior	Diagonal	Banzo inferior
TG 8 L	TR 08644	0,735	8	6,0	4,2	4,2

3.2.8 Lajota Cerâmica

As lajotas cerâmicas foram utilizadas como material de enchimento das lajes. Suas características são fornecidas pelos fabricantes (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Caracterização da lajota cerâmica

Fonte: Artcon

Dimensões (altura x largura x comprimento) em cm	Peso unitário (kg)
6 x 20 x 30	3,5

3.2.9 Vergalhões

Foram utilizados na pesquisa vergalhões nervurados, sendo definidas barras de 8,0 mm para armadura adicional, barras de 6,3 mm para armadura longitudinal e barras de 4,2 mm para armadura de distribuição. Estes materiais foram caracterizados segundo a NBRISO 6892 (ABNT, 2002), sendo ensaiadas duas amostras para cada bitola Ø (mm) (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Características do aço

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP

Ø (mm)	Categoria (CA)	Peso por metro linear (Kg/m)		Ensaio Mecânicos						Dobra- mento*	Local de Ruptura
				Escoamento		Ruptura		σr/σe	Alongam. 10 Ø (%)		
		Média	NBR 7480	kg	(kgf/mm²)	kg	(kgf/mm²)				
4,2	60,0	0,110	Dentro	1009	71,7	1199	85,2	1,19	7,1	Correto	Meio
4,2	60,0	0,110	Dentro	970	69,1	1152	82,1	1,19	6,2	Correto	Meio
6,3	50,0	0,243	Dentro	2142	69,2	2904	93,9	1,36	11,1	Correto	Meio
6,3	50,0	0,243	Dentro	2163	70,0	2810	90,9	1,30	11,1	Correto	Meio
8,0	50,0	0,397	Dentro	3269	64,6	3895	77,0	1,19	13,8	Correto	Meio
8,0	50,0	0,397	Dentro	3447	68,1	4000	79,0	1,16	15,0	Correto	Meio

*o termo **correto**, neste ensaio, significa que o corpo de prova não apresentou ruptura, fissuras ou trincas no ensaio de dobramento da barra a 180°

3.2.10 Instrumentação e Obtenção dos Dados

Para a aplicação das forças nos modelos, foi utilizada uma bomba elétrica da marca ENERPAC, acoplada a um atuador hidráulico da marca ENERPAC – RR1012, com capacidade para 10 tf. A medição intensidade das forças se deu por meio de duas células de carga fixadas na base do atuador hidráulico, da marca ENERPAC, modelo MUF – 2 – 10 TD16.

Para a obtenção dos dados referentes aos deslocamentos, foram utilizados relógios comparadores da marca KYOWA – Eletronic Instruments CO., Ltda., tipo DT-20D Peacock, com precisão de 0,01 x 20 mm.

Quanto à medição das deformações, foram fixados, tanto no concreto da capa das lajes quanto nas armaduras treliçadas, extensômetros elétricos da marca Excel Sensores Ind. Com.Exp.Ltda. dos tipos: PA-06-201BA-120L (para o concreto) e PA-06-125BA-120L (para a armadura).

Com relação à coleta e armazenamento dos dados obtidos por meio de relógios comparadores, de extensômetros elétricos e de células de carga, foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados DAQbook 120 da Iotech, com interface ao programa DASyLab 5.0 (Figura 3.6).

Figura 3.6 - Sistema de Aquisição de Dados



Fonte: Fazzan (2011)

3.3 Estudo das Composições dos Concretos

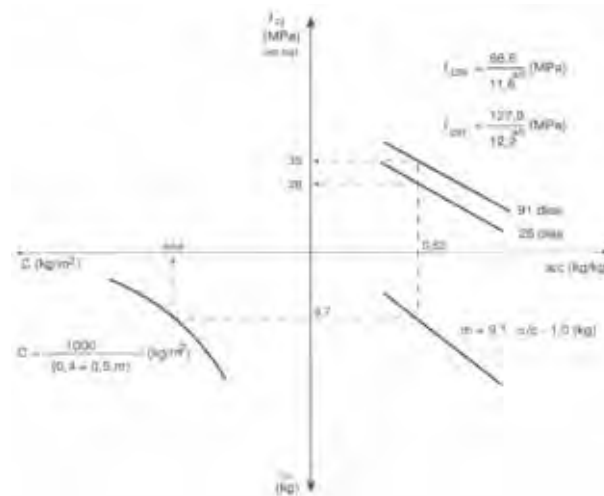
3.3.1 Métodos de Dosagem

Inicialmente, a pesquisa foi direcionada ao estudo de dosagem dos concretos sem e com adição de resíduo. Considerou-se uma resistência à compressão mínima de 25 MPa, aos 28 dias de idade, tanto para os concretos controle quanto para os concretos com resíduos.

3.3.1.1 Método de Dosagem de Concreto IPT/EPUSP

Helene e Terzian (1993) mencionam que são necessários três pontos para se montar o diagrama de dosagem, conforme apresentado na Figura 3.7. O esquema abaixo correlaciona resistência à compressão (f_{cj}), relação água /cimento (a/c), traço (m) e consumo de cimento (C).

Figura 3.7 - Diagrama de dosagem de concretos



Fonte: Helene e Terzian (1993)

O início do estudo experimental partiu da avaliação preliminar, com mistura em betoneira do traço 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa). Baseados nas informações obtidas desta mistura, confeccionam-se mais duas, com traços definidos em 1:3,5 (traço rico) e 1:6,5 (traço pobre), para possibilitar a montagem do diagrama de dosagem, conduzindo à obtenção do traço definitivo.

Uma das etapas mais importantes neste método de dosagem é a determinação do teor ideal de argamassa, que pode ser adotado de acordo com a experiência do profissional responsável pela dosagem. A falta de argamassa acarreta aumento da porosidade do concreto e falhas de concretagem. Entretanto, embora a argamassa em excesso melhore a aparência do concreto, ela aumenta seu custo por metro cúbico e o risco de fissuração por origem térmica (reação de hidratação do cimento). Sendo assim, o teor de argamassa ideal deve ser o mínimo necessário para que não haja aumento da porosidade do concreto.

3.3.1.2 Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho

Pesquisas realizadas por O'Reilly Díaz (1998) permitiram comprovar que, nas misturas de britas com uma proporção considerável de partículas lamelares (de 16 até 31% em massa), não se pode determinar a proporção ótima da areia e da brita pelos métodos convencionais empregados habitualmente.

O'Reilly Díaz (1998) propõe o Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho, considerando que a forma das partículas dos agregados exerce maior influência na resistência e no consumo de cimento do concreto que a composição granulométrica desses agregados.

Primeiramente, determina-se a relação ótima entre agregado miúdo e graúdo através do ensaio da Massa Compactada Unitária (MUC_m). No ensaio, são feitas misturas dos agregados miúdo e graúdo com as seguintes proporções em massa: 35:65; 40:60; 45:55; 50:50 e 55:45. De acordo com a Massa Específica das misturas e o Índice de Vazios, é encontrada a proporção de materiais que possui a maior Massa Compactada e a menor Porosidade, de forma que, para O'Reilly Díaz (1998), tais comportamentos resultam em concretos com aumento de suas propriedades mecânicas. Molda-se, então, um concreto convencional, sendo que a determinação da quantidade de água é feita de maneira empírica, baseando-se em experiências anteriores ou em concretos produzidos para determinada trabalhabilidade. A partir de algumas formulações e tabelas elaboradas pelo autor, determina-se o consumo de cimento reduzido para o novo traço de concreto, considerando-se a resistência de projeto requerida, e que permite obter o traço solução.

3.3.2 Traços de Concretos

Prosseguiu-se com o desenvolvimento da metodologia de dosagem anteriormente definida, visando obter, para os concretos convencionais e com adição de borracha de pneu, as seguintes características:

- resistência à compressão, aos 28 dias de idade, acima de 25 MPa;
- abatimento em 7 ± 1 cm e 10 ± 1 cm, garantindo a trabalhabilidade necessária para concretagem das lajes (foram encontradas dificuldades no adensamento e acabamento dos modelos para o abatimento de 7 ± 1 cm, enquanto que o abatimento de 10 ± 1 cm proporcionou maior facilidade na moldagem dos modelos);
- teor de ar incorporado de 15 litros por metro cúbico;
- substituição de 10% de resíduo de borracha em relação ao volume de agregado miúdo.

A seguir, apresentam-se os traços finais de concreto para a confecção dos modelos:

- **TC – Z 32:** Traço **sem resíduo** de borracha, elaborado com cimento CP II Z 32 (utilizado na capa das lajes);
- **TR – Z 32 I:** Traço **com resíduo** de borracha inserido no **início** da mistura, elaborado com cimento CP II Z 32 (utilizado na capa das lajes);
- **TR – Z 32 F:** Traço **com resíduo** de borracha de pneu inserido no **final** da mistura, elaborado com cimento CP II Z 32 (utilizado na capa das lajes);
- **TC – ARI:** Traço **sem resíduo** de borracha de pneu, elaborado com cimento CPV-ARI Plus (utilizado nas vigotas treliçadas das lajes);
- **TR – ARI I:** Traço **com resíduo** de borracha inserido no **início** da mistura, elaborado com cimento CPV-ARI Plus (utilizado nas vigotas treliçadas das lajes);
- **TR – ARI F:** Traço **com resíduo** de borracha inserido no **final** da mistura, elaborado com cimento CPV-ARI Plus (utilizado nas vigotas treliçadas das lajes).

3.3.2.1 Concreto sem Adição de Resíduo de Borracha (Controle ou Referência)

Para a dosagem dos concretos referência, considerando a capa das lajes e as vigotas treliçadas, foi aplicado inicialmente o método de O'Reilly Díaz (1998).

Verificou-se que, para o concreto das sapatas das vigotas treliçadas (TC – ARI), o método proposto por O'Reilly Díaz (1998) se mostrou eficiente, conduzindo a uma redução significativa do consumo de cimento, se comparado com outras pesquisas. Foram encontradas proporções ótimas entre os agregados miúdos e graúdos de 42% : 58% em massa, ou 44% : 56% em volume, utilizando os cálculos referentes à Massa Específica Absoluta da Mistura, Porcentagem de Vazios e Massa Unitária Compactada.

Porém, para o concreto utilizado para elaborar a capa, não houve uma redução significativa do consumo de cimento, se comparado com o concreto que serve como base para a aplicação das formulações de O'Reilly Díaz (1998).

Portanto, para os traços de concreto que compõem a capa das lajes, foi utilizado o Método IPT/EPUSP, considerando o desvio padrão do método (5 MPa).

Os dados referentes aos traços definitivos foram inseridos em uma planilha desenvolvida pela CESP, com algumas modificações feitas para a posterior inclusão da borracha, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Planilha utilizada para a dosagem dos traços de concreto

APLICAÇÃO:		João Victor Fazzan		Data: 1/2/2010	
		Calculado por:			
Relação (1:m)	1:	6,36			
Teor de Argamassa Seca		52,20			
Volume de Argamassa (%)		59,1			
	VOLUME	PESO			
AR	15,0				
AGREGADO	738,9				
AGLOMERANTE	116,1	360,0			
ÁGUA	130,0	130,0			
TOTAL	1000,0				
		CIMENTO		Itaú CP II Z 32	
		Silica			
		AGREGADO Graúdo		B 1 - Pedreira Três Fronteiras	
		AGREGADO Miúdo		Areia Natural - Porto N. Sra. Aparecida	
		SLUMP (cm)		6,0 a 8,0	
		AR (%)			
A/C		Polifuncional			
A/C Equivalente	0,361	Superplastificante		Sika® ViscoCrete® -3535	
		Incorporador de Ar			
	Retard.	Super.	Incorp.		
% Volume Comb.				55,3	44,7
Componentes				B1	Areia
% Vol. Agregado				55,3	40,2
Volume por M3				408,7	297,2
Densidade S.S.S.				2,929	2,600
Peso S.S.S. por M3				1197,1	772,6
Absorção %				1,22	0,34
Umidade %				0,40	0,05
Água Livre %				0,82	0,29
Peso de Água Livre				9,8	2,2
Peso por M3				1187,2	770,4
				36,0	360,0
				12,1	9,0
				139,0	

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP

Definem-se as composições finais dos concretos controle na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Composição final dos traços TC – ARI e TC – Z 32

	Traço TC - ARI	TC – Z 32
Materiais	Consumo (kg/m³)	
Água	185,0	192,0
Cimento	280,0	342,0
Areia	800,0	884,0
Brita	1172,0	1003,0
Relações	Índices	Índices
Relação (1:m)	7,66	6,19
Teor de Argamassa Seca (%)	50,0	56,8
Volume de Argamassa (%)	60,0	65,7
Relação Água/Cimento (A/C)	0,661	0,561

3.3.2.2 Concreto com Adição de Resíduo de Borracha

Para o alcance da resistência mínima dos concretos com resíduos, foi observado, de acordo com as curvas do Método IPT/EPUSP, um aumento excessivo no consumo de cimento, mostrando sua inviabilidade de acordo com o propósito da pesquisa. O mesmo fato ocorreu para o método proposto por O'Reilly Díaz (1998), uma vez que o concreto que servia como base para a aplicação de suas formulações requereu um alto consumo de cimento. Dessa forma, mesmo após aplicar as equações, o consumo se manteve elevado.

Nesse contexto, foram elaborados os traços com borracha, aplicando a ideia de que a determinação correta das características dos agregados, bem como as suas proporções, podem ser encontradas de acordo com o ensaio de Massa Compactada Unitária (MUC_m) para a mistura brita+areia+borracha. Para isso, seguiu-se o mesmo procedimento de cálculo dos traços sem resíduo, considerando a quantidade de resíduo em substituição (10% em volume) incorporada à proporção de areia. Sendo a proporção dos materiais em massa, substituiu-se o equivalente a 5,4% em massa de resíduo, obtendo-se a proporção ótima entre os agregados miúdos e graúdos (resíduo – areia – brita) de 5,4% : 29,6% : 65% em massa, ou 10% : 27% : 63% em volume, dado pelo maior valor da Massa Compactada Unitária e a menor Porosidade.

Além disso, para a redução do fator água/cimento, foi utilizado aditivo superplastificante, com o intuito de se obter misturas mais trabalháveis, sem a presença de segregação e exsudação.

Inicialmente, foram elaborados traços de concreto com a inserção de borracha no início da mistura, juntamente com o agregado miúdo. Durante o processo de moldagem do primeiro modelo com resíduo, verificaram-se algumas dificuldades no lançamento e adensamento, em função da perda de consistência elevada. Dessa forma, optou-se por elaborar um novo traço de concreto com resíduo, considerando a inserção da borracha no final da mistura.

A Tabela 3.11 mostra os traços com adição de resíduo de borracha.

Tabela 3.11 - Composição final dos traços com resíduo

	Traço TR – ARI I	Traço TR – Z 32 I	Traço TR – ARI F	Traço TR – Z 32 F
Materiais	Consumo (kg/m³)			
Água	125,0	130,0	148,8	140,4
Cimento	310,0	360,0	310,0	360,0
Areia	811,0	772,6	811,0	772,6
Brita	1204,0	1197,1	1204,0	1197,1
Resíduo de Borracha	37,8	36,0	37,8	36,0
Relações	Índices	Índices	Índices	Índices
Relação (1:m)	7,41	6,36	7,41	6,36
Teor de Argamassa Seca (%)	52,2	52,2	52,2	52,2
Volume de Argamassa (%)	58,9	59,1	58,9	59,1
Superplastificante (% peso cimento)	0,960	0,66	0,537	0,81
Relação Água/Cimento (A/C)	0,403	0,361	0,480	0,390

3.3.3 Procedimentos Aplicados às Composições dos Concretos

3.3.3.1 Determinação da Massa Compactada Unitária (MUC_m)

Para a determinação da massa unitária compactada, procedeu-se de acordo com a norma NBRNM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2006). Segundo esta norma, os agregados são colocados em um recipiente cilíndrico, dividindo em três camadas, sendo cada uma dessas camadas adensadas com 25 golpes, através de uma barra de aço de 16 mm de diâmetro, sendo o ultimo golpe no centro do recipiente. Após encher o recipiente, determina-se a massa do mesmo. Descontando o valor da tara do recipiente, encontra-se assim a massa do material, nas quais fornece o valor da Massa Compactada Unitária dividindo a massa do material pelo volume do recipiente, de valor já conhecido.

3.3.3.2 Mistura

Primeiramente, com a betoneira desligada, foram inseridos os agregados miúdos (juntamente com a borracha, para os traços com inserção de resíduos no início, e sem borracha para os traços com inserção de resíduo no final), grãos e aproximadamente 50% da água de amassamento. Em seguida, a betoneira foi ligada por um minuto para a mistura dos materiais.

Posteriormente, adicionou-se o cimento e o restante da água de amassamento, ligando-se a betoneira por mais três minutos, que foram seguidos de três minutos de descanso. Como etapa final, foram definidos os seguintes tempos para a mistura:

- concreto referência: ligou-se a betoneira por mais três minutos;
- concreto com inserção de resíduo no início e superplastificante: acrescentou-se o aditivo superplastificante com a betoneira em movimento deixando-a ligada por mais 6 minutos;
- concreto com inserção de resíduo no final e superplastificante: acrescentou-se o aditivo superplastificante com a betoneira em movimento deixando-a ligada por mais 5 minutos. Em seguida, adicionou-se o resíduo de borracha, ligando-se a betoneira por mais 1 minuto.

3.3.3.3 Outras Caracterizações dos Concretos

Após a retirada do concreto da betoneira, realizaram-se os ensaios de Abatimento do Tronco de Cone, conforme as recomendações da NBRNM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1998).

A seguir, moldaram-se os corpos de prova referentes a cada um dos traços necessários para a pesquisa, com as dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo os moldes fabricados em material PVC (Cloro de Polivinila), seguindo as recomendações da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2008). No dia seguinte, os CPs foram desmoldados e levados para a câmara úmida, para permanecerem em processo de cura até o dia agendado para cada um dos ensaios que foram realizados conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT:

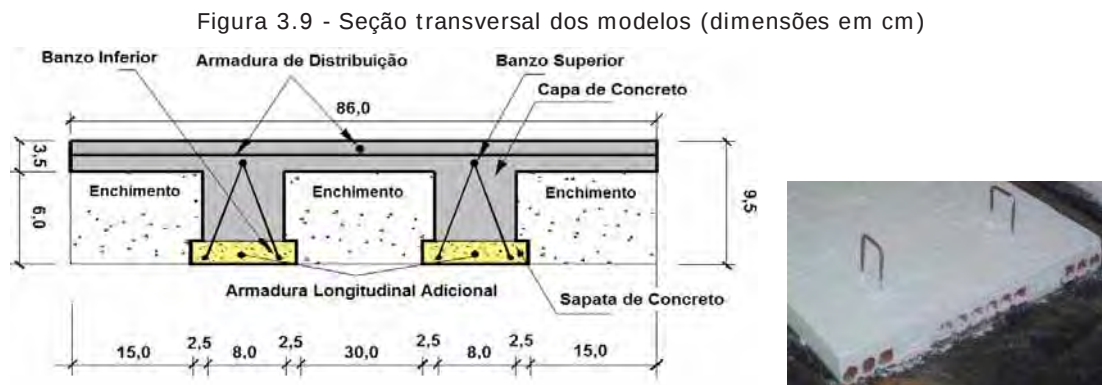
- determinação da Resistência à Compressão axial, aos 7 e 28 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), com a realização do capeamento dos CPs por meio de um composto de enxofre e pozolanas;
- ensaios de Massa específica e Teor de Ar Incorporado, preconizados pela NBRNM 47 (ABNT, 2002), aos 7 e 28 dias;
- resistência à Tração, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011);
- ensaio de Absorção de Água, segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009);
- módulo de Elasticidade, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008).

Para cada ensaio, considerando cada traço, foram moldados três corpos de prova, tomando-se como resistência final a média aritmética dos valores obtidos.

3.4 Definições Gerais dos Modelos Ensaiaados

3.4.1 Definição das Dimensões

Os modelos das lajes pré-fabricadas treliçadas unidirecionais foram definidos utilizando-se duas vigotas pré-moldadas treliçadas de 210 cm de comprimento, lajotas cerâmicas e capa de concreto, de acordo com a NBR 14859-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002). De acordo com a Figura 3.9, os modelos apresentam uma seção transversal em “T” de 86 cm de base superior, 26 cm de base inferior e 9,5 cm de altura, considerando-se a altura da capa de concreto igual a 3,5 cm.

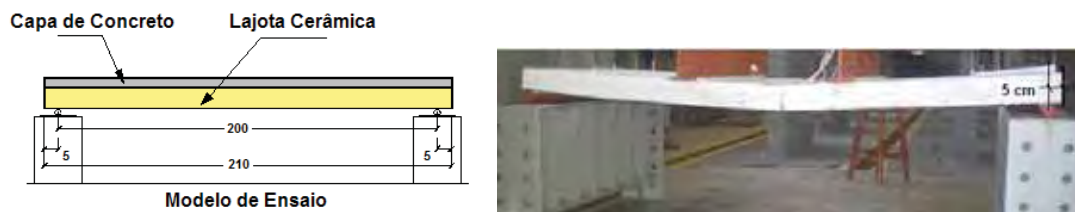


Fonte: Fazzan (2011)

Cada vigota treliçada possui uma base de concreto (sapata) com 3 x 13 cm² de seção transversal que irá envolver a armadura do banzo inferior da treliça e a armadura adicional.

Nos apoios das faixas das lajes, ocorre um aumento de 5 cm no comprimento, com a finalidade de garantir a ancoragem da armadura na região do apoio e a segurança contra possíveis deslocamentos durante os ensaios. A Figura 3.10 mostra um esquema de posicionamento dos modelos.

Figura 3.10 - Perfil longitudinal dos modelos (dimensões em cm)



Fonte: Fazzan (2011)

3.4.2 Definição dos Modelos

Definiu-se a produção de seis modelos de lajes de dimensões 210 x 86 x 9,5 cm (comprimento x largura x altura), sendo três deles sem adição de resíduo, e os outros três elaborados utilizando concretos com substituição de 10% de resíduo, em relação ao volume do agregado miúdo.

Em um primeiro momento, foram produzidos dois modelos: um sem resíduo e outro com resíduo, ambos sem a utilização de extensômetros elétricos e considerando a inserção de resíduo no início da mistura. Tais modelos foram confeccionados para se ter uma estimativa das cargas de ruptura e dos deslocamentos verticais (flechas), visando proteger os equipamentos utilizados durante os ensaios, além de evitar perdas dos extensômetros elétricos e prever as dificuldades durante a montagem, moldagem e ruptura dos modelos. Definem-se esses modelos como:

- PC 01 - SE: Modelo Controle 01, elaborado com concreto **convencional**, Sem Extensômetro elétrico.
- PR 01 - SE: Modelo com **resíduo** 01, Sem Extensômetro elétrico.

Posteriormente, foram produzidos mais quatro modelos, sendo dois deles sem resíduos, e os outros dois com adição de resíduos na capa de concreto e nas sapatas das vigotas pré-moldadas. Nesses modelos, foram utilizados extensômetros elétricos, considerando a inserção de resíduo no final da mistura, justamente pelas dificuldades encontradas nos dois primeiros modelos. Definem-se os quatro modelos seguintes:

- PC 02 - CE: Modelo **Controle** 02, elaborado com concreto **convencional**. Com extensômetro elétrico.
- PR 02 - CE: Modelo com **Resíduo** 02. Com extensômetro elétrico.

- PC 03 - CE: Modelo **Controle** 03, elaborado com concreto **convencional**. Com extensômetro elétrico.
- PR 03 - CE: Modelo com **Resíduo** 03. Com extensômetro elétrico.

3.4.3 Definição das Armaduras

Na capa, a NBR 14859-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002) recomenda a disposição de uma armadura de distribuição, nas direções transversal e longitudinal, composta por barras de aço de pequeno diâmetro, para o controle da fissuração e para a distribuição das tensões oriundas de ações concentradas.

Essa norma recomenda, para aços classe CA-50 e CA-60, uma área de aço mínima de $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$ e pelo menos três barras por metro. Considerando-se um cobrimento lateral das armaduras igual a 2,5 cm, foram adotadas as seguintes recomendações:

- na direção transversal, foi colocada uma armadura composta por 11 barras de diâmetro igual a 4,2 mm e comprimento igual a 81 cm, de aço CA-60, espaçadas a cada 20,5 cm;
- na direção longitudinal, por estarem próximas à borda comprimida, considerou-se que as barras dos banzos superiores da treliça fizessem parte da armadura de distribuição, sendo necessário adicionar apenas uma barra em aço CA-50 com diâmetro igual a 6,3 mm e comprimento igual a 205 cm;
- como armadura adicional, foram incluídas duas barras de diâmetro igual a 8 mm, em aço CA-50, de comprimento igual a 205 cm, uma em cada sapata de concreto (Figura 3.9).

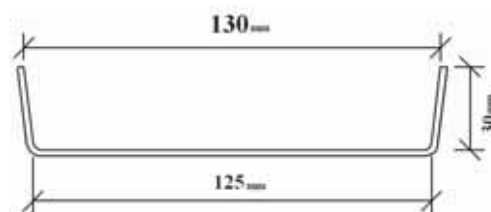
3.5 Descrição da Preparação dos Ensaios

3.5.1 Vigotas Pré-Moldadas Treliçadas

O primeiro passo consistiu na moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas, considerando-se que os concretos utilizados apresentassem resistência característica à compressão (f_{ck}) da ordem de 25 MPa aos 28 dias de idade.

