



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC
Área de Concentração: Estruturas



ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ- MOLDADAS PRODUZIDAS COM CONCRETO RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

HELIO GUIMARÃES ARAGÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. FLÁVIO BARBOZA DE LIMA

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO LOPES LIMA

Maceió, 2007

HELIO GUIMARÃES ARAGÃO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ-
MOLDADAS PRODUZIDAS COM CONCRETO
RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

ORIENTADOR: PROF. FLÁVIO BARBOZA DE LIMA

CO-ORIENTADOR: PROF. PAULO ROBERTO LOPES LIMA

Maceió, 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Maria Ligia Toledo de Lima Cavalcanti – CRB/4-510

A659a Aragão, Helio Guimarães.
Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição / Helio Guimarães Aragão – Maceió, 2007.
xv, 109 f. : il., figs., tabs.

Orientador: Flávio Barbosa de Lima.

Co-Orientador: Paulo Roberto Lopes Lima.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estrutura) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

Bibliografia: f. 88-91.

Anexos. F. [92]-109.

1. Materiais de construção. 2. Construção civil – Reciclagem 3. Resíduos de construção e demolição. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5. Concreto com agregados reciclados. I. Título.

CDU: 691



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
 Centro de Tecnologia – CTEC
 Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC
 Campus A. C. Simões
 Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
 Tel/Fax: (82) 3214-1276
 E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
 Homepage: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec>



Membros da Banca de Exame da Dissertação de Mestrado do Engenheiro Civil **HÉLIO GUIMARÃES ARAGÃO**, intitulada **ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ-MOLDADAS PRODUZIDAS COM CONCRETO RECICLADO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas, no dia 19 do mês de setembro do ano de 2007, às 8 horas e trinta minutos, na Sala de Aula do PPGEC/CTEC/UFAL.

MEMBROS DA BANCA:

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
 Orientador – CTEC/UFAL
 CPF: 304.363.624

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
 Co-orientador – UEFS
 CPF: 549.925.915-15

Prof.ª Dr.ª Mônica Batista Leite Lima
 UEFS
 CPF: 650.062.835-72

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes
 CTEC/UFAL
 CPF: 468.814.504-78

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu força e sabedoria, necessárias para a conclusão deste trabalho.

A minha esposa Uilma, pela compreensão, carinho e incentivo, dedicados ao longo desta caminhada, fundamentais para a concretização deste sonho.

Aos meus pais, Elio e Mara, pelo apoio total e irrestrito em todas as fases da minha vida, pela educação e pelo exemplo de vida.

Aos meus irmãos Lívia e Helder, pelo companheirismo de sempre e pelas palavras de incentivo.

A minha sobrinha Ayane, pelos momentos de descontração e brincadeiras.

A minha sogra Dilma, ao meu sogro José Carlos, aos meus cunhados Robson Torres e Neto, e as minhas cunhadas Lara e Maria Clara, pelo carinho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima, por sua dedicação, sabedoria, respeito e amizade.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima, por sua dedicação, amizade, sabedoria e indispensável ajuda nas realizações dos ensaios.

Aos professores Geraldo Barros Rios e Clodoaldo Freitas, por terem despertado em mim, ainda na graduação através de aulas magníficas, o interesse pela área de estruturas.

À Engenheira Professora Msc Julianne Carvalho, pela indicação no mestrado.

À funcionária Cléo, pelo acompanhamento constante das nossas atividades.

À todos os professores do curso de mestrado, pelas valiosas informações passadas durante o curso.

Aos colegas Osvaldo, Karivaldo, Luciano, Pedro, Andresson e Lucas, que tornaram o convívio o mais agradável possível durante todo o período do curso.

Aos professores do curso de construções prediais do CEFET-UNED/SE pelo grande apoio.

À colega professora do CEFET-UNED/SE, Ana Patrícia, pela indicação no mestrado.

Ao amigo Luciano Melo que durante o primeiro ano do curso em Maceió, tornou sua companhia agradável e inesquecível.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia, pelo auxílio à pesquisa, indispensáveis para a realização dos ensaios.

Aos funcionários do laboratório de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana, pelo apoio na execução dos ensaios.

