



Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Civil

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

“Estudo de Lajes com Adição de Resíduo de Pneu”

Eng^a Ana Paula Moreno Trigo

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

Co-orientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

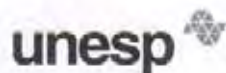
Ilha Solteira

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

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

T828e	Trigo, Ana Paula Moreno Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu / Ana Paula Moreno Trigo. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008 110 p. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008 Orientador: Jorge Luís Akasaki Co-orientador: José Luiz Pinheiro Melges Bibliografia: p. 103-110 1. Concreto armado. 2. Lajes. 3. Materiais alternativos. 4. Resíduo de pneu.
-------	--



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTUDO DE LAJES COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE PNEU

AUTORA: ANA PAULA MORENO TRIGO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JEFFERSON SIDNEY CAMACHO

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ROBERTO CHUST CARVALHO

Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos

Data da realização: 28 de fevereiro de 2008.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais
José Carlos e Salete e a minha irmã
Juliana, pela convivência, apoio, confiança
e carinho sempre demonstrados.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua constante presença.

A minha família que sempre apoiou e acreditou na realização de meus projetos e ao querido Fernando, por estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao professor Dr. Jorge Luís Akasaki enquanto orientador principal responsável pelo trabalho de pesquisa e ao professor Dr. José Luiz Pinheiro Melges pela co-orientação da análise estrutural.

Aos professores Jefferson Sidney Camacho e José Antonio Matthiesen, pelas valiosas contribuições.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista.

A CAPES – Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, pelo apoio financeiro concedido.

A Holcim Brasil, por fornecer os cimentos utilizados na fabricação do concreto.

A Regigante Recuperadora de Pneus Pará pelo fornecimento dos resíduos de borracha.

A Lajes Artcon, na pessoa do engenheiro Antonio Anderson da Silva Segantini, por fornecer as armaduras treliçadas e as lajotas cerâmicas.

A Jeruelplast pela doação dos espaçadores plásticos.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, na pessoa do engenheiro Flávio Moreira Salles, que colocou à disposição todas as instalações e apoio técnico, sem os quais seria difícil alcançar os objetivos do presente trabalho.

Aos técnicos e também amigos Ronaldo, Gilson, Mário, Silvio, Cavassano, Michelan, Lana, Francisco, Iverson, Joaquim, Euclides, Gilmar, Vicente, Lorival, Pascoalín, Anderson, Jorge, Branco, Sergio, Bertoluci e Sumie.

Aos colegas de mestrado e iniciação científica Ana Carolina, Antônio Rogério, Everton, Maria Lidiane, Odilon, Pamela, Wilson, Bruno, Eduardo, João Victor, Lucas, Marcos, Shaianne e William.

A todos que colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Generalidades	13
1.2	Definição do Problema.....	14
1.3	Objetivo.....	14
1.4	Justificativa.....	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Aspectos Gerais.....	15
2.2	Concreto Armado	17
2.2.1	Considerações Iniciais.....	17
2.2.2	Comportamento Estrutural	17
2.3	Lajes Com Vigotas Pré-moldadas Treliçadas	19
2.3.1	Considerações Iniciais.....	19
2.3.2	Breve Histórico	19
2.3.3	Descrição	20
2.3.4	Classificação.....	23
2.4	Resíduos de Borracha de Pneu	24
2.4.1	Considerações Iniciais.....	24
2.4.2	Histórico das Aplicações em Misturas à Base de Cimento.....	25
3	Programa Experimental	39
3.1	Material	39
3.1.1	Cimento	39
3.1.2	Agregados.....	40
3.1.3	Água	41
3.1.4	Resíduo de Borracha de Pneu.....	41
3.1.5	Lajota Cerâmica, Aço e Armação Treliçada	42
3.2	Métodos	43
3.2.1	Caracterização do Material.....	43
3.2.2	Procedimentos para a Confeção dos Modelos de Lajes Treliçadas.....	46
3.2.3	Procedimentos para o Ensaio dos Modelos de Lajes Treliçadas.....	53
3.2.4	Estimativa da Flecha Imediata em Vigas	60

4	Apresentação e Análise dos Resultados.....	65
4.1	Resultados do Ensaio de Caracterização do Material	65
4.1.1	Resíduo de Borracha de Pneu.....	65
4.1.2	Concreto	66
4.2	Resultados do Ensaio da Laje Treliçada	69
4.2.1	Modelos de Laje M-100	69
4.2.2	Modelos de Laje M-210 e M-210E	81
5	Conclusões e Considerações	99
6	Referências.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resíduos de borracha de pneu utilizados.....	13
Figura 2: Elementos estruturais de concreto armado	18
Figura 3: Seção transversal de laje pré-moldada treliçada.....	20
Figura 4: Tipos de vigotas pré-moldadas utilizadas nas lajes	21
Figura 5: Vigota pré-moldada treliçada	21
Figura 6: Armação treliçada.....	22
Figura 7: Lajes com vigotas pré-moldadas do tipo treliça	23
Figura 8: Perda de resistências à compressão e à flexão depois de adicionada a borracha.	28
Figura 9: Curva de carga x deformação de concretos adicionados de borracha de pneu.....	28
Figura 10: Curva de carga x deslocamento	29
Figura 11: Perda de massa por abrasão de corpos-de-prova controle e com 10% de borracha	30
Figura 12: Microscopia eletrônica de resíduos de borracha.....	31
Figura 13: Distribuição dos resíduos de borracha de pneu na mistura de concreto	33
Figura 14: Zonas de transição “pasta de cimento-borracha” e “pasta de cimento-areia”	35
Figura 15: Superfície dos concretos expostos ao fogo.....	37
Figura 16: Vista lateral dos corpos-de-prova submetidos ao fogo.....	38
Figura 17: Resíduos de borracha de pneu utilizados.....	42
Figura 18: Tela do programa utilizada para a dosagem dos traços de concreto.....	44
Figura 19: Tela do programa utilizada para obtenção dos traços finais de concreto	45
Figura 20: Seção transversal dos modelos estudados – Un.: cm.....	47
Figura 21: Preparação de treliça e fôrma	48
Figura 22: Moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas	48
Figura 23: Processos de desmoldagem e cura das vigotas pré-moldadas treliçadas.....	49
Figura 24: Concretagem da capa dos modelos M-100.....	49
Figura 25: Desmoldagem e cura dos modelos M-100.....	50
Figura 26: Posicionamento de ganchos e armadura de distribuição nos modelos M-210	51
Figura 27: Posicionamento dos extensômetros elétricos na armação treliçada. Un.:cm.....	51
Figura 28: Vigota pré-moldada após 24 horas da moldagem e sua cura.....	52
Figura 29: Etapas referentes à confecção dos modelos M-210E	52
Figura 30: Dimensões da peça utilizada no ensaio de flexão (Un. cm)	53
Figura 31: Aplicação do extensômetro elétrico na superfície inferior dos modelos M-100	54

Figura 32: Etapas realizadas anteriormente ao ensaio	55
Figura 33: Esquema geral do posicionamento dos relógios comparadores – Un.: cm.....	55
Figura 34: Esquema estático dos modelos M-100 – Un.: cm.....	56
Figura 35: Esquema geral de ensaio – Vista lateral – Un.: cm	56
Figura 36: Relógios comparadores dispostos nos modelos M-210.....	57
Figura 37: Esquema estático dos modelos M-210 – Un.: cm.....	57
Figura 38: Aplicação do extensômetro elétrico na superfície da armação treliçada.....	58
Figura 39: Posicionamento dos extensômetros elétricos nos modelos M-210E. Un.: cm	59
Figura 40: Transporte dos modelos e posicionamento dos relógios comparadores.....	59
Figura 41: Esquema estático dos modelos de menores dimensões – Un.: cm	60
Figura 42: Comportamento estrutural típico de uma viga de concreto armado biapoiada	60
Figura 43: Substituição da área de aço por uma área de concreto equivalente.....	62
Figura 44: Elementos de seção transversal em “T” sem armadura	62
Figura 45: Seção T com comportamento de seção retangular	64
Figura 46: Seção T com comportamento de seção T verdadeira	64
Figura 47: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L1 na flexão	73
Figura 48: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L2 na flexão	73
Figura 49: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelos L3 na flexão.....	74
Figura 50: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L1-R na flexão	74
Figura 51: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L2-R na flexão	75
Figura 52: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L3-R na flexão	75
Figura 53: Comparação entre as médias dos modelos M-100, com e sem borracha de pneu..	77
Figura 54: Momento fletor x deformação dos modelos L1 e L3-R	78
Figura 55: Momento fletor x deformação dos modelos L2, L3, L1-R e L2-R.....	79
Figura 56: Padrão de fissuração ocorrido nos modelos M-100.....	80
Figura 57: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LSR na flexão	82
Figura 58: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LCR na flexão.....	82
Figura 59: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LSR-C na flexão	83
Figura 60: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LCR-C na flexão.....	83
Figura 61: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) dos modelos M-210 na flexão.....	84
Figura 62: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) dos modelos M-210 na flexão.....	84
Figura 63: Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos LSR-C e LCR-C.....	86
Figura 64: Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos LSR-CA e LCR-CA....	86
Figura 65: Esquema de posicionamento e nomenclatura dos extensômetros elétricos.....	87

Figura 66: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LSR-C na flexão	88
Figura 67: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LCR-C na flexão	88
Figura 68: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LSR-CA na flexão	89
Figura 69: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LCR-CA na flexão	89
Figura 70: Comparação da deformação no concreto para os modelos LSR-C e LCR-C	90
Figura 71: Comparação da deformação no concreto para os modelos LSR-CA e LCR-CA ...	91
Figura 72: Deformação na armadura da Nervura 01 do modelo LSR-CA.....	92
Figura 73: Deformação na armadura da Nervura 02 do modelo LSR-CA.....	92
Figura 74: Deformação na armadura da Nervura 01 do modelo LCR-CA	93
Figura 75: Deformação na armadura da Nervura 02 do modelo LCR-CA	93
Figura 76: Deformação na armadura da Nervura 01 dos modelos sem e com resíduo.....	94
Figura 77: Deformação na armadura da Nervura 02 dos modelos sem e com resíduo.....	94
Figura 78: Comparação das deformações no concreto e na armadura do modelo LSR-CA....	95
Figura 79: Comparação das deformações no concreto e na armadura do modelo LCR-CA ...	95
Figura 80: Posicionamento das fissuras na face inferior dos modelos M-210E	96
Figura 81: Padrão de fissuração ocorrido nos modelos M-210 e M-210E.....	97
Figura 82: Histórico do comportamento da LN ao longo do carregamento.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do concreto armado	17
Tabela 2: Caracterização do agregado miúdo – classificação: areia média	40
Tabela 3: Caracterização do agregado graúdo – classificação: brita intermediária entre 0 e 1	40
Tabela 4: Classificação granulométrica do resíduo de borracha de pneu	42
Tabela 5: Características físicas da lajota cerâmica	42
Tabela 6: Características físicas do aço.....	42
Tabela 7: Características da treliça confeccionada em aço CA-60	42
Tabela 8: Amostragem utilizada no trabalho para cada idade.	46
Tabela 9: Características geométricas de seção transversal “T” sem armadura, no estágio I..	63
Tabela 10: Caracterização do resíduo de borracha de pneu	65
Tabela 11: Composição final dos traços de concreto	66
Tabela 12: Ensaio dos traços de concreto utilizados nos modelos M-100	67
Tabela 13: Ensaio dos traços de concreto utilizados nos modelos de M-210	67
Tabela 14: Ensaio dos traços de concreto utilizados nos modelos de M-210E	68

TRIGO, A. P. M. **Estudo de Lajes com Resíduo de Pneu**. 2008. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia – UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RESUMO

No Brasil, o concreto armado é bastante empregado na confecção de pilares, vigas e lajes das estruturas de edificações. As lajes são utilizadas como piso ou forro e, considerando-se que a laje de forro não demanda ações elevadas, quando comparada à laje de piso, pensa-se na possibilidade de substituir parcialmente o agregado do concreto por outros materiais que sejam, ecológica e economicamente, viáveis. Desses materiais, o resíduo de borracha se mostra promissor, por ser gerado em abundância. Este trabalho objetiva mostrar uma alternativa de reaproveitamento para o resíduo proveniente do processo de recauchutagem de pneu, utilizando-o como parte do agregado de concreto para lajes de forro. São ensaiadas, à flexão, duas lajes unidirecionais, sendo uma delas constituída parcialmente por resíduo de borracha de pneu, e a outra sem, ambas formadas por vigotas pré-moldadas treliçadas. Através dos deslocamentos verticais, das deformações no concreto e na armadura, medidos com auxílio de relógios comparadores e extensômetros elétricos, e dos modos de ruptura da estrutura, obtidos nos ensaios, avalia-se o comportamento dessas lajes.

Palavras-chave: Concreto armado. Laje pré-moldada treliçada. Resíduo de pneu. Ensaios.

TRIGO, A. P. M. **Slabs Study with Tire Residue Addition**. 2008. 110f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Faculdade de Engenharia – UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ABSTRACT

In Brazil, the reinforced concrete is used for pillars, beams and slabs. The slabs are used as floor or lining and, as the lining slab do not demand raised actions, when compared with the floor slab, it is possible to replace partially the concrete aggregate for ecologically and economically viable materials. From these materials, the rubber residue is promising and abundant. The aim of this work is to show a recycling alternative for tire rubber from retreading process, using it as part of the concrete aggregate in lining slabs. Two unidirectional slabs are assayed to the flexure, one partially with tire rubber residue and another one without, both formed by precast lattice joist. The slabs behavior is evaluated through the vertical displacements, concrete and reinforcement deformations, measured with comparing clocks and electric strain gages, and structure rupture ways.

Keywords: Reinforced concrete. Precast slab with lattice joist. Tire rubber. Assays.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A organização desta dissertação é elaborada de modo a simplificar e facilitar o entendimento dos conceitos que são abordados em seis capítulos.

Capítulo 1 – Introdução

Aborda o contexto no qual a dissertação está inserida. Este contexto engloba os aspectos econômicos e técnicos que justificam o investimento conferido à dissertação, e também traz a definição do problema e os objetivos que guiam o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Apresenta uma revisão bibliográfica dos temas mais relevantes para a pesquisa, tais como: concreto armado, lajes formadas por vigotas pré-moldadas treliçadas, borracha de pneu e resíduos provenientes da recauchutagem de pneus.

Capítulo 3 – Material e Métodos

Mostra as características dos materiais empregados e a metodologia utilizada para a caracterização dos materiais e para a realização dos ensaios.

Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados

Traz os resultados obtidos dos ensaios realizados no Capítulo 3, assim como análise e discussão pertinentes a cada resultado.

Capítulo 5 – Conclusões e Considerações

Neste capítulo, apresentam-se algumas conclusões e considerações feitas com base na análise dos resultados e na literatura.

Capítulo 6 – Referências

1 Introdução

1.1 Generalidades

O concreto armado é utilizado em várias estruturas, com diversas funções, entre elas, muros de arrimo, reservatórios, pontes e edificações compostas por pilares, vigas e lajes.

Com intuito de otimizar o sistema de laje de concreto armado moldada *in loco*, foi lançada no mercado brasileiro a laje treliçada que reduz o uso de fôrma e escoramento, diminuindo o custo total da edificação, além de ser de fácil manuseio e montagem.

A laje treliçada é formada por vigotas pré-moldadas com armação em forma de treliça, elementos de enchimento (blocos cerâmicos, de concreto celular, de poliestireno expandido) e capa de concreto que solidariza o conjunto. A confecção da capa normalmente é feita utilizando concreto convencional, sem nenhum tipo de adição. Entretanto, considerando-se o crescimento da conscientização ecológica e das preocupações com o meio ambiente, pode existir a possibilidade de incrementar algum resíduo inerte nesse concreto.

Um resíduo inerte muito promissor em nosso país é o proveniente da recauchutagem de pneus (Figura 1); este resíduo vem sendo utilizado em materiais cimentícios como substituição parcial ao agregado miúdo. Quando analisadas as propriedades elásticas da borracha, sua resistência ao impacto e sua baixa massa específica – características estas muitas vezes desejadas em concretos e que podem ser melhoradas através da inserção do resíduo em sua composição – vê-se uma alternativa limpa de descarte para esse resíduo.



Figura 1: Resíduos de borracha de pneu utilizados

1.2 Definição do Problema

Um dos grandes desafios para o homem, atualmente, é o tratamento e descarte de rejeitos e dejetos de materiais, principalmente os materiais poliméricos, cuja decomposição é extremamente lenta e que representam um sério problema ambiental. O resíduo de borracha de pneu proveniente da recauchutagem de pneus fora de uso é um dos resíduos gerados pela indústria e que, muitas vezes, se encontra disposto de modo inadequado no meio ambiente.

Embora existam oportunidades para reciclagem e reaproveitamento deste resíduo, não existem recuperadoras em número suficiente frente à imensa quantidade que é acumulada, bem como é insuficiente o mercado para esse tipo de material reciclado (FIORITI, 2007, p.4).

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é verificar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de borracha de pneu, resultante do processo de recauchutagem, em lajes com vigotas pré-moldadas treliçadas. Como objetivos secundários, realizar estudos relativos à dosagem do concreto com resíduo de borracha e caracterizar o comportamento estrutural das lajes à flexão.

1.4 Justificativa

O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial e vem crescendo rapidamente em todos os ramos da atividade econômica. Tal aproveitamento contempla a redução do consumo de matérias-primas, favorecendo a questão ambiental e, trazendo, por vezes, melhorias técnicas e operacionais.

Um material que pode ser reaproveitado e que constitui um problema ambiental no mundo, é o resíduo de borracha proveniente da recauchutagem dos pneus inservíveis. A utilização racional e benéfica desses resíduos em lajes treliçadas, além de satisfazer às crescentes preocupações com relação à disposição ambiental de detritos, economiza recursos naturais.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aspectos Gerais

O concreto armado é considerado o material estrutural mais aplicado em obras civis no mundo, devido a diversos fatores: facilidade de ser moldado em diversas geometrias, mão-de-obra barata e não especializada para sua confecção e materiais que o compõem, disponíveis em várias regiões do planeta.

Como consequência da crescente aplicação deste material, há o elevado consumo de matérias-primas como cimento, brita e areia. Preocupados com o fato dessas matérias-primas estarem cada vez mais escassas, pesquisadores buscam alternativas ecológica e economicamente viáveis para minimizar tal problema, e vêem, muitas vezes, a incorporação de resíduos na composição do concreto como uma solução.

Segundo Marques (2005, p.12) existe uma grande variedade de resíduos que são utilizados no concreto: escória de alto-forno, cinza de casca de arroz, entulho da construção civil e materiais pozzolânicos. A borracha de pneu, proveniente de pneus fora de uso ou da recauchutagem, é um dos resíduos produzidos pela indústria e que também pode substituir, parcialmente, os agregados naturais do concreto.

O resíduo de pneu é um problema crescente e grave de saúde pública, particularmente em países de climas tropicais, já que empilhados servem de criadouros para mosquitos transmissores de dengue, febre amarela e malária (MATTOS, 2006).

A queima desse resíduo libera óleo pirolítico, que contém produtos químicos tóxicos e metais pesados capazes de produzir efeitos adversos à saúde, como perda de memória, deficiência no aprendizado, supressão do sistema imunológico, danos nos rins e fígado. Esse óleo pode contaminar o solo e água, além de penetrar em lençóis freáticos. Estudos demonstram que a poluição de águas causada pelo escoamento derivado da queima de pneus pode durar até 100 anos (MATTOS, 2006).

Lund (1993, p.18.6) menciona que os pneus não podem ser dispostos em aterros sanitários, pois devido à dificuldade de compactação, os pneus voltam à superfície depois de um determinado tempo, reduzindo significativamente a vida útil dos aterros. Por outro lado, a trituração, que resolveria o problema da compactação, é um processo caro.

Face aos impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado dos resíduos de pneu, o setor da construção civil contribui para a melhora deste quadro, à medida que possibilita a incorporação destes resíduos em misturas à base de cimento. Baseado nas propriedades elásticas conferidas a estas misturas, diversos autores sugerem que sua aplicação seja ideal em situações sujeitas aos efeitos de impacto como, barreiras de proteção de rodovias e em situações favorecidas pela baixa massa unitária da mistura, como lajes de forro.

Deste modo, vê-se a possibilidade de incorporação do resíduo de borracha de pneu na capa de solidarização de lajes de forro com vigotas pré-moldadas treliçadas. O uso deste resíduo nas vigotas pré-moldadas é, a princípio, inapropriado, já que estes elementos são responsáveis por absorver a maior parte das solicitações.

A escolha pela laje treliçada foi baseada no fato de que esta laje vem sendo cada vez mais utilizada. Isso se deve ao fato desse sistema permitir grande economia em fôrmas e escoramento, ser de fácil manuseio e montagem e, se bem dimensionado e executado, comporta-se adequadamente e com segurança (FLÓRIO, 2004, p.4).

2.2 Concreto Armado

2.2.1 Considerações Iniciais

Em uma viga que trabalha predominantemente à flexão, cabe ao material concreto a função principal de absorver as tensões de compressão, e ao material aço atribui-se a tarefa de absorver as tensões de tração e auxiliar o concreto a absorver as tensões de compressão, quando necessário (CAMACHO, 2006, p.4).

Carvalho e Figueiredo (2007, p.19) apresentam diversas vantagens e desvantagens do concreto armado, Tabela 1, merecendo destaque:

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do concreto armado

Vantagens	Desvantagens
a. Tem boa trabalhabilidade e por isso se adapta a várias formas.	a. Quando não se utiliza a pré-moldagem, necessita de escoramentos.
b. Permite a obtenção de estruturas monolíticas, pois há aderência entre o concreto endurecido e o lançado posteriormente.	b. Devido à seu elevado peso específico ($\gamma \approx 25 \text{ kN/m}^3$) acarreta em peso próprio muito grande, limitando seu uso em determinadas situações, ou elevando muito seu custo.
c. Possibilita a utilização da pré-moldagem.	

2.2.2 Comportamento Estrutural

Uma estrutura de concreto armado convencional é composta por três elementos estruturais básicos, mostrados na Figura 2 e definidos segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p.74-75):

- Vigas: são elementos lineares em que a flexão é preponderante.
- Pilares: são elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.

- Placas: são elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais a seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes.

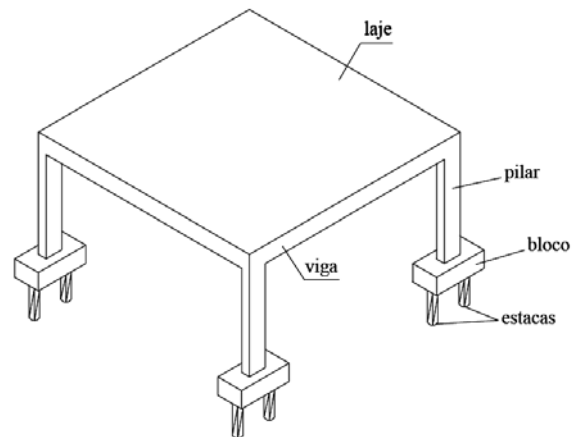


Figura 2: Elementos estruturais de concreto armado

Fonte: Silva (2005, p.18)

Dos elementos estruturais citados, somente serão apresentadas maiores informações à respeito das lajes, uma vez que o foco deste trabalho é a incorporação de resíduos de borracha de pneu em lajes treliçadas.

2.3 Lajes Com Vigotas Pré-moldadas Trelaçadas

2.3.1 Considerações Iniciais

A grande vantagem da utilização das lajes pré-moldadas é a redução da quantidade de fôrmas em relação à laje maciça ou à laje nervurada moldada no local. E aliada a suas características geométricas, há redução do volume de concreto, se comparadas às lajes maciças (DROPPA JÚNIOR, 1999, p.6).

As lajes aqui descritas, embora usualmente chamadas de pré-moldadas, são, na verdade, parcialmente pré-moldadas, pois apenas um de seus componentes (a vigota trelaçada) é executado fora do local de utilização definitiva na estrutura.

Com o aumento da demanda dessas lajes, novos tipos de lajes pré-moldadas foram desenvolvidos, como, por exemplo, as lajes formadas por vigotas pré-moldadas com armação em forma de treliça, comumente chamadas de lajes trelaçadas.

2.3.2 Breve Histórico

Desenvolvida na Europa, a laje trelaçada surgiu para suportar algumas deficiências que a laje convencional pré-fabricada apresenta, e competir com a laje maciça no que diz respeito à relação custo/benefício. Hoje, são utilizadas com sucesso na construção civil em todo o mundo.

Segundo Muniz (1991, p.19), o sistema de lajes trelaçadas teve larga utilização a partir da Segunda Guerra Mundial e em muito contribuiu para solucionar o problema da reconstrução dos países destruídos pela guerra, e a grave crise habitacional conseqüente.

A partir da década de 60, começou-se a produzir em escala industrial, na Europa, armaduras pré-fabricadas soldadas por eletrofusão para utilização na construção civil. Nos dias de hoje, essas armaduras são bastante utilizadas em todo o mundo, tendo a função, tanto de armadura de distribuição (tela soldada), como a de resistir a esforços solicitantes (armadura trelaçada, tela soldada).

No Brasil, as lajes trelaçadas já são utilizadas há cerca de 25 anos, mas sua difusão e seu crescimento se deram no início da década de 90. Hoje, muitas fábricas de lajes oferecem várias opções de executar a laje trelaçada, podendo ser lajes nervuradas unidirecionais ou bidirecionais.

2.3.3 Descrição

Estas lajes são sistemas formados por nervuras cujas vigotas (parte da nervura) são pré-moldadas de concreto armado do tipo treliça, espaçadas de maneira uniforme por elementos de enchimento leves (blocos cerâmicos, de concreto celular, de poliestireno expandido, etc.) e cobertas por uma capa de concreto moldada no local, cuja função é garantir a distribuição dos esforços atuantes no elemento, aumentar sua resistência à flexão e nivelar o piso.

Em comparação com os demais sistemas de lajes pré-moldadas, as lajes treliçadas apresentam as seguintes vantagens (DROPPA JÚNIOR, 1999, p.12):

- Economia de fôrmas e escoramentos, proporcionando redução de mão-de-obra e materiais.
- O transporte e o manuseio da vigota treliçada são bastante facilitados, devido ao seu formato e baixo peso ($\gamma \cong 0,1 \text{ kN/m}$).
- Possibilita maior rapidez de execução.

A utilização das lajes treliçadas torna-se inapropriada em regiões em que a armadura em forma de treliça não é encontrada ou não tem preço competitivo, cabendo ao projetista optar pelo sistema construtivo mais adequado.

Para a confecção desse tipo de laje são empregados os elementos pré-moldados lineares (as vigotas) do tipo treliça, os elementos leves de enchimento posicionados entre as vigotas (apoiados nas vigotas), e, por cima destes, é colocada uma capa de concreto moldada no local, como ilustrado na Figura 3. A capa e as vigotas compõem a seção resistente da laje à flexão e ao cisalhamento.

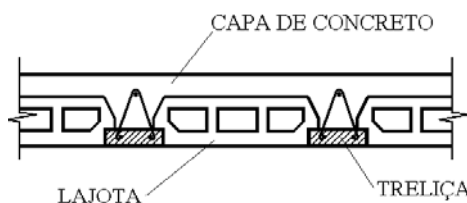


Figura 3: Seção transversal de laje pré-moldada treliçada

Fonte: alterado de Carvalho e Figueiredo (2007, p.64)

Na capa é recomendada, segundo a NBR 14859-1, a disposição de uma armadura de distribuição, nas direções transversal e longitudinal, composta por barras de aço de pequeno diâmetro ou em tela soldada, para o controle da fissuração e para a distribuição das tensões oriundas de ações concentradas. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p.3).

Atualmente, existem três tipos de vigota pré-moldada no mercado, mostrados na Figura 4: a de concreto armado, com seção transversal em T invertido e armadura passiva envolvida pelo concreto; a de concreto protendido, com seção transversal em T invertido e armadura de protensão pré-tracionada envolvida pelo concreto; e a treliçada, com armadura treliçada e placa de concreto envolvendo as barras inferiores da treliça (DROPPA JÚNIOR; EL DEBS, 2001, p.105).

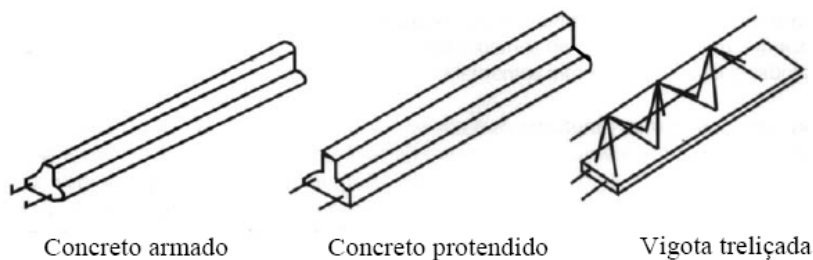


Figura 4: Tipos de vigotas pré-moldadas utilizadas nas lajes

Fonte: França e Fusco (1997) citado por Pinheiro e Razende (2003, p.17.4)

A vigota pré-moldada treliçada é obtida com a colocação de uma armação treliçada em uma sapata de concreto, adicionando, se necessário, uma armação complementar (Figura 5). Devem ser dimensionadas para suportar os esforços solicitantes após a concretagem da laje e ter a rigidez necessária para resistir ao transporte e montagem.

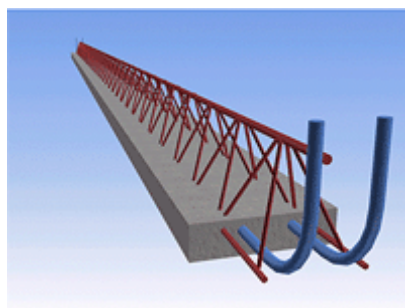


Figura 5: Vigota pré-moldada treliçada

Fonte: Pereira (2001)

Conforme NBR 14862 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002, p.2), a armação treliçada é uma estrutura formada por sistema de eletrofusão, de modo a formar duas treliças unidas pelo vértice. As diagonais proporcionam rigidez ao conjunto e excelentes condições de transporte e manuseio. Essa estrutura é dividida em três partes distintas (Figura 6):

- Banzo inferior (armadura positiva) - formado por dois vergalhões na base da treliça (ϕ_{inf}), que serve para absorver as tensões de tração oriundas da flexão. Quando necessário, coloca-se a armadura adicional para absorver as tensões de tração.
- Banzo superior (armadura negativa) - vértice formado por um vergalhão de aço (ϕ_{sup}), sendo o principal responsável pela rigidez ao transporte e que também determina a distância máxima entre as linhas de escora.
- Sinusóide (armadura transversal) - formado por vergalhões laterais dobrados em sinusóide (ϕ_{diag}), sendo responsável pela rigidez ao conjunto e também pela absorção das tensões de cisalhamento oriundas da força cortante. O sinusóide, no entanto, somente poderá ser considerado para absorver o cisalhamento quando o banzo superior estiver situado acima da linha neutra da seção transversal da laje.