As vigotas pré-moldadas treliçadas, confeccionadas com os traços TC-ARI, TR-ARI I e TR-ARI F, foram moldadas em fôrma metálica fabricada em chapa de aço na espessura de 32 mm e dimensões da seção transversal mostradas na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Seção transversal das fôrmas para vigotas treliçadas



Fonte: Forni (2005, p. 43)

Em função do comprimento da fôrma metálica, foram moldadas duas vigotas de comprimento igual a 210 cm para cada betonagem, sendo estas separadas por espaçadores de madeira, conforme ilustra a Figura 3.12.

Figura 3.12 - Fôrma metálica utilizada na moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas



Fonte: Fazzan (2011)

Para garantir o cobrimento necessário da armadura treliçada durante a concretagem, bem como a fixação da armadura adicional na sapata de concreto, foram utilizados espaçadores plásticos, como mostra a Figura 3.13.

Figura 3.13 - Espaçadores plásticos para posicionamento da armadura



Fonte: Fazzan (2011)

Para melhorar a ancoragem da armadura adicional no apoio, foi utilizado gancho em forma de U, composto por $\phi 8\text{mm}$, como mostra a Figura 3.14. Além disso, foram elaborados mais 5 ganchos, compostos por $\phi 4,2\text{mm}$ e espaçados a cada 7,5 cm, na região dos apoios, perpendiculares aos dois fios da armadura treliçada, à barra da armadura adicional e ao trecho inferior do gancho.

Figura 3.14 - Ancoragem da armadura adicional



Fonte: Fazzan (2011)

Abaixo, estão referidos os traços utilizados para moldagem das vigotas treliçadas em cada modelo de laje:

- TC – ARI: Traço utilizado nas vigotas treliçadas dos modelos sem resíduos (PC 01 – SE, PC 02 – CE e PC 03 – CE);
- TR – ARI I: Traço utilizado nas vigotas treliçadas do modelo PR 01–SE (com resíduo). Após verificar, neste modelo, a perda de abatimento decorrente da inclusão da borracha no início da mistura, a sequência de inclusão da borracha foi modificada nos modelos seguintes;
- TR – ARI F: Traço utilizado nas vigotas treliçadas dos modelos com resíduo PR 02 – CE e PR 03 – CE.

Estando a fôrma metálica devidamente posicionada, limpa e seca, aplicou-se um óleo desmoldante em sua superfície. Preencheu-se com concreto apenas metade da altura das fôrmas. Posicionou-se a treliça metálica na fôrma, de modo que ferragem positiva pudesse ficar totalmente submersa no concreto. Por fim, completou-se o preenchimento da fôrma. A Figura 3.15 mostra os procedimentos realizados durante a concretagem das sapatas das vigotas. Após 24 horas, realizou-se a desforma das vigotas manualmente, sendo estas levadas à câmara úmida para a cura durante 7 dias (Figura 3.16).

Figura 3.15 - Moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 3.16 - Desmoldagem e cura das vigotas pré-moldadas treliçadas



Fonte: Fazzan (2011)

3.5.2 Modelos de Lajes Treliçadas

3.5.2.1 Nivelamento do Piso e Execução das Fôrmas

Os modelos foram montados no piso interno do Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS).

Nos modelos PC 01–SE e PR 01–SE (sem e com resíduo de borracha, sem extensômetros), utilizou-se apenas lona plástica para proteção do piso. Entretanto, foram detectadas posteriormente algumas falhas no apoio das extremidades das lajes durante o ensaio de ruptura. Dessa forma, para a confecção dos demais modelos, foi necessário nivelar o piso fazendo uso de areia, lona plástica e uma placa em madeira compensada (Figura 3.17), garantindo que os modelos estivessem perfeitamente apoiados em suas extremidades durante o ensaio de ruptura.

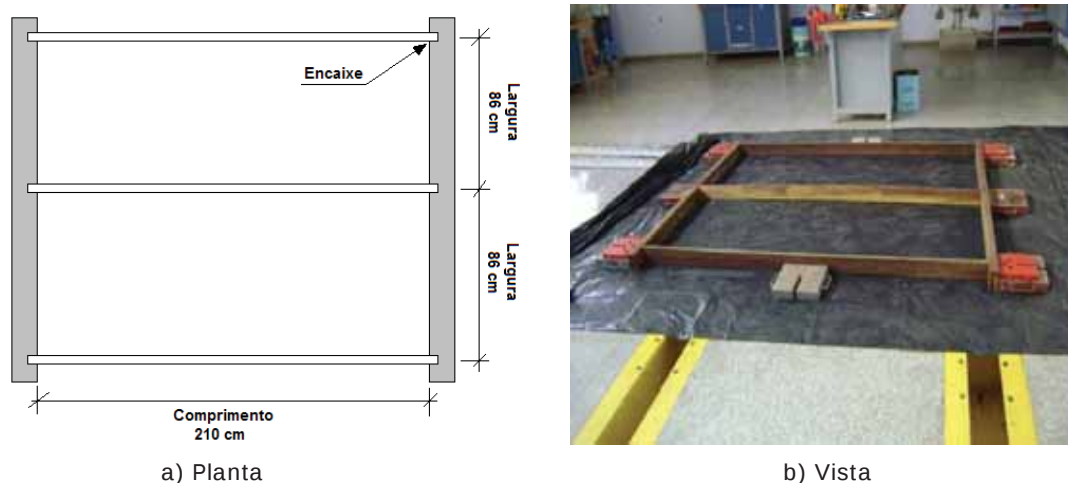
Figura 3.17 - Nivelamento do piso



Fonte: Fazzan (2011)

Para a execução das fôrmas, foram utilizadas tábuas de madeira. Com o intuito de facilitar o processo de desforma, foi construído um encaixe nas tábuas dispostas ao longo da largura dos modelos, permitindo a fixação de outras tábuas dispostas ao longo do comprimento (Figura 3.18). Também houve a necessidade de se utilizar pesos de aço nas laterais das fôrmas, prevenindo o sistema contra possíveis aberturas durante a concretagem. As fôrmas foram elaboradas permitindo moldar dois modelos de lajes, sendo estes separados por uma tábua central disposta no comprimento.

Figura 3.18 - Fôrma utilizada para montagem dos modelos



Fonte: Fazzan (2011)

3.5.2.2 *Montagem, moldagem, adensamento e cura*

Os modelos de laje foram definidos utilizando-se duas vigotas pré-moldadas treliçadas, duas faixas laterais de lajotas cerâmicas cortadas ao meio e uma faixa central de lajotas cerâmicas inteiras, formando duas seções transversais em “T”, conforme mostra a Figura 3.9. Foi passado óleo desmoldante na lona plástica e nas laterais das fôrmas, a fim de garantir facilidade na desmoldagem dos modelos. Em seguida, as vigotas pré-moldadas foram posicionadas, permitindo o encaixe das lajotas cerâmicas nos vãos existentes (Figura 3.19).

Como o comprimento do modelo não coincidiu com uma quantidade exata de lajotas, algumas delas tiveram de ser cortadas para preencher o espaço vazio. Nos primeiros modelos confeccionados (PC 01–SE e PR 01–SE), as lajotas cortadas foram posicionadas na extremidade dos modelos. Entretanto, em função da detecção da não uniformidade dos apoios durante o processo de ruptura de um dos modelos mencionados, decidiu-se posicionar as lajotas cortadas no meio do vão central dos modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE (Figura 3.20).

Figura 3.19 - Montagem dos modelos



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 3.20 - Posicionamento da última fileira de lajotas cerâmicas



Modelos PC 01 – SE e PR 01 – SE

Modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e
PR 03 – CE

Fonte: Fazzan (2011)

Após o procedimento anterior, realizou-se o posicionamento da armadura de distribuição: 11 barras de diâmetro igual a 4,2 mm e comprimento igual a 81 cm, em aço CA-60, espaçadas a cada 20,5 cm, na direção transversal, e uma barra em aço CA-50 com diâmetro igual a 6,3 mm e comprimento igual a 205 cm, na direção longitudinal (Figura 3.21). Além disso, foram adicionados quatro ganchos, elaborados com barras de diâmetro igual a 8 mm em aço CA-50, e fixados nos cantos de cada modelo, para que o mesmo pudesse ser içado e posicionado no local do ensaio (Figura 3.21).

Figura 3.21 - Posicionamento dos ganchos e da armadura de distribuição



Fonte: Fazzan (2011)

Posteriormente, realizou-se o umedecimento dos modelos para retirada do material pulverulento, seguindo o lançamento do concreto. O adensamento foi feito com vibrador de imersão, sendo o acabamento obtido pela regularização da superfície através de régua niveladora metálica e desempenadeira (Figura 3.22). Os traços utilizados na capa de cada modelo foram:

- TC – Z 32: Traço usado na capa dos modelos PC 01 – SE, PC 02 – CE e PC 03 – CE.
- TR – Z 32 I: Traço usado na capa do modelo PR 01 – SE.
- TR – Z 32 F: Traço usado na capa dos modelos PR 02 – CE e PR 03 – CE.

Figura 3.22 – Concretagem: lançamento, adensamento e acabamento



Fonte: Fazzan (2011)

Após a concretagem, os modelos permaneceram em processo de cura por 7 dias, sendo os modelos molhados periodicamente. Além disso, foi utilizada uma manta de espuma para evitar a evaporação precoce da água e a conseqüente fissuração do concreto por retração plástica, como mostra a Figura 3.23.

Decorridos os 7 dias de cura, os modelos permaneceram no mesmo local até a data de ruptura por mais 21 dias, totalizando 28 dias de cura do concreto da capa.

Figura 3.23 - Cura durante 7 dias



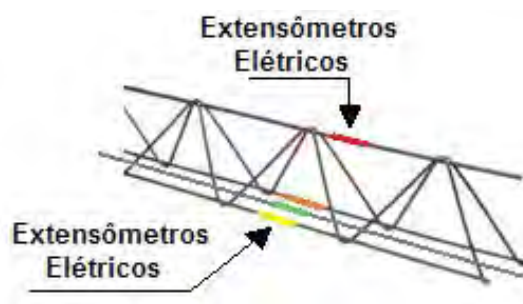
Fonte: Fazzan (2011)

3.5.2.3 *Extensômetros Elétricos*

A instrumentação para avaliação das deformações nas armaduras e no concreto se deu por meio de extensômetros elétricos. Estes foram posicionados no centro do vão, local onde deve ocorrer o máximo valor do momento fletor positivo.

Inicialmente, foi instrumentada a armação treliçada, para posterior confecção das vigotas pré-moldadas dos modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE. O posicionamento dos extensômetros é mostrado na Figura 3.24. As sapatas das vigotas treliçadas instrumentadas foram confeccionadas seguindo o mesmo procedimento realizado nas vigotas sem instrumentação (item 3.5.1).

Figura 3.24 - Posicionamento dos extensômetros – Armação Treliçada e Armadura Adicional



Fonte: Fazzan (2011)

Foram utilizados extensômetros elétricos da marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda e tipo PA-06-125BA-120L para medição das deformações nas armaduras treliçada e adicional (Figura 3.25).

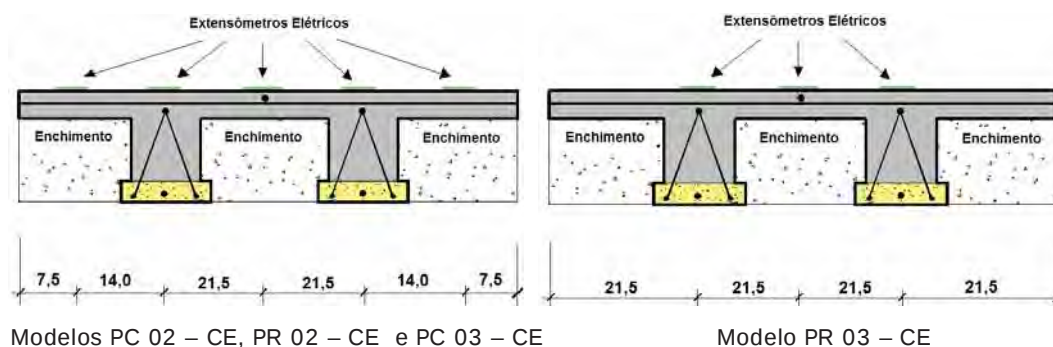
Figura 3.25 - Fixação do extensômetro elétrico na armação treliçada e na armadura adicional



Fonte: Fazzan (2011)

As deformações longitudinais do concreto da capa dos modelos também foram medidas através de extensômetros elétricos localizados na parte superior de cada faixa de laje, no meio do vão, da marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda e tipo PA-06-201BA-120L. De acordo com a Figura 3.26, nos modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE, foram utilizados cinco extensômetros no concreto, enquanto que nos modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE, foram utilizados três extensômetros. A colagem dos extensômetros foi feita uma semana antes do ensaio de ruptura, considerando 21 dias de cura do concreto que compunha a capa dos modelos (Figura 3.27).

Figura 3.26 - Posicionamento dos extensômetros elétricos no concreto (dimensões em cm)



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 3.27 - Aplicação do extensômetro elétrico na superfície da capa de concreto

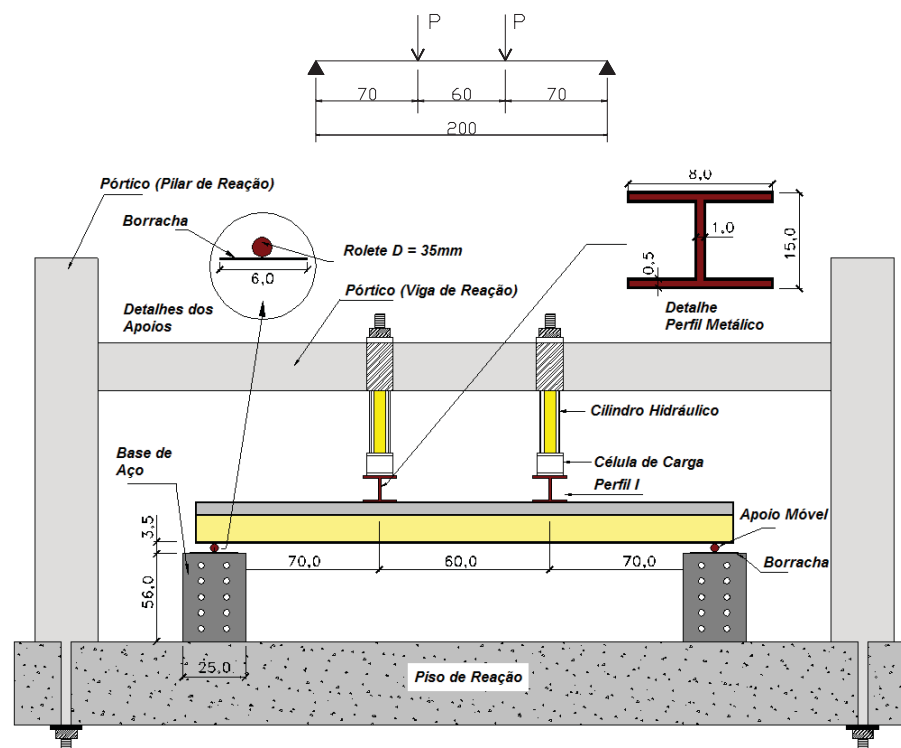


Fonte: Fazzan (2011)

3.5.2.4 Procedimentos de Ensaio e Instrumentação

O carregamento aplicado procurou simular a situação de flexão pura no “terço médio” dos modelos (Figura 3.28). A estrutura de reação foi composta por um pórtico metálico e pela laje de reação do NEPAE. Os modelos tiveram as suas extremidades simplesmente apoiadas (Figura 3.29).

Figura 3.28 - Esquema estático dos modelos (dimensões em cm)



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 3.29 - Esquema geral de ensaio



Fonte: Fazzan (2011)

Aplicou-se em cada modelo uma pintura à base de tinta Latex, a fim de facilitar a visualização de fissuras que viessem a surgir durante o ensaio de ruptura. O transporte dos modelos foi feito até o local de ensaio com auxílio de ponte rolante e cintas de tecido. Foram utilizados dois tarugos de aço passando por dois conjuntos de ganchos localizados nas extremidades das lajes, sendo os tarugos ligados às cintas. Os modelos foram transportados aos 27 dias de idade de cura do concreto, garantindo que este tivesse resistência suficiente para as operações. A Figura 3.30 mostra o transporte dos modelos.

Figura 3.30 - Transporte e posicionamento dos modelos



Fonte: Fazzan (2011)

A fixação dos perfis metálicos foi feita utilizando-se gesso, garantindo o nivelamento para o ponto de aplicação da carga, conforme mostra a Figura 3.31.

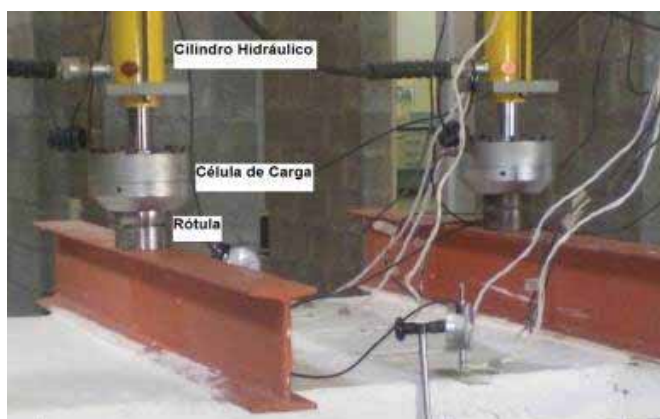
Figura 3.31 - Fixação dos perfis metálicos



Fonte: Fazzan (2011)

As forças foram aplicadas por dois atuadores hidráulicos, sendo acoplada uma célula de carga de 10 tf para cada atuador, para medição da intensidade das forças. Para a distribuição das forças no vão das lajes, foram utilizados dois perfis metálicos. Entre as células de carga e os perfis metálicos, foram utilizadas rótulas metálicas, permitindo a acomodação do cilindro hidráulico em função de possíveis imperfeições na superfície dos perfis metálicos (Figura 3.32).

Figura 3.32 - Posicionamento dos Cilindros Hidráulicos, Células de Carga e Rótulas



Fonte: Fazzan (2011)

Os deslocamentos verticais foram medidos por meio de relógios comparadores posicionados na região central da laje, um em cada borda, conforme ilustrado na Figura 3.33. Os relógios foram fixados em uma haste metálica e apoiados nas lajes por meio de suportes acrílicos, sendo a base da haste apoiada em blocos de concreto. Utilizou-se adesivo epóxi para colagem dos suportes.

Figura 3.33 - Posicionamento dos Relógios Comparadores



Fonte: Fazzan (2011)

Para os modelos iniciais (PC 01 – SE e PR 01 – SE), decidiu-se por retirar os equipamentos de medição do deslocamento vertical para uma carga de aproximadamente 70% do valor da carga de ruptura encontrada no dimensionamento. Nos modelos instrumentados com extensômetros (PC 02–CE, PR 02–CE, PC 03–CE e PR 03–CE), decidiu-se por retirar os equipamentos considerando valores próximos à ruptura, uma vez que foi caracterizado o comportamento dúctil dos modelos.

As células de carga e os relógios comparadores foram conectados ao sistema de aquisição de dados. Para os modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE, foram conectados ainda ao sistema, os extensômetros elétricos instalados nas armaduras e no concreto da capa, conforme ilustra a Figura 3.34.

Figura 3.34 - Ensaio de ruptura dos modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE



Fonte: Fazzan (2011)

O ensaio de flexão pura foi realizado aos 28 dias de idade, com velocidade de carregamento de 5 kgf/s. Para acomodação dos modelos, optou-se por fazer o ciclo de escorvamento, levando os modelos a uma carga de 10% do valor da carga de ruptura prevista no dimensionamento (equivalente a 9,0 kN). Os ensaios foram encerrados a partir do qual não se verificou ganho de carga nos atuadores hidráulicos. Por fim, o sistema foi descarregado, sendo registrados os padrões de fissuração e as aberturas de fissuras.

Os deslocamentos (flechas) foram calculados conforme as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2003), já descritas no item 2.3.2 deste trabalho.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Concretos

4.1.1 Concreto Sem Adição de Resíduo (Controle ou Referência)

Para o concreto controle das sapatas das vigotas treliçadas (TC – ARI), foi utilizado o método proposto por O'Reilly Díaz (1998), já que foi encontrada uma redução no consumo de cimento de 350 kg/m³, correspondente ao traço que serve como base de aplicação de suas formulações, para 280 kg/m³ (traço final).

Considerando a determinação correta das características dos agregados, requisito fundamental para O'Reilly Díaz (1998), foi encontrada a relação ótima entre o agregado miúdo (areia) e graúdo (brita), obtendo um teor de argamassa de 50% em volume.

Para o concreto que compõe a capa das lajes, foi utilizado o método IPT/EPUSP, que explica a correlação entre as resistências à compressão do concreto e a compacidade dele quando fresco. Para isso, foi obtido, através de tentativas, pelo método visual, um teor de argamassa ideal de 56,8% em volume, garantindo que a argamassa pudesse envolver adequadamente o agregado graúdo. Para a resistência requerida, foi encontrado um consumo de cimento de 342 kg/m³ de concreto.

Em ambos os traços, a trabalhabilidade se mostrou adequada para tais fins de aplicação.

4.1.2 Concreto Com Adição de Resíduo de Borracha

Considerando a redução nas resistências à compressão em função da inclusão da borracha, decidiu-se por aumentar o consumo de cimento em ambas as aplicações (vigotas e capa), utilizando-se, ainda, um aditivo superplastificante.

Dessa forma, utilizou-se o método proposto por O'Reilly Díaz (1998) somente para a obtenção do teor de argamassa (52,2%), de acordo com o ensaio de Massa Compactada Unitária (MUC_m). O maior valor da Massa Compactada Unitária e a menor Porosidade foram encontradas para uma proporção ótima entre agregados miúdos e graúdos (resíduo-areia-brita) de 5,4% : 29,6% : 65% em massa, ou 10% : 27% : 63% em volume.

A menor influência da introdução de partículas de borracha de pneu na resistência do concreto utilizando-se o método de O'Reilly Díaz (1998) pode ser atribuída ao fato de que este método se baseia na determinação das características do agregado graúdo, enquanto que as partículas de borracha são substituídas em relação ao volume de agregado miúdo. Além disso, o tipo de agregado graúdo apresenta grande influência na magnitude da resistência mecânica dos concretos; sendo assim, a substituição da maior parte de agregado miúdo por graúdo, em proporções ideais, que, por consequência geram menores teores de argamassa, pode garantir incrementos nas resistências mecânicas em concretos com adição de resíduos de borracha, assim como para o concreto convencional.

Na moldagem do modelo inicial com a adição de resíduo (PR 01 – SE) e inserção deste no início da mistura, tanto para as vigotas (traço TR – ARI **I**) quanto para o capeamento (traço TR – Z 32 **I**), verificou-se certa dificuldade no lançamento, adensamento e acabamento do concreto, considerando-se a situação mais crítica após 5 minutos decorridos a partir do início das operações. Em função da perda de consistência expressiva, conduziu-se à elaboração de dois traços com resíduo (TR – ARI **F** e TR – Z 32 **F**), adicionando-se a borracha no final da mistura. Em particular ao concreto elaborado para o capeamento, seu acabamento se deu com maior facilidade nos demais modelos com resíduo (PR 02 – CE e PR 03 – CE). Não houve perda de consistência expressiva mesmo após 20 minutos, tempo médio gasto para lançamento, adensamento e acabamento dos modelos.

O comportamento acima descrito pode ser visualizado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Lançamento, adensamento e acabamento dos modelos com resíduo



Modelo PR 01 – SE

Modelos PR 02 – CE e PR 03 – CE

Fonte: Fazzan (2011)

4.1.3 Resultados dos Traços de Concreto

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam-se os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão, Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade, Massa Específica, Absorção, Teor de Ar Incorporado e o valor do Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*). Os resultados foram obtidos por meio da ruptura dos corpos de prova elaborados com o concreto utilizado na moldagem das sapatas e da capa dos modelos.

Os corpos de prova dos concretos elaborados com cimento CPV-ARI Plus (Traços TC – ARI, TR – ARI I e TR – ARI F) foram ensaiados aos 35 dias de idade, uma vez que a moldagem das sapatas das vigotas pré-moldadas treliçadas foi feita uma semana antes da moldagem da capa dos modelos de lajes. Ou seja, pelo fato dos modelos serem ensaiados aos 28 dias de idade, as sapatas contavam com uma idade de 1 semana a mais que a do modelo.

Para os traços TC – Z 32, TR – Z 32 I, TC – ARI e TR – ARI I, foi fixado o Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*) de 7 ± 1 cm, enquanto que, para os traços TR – Z 32 F e TR – ARI F, foi considerado um abatimento de 10 ± 1 cm, justamente pelas dificuldades encontradas no lançamento, adensamento e acabamento dos modelos iniciais.