RESUMO

A utilização do concreto reciclado com substituição dos agregados naturais por agregados reciclados oriundos do beneficiamento do resíduo de construção e demolição (RCD) é uma das alternativas mais promissoras para redução do impacto ambiental e do consumo de energia do setor da Construção Civil. No entanto, para que essa solução seja aplicada em larga escala é preciso que esse novo material possa ser utilizado na produção de elementos estruturais, que representam a maior parcela do consumo do concreto. Neste trabalho, foi avaliado experimentalmente o comportamento mecânico de lajes pré-moldadas, através do ensaio de vigas T e de lajes pré-moldadas de concreto armado, submetidas a ensaio de flexão em 4 pontos, produzidas com concreto reciclado utilizando 50% e 100% de substituição do agregado natural por reciclado. Buscando avaliar e verificar a viabilidade técnica da utilização de RCD no concreto para a produção de tais elementos. Verifica-se que o emprego do concreto reciclado com 50% e 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos, é viável para a fabricação de lajes pré-moldadas.

Palavras-Chave: **concreto reciclado; resíduo de construção e demolição; elementos estruturais.**

ABSTRACT

The use of recycled concrete with substitution of the natural aggregate by recycled aggregate from construction and demolition waste (CDW) is one of the most promising alternatives for reduction of the environmental impact of the construction industry. However, for this solution be applied in wide scale it is necessary that new material can be used in the production of structural elements, which represent the largest portion of the concrete consumption. In this work, the mechanical behaviour of flags and T beams, formed by a precast element and a layer of reinforced concrete, submitted to flexural test. To produce the upper concrete layer recycled aggregates were used. The substitution rates of fine and coarse natural aggregate for recycled ones were 50% and 100%.

Keywords: recycled concrete, construction and demolition waste, structural elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O edifício do meio ambiente; 1º edifício do Reino Unido a incorporar a tecnologia de concreto usinado com a utilização de agregados reciclados. (LEVY e HELENE, 2002).....	6
Figura 2 - Piso de alta resistência do Laboratório de Cardinton construído especialmente para analisar o efeito causado por substituição em massa de 20% de agregados reciclados de concreto e alvenaria de baixa qualidade (LEVY e HELENE, 2002).....	7
Figura 3 - Demolição do piso existente no terreno da Obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)	8
Figura 4 - Usina de reciclagem no canteiro da obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)	9
Figura 5 - Contramarcos de janelas produzidos com RCD e empregados na obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)	9
Figura 6 - Laje formada por vigotas pré-moldadas (BORGES, 1997).....	12
Figura 7 - Seções transversais de lajes pré-moldadas - NBR 14859-1-(ABNT-2002)	13
Figura 8a – Habitação popular executada com laje pré-moldada tipo trilho na cidade de Aracaju-SE.	14
Figura 8b – Detalhe da vigota pré-moldada tipo trilho utilizada em habitação popular.	14
Figura 9 - Seção transversal da laje pré-moldada com vigotas tipo trilho em concreto armado.	15
Figura 10 - Elementos de Enchimento - NBR 14859-1-(ABNT-2002).....	16
Figura 11 - Dimensões, em cm, do bloco cerâmico utilizado.....	17
Figura 12 – Representação esquemática do escoramento de uma laje pré-moldada.....	18
Figura 13 - Escoramento de lajes pré-moldadas.	19
Figura 14 - Laje nervurada sem o elemento de enchimento (ATEX do Brasil).....	20