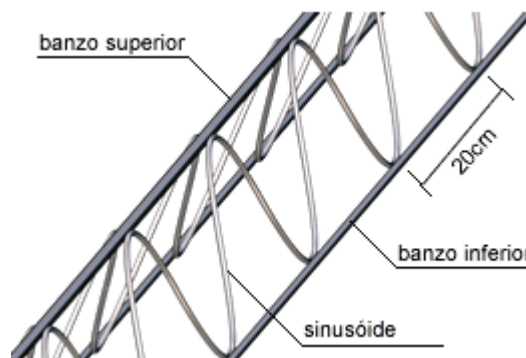


Figura 6: Armação treliçada

Fonte: LAJES (2005)

Segundo a NBR 14862, as treliças são padronizadas por um código TR seguida dos seguintes dígitos: os dois primeiros representam a altura da treliça e os 3 últimos representam as bitolas, em mm, do banzo superior, sinusóide e banzo inferior, respectivamente, sem a consideração das casas decimais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p.4).

Ainda segundo a norma, a armadura das treliças é constituída de fios de aço CA 60¹. Desta forma, por exemplo, o código TR20656 designa uma treliça de 20 cm de altura, um fio de 6 mm no banzo superior, sinusóides com 5 mm e dois fios de 6 mm no banzo inferior.

Como a principal característica desse tipo de laje (nervurada com vigotas pré-moldadas) é a diminuição da quantidade de concreto na região tracionada, pode-se usar um material de enchimento. Além de reduzir o consumo de concreto, há um alívio do peso próprio. O material de enchimento deve ser o mais leve possível, mas com resistência suficiente para suportar as operações de execução. Normalmente são utilizados blocos cerâmicos vazados (lajotas cerâmicas), blocos de concreto celular ou blocos de poliestireno expandido (isopor).

Deve-se ressaltar que a resistência do material de enchimento (materiais inertes) não é considerada no cálculo da laje.

2.3.4 Classificação

Segundo a NBR 14859-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002, p.2) estas lajes são classificadas segundo a posição de suas nervuras (vigotas). São consideradas unidirecionais quando as nervuras principais resistentes estão dispostas em uma única direção, ou seja, quando as nervuras são montadas numa única direção, e são consideradas bidirecionais quando as nervuras estão dispostas em duas direções. A Figura 7 mostra lajes treliçadas utilizando EPS como elemento de enchimento.



Unidirecional



Bidirecional

Figura 7: Lajes com vigotas pré-moldadas do tipo treliça

Fonte: LAJES (2005)

¹ A sigla CA seguida de um número, neste caso 60, indica se tratar de um aço cuja resistência à tração ou compressão (no caso do aço as duas resistências são as mesmas) é de 6000kgf/cm², segundo a NBR 7480 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 1)

2.4 Resíduos de Borracha de Pneu

2.4.1 Considerações Iniciais

O surgimento dos pneus de borracha fez com que fossem substituídas as rodas de madeira e de ferro, usadas em carroças e carruagens desde os primórdios da História. Esse grande avanço foi possível quando o norte-americano Charles Goodyear inventou o pneu. Ao descobrir o processo de vulcanização da borracha, deixando cair no fogão, a borracha misturada com enxofre, mal sabia ele que sua invenção revolucionaria o mundo. Entre as suas potencialidades industriais, além de ser mais resistente e durável, a borracha absorve melhor o impacto das rodas com o solo, o que tornou o transporte muito mais prático e confortável (RECICLAGEM, 2001).

Porém, juntamente com a revolução no setor dos transportes, a utilização dos pneus de borracha trouxe consigo a problemática do impacto ambiental, uma vez que a maior parte dos pneus descartados está abandonado em locais inadequados, causando grandes transtornos para a saúde e a qualidade de vidas humanas (RECICLAGEM, 2001).

Para se ter uma idéia, em cinco anos, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (Anip) recolheu 70 milhões de pneus usados, atendendo à resolução 258 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), de 26 de agosto de 1999, que indica, para 2005, o recolhimento de cinco pneus para cada quatro fabricados ou importados (VASCONCELOS, 2005, p.80).

Atualmente no Brasil são produzidos cerca de 50 milhões de pneus e apesar da importação de bens usados ser proibida por resoluções, outros 11 milhões de pneus usados entram no país todo ano, por meio de liminares judiciais (FIORI, 2005).

Segundo Reciclagem (2001) são descartados anualmente 20 milhões de pneus como lixo no Brasil. Aliado a isto há de se considerar o fato de que os pneus inicialmente eram feitos de borracha natural e a recuperação dessa borracha era muito comum; porém com o desenvolvimento de elastômeros sintéticos para substituir a borracha natural, o processo de recuperação tornou-se muito mais caro e complexo.

Assim, a borracha provinda de pneu inservível tem sido objeto de estudo de inúmeras pesquisas, dentre as mais diferentes áreas de interesse, onde cada setor visa aproveitar parte desse enorme potencial em inúmeras aplicações.

Algumas empresas, preocupadas com a qualidade do meio ambiente, procuram formas alternativas de reciclagem da borracha. Raspas de pneus são utilizadas em outros países para a fabricação de tapetes de carros, bolas de borracha, placas de pisos e solados de calçados. Com o avanço tecnológico, surgiram novas aplicações, como a mistura com asfalto. Na forma inteira, Collins et al. (2002, p.S245) apresenta outra aplicação: diferentes configurações de pneus estão sendo monitorados e utilizados como recifes artificiais na costa leste americana.

O emprego da borracha é muito amplo, pois as características e propriedades que os elastômeros reúnem fazem com que alcancem praticamente todos os setores da economia: automobilístico, calçadista, construção civil, plásticos, materiais hospitalares e outros também de grande importância no dia-a-dia da sociedade.

O setor da construção civil vem contribuindo para a reciclagem de resíduos prejudiciais ao meio ambiente através da possibilidade de incorporação destes resíduos em misturas à base de cimento. Segundo Marques (2005, p.12) o uso da borracha de pneu em compostos à base de cimento pode ser uma alternativa limpa de descarte para este material prejudicial ao meio ambiente.

2.4.2 Histórico das Aplicações em Misturas à Base de Cimento

O uso de resíduos de borracha de pneu na produção de materiais à base de cimento é definido por Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.226) como uma grande oportunidade de contribuir para a preservação do meio ambiente, à medida que se amplia a reciclagem dos pneus inservíveis descartados em todo o mundo.

Segundo Bignozzi e Sandrolini (2004, p.78), os estudos da utilização de resíduos de borracha de pneu em concretos de cimento Portland existem à cerca de uma década. Assim, são vários os trabalhos que visam, além de fornecer contribuições ao meio ambiente, proporcionar enriquecimento a respeito do assunto, abrangendo as diferentes propriedades das misturas de cimento Portland, sejam elas pastas, argamassas ou concretos.

A substituição parcial de agregados naturais por resíduos de borracha de pneu colabora duplamente com o meio ambiente, pois além de reciclar tais resíduos, poupam-se as reservas finitas de agregados naturais, contribuindo, desta forma, com a qualidade ambiental.

Nos materiais cimentícios são empregados, sem distinção, tanto os resíduos de borracha provenientes do fracionamento dos pneus inservíveis quanto àqueles oriundos dos processos de recauchutagem. Estes resíduos são disponibilizados em diversas granulometrias, as quais normalmente estão compreendidas dentro das faixas granulométricas dos agregados naturais, miúdos e graúdos, comumente utilizados na produção de argamassas e concretos.

Um dos primeiros estudos com a incorporação de borracha de pneu em concreto foi realizado por Eldin e Senouci (1993, p.74). Os autores fizeram substituições no agregado miúdo por borracha de 1mm, assim como substituições no agregado graúdo por borracha com dimensões de 38, 25, 19 e 6mm. Após a incorporação da borracha, além da menor trabalhabilidade, foi observada menor queda na resistência à compressão e na resistência à tração de misturas com substituição no agregado miúdo e granulometrias mais finas. Também foi observado aumento da tenacidade de misturas contendo borracha de pneu.

Isso indica que o tamanho do agregado influencia as propriedades mecânicas e reológicas de concretos com borracha de pneu.

Analizando esse aspecto, pesquisas mais recentes foram desenvolvidas por Akasaki et al. (2003, p.15). Os autores utilizaram diferentes granulometrias do resíduo de borracha e fizeram substituições tanto no agregado graúdo quanto no agregado miúdo, avaliando a resistência à flexão, absorção de água, densidade no estado fresco e a trabalhabilidade. Apesar dos corpos-de-prova ensaiados à flexão apresentarem queda na resistência, eles tiveram maior capacidade de resistência residual após a ruptura.

Foi observada queda na trabalhabilidade nas misturas após a incorporação da borracha, diminuição da densidade e menor absorção de água. Entretanto, a absorção de água sofre interferência com o tamanho do agregado, pois para a borracha com granulometria mais fina a absorção de água encontrada foi menor.

Com base neste estudo, Akasaki et al. (2003, p.15) mencionam que os resíduos de borracha de pneu ao serem incorporados nos concretos devem substituir a areia para que não haja perda de resistência acentuada.

Fattuhi e Clark (1996, p.236) estudaram dois tipos de concretos segundo a granulometria da borracha de pneu incorporada: concretos contendo resíduos de 1-16mm e concretos com granulometria inferior a 5mm, variando de 0 a 13% a substituição, em massa, dos totais de sólidos (agregados) do concreto pela borracha de pneu. As propriedades estudadas foram a trabalhabilidade, peso específico, resistência à compressão, absorção de impacto e um ensaio investigativo a respeito da extinção do fogo.

Os testes de resistência ao fogo mostraram grande redução na inflamabilidade da borracha de pneu, devido à presença da pasta de cimento e dos agregados. O ensaio de fogo consistiu em submeter corpos-de-prova por três minutos a um maçarico, tendo apenas como objetivo observar a aparência e o tempo de extinção do fogo. Os resultados mostraram que o fogo se extinguiu sozinho de 4 a 5 segundos.

Fattuhi e Clark (1996, p.236) observaram que a capacidade de resistência ao impacto dos concretos com adição de resíduos de borracha de pneu foi comparável à do concreto referência (sem resíduo).

Quanto à resistência à compressão, os autores observaram queda após a inserção da borracha e notaram que os concretos adicionados de resíduos de borracha de granulometria fina (até 5 mm) apresentaram valores de resistência à compressão menor do que àqueles adicionados de resíduos, de mesma natureza, com maiores granulometrias (até 16mm).

A queda na resistência à compressão foi atribuída pelos autores ao fato da borracha se comportar como vazios e pelo seu baixo módulo de elasticidade.

A redução de peso específico nos concretos com adição de borracha de pneu veio acompanhada da redução na resistência à compressão dos mesmos. Fazendo a máxima substituição (13% em massa), Fattuhi e Clark (1996, p.236) conseguiram obter redução de 20% no peso específico, entretanto ocorreu uma abrupta redução da resistência à compressão, cerca de 70%.

Os autores observaram que a trabalhabilidade é influenciada pelas dimensões dos agregados, pois para menores granulometrias os concretos estudados apresentam melhor desempenho se comparados aos de granulometrias maiores. Ressaltaram que tal observação é similar ao exposto por alguns pesquisadores e contrária a outros.

Motivado por certas constatações nas investigações de concretos com adição de resíduos de borracha de pneu serem controversas, Fattuhi e Clark (1996, p.236) destacaram a necessidade de uma abrangente caracterização do resíduo utilizado, quanto à sua origem, tamanho, formato, granulometria, densidade, quantidade e tipo presente; sendo este um ponto crucial para evitar pseudocomparações.

Toutanji (1996, p.138) substituiu diferentes porcentagens de borracha de 12,7mm (25%, 50%, 75 e 100%) pelo volume de agregado graúdo no concreto. O autor verificou que houve redução tanto na resistência à compressão quanto na resistência à flexão, com o aumento da porcentagem de borracha. Foi observado que a perda de resistência é menor para a flexão do que para a compressão, conforme mostrado na Figura 8.

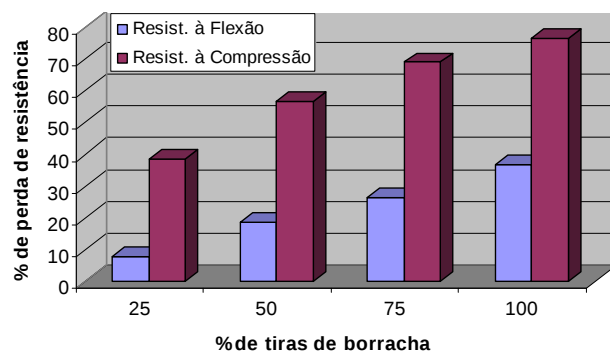


Figura 8: Perda de resistências à compressão e à flexão depois de adicionada a borracha.

Fonte: alterado de Toutanji (1996, p.137)

Também foi observado que houve aumento da capacidade de deformação com a adição da borracha. Este aumento é mostrado na Figura 9, que apresenta a curva referente à carga pelo deslocamento vertical.

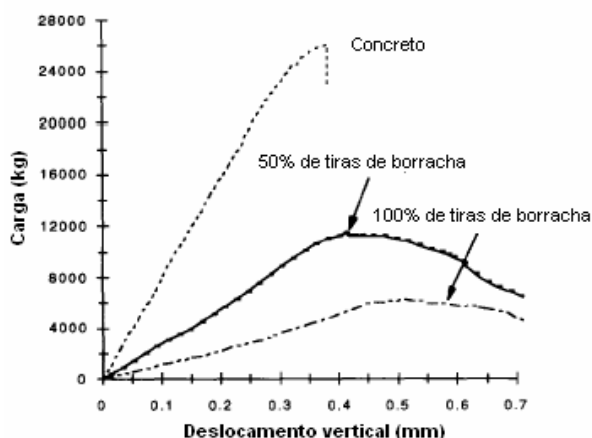


Figura 9: Curva de carga x deformação de concretos adicionados de borracha de pneu

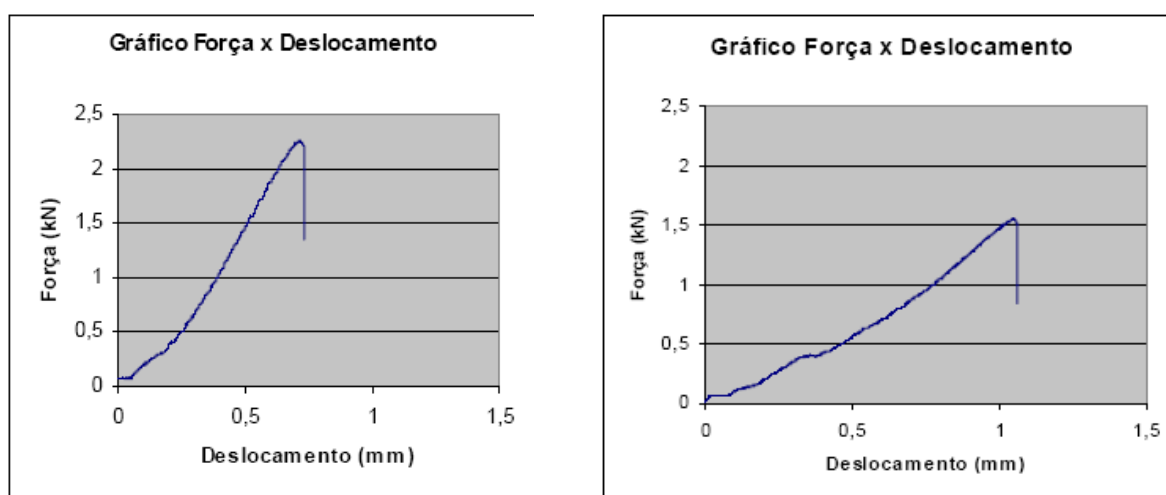
Fonte: alterado de Toutanji (1996, p.138)

Considerando a necessidade de avaliar os concretos com fibras, também em relação à resistência ao impacto, observa-se que, em geral, a simples metodologia da maioria dos ensaios de resistência ao impacto – baseada em peso submetido à queda livre, de altura conhecida – revela dificuldades na quantificação precisa do desempenho dos materiais ensaiados, limitando-se, muitas vezes, a análise comparativa superficial, como afirmam Mehta e Monteiro (1994, p.445).

Hughes e Al-Dafiry (1995, p.240) estudaram a determinação da resistência ao impacto, em vigas de concreto com adição de fibras industrializadas. Os autores se basearam na absorção de energia das vigas quando sujeitas a carregamento estático, visando condições de ensaio mais definidas. Contudo, apesar de obterem excelentes resultados, houve a necessidade de equipamentos de maior sofisticação, com controle de carregamento e deformação, não havendo, assim, contribuição para a total difusão desta prática.

É intuitivo pensar que um material com baixo módulo de elasticidade tenha maior capacidade de resistir a esforços de impacto. O comportamento do concreto com borracha, sob esforços de colisões², foi estudado por Topçu e Avcular (1997, p.1137). Em seus resultados viu-se que o concreto emborrachado resistiu de forma satisfatória, e tal fato se intensifica à medida que se aumenta a quantidade de borracha.

Em estudos mais recentes, Santos (2005, p.62) analisou, além da resistência à compressão, à tração e à flexão, a resistência ao impacto, capacidade de deformação e ponto de fulgor da borracha. Os teores de adições no concreto variaram de 1% a 3%. O valor de resistência ao impacto, por coincidência, foi o mesmo para as misturas com e sem resíduo, 382,7 J. Já a capacidade de deformação teve seu valor aumentado com a inserção do resíduo, como pode ser visto na Figura 10.



Concreto sem resíduo de borracha

Concreto com 3% de resíduo de borracha

Figura 10: Curva de carga x deslocamento

Fonte: Santos, 2005, p.62

² A expressão colisão é utilizada para diferenciar um tipo de ensaio, onde são ensaiados corpos-de-prova cilíndricos submetidos a colisões com martelos tipo bate-estacas e são observadas as tensões e deformações estáticas e dinâmicas, de outro existente, onde se promove a queda de esferas de aço sob placas pré-moldadas e se observam os danos progressivos com o número de quedas provocadas (TOPÇU; AVCULAR, 1997, p.1137)

A análise da temperatura de fulgor revelou que as temperaturas de amolecimento e de combustão ocorreram em uma faixa de 160°C, muito acima daquela em que o concreto tem suas propriedades ameaçadas, ou seja, no caso de incêndio, o resíduo não influencia no comportamento da estrutura, uma vez que o concreto apresenta deficiências bem antes.

Como foi visto, a maioria dos estudos apresenta queda nas propriedades mecânicas estudadas, principalmente na resistência à compressão. Essa queda vem sendo atribuída à falta de aderência entre a superfície da borracha e a matriz de cimento, por isso, alguns autores sugerem o tratamento superficial do resíduo.

Segre (1999, p.73) estudou a influência do tratamento superficial com soluções aquosas de H_2SO_4 e $NaOH$ em pastas de cimentos adicionadas de 5 a 10% de partículas de borracha de pneu, visando aumentar a hidrofiliabilidade da superfície das mesmas para compatibilizá-las com a matriz de cimento, ou seja, visando melhorar a adesão da partícula com a matriz.

Foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, densidade, resistências à compressão, ao ataque de ácido e à flexão e determinação da energia total de fratura. Com esses ensaios foi observado que a adição da borracha funciona como agente tenacificante. A determinação da perda de massa por abrasão e as micrografias eletrônicas de varredura comprovaram que o tratamento superficial aplicado com solução saturada de $NaOH$ melhorou a aderência química da borracha à matriz de cimento. O ensaio de perda de massa por abrasão pode ser visto na Figura 11.

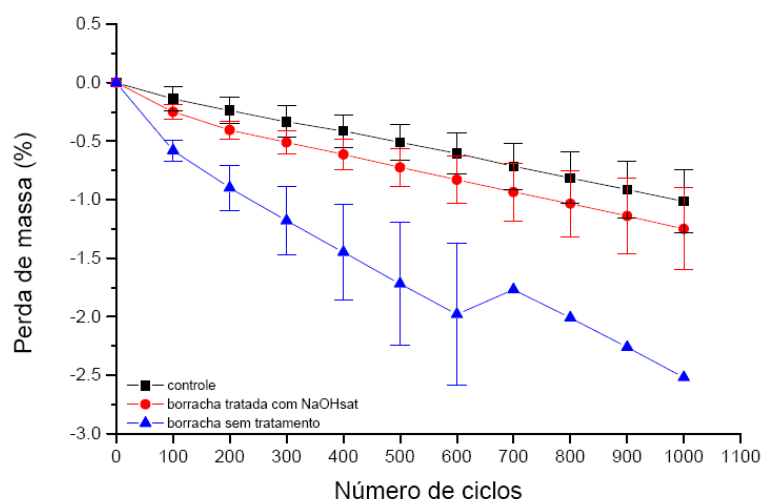
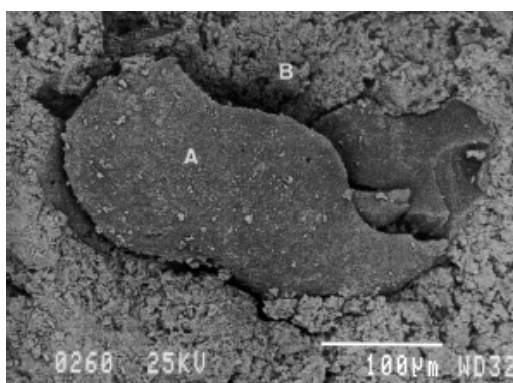


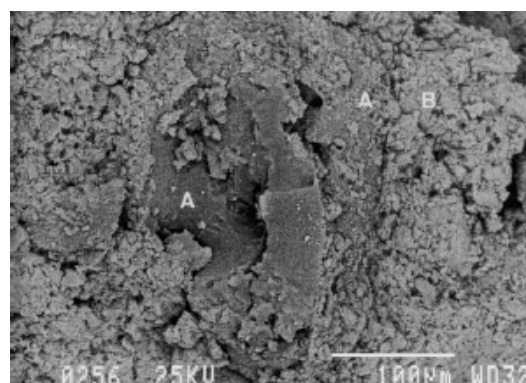
Figura 11: Perda de massa por abrasão de corpos-de-prova controle e com 10% de borracha

Fonte: Segre, 1999, p.73

Ainda neste campo, Segre e Jokes (2000, p.1424) e Segre, Monteiro e Sposito (2002, p.521-522) afirmam que embora tenha sido observada perda na resistência à compressão nas misturas contendo borracha, esta foi menor que a obtida para borracha sem tratamento, mostrando sua eficiência. Neste trabalho, os autores concluem que o tratamento superficial da borracha de pneu com solução saturada de NaOH aumentou significativamente a aderência entre as partículas e a matriz de cimento. Esse fato pode ser observado através da Figura 12, onde A é o resíduo e B é a pasta de cimento.



sem tratamento



com tratamento em solução saturada de NaOH

Figura 12: Microscopia eletrônica de resíduos de borracha

Fonte: Segre e Joekes (2000, p.1424)

Comparando os tratamentos com H_2SO_4 e NaOH, o que utiliza hidróxido de sódio comercial (NaOH) mostra-se o mais interessante para um tratamento de grande quantidade de borracha, devido seu baixo custo. O interesse do tratamento fica explícito na diminuição dos efeitos prejudiciais provocados pela adição do resíduo nas misturas cimentícias.

Procurando avaliar a durabilidade dos próprios resíduos de borracha de pneu, Huynh e Raghavan (1997, p.142) submeteram dois tipos de granulometria de borracha (menores que 4,75mm e menores que 2,36mm) a meios altamente alcalinos.

Os resíduos foram mantidos durante um período de quatro meses, em temperatura ambiente, nas diversas soluções químicas: hidróxido de sódio (NaOH) de pH 10, hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) de pH 12,5, cimento de pH 13 e água de pH 7. Foram feitos ensaios de perda de massa, resistência à tração, análise da microestrutura e determinação da variação de pH. Eles observaram que as propriedades iniciais dos mesmos foram conservadas e não houve perda de resistência da borracha.

Deste modo, observa-se que o resíduo de borracha proveniente da recauchutagem de pneus pode ser considerado inerte quimicamente, ou seja, não reage com os componentes das misturas cimentícias; podendo ser utilizado, a princípio, em qualquer aplicação da construção civil. Entretanto, como foi visto, não é o seu caráter químico que restringe sua utilização, mas sim as alterações físicas que ele causa nas misturas à base de cimento ao ser incorporado. Uma alteração que não envolve nenhum tipo de resistência mecânica, mas que limita a utilização das misturas adicionadas de borracha é a trabalhabilidade.

A trabalhabilidade pode ser influenciada tanto pela granulometria do resíduo quanto pelo modo como o ensaio é feito. Khatib e Bayomy (1999) apud Meneghini (2003, p.15) e Albuquerque et al (2002, p.14). mostram, respectivamente, tais influências.

Khatib e Bayomy (1999) apud Meneghini (2003, p.15) avaliaram a trabalhabilidade em argamassas empregando diferentes granulometrias de resíduo de borracha. Eles constataram que os resíduos de menor granulometria resultaram em argamassas menos trabalháveis. Também foi observado que quanto maior a quantidade de borracha adicionada, menor é o abatimento, sendo que para 40% de substituição tem-se um abatimento próximo a zero.

Albuquerque et al. (2002, p.14) avaliaram a influência do tipo de ensaio e do formato dos resíduos de borracha, na trabalhabilidade de concretos. Os autores citam que, quando baseada no abatimento do tronco de cone, esta grandeza diminui com o incremento do resíduo de borracha de pneu, contudo quando mensurada com o teste VeBe, apresenta-se ligeiramente superior ao concreto controle (sem resíduo de borracha). Apenas concretos com certos teores de borracha apresentaram trabalhabilidade superior ao concreto controle no ensaio VeBe.

Na questão do formato do resíduo de borracha de pneu utilizado, Albuquerque et al. (2002, p.15) observaram, em relação ao desenvolvimento das propriedades mecânicas, um melhor desempenho dos resíduos em forma de fibras se comparados aos em forma granular.

A partir de quantidades de adição consideradas pequenas, cerca de 10% de resíduos de borracha de pneu em substituição à areia, de acordo com os autores, podem-se obter, no concreto adicionado de borracha, valores de tenacidade superiores aos encontrados nos concretos convencionais.

Güneyisi, Gesoglu e Özturan (2004, p.2311) verificaram uma representativa redução do abatimento com o aumento da quantidade de resíduos de borracha de pneu implementados em concretos com baixa relação água/aglomerante, adicionados ou não de sílica ativa. Assim pode-se notar que a forte influência dos resíduos de borracha de pneu sobre a trabalhabilidade do concreto está condicionada também à relação água/aglomerante praticada.

Li et al. (2004, p.2284) estudaram o efeito dos resíduos de borracha de pneu na trabalhabilidade de concretos convencionais. Eles avaliaram também a influência do formato nestes concretos, trabalhando com resíduos na forma de fibra e na forma de placa. Os autores observaram apenas alterações mínimas nos valores dos abatimentos. Com relação ao formato do resíduo, Li et al. (2004, p.2287) notaram superioridade das propriedades mecânicas de concretos com resíduo em forma de fibra.

Albano et al. (2005, p.439) caracterizaram, por meio de técnicas destrutivas (propriedades mecânicas) e não destrutivas (teste ultra-sônico), compósitos de concreto com borracha, variando o tamanho das partículas de borracha. Além disso, a borracha foi tratada com NaOH (hidróxido de sódio) e silano A-174, com a finalidade de melhorar a adesão interfacial entre o concreto e a borracha.

Os autores confeccionaram concreto convencional e concreto com borracha com a mesma relação água/cimento, e fizeram a substituição, em volume, de 0%, 5% e 10%, de areia por borracha, sendo que o tamanho das partículas de borracha foi de 0,29mm e 0,59mm. As propriedades analisadas, no estado fresco, foram o slump, a segregação e a densidade e no estado endurecido, a resistência à compressão.

Os resultados mostram que ao adicionar 10% de borracha ao concreto convencional, ocorre uma redução de 88% no slump, devido à diminuição no fluxo da mistura, por causa da presença de uma parcela elevada de agregados finos (partículas de borracha), que têm uma densidade muito baixa, logo, um volume maior. A Figura 13 mostra que não ocorreu segregação dos agregados, nem do cimento e nem da borracha, obtendo, portanto, uma distribuição homogênea.

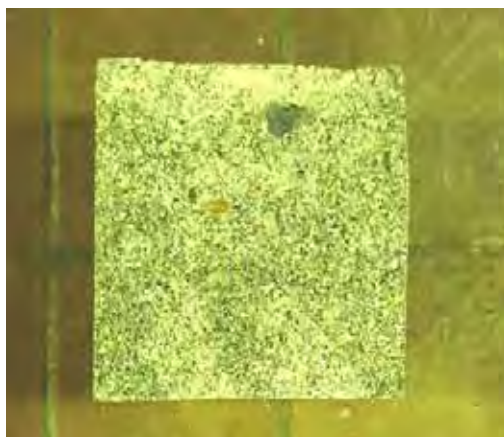


Figura 13: Distribuição dos resíduos de borracha de pneu na mistura de concreto

Fonte: Albano et al. (2005, p.441)

Quanto à densidade, verificou-se que esta diminuiu em 29,0% para a utilização de 10% de borracha de 0,59mm, e em 38,0% para 10% de borracha de 0,29mm. Os autores explicam que isso ocorre devido à maior porosidade do compósito obtido; significando maior quantidade de espaços encheidos com água, para a mesma relação concreto/borracha.

Com relação ao ensaio de resistência à compressão, pode-se dizer que, tanto a borracha tratada quanto a não tratada, apresentaram queda de 60%, para a substituição de 5% e queda de 88% para a substituição de 10%. Entretanto, ao utilizar borracha fina, respectivamente nas mesmas substituições, as quedas foram bem maiores, 71% e 97%, sendo atribuída aos maiores vazios intersticiais, gerados pela borracha fina, preenchidos por água.