Os dados de Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade foram calculados considerando o desvio relativo máximo, conforme item 3.6.3 da NBR 7215 (ABNT, 1997). Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Tabela 4.1 - Ensaio dos traços de concreto - Modelos PC 01 – SE e PR 01 – SE

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Slump (cm)	Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
Capa - PC 01 - SE	TC – Z 32	7,8	2445,40	1,9
Capa - PR 01 - SE	TR – Z 32 I	7,9	2162,20	6,8
Sapata - PC 01 - SE	TC – ARI	8,0	2518,33	1,0
Sapata - PR 01 - SE	TR – ARI I	9,0	2115,52	7,2

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Absorção (%)
Capa PC 01 - SE	TC – Z 32	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		5,28
		22,27	27,69	2,68	3,92	26,10	32,51	5,08
		24,79	28,61	2,81	4,10	28,21	32,62	5,52
		Média	23,54	2,74	4,00	27,76	32,50	5,29
Capa PR 01 - SE	TR – Z 32 I	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		2,63
		21,57	28,52	2,61	3,11	24,12	24,75	2,93
		23,30	30,00	2,73	3,50	25,07	26,74	2,41
		Média	22,52	2,65	3,31	24,59	25,77	2,66
Sapata PC 01 - SE	TC – ARI	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		6,06
		22,87	27,28	2,88	3,88	26,79	28,45	6,09
		23,27	27,75	3,06	4,27	29,78	30,70	6,30
		Média	23,09	2,96	4,12	28,56	30,24	6,15
Sapata PR 01 - SE	TR – ARI I	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		4,13
		18,98	24,10	2,38	3,23	22,40	25,07	3,98
		19,60	26,40	2,52	3,48	23,21	25,90	2,75
		Média	19,29	2,43	3,30	22,80	25,48	3,62

Tabela 4.2 - Ensaio dos traços de concreto - Modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Slump (cm)	Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
Capa - PC 02 - CE	TC – Z 32	8,1	2472,34	1,7
Capa - PR 02 - CE	TR – Z 32 F	11,1	2237,74	4,8
Sapata - PC 02 - CE	TC – ARI	8,3	2529,50	1,3
Sapata - PR 02 - CE	TR – ARI F	10,0	2204,23	5,5

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Absorção (%)
Capa PC 02 - CE	TC – Z 32	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		6,03
		19,30	25,46	2,24	3,05	25,33	26,72	5,75
		20,49	28,53	3,05	3,89	26,49	28,82	5,22
	Média	20,04	27,00	2,73	3,48	25,96	28,05	5,67
Capa PR 02 - CE	TR – Z 32 F	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		2,08
		20,16	27,38	2,78	3,99	26,91	28,63	2,55
		21,35	29,43	3,45	4,15	28,02	29,70	2,61
	Média	20,94	28,37	3,10	4,07	27,55	29,20	2,41
Sapata PC 02 - CE	TC – ARI	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		5,87
		20,91	26,56	2,91	4,10	28,15	29,28	6,44
		21,88	28,28	3,28	4,46	29,37	31,65	6,11
	Média	21,43	27,46	3,12	4,29	28,60	30,10	6,14
Sapata PR 02 - CE	TR – ARI F	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		3,39
		20,72	24,97	2,40	3,71	24,71	25,58	3,73
		21,82	27,45	2,88	3,72	25,62	26,90	3,12
	Média	21,27	26,03	2,59	3,72	25,28	26,40	3,41

Tabela 4.3 - Ensaio dos traços de concreto - Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Slump (cm)	Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
Capa PC 03 - CE	TC – Z 32	7,5	2459,85	2,2
Capa PR 03 - CE	TR – Z 32 F	10,6	2286,37	4,5
Sapata PC 03 - CE	TC – ARI	8,1	2511,76	1,5
Sapata PR 03 - CE	TR – ARI F	11,5	2228,54	6,0

Modelo de Laje	Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Absorção (%)
Capa PC 03 - CE	TC – Z 32	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		5,63
		19,69	27,68	3,45	4,17	28,46	30,80	4,99
		21,65	29,62	3,15	4,60	29,60	34,32	5,39
		Média	20,84	28,79	3,28	4,35	29,20	32,48
Capa PR 03 - CE	TR – Z 32 F	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	28 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		2,18
		21,86	27,41	3,22	4,05	28,38	30,01	2,89
		22,49	30,69	3,24	4,31	30,18	31,84	2,33
		Média	22,08	29,08	3,23	4,12	29,23	31,18
Sapata PC 03 - CE	TC – ARI	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		5,94
		22,50	27,95	3,37	4,46	30,10	32,04	5,90
		23,02	30,03	3,68	4,96	30,95	33,05	6,02
		Média	22,76	29,21	3,52	4,73	30,42	32,54
Sapata PR 03 - CE	TR – ARI F	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	7 Dias	35 Dias	35 Dias
		Intervalo		Intervalo		Intervalo		3,10
		21,43	27,80	3,08	4,77	28,27	30,28	3,49
		23,14	29,68	3,41	4,93	29,90	31,10	3,01
		Média	22,51	29,49	3,23	4,85	28,98	30,67

4.1.4 Análise dos Resultados dos Traços de Concreto

De acordo com os resultados obtidos, os métodos de dosagem empregados se mostraram eficientes na obtenção da resistência requerida (acima de 25 MPa aos 28 dias de idade) para os traços controle e com adição de resíduo.

Embora os traços sejam elaborados com dois tipos diferentes de cimento, verificou-se, entre 7 e 28 dias, um ganho de resistência próximo para os concretos das vigotas treliçadas (elaborado com cimento CPV-ARI Plus) e da capa (elaborado com cimento CP II Z 32).

Os resultados de resistência à tração aos 28 dias de idade mostraram que a inserção de resíduo no final da mistura proporcionou valores maiores que os dos concretos com inserção de resíduo no início.

Para os traços finais dos concretos com borracha, foram obtidos consumos de cimento de 310 kg/m³ de concreto para a fabricação das sapatas das vigotas treliçadas e 360 kg/m³ de concreto para a confecção da capa das lajes. Foi observado um aumento no consumo de cimento de 10,7% para o concreto das sapatas e de 5,3% para o concreto da capa, em relação aos consumos do traço referência, que corresponderam aos consumos de cimento de 280 kg/m³ de concreto e 342 kg/m³ de concreto, respectivamente.

Constatou-se que os traços com resíduo de borracha apresentaram aumento nos valores de teor de ar incorporado, se comparado aos traços sem resíduo. Entretanto, pode-se observar que os traços de concreto com inserção de resíduo no final apresentaram redução do teor de ar incorporado, se comparado com os traços com inserção de resíduo no início. Tal fato se justifica pela redução do tempo de mistura da borracha nos traços TR – Z 32 F e TR – ARI F, considerando que o formato alongado (tipo fibra) do resíduo tem influência na capacidade de reter ar no interior das misturas. A redução variou em torno de 33% para o traço TR – Z 32 e 17% para o traço TR – ARI.

A adição do resíduo ocasionou uma redução no módulo de elasticidade dos concretos. Nota-se uma maior diferença entre os módulos dos concretos sem resíduo e com inserção de resíduo no início da mistura, se comparados com os traços convencionais e com inserção de resíduo no final da mistura. No caso do modelo 02 com resíduo (PR 02 – CE), observou-se o que concreto empregado na capa (traço TR – Z 32 F) apresentou o valor do módulo de elasticidade ligeiramente maior que o módulo do concreto da capa sem resíduo (traço TC – Z 32). De fato, a redução do teor de ar incorporado para os concretos com adição de resíduo no final da mistura, em relação aos traços com inserção de resíduo no início, refletiu no aumento do módulo de elasticidade, considerando que a inserção desse no final proporcionou um melhor empacotamento das partículas no interior dos concretos.

Além disso, segundo Hartmann e Helene (2003), os aditivos químicos e a relação água/cimento têm influência direta no módulo de elasticidade dos concretos. Menores relações água/cimento, para resistências constantes, indicam incrementos nos módulos de elasticidade. Os autores verificaram que, para resistências constantes, o uso de superplastificantes requereu relações água/cimento mais baixas e consequentemente módulos de elasticidade maiores, quando comparados ao concreto referência.

Em relação à massa específica, foram observadas quedas de 13,1%, 10,4% e 7,6% (modelos PR 01 – SE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, respectivamente) para os traços com adição de resíduo, em relação aos traços controle, utilizando-se cimento CP II Z 32. Para o cimento CPV-ARI Plus, foram observadas reduções de 19,0%, 14,8% e 12,7%, considerando os modelos PR 01 – SE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, respectivamente, em relação aos modelos sem adição de resíduo. As reduções constatadas indicam que a adição de borracha pode proporcionar redução do peso próprio das estruturas e consequentemente reduzir os custos com fundações.

Nos três grupos de modelos estudados, ficou constatado que a inclusão da borracha nos concretos, associada ao uso de aditivo, causou redução da absorção. Todos os traços convencionais apresentaram valores de absorção superiores aos traços com resíduo, sendo essa diferença aproximadamente constante nos seis modelos (da ordem de 44% a 57%). Em função da borracha atuar como poros fechados no interior dos concretos, já que sua taxa de absorção é nula, a adição de resíduos de borracha de pneu em concretos pode servir como uma forma de aumentar a sua durabilidade.

4.2 Ensaios dos Modelos de Lajes Pré-Moldadas Trelaçadas

Os modelos de laje foram instrumentados e ensaiados à flexão pura aos 28 dias de idade, sendo armazenados no Sistema de Aquisição de Dados os resultados experimentais obtidos.

Os dados referentes à carga e deslocamento vertical foram obtidos para todos os modelos de laje. Já os resultados referentes à deformação do concreto e da armadura foram obtidos apenas para os modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE.

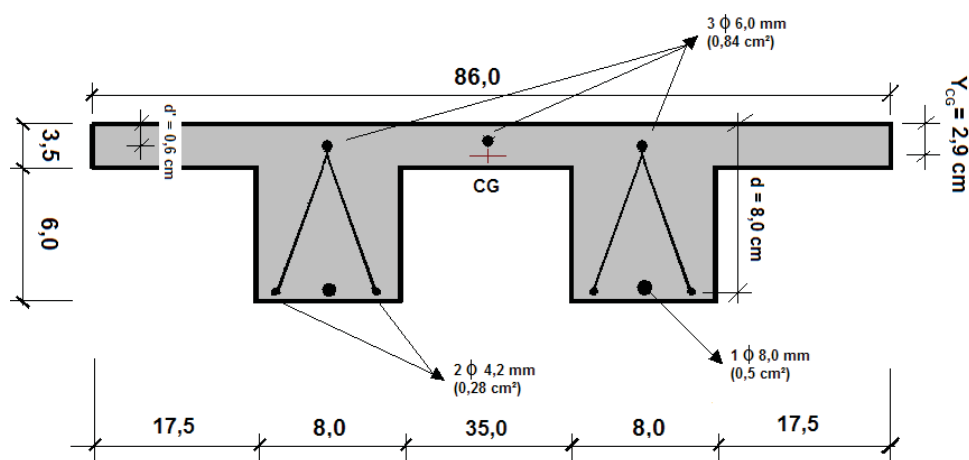
O modelo proposto por Branson (1968), adotado pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), foi utilizado com o intuito de fornecer os dados de deslocamento vertical (flecha) e momento de fissuração (M_f). Dessa forma, permitiu-se comparar os valores calculados pelo método com valores experimentais, apresentados no gráfico Momento Fletor x Relação Flecha/Vão.

Os valores de flecha experimental também foram analisados no Estado Limite de Serviço, que corresponde à aceitabilidade sensorial na limitação visual, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003). A norma prevê um deslocamento limite de $L/250$, sendo L o vão do elemento estrutural.

4.3 Dimensionamento dos Modelos de Lajes Pré-Moldadas Treliçadas

A seção transversal dos modelos de laje é definida na Figura 4.2 e suas propriedades geométricas são apresentadas na Tabela 4.4. Para efeitos de simplificação dos cálculos, foram desprezadas as mísulas e as abas da seção da sapata de concreto, indicando que as nervuras possuem largura (b_w) de 8 cm. O vão teórico foi adotado como sendo igual a 200 cm.

Figura 4.2 - Seção transversal dos modelos (unidades em cm)



Fonte: Fazzan (2011)

Tabela 4.4 - Características geométricas dos modelos

Propriedades Geométricas da Seção Transversal		
Área (cm ²)	A_g	397
Altura (cm)	h	9,5
Altura útil (cm)	d	8,0
Altura da mesa (cm)	h_f	3,5
Cobrimento superior (cm)	d'	0,6
Largura (cm)	b	86
Largura da nervura (cm)	b_w	8,0
Centro geométrico em y (cm)	y_{cg}	2,9
Momento de inércia (cm ⁴)	I_c	2237,5
Área de aço total na tração (cm ²)	A_{st}	1,56
Área de aço total na compressão (cm ²)	A_{sc}	0,84

Além disso, são feitas as seguintes observações:

- para simplificação dos cálculos, foi adotado, para a armadura adicional superior, um diâmetro de 6,0 mm, embora a barra em aço CA-50 possuísse diâmetro de 6,3 mm. Considerando-se 3 barras de Ø 6,0 mm, ao invés de 2 barras com Ø 6,0 mm mais uma barra com Ø 6,3 mm, verificou-se uma diferença percentual de apenas 3,6 % da área de aço total na compressão;

- em função dos ensaios terem mostrado que a tensão de escoamento das barras em aço CA-50, com diâmetros de 6,3 mm e 8,0 mm, se aproximou de 700 MPa, decidiu-se por adotar o valor da tensão de escoamento igual a 600 MPa (CA-60);

- o valor do cobrimento superior (d') foi obtido experimentalmente, sendo utilizada a média das distâncias da face superior dos modelos até o centro da armadura comprimida.

O Momento Atuante (M_A) nos modelos foi definido como sendo a soma do momento causado pelos pesos próprios da seção do concreto, das lajotas e dos perfis metálicos (79,525 kN.cm) com o momento causado pela carga P aplicada por cada atuador hidráulico ($70.P$), conforme a Equação 4.1. Como os relógios comparadores foram posicionados quando os modelos já estavam submetidos ao peso próprio, os deslocamentos estão relacionados com a carga aplicada pelos atuadores hidráulicos.

$$M_A = 79,525 + 70.P \quad (kN.cm) \quad (4.1)$$

O momento atuante acima descrito será utilizado no cálculo da carga de ruptura prevista em cada modelo e no cálculo da rigidez equivalente no método de Branson (1968), sendo este preconizado pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003). De fato, Santos (2009) concluiu que, para o método de Branson (1968), é mais coerente somar os momentos permanentes ao momento gerado pela aplicação do carregamento do que subtrair do momento de fissuração, que é uma característica do material usado no elemento estrutural.

4.3.1 Cálculo do Momento de Ruptura ou Momento Resistente

A Tabela 4.5 mostra os valores dos parâmetros necessários para o cálculo do momento resistente. O modelo de cálculo para a obtenção do momento de ruptura dos modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE encontra-se em anexo.

Tabela 4.5 - Dados para cálculo do Momento Resistente e Carga de Ruptura

Parâmetro	Unid.	Modelos		
		PC 01 , PR 01 (SE-Sem ext.)	PC 02 , PR 02 (CE-Com ext.)	PC 03 ; PR 03 (CE-Com ext.)
Posição Linha Neutra (x)	cm	0,807	0,821	0,793
Deformação Aço Tracionado (ϵ_s)	‰	10	10	10
Deformação Concreto Comprimido (ϵ_c)	‰	1,122	1,144	1,100
Deformação Aço Comprimido (ϵ_{sc})	‰	0,288	0,308	0,268
Deformação Convencional (ϵ_{vd})	‰	2,86	2,86	2,86
Resultante do Aço Tracionado (R_{ST})	kN	93,60	93,60	93,60
Resultante do Aço Comprimido (R_{SC})	kN	5,08	5,43	4,73
Resultante do Concreto Comprimido (R_{CC})	kN	88,60	88,25	88,83
C.G. do Concreto Comprimido (Z_G)	cm	0,28	0,29	0,28
Momento Resistente Estimado (M_U)	kN.cm	720,60	720,00	721,18
Carga de Ruptura Estimada (P)	kN	9,157	9,150	9,166

4.3.2 Previsão da Flecha Imediata

A Tabela 4.6 mostra as características mecânicas dos modelos determinado pelo método de Branson (1968). O modelo de cálculo para a previsão da flecha imediata segundo o método proposto se encontra em anexo, para os modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE.

Tabela 4.6 - Características mecânicas - Método de Branson (1968)

Característica	Unid.	Modelos		
		PC 01 , PR 01 (SE-Sem ext.)	PC 02 , PR 02 (CE-Com ext.)	PC 03 , PR 03 (CE-Com ext.)
Resistência Média à Compressão (f_{cm})	kN/cm ²	2,80	2,70	2,90
Resistência à Tração Axial ($f_{ct,m}$)	kN/cm ²	0,28	0,27	0,28
Momento de Inércia (I_c)	cm ⁴	2237,50	2237,50	2237,50
Momento de Fissuração (M_f)	kN.cm	112,51	109,84	115,13
Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs})	kN/cm ²	2518,80	2473,40	2563,34
Módulo de elasticidade aço (E_s)	kN/cm ²	21000	21000	21000
α_e	---	8,34	8,49	8,19
Posição Linha Neutra (x)	cm	1,37	1,38	1,36
Momento de inércia estágio II (I_{II})	cm ⁴	649,60	660,10	639,53

4.4 Análise dos Resultados das Lajes – Momento Fletor x Flecha/Vão

Nas Figuras 4.3 a 4.8 são feitas comparações das relações flecha/vão e momento fletor para cada um dos modelos, incluindo-se os valores dos momentos de ruptura (M_{rup}) e momento de retirada dos relógios comparadores ($M_{r,rel}$).

O deslocamento no meio do vão foi obtido a partir da média aritmética dos valores fornecidos pelos relógios comparadores, localizados um em cada borda dos modelos.

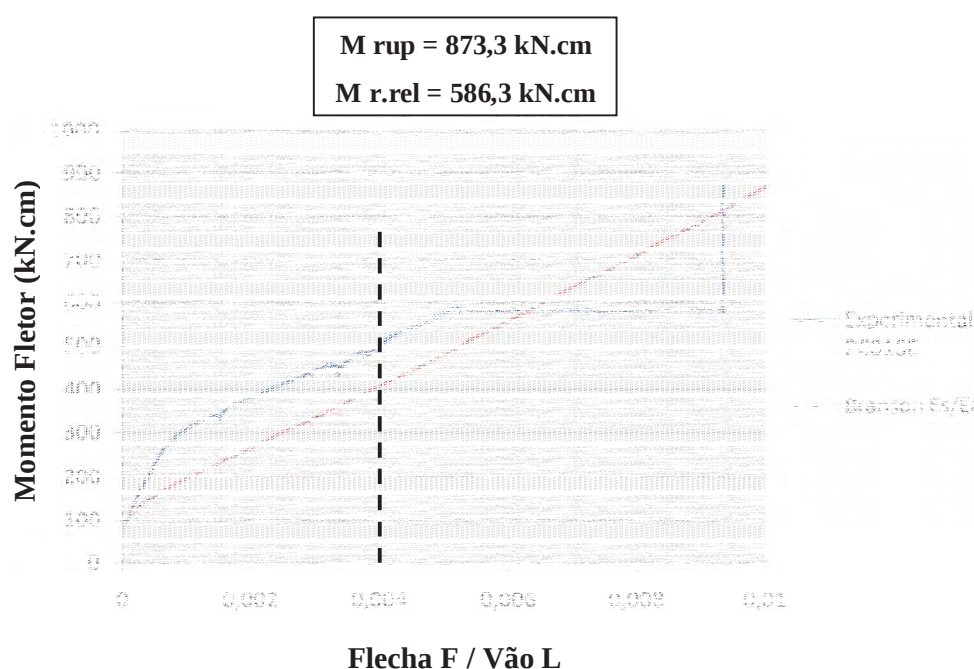
A relação flecha/vão teórica é obtida a partir do valor do momento de inércia média de Branson para $\alpha_e = E_s/E_c$, sendo α_e o quociente da divisão do módulo de elasticidade do aço pelo módulo de elasticidade secante do concreto.

A retirada dos relógios comparadores se deu com base no valor calculado previsto da carga de ruptura. Em relação aos modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE, decidiu-se retirar os equipamentos para uma carga próxima à carga de ruptura, dada à experiência obtida nos ensaios dos modelos anteriores (PC 01 – SE e PR 01 – SE).

São observados, nos gráficos a seguir, pontos onde se verifica queda do valor do momento fletor para uma mesma relação flecha/vão no decorrer do ensaio. Tal fato pode ser explicado pela realização de pequenas interrupções para avaliar as condições de apoio dos modelos, marcação da posição das fissuras e anotação de possíveis ruídos que pudessem confirmar a detecção da primeira fissura com o momento de fissuração obtido pelo próprio gráfico de Momento Fletor x Relação Flecha/Vão.

Os ensaios foram encerrados a partir do qual não se verificou ganho de carga nos atuadores hidráulicos, sendo indicados, nos gráficos, por meio de quedas no momento fletor.

Figura 4.3 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão - Modelo **PC 01 – SE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.4 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão - Modelo **PR 01 – SE**

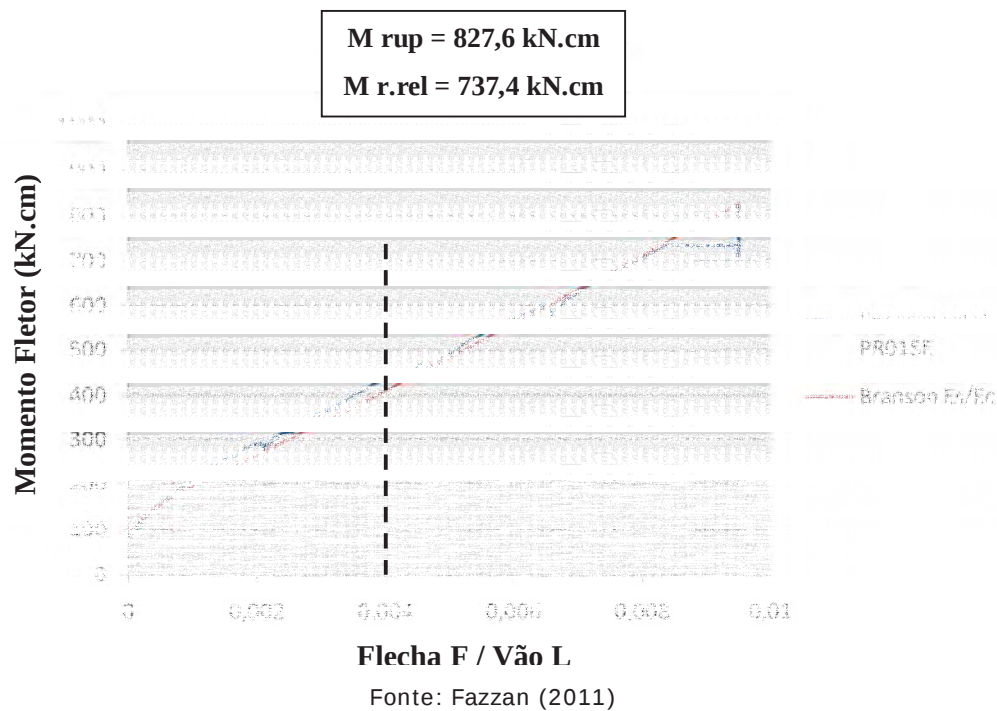


Figura 4.5 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão do modelo **PC 02 – CE**