Figura 15 - Detalhe de uma laje nervurada.....	21
Figura 16 - Seção T equivalente para as lajes pré-moldadas.	24
Figura 17- Situações analisadas – (CARVALHO e FIGUEIREDO -2004)	26
Figura 18 – Domínios de estado limite último de uma seção transversal.....	28
Figura 19 – Seção T com mesa comprimida.....	29
Figura 20 – Seção T com a mesa e parte da nervura comprimidos.....	30
Figura 21 - Curvatura de um elemento fletido.....	32
Figura 22 - Viga em concreto armado simplesmente apoiada sob ações de serviço- (CARVALHO e FIGUEIREDO 2004)	34
Figura 23 - Gráfico momento x deslocamento de um elemento de concreto armado sob flexão.....	35
Figura 24 - Seção no estágio I, sem considerar a presença da armadura.....	37
Figura 25- Seção no estágio I, com armadura.	38
Figura 26 - Seção no estágio II, com armadura longitudinal As.....	39
Figura 27 - Caracterização gravimétrica do resíduo.....	41
Figura 28 - Agregado graúdo reciclado.....	42
Figura 29 - Agregado miúdo reciclado.....	42
Figura 30 – Seção T utilizada no ensaio.....	45
Figura 31 – Seção T após a moldagem antes do ensaio.....	46
Figura 32 – Forma de madeira utilizada para a moldagem da viga T.....	47
Figura 33 – Seção da laje.....	48
Figura 34 – Laje após a moldagem.....	48
Figura 35 – Armação da vigota.....	49
Figura 36 – Armadura de distribuição.....	49
Figura 37 – Fôrma utilizada para a moldagem da laje.....	50
Figura 38 a) Fôrma da vigota.....	51
Figura 38 b) Espaçadores plásticos.....	51
Figura 39 - Betoneira utilizada para a fabricação dos concretos.....	51
Figura 40 – Moldagem das vigotas.	52
Figura 41 – Ensaio de abatimento de cone.....	52
Figura 42 – Mesa vibratória utilizada para adensamento das vigotas.....	53
Figura 43 – Vigotas após a vibração.....	53
Figura 44 – Laje pronta para ser concretada.....	54
Figura 45 – Concretagem da Laje.....	55

Figura 46 – Adensamento da laje através de vibrador.....	55
Figura 47 – Transporte da laje até o local do ensaio.....	56
Figura 48 – Momento do posicionamento da laje no local do ensaio.....	57
Figura 49 – Detalhe do içamento.....	57
Figura 50 – Esquema de carregamento das vigas T.....	58
Figura 51 – Esquema de carregamento das lajes.....	59
Figura 52 – Sistema de aquisição de dados.....	60
Figura 53 – Rotação do elemento estrutural no apoio.....	61
Figura 54 – Esquema de carregamento das vigas T.....	62
Figura 55 – Aparato utilizada no ensaio da viga T.	62
Figura 56 – Instrumentação utilizada no ensaio da viga T.....	63
Figura 57 - Esquema de carregamento das lajes.....	63
Figura 58 – Aparato utilizado no ensaio das lajes.....	64
Figura 59 – Laje com deflexão excessiva.....	65
Figura 60 – Gráfico momento x deslocamento para as três vigas T.....	67
Figura 61 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto de referência.....	71
Figura 62 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto reciclado com 50% de substituição.....	71
Figura 63 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto reciclado com 100% de substituição.....	72
Figura 64 – Gráfico momento x deslocamento para as séries L1, L2, L3.....	74
Figura 65 – Deslocamentos verticais na direção longitudinal das lajes L1, L2, L3 até a flecha limite de 8,0 mm.....	77
Figura 66 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L1.....	79
Figura 67 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L2.....	79
Figura 68 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L3.....	80
Figura 69 - Gráfico força x deslocamento transversal para os 3 tipos de painéis – (LATTERZA-1998)	81
Figura 70 - Configuração das fissuras da laje de referência	82