O comportamento demonstrado nos testes de velocidade ultra-sônica de pulso com o tempo mostra que a velocidade ultra-sônica é dependente dos tamanhos e da adição das partículas de borracha, bem como do agente de ligação, e que a adição da borracha diminuiu o comprimento da onda por tempo, devido ao volume que a borracha ocupa, e também a absorção de água pelo material.

Albano et al. (2005, p.446) concluem que, quando a quantidade de inserção aumenta e o tamanho das partículas de borracha diminui, o slump e a densidade diminuem, assim como a resistência e as fissuras no estado endurecido. Os tratamentos da borracha não introduziram mudanças significativas nos ensaios realizados.

O fato de serem verificadas, pela maioria dos autores, diminuição da trabalhabilidade e significativa redução na resistência à compressão, faz com que os estudos referentes à utilização de diferentes tipos de fibras industrializadas para o reforço do material concreto fiquem cada vez mais direcionados.

Segundo Wang, Wu e Li (2000, p.314) os estudos estão cada vez mais voltados para as propriedades elásticas oferecidas pela borracha, sendo justificados pelos efetivos aumentos de tenacidade e resistência à retração encontrados. Assim, de maneira geral, a utilização das fibras recicladas, categoria que os resíduos de borracha de pneu se enquadram, além de contribuir com o meio ambiente, podem resultar em algumas vantagens ao material concreto.

Taha, Dieb e Wahab (2003, p.9) realizaram um estudo buscando avaliar a tenacidade dos concretos com resíduo de pneu. Como verificaram incremento na tenacidade, eles afirmam que a adição deveria ser levada em conta como uma prevenção à probabilidade de fissuração, a qual é relativamente alta no concreto.

Devido ao aumento da capacidade de deformação e aos maiores valores de resistência à flexão obtidos, em especial, nas pastas de cimento com resíduos de borracha de pneu, Benazzouk et al. (2003, p.719-720) afirmam que, expandem-se as possibilidades de aplicação deste resíduo, abordando inclusive contribuições à ampliação da segurança das estruturas.

Aspectos referentes à microestrutura e durabilidade dos concretos adicionados de resíduos de borracha também vêm sendo abordados.

Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.226) ao estudarem a microestrutura de concretos com resíduos de borracha de pneu, apresentada na Figura 14, observaram uma zona de transição “pasta de cimento-borracha” fraca quando comparada à zona “pasta de cimento-areia”. Estes autores afirmam ainda que essa microestrutura, em particular, seria um fator adicional para a ocorrência da diminuição da resistência à compressão dos concretos quando adicionados de resíduos de borracha.



Figura 14: Zonas de transição “pasta de cimento-borracha” e “pasta de cimento-areia”

Fonte: Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.226)

Olivares et al. (2002, p.1595) destacam que a adição de fibras de polipropileno e resíduos de borracha de pneu (em forma de fibra) em materiais compósitos, no caso o concreto, pode provocar defeitos na estrutura interna, acarretando reduções na capacidade de resistência. Entretanto, os autores afirmam que, após a resistência última ser extrapolada, os resíduos de borracha colaboram com o concreto, combatendo a propagação das fissuras e assim aumentando a tenacidade do material e o trabalho de fratura. Esta característica pode ser elucidada devido à grande diferença na rigidez dos materiais, uma vez que a matriz de cimento possui módulo de elasticidade no patamar dos 30GPa, valor cerca de 10 vezes superior ao da borracha.

A durabilidade dos compósitos de cimento está diretamente ligada à sua própria capacidade de impermeabilidade frente a líquidos e gases. Benazzouk, Douzane e Quéneudec (2004, p.28) investigaram o transporte de fluídos através de pastas de cimento, no estado endurecido, quando adicionadas de resíduos de borracha industrial, as quais, em comparação com a pasta sem adição desta borracha, apresentaram redução de capilaridade e da difusividade hidráulica; fatores que por sua vez contribuem para a diminuição da absorção.

De acordo com Bonnet (2003, p.59), a implementação de borracha na composição de materiais à base de cimento contribui para o aumento da resistência à micro-fissuração, resultando numa ampliação da durabilidade.

É válido ressaltar que também ocorrem investigações experimentais abordando adições híbridas ao material concreto. Dentre outras composições, Bonnet (2003, p.60) e Li et al. (2004, p.2283) utilizaram concomitantemente aos resíduos de borracha de pneu, fibras de aço e fibras de polipropileno, respectivamente.

Atualmente, diversos estudos têm como foco a utilização dos resíduos de borracha de pneu em pavimentos rígidos de concreto, tendo em vista as propriedades elásticas conferidas ao concreto com borracha. Olivares et al. (2007, p.1918) estudaram o comportamento à fadiga em corpos-de-prova prismáticos, adicionados de 0%, 3,5% e 5%, em volume, de resíduo de borracha.

A partir dos resultados de fadiga obtidos e do estudo analítico realizado, os autores viram a possibilidade do concreto com borracha ser utilizado como composto para pavimento rígido de estradas, em sub-base. Notaram que a adição das fibras de borracha de pneu melhorou suas características de resistência, sobretudo quanto à fragilidade.

Olivares et al. (2007, p.1927) apresentaram como principais conclusões o ótimo índice de laminação das fibras de borracha, a compatibilidade existente entre a ligação cimento/borracha, as boas dissipações da energia dinâmica e a diminuição da rigidez do concreto com borracha.

O resíduo de borracha de pneu pode ser utilizado ainda em forma de cinza. Al-Akhras e Smadi (2003, p.2661) investigaram argamassas com cinza de borracha de pneu e observaram um acréscimo na capacidade de resistência à compressão e à flexão com o aumento da quantidade de cinza na mistura, o que foi atribuído ao efeito “filler” da cinza em questão, sendo notadas também maiores resistências ao congelamento e à penetração de íons de cloreto das argamassas com cinza, em relação àquelas sem adição.

Contudo, Siddique e Naik (2004, p.568) indicam a necessidade de um maior número de pesquisas abordando o uso da cinza de borracha de pneu em concretos e argamassas.

Recentemente, dentro do tema da adição de resíduos de borracha de pneu em materiais cimentícios, iniciando outra linha de pesquisa, diferenciada da já promissora adição destes resíduos a concretos convencionais, Olivares e Barluenga (2004, p.111) estudaram a adição de resíduos de borracha de pneu no comportamento de concretos de alta resistência, utilizando 0%, 3%, 5% e 8%, em volume, de resíduo de borracha.

Segundo Olivares e Barluenga (2004, p.116), a presença do resíduo de borracha de pneu ocasionou reduções nos valores de resistência à compressão, entretanto para o menor teor de adição (3%) obteve-se 80MPa, valor este que caracteriza um concreto de alta resistência.

Analisando suas performances ao fogo, constataram um avanço na capacidade de resistência ao fogo do concreto de alta resistência devido à adição da borracha. A inclusão de baixas frações volumétricas de borracha reduziu o risco de lascamento (*spalling*) do concreto submetido a altas temperaturas. Os autores explicam que isso ocorreu, porque o vapor de água, responsável pela geração de pressão interna na matriz do concreto, consegue sair devido aos canalículos formados com a queima da borracha.

A Figura 15 mostra os concretos, com (3%) e sem (0%) resíduo de borracha, após serem expostos à elevada temperatura.

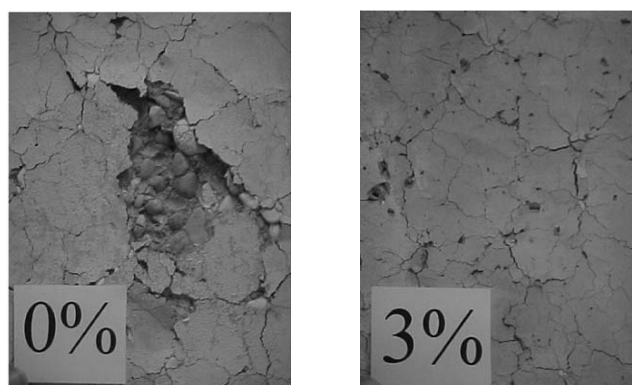


Figura 15: Superfície dos concretos expostos ao fogo

Fonte: Olivares e Barluenga (2004, p.116)

Os autores observaram uma redução na profundidade dos danos causados pela elevada temperatura (500C), sugerindo que isso pode significar uma redução no cobrimento dos elementos estruturais ou um aumento da segurança das estruturas em caso de incêndio. Além disso, os ensaios mostraram que quanto maior a porcentagem de adição de resíduo de borracha, menor será a curvatura de peças de concretos, como mostrado na Figura 16.

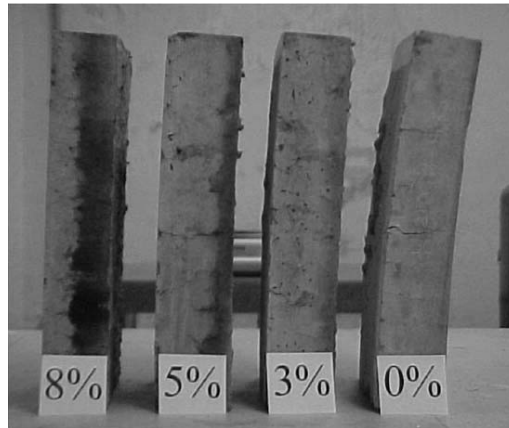


Figura 16: Vista lateral dos corpos-de-prova submetidos ao fogo

Fonte: Olivares e Barluenga (2004, p.116)

De modo geral, pode-se concluir que as composições adicionadas de borracha de pneu são indicadas para uso em elementos que exijam baixa resistência mecânica, menor peso e absorção de água, bom isolamento térmico e acústico além de boa resistência ao impacto.

3 Programa Experimental

3.1 Material

Neste trabalho, são estudados dois tipos de protótipos de lajes treliçadas: um sem adição de resíduo de borracha de pneu, denominado de Laje Sem Resíduo (LSR) e outro constituído de resíduo, denominado de Laje Com Resíduo (LCR). Para a confecção destes protótipos, foram necessários os seguintes materiais:

- Concreto, composto por cimento, areia, brita e água;
- Resíduo de borracha de pneu;
- Lajotas cerâmicas, como material de enchimento;
- Aço, para a composição da armadura de distribuição;
- Armação treliçada, para a composição da armadura positiva.

A areia, a brita e o resíduo de borracha de pneu foram caracterizados no Laboratório de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo (CESP). As características do cimento, da lajota cerâmica, do aço e da armação treliçada foram fornecidas pelos fabricantes.

3.1.1 Cimento

Os cimentos utilizados foram o CPV-ARI Plus Holcim (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) para a confecção das vigotas pré-moldadas e o CP II E 32 Holcim (Cimento Portland Composto) para o capeamento das lajes; ambos com massa específica igual a $3,09\text{g/cm}^3$, conforme informação do fabricante.

A escolha do cimento CPV-ARI Plus baseou-se no fato de que, como as peças pré-moldadas devem ser desmoldadas o mais rápido possível a fim de economizar tempo no processo de execução da laje, torna-se interessante seu uso, pelo fato de apresentar alta resistência nas primeiras idades e possibilitar tal desforma.

Já a escolha do cimento CP II E 32 se justificou à medida que tal cimento é o mais comum na região noroeste do Estado de São Paulo, facilitando sua aquisição; além de ser bastante empregado para este fim.

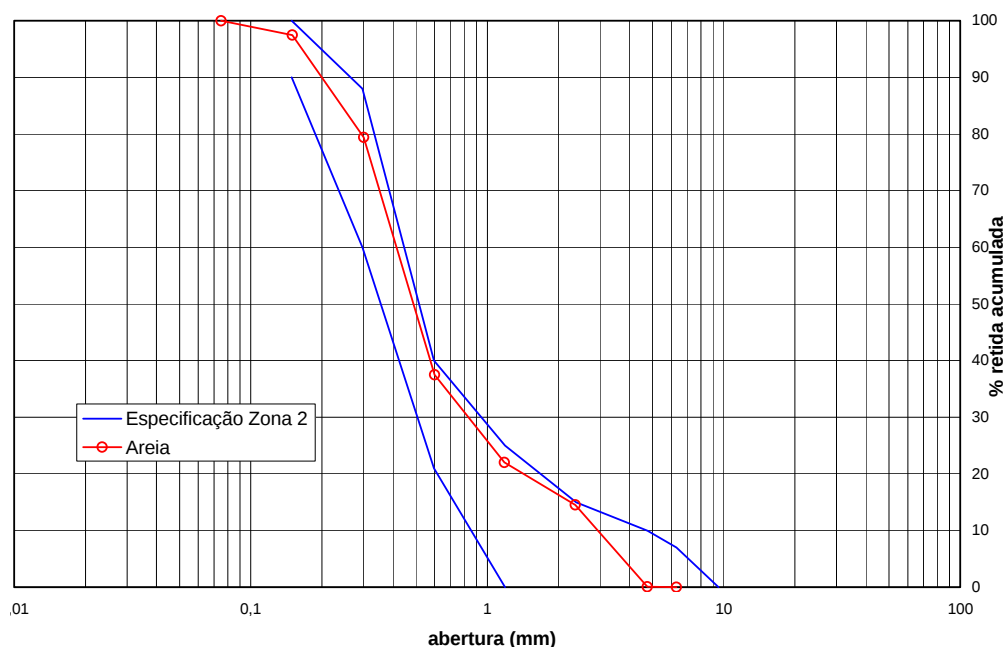
3.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural proveniente do Porto Nossa Senhora Aparecida, Andradina – S.P e o agregado graúdo foi a brita intermediária entre 0 e 1, proveniente da Pedreira Três Fronteiras, Três Fronteiras – S.P.

A caracterização dos agregados baseou-se nos ensaios de granulometria, segundo a NBRNM 248 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), absorção de água, NBRNM 30 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001), massa específica e massa específica aparente, NBRNM 52 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), massa unitária, NBRNM 45 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006) e materiais pulverulentos, NBRNM 46 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), cujos resultados apresentam-se nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Caracterização do agregado miúdo – classificação: areia média

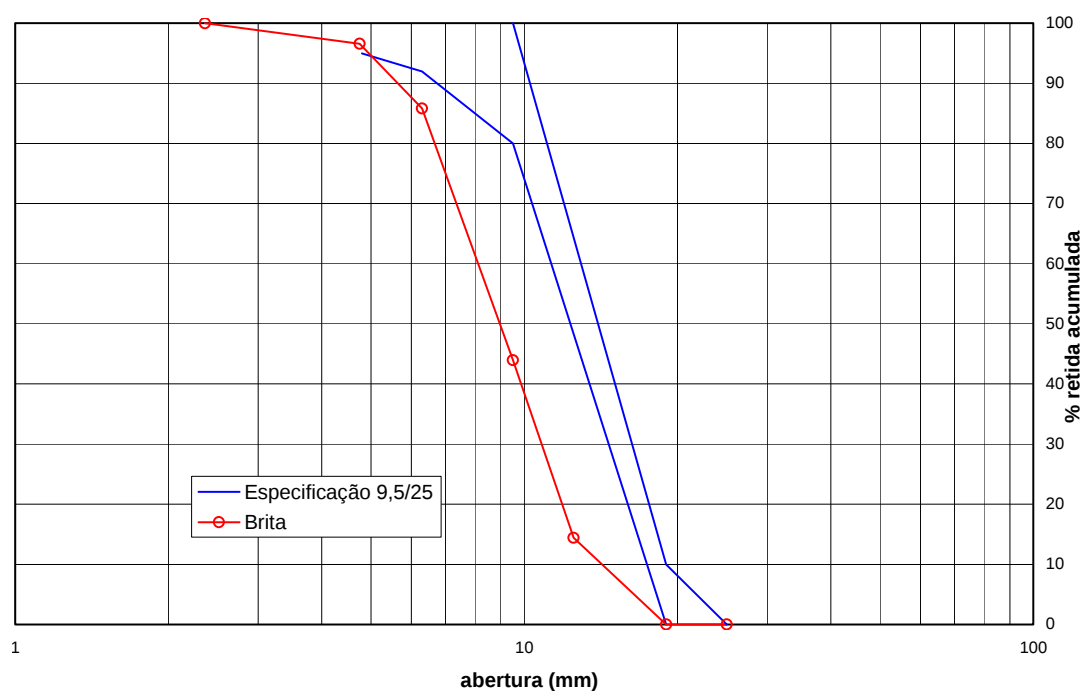
Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP



ϕ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	aparente (g/cm ³)	solta (g/cm ³)	solta 4% umid. (g/cm ³)			
4,75	2,51	2,654	2,667	2,646	1,511	1,146	0,30	0,26	-

Tabela 3: Caracterização do agregado graúdo – classificação: brita intermediária entre 0 e 1

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP



φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária (g/cm³)	absor- ção (%)	pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seco (g/cm³)	aparente (g/cm³)			
19,0	6,41	2,900	2,860	2,980	1,520	1,41	0,21

3.1.3 Água

Utilizou-se, na composição das misturas de concreto, água potável proveniente da rede de distribuição municipal.

3.1.4 Resíduo de Borracha de Pneu

O resíduo de borracha, proveniente da recauchutagem de pneus inservíveis, conforme apresentado na Figura 17, foi cedido pela empresa REGIGANT – Recuperadora de Pneus Gigantes Ltda., localizada na cidade de Ilha Solteira – S.P.

A faixa granulométrica do resíduo utilizado no trabalho foi obtida após seu peneiramento em mesa vibratória, sendo utilizado o material que passa por esta. A Tabela 4 apresenta o jogo de peneiras utilizado, as porcentagens retidas para cada faixa de resíduo e suas respectivas denominações. Nota-se que, da quantidade total de resíduo de borracha fornecida, apenas 1,9% foi descartada.

Tabela 4: 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	1,9	B. Muito Grossa	não foi utilizada
N.º 8	2,38	45,9	Borracha Grossa	-
N.º 16	1,19	27,2	Borracha Média	-
Fundo	0,075	25,0	Borracha Fina	-



Figura 17: Resíduos de borracha de pneu utilizados

3.1.5 Lajota Cerâmica, Aço e Armação Treliçada

As características da lajota cerâmica e do aço são apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente e as características da armação treliçada, na Tabela 7.

Tabela 5: 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 6: Características físicas do aço

Fonte: COMERCIAL GERDAU

Fio	Diâmetro (cm)	Peso (kg/m)	Perímetro (cm)	Área (cm ²)
4,2	0,42	0,109	1,32	0,139

Tabela 7: Características da treliça confeccionada em 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

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização do Material

3.2.1.1 Resíduo de Borracha de Pneu

Para a caracterização desse material foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa específica aparente, cujos resultados são mostrados no item 4.1.1 do Capítulo 4.

- **Granulometria**

Após o recebimento dos resíduos de borracha de pneu, estes foram peneirados e separados de impurezas, como fio de nylon e aço.

O ensaio de granulometria nos resíduos de borracha seguiu o preconizado pela NBRNM 248 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). Devido à diferença de massa específica entre a borracha e o agregado convencional, o ensaio foi feito em uma amostra de 250g do material e não 1kg como diz a norma.

- **Massa específica**

A determinação da massa específica para os resíduos de borracha de pneus foi feita baseada na NBRNM 53 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). Como a densidade da borracha é próxima à da água, optou-se pelo uso do álcool para a realização do ensaio. Procurando evitar problemas com possíveis reações com o álcool, estes foram deixados em contato o menor tempo possível.

- **Massa específica aparente (ou unitária)**

A determinação da massa específica aparente foi realizada segundo a NBRNM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

3.2.1.2 Concreto

Antes da caracterização dos traços de concreto, foi realizado um estudo de dosagem, tanto para o traço sem resíduo quanto para o constituído do mesmo, a fim de obter traços de concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) mínima de 20 MPa, aos 28 dias de idade; exigência feita pela NBR 14859-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, p.5).

Para definir tais traços, foi utilizado um programa em planilha do aplicativo da Microsoft Excel fornecido pela CESP, cuja tela de entrada de dados e resultados é mostrada na Figura 18.

APLICAÇÃO: Dosagem do Traço CSR E 32 **Data:** 8/2/2007
Calculado por: Ana Paula

Relação (l:m)	1:	5,9
Teor de Argamassa Seca		53,9
Volume de Argamassa (%)		63,4

	VOLUME	PESO
AR	15,0	
AGREGADO	676,9	
AGLOMERANTE	114,1	352,7
ÁGUA	194,0	194,0
TOTAL	1000,0	
A/C		
A/C Equivalente	0,550	

CIMENTO	Ciminas CP II E
Silica	-
AGREGADO Graúdo	B 1 - Pedreira Três Fronteiras
AGREGADO Miúdo	Areia Natural - Porto N. Sra. Aparecida
SLUMP (cm)	6,0 a 8,0
AR (%)	
Poli funcional	
Superplastificante	
Incorporador de Ar	

Aditivos							
Retard.	Super.	Incorp.					

% Volume Comb.							
Componentes							
% Vol. Agregado							
Volume por M3							
Massa Específica S.S.S.							
Peso S.S.S. por M3							
Absorção %							
Umidade %							
Água Livre %							
Peso de Água Livre							
Peso por M3							

	B1	Areia	Cim.	Silica	Água
	54,0	46,0	100,0	-	
	365,5	311,4	114,1		194,0
	2,900	2,654	3,09		1,00
	1060	826	352,7		194,0
	1,41	0,38			
	0,98	0,09			
	0,43	0,21			
	4,6	1,7	6,3		4,7
	1055	825	352,7		198,7

Figura 18: Tela do programa utilizada para a dosagem dos traços de concreto

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO

O método do programa, desenvolvido pela própria CESP, baseia-se na porcentagem de areia necessária para envolver todo o agregado graúdo e dar ao concreto boa trabalhabilidade, sem resultar em alto consumo de cimento.

A porcentagem ideal de areia, encontrada experimentalmente após várias tentativas, foi verificada visualmente, logo após o ensaio de abatimento (*slump*), fazendo um bastão de aço penetrar no concreto.

Os dados de entrada foram: massa específica dos materiais constituintes e absorção e umidade da brita e areia. Além disso, foi necessário fixar o abatimento de 7 ± 1 cm, o teor de ar incorporado de 15 l/m^3 e a resistência a compressão mínima do concreto de 20 MPa.

Desta forma, para cada traço, foram feitas três dosagens a partir de três relações água/cimento (a/c), a fim de obter um valor de relação a/c correspondente à resistência desejada, levando-se em conta a adição de 7 MPa como desvio padrão do método.

A Figura 19 mostra a planilha, em Microsoft Excel, utilizada para obtenção dos traços finais de concreto.

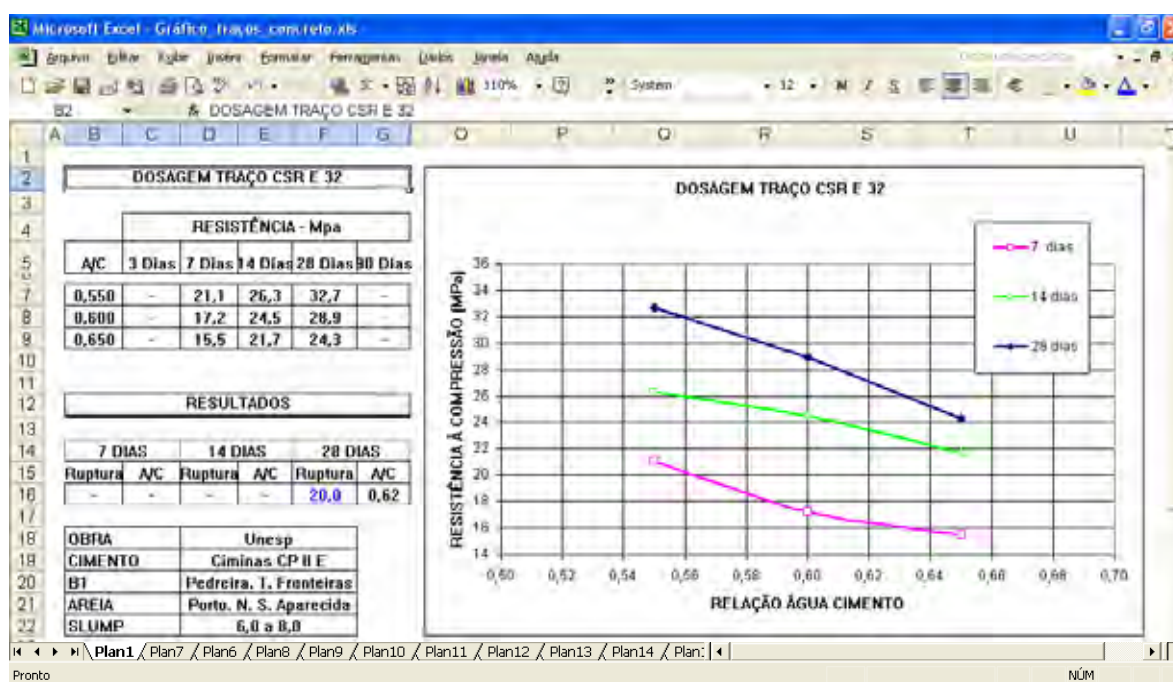


Figura 19: Tela do programa utilizada para obtenção dos traços finais de concreto

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO

Os traços finais de concreto foram atribuídos como:

- CSR – E 32: Traço de concreto sem resíduo de borracha de pneu confeccionado com cimento CP II E 32. Usado na capa das lajes.
- CCR – E 32: Traço de concreto com resíduo de borracha de pneu confeccionado com cimento CP II E 32. Usado na capa das lajes.
- CSR – ARI: Traço de concreto sem resíduo de borracha de pneu confeccionado com cimento CPV-ARI Plus. Usado nas vigotas treliçadas dos protótipos de lajes.

Após a definição desses traços, foram moldados, de acordo com a NBR 5738 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, nas dimensões de 10 x 20 cm, para as idades de 7 e 28 dias. O adensamento e a cura desses CPs obedeceram a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

A caracterização dos traços de concreto foi feita a partir dos ensaios: massa específica e teor de ar incorporado, preconizados pela NBRNM 47 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002), resistência à compressão, segundo a NBR 5739 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007), resistência à tração, segundo a NBR 7222 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994) e módulo de elasticidade, preconizado pela NBR 8522 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003). A Tabela 8 mostra o número de CPs utilizados para cada traço e para cada ensaio.

Tabela 8: Amostragem utilizada no trabalho para cada idade.

Traço \ Ensaio	Resistência à Compressão	Resistência à Tração	Módulo de Elasticidade
CSR – E 32	3	3	3
CCR – E 32	3	3	3
CSR – ARI	3	3	3

A composição final dos traços estudados e os resultados de caracterização dos mesmos são apresentados no item 4.1.2 do Capítulo 4.

3.2.2 Procedimentos para a Confeção dos Modelos de Lajes Treliçadas

Inicialmente, foram definidas as dimensões dos modelos de laje a serem ensaiados. A fim de facilitar e padronizar a produção dos mesmos, confeccionou-se modelos com 100 cm de comprimento, definidos como M-100. Entretanto, após os ensaios, viu-se a necessidade de estudar modelos com menor rigidez, sendo, portanto, confeccionados modelos de 210 cm de comprimento, definidos como M-210.

Os modelos M-100 foram constituídos por uma vigota pré-moldada treliçada de 100 cm de comprimento, lajotas cerâmicas e capa de concreto, como indica a NBR 14859-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002, p.3). Apresentaram seção transversal em “T” de 43 cm de base superior, 13 de base inferior e 12 cm de altura, considerando-se a altura da capa como sendo igual a 6,0 cm.

Já os modelos M-210 foram constituídos por duas vigotas pré-moldadas treliçadas de 210 cm de comprimento, lajotas cerâmicas e capa de concreto, como indica a NBR 14859-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002, p.3). Apresentaram seção transversal em “T” de 86 cm de base superior, 26 cm de base inferior e 9,5 cm de altura, e espessura da capa igual a 3,5 cm. A Figura 20 mostra as seções transversais dos modelos estudados.

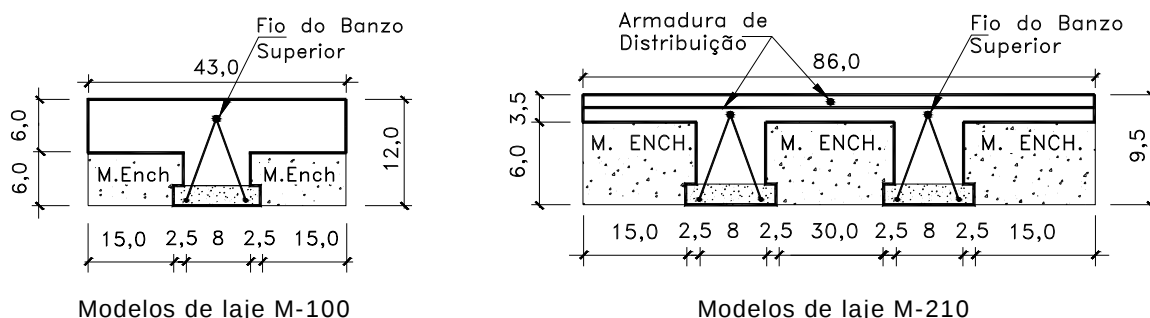


Figura 20: Seção transversal dos modelos estudados – Un.: cm

Os modelos M-100 foram instrumentados com extensômetro elétrico e ensaiados à flexão. Já os modelos M-210 tiveram parte da amostra ensaiada à flexão sem extensômetro elétrico e parte ensaiada com extensômetro elétrico, sendo esta última amostragem designada por M-210E.

3.2.2.1 Modelos de Laje M-100

Os modelos M-100 foram formados por seis protótipos de laje, de dimensões 100 x 43 x 12 cm (comprimento x largura x altura), sendo três sem resíduo de borracha de pneu (L1, L2 e L3) e três constituídos de 12%, em volume, de resíduo (L1-R, L2-R e L3-R). Essa amostragem foi confeccionada no Laboratório de Engenharia Civil da CESP.

Para a confecção desses modelos, primeiramente, foi necessário moldar as vigotas pré-moldadas, já que as vigotas comercializadas na região, na maioria das vezes, não apresentam f_{ck} de no mínimo 20 MPa, aos 28 dias de idade.

Antes da confecção do traço e moldagem das vigotas, foram inseridos espaçadores a cada 30 cm na armação treliçada. Também foi passado óleo desmoldante na superfície da fôrma metálica e adicionados espaçadores de madeira para que cada vigota tivesse comprimento de 100 cm (Figura 21).