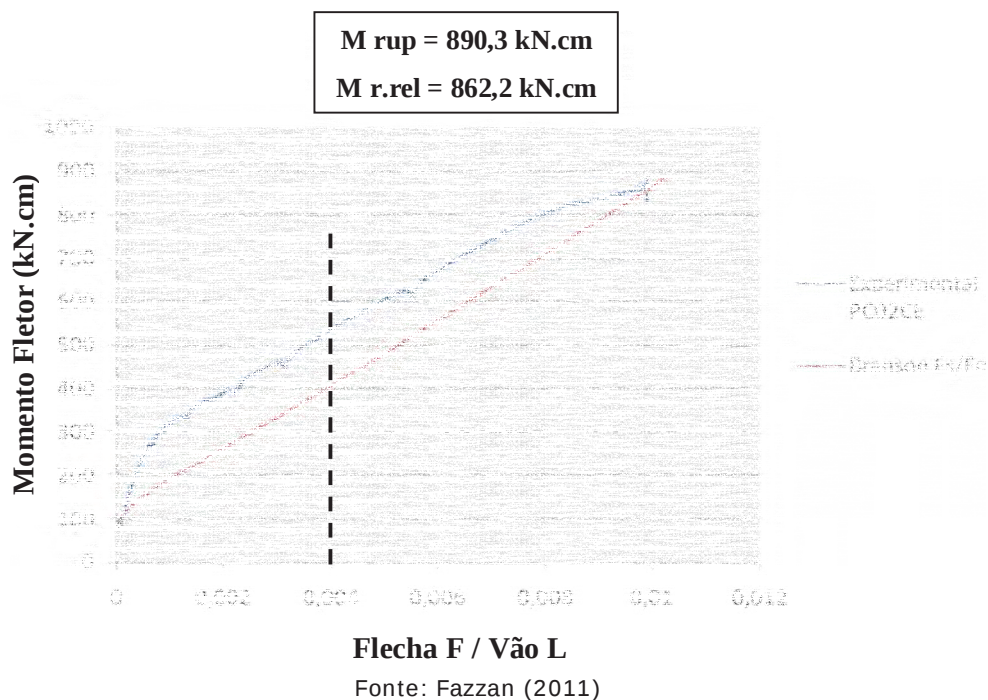
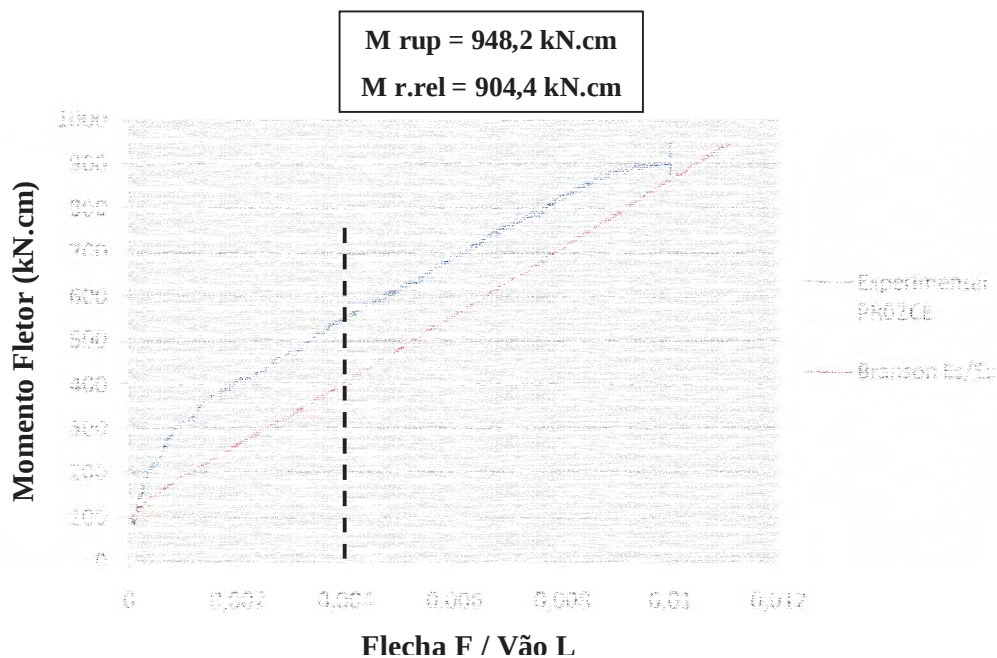
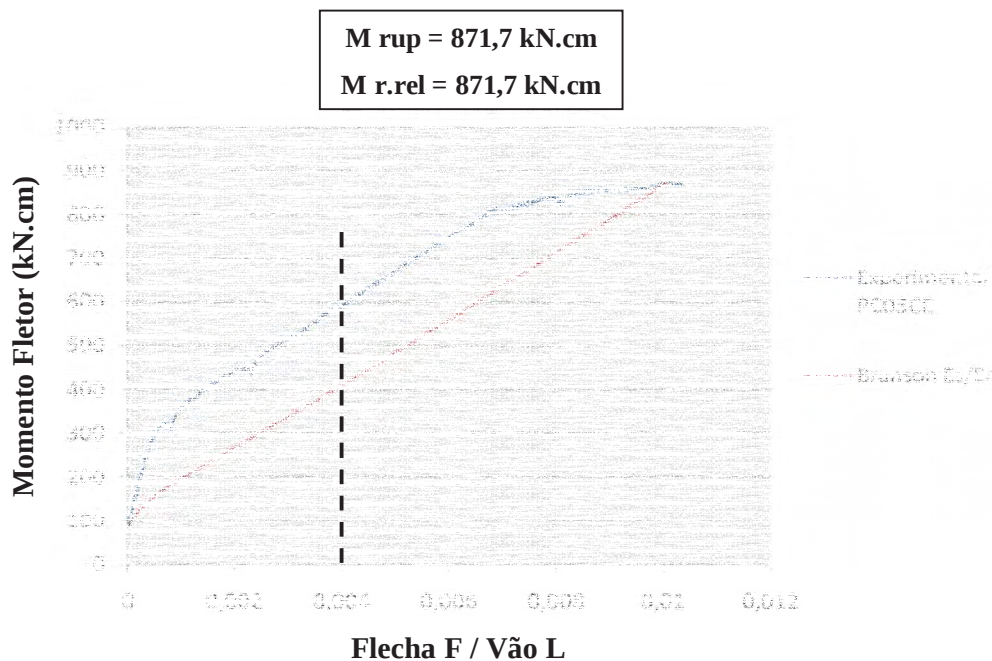


Figura 4.6 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão - Modelo **PR 02 – CE**

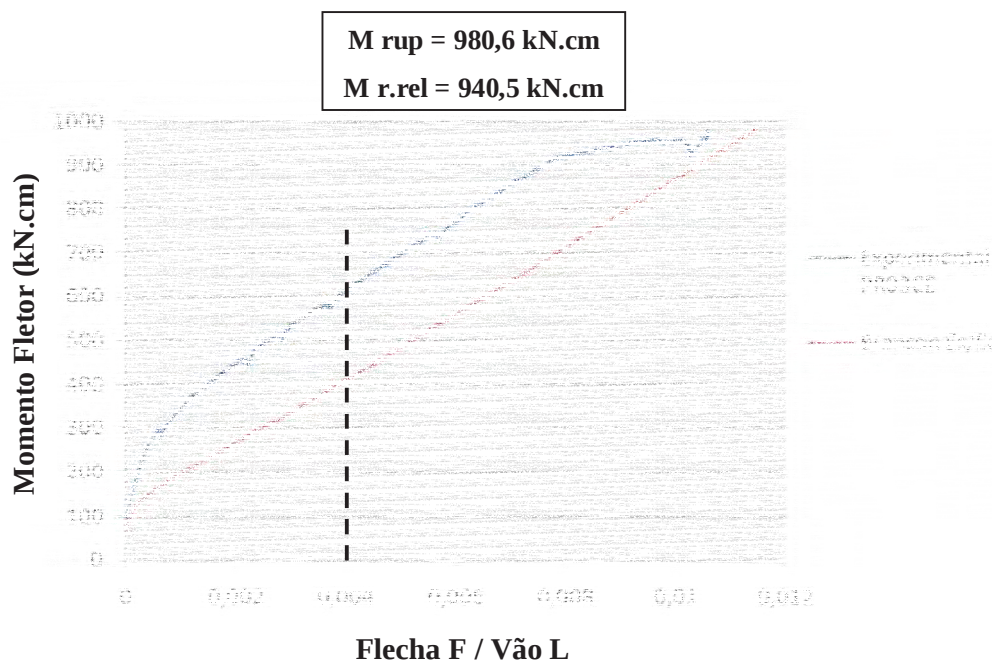


Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.7 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão - Modelo **PC 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.8 - Momento Fletor x Relação Flecha/Vão - Modelo **PR 03 – CE**

Fonte: Fazzan (2011)

De acordo com as figuras mencionadas anteriormente, observa-se em todos os modelos a evolução do momento fletor com o aumento da relação flecha/vão, indicando que os comportamentos similares foram garantidos pelas condições satisfatórias de ensaio.

Os momentos de ruptura encontrados experimentalmente atingiram valores entre 820 kN.cm e 980 kN.cm. Entretanto, comparando-se os modelos com e sem adição de resíduo separadamente, essa diferença se deu em menor grandeza.

Pode-se observar que, após o momento de fissuração experimental ser atingido, ocorre uma mudança de declividade das curvas apresentadas nos gráficos.

Os modelos PC 01 – SE e PR 01 – SE foram moldados com o intuito de prever as dificuldades encontradas durante o ensaio de ruptura dos mesmos, sendo feitas as seguintes considerações:

- verificou-se um problema no controle da velocidade de aplicação do carregamento no modelo PC 01 – SE, embora não tenham sido verificadas quaisquer anormalidades nos gráficos de Momento Fletor x Flecha/Vão. Além disso, o fato de ter sido verificado um ganho exagerado de carga em um curto período de tempo, após um patamar de grandes deslocamentos

sem ganho de carga, está relacionado com a retirada dos relógios comparadores para o momento fletor aproximado de 586 kN.cm;

- em especial ao modelo PR 01 – SE, observa-se um comportamento diferente do gráfico Momento Fletor x Flecha/Vão, nas quais não se detectou o momento de fissuração experimental, indicado pela mudança de declividade do gráfico. Tal fato pode ser justificado por alguns problemas encontrados na condição de apoio em uma das extremidades do modelo: observou-se que o modelo estava parcialmente apoiado em uma das lajotas da extremidade; com isso, é possível que tenha ocorrido concentrações de tensões e a conseqüente fissuração prematura da peça.

Em geral, observou-se que as curvas experimentais e de Branson crescem paralelamente. Sendo assim, o método proposto forneceu resultados adequados, uma vez que o estado limite de utilização foi atingido para momentos fletores menores que os observados no ensaio experimental.

A Tabela 4.7 mostra a comparação dos momentos de fissuração calculados pelo método de Branson com os momentos de fissuração experimentais, obtidos pela mudança de declividade dos gráficos anteriores. Além disso, são fornecidos os valores aproximados do momento de fissuração, considerando o som emitido pela provável acomodação de lajotas, após o início da fissuração, permitindo compará-los com os dados experimentais.

Para o modelo PR 01 – SE, verificou-se que a curva de Branson garantiu com exatidão a previsão da flecha imediata. Entretanto, os dados obtidos experimentalmente não foram consistentes em função das falhas encontradas, tornando impossível a obtenção do valor do momento de fissuração experimental, em função da variação da inclinação do gráfico.

Tabela 4.7 - Resultados dos momentos de fissuração calculados e experimentais

MODELO	MOMENTO DE FISSURAÇÃO (kN.cm)		
	Experimental	Som Emitido	Branson
PC 01 – SE	298,6	331,5	112,5
PR 01 – SE	---	---	112,5
PC 02 – CE	290,6	268,5	109,4
PR 02 – CE	307,6	317,5	109,4
PC 03 – CE	315,7	310,5	115,1
PR 03 – CE	301,1	289,5	115,1

Podem-se analisar as diferenças entre momentos de fissuração experimentais, sendo observado um aumento de 11,4% para o modelo PR 02 – CE e queda de 1,2% para o modelo PR 03 – CE, em relação aos modelos PC 02 – CE e PC 03 – CE, respectivamente.

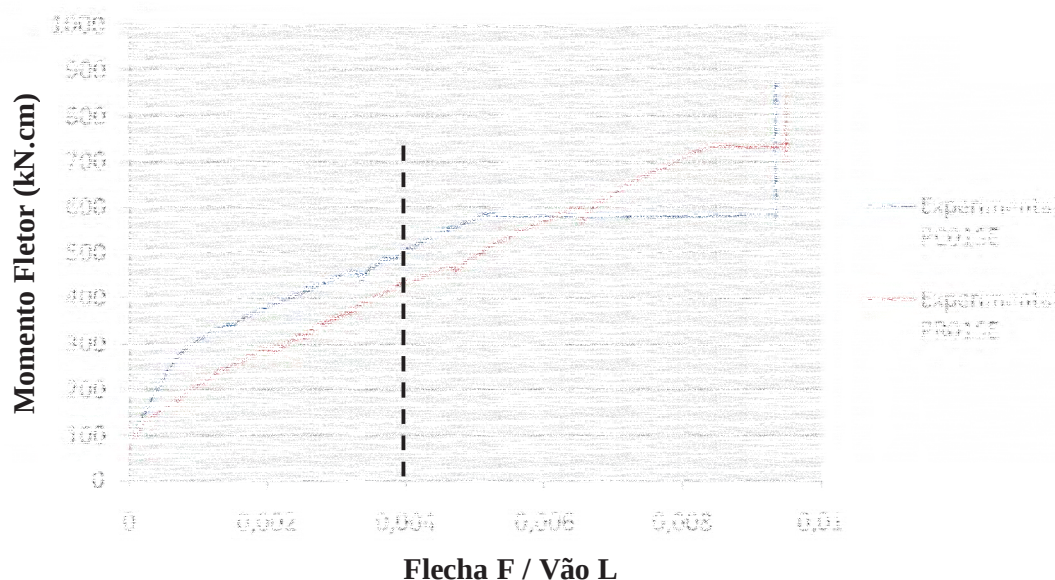
Os resultados de momento de fissuração obtidos pelo som da acomodação das lajetas mostraram-se em conformidade com os valores experimentais.

Além disso, são analisados os resultados de momentos de fissuração experimentais com os resultados obtidos pelo método de Branson, verificando que este método proporcionou reduções de 60,4%, 60,4%, 64,4%, 62,2% e 61,2%, para os modelos PC 01 – SE, PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE, respectivamente. Observa-se que o aumento do valor do momento de fissuração utilizado pela formulação de Branson poderia melhorar a previsão da flecha imediata para o caso destes modelos.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 representam a comparação entre os modelos sem e com adição de resíduo de borracha de pneu, para os valores dos momentos fletores e relações Flecha/Vão. Dessa forma, foram analisados, em cada Figura, modelos da mesma moldagem, considerando:

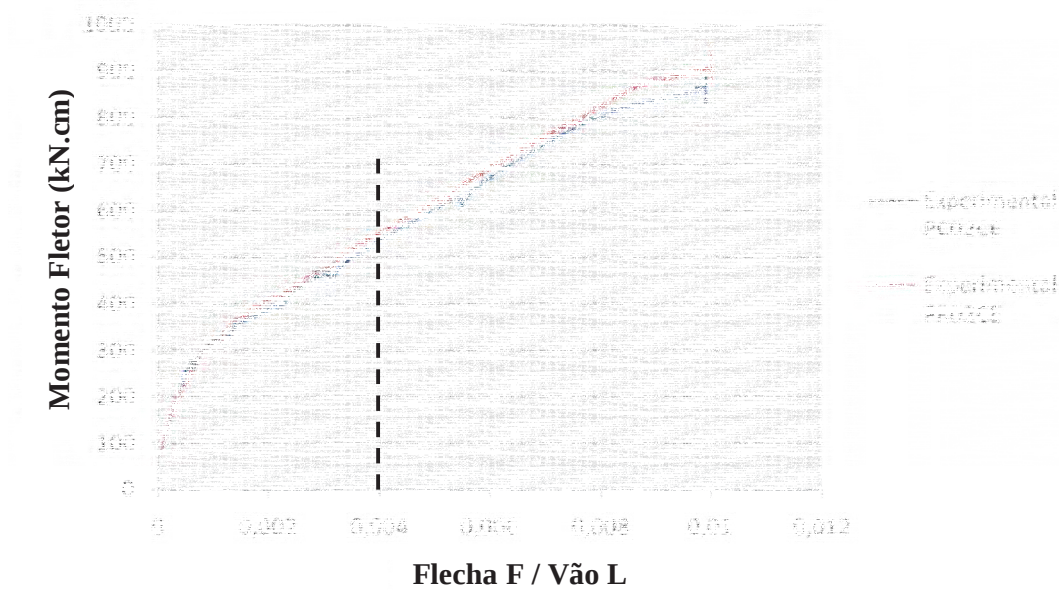
- 1ª Moldagem: Modelos PC 01 – SE e PR 01 – SE.
- 2ª Moldagem: Modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE.
- 3ª Moldagem: Modelos PC 03 – CE e PR 03 – CE.

Figura 4.9 – Comparação do Momento x Flecha/Vão - Modelos **PC 01 – SE** e **PR 01 – SE**



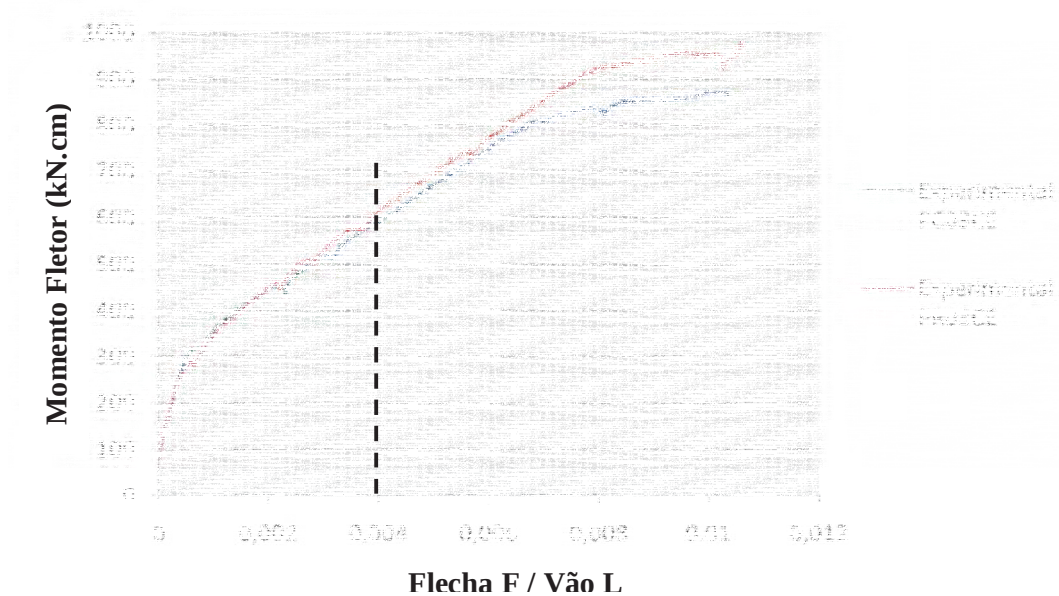
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.10– Comparação do Momento x Flecha/Vão - Modelos **PC 02 – CE** e **PR 02 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.11 – Comparação do Momento x Flecha/Vão - Modelos **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Inicialmente, foram analisados, em cada figura, os valores de flecha experimental no Estado Limite de Serviço, que corresponde à aceitabilidade sensorial na limitação visual, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003). A norma prevê um deslocamento limite de $L/250$, sendo L o vão do elemento estrutural. Portanto, o valor da razão Flecha/Vão (F/L) é igual a 0,004.

Neste contexto, observa-se, na Figura 4.9, que o modelo com resíduo (PR 01 – SE) apresenta valores de Flecha/Vão superiores aos valores observados no modelo inicial sem resíduo (PC 01 – SE). Entretanto, conclusões não podem ser feitas em relação ao modelo com resíduo, considerando as falhas encontradas durante o ensaio.

Por outro lado, fica evidente que os modelos PR 02 – CE e PR 03 – CE apresentaram valores de deslocamento ligeiramente inferiores aos modelos PC 02 – CE e PC 03 – CE, respectivamente, para uma mesma carga. De maneira geral, as curvas se comportaram de maneira quase idêntica até o momento de 800 kN.cm.

Da mesma forma, a Tabela 4.8 mostra que modelos com inserção de resíduo de borracha no final da mistura (PR 02 – CE e PR 03 – CE) apresentaram valores de momento fletor experimental superiores em 3,7% e 5,0% aos valores de momento fletor experimental dos modelos sem resíduo (PC 02 – CE e PC 03 – CE), respectivamente, para o Estado Limite de Serviço.

Além disso, o modelo proposto por Branson garante segurança estrutural em todos os modelos ensaiados, considerando que o método fornece menores valores de momento fletor em relação aos dados experimentais. Sendo assim, para valores constantes de momento fletor, a utilização do modelo proposto faz com que se atinja o Estado Limite de Serviço mais precocemente.

Tabela 4.8 - Momento fletor experimental e obtido pelo método de Branson, para o Estado Limite de Serviço

MODELO	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO F/L = 0,004 ou Flecha = 8,0mm	
	Momento Fletor Experimental (kN.cm)	Momento Fletor Branson (kN.cm)
PC 01 – SE	508,0	409,3
PR 01 – SE	435,4	411,1
PC 02 – CE	529,2	408,1
PR 02 – CE	548,9	407,8
PC 03 – CE	587,3	411,0
PR 03 – CE	616,8	412,6

Portanto, pode-se afirmar que os modelos PR 02 – CE e PR 03 – CE apresentaram rigidez à flexão equivalente aos modelos PC 02 – CE e PC 03 – CE. É notável que a inclusão do resíduo não tenha alterado o comportamento dos modelos no Estado Limite de Serviço. Aliado aos valores próximos de momento de fissuração experimental e acréscimos de momento de ruptura para os modelos referentes com resíduo, tais comportamentos podem ser relacionados com os resultados dos ensaios dos concretos.

Trigo et al. (2008), ao analisar o comportamento estrutural de modelos de lajes treliçadas pré-moldadas unidirecionais, sem e com resíduo de borracha de pneu incluído no concreto da capa dessas lajes, verificaram queda expressiva do módulo de elasticidade do concreto com resíduo, pelo fato deste atuar como vazios dentro do concreto. Dessa forma, os modelos apresentaram menor rigidez, e, portanto, maiores deformações.

Para os concretos utilizados nos modelos PR 02 – CE e PR 03 – CE, o fato de se adicionar resíduo no final da mistura causou incrementos no valor do módulo de elasticidade. Além disso, sabe-se que a flecha do elemento estrutural depende da inércia da seção transversal e das propriedades dos concretos, sendo a rigidez à flexão caracterizada pelo produto E.I.

As reduções do teor de ar incorporado, por estar diretamente relacionadas com o melhor empacotamento das partículas no interior dos concretos com resíduo, proporcionaram aumento de rigidez das estruturas e, conseqüentemente, reduções nos deslocamentos. Além disso, ficou comprovado que a utilização de aditivos superplastificantes em concretos com resíduo gera incrementos no módulo de elasticidade e na resistência mecânica, sendo as propriedades observadas com as reduções do fator água/cimento e melhor hidratação das partículas de cimento.

A obtenção das propriedades desejáveis para os concretos com adição de resíduo também tiveram relação com a boa execução das etapas de concretagem dos modelos, principalmente no diz respeito à vibração das sapatas de concreto das vigotas pré-moldadas e ao processo de cura dos modelos.

A Tabela 4.9 mostra a comparação dos valores de momento de ruptura experimental com os valores de momento resistente, calculado segundo dimensionamento apresentado em anexo.

Tabela 4.9 - Resultados dos momentos de ruptura calculados e experimentais

MODELO	Momento de Ruptura Experimental (kN.cm)	Momento de Ruptura Calculado ou <i>Momento Resistente</i> (kN.cm)	Razão entre os momentos experimental e calculado
PC 01 – SE	873,3	720,6	1,21
PR 01 – SE	827,6	720,6	1,15
PC 02 – CE	890,3	720,0	1,24
PR 02 – CE	948,2	720,0	1,32
PC 03 – CE	871,7	721,2	1,21
PR 03 – CE	980,6	721,2	1,36

Observa-se que todos os modelos apresentaram momento de ruptura experimental superior ao momento resistente calculado, salientando que o uso da borracha não alterou o comportamento quanto à segurança das estruturas. Pressupõe-se também que a segurança estrutural foi majorada em função de se ter utilizado a tensão de escoamento do aço igual a 600 MPa, mesmo que os ensaios em laboratório tivessem fornecido tensões de escoamento próximas a 700 MPa.

Além do mais, constata-se que os modelos com inserção de resíduo de borracha no final da mistura (PR 02 – CE e PR 03 – CE) apresentaram valores de momento de ruptura experimental superiores aos valores de momento de ruptura dos modelos sem resíduo de borracha (PC 02 – CE e PC 03 – CE), sendo os momentos de ruptura experimentais aumentados em 6,5% e 12,5% e a segurança aumentada em 5% e 9%, respectivamente.

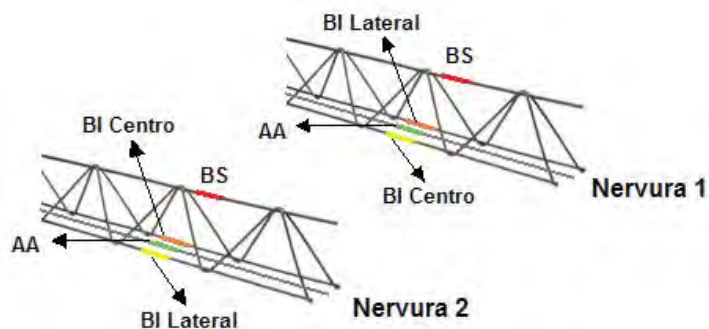
Quanto ao modelo PR 01 – SE, no Estado Limite Último foi observada redução de apenas 5,2% do momento de ruptura experimental em relação ao modelo inicial sem resíduo (PC 01 – SE).

4.5 Análise dos Resultados das Lajes – Momento Fletor x Deformação

A instrumentação para avaliação das deformações nas armaduras e no concreto se deu por meio de extensômetros elétricos. Estes foram posicionados no centro do vão, local onde deve ocorrer o máximo valor do momento fletor positivo. A Figura 4.12 representa o esquema de posicionamento e nomenclatura dos extensômetros elétricos utilizados na armadura, sendo:

- BI – Banzo Inferior
- BS – Banzo Superior
- AA – Armadura Adicional

Figura 4.12 - Posicionamento dos extensômetros elétricos da armadura



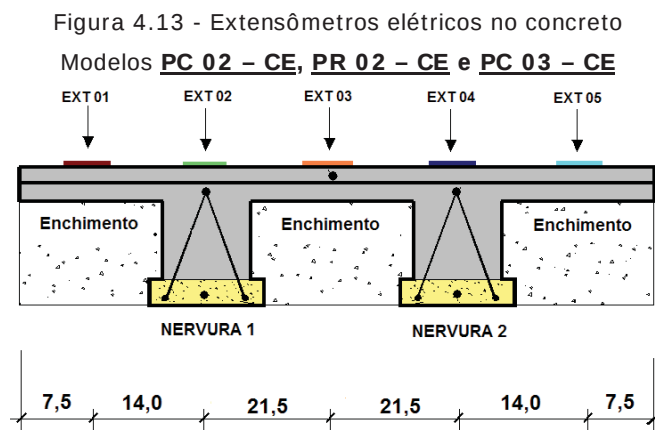
Fonte: Fazzan (2011)

Portanto, nos gráficos de Momento Fletor x Deformação na Armadura, serão utilizadas as seguintes nomenclaturas (Tabela 4.10):

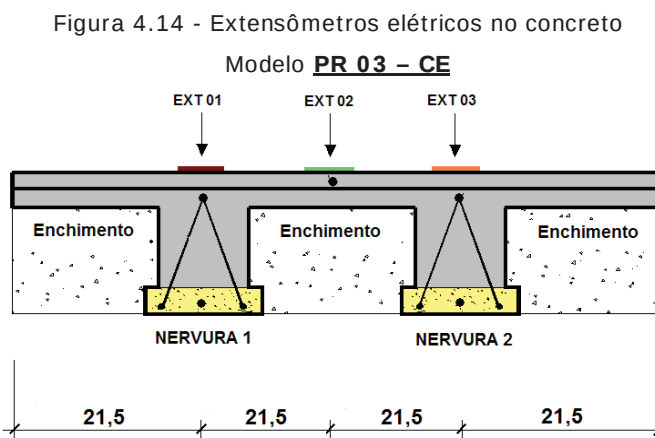
Tabela 4.10 - Nomenclatura dos extensômetros elétricos da armadura

Nomenclatura	Modelo	PC 02 – CE	Nomenclatura	Modelo	PR 02 – CE PC 03 – CE PR 03 – CE
BI – L – N1		BI – Lateral – Nervura 1	BI – L – N2		BI – Lateral – Nervura 2
BI – C – N1		BI – Centro – Nervura 1	BI – C – N2		BI – Centro – Nervura 2
BI – L – N2		BI – Lateral – Nervura 2	BS – N2		BS – Nervura 2
BI – C – N2		BI – Centro – Nervura 2	AA – N2		AA – Nervura 2
AA – N2		AA – Nervura 2	BI – L – N1		BI – Lateral – Nervura 1
			BI – C – N1		BI – Centro – Nervura 1
			AA – N1		AA – Nervura 1
			BS – N1		BS – Nervura 1

As Figuras 4.13 e 4.14 representam o esquema de posicionamento e nomenclatura dos extensômetros elétricos utilizados no concreto.