Figura 71 - Fotografia da laje de referência fissurada.	82
Figura 72 - Configuração das fissuras da laje produzida com concreto RCD- 50%.....	83
Figura 73 - Fotografia da laje RCD-50% fissurada.	83
Figura 74 - Configuração das fissuras da laje produzida com concreto RCD- 100%.....	84
Figura 75 - Fotografia da laje RCD-100% fissurada.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Altura total da laje - NBR 14859-1(ABNT-2002)	15
Tabela 2 - Dimensões, em cm, padronizadas dos elementos de enchimento NBR 14859-1-(ABNT-2002).	16
Tabela 3 - Limites de deslocamentos para aceitabilidade sensorial - NBR-6118 (ABNT-2004).	23
Tabela 4 – Massa específica e módulo de finura dos agregados	43
Tabela 5 – Traços dos concretos.	43
Tabela 6 - Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.....	44
Tabela 7 – Características de cada série.....	45
Tabela 8 – Dimensões reais das seções T ensaiadas.....	46
Tabela 9 – Características das vigas T.....	66
Tabela 10 – Cargas de serviço teórica e experimental.	67
Tabela 11 – Características das Lajes.....	73
Tabela 12 – Cargas de serviço teórica e experimental.....	73
Tabela 13 – Espaçamento médio entre as fissuras e quantidade total de fissuras das lajes.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
<	Menor
≤	Menor ou igual
≥	Maior ou igual
a	Deslocamento vertical-Flecha
a/c	Relação água/cimento
As	Área de aço
bf	Largura colaborante da mesa
bw	Largura da nervura
cm	Centímetro
d _{med}	Altura útil média
E _c	Módulo de elasticidade secante do concreto
E _s	Módulo de deformação longitudinal do aço
f _c	Resistência à compressão do concreto
f _{ct}	Resistência à tração direta do concreto
g	Grama
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GPa	Giga Pascal
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGR	Agregado Graúdo Reciclado
AMR	Agregado Miúdo Reciclado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP –V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
EPS	Poliestireno Expandido
ELS	Estado Limite de Serviço
NBR	Norma Brasileira Registrada
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
CAPÍTULO 2 – CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS	4
2.1 Histórico	4
2.2 Aplicações	6
2.3 Propriedades mecânicas do concreto reciclado	10
CAPÍTULO 3 - LAJES FORMADAS POR ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS	12
3.1 Conceitos	12
3.2 Prescrições Construtivas	15
3.2.1 Altura Total	15
3.2.2 Elementos de Enchimento	16
3.2.3 Execução	17

3.3 Análise Estrutural de Lajes Pré-moldadas	20
3.3.1 Lajes Nervuradas	20
3.3.2 Critérios de Dimensionamento	24
3.3.3 Momento Limite para uma seção T	27
3.3.4 Armadura Longitudinal	30
3.3.5 Cálculo da armadura da mesa	31
3.3.6 Cálculo da armadura de cisalhamento	31
3.4. Deflexões de Lajes	32
3.4.1 Introdução	32
3.4.2 Cálculo de flechas em vigas segundo a NBR6118:2004	35
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 Materiais	41
4.1.1 Agregado Reciclado	41
4.1.2 Concreto	43
4.2 Produção dos Elementos Estruturais	44
4.2.1 Vigas T	45
4.2.2 Lajes	47
4.3 Métodos de Ensaio	58
4.3.1 Ensaio das Vigas T	61
4.3.2 Ensaio das Lajes	63
CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
5.1 Análise das Vigas T	66
5.2 Análise das Lajes	72
CAPÍTULO 6- CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6.1 Conclusões	86
6.2 Sugestões para Futuras Pesquisas	87
REFERENCIAS	88
ANEXO – Exemplos Numéricos	92

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A geração e a disposição de resíduos sólidos provenientes de construções e demolições é um dos graves problemas urbanos atuais, refletindo diretamente na qualidade ambiental dos municípios.

Recentemente, um processo de conscientização ambiental, aliada à necessidade de redução de custos, vem se instalando no país, refletindo-se na indústria da construção civil que através da implantação de programas de gestão pela qualidade, procura diminuir a geração de resíduos, ou mesmo reaproveitá-los no próprio canteiro de obra. Aliado a isso, a Resolução do CONAMA nº 307/2002, obriga, por parte dos geradores, a correta destinação e beneficiamento do resíduo da construção e demolição que não poderá ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota-fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei. O reuso do material reciclado pode ser feito na pavimentação urbana, fabricação de blocos, fabricação de lajes pré-moldadas e outras aplicações.

Nesse cenário, a reciclagem surge como uma das formas de solução para o problema gerado pelo entulho, tornando-o novamente utilizável, principalmente no próprio setor da construção civil, onde há grande potencialidade de absorção desses resíduos. Procurando definir usos para os reciclados graúdos e miúdos, como agregados para concreto, com os devidos cuidados e restrições que lhes cabem, este trabalho tem como objetivo principal estudar a viabilidade do uso de concreto reciclado de construção e demolição (RCD) para produção de lajes pré-moldadas. O material a ser desenvolvido se aplica à execução de lajes pré-moldadas de piso e forro em habitações de interesse social, que possuem um ou mais pavimentos.