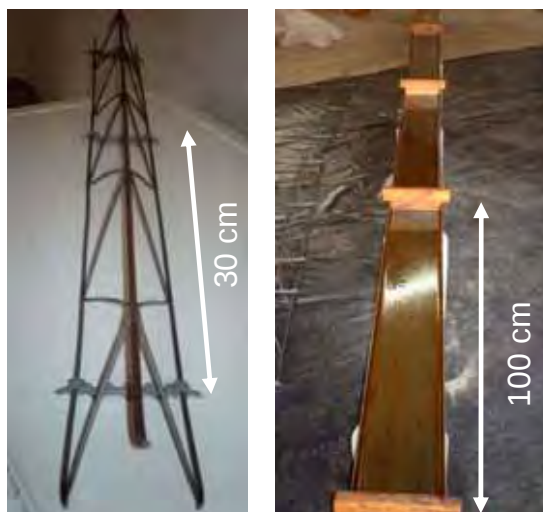


Figura 21: Preparação de treliça e fôrma

As vigotas pré-moldadas treliçadas, confeccionadas com o traço CSR – ARI, foram moldadas em fôrma metálica, conforme mostrado na Figura 22. Primeiramente, foi feito o lançamento de uma camada de concreto de, aproximadamente, 1,5 cm de altura. Em seguida, a treliça foi posicionada sobre esta camada e a operação terminou com o preenchimento da fôrma. O concreto utilizado não necessitou de vibração.



Figura 22: Moldagem das vigotas pré-moldadas treliçadas

Após 24 horas, as vigotas treliçadas foram desmoldadas e submersas em água, durante 7 dias, para a cura (Figura 23). Decorrido esse período, as vigotas foram empregadas na composição dos modelos de lajes.



Figura 23: Processos de desmoldagem e cura das vigotas pré-moldadas treliçadas

Como esses modelos de laje possuem apenas uma vigota treliçada, foi necessário utilizar lajotas cerâmicas cortadas ao meio para formar a seção transversal em “T”. Os modelos de lajes foram montados no chão, sobre uma lona plástica.

A etapa seguinte constou do lançamento dos concretos CSR – E 32 e CCR – E 32 sobre o sistema montado, previamente umedecido, do adensamento feito com vibrador de imersão e da posterior finalização da superfície (Figura 24).

Para a execução dessa etapa foi necessária a confecção de fôrmas de madeira que facilitassem o processo de desforma, sendo usado, então, apenas tábuas laterais e, para que não houvesse abertura destas, foram utilizadas tábuas superiores como travamento lateral e pesos de aço com função, também, de travamento.



Figura 24: Concretagem da capa dos modelos M-100

A confecção dos modelos M-100 foi finalizada com a desmoldagem dos mesmos, após 24 horas e acondicionamento em câmara úmida, conforme mostrado na Figura 25, até a data do ensaio (28 dias após a concretagem da capa de concreto).



Figura 25: Desmoldagem e cura dos modelos M-100

3.2.2.2 Modelos de Laje M-210

Os modelos M-210 foram formados por dois protótipos de laje, sendo um sem resíduo de borracha de pneu (LSR) e um constituído de 12%, em volume, de resíduo (LCR), ambos de dimensões 210 x 86 cm x 9,5 (comprimento x largura x altura). Essa amostragem foi confeccionada no Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE) da UNESP.

Optou-se por confeccionar e ensaiar tais modelos sem os extensômetros, justamente para prever as dificuldades que seriam encontradas e para ter uma estimativa das cargas e dos deslocamentos verticais máximos (flecha) que ocorreriam em tais modelos, de modo a evitar perda de extensômetros elétricos.

O mesmo procedimento, descrito nos modelos M-100, foi aplicado neste caso, entretanto algumas considerações merecem ser mencionadas:

- O processo de cura teve que ser realizado no próprio local de moldagem, durante 7 dias, devido às restrições de dimensão da câmara úmida.
- Houve a necessidade de dispor quatro ganchos nos cantos de cada modelo, antes da concretagem dos mesmos, para posterior transporte até o local de ensaio.
- Seguindo a recomendação da NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003), foi adicionada armadura de distribuição em aço CA-60, composta por 11 ϕ 4,2mm a cada 17,5 cm na direção transversal e 3 ϕ 6,3mm a cada 21,5 cm na direção longitudinal, no concreto da capa de cada modelo.

A disposição dos ganchos e da armadura de distribuição é mostrada na Figura 26.



Figura 26: Posicionamento de ganchos e armadura de distribuição nos modelos M-210

3.2.2.3 Modelos de Laje M-210E

Os modelos M-210E foram formados por quatro protótipos de laje, sendo dois sem resíduo de borracha de pneu (um com extensômetro apenas no concreto, definido por LSR-C e um com extensômetro no concreto e na armadura, definido por LSR-CA) e dois constituídos de 12%, em volume, de resíduo (um com extensômetro apenas no concreto, definido por LCR-C e um com extensômetro no concreto e na armadura, definido por LCR-CA), todos com dimensões idênticas às dos modelos M-210. Essa amostragem foi confeccionada no Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE) da UNESP.

Antes de confeccionar os modelos LSR-CA e LCR-CA foi necessário instrumentar a armação treliçada com extensômetros elétricos, conforme posição indicada na Figura 27, para posterior confecção das vigotas pré-moldadas. As vigotas treliçadas instrumentadas foram confeccionadas seguindo o mesmo procedimento realizado nas vigotas dos modelos M-100.

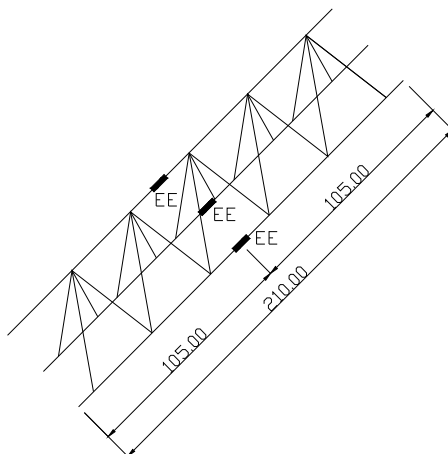


Figura 27: Posicionamento dos extensômetros elétricos na armação treliçada. Un.:cm

Depois de finalizada a instrumentação da armação treliçada, foram feitas a moldagem e cura das vigotas pré-moldadas (Figura 28) e a confecção dos modelos de laje M-210E, (Figura 29), seguindo o mesmo procedimento descrito nos modelos de laje M-210. A cura desses modelos foi feita por 7 dias, com a manutenção da umidade por meio de constante aspersão de água

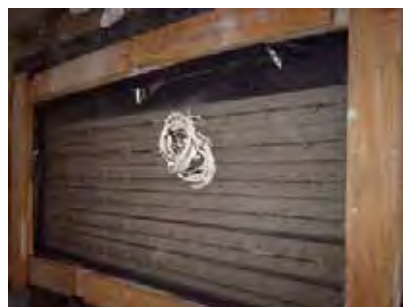


Figura 28: Vigota pré-moldada após 24 horas da moldagem e sua cura



Montagem



Posicionamento dos fios



Umedecimento prévio



Lançamento e adensamento do concreto



Acabamento



Cura durante 7 dias

Figura 29: Etapas referentes à confecção dos modelos M-210E

3.2.3 Procedimentos para o Ensaio dos Modelos de Lajes Treliçadas

3.2.3.1 Modelos de Laje M-100

Para a execução do ensaio destes modelos de lajes, além de ter sido realizado a preparação de suas superfícies, foi também confeccionada uma peça metálica para aplicação da carga no ensaio de flexão.

Essa peça, com peso de 35,45 kg, foi formada por dois cilindros de aço, de 2 cm de diâmetro e 43 cm de comprimento, soldados em uma placa de aço, de dimensões 2 x 35 x 43 cm. Os cilindros foram dispostos na placa a uma distância de 30 cm (Figura 30).

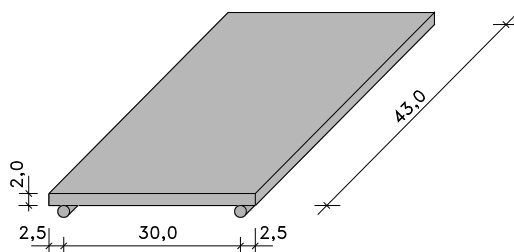


Figura 30: Dimensões da peça utilizada no ensaio de flexão (Un. cm)

A preparação dos modelos M-100 teve início com a retirada dos mesmos da câmara úmida. Após 24 horas, como a superfície já estava seca, foi possível colar dois extensômetros elétricos em cada modelo (um na superfície superior e outro na inferior da nervura). Os extensômetros elétricos usados, da marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda e tipo PA-06-201BA-120L, foram colados seguindo o procedimento:

- Preparo da região onde o extensômetro seria aplicado que consistiu em lixar, aplicar massa corrida para preencher possíveis vazios e lixar novamente.
- Marcação da posição final para o extensômetro, a limpeza com solução neutra e a colagem do extensômetro com adesivo adequado.
- Verificação do funcionamento do extensômetro e soldagem de seus terminais. A verificação foi feita com multímetro digital portátil, marca Politerm – Instrumentos de Medição Ltda., modelo MY 980.

A Figura 31 apresenta algumas dessas etapas.



Figura 31: Aplicação do extensômetro elétrico na superfície inferior dos modelos M-100

Além disso, em cada modelo, foi aplicada uma pintura à base de cal, a fim de facilitar a visualização de fissuras que viessem a surgir durante o ensaio e foi realizada a marcação das posições de apoio e de aplicação de carga.

Logo após, foram fixados dois suportes acrílicos com adesivo epóxi, um em cada extremidade central do vão. Esses suportes funcionaram como apoio para os relógios comparadores, já que o apoio direto na superfície dos modelos colocaria em risco a segurança dos equipamentos. Os relógios comparadores, da marca KYOWA – Eletronic Instruments CO., Ltda., tipo DT-20D Peacock, apresentam precisão de 0,01 x 20 mm.

Em seguida, cada modelo M-100 foi transportado com uma empilhadeira hidráulica manual, marca Paletrans, modelo LM 1016, com capacidade de 1000 kgf, até o local de ensaio e posicionado na prensa hidráulica, marca MARUTO – Maruto Instrument Co., Ltd., com capacidade de 100 tf. A Figura 32 apresenta algumas das etapas citadas anteriormente.



Marcação das posições após pintura



Fixação dos suportes acrílicos



Transporte com empilhadeira



Posicionamento na prensa hidráulica

Figura 32: Etapas realizadas anteriormente ao ensaio

A célula de carga, da marca MSI – Micro Sensores Industrial Ltda., modelo MUF-2-10TD6, com capacidade para 10 tf, e os relógios comparadores foram instalados nas posições mostradas na Figura 33, e conectados ao sistema de aquisição de dados, DAQbook 120 da Iotech, com interface ao programa DASYLab 5.0.

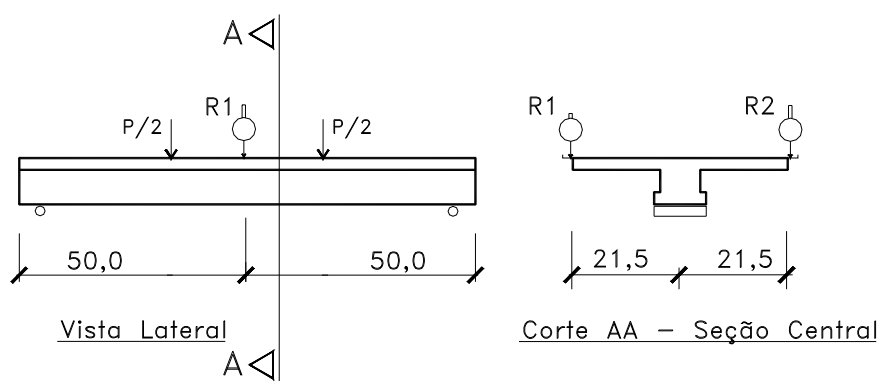


Figura 33: Esquema geral do posicionamento dos relógios comparadores – Un.: cm

O ensaio dos modelos foi realizado aplicando-se cargas concentradas em linha na região central do vão, para que esta região estivesse sob flexão, sem qualquer influência do esforço cortante. Os resultados deste ensaio são mostrados no item 4.2.1 do Capítulo 4. A Figura 34 mostra o esquema estático desses modelos.

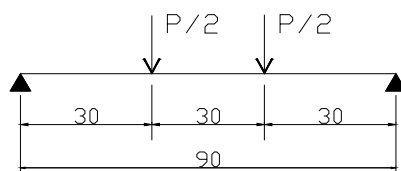


Figura 34: Esquema estático dos modelos M-100 – Un.: cm.

Antes dos modelos serem ensaiados até a ruptura, na velocidade de 5 kgf/s, foram feitos dois ciclos de pré-carga visando acomodação dos mesmos, carregando até 10% da carga de ruptura e descarregando na mesma velocidade.

3.2.3.2 Modelos de Laje M-210

Antes da execução do ensaio destes modelos de laje, foi necessário movimentar os pórticos localizados no NEPAE e montar toda a estrutura necessária para a realização do ensaio de flexão pura. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 35.

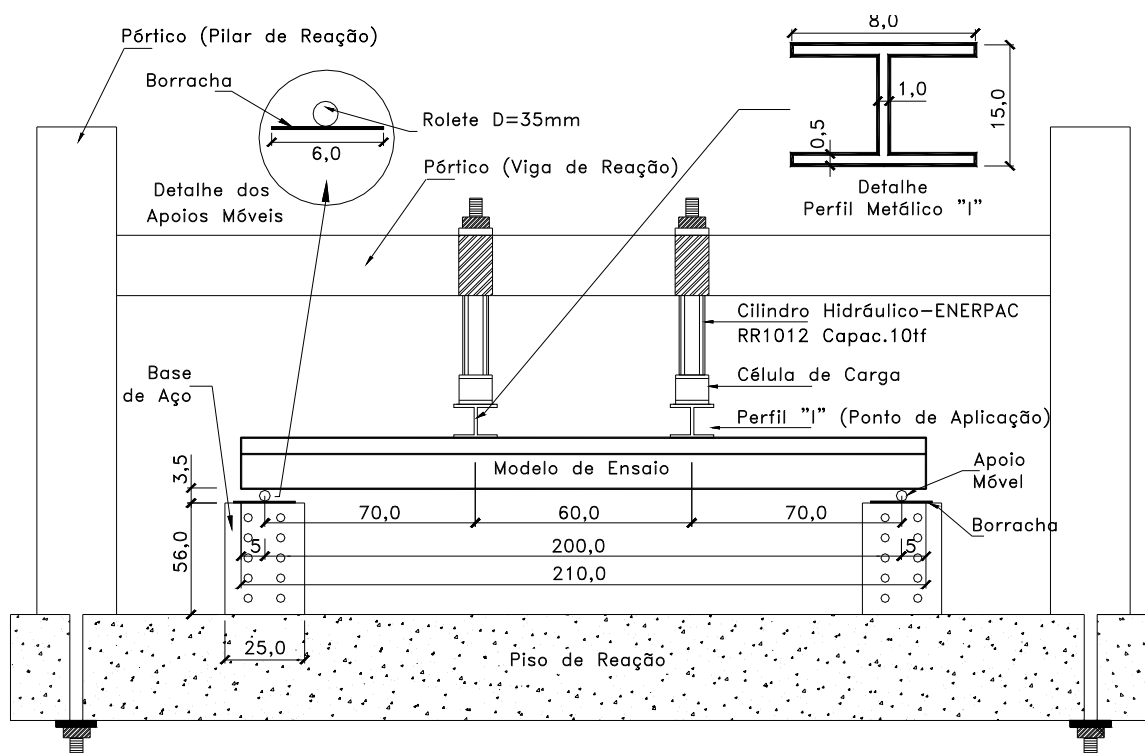


Figura 35: Esquema geral de ensaio – Vista lateral – Un.: cm

As superfícies desses modelos foram preparadas seguindo o mesmo procedimento feito nos modelos M-100, sem a colagem dos extensômetros elétricos.

Devido às dimensões dos modelos M-210, houve a necessidade de transportá-los até o local de ensaio com auxílio de ponte rolante. O transporte foi feito somente no dia anterior ao ensaio, devido ao fato do modelo apresentar, nesta data, resistência suficiente que garantisse o não comprometimento do mesmo. A Figura 36 mostra os relógios comparadores dispostos nas extremidades da região central da laje.



Figura 36: Relógios comparadores dispostos nos modelos M-210

A aplicação da carga e a velocidade de carregamento foram realizadas seguindo o mesmo procedimento utilizado nos modelos M-100. A Figura 37 mostra o esquema estático usado para esses modelos.

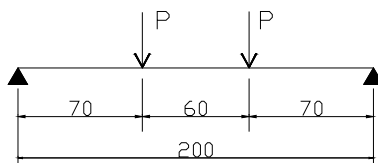


Figura 37: Esquema estático dos modelos M-210 – Un.: cm

Os resultados do ensaio de flexão para os modelos de laje M-210 são apresentados no item 4.2.2 do Capítulo 4.

3.2.3.3 Modelos de Laje M-210E

O ensaio de flexão pura foi realizado utilizando a mesma estrutura usada nos modelos M-210, com o respectivo esquema de ensaio. A confecção dos modelos LSR-CA e LCR-CA, sem e com resíduo de borracha respectivamente, foi feita após a instrumentação da armação treliçada. As etapas da instrumentação dessa armação, mostradas na Figura 38, só iniciaram depois da inserção dos espaçadores na mesma.



Preparo da superfície



Marcação da superfície



Limpeza final



Verificação do funcionamento



Colagem



Solda dos terminais

Figura 38: Aplicação do extensômetro elétrico na superfície da armação treliçada

Depois de finalizada a instrumentação da armação treliçada, os extensômetros elétricos, da marca Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda e tipo PA-06-125BA-120L, foram protegidos com borracha de silicone e identificados.

O procedimento referente ao preparo da superfície e à colagem dos extensômetros elétricos no concreto seguiu conforme descrição feita para os modelos M-100.

A Figura 39 mostra o esquema de posicionamento dos extensômetros elétricos nos modelos de laje com extensômetros apenas no concreto (LSR-C, sem resíduo de borracha e LCR-C, com resíduo) e nos modelos de laje com extensômetros tanto no concreto quanto na armadura (LSR-CA, sem resíduo de borracha e LCR-CA, com resíduo).

Aspectos referentes a transporte dos modelos e posicionamento dos relógios comparadores também seguiram o procedimento adotado nos modelos M-210, conforme mostrado na Figura 40.

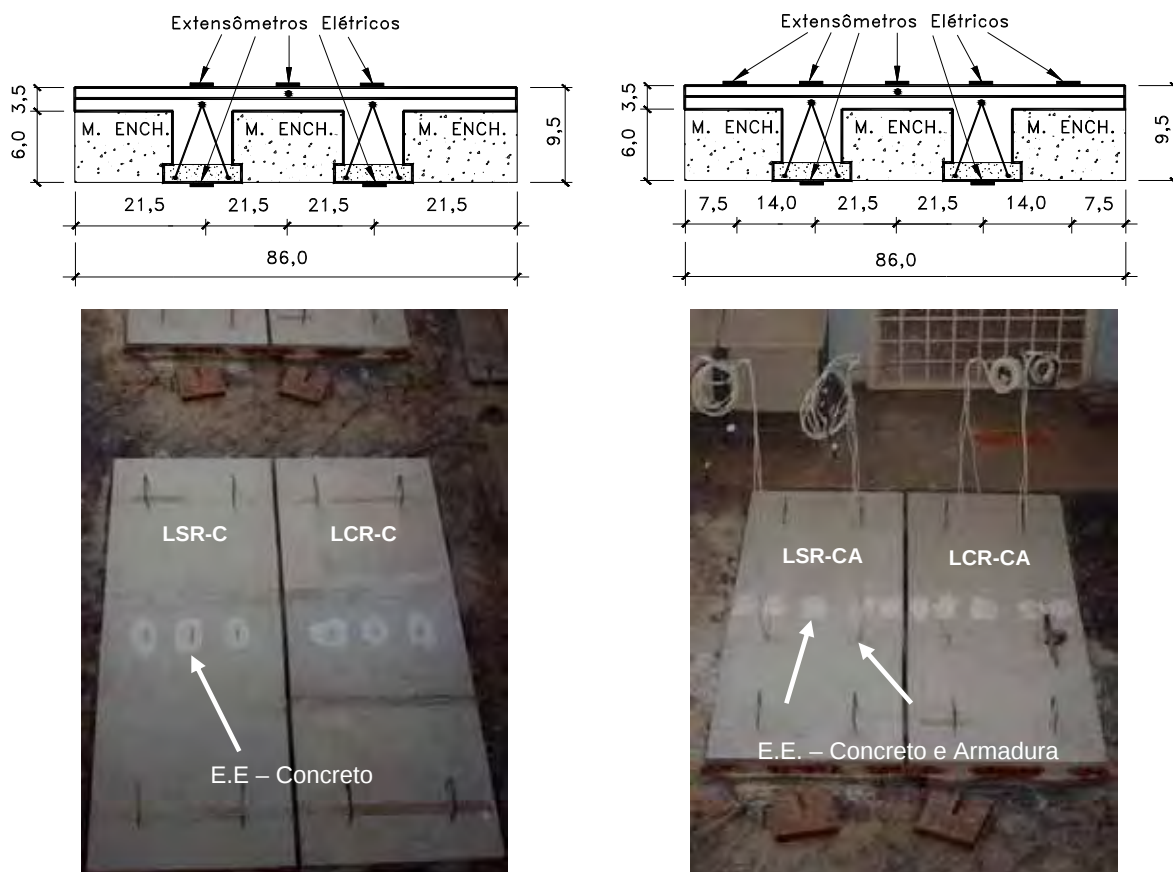


Figura 39: Posicionamento dos extensômetros elétricos nos modelos M-210E. Un.: cm



Figura 40: Transporte dos modelos e posicionamento dos relógios comparadores

Os modelos de laje M-210E foram ensaiados à flexão aos 28 dias de idade, com esquema estático e procedimentos de aplicação de carga e velocidade de carregamento idênticos aos utilizados nos modelos M-210. Os resultados deste ensaio são apresentados no item 4.2.2 do Capítulo 4.

3.2.4 Estimativa da Flecha Imediata em Vigas

Na Figura 41 pode-se visualizar a expressão usada para estimar o deslocamento no meio do vão, utilizando a teoria da Resistência dos Materiais, e o correspondente esquema estático usado nos ensaios.

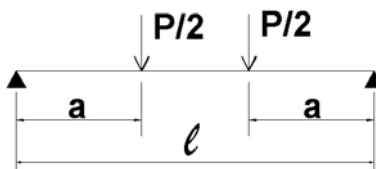
$$v_{\max} = \frac{\left(\frac{P}{2}\right)a(3\ell^2 - 4a^2)}{24EI}$$


Figura 41: Esquema estático dos modelos de menores dimensões – Un.: cm

Nas estruturas de concreto armado, a previsão do deslocamento vertical é mais complexa, pois, além da existência da armadura, que acentua as características de não homogeneidade do material, há a possibilidade, mesmo sob ações de serviço, do aparecimento de fissuras em determinadas regiões da viga, localizadas abaixo da linha neutra, nos elementos bi-apoiados.

A Figura 42 mostra uma viga onde a região central está fissurada, em função dos momentos fletores atuantes, e as regiões próximas ao apoio não estão. Admite-se que as seções não fissuradas trabalhem no estágio I e as seções fissuradas, no estágio II.

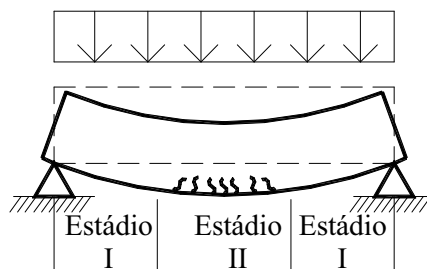


Figura 42: Comportamento estrutural típico de uma viga de concreto armado biapoiada

Considera-se que ocorra a fissuração em uma determinada seção transversal quando o momento fletor que atua nesta seção for maior que o momento de fissuração (M_f). Quando isso acontece, ocorre uma diminuição da inércia dessas seções. O momento de fissuração é dado pela Equação 1:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,inf} \cdot I_c}{y_t} \quad (1)$$

sendo:

α : 1,2 para seções em forma de “T” ou duplo “T” e 1,5 para seções retangulares;

I_c : momento de inércia da seção bruta de concreto;

$f_{ct,inf}$: resistência à tração direta do concreto, dada por: $f_{ct,inf} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$;

y_t : distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

O modelo proposto por Branson (1968), detalhadamente explicado em Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p.179-181) e adotado pela NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, p.112), admite, para todo o elemento de concreto, uma única inércia, que representa os trechos fissurados e não fissurados. Esse modelo baseia-se em um método semi-probabilístico, o qual considera uma variação da tensão ao longo da seção transversal e ao longo do comprimento de uma maneira simplificada, utilizando expressões empíricas que fornecem valores médios da inércia.

Dessa forma, Branson (1968) procura traduzir, aproximadamente, o efeito da fissuração do concreto, quando submetido à flexão, no cálculo das deformações imediatas. Esse procedimento pode ser utilizado para obter o valor da inércia, intermediário ao valor no estágio I e no estágio II.

Os resultados obtidos pela expressão de Branson (1968), mostrada na Equação 2, conduzem a resultados adequados para vigas simplesmente apoiadas e para vigas contínuas.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (2)$$

onde:

I_c : momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} : momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha_e = E_s/E_c$. O valor de α_e pode, também, ser adotado igual a 15, conforme apresentado pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p.116);

M_a : momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação, sendo igual a $P/2.a$;

- M_f : momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;
- E_{cs} : módulo de elasticidade secante do concreto.

Desta forma, torna-se necessária a determinação dos momentos de inércia nos estádios I e II.

No estágio I pode-se considerar que a estrutura se deforma pouco, as tensões normais que surgem nas seções transversais mais solicitadas são pequenas e as tensões são proporcionais às respectivas deformações, valendo, portanto, a lei de Hooke. Em vigas de concreto armado, para que o cálculo da inércia possa ser feito com base na resistência dos materiais, que só trabalha com materiais homogêneos, a área de armadura tracionada deve ser transformada em área de concreto tracionado equivalente (Figura 43).

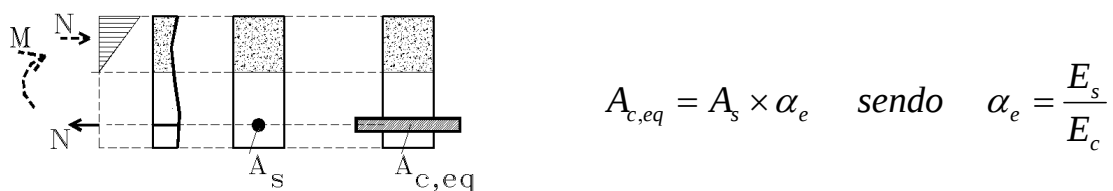


Figura 43: Substituição da área de aço por uma área de concreto equivalente

No entanto, as características geométricas da seção de concreto sem armadura, denominada bruta pela norma de concreto, em diversas situações pouco diferem daquelas em que se considera a armadura (seções homogeneizadas), sendo possível, em alguns casos, calcular apenas as referentes à seção bruta, em vez da homogeneizada (Carvalho e Figueiredo Filho, 2007, p.177). Desta forma, as expressões para uma seção em forma de “T”, mostrada na Figura 44, sem considerar a presença de armadura, estão na Tabela 9:

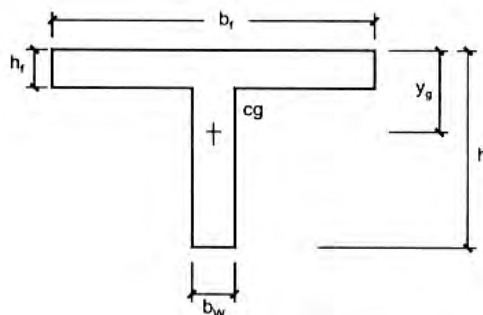


Figura 44: Elementos de seção transversal em “T” sem armadura

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p.175)

Tabela 9: Características geométricas de seção transversal “T” sem armadura, no estágio I

Área (seção geométrica)	$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h$	(3)
Centro de gravidade	$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g}$	(4)
Momento de inércia à flexão	$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2$	(5)

Já no estágio II, são adotadas as seguintes hipóteses:

- a) existem pequenas fissuras nas proximidades da borda inferior da viga;
- b) despreza-se a colaboração do concreto tracionado (“concreto não resiste à tração”);
- c) a armadura absorve as tensões de tração em função da existência da aderência entre os materiais, ou seja, a deformação na armadura tracionada é a mesma que a do concreto tracionado que a envolve ($\varepsilon_s = \varepsilon_c$);
- d) seções planas permanecem planas, ou seja, as deformações são proporcionais à distância da linha neutra;
- e) vale a lei de Hooke para o concreto comprimido e para a armadura tracionada.