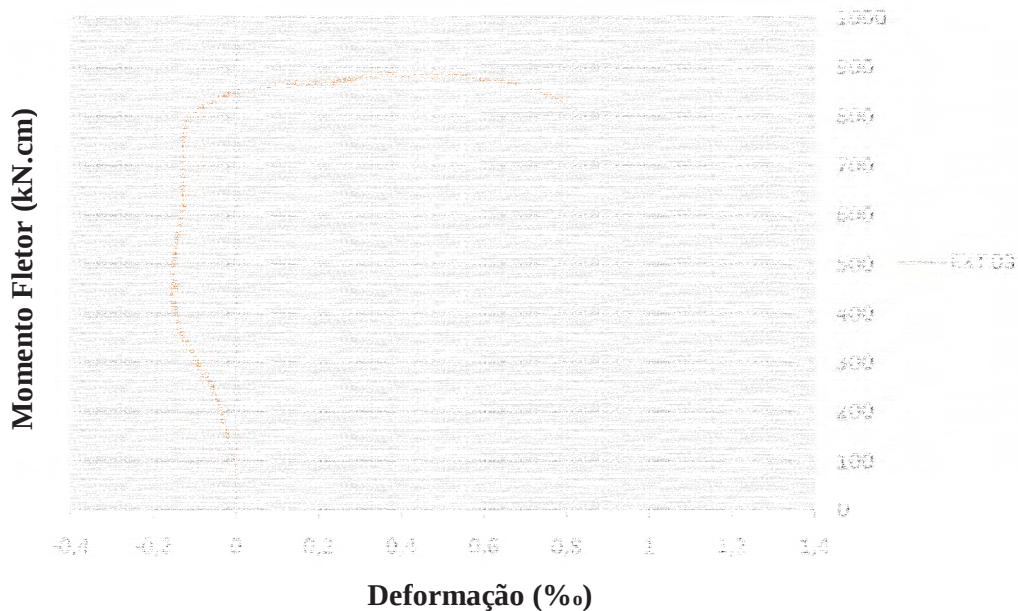
Fonte: Fazzan (2011)



Fonte: Fazzan (2011)

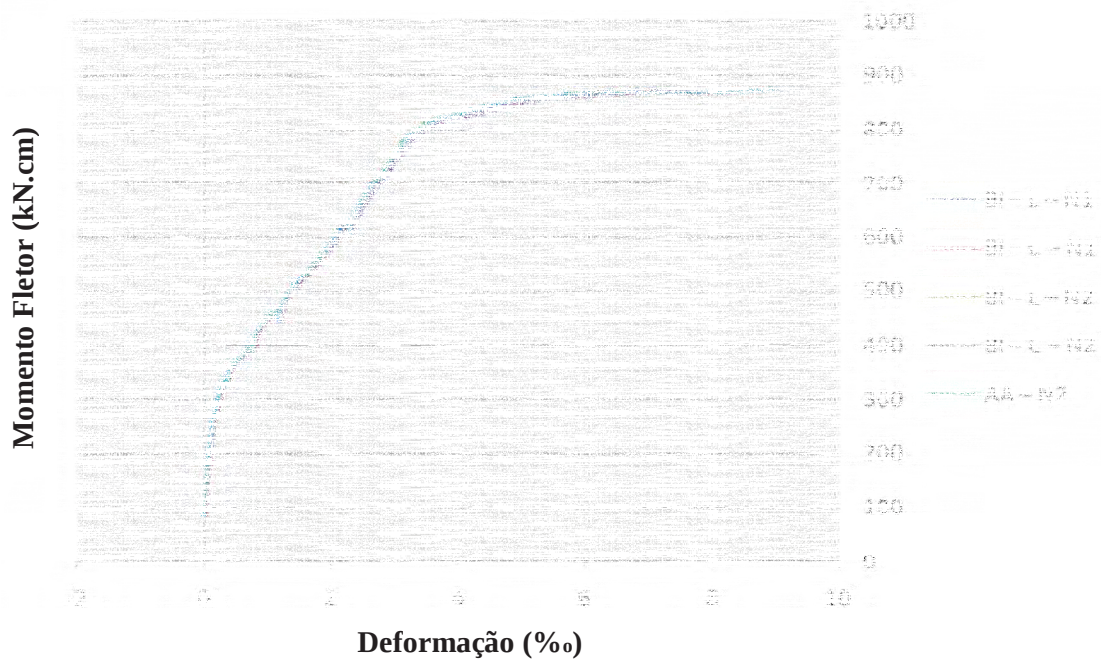
As Figuras 4.15 a 4.22 ilustram os resultados de deformação no concreto e na armadura em função do momento fletor para os modelos PC 02 – CE, PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE, respectivamente.

Figura 4.15 - Momento Fletor x Deformação no concreto - Modelo **PC 02 - CE**

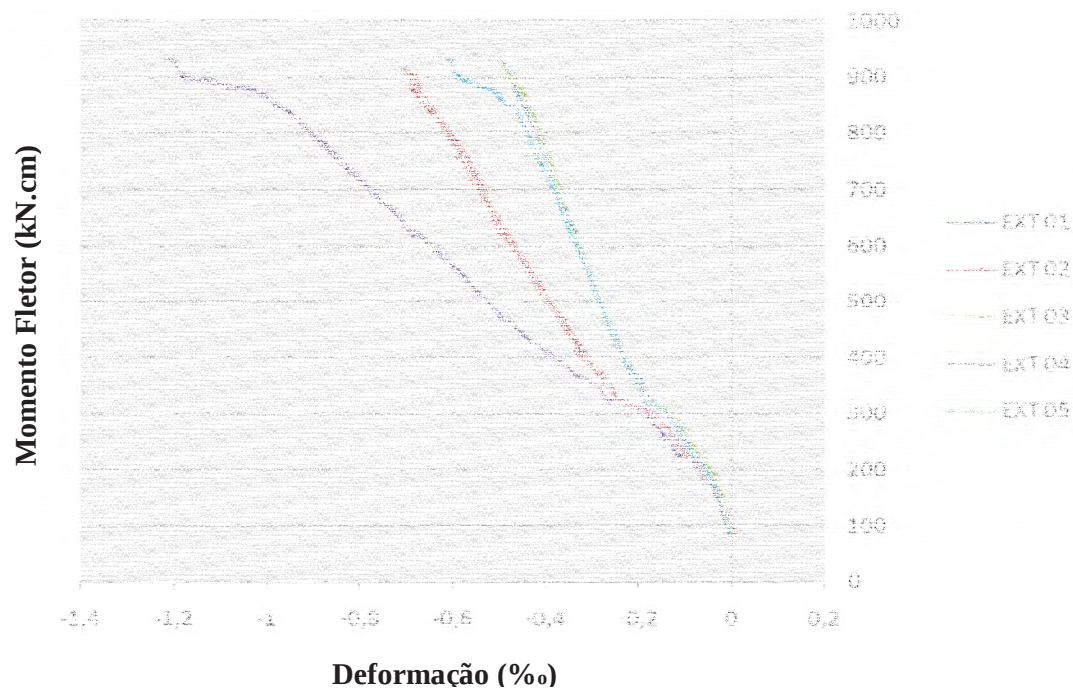


Fonte: Fazzan (2011)

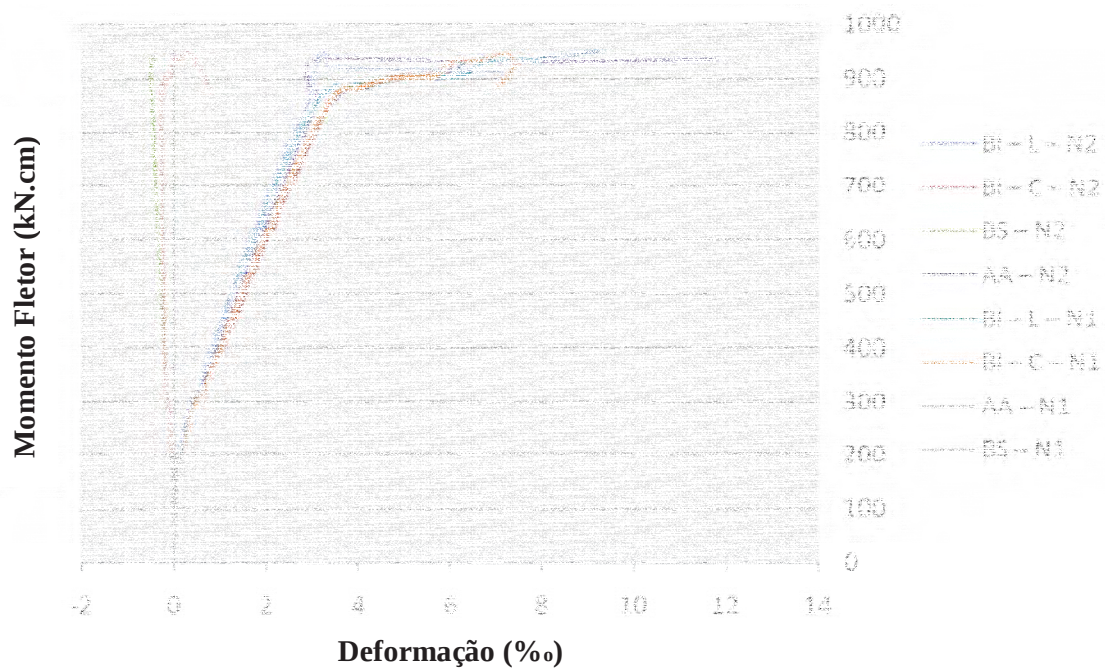
Figura 4.16 - Momento Fletor x Deformação na armadura - Modelo **PC 02 - CE**



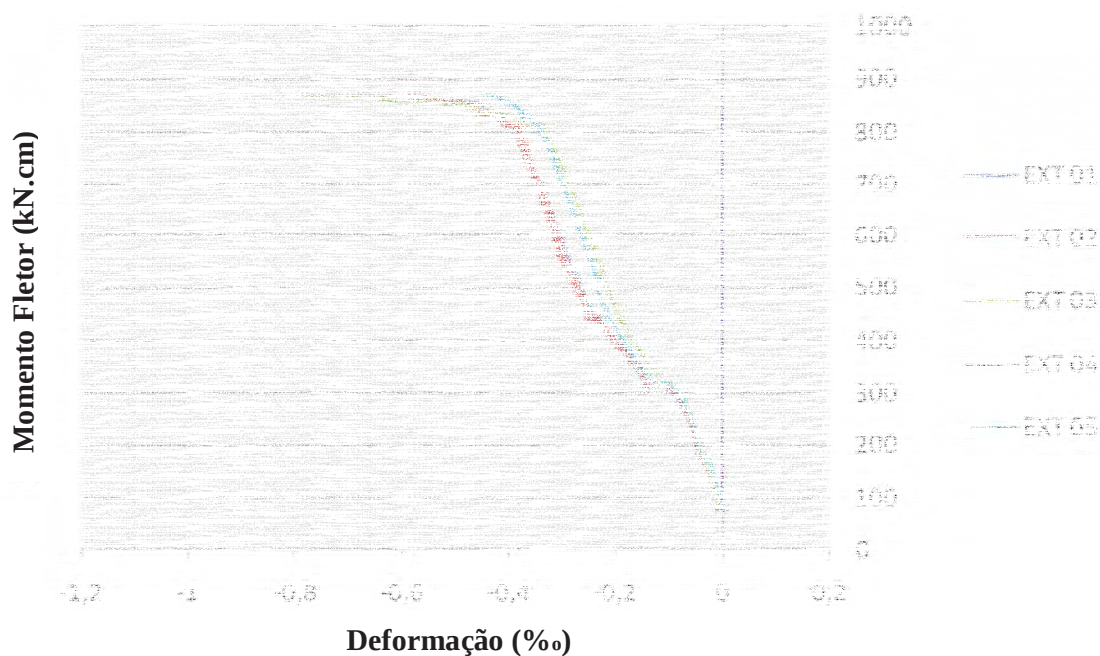
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.17 - Momento Fletor x Deformação no concreto - Modelo **PR 02 - CE**

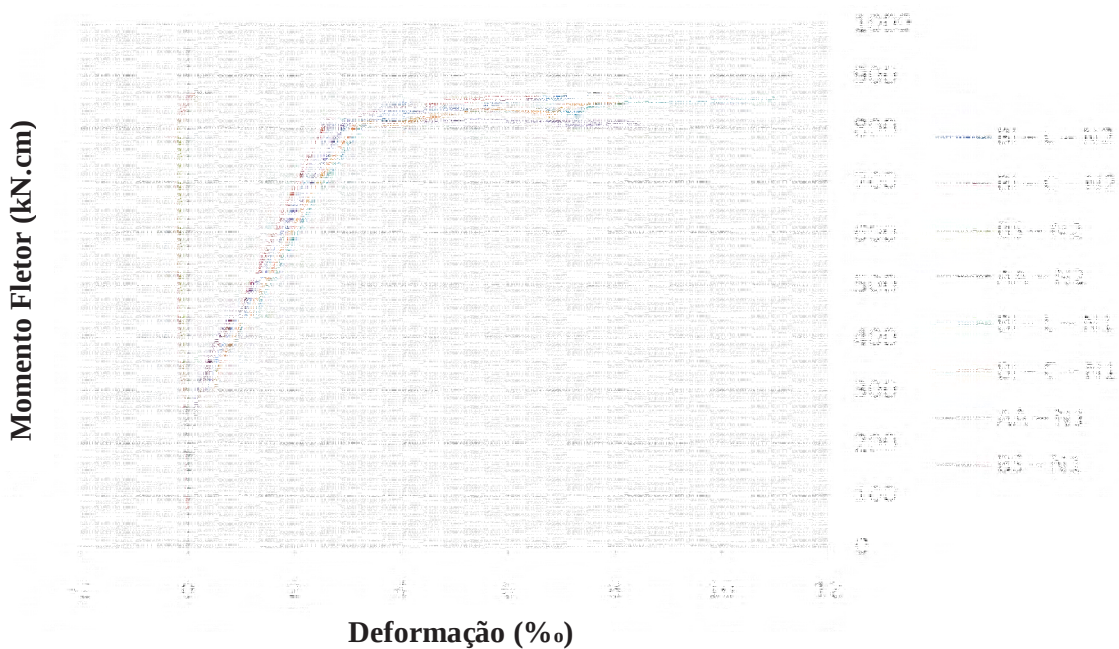
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.18 - Momento Fletor x Deformação na armadura - Modelo **PR 02 - CE**

Fonte: Fazzan (2011)

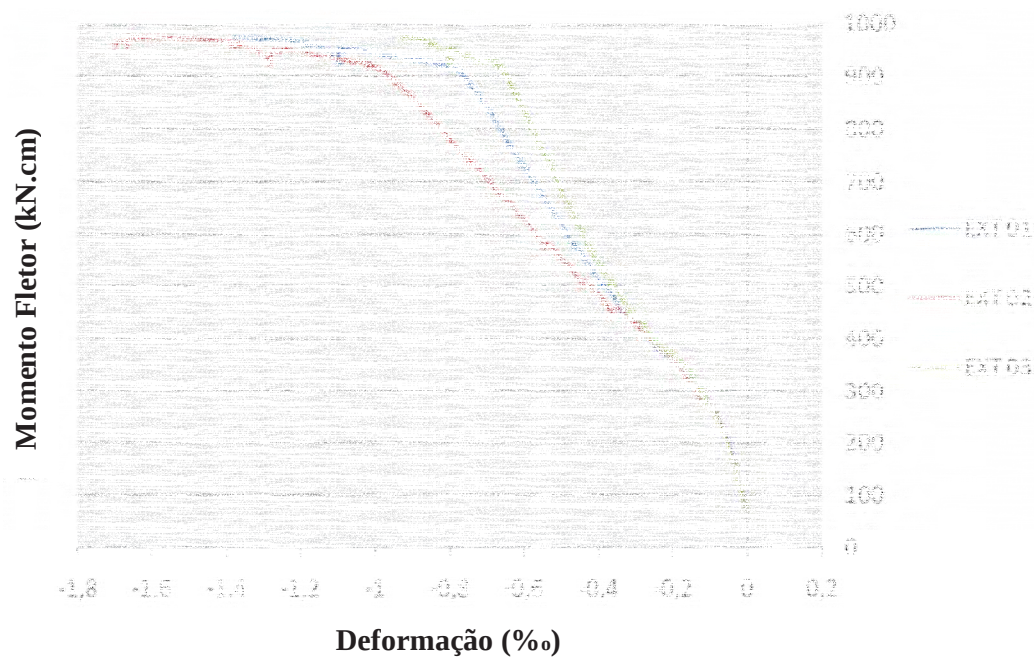
Figura 4.19 - Momento Fletor x Deformação no concreto - Modelo **PC 03 - CE**

Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.20 - Momento Fletor x Deformação na armadura - Modelo **PC 03 - CE**

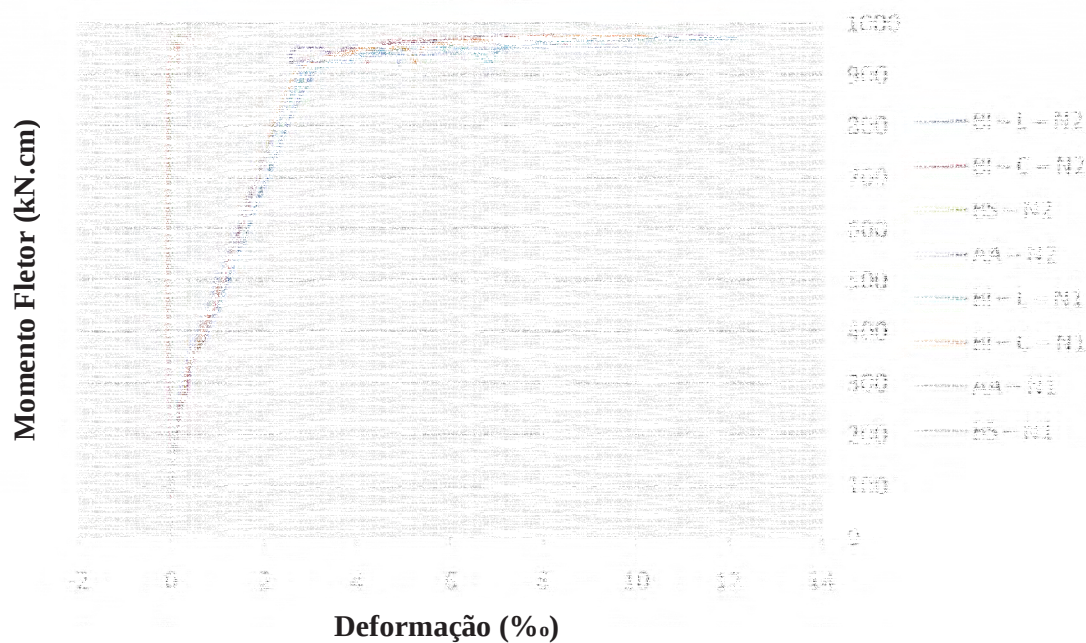
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.21 - Momento Fletor x Deformação no concreto - Modelo **PR 03 - CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.22 - Momento Fletor x Deformação na armadura - Modelo **PR 03 - CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Os gráficos de Momento Fletor x Deformação das armaduras positivas e negativas puderam fornecer valores consistentes de alongamento e encurtamento, mostrando que os elementos trabalharam solidariamente durante o ensaio de ruptura.

Os dados de deformação do concreto comprimido foram coerentes para os modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE. Conforme esperado, foram observadas deformações maiores nos extensômetros localizados sobre as nervuras, e menores para os posicionados junto às bordas e na região central dos modelos.

No modelo PC 02 – CE, embora tenham sido utilizados cinco extensômetros para medir deformações do concreto comprimido, apenas foi possível coletar dados do extensômetro número 03 (EXT 03), considerando que os demais extensômetros forneceram deformações de tração (valores positivos de deformação). O mesmo fato ocorreu na leitura das deformações dos banzos superiores (BS) das armaduras. Mesmo nas barras tracionadas, a coincidência de leituras também provocou desconfiança quanto à coerência dos resultados obtidos. Estes problemas provavelmente ocorreram em função de um problema na configuração do Sistema de Aquisição de Dados.

Para o modelo PC 03 – CE, foi verificada a perda do extensômetro número 04 (EXT 04) na medição da deformação do concreto, não sendo registradas leituras.

Para os quatro modelos analisados, ficou constatado que o instante dado pelo momento de fissuração pode estar relacionado com pequenas descontinuidades nos gráficos Momento x Deformação da armadura tracionada e Momento x Deformação do concreto comprimido. Percebe-se que o aço e o concreto começam a se deformar com maior amplitude por volta de 300 kN.cm, ou seja, a partir do instante em que o concreto tracionado começa a fissurar.

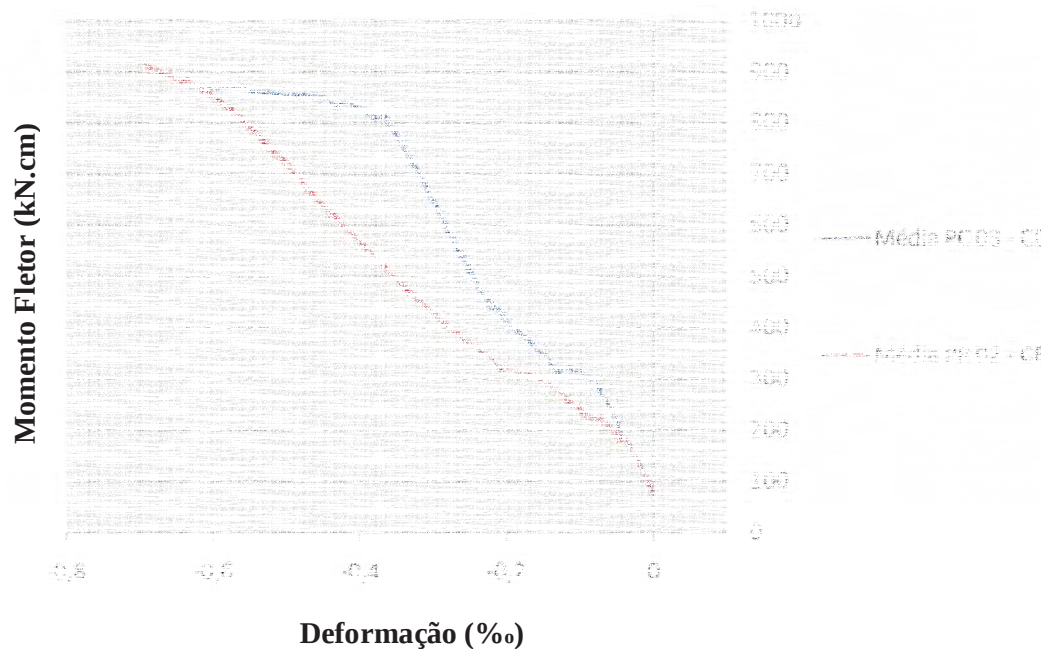
Para os concretos, as deformações são praticamente as mesmas até aproximadamente 220 kN.cm, 320 kN.cm e 440 kN.cm, e para as armaduras tracionadas, até 310 kN.cm, 305 kN.cm e 360 kN.cm, correspondente aos modelos PR 02 – CE, PC 03 – CE e PR 03 – CE, respectivamente.

Nos gráficos de Momento x Deformação das armaduras positivas, verifica-se, próximo ao momento de ruptura, o escoamento das armaduras. Com relação às barras do banzo superior das armaduras treliçadas, pode-se perceber uma tendência de inversão dos esforços, em função da elevação da linha neutra decorrente do escoamento das armaduras tracionadas.

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 mostram a comparação das deformações no concreto, para os modelos sem e com adição de resíduo, considerando a média das deformações em cada modelo. Em função dos dados não confiáveis obtidos no modelo PC 02 – CE, decidiu-se comparar as deformações do modelo PC 03 – CE com PR 02 – CE e PC 03 – CE com PR 03 – CE.