No caso das lajes treliçadas, existem duas hipóteses relacionadas ao comportamento estrutural da seção transversal. Na primeira hipótese, supondo-se que a linha neutra corte a mesa ($x \leq h_f$), conforme mostrado na Figura 45, a seção terá um comportamento de seção retangular e o formulário a ser adotado para a determinação da posição da Linha Neutra e do momento de Inércia no estágio II é dado a seguir.

$$\begin{cases} m_s = 0 \longrightarrow \alpha_e \left[\sum A_{si} \cdot (d_i - x) \right] - b_f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 & (6) \\ I_{II} = b_f \cdot \frac{x^3}{12} + b_f \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2} \right)^2 + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2 & (7) \end{cases}$$

$$\text{com } \alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (8)$$

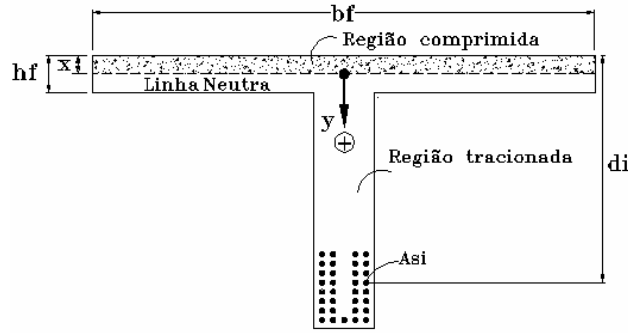


Figura 45: Seção T com comportamento de seção retangular

Já na segunda hipótese, considera-se que a linha neutra corte a alma ($x > h_f$), conforme mostrado na Figura 46, e que a seção terá um comportamento de seção T verdadeira, sendo necessário adotar as expressões:

$$\begin{cases} m_s = 0 \longrightarrow \alpha_e [\sum A_{si} \cdot (d_i - x)] - b_w \cdot x \cdot \frac{x}{2} - (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(x - \frac{h_f}{2}\right) = 0 & (9) \\ I_{II} = b_w \cdot \frac{x^3}{12} + b_w \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^2 + (b_f - b_w) \cdot \frac{h_f^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(x - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2 & (10) \end{cases}$$

com $\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$

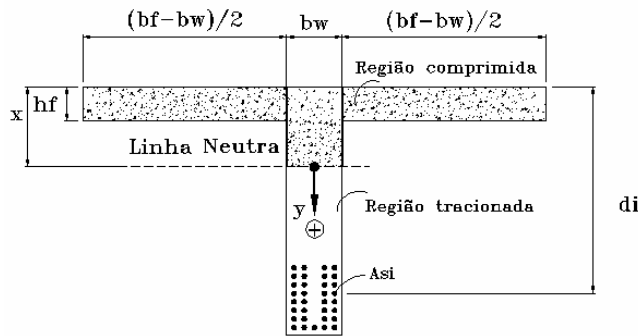


Figura 46: Seção T com comportamento de seção T verdadeira

4 Apresentação e Análise dos Resultados

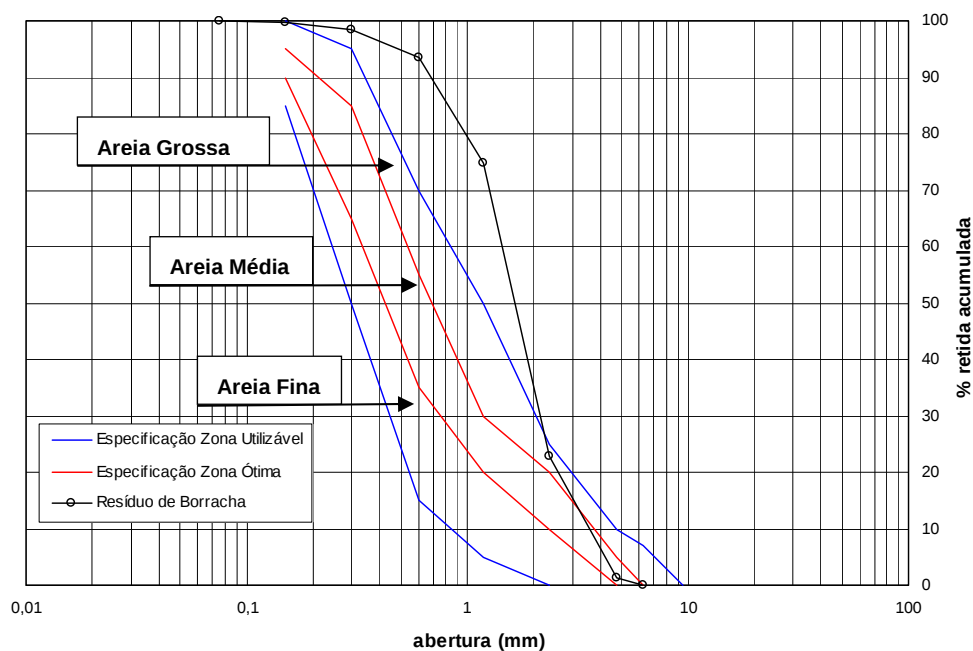
4.1 Resultados do Ensaio de Caracterização do Material

4.1.1 Resíduo de Borracha de Pneu

A Tabela 10 mostra os resultados de caracterização do resíduo de borracha de pneu. Comparando à distribuição granulométrica da areia, pode-se notar que aproximadamente 15% do resíduo apresenta granulometria de uma areia média, outros 15% apresenta granulometria de uma areia grossa e o restante apresenta granulometria superior à de uma areia grossa.

Tabela 10: Caracterização do resíduo de borracha de pneu

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP



ϕ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm ³)	absoluta (g/cm ³)	aparente (g/cm ³)	solta (g/cm ³)	4% de umidade (g/cm ³)			
4,75	3,91	-	1,090	0,348	-	-	-	-	-

4.1.2 Concreto

A partir do estudo de dosagem, baseado no método da porcentagem de areia, foi possível confeccionar dois traços de concreto sem resíduo de borracha de pneu, um com cimento CP II E 32, CSR – E 32, e outro com cimento CP V ARI Plus, CSR – ARI, e mais um traço de concreto com resíduo de borracha, utilizando o cimento CP II E 32, denominado CCR – E 32.

A composição final desses traços de concreto é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Composição final dos traços de concreto

Traço	Teor de Argamassa (%)	Consumo de Material em Kg/m ³					Relação a/c	Slump (cm)
		Cimento	Brita	Areia	Borracha	Água		
CSR – E 32 1:6,6	53,6	319,14	1060,00	844,51	–	198,00	0,62	7,8
CCR – E 32 1:5,4	54,8	377,12	1030,88	734,44	33,52	200,00	0,53	7,9
CSR – ARI 1:6,8	53,6	310,59	1054,92	845,89	–	202,00	0,65	7,7

Após terem sido definidos os traços de concreto, foram moldados corpos-de-prova e realizados ensaios de massa específica, teor de ar incorporado, resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Os ensaios de massa específica e teor de ar incorporado foram feitos imediatamente após a preparação dos concretos, já os de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade foram realizados nas idades de 7 e 28 dias.

Ao observar a composição dos traços de concreto estudados, na Tabela 11, fica evidente que a inserção do resíduo de borracha de pneu no concreto acarreta em um maior consumo de cimento, que é de 15,4% para o cimento CP II E 32.

Como observado na literatura, a inserção do resíduo de borracha de pneu no concreto ocasiona perda de sua resistência em relação ao concreto sem adição. Considerando-se traços de concreto com a mesma resistência à compressão, a perda desta propriedade, quando o resíduo é adicionado, é compensada com o aumento no consumo de cimento.

Turatsinze, Bonnet e Granju (2004, p.6) que pesquisaram o uso de borracha de pneu em concreto em substituições de 20%, em volume, da areia por borracha de pneu, constataram que após a substituição, a resistência inicial foi reduzida em 50%.

A queda na resistência à compressão, observada por todos os autores é, em muitos casos, atribuída à baixa aderência entre a borracha e a matriz. Entretanto, Albuquerque et al. (2004, p.416), que também observou queda na resistência à compressão após adição da borracha de pneu em argamassa, concluíram que nada pode ser afirmado em relação à aderência entre a argamassa e a borracha, visto que a substituição de parte do agregado pela borracha aumenta a quantidade de ar incorporado.

As Tabelas 12, 13 e 14 mostram os resultados dos traços de concreto utilizados nos modelos M-100, M-210 e M-210E, respectivamente.

Tabela 12: Ensaios dos traços de concreto utilizados nos modelos M-100

Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias		
CSR – E 32	15,33	19,45	2,23	3,13	32,73	29,02	2371,04	4,4
	14,42	22,22	2,42	3,11	38,86	27,70		
	14,61	21,03	2,01	3,12	47,42	27,82		
	14,79	20,90	2,22	3,12	39,67	28,18		
CCR – E 32	14,13	19,97	2,32	2,67	19,95	31,19	2293,18	6,9
	13,84	21,54	2,34	3,38	18,23	28,44		
	15,45	20,11	2,43	2,74	18,94	30,01		
	14,47	20,54	2,37	2,93	19,04	29,88		
CSR – ARI	24,28	28,37	3,34	3,82	33,66	29,38	2398,96	3,8
	26,71	27,65	3,41	3,23	36,57	32,59		
	26,43	28,82	3,39	3,45	35,18	34,54		
	25,81	28,28	3,38	3,50	35,14	32,17		

Tabela 13: Ensaios dos traços de concreto utilizados nos modelos de M-210

Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias		
CSR – E 32	15,01	21,92	2,26	3,09	20,05	24,30	2389,31	3,9
	16,25	22,46	2,38	3,21	26,23	31,47		
	15,49	20,67	2,23	3,06	20,83	23,34		
	15,58	21,68	2,29	3,12	22,37	26,37		
CCR – E 32	16,04	20,59	2,07	3,06	19,93	23,03	2302,86	6,3
	16,36	23,24	2,75	2,73	18,66	18,25		
	16,28	22,21	1,63	3,24	21,29	23,25		
	16,23	22,01	2,15	3,01	19,96	21,51		
CSR – ARI	27,06	35,77	3,76	4,20	34,39	35,22	2419,54	3,5
	31,49	38,26	3,74	3,76	32,42	31,21		
	28,31	35,80	3,72	4,16	31,98	32,81		
	28,95	36,61	3,74	4,04	32,93	33,08		

Tabela 14: Ensaios dos traços de concreto utilizados nos modelos de M-210E

Ensaio Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Massa Específica (kg/m ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias	7 Dias	28 Dias		
CSR – E 32	17,31	27,99	2,21	3,20	26,28	29,39	2382,74	4,1
	18,82	26,71	2,74	3,66	26,83	32,48		
	18,87	28,02	2,51	3,46	26,60	30,98		
	Média	18,33	27,57	2,47	3,44	26,57		
CCR – E 32	16,02	20,89	2,46	3,00	23,84	29,91	2299,48	6,5
	16,81	23,91	2,63	3,30	21,81	25,66		
	16,29	22,82	2,52	3,11	22,87	27,73		
	Média	16,37	22,54	2,54	3,14	22,84		
CSR – ARI	26,94	35,12	3,79	3,76	30,35	28,96	2411,03	3,4
	25,23	34,56	3,43	3,79	27,63	33,97		
	31,15	35,08	3,65	3,78	29,09	31,48		
	Média	27,77	34,92	3,62	3,78	29,02		

Assim como na literatura, os traços de concreto, com resíduo de borracha, apresentaram aumento nos valores de teor de ar incorporado se comparado aos traços sem resíduo; aspecto observado nas Tabelas 12, 13 e 14. O aumento desta propriedade, para os traços com CP II E 32, usados, respectivamente, nos modelos M-100, M-210 e M-210E, foi de 56,8%, 61,5% e 58,5%.

Benazouk et al. (2006, p.653), estudando concretos convencionais (CRC) e celulares (ACRC), variando de 0% a 50%, em volume, a quantidade de borracha de pneu substituída no agregado miúdo, notaram um aumento de 60% no teor de ar incorporado para o traço CRC e um aumento de 25,2% para o traço ACRC, quando 10% do resíduo foi adicionado. Os autores concluíram que este aumento pode ser devido à potencialidade da partícula de borracha aprisionar o ar em sua superfície áspera, devido à sua natureza não-polar.

A adição do resíduo proporciona também queda no módulo de elasticidade do concreto. Ao analisar o traço com cimento CP II E 32, aos 28 dias de idade, utilizado nos modelos M-210 e M-210E, nota-se que os valores de módulo de elasticidade tiveram queda de 18,4% e 10,3% quando o resíduo foi adicionado; queda esta não ocorrida com o mesmo traço utilizado nos modelos M-100.

Quanto à massa específica, podem-se observar quedas de 3,3%, 3,6% e 3,5% nos traços de concreto com cimento CP II E 32, usados respectivamente nos modelos M-100, M-210 e M-210E, quando o resíduo de borracha foi adicionado, conforme mostrado nas Tabelas 12, 13 e 14.

4.2 Resultados do Ensaio da Laje Treliçada

O ensaio de resistência à flexão forneceu resultados de carga, deslocamento vertical e deformação do concreto para os modelos de laje M-100, resultados de carga e deslocamento vertical para os modelos de laje M-210 e resultados de carga, deslocamento vertical e deformação do concreto e da armadura para os modelos de laje M-210E.

Os resultados de deslocamento vertical, obtidos experimentalmente, foram comparados com os resultados obtidos teoricamente a partir da formulação proposta por Branson (1968) citado por Carvalho e Figueiredo Filho (2007, p.179-181). Essa comparação foi feita a fim de avaliar se o comportamento estrutural das lajes treliçadas pode ser modelado a partir de tal formulação.

4.2.1 Modelos de Laje M-100

Para o esquema estático usado nos ensaios, a previsão da flecha imediata ou instantânea no meio do vão, ($v_{\max}$), foi feita a partir da equação da resistência dos materiais, Equação 11, válida para seções constantes ao longo da peça:

$$v_{\max} = \frac{\left(\frac{P}{2}\right)a(3\ell^2 - 4a^2)}{24(E \cdot I)_{eq}} \quad (11)$$

Para a determinação da rigidez equivalente, $(E \cdot I)_{eq}$, foi utilizada a formulação apresentada no item 3.2.4 do Capítulo 3.

Para exemplificar a aplicação da formulação e a obtenção das flechas teóricas, será considerado um caso genérico com aplicação de carga no valor de 10 kN para o modelo M-100, que apresenta l igual a 90 cm e a igual a 30 cm. O raciocínio mostrado neste exemplo foi desenvolvido para a obtenção das flechas teóricas de todos os modelos estudados.

Exemplo para $\alpha_e = E_s/E_c$:

- Cálculo da área da seção geométrica:

$$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h \quad \rightarrow \quad A_g = (43 - 13) \cdot 6 + 13 \cdot 12 \quad \rightarrow \quad A_g = 336 \text{ cm}^2$$

- Cálculo do centro de gravidade:

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g} \quad \rightarrow \quad y_{cg} = \frac{(43 - 13) \cdot \left(\frac{6^2}{2}\right) + 13 \cdot \frac{12^2}{2}}{336} \quad \rightarrow \quad y_{cg} = 4,39 \text{ cm}$$

- Cálculo do momento de inércia à flexão, no estágio I:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad \rightarrow$$

$$I_g = \frac{(43 - 13) \cdot 6^3}{12} + \frac{13 \cdot 12^3}{12} + (43 - 13) \cdot 6 \cdot \left(4,39 - \frac{6}{2}\right)^2 + 13 \cdot 12 \cdot \left(4,39 - \frac{12}{2}\right)^2 \quad \rightarrow \quad I_g = 3164,14 \text{ cm}^4$$

- Cálculo do momento de inércia à flexão, no estágio II:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad \rightarrow \quad \alpha_e = \frac{E_s}{5600 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{f_{ck}}} \quad \rightarrow \quad \alpha_e = \frac{210000}{5600 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{20,9}} \quad \rightarrow \quad \alpha_e = 9,65$$

obs.: f_{ck} é a resistência à compressão do concreto da capa.

$$\alpha_e \left[\sum A_{si} \cdot (d_i - x) \right] - b f \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad \rightarrow$$

$$9,65 \left[0,28 \cdot (10,8 - x) + 0,31 \cdot (2,8 - x) \right] - 43 \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0 \quad \rightarrow \quad x = 1,19 \text{ cm}$$

Neste caso, a linha neutra corta a mesa $\rightarrow x = 1,19 \text{ cm} < h_f = 6 \text{ cm}$

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

$$I_{II} = 43 \cdot \frac{1,19^3}{12} + 43 \cdot 1,19 \cdot \left(\frac{1,19}{2}\right)^2 + 9,65 \left[0,28(10,8 - 1,19)^2 + 0,31(2,8 - 1,19)^2 \right] \rightarrow$$

$$I_{II} = 277,44 \text{ cm}^4$$

- Cálculo do momento de fissuração:

$$f_{ct,inf} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \rightarrow f_{ct,inf} = 0,30 \cdot 28,2^{2/3} \rightarrow f_{ct,inf} = 2,78 \text{ MPa}$$

obs.: f_{ck} é a resistência à compressão do concreto da sapata.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,inf} \cdot I_c}{y_t} \rightarrow M_r = \frac{1,2 \cdot (2,78/10) \cdot 3164,14}{12 - 4,39} \rightarrow M_r = 138,71 \text{ kN.cm}$$

- Cálculo do momento atuante:

$$M_a = P/2 \cdot a \rightarrow M_a = 10/2 \cdot 30 \rightarrow M_a = 150,0 \text{ kN.cm}$$

- Cálculo da rigidez equivalente:

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

$$(EI)_{eq} = \frac{5600 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{20,9}}{10} \cdot \left\{ \left(\frac{138,71}{150} \right)^3 3164,14 + \left[1 - \left(\frac{138,71}{150} \right)^3 \right] 277,44 \right\} \leq \frac{5600 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{20,9}}{10} \cdot 3164,14 \rightarrow$$

$$(EI)_{eq} = 21,76 \text{ GPa} \cdot 2559,98 \text{ cm}^4 \leq 21,76 \text{ GPa} \cdot 3164,14 \text{ cm}^4$$

$$(EI)_{eq} = 55705,24 \text{ GPa.cm}^4 \leq 68855,04 \text{ GPa.cm}^4 \rightarrow \text{Ok!}$$

Portanto:

$$(EI)_{eq} = 55705,24 GPa.cm^4$$

- Cálculo da flecha teórica:

$$v_{\max} = \frac{\left(\frac{P}{2}\right) a (3 \ell^2 - 4 a^2)}{24 (E \cdot I)_{eq}} \rightarrow v_{\max} = \frac{\left(\frac{10}{2}\right) 30 (3 \cdot 90^2 - 4 \cdot 30^2)}{24 (55705,24 \cdot 100)} \rightarrow v_{\max} = 0,023 cm$$

Os resultados de carga, deslocamento vertical e deformação do concreto, obtidos diretamente do ensaio de resistência à flexão foram capturados e armazenados pelo programa de aquisição de dados durante a execução do ensaio. Pelo fato do deslocamento vertical ter sido lido diretamente do ensaio e na região central do vão, optou-se por denominá-lo, neste trabalho, como flecha experimental.

De posse das flechas experimentais e teóricas dos modelos de laje M-100 foi possível comparar tais resultados. As Figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52 mostram as relações flecha/vão em função da variação do momento fletor para os modelos M-100, sem resíduo de borracha, L1, L2 e L3 e com resíduo, L1-R, L2-R e L3-R, respectivamente.

Para cada modelo são apresentadas três diferentes relações flecha/vão, sendo uma experimental, obtida com a média entre os valores de deslocamentos, medidos no vão central, a partir de dois relógios comparadores, e duas relações flecha/vão teóricas, obtidas a partir da Inércia Média de Branson para $\alpha_e = 15$ e $\alpha_e = E_s/E_c$.

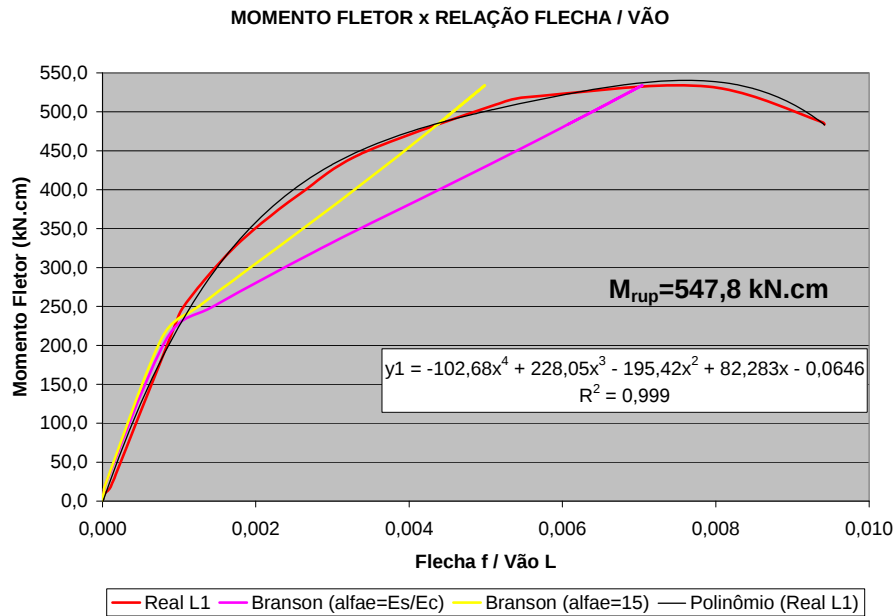


Figura 47: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L1 na flexão

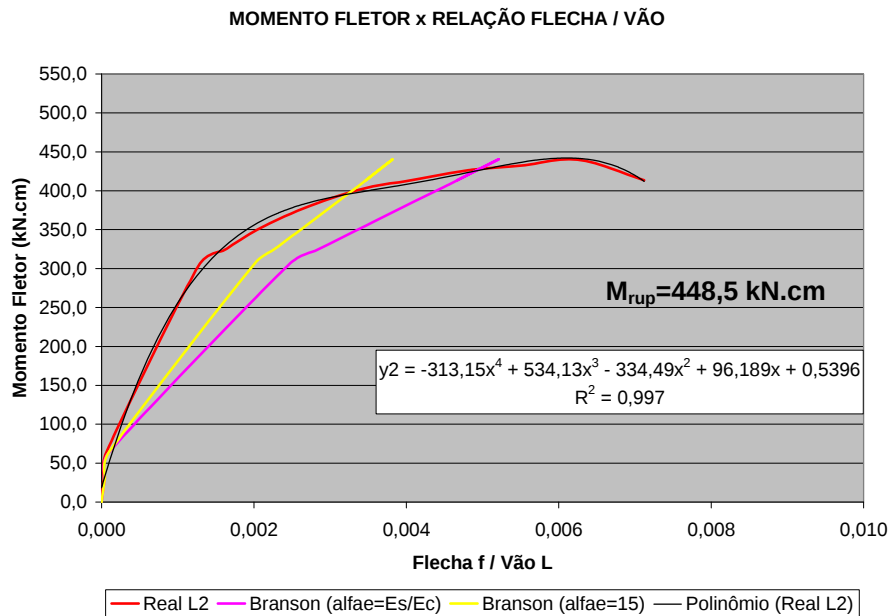


Figura 48: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L2 na flexão

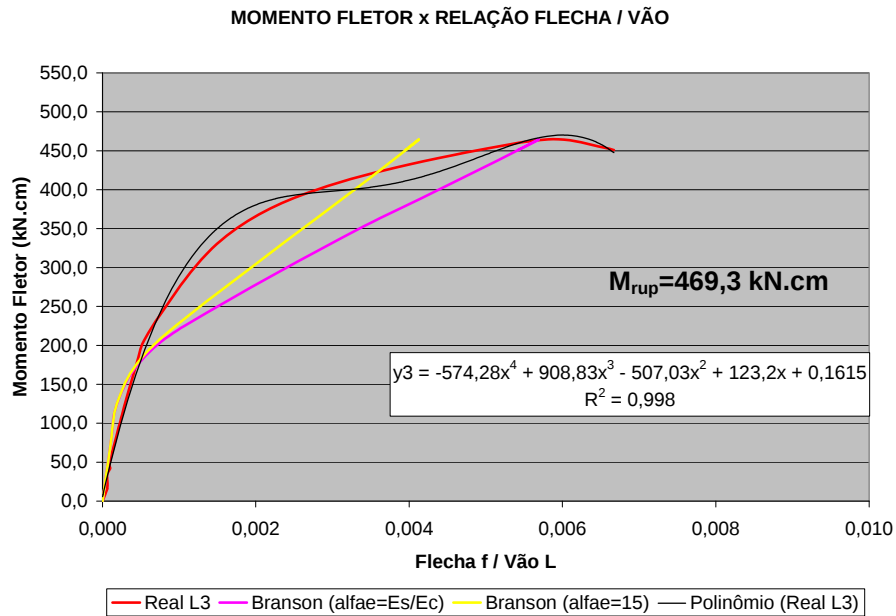


Figura 49: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelos L3 na flexão

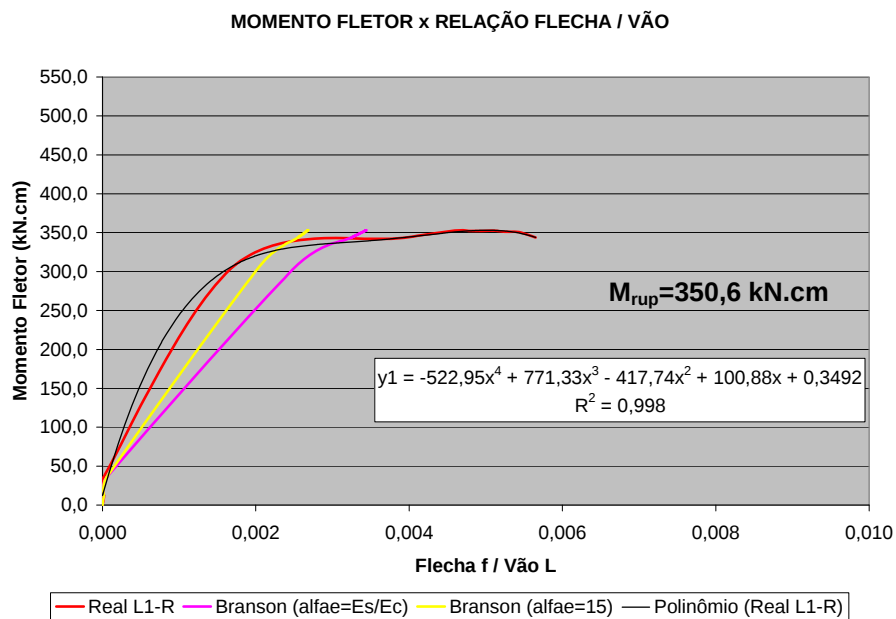


Figura 50: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L1-R na flexão

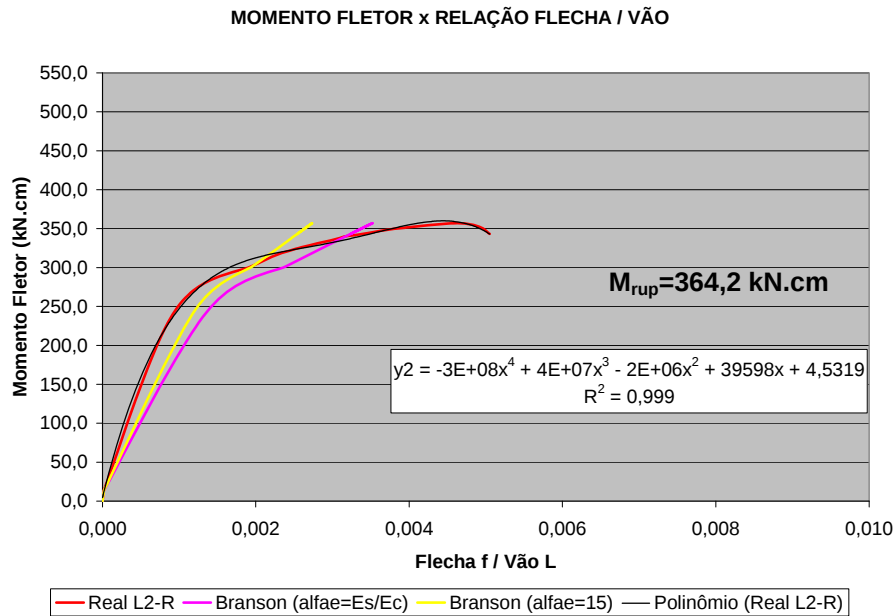


Figura 51: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L2-R na flexão

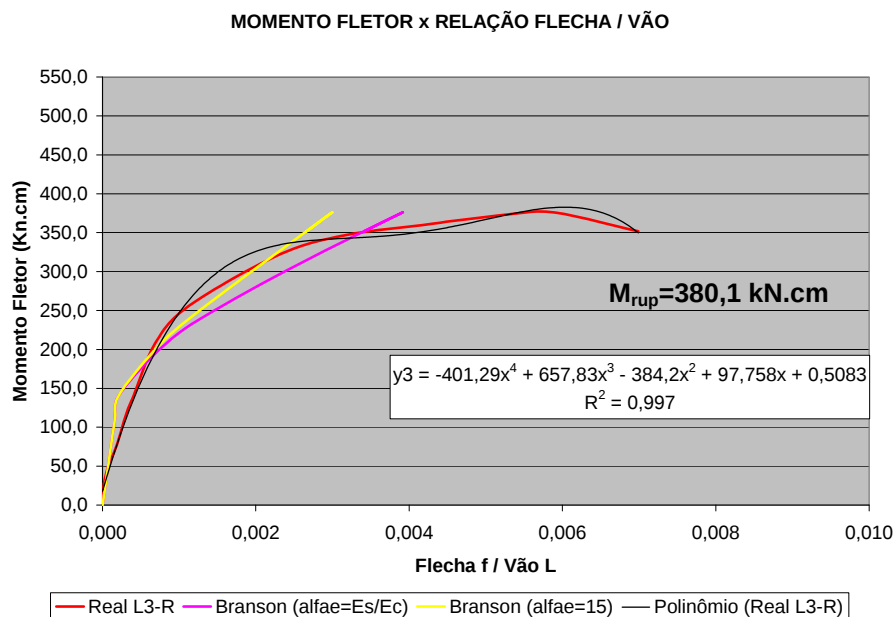


Figura 52: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo L3-R na flexão

Observando as Figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52, percebe-se que tanto as curvas reais dos modelos sem resíduo de borracha quanto às curvas reais dos modelos constituídos do resíduo apresentam, dentro dos respectivos grupos, valores de momentos fletores e de relações flecha/vão bem próximos. Isto indica que nada no ensaio parece ter interferido nos resultados obtidos e que a confiabilidade do ensaio com relação à amostragem está garantida.

Apesar de ter havido queda nos valores de momento fletor após a inserção do resíduo, é interessante notar que as curvas reais dos modelos sem resíduo e as dos modelos com resíduo têm uma tendência de comportamento bem semelhante; desta forma, a inserção do resíduo não modifica a tendência de comportamento.

Observa-se também que, os modelos com resíduo de borracha de pneu apresentam valores de flecha superiores aos encontrados nos modelos sem resíduo, para uma mesma carga. Isso indica que os modelos com borracha possuem menor rigidez; fato este, atribuído ao baixo módulo de elasticidade conferido ao concreto com borracha.

Comparando a curva real com as curvas teóricas, presentes nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52, pode-se dizer que as curvas dos modelos sem resíduo de borracha são praticamente as mesmas apenas no início do ensaio e, com o incremento de momento, o valor da flecha experimental é inferior aos valores calculados com a Inércia Média de Branson, tanto para $\alpha_e = E_s/E_c$ quanto para $\alpha_e = 15$. Seguindo o mesmo raciocínio, pode-se afirmar que os modelos contendo resíduo de borracha têm flechas experimentais bem semelhantes às teóricas.

Nos modelos ensaiados, com e sem resíduo, percebe-se que quanto maior o momento aplicado maior é a diferença entre as flechas teóricas de Branson. A equação que considera $\alpha_e = 15$, no cálculo da flecha teórica, tem maior proximidade dos resultados reais dos modelos estudados, como pode ser visto nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52.

Entretanto, ao analisar o estado limite de utilização³, percebe-se que para o deslocamento limite de $L/250$, correspondente à aceitabilidade sensorial, na limitação visual, o valor da razão flecha/vão (f/L) é de 0,004. Nesta razão, os modelos L1, L2 e L3 são melhor representados pela Inércia Média de Branson com $\alpha_e = E_s/E_c$ e no caso dos modelos L1-R, L2-R e L3-R pode-se dizer que as curvas teóricas não os representam de maneira segura.

Observando ainda a relação f/L igual a 0,004, percebe-se que este limite de flecha conduz a valores de momento fletor bem próximos aos valores de ruptura ocorridos nos modelos, tanto sem quanto com resíduo de borracha; indicando que os modelos de laje atingiram primeiro o estado limite último⁴.

³ Neste trabalho o Estado Limite de Utilização ou de Serviço foi considerado como sendo o estado limite de deformações excessivas (ELS-DEF), definido pela NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, p.5) como sendo o estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da estrutura

⁴ Estado Limite Último (ELU) é o estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura, conforme a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p.4)

As linhas de tendência exibidas nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51 e 52 foram traçadas com base na curva real, para posterior obtenção das curvas médias de flecha. Essas linhas de tendência representam bem o comportamento de tais modelos, já que têm R^2 acima de 0,99.

A Figura 53 mostra a comparação entre as curvas médias obtidas.

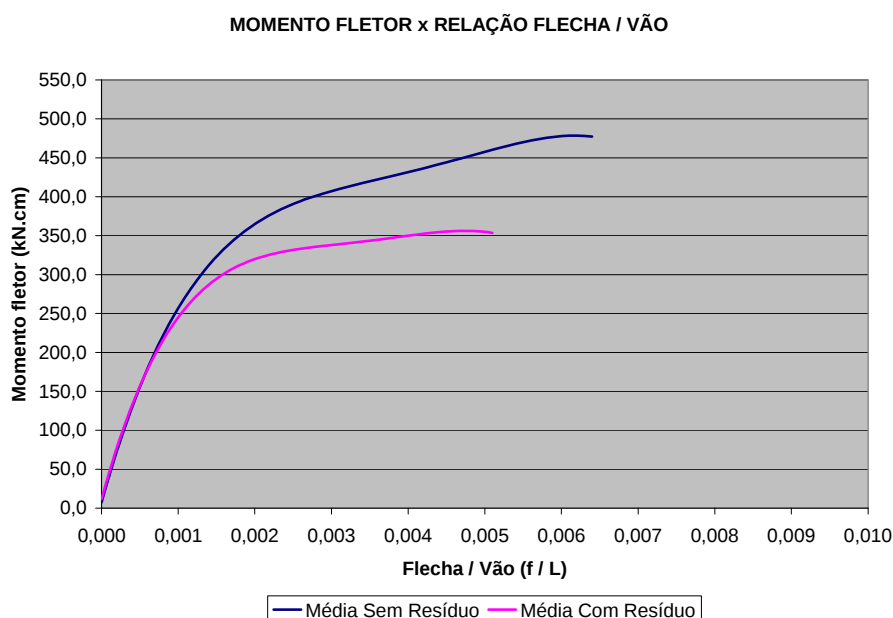


Figura 53: Comparação entre as médias dos modelos M-100, com e sem borracha de pneu

Analisando a Figura 53, é notório que, ao adicionar o resíduo de borracha, o momento de ruptura⁵ diminui, sofrendo uma queda de 28,6%.

Cabe salientar que essa diminuição no momento de ruptura não está ligada à queda de resistência à compressão dos traços de concreto, geralmente ocasionada pela inserção do material borracha nas misturas de concreto, já que a dosagem dos traços de concreto proporcionou misturas, com e sem resíduo, com resistência à compressão, aos 28 dias de idade, em torno de 20 MPa.

Fazendo uma análise dentro do estado limite último, nota-se que para o alongamento máximo da armadura de 10%, visualizado na Figura 54 a seguir, o momento fletor está em torno de 200 kN.cm. Para este momento, as curvas com e sem resíduo caminham de maneira idêntica, como pode ser visto na Figura 53.

⁵ Neste trabalho admitiu-se momento de ruptura como sendo o momento em que, embora houvesse tentativa de aplicação de carregamento na estrutura, a mesma só apresentava aumento de deformação

Desta forma, percebe-se que, a adição do resíduo de borracha, ao traço controle, não tem influência sobre o comportamento da estrutura, quando esta trabalha em regime último, uma vez que as curvas com e sem resíduo, apresentadas na Figura 53, são praticamente idênticas.

O comportamento de semelhança permanece até a relação flecha/vão de 0,001. Entretanto, quando a estrutura atinge o deslocamento limite de $L/250$, correspondente a relação de 0,004, a diferença entre os momentos fletores atinge 21,4%.

Além da flecha, também foram medidas as deformações no concreto nas fibras superior e inferior dos modelos de laje M-100.

A Figura 54 ilustra uma comparação dos resultados obtidos para o modelo sem resíduo de borracha, L1, e para o modelo constituído do resíduo, L3-R. Esta comparação foi feita devido à semelhança de comportamento, ou seja, ambos os modelos caracterizaram bem a compressão e a tração ocorridas no concreto.

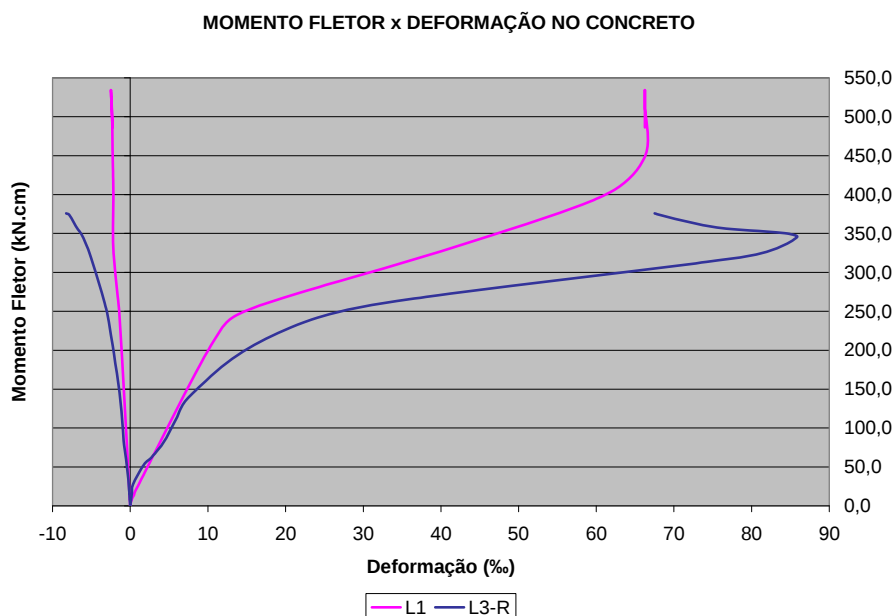


Figura 54: Momento fletor x deformação dos modelos L1 e L3-R

A partir da Figura 54 nota-se que o modelo com resíduo de borracha, L3-R, segue a mesma tendência de comportamento até o momento de 150 kN.cm, tanto para a fibra comprimida quanto para a tracionada, ou seja, este modelo tem os mesmos momentos e as mesmas deformações do modelo sem resíduo, L1. Entretanto, fica claro que a inserção do resíduo no traço de concreto acarreta em maior deformação do modelo, para momentos superiores a 150 kN.cm.

Quanto à fibra tracionada (valores positivos de deformação), à medida que o momento fletor aumenta, a diferença de comportamento entre os dois modelos aumenta, ou seja, a diferença no valor de deformação, para um mesmo momento aplicado, aumenta. Aos 200 kN.cm a diferença é de 50,0% e chega a 100,0% para 300 kgf.

Como os demais modelos M-100, sem e com resíduo de pneu, tiveram comportamento distinto dos modelos apresentados anteriormente, optou-se por compará-los separadamente, através da Figura 55.

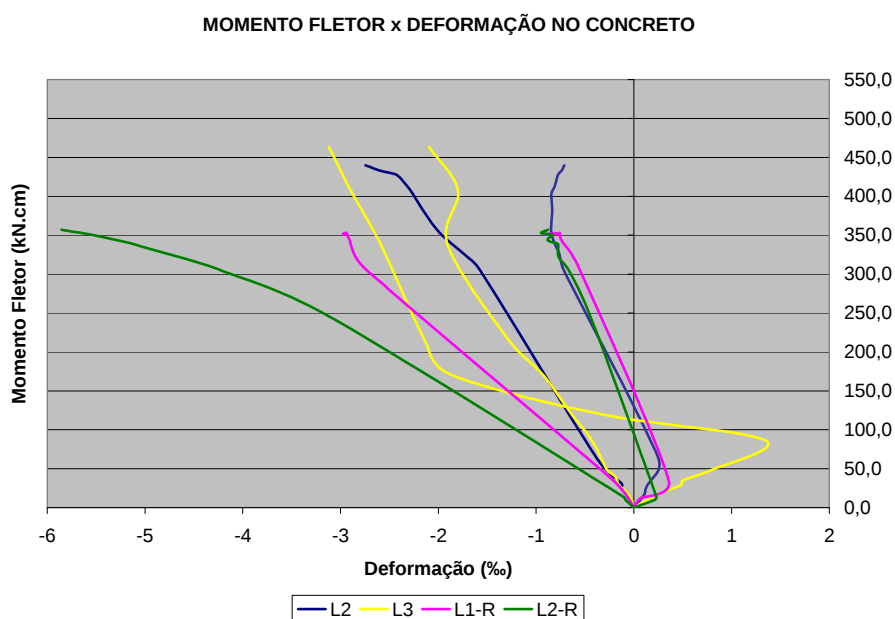


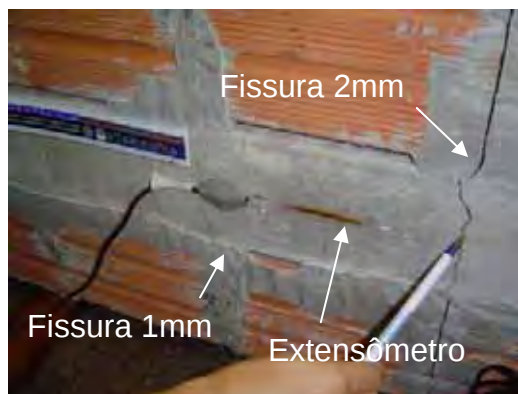
Figura 55: Momento fletor x deformação dos modelos L2, L3, L1-R e L2-R

Observando a Figura 55 fica claro que tanto os modelos sem resíduo, L2 e L3, quanto os constituídos do mesmo, L1-R e L2-R, tem a deformação do concreto bem representada na fibra superior (fibra comprimida). Já a deformação na fibra inferior (fibra tracionada) sofre mudança brusca de comportamento.

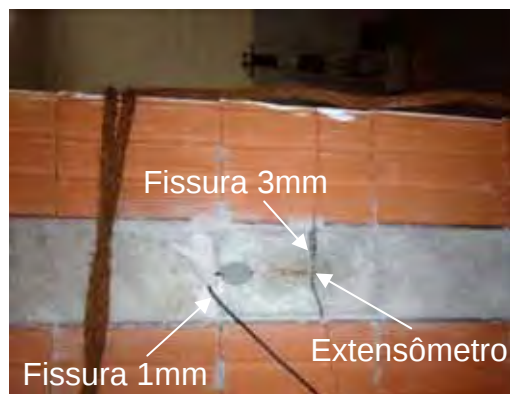
Essa mudança de comportamento é caracterizada pela inversão brusca de valores positivos, que representam tração, para valores negativos, que representam compressão; este fato induz, a princípio, pensar que ocorreu compressão na fibra que foi tracionada.

Após análise dos resultados e, com base no padrão de fissuração dos modelos, não se chegou a um consenso razoável que explicasse as leituras negativas apresentadas pelos modelos L2, L3, L1-R e L2-R.

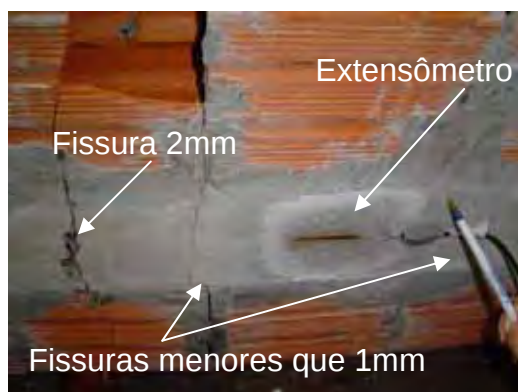
A Figura 56 mostra o padrão de fissuração dos modelos M-100 após ensaio de flexão.



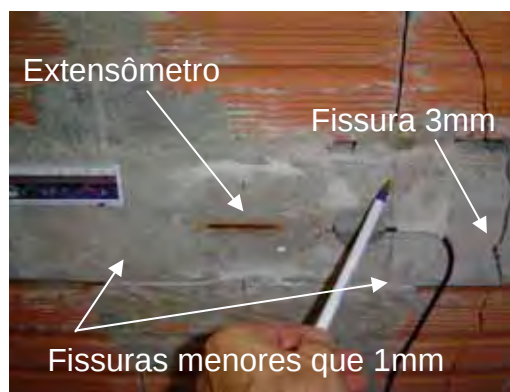
modelo L1



modelo L3-R



modelo L2



modelo L3



Modelo L1-R



Modelo L2-R

Figura 56: Padrão de fissuração ocorrido nos modelos M-100

Um fato que deve ser mencionado é que o aparecimento da primeira fissura nos modelos sem resíduo ocorreu para um momento de 315 kN.cm e para os modelos com resíduo, com um momento de 230 kN.cm, aproximadamente. Este fato pode ser atribuído à maior deformação do concreto com borracha e à diminuição da resistência no banzo tracionado, dado a presença do resíduo, acarretando em maior alongamento da armadura e por consequência, no surgimento precoce das fissuras.

4.2.2 Modelos de Laje M-210 e M-210E

O sistema de aquisição de dados, acoplado aos modelos de laje M-210, armazenou resultados de carga e deslocamento vertical, e no caso dos modelos M-210E, além desses resultados, também foi armazenado dados de deformação no concreto e na armadura.

A previsão da flecha imediata ou instantânea no meio do vão, ($v_{\max}$), foi feita segundo o mesmo procedimento utilizado nos modelos M-100; considerando a Inércia Média de Branson. A formulação referente ao cálculo da rigidez equivalente, $(E.I)_{eq}$, apresentada no item 3.2.4 do Capítulo 3, é válida também para esses modelos.

Assim como foi feito para os modelos M-100, as Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 mostram as relações flecha/vão em função da variação do momento fletor para os modelos de laje LSR, LCR, LSR-C, LCR-C, LSR-CA e LCR-CA, respectivamente.

Para cada modelo são apresentadas três diferentes relações flecha/vão, sendo uma experimental, obtida com a média entre os valores de deslocamentos, medidos no vão central, a partir de dois relógios comparadores, e duas relações flecha/vão teóricas, obtidas a partir da Inércia Média de Branson para $\alpha_e = 15$ e $\alpha_e = E_s/E_c$.

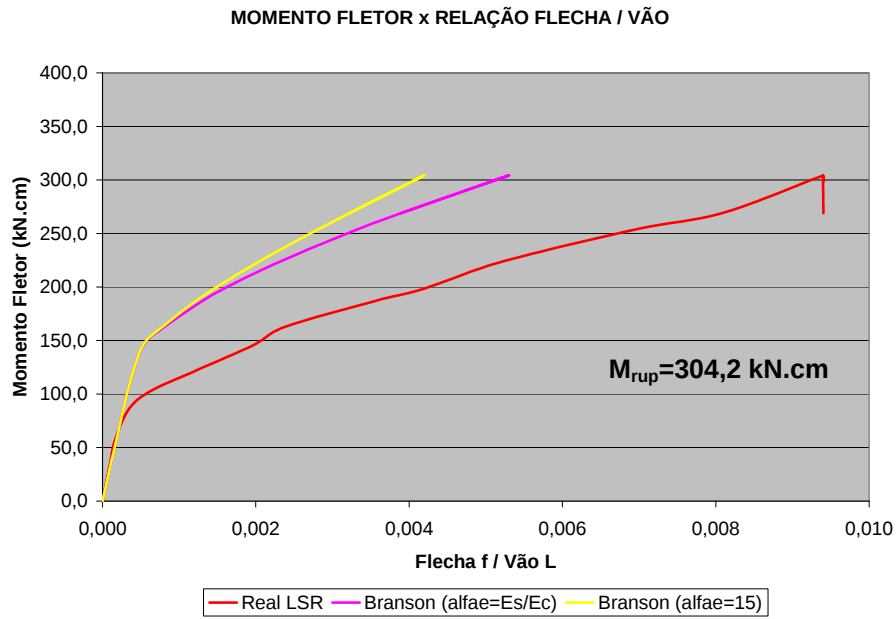


Figura 57: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LSR na flexão

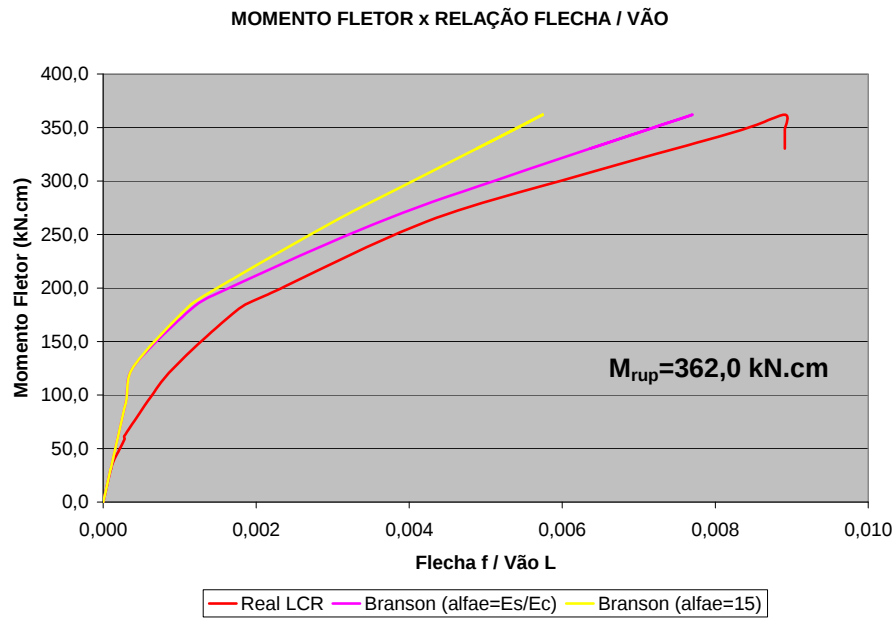


Figura 58: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LCR na flexão

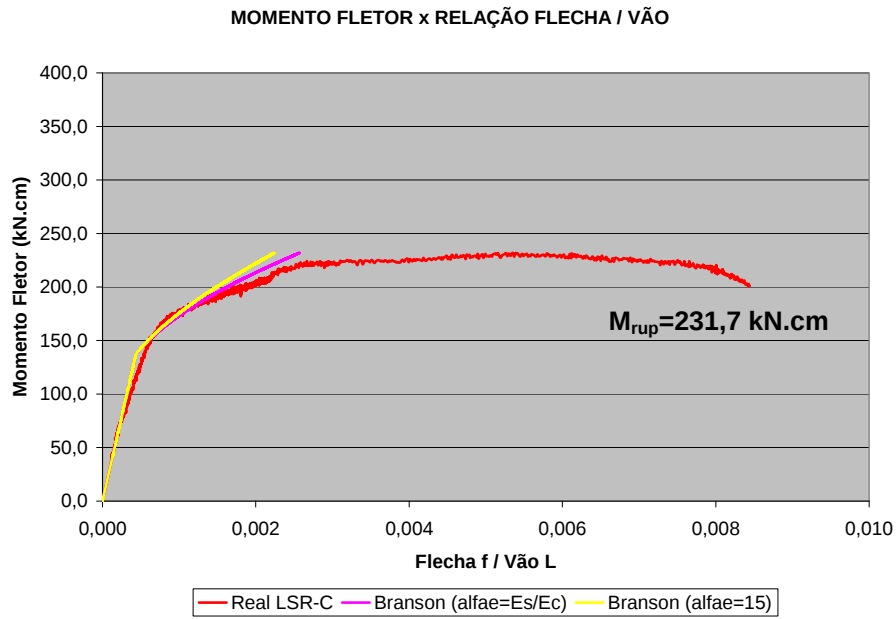


Figura 59: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LSR-C na flexão

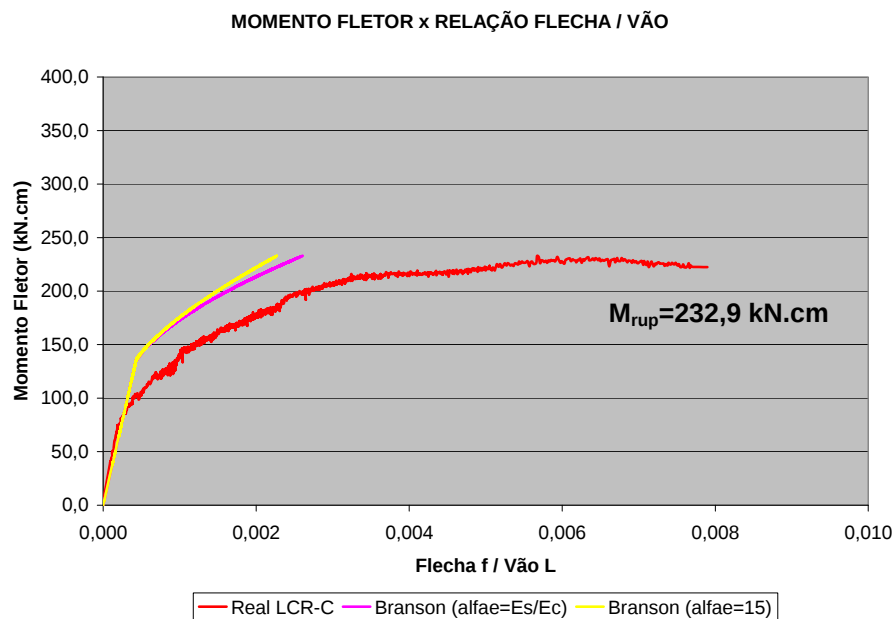


Figura 60: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) do modelo LCR-C na flexão

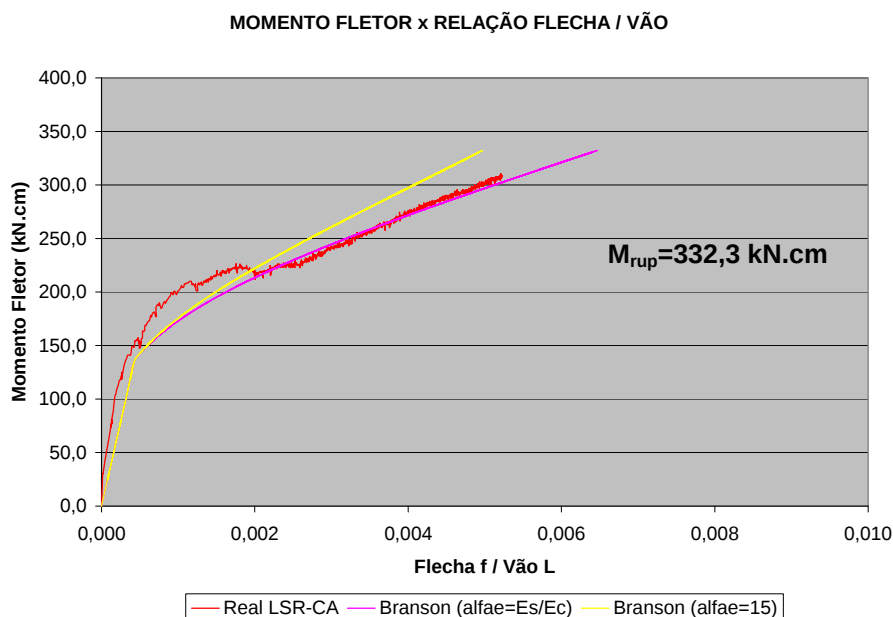


Figura 61: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) dos modelos M-210 na flexão

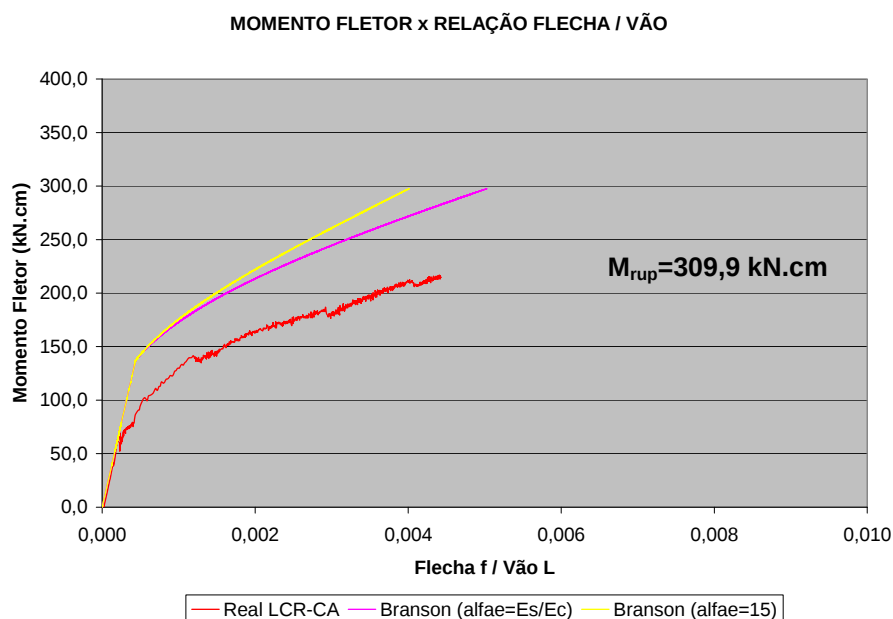


Figura 62: Momento fletor x relação flecha/vão (f/L) dos modelos M-210 na flexão

Assim como verificado nos modelos M-100, as curvas reais dos modelos M-210 sem e com resíduo exibem uma tendência de comportamento bem semelhante, conforme Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62; demonstrando que a inserção do resíduo não modifica a tendência de comportamento. Deve ser mencionado que os relógios comparadores dos modelos LSR-CA e LCR-CA foram removidos respectivamente com 308,6 e 214,5 kN.cm, para segurança do equipamento.

A fim de facilitar a comparação entre os modelos sem e com resíduo de borracha de pneu, são exibidos nas Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 os valores dos momentos de ruptura M_{rup} relativos a cada modelo.

Observa-se que o modelo sem resíduo de borracha, LSR, Figura 57, tem momento de ruptura M_{rup} de 304,2 kN.cm, sendo menor que o do modelo com resíduo, LCR, Figura 58, que é superior a 360,0 kN.cm. Como o modelo LSR-CA e também os modelos M-100 sem resíduo, apresentam comportamento inverso, ou seja, ao fazer a adição há queda no momento fletor, imagina-se que ocorreu algum problema, que não foi identificado, no protótipo LSR. Devido a esse problema não foi possível comparar os modelos LSR e LCR. Quanto aos modelos LSR-C e LCR-C, Figuras 59 e 60 respectivamente, pode-se dizer que os valores de momento de ruptura foram praticamente os mesmos.

Analisando os valores de flecha encontrados, observa-se que os modelos com resíduo de borracha, com exceção do LCR, demonstram valores de flecha superiores aos dos modelos sem resíduo, para um mesmo momento fletor. Isso indica que os modelos M-210 com borracha possuem menor rigidez, assim como os modelos M-100 com borracha.

Comparando a curva real com as curvas teóricas, ilustradas nas Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62, pode-se dizer que os modelos LCR, LCR-C e LCR-CA apresentam valores de flecha experimental superiores aos calculados com a utilização da Inércia Média de Branson, tanto para $\alpha_e = E_s/E_c$ quanto para $\alpha_e = 15$; isto demonstra que o modelo de previsão de flecha utilizado não proporciona segurança estrutural para elementos adicionados de resíduo. Já os modelos LSR-C e LSR-CA, sem resíduo de borracha, tiveram maior proximidade entre as flechas experimental e teóricas.

Para que os modelos com resíduo de borracha, LCR, LCR-C e LCR-CA, sejam bem representados pelo modelo de Branson é necessário que a previsão do momento de fissuração sofra uma redução de aproximadamente 37 %. Isso porque, ao adicionar o resíduo de borracha de pneu em tais modelos, o momento de fissuração ocorre antecipadamente, como pode ser visto nos modelos LSR-C e LCR-C, por exemplo, com momento passando de 150 para 95 kN.cm.

Observando a relação f/L igual a 0,004, correspondente à aceitabilidade sensorial, na limitação visual, percebe-se que este limite de flecha conduz a valores de momento fletor da ordem de 70% dos valores do momento de ruptura ocorridos nos modelos, tanto sem quanto com resíduo de borracha; indicando que os modelos de laje M-210 atingiram primeiro o estado limite último, assim como os modelos M-100.

Para facilitar a análise dos resultados dentro do estado limite último, são feitas duas comparações entre os modelos sem e com resíduo de borracha: uma entre os modelos LSR-C e LCR-C e outra entre os modelos LSR-CA e LCR-CA, respectivamente conforme Figuras 63 e 64.