Figura 4.23 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto

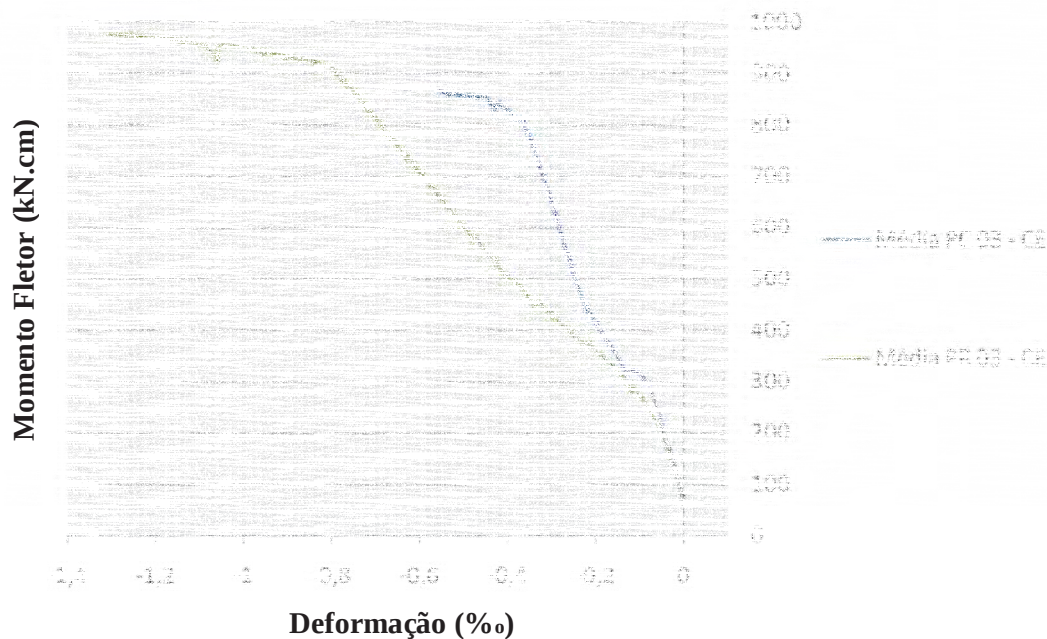
Modelos **PC 03 – CE** e **PR 02 - CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.24 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto

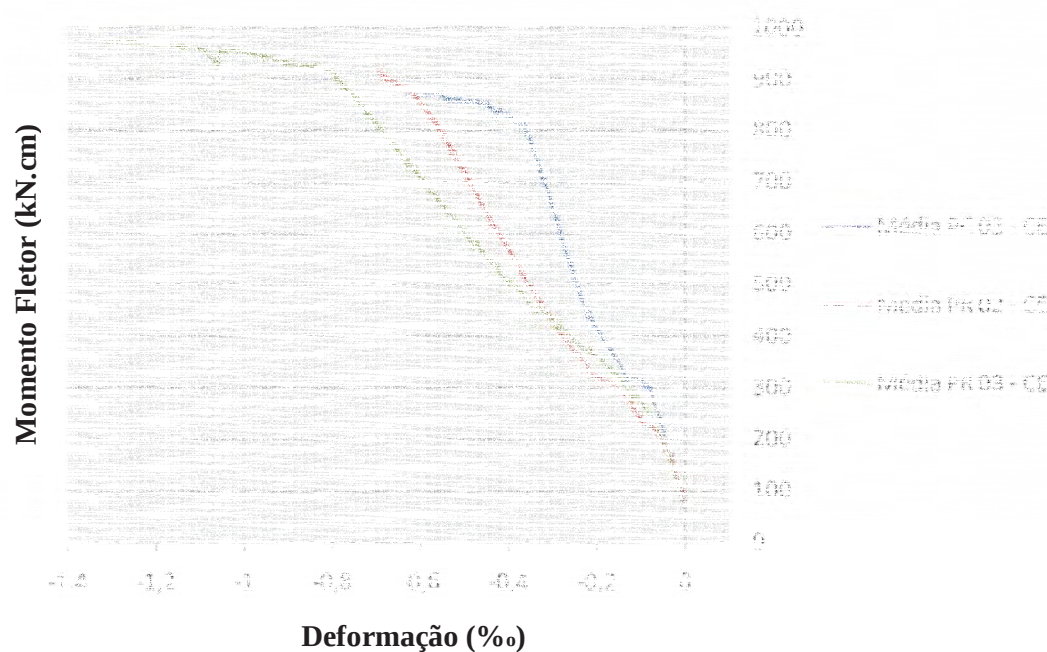
Modelos **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.25 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto

Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Verifica-se, de acordo com os gráficos, que, para um mesmo momento fletor, as deformações no concreto são maiores para os modelos com resíduo. As maiores diferenças são observadas para um momento fletor aproximado de 800 kN.cm, sendo registrados acréscimos de deformação em 52,8% para o modelo PR 02 – CE e 88,9% para o modelo PR 03 – CE, em relação ao modelo sem resíduo (PC 03 – CE). Observa-se, no entanto, que a plastificação dos modelos com resíduo, caracterizadas pela mudança da inclinação das curvas, ocorrem para momentos fletores maiores. Tomando-se como referência os modelos PC 03-CE e PR 03-CE, observa-se que as maiores deformações para os modelos com resíduo podem estar relacionadas com a diminuição dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente, de 32,48 GPa para 31,18 GPa, respectivamente.

Após o momento fletor aproximado de 800 kN.cm, os gráficos mostram um aumento excessivo de deformações para pequenos acréscimos de momento fletor.

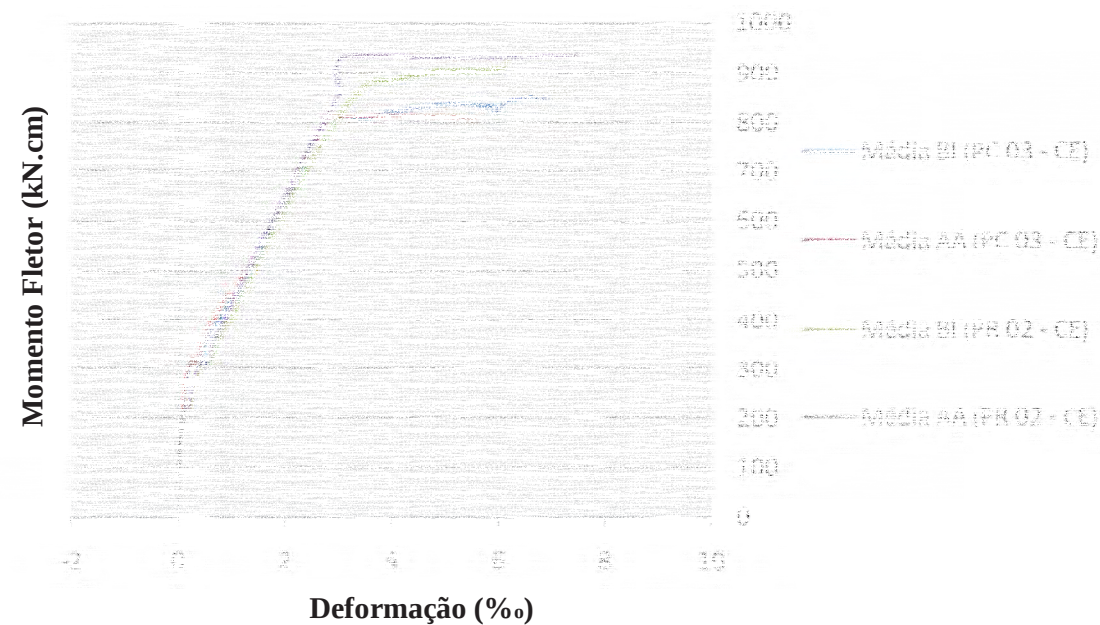
De modo geral, os valores de encurtamento dos concretos se mostraram praticamente iguais até momentos fletores de 200 kN.cm serem atingidos.

Foram observados encurtamentos máximos dos concretos na ordem de 1,3‰, 1,4‰ e 1,7‰, correspondentes às cargas de ruptura dos modelos PC 03 – CE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, respectivamente. Destaca-se, no entanto, que esta carga de ruptura representa um valor convencional, uma vez que o ensaio foi interrompido quando não se verificou ganho de carga nos atuadores hidráulicos com o acionamento da bomba hidráulica, após um valor máximo ter sido atingido e ter sofrido uma brusca redução.

As Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 mostram a comparação das deformações nas armaduras positivas, para os modelos sem e com adição de resíduo. Foram analisadas as médias das deformações entre as duas nervuras e as posições Lateral – Centro, para os banzos inferiores da armadura treliçada, e a média das leituras nas armaduras adicionais. Analogamente à análise feita para o concreto, compararam-se as deformações do modelo PC 03 – CE com PR 02 – CE e PC 03 – CE com PR 03 – CE.

Figura 4.26 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura

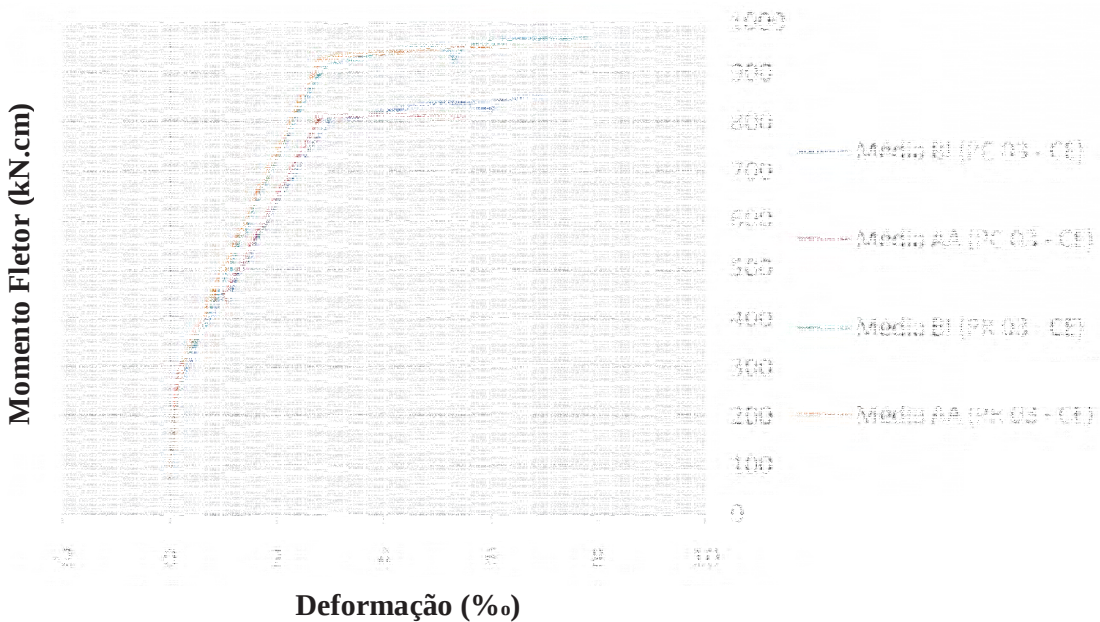
Modelos **PC 03 – CE** e **PR 02 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

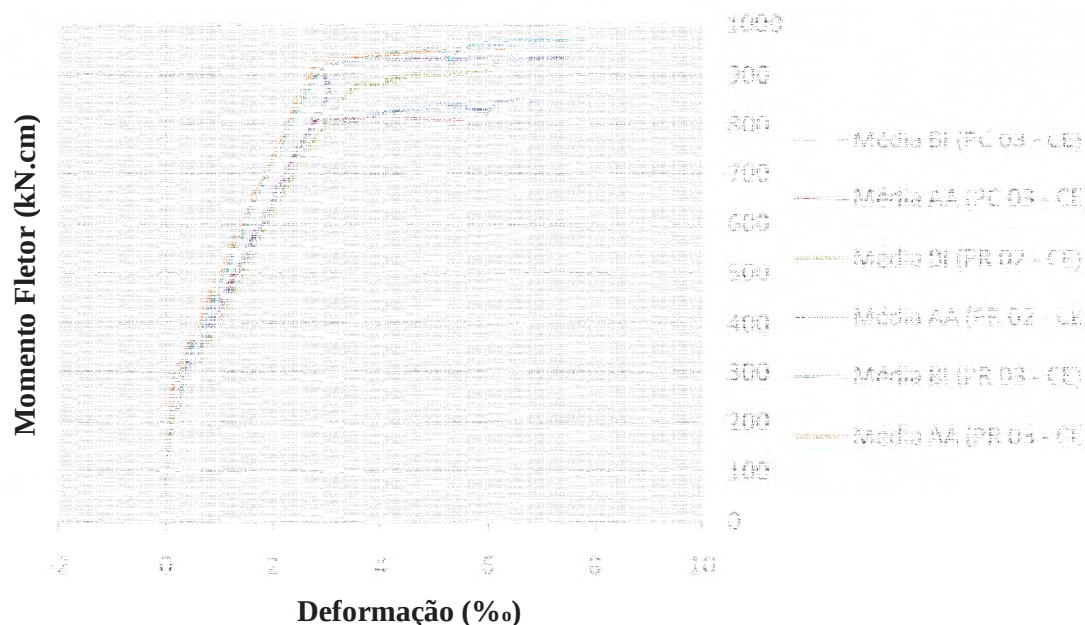
Figura 4.27 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura

Modelos **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.28 – Comparação do Momento Fletor x Deformação na armadura

Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**

Fonte: Fazzan (2011)

Os gráficos indicaram que tanto as barras utilizadas como armadura adicional, em aço CA-50, como os fios do banzo inferior da armadura treliçada, em aço CA-60, escoaram. Não foram constatados escorregamentos, demonstrando que as barras estavam bem ancoradas.

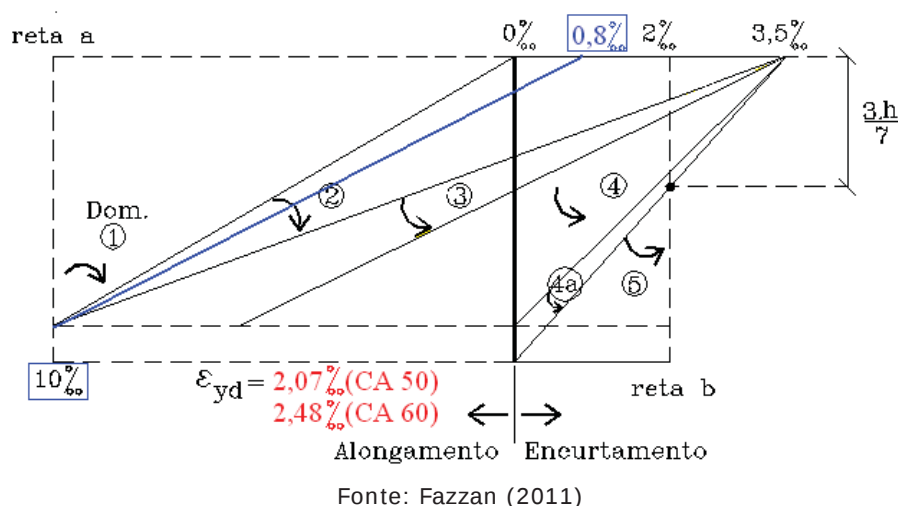
Tomando-se como referência os modelos PC 03-CE e PR 03-CE, observa-se que, ao contrário do que ocorreu no concreto comprimido, as deformações no aço são menores para os modelos com resíduo, para um mesmo momento fletor.

Para a determinação da resistência última de cálculo de uma dada seção transversal, é preciso saber qual domínio está situado o diagrama de deformações de cálculo específicas dos materiais aço e concreto. De acordo com o modelo de cálculo apresentado no trabalho, observa-se que os modelos trabalharam no domínio 2, sendo o estado limite último caracterizado pela deformação do aço em 10‰ e a deformação do concreto inferior a 3,5‰.

De acordo com a Figura 4.25, vê-se que todos os modelos ensaiados apresentaram deformações do concreto comprimido na faixa central dos vãos inferiores a 3,5‰ (entre 0,6‰ e 1,3 ‰).

Na Figura 4.28, embora o valor médio das armaduras tracionadas não tenham atingido deformações de 10‰ (os resultados se concentraram até um valor da ordem de 8‰), pode-se observar, nas Figuras 4.18, 4.20 e 4.22, que alguns extensômetros atingiram deformações da ordem de 10‰, caracterizando o domínio 2. Destaca-se que a carga de ruptura representa, neste caso, um valor convencional, uma vez que o ensaio foi interrompido quando não se verificou ganho de carga nos atuadores hidráulicos com o acionamento da bomba hidráulica, após um valor máximo ter sido atingido e ter sofrido uma brusca redução. Na Figura 4.29 tem-se a representação dos valores experimentais das deformações do aço e do concreto em relação aos domínios de cálculo.

Figura 4.29 – Representação dos valores experimentais das deformações do aço e do concreto em relação aos domínios de cálculo

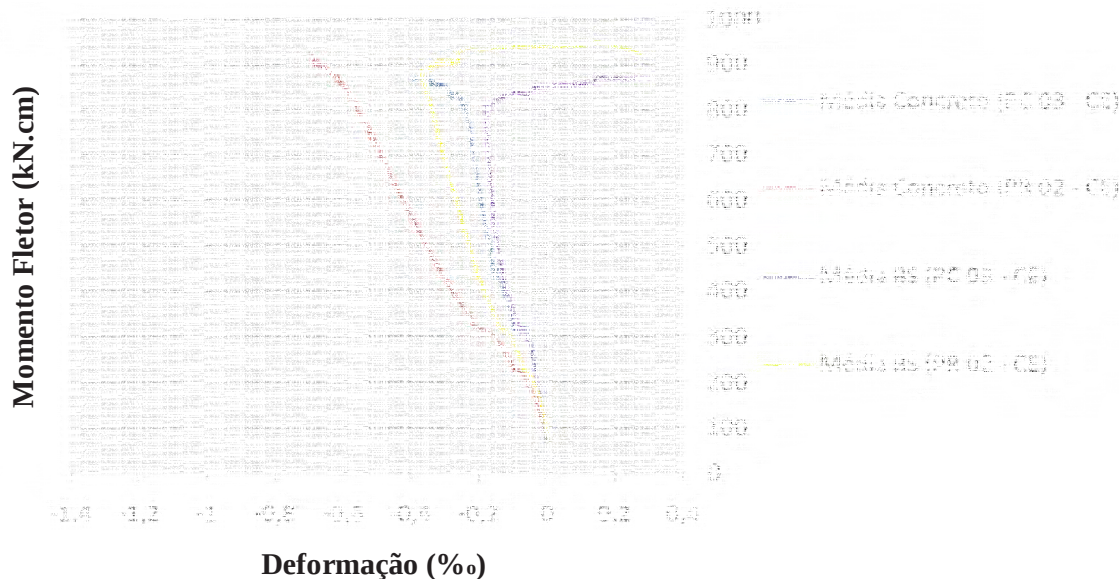


A Tabela 4.11 mostra as deformações no concreto e na armadura dos modelos PC 03 – CE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, para momentos fletores experimentais, correspondentes aos valores de Flecha/Vão igual a 0,004, no Estado Limite de Serviço. Considerou-se a média das deformações dos banzos inferiores e armaduras adicionais, em função da proximidade dos valores obtidos nos gráficos anteriores. Observa-se que a inclusão da borracha provocou maiores deformações no concreto e menores deformações nas armaduras.

Tabela 4.11 - Análise das deformações no concreto e na armadura para o Estado Limite de Serviço

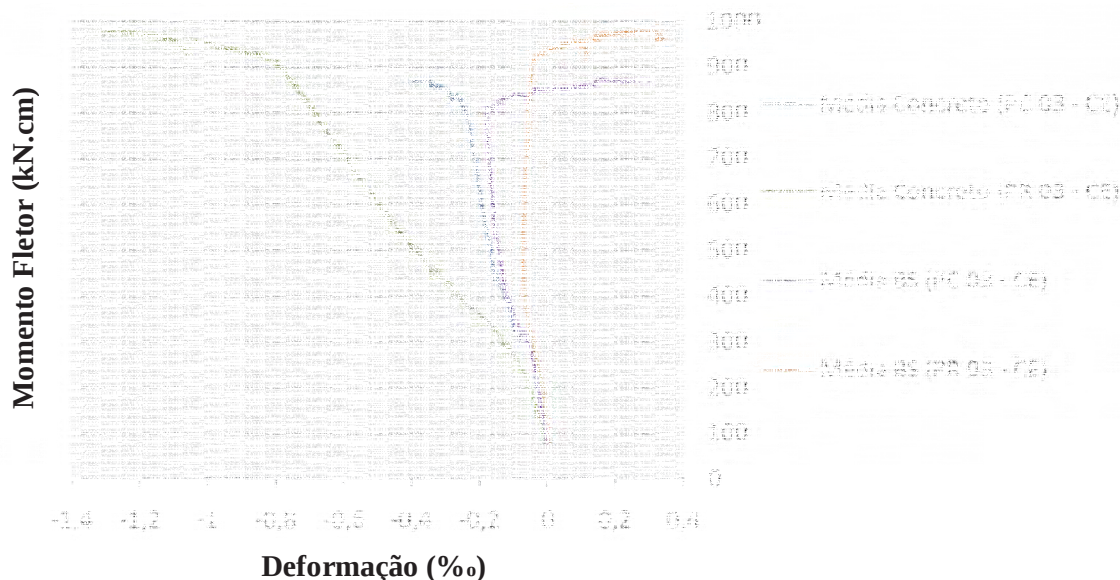
MODELO	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO F/L = 0,004		
	Momento Fletor Experimental (kN.cm)	Deformação do Concreto (‰)	Deformação Média das Armaduras (BI e AA) (‰)
PR 02 – CE	548,9	-0,38	1,58
PC 03 – CE	587,3	-0,28	1,74
PR 03 – CE	616,8	-0,51	1,51

As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram a comparação das deformações ocorridas nos concretos com as deformações dos banzos superiores da armação treliçada. Também foi considerada, para os banzos superiores de cada modelo, a média das deformações entre as leituras obtidas nas duas nervuras.

Figura 4.30 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida - Modelos **PC 03 – CE** e **PR 02 – CE**

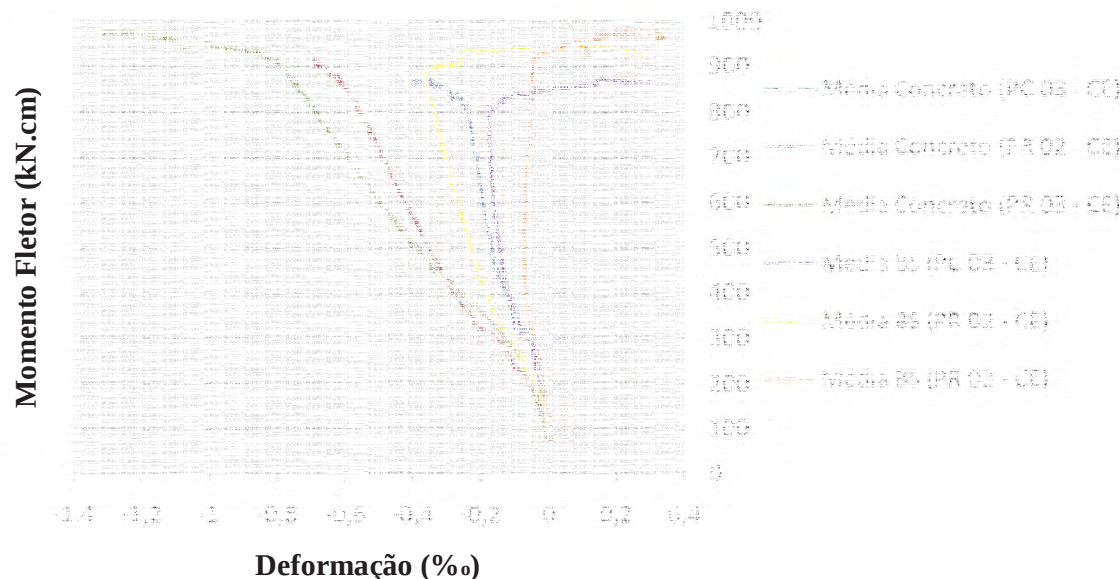
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.31 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida - Modelos **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.32 – Comparação do Momento Fletor x Deformação no concreto e na armadura comprimida - Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Tomando-se como referência a Figura 4.31, observa-se que a deformação no banzo superior da armadura treliçada comprimida é inferior à do concreto, como era de se esperar. Próximo à ruína, a tendência é que ocorra uma inversão dos esforços nos fios dos banzos superiores em função da diminuição da profundidade da linha neutra. Esta diminuição, por sua vez, ocorre em função da necessidade de um maior braço de alavanca para a armadura equilibrar o esforço solicitante na seção transversal, uma vez que o escoamento da armadura tracionada já foi atingido.

Para os momentos fletores experimentais correspondentes aos valores de Flecha/Vão igual a 0,004, no Estado Limite de Serviço, são fornecidos os dados de deformação dos modelos PC 03 – CE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, de acordo com a Tabela 4.12. São consideradas as médias das deformações nos concretos e nos banzos superiores.

Tabela 4.12 - Deformações no concreto e na armadura comprimida para o Estado Limite de Serviço

MODELO	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO F/L = 0,004		
	Momento Fletor Experimental (kN.cm)	Deformação do Concreto (‰)	Deformação Média das Armaduras (BS) (‰)
PR 02 – CE	548,9	-0,38	-0,15
PC 03 – CE	587,3	-0,28	-0,16
PR 03 – CE	616,8	-0,51	-0,07

Em relação ao modelo sem adição de resíduo PC 03 - CE, foram registrados, para o modelo com adição de resíduo PR 03 – CE, acréscimos de deformação para o concreto (da ordem de 82%), e redução da deformação do banzo comprimido (da ordem de 56%).

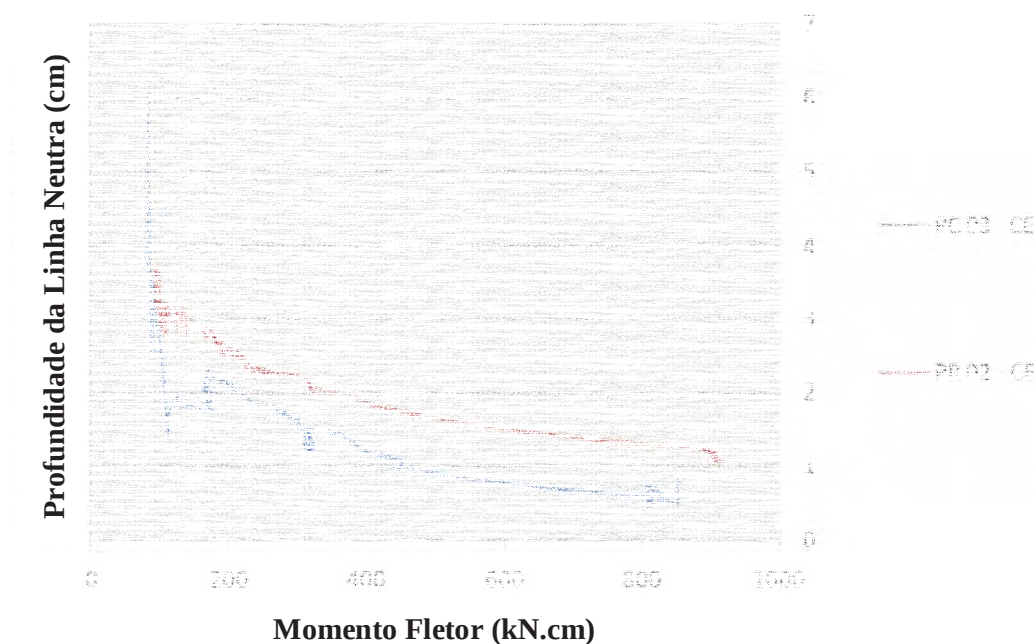
4.6 Análise da Profundidade da Linha Neutra

De posse dos resultados de deformação das armaduras positivas e do concreto, faz-se a análise do comportamento da profundidade da linha neutra. Considera-se, para o domínio 2, que a linha neutra corta a seção transversal da peça, sendo a profundidade da linha neutra dada pela Equação 4.2:

$$\frac{\varepsilon_C}{x} = \frac{\varepsilon_S}{d - x} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{\varepsilon_C \cdot d}{\varepsilon_C + \varepsilon_S} \quad (4.2)$$

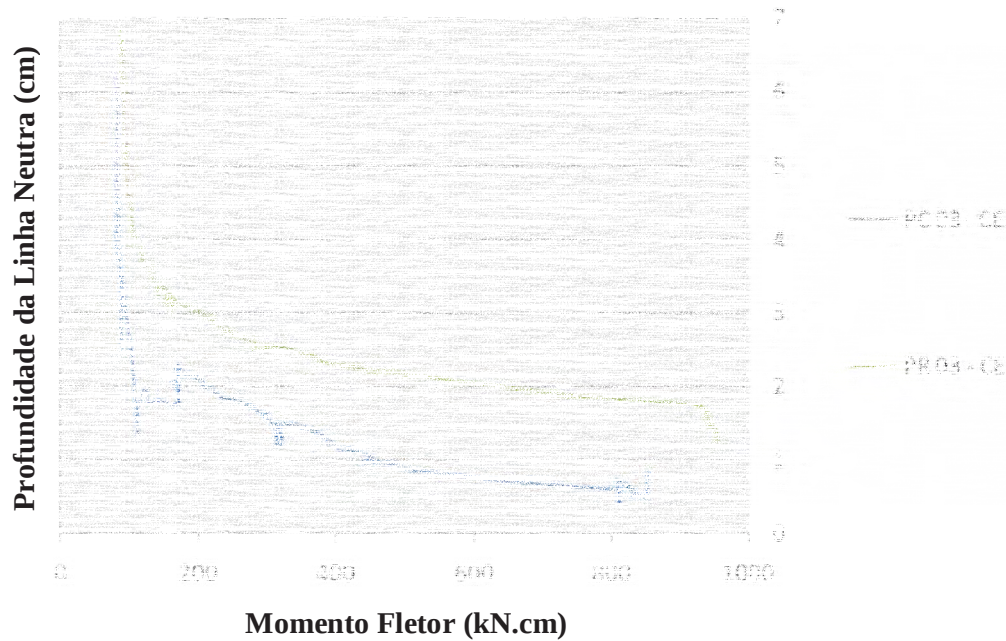
As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 mostram o comportamento da profundidade da linha neutra com os acréscimos de momento fletor, para os modelos PC 03 – CE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, respectivamente. Para as deformações específicas do aço (ϵ_s), são consideradas as médias das deformações obtidas nas posições Lateral – Centro e Nervura 1 – Nervura 2, analogamente para as deformações específicas dos concretos (ϵ_c).

Figura 4.33 - Comparação da profundidade da Linha Neutra
Modelos **PC 03 – CE** e **PR 02 – CE**



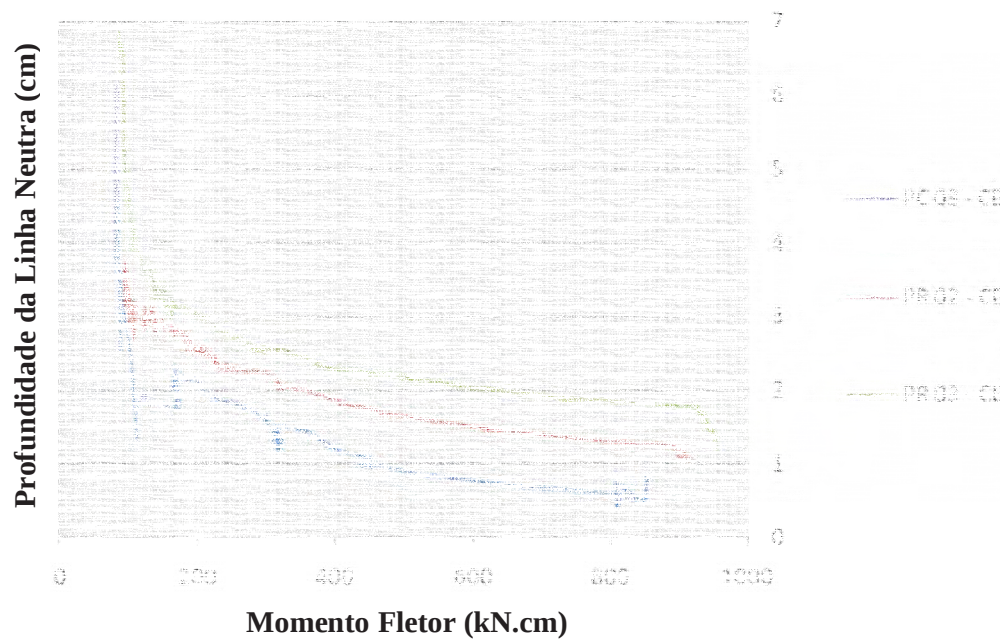
Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.34 - Comparação da profundidade da Linha Neutra
Modelos **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.35 - Comparação da profundidade da Linha Neutra
Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

Os gráficos puderam indicar que, tanto os modelos com adição de resíduo quanto os modelos sem adição apresentaram comportamentos similares para profundidade da linha neutra. Verificam-se, dessa forma, as boas condições de leitura das deformações tanto no aço quanto no concreto e a aplicabilidade do método de cálculo para os modelos com adição de resíduo.

Para valores compreendidos entre 290 kN.cm e 315 kN.cm, que corresponde aos valores médios de momento de fissuração, foram observadas pequenas descontinuidades na profundidade da linha neutra. Após atingir o momento de fissuração, verificaram-se reduções ainda maiores da profundidade da linha neutra com a aplicação das cargas, mostrando diminuição da seção comprimida com o aumento das fissuras.

De acordo com os dados fornecidos pela Tabela 4.13, percebe-se que o aço empregado nos modelos com resíduo se deformou em menor amplitude, em relação ao aço utilizado nos modelos sem resíduo, para o Estado Limite de Serviço, ao contrário do que foi observado para o concreto comprimido. Como consequência, pode-se observar que a profundidade da linha neutra para modelos sem resíduo é menor que para os modelos com.

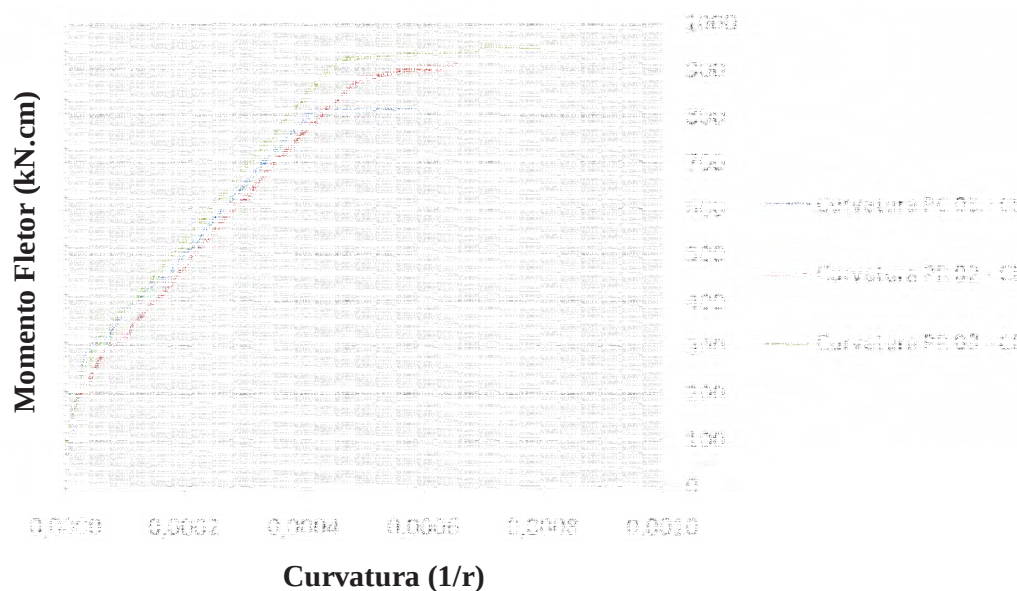
Tabela 4.13 - Análise da profundidade da Linha Neutra para o Estado Limite de Serviço

MODELO	ESTADO LIMITE DE SERVIÇO F/L = 0,004			
	Momento Fletor Experimental (kN.cm)	Deformação do Concreto (‰)	Deformação Média das Armaduras (BI e AA) (‰)	Profundidade da Linha Neutra (cm)
PR 02 – CE	548,9	-0,38	1,58	1,57
PC 03 – CE	587,3	-0,28	1,74	0,78
PR 03 – CE	616,8	-0,51	1,51	2,02

4.7 Análise da Curvatura (1/r)

A Figura 4.36 mostra a análise experimental da curvatura para os modelos PC 03 – CE, PR 02 – CE e PR 03 – CE, utilizando-se da média das deformações do aço tracionado e do concreto. Para isso, obtiveram-se os dados de curvatura (1/r) por meio da Equação 4.3:

$$\frac{1}{r} = \frac{|\varepsilon_c| + \varepsilon_s}{d} \quad (4.3)$$

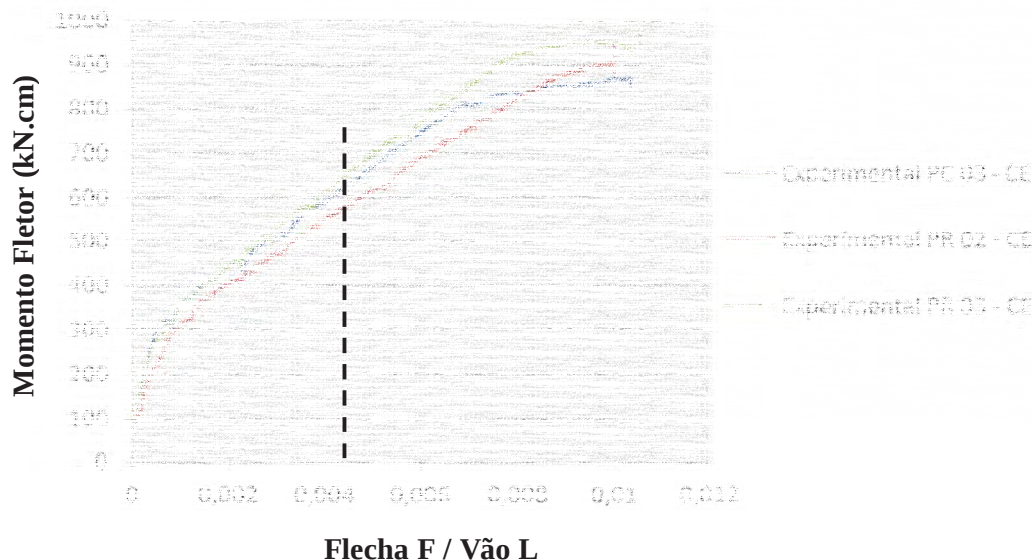
Figura 4.36 - Comparação das Curvaturas ($1/r$)Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**

Fonte: Fazzan (2011)

Com base no modelo sem adição de resíduo (PC 03 – CE) e para valores constantes de momento fletor, é possível verificar que o modelo PR 02 – CE apresentou valores ligeiramente superiores de curvatura, enquanto que o modelo PR 03 – CE apresentou valores inferiores, o que lhe confere um grau superior de rigidez em relação ao modelo sem resíduo, aliado às reduções de deslocamentos por parte do modelo com adição de borracha. De fato, a análise da Figura 4.37 permite verificar que o modelo PR 02 – CE também apresentou valores superiores de deslocamentos para um mesmo valor de momento fletor, em relação ao modelo sem resíduo, enquanto que o modelo PR 03 – CE apresentou menores deslocamentos.

A observação feita deixa claro que os valores de deslocamentos medidos pelos relógios comparadores se mostraram coerentes com os valores das deformações obtidas por meio dos extensômetros elétricos, permitindo mais uma vez salientar as condições satisfatórias dos ensaios.

Figura 4.37 – Comparação do Momento Fletor x Relação Flecha/Vão
Modelos **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**



Fonte: Fazzan (2011)

4.8 Análise do Padrão de Fissuração

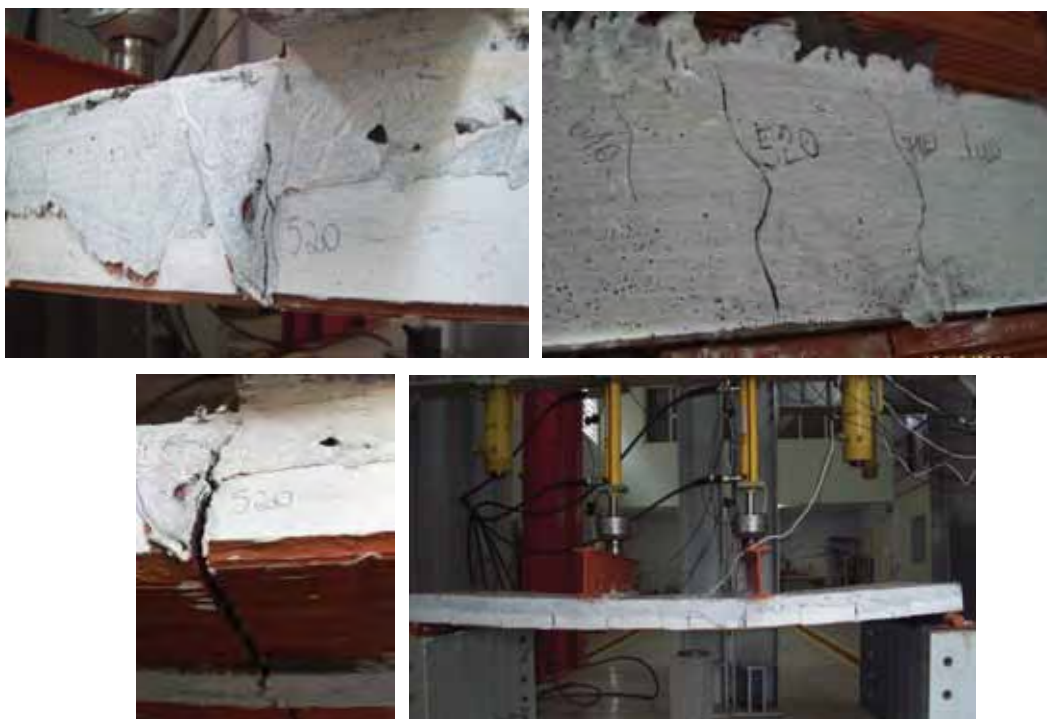
As Figuras 4.38 e 4.39 mostram o comportamento dos modelos no ensaio de ruptura em relação ao padrão de fissuração e à abertura das fissuras.

Figura 4.38 - Fissuras – Modelo sem resíduo



Fonte: Fazzan (2011)

Figura 4.39 - Fissuras – Modelo com resíduo



Fonte: Fazzan (2011)

Verifica-se que as fissuras mais abertas se deram na região central dos modelos, por atuação dos maiores momentos fletores positivos e pelo consequente aumento de deformações. As imagens também mostram que o caminhamento das fissuras, para o Estado Limite Último, ocorre entre as lajotas cerâmicas, dado que as lajotas são apenas encaixadas, sem quaisquer elementos de ligação.

Ambos os modelos (com e sem adição de resíduo) apresentaram poucas fissuras nas laterais, sendo a quantidade de fissuras equivalentes. A Figura 4.40 ilustra melhor o padrão de fissuração e a abertura de fissuras para as nervuras dos modelos sem e com adição de resíduo, após o ensaio de ruptura. Algumas observações são relatadas na Tabela 4.14.

Figura 4.40 - Comparação do padrão de fissuração e abertura de fissuras das nervuras



a) Modelo sem Adição de Resíduo

b) Modelo com Adição de Resíduo

Fonte: Fazzan (2011)

Tabela 4.14 - Dimensões aproximadas das fissuras registradas
Modelos **PC 02 – CE**, **PR 02 – CE**, **PC 03 – CE** e **PR 03 – CE**

COMPORTAMENTO	MODELO			
	PC 02 - CE	PR 02 - CE	PC 03 - CE	PR 03 - CE
Padrão de fissuração nas laterais dos modelos e laterais da parte inferior das nervuras, antes da ruptura	0,5 mm a 1,0 mm	0,2 mm a 0,5 mm	0,1 mm a 0,4 mm	0,2 mm a 0,5 mm
Fissuras localizadas na parte inferior das sapatas de concreto das vigotas pré-moldadas treliçadas, localizadas próximas à região central das nervuras e se estendendo até as lajotas cerâmicas e laterais dos modelos, após ruptura	1,0 mm a 9,0 mm	0,2 mm a 4,0 mm	1,0 mm a 6,0 mm	0,2 mm a 3,0 mm
Quantidade aproximada de fissuras em cada lateral	---	---	6	3

De acordo com o padrão de fissuração dos modelos, permitiu-se concluir que os modelos com adição de resíduo apresentaram maior quantidade de fissuras na base das nervuras, porém com aberturas menores, em relação aos modelos sem resíduo. De certa forma, pode-se deduzir que a borracha tenha se caracterizado como um concentrador de tensões, em função da sua menor densidade, o que contribuiu para a formação das microfissuras observadas. Além disso, pressupõe-se que, por conta do aumento do teor de ar incorporado, surgisse uma maior quantidade de fissuras, considerando o aumento dos pontos frágeis de ruptura e o consequente caminhamento das tensões entre os poros. Também foi observada uma menor concentração de fissuras nas laterais dos modelos com adição. Este comportamento pode ter relação com a maior capacidade de “costura” por parte das fibras do resíduo, que contribuem para a redução da abertura de fissuras. Analisando as dimensões das fissuras, é possível dizer que as fibras de maiores dimensões tenham contribuído para a redução da macrofissuração, ao passo que as fibras menores tenham contribuído para a redução das dimensões das microfissuras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Atualmente, o uso de lajes nervuradas pré-moldadas tem sido uma das alternativas mais comuns para a construção de pavimentos de edificações. Além disso, a aplicação de resíduos de borracha de pneu triturado na indústria da construção civil tem se mostrado promissora, na necessidade de se preservar o meio ambiente e de garantir o prolongamento das reservas naturais, que fornecem matérias-prima necessárias para a elaboração dos concretos.

Neste contexto, o trabalho objetivou a utilização de resíduos de borracha em substituição parcial do agregado miúdo dos concretos que compõem a capa e as vigotas de lajes pré-fabricadas treliçadas unidirecionais.

O estudo de dosagem dos concretos sem adição de resíduo foi feito utilizando o método proposto por O'Reilly Díaz (1998), para a elaboração do concreto das sapatas das vigotas, e o método IPT/EPUSP, para o concreto utilizado na capa das lajes. Os métodos conduziram com excelência à resistência à compressão mínima requerida de 25 MPa aos 28 dias de idade.

Para os concretos com adição de resíduos, utilizou-se o método proposto por O'Reilly Díaz (1998) somente para a obtenção do teor de argamassa. Na necessidade de se aumentar o consumo de cimento, para a mesma resistência requerida, foram constatados acréscimos de 10,7% e 5,3% no consumo de cimento, para o concreto das sapatas e para o concreto da capa, respectivamente.

Em função das dificuldades encontradas no lançamento, adensamento e acabamento do concreto com adição de resíduo utilizado nos modelos de laje iniciais, decidiu-se por adicionar o resíduo de borracha no final das misturas. Com isso, foi observado que a inserção do resíduo no final trouxe acréscimos nos valores de resistência à tração e módulo de elasticidade e reduções do teor de ar incorporado, se comparado com a inserção de resíduo no início da mistura. O último fato se justifica pela redução do tempo de mistura da borracha inserida no final, considerando que o formato alongado (tipo fibra) do resíduo tem influência na capacidade de reter ar no interior das misturas.

Além disso, a redução do teor de ar incorporado nos concretos com adição de resíduo no final da mistura, em relação aos traços com inserção de resíduo no início, gerou aumento do valor do módulo de elasticidade, proporcionando um melhor empacotamento das partículas no interior dos concretos.

Foram constatadas reduções da massa específica e da absorção para os concretos com adição de resíduo, indicando, no primeiro caso, a possibilidade de redução do peso próprio da estrutura, e, no segundo caso, a possibilidade de se obter uma maior durabilidade, principalmente quando a estrutura se encontra exposta a ambientes agressivos.

As curvas experimentais de Momento Fletor x Flecha/Vão apresentaram mesmos comportamentos em todos os modelos de lajes, indicando condições satisfatórias de ensaio. Os gráficos permitiram obter os valores de momento de fissuração experimentais, sendo indicados por mudanças de declividade das curvas. Somente não se detectou o momento de fissuração para o modelo inicial com resíduo, em função de alguns problemas encontrados no nivelamento do modelo durante sua montagem, o que pode ter contribuído para a fissuração prematura da peça, em função da concentração de tensões.

A comparação do método proposto por Branson (1968) com as curvas experimentais permitiu concluir que o método garante segurança estrutural tanto para modelos sem como para modelos com resíduo, uma vez que o Estado Limite de Serviço previsto foi atingido para momentos fletores calculados menores que os observados no ensaio experimental. Entretanto, os valores dos momentos de fissuração calculados conforme o método foram, aproximadamente, 60% menores que em relação aos valores experimentais observados. Tal fato torna interessante a realização de um estudo mais aprofundado da equação do método de Branson (1968).

Pode se verificar que os modelos com adição de resíduo apresentaram momentos de fissuração experimentais da mesma ordem de grandeza dos modelos sem adição de resíduo.

Para o Estado Limite de Serviço, correspondente ao deslocamento limite de $L/250$ ou valores de Flecha/Vão (F/L) igual a 0,004, ficou evidente que os modelos com adição de resíduo de borracha no final da mistura apresentaram valores de carregamento ligeiramente superiores aos modelos sem adição de resíduo. Portanto, pode se considerar que os modelos com resíduo apresentaram rigidez à flexão equivalente aos modelos sem resíduo.

Com relação aos momentos de ruptura experimentais, observa-se que a adição de resíduo no final da mistura proporcionou valores 9% superiores que os dos modelos sem adição de resíduo; em compensação, a adição do resíduo no início da mistura provocou uma redução da ordem de 5% em relação ao modelo sem resíduo. É possível que o comportamento descrito para os modelos com resíduo tenha sido diretamente influenciado pelos incrementos no valor do módulo de elasticidade dos concretos com inserção de borracha no final da mistura, pelas reduções do teor de ar incorporado e pela utilização de aditivos superplastificantes.

A análise dos gráficos de Momento Fletor x Deformação das armaduras positivas e negativas indicaram valores consistentes de alongamento e encurtamento, mostrando que os elementos trabalharam solidariamente durante o ensaio de ruptura. De maneira geral, as armaduras e o concreto se deformaram com maior amplitude por volta de 300 kN.cm, a partir do instante em que o concreto começou a fissurar.

Analizando-se as deformações do aço e do concreto comprimido, na faixa central dos vãos, verifica-se, para o concreto, encurtamentos entre os valores de 0,6‰ e 1,3 ‰, e, para a armadura, alguns extensômetros atingiram o valor de 10‰. Conclui-se, portanto, que o domínio associado ao Estado Limite Último foi o Domínio 2. Destaca-se que a carga de ruptura representa, neste caso, um valor convencional, uma vez que o ensaio foi interrompido quando não se verificou ganho de carga nos atuadores hidráulicos com o acionamento da bomba hidráulica, após um valor máximo ter sido atingido e ter sofrido uma brusca redução.