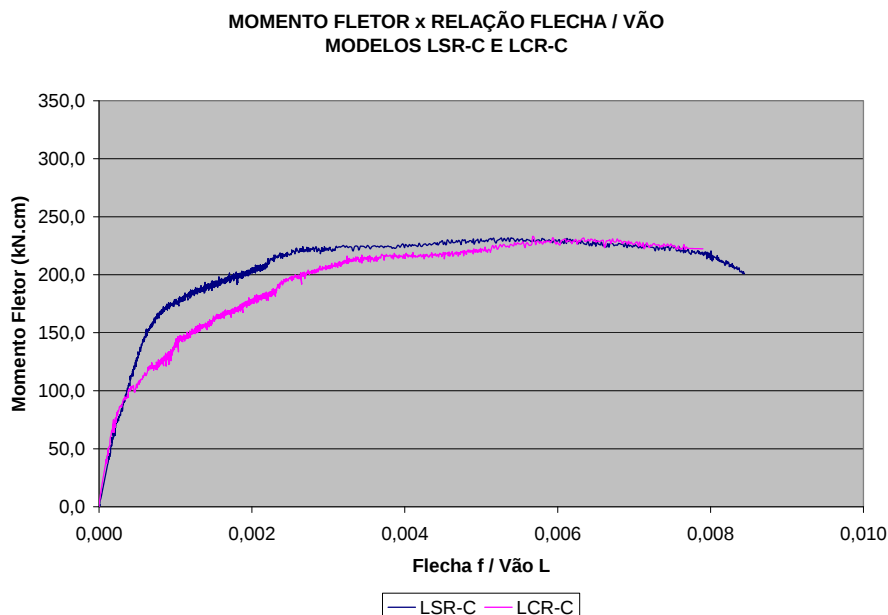


Figura 63: Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos LSR-C e LCR-C

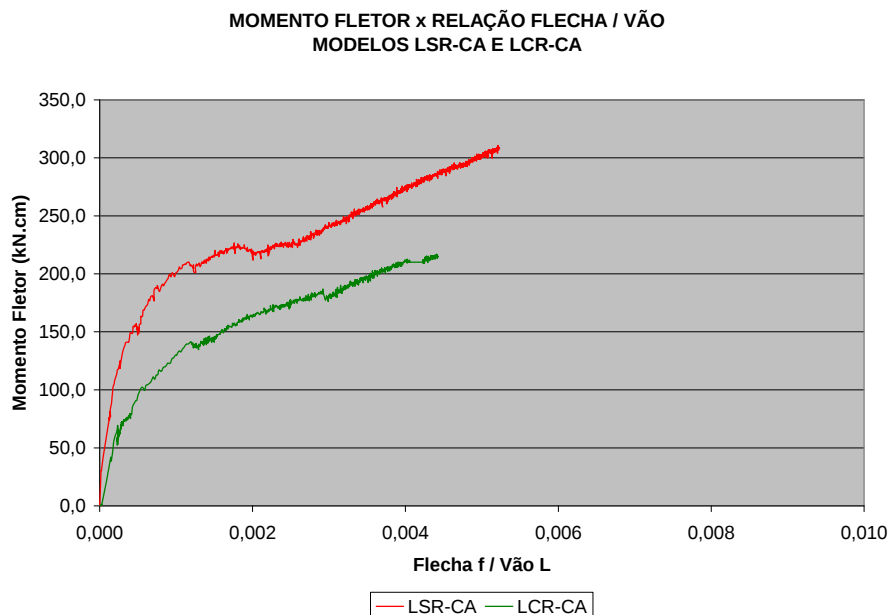


Figura 64: Comparação da relação flecha/vão (f/L) para os modelos LSR-CA e LCR-CA

Considerando o alongamento máximo da armadura de 10 ‰, visualizado na Figura 65 a seguir, nota-se que o momento fletor está entre 150 e 180 kN.cm para os modelos LCR-C e LSR-C, respectivamente. Para este intervalo de momento, as curvas com e sem resíduo destes modelos diferem em até 100 ‰ na relação f/L , como pode ser visto na Figura 63.

Da mesma forma, o momento fletor dos modelos LCR-CA e LSR-CA para o alongamento máximo de 10 ‰, mostrado na Figura 64, está entre 170 e 210 kN.cm, o que proporciona uma diferença superior a 210 ‰ na relação f/L entre tais modelos.

Desta forma, percebe-se que, a adição do resíduo de borracha, ao traço controle, influencia completamente o comportamento da estrutura, quando esta trabalha em regime último. Entretanto, quando a estrutura atinge o deslocamento limite de $L/250$, correspondente a relação de 0,004, a diferença entre os momentos fletores é de 30,9 ‰ para os modelos LSR-CA e LCR-CA e não chega a atingir 5% no caso dos modelos LSR-C e LCR-C.

Para um melhor entendimento das curvas presentes nas Figuras 66 e 67, seguem na Figura 65 dois esquemas de posicionamento e nomenclatura referentes aos extensômetros colados no concreto e na armadura, respectivamente.

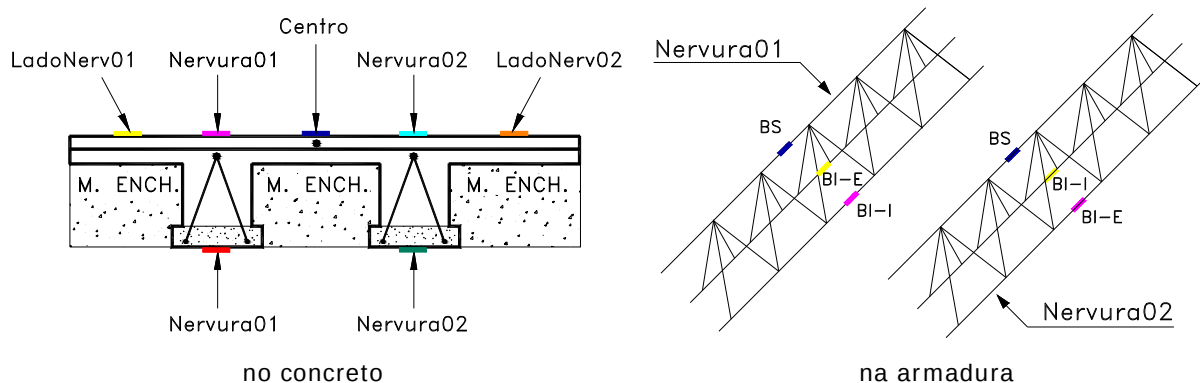


Figura 65: Esquema de posicionamento e nomenclatura dos extensômetros elétricos

As Figuras 66, 67, 68 e 69 ilustram os resultados de deformação no concreto em função do momento fletor para os modelos LSR-C, LCR-C, LSR-CA e LCR-CA, respectivamente. A Figura 67 faz uma comparação entre tais resultados.

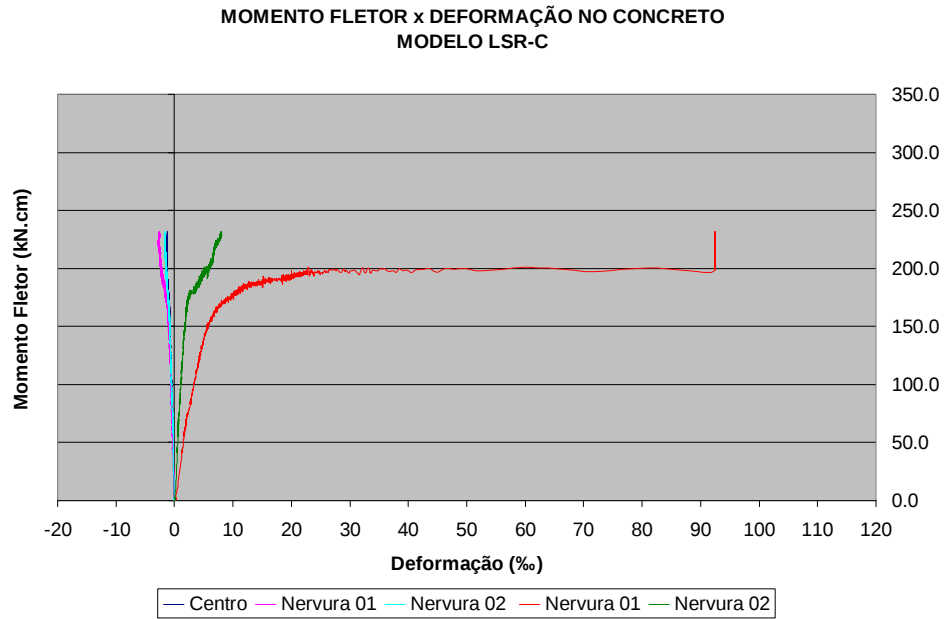


Figura 66: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LSR-C na flexão

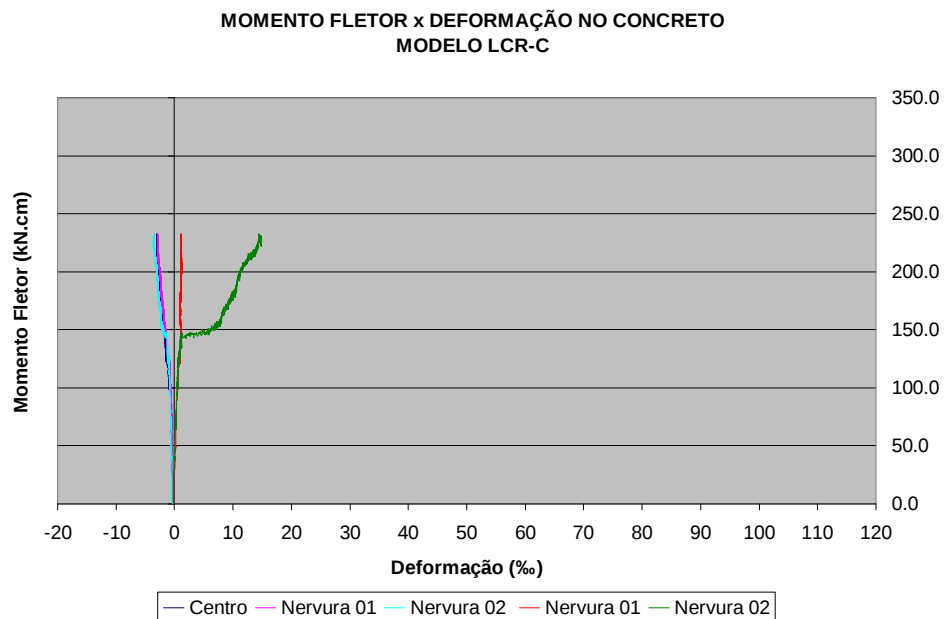


Figura 67: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LCR-C na flexão

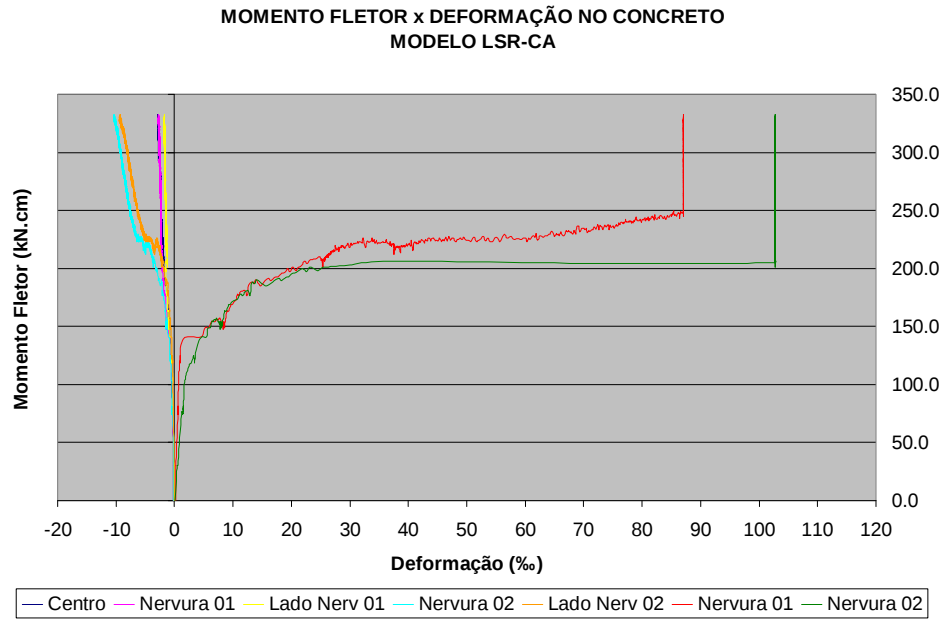


Figura 68: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LSR-CA na flexão

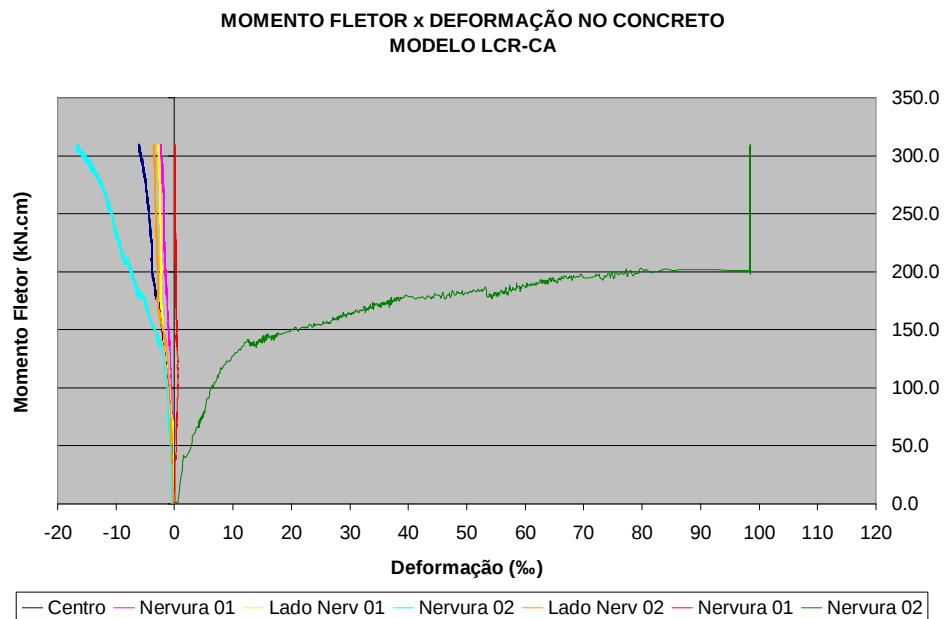


Figura 69: Momento fletor x deformação no concreto do modelo LCR-CA na flexão

Ao observar respectivamente as Figuras 67 e 69 nota-se que os extensômetros elétricos posicionados nas fibras tracionadas (valores positivos de deformação) das nervuras 01 dos modelos com resíduo de borracha, LCR-C e LCR-CA, não registraram medidas de alongamento durante o ensaio de flexão.

Nota-se também que os extensômetros posicionados nas fibras tracionadas da Nervura 01 dos modelos LSR-C (Figura 66) e LSR-CA (Figura 68) e os da Nervura 02 dos modelos LSR-CA e LCR-CA (Figuras 68 e 69 respectivamente), pelo fato de se romperem por surgimento de fissura, deixaram de registrar medidas de alongamento do concreto após 200 e 250 kN.cm.

Com exceção dos extensômetros elétricos localizados nas fibras comprimidas (valores negativos de deformação) das nervuras 02 dos modelos LSR-CA (Figura 68) e LCR-CA (Figura 69) e o do Lado da Nerv 02 do modelo LSR-CA (Figura 68), tanto os extensômetros dos modelos sem resíduo de borracha quanto os dos modelos constituídos do resíduo registram, dentro dos respectivos grupos, valores de encurtamento do concreto e de momentos fletores bem próximos, garantindo a confiabilidade do ensaio quanto à amostragem. O mesmo pode ser dito para os extensômetros posicionados nas fibras tracionadas dos modelos.

As Figuras 70 e 71 facilitam a análise comparativa dos modelos LSR-C e LCR-C e dos modelos LSR-CA e LCR-CA, respectivamente.

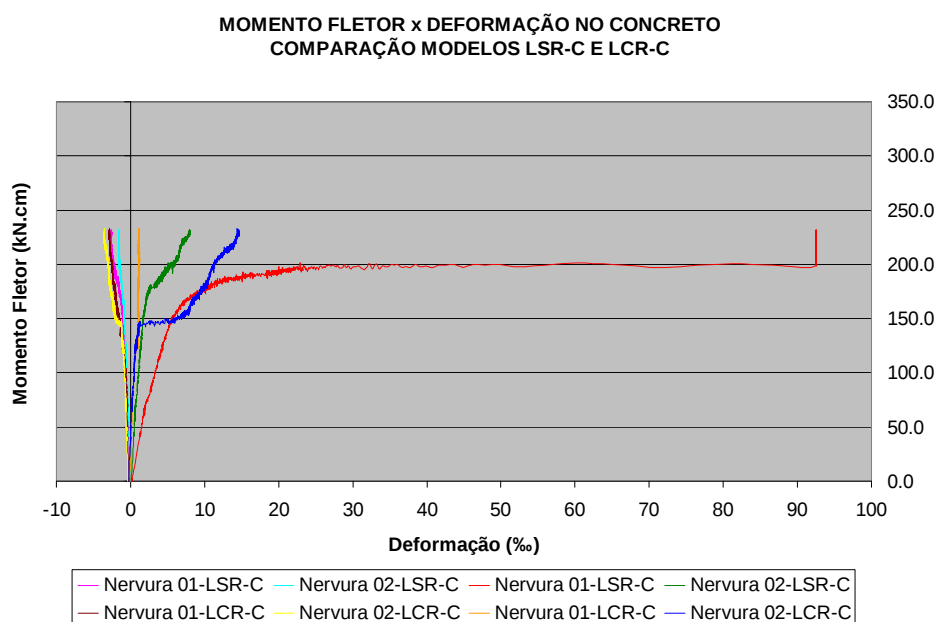


Figura 70: Comparação da deformação no concreto para os modelos LSR-C e LCR-C

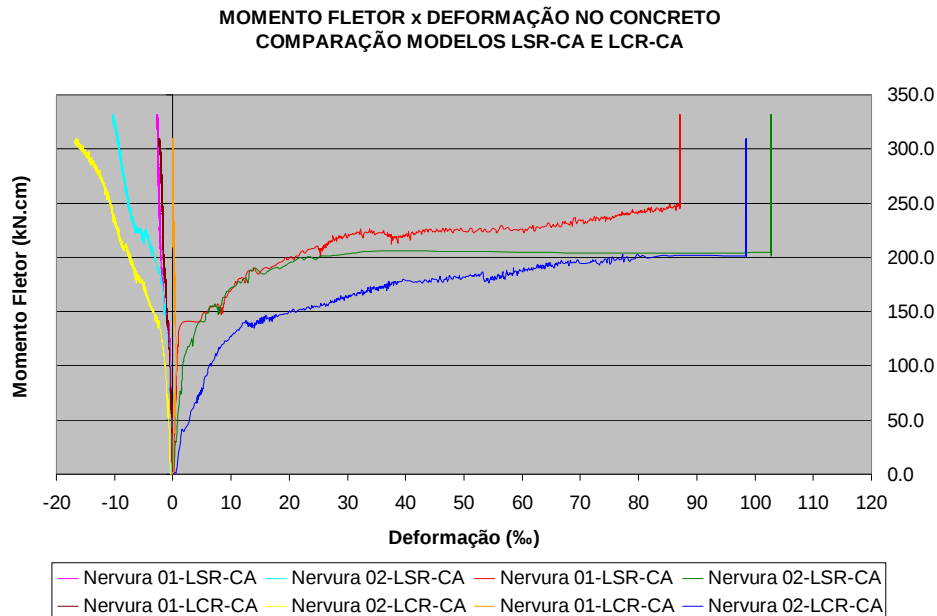


Figura 71: Comparação da deformação no concreto para os modelos LSR-CA e LCR-CA

Estudando os modelos LSR-C e LCR-C, presentes na Figura 70, quanto ao estado limite último, percebe-se que, na flexão simples, para o encurtamento máximo do concreto de 3,5 ‰, a adição do resíduo ao concreto proporciona uma queda de 10,5 % no valor do momento fletor. Já para o alongamento máximo de 10 ‰, tem-se uma queda de 25,6 % quando o resíduo é adicionado.

Usando o mesmo raciocínio para os modelos LSR-CA e LCR-CA, Figura 71, observa-se que, para o encurtamento máximo do concreto de 3,5 ‰, tem-se uma queda de até 26,8% no momento fletor ao adicionar o resíduo ao concreto e uma queda de 23,5% na mesma propriedade quando analisado o alongamento máximo de 10‰.

As Figuras 72, 73, 74 e 75 mostram os resultados de deformação na armadura em função do momento fletor do modelo sem resíduo de borracha, LSR-CA, e do modelo com resíduo, LCR-CA. Para cada modelo são apresentados os resultados das duas nervuras ensaiadas.

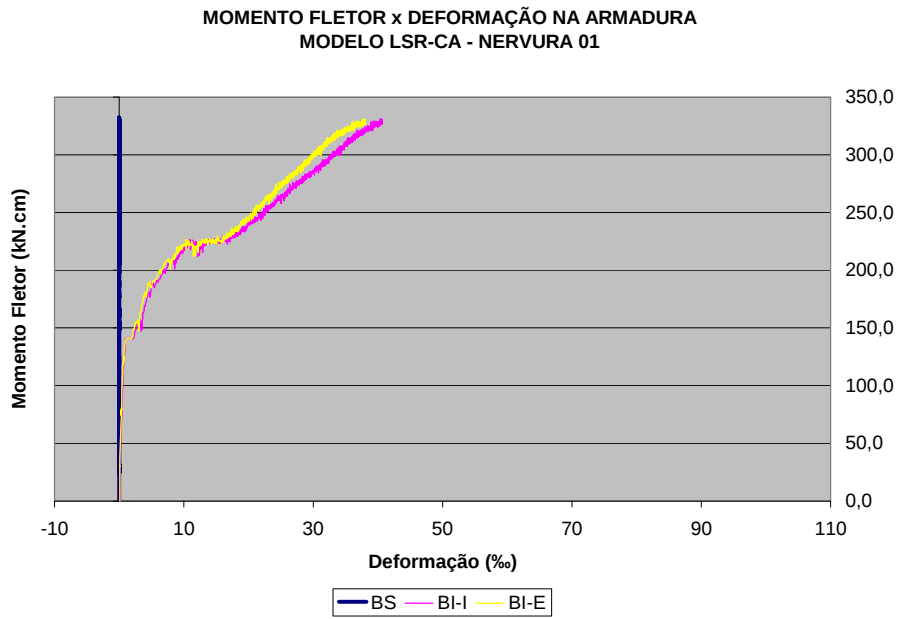


Figura 72: Deformação na armadura da Nervura 01 do modelo LSR-CA

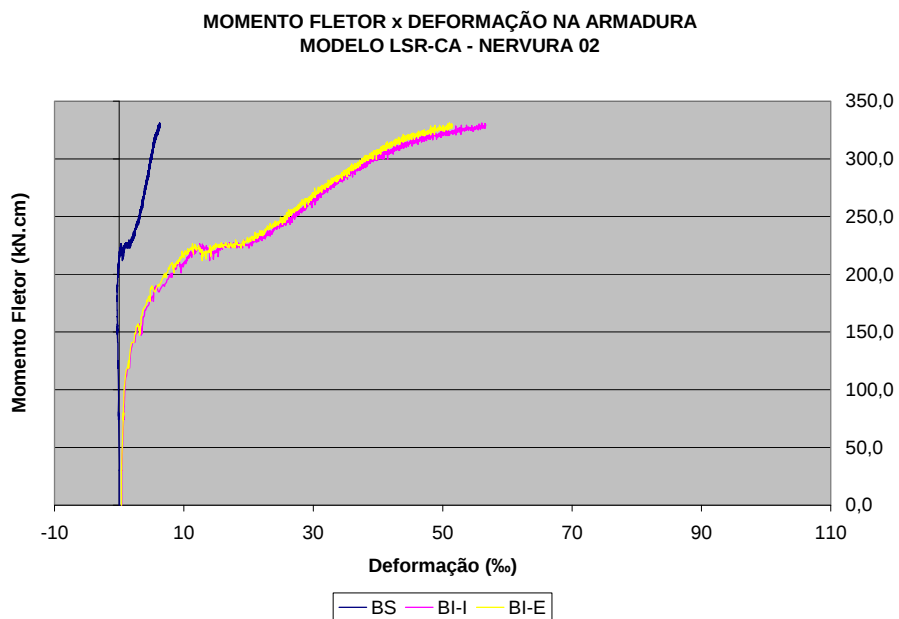


Figura 73: Deformação na armadura da Nervura 02 do modelo LSR-CA

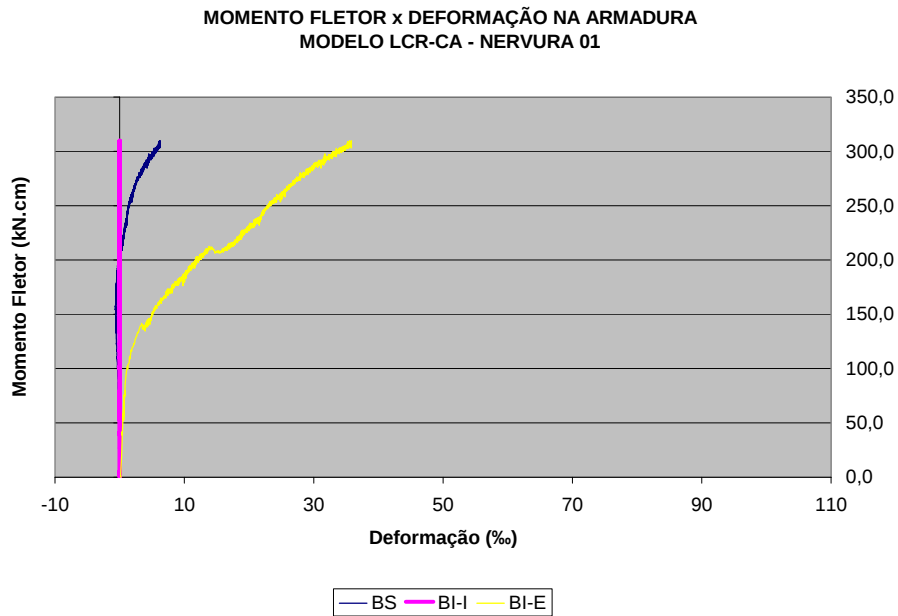


Figura 74: Deformação na armadura da Nervura 01 do modelo LCR-CA

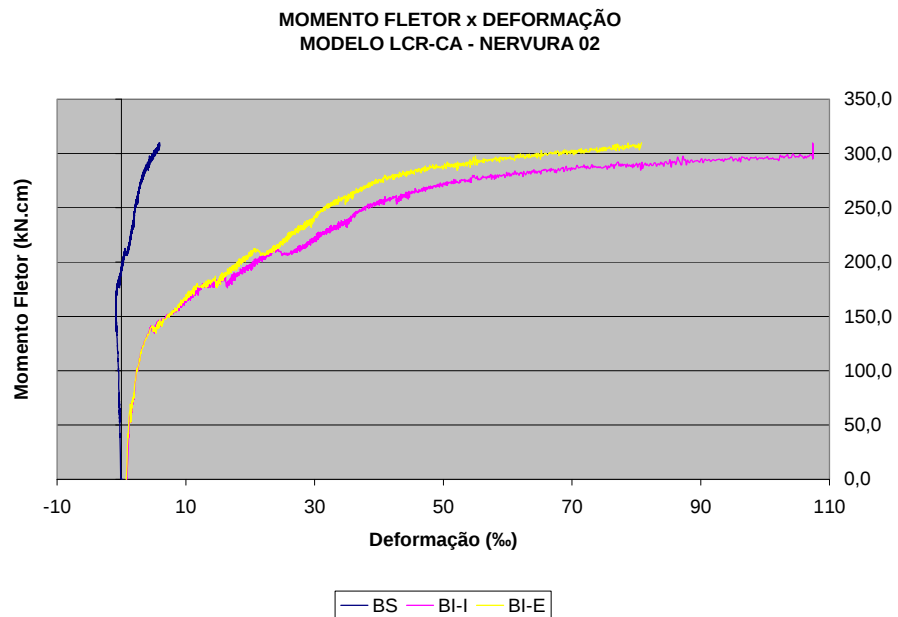


Figura 75: Deformação na armadura da Nervura 02 do modelo LCR-CA

Como pode ser visto nas Figuras 72 e 74, o extensômetro elétrico posicionado no banzo superior BS da Nervura 01 do modelo LSR-CA e o extensômetro do banzo inferior interno BI-I da nervura 01 do modelo LCR-CA não registraram medidas de alongamento da armadura durante o ensaio de flexão.

As Figuras 72, 73, 74 e 75 deixam claro que as curvas de deformação dos modelos M-210E são parecidas, indicando que foram registradas boas leituras na armadura durante o ensaio de flexão.

Outro aspecto interessante é que as curvas de deformação na armadura dos modelos sem resíduo de borracha e as curvas dos modelos constituídos de resíduo também são semelhantes. Este fato fica evidente nas Figuras 76 e 77.