As condições satisfatórias de leitura das deformações do concreto e da armadura foram comprovadas pelos comportamentos similares da profundidade da linha neutra, tanto para os modelos sem adição de resíduo quanto para os modelos constituídos com borracha. Além disso, foram observadas maiores profundidades da linha neutra para os modelos com resíduo.

Pelo fato da inclusão de borracha nos concretos ocasionar um aumento das deformações no concreto comprimido, era de se esperar que os modelos com adição de resíduo apresentassem flechas maiores, se comparados aos modelos sem adição. Entretanto, embora tenham sido verificados acréscimos nas deformações do concreto comprimido, também foram verificadas reduções das deformações do aço.

De certa forma, a equação da curvatura ($1/r$) permitiu concluir que a redução das deformações do aço teve maior influência que o aumento da deformação do concreto na rigidez à flexão dos modelos.

Justificado pela ideia de que os modelos sem adição de resíduo apresentaram curvaturas próximas às dos modelos com adição, para um mesmo momento fletor, pode-se demonstrar com maior clareza que os modelos com adição de resíduo apresentaram rigidez da mesma ordem de grandeza. Isso quer dizer que há consistência nos dados de deslocamentos medidos pelos relógios comparadores e nos valores das deformações obtidas por meio dos extensômetros elétricos.

Os modelos com adição de resíduo de borracha apresentaram um comportamento diferenciado quanto ao padrão de fissuração. Embora tenha sido constatada uma maior concentração de fissuras na base das sapatas das nervuras com adição de resíduo, foram verificadas menores aberturas de fissuras, em relação às aberturas encontradas nos modelos sem adição de resíduo.

Pressupõe-se que, por conta do aumento do teor de ar incorporado, surgisse uma maior concentração de fissuras, considerando o aumento dos pontos frágeis de ruptura e o consequente caminhamento das tensões entre os poros. Por outro lado, em função da borracha ser responsável pela capacidade de absorção de esforços, também é possível que o resíduo tenha absorvido uma pequena parcela dos esforços de tração, proporcionando um efeito de “costura” do concreto para resistir aos esforços solicitantes, e a consequente redução da abertura das fissuras.

Conclui-se, com base nas condições específicas relacionados à realização deste trabalho, que o uso do resíduo de borracha de pneu em lajes pré-moldadas unidirecionais não compromete o seu comportamento estrutural frente às verificações dos Estados Limites Último e de Serviço.

Recomendações para Futuras Pesquisas

A continuidade do trabalho pode ser baseada nas seguintes propostas:

- Novos estudos de dosagem do concreto com adição de resíduo de borracha de pneu, por meio da aplicação de novos aditivos superplastificantes disponíveis no mercado; com isso, visa-se obter, para os concretos com e sem resíduo de borracha, resistências à compressão próximas, e reduções ainda mais significativas no aumento do consumo de cimento decorrente da inclusão da borracha.
- Análise do comportamento do concreto com adições de resíduo e de superplastificante quanto à exposição ao fogo.
- Avaliação dos modelos de lajes pré-moldadas treliçadas quanto à flecha diferida no tempo, comparando os efeitos da fluência nos concretos sem e com adição de resíduo de borracha.
- Estudo do comportamento de um modelo estrutural de laje pré-moldada sem considerar a armadura adicional na sapata de concreto das vigotas pré-moldadas treliçadas, sendo este sistema construtivo o mais empregado nas construções de pequeno e médio porte.

6 REFERÊNCIAS

ARTEFATOS DE CONCRETO – ARTCON. **Lajota Cerâmica**. Ilha Solteira: [s.n.], 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Reciclanip**. In: SEMINÁRIO REGIONAL SUL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2007, Londrina. **Reciclanip**. Londrina: Anip, 2007. Disponível em: < <http://www.anip.com.br> >. Acesso em: 6 out. 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Reciclanip apresenta balanço do primeiro quadrimestre de 2011**. São Paulo: Anip, 2011. Disponível em: < <http://www.anip.com.br> >. Acesso em: 5 jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 221 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRISO 6892** – Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002. 34 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218**: agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: argamassa e concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento portland composto: especificação. Rio de Janeiro, 1997. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14859-1**: laje pré-fabricada - requisitos - parte 1: lajes unidirecionais. Rio de Janeiro, 2002. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14862**: Armaduras treliçadas eletrossoldadas - requisitos. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 23**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 45:** agregados - determinação da massa unitária, massa unitária compactada e seca e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 46:** agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 47:** concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 49:** agregado fino – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 52:** agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 53:** agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 65:** cimento portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento o tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 76:** cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine). Rio de Janeiro, 1998. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBRNM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BATAYNEH, M. K.; MARIE, I.; ASI, I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. **Waste Management**, Oxford, v. 28, n. 11, p. 2171-2176, 2008.

BELGO. **Treliças nervuradas belgo**. ArcelorMittal: [s.n.], 2010. Catálogo de Venda. Disponível em: < www.belgo.com.br >. Acesso em: 15 nov. 2010.

BIGNOZZI, M.C.; SANDROLINI, F. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 36, n. 4, p. 735-739, 2006.

CAIXETA, D. P. **Contribuição ao estudo de lajes pré-fabricadas com vigas treliçadas**. 1998. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; DE ANGELIS NETO, G. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Sci. Technol.** Maringá, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado:** segundo a NBR 6118:2003. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2004. 374 p.

COMERCIAL GERDAU. **Aço para construção civil**. Gerdau: [s.n.], 2009. Catálogo de Venda. Disponível em:
<http://www.comercialgerdau.com.br/produtos/download/catalogos/catalogo_aco_para_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2009.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP model code 1990:** desing code. London: Published by Thomas Telford, 1993. p. 437.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP. **Laboratório CESP de engenharia civil**. Ilha Solteira: LCEC, 2009.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. **Pneus**. São Paulo: [s.n.], 2005. (Ficha Técnica, 8). Disponível em:

< http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_pneus.php >. Acesso em: 23 dez. 2009.

FORMA E DESIGN. **Concretagem**. Pelotas: [s.n.], 2010. Disponível em:

< <http://www.formaesign.com.br/2010/07/concretagem.html> >. Acesso em: 13 mar. 2011.

CONCRETO. **Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, 1600 p.

CONSTRUIR. **Lajes pré - fabricadas**. Blogger: [s.n.], 2010. Disponível em:

< <http://aprendaaconstruirereformar.blogspot.com/2010/11/lajes-pre-fabricadas.html> >. Acesso em: 5 maio 2011.

DROPPA JÚNIOR, A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. 1999. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DROPPA JÚNIOR, A.; EL DEBS, M. K. Análise não-linear de lajes pré-moldadas com armação treliçada: comparação de valores teóricos com experimentais e simulações numéricas em painéis isolados. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 17, p. 105-120, 2001.

FERNÁNDEZ, J. N. E. **Diseño de mezclas cementantes con residuos de neumáticos para La obtención de materiales ligeros y aislantes**. 2010. 71 f. Tesis (Master) – Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2010.

FIORITI, C. F. **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria**: 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

FLÓRIO, M. C. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas pré-moldadas em concreto armado**. 2004. 213 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

FORNI, D. **Custos de lajes formadas por vigotas treliçadas considerando a produção, o transporte, a montagem e a concretagem**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós - Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 5, p. 1828–1836, 2009.

GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GOMES FILHO, C. V. **Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil**. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo: EPUSP - Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2003. 22 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/330).

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1993. 349 p.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M., Rubberized Portland Cement Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 11, n. 13, p. 206-213, 1999.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem de pneus: discussão do impacto da política brasileira. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 32-49, 2009.

LI, L. J.; XIE, W. F.; LIU, F.; GUO, Y. C.; DENG, J. Fire performance of high-strength concrete reinforced with recycled rubber particles. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 63, n. 3, p. 187-195, 2011.

LOPES, R. E.; VITA, M. O.; AKASAKI, J. L.; BARBOSA, M. B.; ALCÂNTARA, M. A. M. e FREITAS, I. R. M. **Estudo de dosagens de concretos com resíduos de borracha de pneus utilizando aditivos superplastificantes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2006. p. 1-12.

LOPES, M. D.; MARQUES, A. C.; RICCI, E. C.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L. **Estudo de dosagens para obter concretos com resíduos de borracha de pneu**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1-7.

MARQUES, M. L.; MARQUES, A. C.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L. **Avaliação do comportamento da argamassa adicionada de diferentes granulometrias de borracha após tratamento superficial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais...** São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1-12.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MELO, C. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, W. L. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 45-56, 2009.

NGUYEN, T-H.; TOUMI, A.; TURATSINZE, A. Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberised cement-based mortars. **Materials and Design**, Surrey, v. 31, n. 1, p. 641-647, 2010.

O'REILLY DÍAZ, VITERVO. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini, 1998. 122 p.

OZBAY, E.; LACHEMI, M.; SEVIM, U. K. Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag. **Materials and Structures**, London, v. 44, n. 7, p. 1297-1307, 2010.

PENA, E. T. **A Reforma de pneus é uma atividade “verde”**. Entrevista. Disponível em: < <http://www.infopneus.com.br/artigos/a-reforma-de-pneus-e-uma-atividade-verde/> >. Acesso em: 30 abr. 2011.

RAGHAVAN, D.; HUYNH, H. C. F.; FERRARIS, C. F. Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 33, n. 7, p. 1745-1752, 1998.

RODOLPHO, P. M. **Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SANTOS, M. R. **Análise numérica de lajes treliçadas pré-moldadas com adição de resíduo de borracha**. 2009, 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

SANTOS, M. R. et al. Avaliação de flechas de modelos de lajes treliçadas, sem e com adição de resíduo de borracha de pneu. **Revista Internacional Construlink**, Lisboa, v. 8, n. 23, p. 5-16, 2010.

SILVA, M. A. F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

TECNOLAJES. **Obras com a marca tecnolajes**. Quatro Barras: [s.n.], 2006. Disponível em:

< http://www.tecnolajes.com.br/portifolio/ssp_director/albums/album-17/lg/laje_bidirecional__10_.jpg >. Acesso em: 10 jun. 2011.

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; CAMACHO, J. S. Avaliação do comportamento estrutural de modelos de lajes pré-moldadas com concreto com resíduo de borracha de pneu. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 37-50, 2008.

TURKI, M.; BRETAGNE, E.; ROUIS, M.J.; QUÉNEUDEEC, M. Microstructure, physical and mechanical properties of mortar–rubber aggregates mixtures. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 7, p. 2715-2722, 2009.

USINA TRITURADORA ECOLÓGICA DE PNEUS- UTEP. **Aplicações**. São Paulo: [s.n.], 2006. Disponível em:
< <http://www.3wdesign.com.br/portal/Produtos/tabid/496/Default.aspx> >. Acesso em: 23 jan. 2010.

UYGUNOĞLU, T.; TOPÇU, I. B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 7, p. 1141-1150, 2010.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza da casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 77-90, 2010.

ZHANG YaMei, et al. Comparison of the fracture process of the rubberized concrete and plain concrete under bending load. **Science China**, Beijing, v. 53, n. 6, p. 1526–1533, 2010.

ZHENG, L.; HUO, X. S.; YUAN, Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 22, n. 5, p. 939–947, 2008.

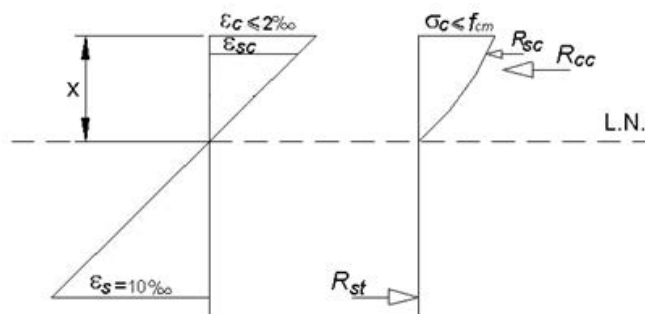
ANEXO

Cálculo do Momento de Ruptura ou Momento Resistente

Abaixo segue o modelo de cálculo para a obtenção do momento de ruptura dos modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE.

Supondo a posição da linha neutra $x = 0,821 \text{ cm}$, para o sub-domínio 2a ($\epsilon_c \leq 2\text{‰}$; $\epsilon_s = 10\text{‰}$), obtêm-se as equações de equilíbrio de acordo com as deformações (Figura A.1):

Figura A.1 - Sub-domínio 2a.



Fonte: Modificado de Santos (2009)

$$\epsilon_s = 10 \text{ ‰} \quad (\text{A.1})$$

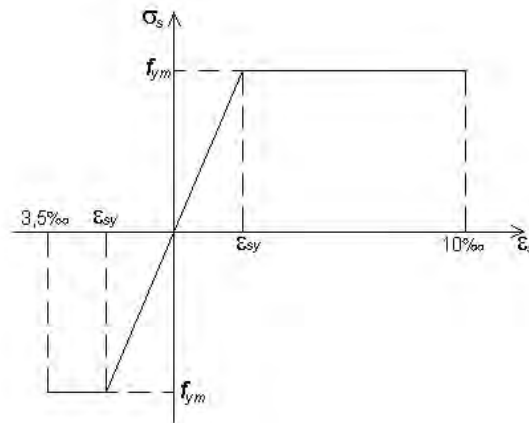
$$\epsilon_c = \frac{x \cdot 10 \text{ ‰}}{d - x} = \frac{0,807 \cdot 10 \text{ ‰}}{8 - 0,807} = 1,144 \text{ ‰} \quad (\text{A.2})$$

$$\epsilon_{sc} = \frac{(x - d') \cdot 10 \text{ ‰}}{d - x} = \frac{(0,807 - 0,6) \cdot 10}{8 - 0,807} = 0,308 \text{ ‰} \quad (\text{A.3})$$

O valor de x é compatível com domínio 2ª pois $\epsilon_c \leq 2\text{‰}$.

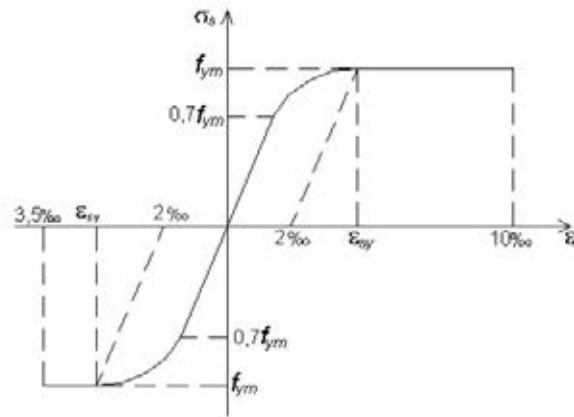
A NBR 6118 (ABNT, 2003) simplifica o diagrama do aço para as classes A e B de acordo com a Figura A.2 para o aço classe A e a Figura A.3 para o aço classe B.

Figura A.2 - Diagrama tensão x deformação do aço classe A.



Fonte: Droppa Júnior apud Santos (2009)

Figura A.3 - Diagrama tensão x deformação do aço classe B.



Fonte: Droppa Júnior apud Santos (2009)

Para o estado limite último, pode se utilizar o diagrama simplificado mostrado na Figura A.2. A tensão no aço (σ_s) para valores menores que a tensão de escoamento convencional (f_{ym}) é obtida pela Equação A.4 e a deformação convencional (ϵ_{sy}) é obtida pela Equação A.5. Considerando a tensão de escoamento do aço (f_{ym}) igual a 600 MPa e seu módulo de elasticidade (E_s) igual a 210 GPa, obtém-se:

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \quad (\text{A.4})$$

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_{ym}}{E_s} = \frac{600}{210000} = 2,86 \text{ ‰} \quad (\text{A.5})$$

Para o cálculo da equação de equilíbrio, considerando-se que a armadura tracionada está escoando e a armadura comprimida não, são definidas as equações abaixo, de acordo com a Figura A.1:

$$R_{ST} = f_{ym} \cdot A_{ST} = 60.1,56 = 93,60 \text{ kN} \quad (\text{A.6})$$

$$R_{SC} = \sigma'_S \cdot A_{SC} = E_S \cdot \varepsilon_{SC} \cdot A_{SC} = \frac{21000.0,308.0,84}{1000} = 5,43 \text{ kN} \quad (\text{A.7})$$

Para $x = 0,821$ cm, supõe-se que a linha neutra corta a mesa, sendo sua altura h_f igual a 3,5 cm. Além disso, de acordo com os corpos de prova coletados durante a moldagem dos modelos, considerou-se a resistência média do concreto da capa das lajes (f_{cm}) aos 28 dias de idade igual a 27 MPa, correspondente a 2,7 kN/cm². Nestas condições:

$$R_{CC} = b \cdot f_{cm} \cdot \left(\frac{\varepsilon_C \cdot x}{2} - \frac{\varepsilon_C^2 \cdot x}{12} \right) = 86.2,7 \cdot \left(\frac{1,144.0,821}{2} - \frac{1,144.0,821}{12} \right) = 88,25 \text{ kN} \quad (\text{A.8})$$

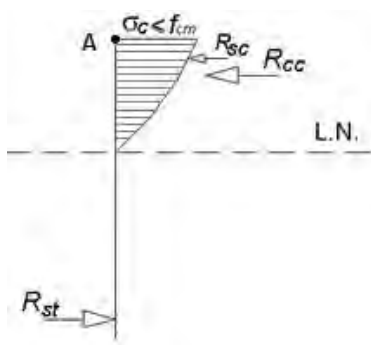
Verifica-se, de acordo com a equação de equilíbrio (Equação A.9) a condição:

$$R_{ST} \cong R_{SC} + R_{CC} \implies 93,60 \cong 5,43 + 88,25 (= 93,68) \quad \text{OK!} \quad (\text{A.9})$$

Para o cálculo do momento último, utilizam-se as Equações A.10 e A.11 e a Figura A.4, considerando a seção transversal retangular:

$$Z_G = x - \frac{x \cdot (16 - 3 \cdot \varepsilon_C)}{24 - 4 \cdot \varepsilon_C} = 0,807 - \frac{0,821 \cdot (16 - 3 \cdot 1,144)}{24 - 4 \cdot 1,144} = 0,29 \text{ cm} \quad (\text{A.10})$$

Figura A.4 - Sub-domínio 2a – Cálculo do Momento Fletor no ponto A



Fonte: Modificado de Santos (2009)

$$M_U = \sum M_A = (R_{ST} \cdot d) - (R_{SC} \cdot d') - (R_{CC} \cdot Z_G) \quad (A.11)$$

$$M_U = (93,6 \cdot 8,0) - (5,43 \cdot 0,6) - (88,25 \cdot 0,29) = 720,0 \text{ kN.cm}$$

Cálculo da Carga de Ruptura

Obtém-se o valor da carga de ruptura considerando o momento atuante na seção igual ao momento resistente. Dessa forma:

$$79,525 + 70 \cdot P = 720,0 \quad \Rightarrow \quad P = 9,150 \text{ kN} \quad (A.12)$$

Previsão da Flecha Imediata - Modelo proposto por Branson (1968)

A análise do método pode ser iniciada calculando-se o momento de fissuração, M_r , dado pela Equação A.14. Para o exemplo de cálculo abaixo, também são utilizados os modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE. Para isso, são definidos os seguintes parâmetros:

- $\alpha = 1,2$ (seções em forma de “T”)
- $I_c = 2237,5 \text{ cm}^4$
- $y_t = 6,6 \text{ cm}$
- Para o cálculo de f_{ct} , em função da proximidade dos valores de resistência à compressão aos 28 dias de idade para o concreto da sapata e da capa, adotou-se:
- $f_{ck} = 27 \text{ MPa} = 2,7 \text{ kN/cm}^2$;

portanto:

$$f_{ct} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,30 \cdot (27)^{2/3} = 2,7 \text{ MPa} \longrightarrow 0,27 \text{ kN / cm}^2 \quad (\text{A.13})$$

O momento de fissuração (M_r) é dado por:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 0,27 \cdot 2237,5}{6,6} = 109,84 \text{ kN.cm} \quad (\text{A.14})$$

No Estádio I, calcula-se relação entre a área de concreto e a área de armadura α_e , de acordo com a Equação A.16. Para isso, é necessário o cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto, dado por:

$E_{cs} = 0,85.5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$, sendo f_{ck} a resistência característica do concreto à compressão dos modelos PC 02 – CE e PR 02 – CE igual a 27 MPa.

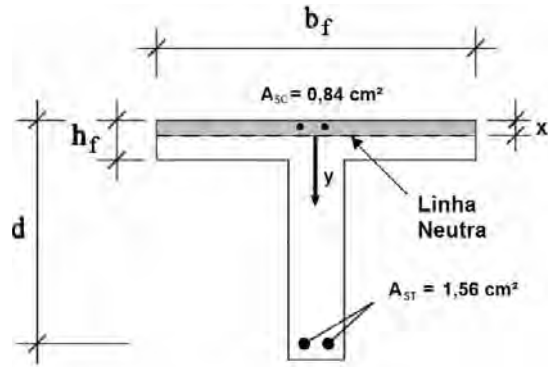
$$E_{cs} = 0,85.5600 \cdot \sqrt{27} = 24\,734 \text{ MPa} \longrightarrow 2473,4 \text{ kN / cm}^2 \quad (\text{A.15})$$

Assim sendo:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{2473,4} = 8,49 \quad (\text{A.16})$$

A avaliação do Estádio II puro se inicia com a função de obter a posição da linha neutra (x) (Figura A.5). Para isso, adota-se o momento estático da seção homogeneizada igual a zero (Equação A.17), considerando, neste trabalho, a contribuição da armadura comprimida.

Figura A.5 - Seção Transversal em forma de "T", no Estádio II puro



Fonte: Fazzan (2011)

$$m_s = 0 \Rightarrow \alpha_e \left[\sum A_{si} \cdot (d_i - x) \right] - b_f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$-\left(0,86 \cdot x \cdot \frac{x}{2} \right) + (1,56 \cdot 8,49 \cdot [8 - x]) - (0,84 \cdot 8,49 \cdot [x - 0,6]) = 0 \quad (\text{A.17})$$

Portanto: $x = 1,38 \text{ cm}$

De posse do resultado da posição da linha neutra, é possível calcular o momento de inércia da seção no Estádio II puro (I_{II}) (Equação A.18). Os modelos de cálculo previstos na pesquisa indicaram que a linha neutra corta a mesa, ou seja, $x \leq h_f$.

$$I_{II} = b_f \cdot \frac{x^3}{12} + b_f \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2} \right)^2 + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2 \quad (\text{A.18})$$

$$I_{II} = 86 \cdot \frac{1,38^3}{12} + 86 \cdot 1,38 \cdot \left(\frac{1,38}{2} \right)^2 + 8,49 \cdot 1,56 \cdot (8 - 1,38)^2 + 8,49 \cdot 0,84 \cdot (1,38 - 0,6)^2$$

$$I_{II} = 660,1 \text{ cm}^4$$

Dessa forma, é feita a avaliação da flecha imediata aproximada em vigas de acordo de com a Equação A.19, por meio de adaptação da equação da rigidez equivalente:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} \leq E_{cs} \cdot I_c \quad (\text{A.19})$$

$$(EI)_{eq} = 2473,4 \left\{ \left(\frac{109,8}{79,525 + 70.P} \right)^3 . 2237,5 + \left[1 - \left(\frac{109,8}{79,525 + 70.P} \right)^3 \right] . 660,1 \right\}$$

$$\leq 2473,4 . 2237,5$$

A análise da rigidez equivalente na seção transversal e a flecha imediata podem ser feitas atribuindo-se valores do carregamento P. Para P = 8,0 kN, obtém-se:

$$(EI)_{eq} = 2473,4 \left\{ \left(\frac{109,8}{79,525 + 70.8,0} \right)^3 . 2237,5 + \left[1 - \left(\frac{109,8}{79,525 + 70.8,0} \right)^3 \right] . 660,1 \right\}$$

$$\leq 5\,534\,232,5 \text{ (kN.cm}^2\text{)}$$

(A.20)

$$(EI)_{eq} = 1\,652\,448,8 \leq 5\,534\,232,5 \text{ (kN.cm}^2\text{)}$$

Portanto: $(EI)_{eq} = 1\,652\,448,8 \text{ kN.cm}^2$

Portanto, a previsão da flecha imediata ou instantânea pode ser obtida a partir da Equação A.21, considerando a rigidez equivalente da nervura:

$$v_{\max} = \frac{P.a.(3\ell^2 - 4a^2)}{24(EI)_{eq}} = \frac{8,0.70.(3.200^2 - 4.70^2)}{24.1652448,8} = 1,42 \text{ cm}$$

(A.21)

Análise da Curvatura (1/r)

Tabela A.1 - Resultados de Curvatura (1/r)

MODELO	MOMENTO FLETOR = 400 KN.cm			MOMENTO FLETOR = 800 KN.cm		
	Deformação do Concreto (‰)	Deformação Média das Armaduras (BI e AA) (‰)	Curvatura (1/r)	Deformação do Concreto (‰)	Deformação Média das Armaduras (BI e AA) (‰)	Curvatura (1/r)
PR 02 – CE	-0,28	0,90	$1,47.10^{-4}$	-0,55	2,84	$4,24.10^{-4}$
PC 03 – CE	-0,19	0,70	$1,11.10^{-4}$	-0,36	2,86	$4,02.10^{-4}$
PR 03 – CE	-0,26	0,65	$1,14.10^{-4}$	-0,68	2,28	$3,70.10^{-4}$