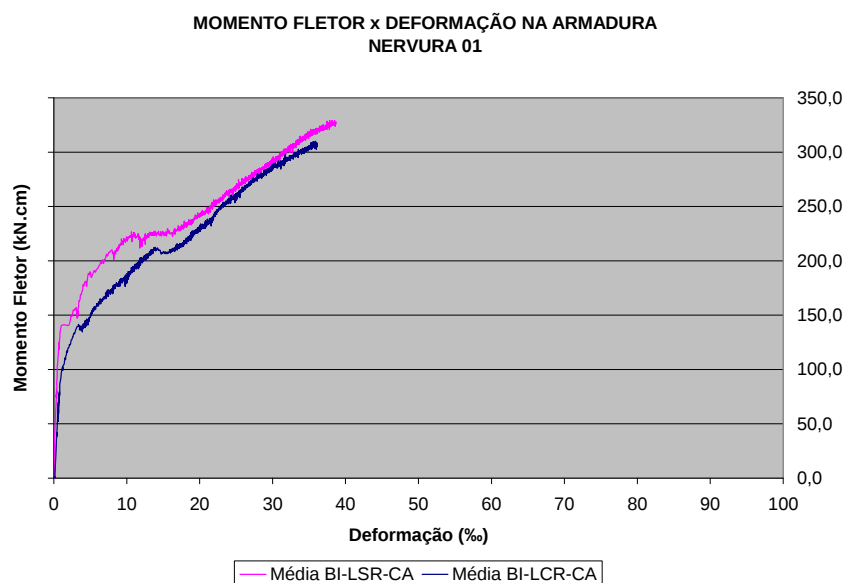


Figura 76: Deformação na armadura da Nervura 01 dos modelos sem e com resíduo

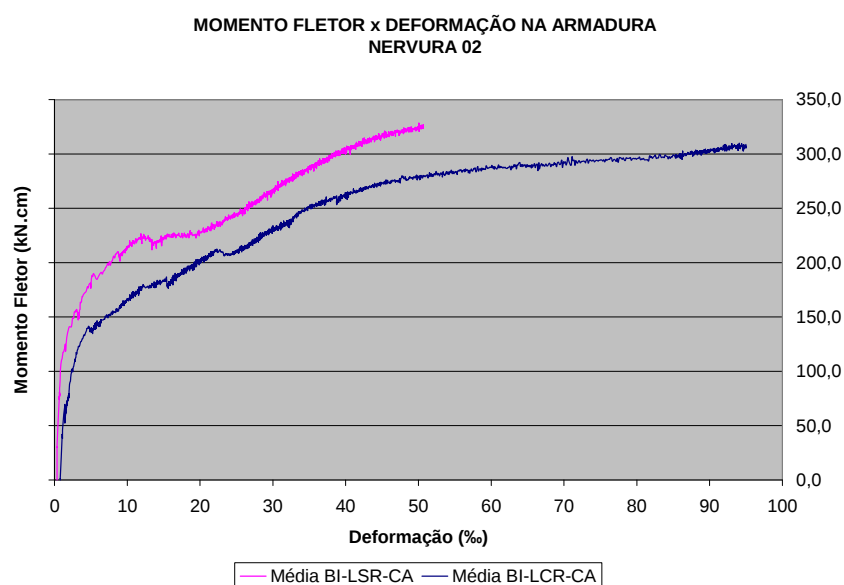


Figura 77: Deformação na armadura da Nervura 02 dos modelos sem e com resíduo

De posse dos resultados mostrados nas Figuras 71, 72, 73, 74 e 75, é possível fazer uma análise comparativa das deformações ocorridas no concreto e no banzo superior da armadura treliçada, conforme exibido nas Figuras 78 e 79.

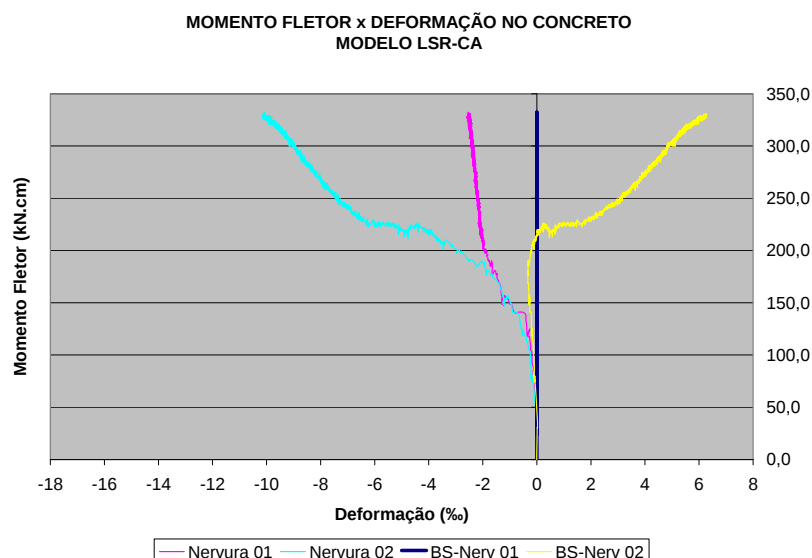


Figura 78: Comparação das deformações no concreto e na armadura do modelo LSR-CA

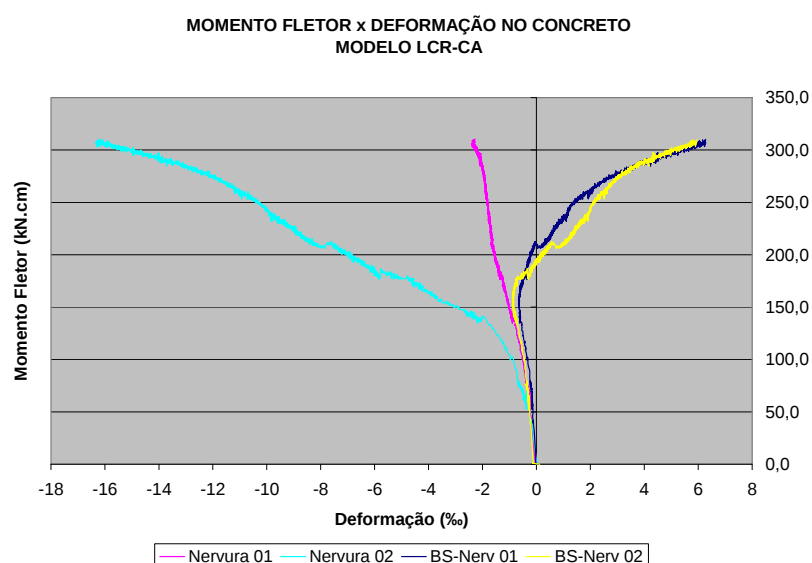


Figura 79: Comparação das deformações no concreto e na armadura do modelo LCR-CA

Pode-se dizer, ao avaliar as Figuras 78 e 79, que os valores de deformação do concreto e da armadura são praticamente os mesmos, ou seja, até o momento fletor de 100 kN.cm, aproximadamente, as deformações ocorridas nos extensômetros elétricos acusam semelhantes valores de compressão na fibra superior dos modelos LSR-CA e LCR-CA (valores negativos de deformação).

Entretanto, após os 100 kN.cm, ocorre inversão nos valores de deformação do banzo superior BS da armadura, passando a registrar valores de tração na fibra superior (valores positivos de deformação). Esse comportamento já era esperado, uma vez que, ao longo do carregamento, a região que antes estava comprimida passa a ser tracionada, devido ao deslocamento da posição da linha neutra.

Ao comparar os modelos sem e com resíduo de borracha, percebe-se que os valores de deformação estão bem próximos, tanto para a deformação do concreto quanto para a deformação ocorrida no banzo superior BS da armadura.

As Figuras 80 e 81 mostram, respectivamente, o posicionamento das fissuras na face inferior dos modelos M-210E e o padrão de fissuração dos modelos M-210 e M-210E, após o ensaio de flexão.

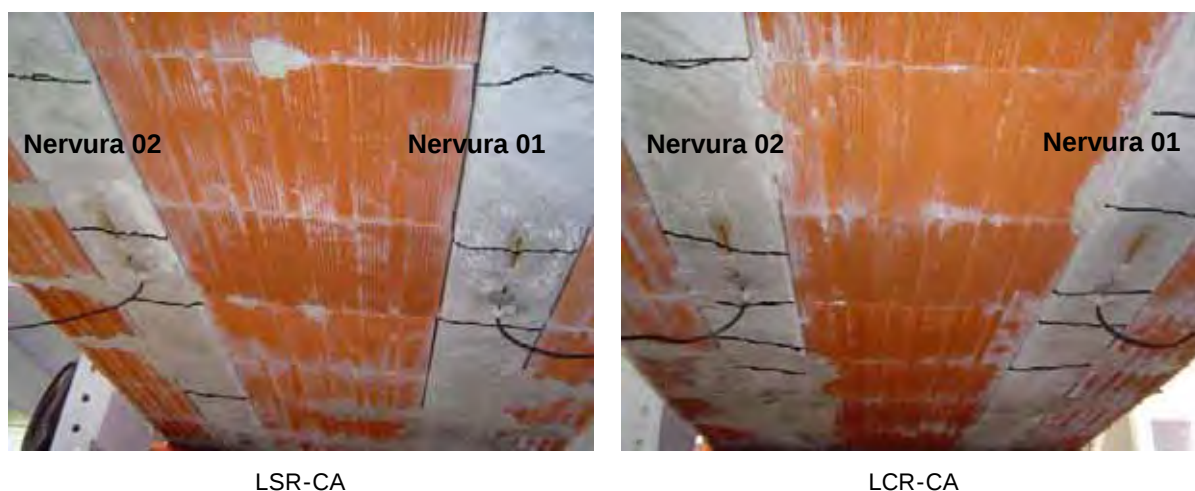


Figura 80: Posicionamento das fissuras na face inferior dos modelos M-210E

Tanto o modelo sem resíduo, LSR-CA, quanto o modelo com resíduo, LCR-CA, têm fissuras igualmente espaçadas ao longo das nervuras, conforme Figura 80. A quantidade e a abertura dessas fissuras também são semelhantes para esses dois modelos.

Com exceção do extensômetro elétrico presente na Nervura 01 do modelo LCR-CA, todos os demais tiveram a leitura de deformação do concreto encerrada após o surgimento da fissura, já que esta rompe as grades de leitura do extensômetro; este fato pôde ser constatado nas Figuras 68 e 69.



LSR



LCR



LSR-C



LCR-C



LSR-CA



LCR-CA

Figura 81: Padrão de fissuração ocorrido nos modelos M-210 e M-210E

As fissuras apresentadas na Figura 61 são características do ensaio de flexão, ou seja, são fissuras verticais concentradas na região central dos modelos.

A Figura 82 a seguir mostra o histórico do comportamento da linha neutra, LN, ao longo do carregamento, para os modelos LSR-CA e LCR-CA. Destaca-se que as deformações no aço acima de 10‰ e no concreto acima de 3,5‰ servem apenas para ilustrar a tendência de comportamento da linha neutra, uma vez que o estado limite último já foi atingido para essas deformações.

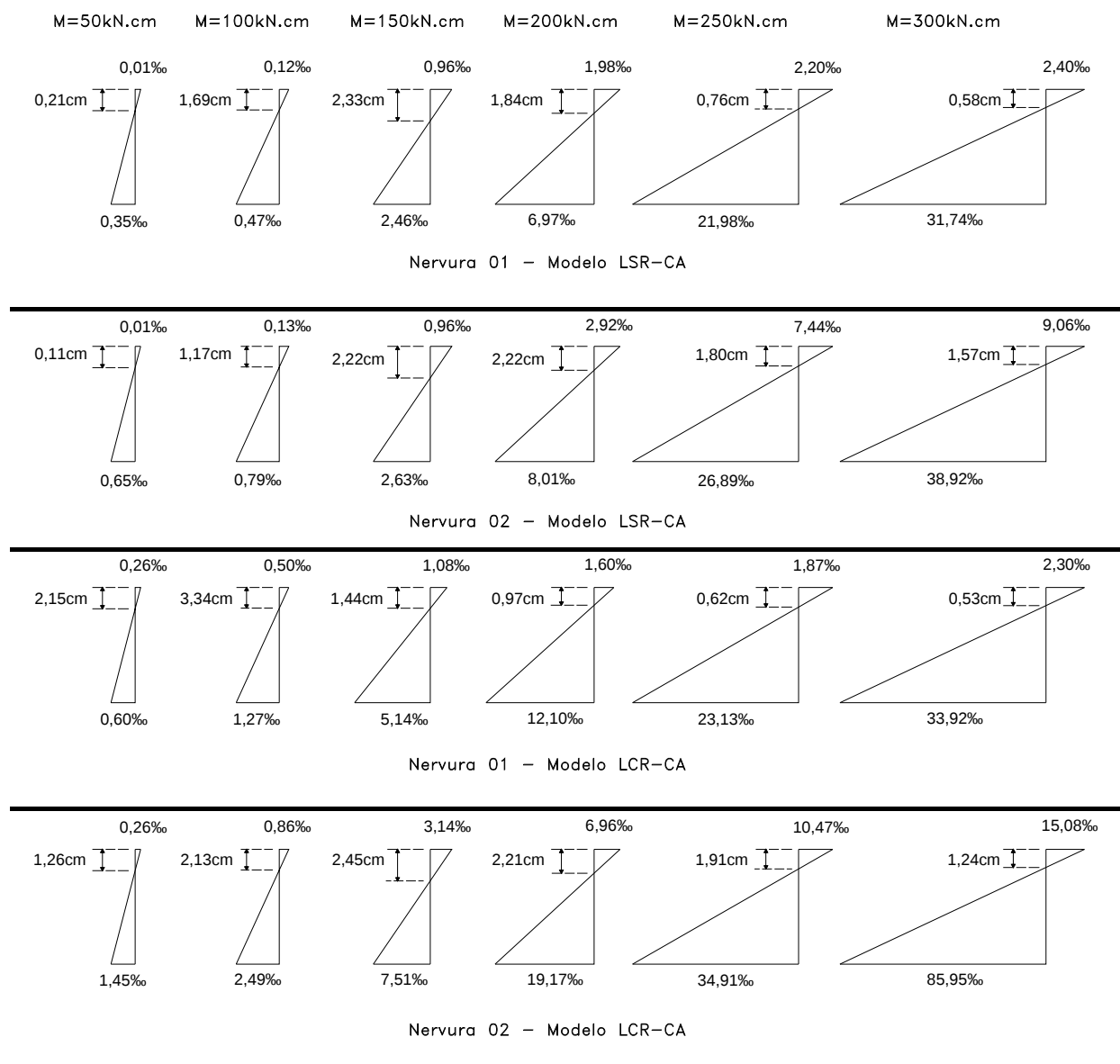


Figura 82: Histórico do comportamento da LN ao longo do carregamento.

Ao observar os diagramas de deformações presentes na Figura 82, nota-se que as nervuras 02, tanto a do modelo sem resíduo de borracha, LSR-CA, quanto a do modelo constituído de resíduo, LCR-CA, têm valores maiores de deformações do concreto e da armadura, se comparados aos valores apresentados pelas nervuras 01 dos respectivos modelos. Provavelmente, o carregamento aplicado nesses modelos não se distribuiu de maneira equitativa para as nervuras 01 e 02.

Outro aspecto a ser mencionado é o padrão de comportamento da linha neutra LN. Com exceção da Nervura 01 do modelo LCR-CA, as demais nervuras passam a se comprimir gradativamente, até o momento fletor de 150 kN.cm, ou seja, ocorre aumento no valor da posição da LN e, após este momento fletor, a linha neutra volta a subir na peça.

5 Conclusões e Considerações

A caracterização do resíduo de borracha de pneu indica que a maior parcela deste, cerca de 70%, apresenta granulometria superior à de uma areia grossa, ou seja, o resíduo utilizado neste trabalho pode ser considerado como fibra. De acordo com a literatura, o resíduo de borracha de pneu com o formato de fibra proporciona reduções menos significativas nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios se comparado ao resíduo com formato esférico; sendo tal informação de principal valia para o trabalho.

Os resultados de caracterização dos traços de concreto indicam que a adição de resíduo de borracha de pneu ao traço controle proporciona um aumento no consumo de cimento e que este aumento, por sua vez, está diretamente relacionado com o aumento no teor de ar incorporado.

Como visto na literatura, o aumento no teor de ar incorporado nos concretos com resíduo de borracha de pneu, que pode ser atribuído à potencialidade da partícula de borracha aprisionar o ar em sua superfície áspera devido à sua natureza não-polar, acarreta em queda na resistência à compressão e diminuição da massa específica.

Como no trabalho a resistência à compressão, aos 28 dias de idade, é a mesma para os traços com e sem resíduo, com intuito de comparar tais resultados, tem-se como consequência o aumento no consumo de cimento. Entretanto, tal aumento, da ordem de 15 %, não inviabiliza a utilização do resíduo, já que o teor de argamassa, 55 %, está próximo do ideal, entre 52 e 54 %.

Além da queda na resistência à compressão outra propriedade que sofre redução depois da inserção do resíduo de borracha é o módulo de elasticidade. Comportamento este esperado, pois está de acordo com o encontrado na literatura. Isto também ocorre porque a borracha é um material que atua como vazios dentro do concreto, permitindo maiores deformações.

Devido à semelhança de comportamento apresentada pelos modelos de laje M-100, M-210 e M-210E, com e sem resíduo de borracha de pneu, pode-se considerar que o ensaio de resistência à flexão é confiável quanto à amostragem ensaiada. Apesar de ter havido queda nos valores de momento fletor após a inserção do resíduo, pode-se afirmar que a inserção do resíduo não modifica a tendência de comportamento de tais modelos.

Os maiores valores de relações flecha/vão, para um mesmo momento, encontrados nos modelos com resíduo de borracha de pneu estudados, indicam que estes modelos possuem menor rigidez que os modelos sem resíduo; fato que pode ser atribuído ao baixo módulo de elasticidade conferido ao concreto com borracha.

Ao considerar as deformações no aço e no concreto relativas ao estado limite último, percebe-se que os modelos M-100, sem e com resíduo de borracha, apresentam comportamentos idênticos. Essa semelhança de comportamento não é verificada para os modelos M-210E.

No entanto, ao considerar o estado limite de serviço, para o deslocamento limite de $L/250$, as diferenças entre os modelos M-100 e M-210E, sem e com resíduo, atingem 21,4% e 30%, respectivamente.

Ressalta-se que todos os modelos atingem o estado limite último por alongamento excessivo da armadura antes mesmo de atingirem o estado limite de serviço, para o deslocamento limite de $L/250$.

Não foi feita a comparação dos modelos M-210, sem e com resíduo de borracha de pneu, devido ao fato destes modelos terem comportamento inverso ao adicionar o resíduo.

Os resultados de previsão de flecha, utilizando a Inércia Média de Branson, quando não se considera a adição do resíduo ao concreto, indicam que o modelo proposto por Branson torna-se mais adequado para estruturas com menor rigidez, como é o caso dos modelos M-210E.

Ao analisar os modelos M-100 quanto a esse aspecto, percebe-se que os modelos constituídos de resíduo de borracha, por terem menor rigidez, apresentam valores mais próximos entre as flechas experimentais e as teóricas, se comparado aos modelos sem resíduo, entretanto, os valores entre essas flechas ainda divergem.

Já os modelos M-210 e M-210E com resíduo de borracha apresentam valores de flecha experimental superiores aos calculados com o modelo proposto por Branson. Isto demonstra que o modelo de previsão de flecha utilizado não proporciona segurança estrutural para elementos adicionados de resíduo.

Para que os modelos com resíduo de borracha possam ser melhor representados pelo modelo proposto por Branson sugere-se que o momento de fissuração sofra uma redução de aproximadamente 37 %. Isso porque, ao adicionar o resíduo de borracha de pneu em tais modelos, o momento de fissuração diminui.

Quanto aos resultados de deformação do concreto, tanto os extensômetros posicionados nos modelos sem resíduo de borracha quanto os posicionados nos modelos constituídos do resíduo registram, dentro dos respectivos grupos, valores de encurtamento e alongamento do concreto bem próximos para o carregamento aplicado, garantindo a confiabilidade do ensaio quanto à amostragem. Não pode ser dito o mesmo para os modelos M-100.

Focando os modelos M-210E ensaiados à flexão simples, os resultados de deformação do concreto indicam que a adição do resíduo ao concreto ocasiona uma redução de aproximadamente 25 % no valor do momento fletor, quando tais modelos trabalham em regime último.

Os resultados de deformação da armadura dos modelos M-210E, pelo fato de terem valores próximos, ou seja, as curvas de deformação destes modelos são parecidas, indicam que foram registradas boas leituras na armadura durante o ensaio de flexão.

A comparação feita entre os valores de deformação do concreto e da armadura indica que tais valores são praticamente os mesmos até o momento fletor aproximado de 150 kN.cm, acusando compressão na fibra superior dos modelos M-210E. A partir deste momento fletor, o banzo superior da armadura passa a registrar tração na fibra superior. Esse comportamento já era esperado, uma vez que, ao longo do carregamento, a região que antes estava comprimida passa a ser tracionada, devido ao deslocamento da posição da linha neutra.

O resultado comparativo das deformações do concreto e da armadura entre os modelos de laje M-210E sem e com resíduo de borracha mostra que os valores de deformação estão próximos.

Ao avaliar os modelos M-100, M-210 e M-210E quanto às fissuras, percebe-se que as mesmas são verticais e concentradas na região central dos modelos, características do ensaio de flexão.

O aparecimento da primeira fissura nos modelos M-100 sem resíduo ocorre para momentos fletores maiores se comparado aos modelos M-100 com resíduo. Este fato pode ser atribuído à maior deformação do concreto com borracha e à diminuição da resistência no concreto tracionado, dado a presença do resíduo, acarretando em maior alongamento da armadura e por consequência, no surgimento precoce das fissuras.

Independente da presença ou não do resíduo de borracha de pneu nos modelos M-210E, ambos exibem fissuras igualmente espaçadas ao longo das nervuras, em quantidade e abertura semelhantes.

Ao fazer um histórico do comportamento da linha neutra ao longo do carregamento, nota-se que, provavelmente, o carregamento aplicado nos modelos M-210E não se distribuiu de maneira eqüitativa para as duas nervuras que os compõem, já que as deformações do concreto e da armadura são diferentes para cada nervura. A linha neutra nesses modelos desce gradativamente até o momento fletor de 150 kN.cm e, após este momento fletor, volta a subir.

Como foi visto, existem desvantagens de desempenho estrutural ao empregar o resíduo de borracha, proveniente da recauchutagem de pneu, em lajes pré-moldadas treliçadas. Entretanto, esta adição não inviabiliza seu uso tecnicamente, e ainda apresenta grande vantagem quanto ao aspecto ambiental, que é dar destinação adequada para o resíduo em questão.

Como proposta de continuidade deste trabalho, objetivando aprofundar a viabilidade da utilização de concretos com incorporação de resíduos de borracha em estruturas de construção civil, outros estudos devem ser realizados, para melhor avaliar suas propriedades mecânicas e seu comportamento estrutural:

- avaliar seu comportamento estrutural através de ensaios de deformação lenta, como, por exemplo, fluência;
- buscar melhorar a matriz do concreto, com intuito de aumentar sua resistência à compressão, através de tratamento químico utilizando aditivos redutores de ar;
- propor uma reformulação para o modelo proposto por Branson (1968), de modo a adequar sua aplicação para estruturas de laje com e sem resíduos, já que a formulação existente prevê flechas imediatas em vigas;
- estudar o uso do concreto com resíduo de borracha de pneu em estruturas sujeitas à choques e vibrações, tais como juntas de concreto;
- analisar o comportamento do material quando utilizado como concreto ancorado;
- submeter o concreto com resíduo de borracha à exposição ao fogo, avaliando o comportamento da estrutura e a liberação de gases tóxicos.

6 Referências

AL-AKHRAS, N. M.; SMADI, M. M. Properties of tire rubber ash mortar. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 82, 2003, New Jersey. **Annual Meeting...** New Jersey: TRB, 2003. p. 2660-2662.

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; REYES, J.; FELIU, J. L.; HERNÁNDEZ, M. Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing. **Composite Estructure**, Venezuela, v. 71, n. 1, p. 439-446, 2005.

ALBUQUERQUE, A. C. et al. Concreto com borracha de pneu: uma revisão bibliográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Ibracon, 2002. CD-ROM.

ALBUQUERQUE, A. C.; HASPARYK, N. P.; ANDRADE, A. S.; CORRÊA M. I. F.; SOUZA NETO, M. M.; MACEDO, D. C. B.; CARDOSO, C. G. Investigation of different treatments in tire rubber with a view to concrete application, In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 40, 2004, Barcelona. **RILEM Proceedings...** Barcelona: RILEM, 2004, v. 1, p. 412-421.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova (PROJETO DE EMENDA EM CONSULTA NACIONAL ATÉ 19.10.2007). Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 9p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14862**: armaduras treliçadas eletrossoldadas – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 10p.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 52**: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 53**: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 8p.

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

AKASAKI, J. L.; SERNA ROS, P.; REYES, B.; TRIGO, A. P.M. Avaliação da resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003. CD-ROM.

BENAZZOUK, A.; MEZREB, K.; DOYEN, G.; GOULLIEUX, A.; QUÉNEUDEC, M. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behavior of cement–rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 25, n. 7, p.711-720, 2003.

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; QUÉNEUDEC, M. Transport of fluids in cement–rubber composites. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 26, n. 1, p. 21-29, 2004.

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; QUÉNEUDEC, M. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 28, n. 7, p. 650-657, 2006.

BIGNOZZI, M. C.; SANDROLINI, F. Recycling tire rubber in building materials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING, 2, 2004, Inglaterra. **Anais...** Inglaterra: Kingston, 2004. p. 78.

BONNET, S. Effet de l'incorporation des granulats caoutchouc sur la résistance à la fissuration des mortiers. In: RENCONTRES UNIVERSITAIRES DE GENIE CIVIL, 21, 2003, La Rochelle. **Rencontres...** La Rochelle: AUCG, 2003. p. 59-70.

BRANSON, D. E. Procedures for computing deflections. **ACI Journal**, New York, v. 65, n. 9, p. 53-65, 1968.

CAMACHO, J. S. **Introdução ao estudo do concreto armado**. Ilha Solteira: Unesp/Departamento de Engenharia Civil, 2006. (Notas de aula). Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unep.br/downloads.htm>>. Acesso em: 15 Maio 2007.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2003. 3.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007. 368p.

COLLINS, K. J.; JENSEN, A. C.; MALLINSON, J. J.; ROENELLE, V.; SMITH, I. P. Environmental impact assessment of scrap tyre artificial reef. **ICES Journal of Marine Science**, Oxford, v. 59, n. 1, p. S243-S249, 2002.

DROPPA JÚNIOR, A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. 1999. 176f. 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**. São Carlos: USP, 2001. p. 105-120. (Cadernos de Engenharia de Estruturas, 17).

ELDIN, N. N.; SENOUCE, A. B. Observations on rubberized concrete behavior. **Cement, Concrete and Aggregates**, Oregon, v. 15, n. 1, p. 74-84, 1993.

FATTUHI, N. I.; CLARK, L.A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 10, n. 4, p. 229-236, 1996.

FIORI, M. **Pneus:** governo quer evitar entrada de 11 milhões de pneus usados por ano no Brasil. Brasília: Agência Brasil, 2005 Disponível em: <http://www.radiobras.gov.br/materia_i_2004.php?materia=245706&q=1&editoria>. Acesso em: 23 Nov. 2006.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** 2007. 202. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; ÖZTURAN, T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 1, p. 2309-2317, 2004.

HUGHES, B. P.; AL-DAFIRY H. Impact energy absorption at contact zone and supports of reinforced plain and fibrous concrete beams. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 9, n. 3, p. 239-244, 1995.

HUYNH, H.; RAGHAVAN, D. Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments. **Advanced Cement Based Materials**, New York, v. 6, n. 1, p. 138-143, 1997.

LAJES **treliçadas**. São José dos Campos: CONSTRUMAXXI, 2004. Disponível em: <http://www.construmaxxi.com.br/produtos_lajes.html>. Acesso em: 8 Agost. 2007.

LAJES **treliçadas unidirecionais e bidirecionais**. Ananindeua: PREMAC, 2005. Disponível em: <http://www.premac.com.br/html/lajestrelcadas_unibid.html>. Acesso em: 4 Agost. 2007.

LI, G. et al. Development of waste tire modified concrete. **Composites, Part B: Engineering**, Louisiana, v. 36, n. 4, p. 2283-2289, 2004.

LUND, H. F. **The Mc Graw-Hill Recycling Handbook**. 2.ed. New York: Mc Graw-hill, 1993. 976p.

MARQUES, A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. 2005. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MATTOS, M. União européia não poderá mais depositar pneus em aterros e quer exportá-los para o Brasil. **Envolverde**: revista digital de meio ambiente, educação e cidadania, São Paulo, v. 8, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.envolverde.ig.com.br>>. Acesso em: 2 Jun. 2007.

MENEGHINI, E. C. A. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha**. 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MUNIZ, C. E. Mais competitivas: lajes treliçadas. **Revista IBRACON**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 19-21, 1991.

OLIVARES, F. H. et al. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 32, n. 3, p. 1587-1596, 2002.

OLIVARES, F.H.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 34, n. 4, p. 109-117, 2004.

OLIVARES, F.H.; BARLUENGA, G; LANDA, B. P.; BOLLATI, M.; WITOSZEK, B. Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements. **Construction and Building Materials**, Madri, v. 21, n. 10, p. 1919-1927, 2007.

PEREIRA, V. F. **Lajes treliçadas**. São Paulo: TQS, 2001. (Artigo Técnico da TQS, 15). Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/novidades/noticias/noticia.asp?id=47>>. Acessado em: 13 Agost. 2007.

PINHEIRO, L. M.; RAZENDE, J. A. **Apostila: estruturas de concreto**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC – USP, 01 dez de 2003. Disponível em: www.fec.unicamp.br. Acesso em: 08 maio 2007.

RECICLAGEM de pneus. **Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem Sistema FIEP**, Curitiba, v.1, n.3, 2001. Disponível em: <[http://www. ambientebrasil.com.br](http://www.ambientebrasil.com.br)>. Acesso em: 2 Fev. 2007.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. 2005. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SEGRE, N. C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. 1999. 92f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SEGRE, N.; JOEKES, I. Use of tire rubber particles as addition cement paste. **Cement Concrete and Research**, Elmsford, v. 30, n. 3, p. 1421-1425, 2000.

SEGRE, N.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix. **Journal of Colloid and Interface Science**, New York, v. 248, n. 2, p. 521-523, 2002.

SIDDIQUE, R.; NAIK, T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. **Waste Management**, Milwaukee, v. 24, n. 1, p. 563-569, 2004.

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

TAHA, M. M. R.; DIEB, A. S. E.; WAHAB, M. M. A. Fracture toughness of concrete incorporating of tire particles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERFORMANCE OF CONSTRUCTION MATERIALS IN THE NEW MILLENNIUM, 8, 2003, Cairo. **Anais...** Cairo: ICPCM, 2003, v. 36, p. 18-20.

TOPÇU, I. B.; AVCULAR, N. Analysis of rubberized concrete as a composite material. **Cement Concrete and Research**, Elmsford, v. 27, n. 2, p. 1135-1139, 1997.

TOUTANJI, H. A. The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 18, n. 1, p. 135-139, 1996.

TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Mechanical characterisation of cement based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. **Building and Environment**, Oxford, v. 40, n. 1, p. 221-226, 2004.

TURATSINZE, A.; BONNET, S.; GRANJU, J. L. Mechanical characterisation of cement based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. **Building and Environment**, Oxford, v. 39, n. 2, p. 221-226, 2004.

VASCONCELOS, Y. Borracha na mureta. **Revista Fapesp**, São Paulo, v. 109, n. 1, p. 80-81. 2005.

WANG, Y.; WU, H. C.; LI, V. C. Concrete reinforcement with recycled fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 12, n. 2, p. 314-319, 2000.