As lajes pré-moldadas são elementos construtivos bastante utilizados em alguns tipos de habitações de interesse social, já que esse sistema estrutural, formado por vigotas e elementos de enchimento pré-fabricados, é um sistema que serve de forma para a capa de concreto que é moldada no local da obra, além de ser um sistema de fácil montagem, e consumir uma quantidade reduzida de escoras. A incorporação do RCD na produção de elementos de

concreto pré-moldados poderá reduzir significativamente o consumo de energia e o consumo de agregados naturais.

Dessa forma, o estudo do comportamento mecânico destes concretos pré-moldados confeccionados a partir de agregados reciclados de RCD é de fundamental importância para a utilização segura dos mesmos e um avanço na questão ambiental, econômica e social da construção civil.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

- Demonstrar a potencialidade da utilização do concreto reciclado, como material estrutural.
- Avaliar o desempenho estrutural, à flexão, de lajes pré-moldadas confeccionados com concretos utilizando-se a fração graúda e miúda do material reciclado como substituição parcial ou total do material natural.
- Verificar a validade da NBR 6118 (ABNT, 2004) para o dimensionamento de peças estruturais fabricadas com concretos reciclados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos, de forma a sintetizar toda a pesquisa e esclarecer os principais aspectos trabalhados, como segue:

No capítulo 1 apresenta-se a introdução do trabalho, os aspectos relevantes do tema, os objetivos e apresentação da dissertação.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre o concreto reciclado, destacando-se o seu histórico, as suas propriedades mecânicas e aplicações.

O capítulo 3 trata das lajes formadas por elementos pré-moldados, neste capítulo são descritas algumas prescrições construtivas e também é feita uma análise estrutural de lajes pré-moldadas, verificando-se os critérios de dimensionamento, a determinação da armadura longitudinal e o cálculo de flechas em lajes, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2004).

O capítulo 4 apresenta os materiais e métodos. Descreve os materiais utilizados no trabalho e os métodos de ensaio para o estudo do comportamento à flexão das vigas T e das lajes pré-moldadas.

No capítulo 5 é feita a apresentação e análise dos resultados dos ensaios. Esta análise consiste na comparação dos resultados dos ensaios à flexão dos elementos estruturais produzidos com concreto reciclados, com os elementos estruturais produzidos com o concreto de referência. É feita ainda, uma análise teórica do comportamento das vigas T e das Lajes, os resultados teóricos foram comparados com os resultados experimentais.

No capítulo 6 são feitas as considerações finais sobre os resultados obtidos no trabalho, e em seguida, apresentam-se recomendações para futuras pesquisas.

Finalizando-se, apresentam-se as referências utilizadas em todo o desenvolvimento do trabalho, bem como um anexo com exemplos de determinação de flechas em lajes produzidas com concretos convencionais e lajes produzidas com concretos reciclados.

CAPÍTULO 2 – CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

2.1 HISTÓRICO

SCHULZ e HENDRICKS, citados por LEITE (2001), mostram registros da utilização de alvenaria britada para produção de concreto desde a época dos romanos. Igualmente nesta época era usada uma mistura de argilas, cinzas vulcânicas, cacos cerâmicos e pasta aglomerante de cal, que servia como uma camada para pavimentos, sobre a qual efetuava-se o revestimento final do pavimento (BRITO FILHO, citado por LEITE, 2001).

A produção de concretos com agregados reciclados ocorre a partir de 1928, quando começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o efeito do consumo de cimento, consumo de água e granulometria dos agregados de alvenaria britada e de concreto. Porém a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial, na reconstrução de cidades Européias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombros ou entulho resultante, foi britado para produção de agregados, visando atender à demanda na época WEDLER e HUMMEL, citados por LEVY e HELENE, (2002). Com base neste fato LEVY e HELENE,(2002) afirmam que 1946 marca o início do desenvolvimento da reciclagem de resíduos de construção e demolição na construção.

Em 1977, no Japão, foram propostas as primeiras normas para utilização de agregado reciclado de concreto. Depois de 1982 as normas ASTM C 32-82 e C 125-79 incluíram o agregado graúdo reciclado de concreto nas especificações de agregado para concreto (HANSEN, citado por LEITE, 2001). A partir da década de 80, normas e recomendações também entraram em vigor nos Países Baixos, na Dinamarca, na Rússia e na Alemanha, entre outros. E mais estudos estão sendo desenvolvidos em outros países como, França, Espanha, Bélgica, Noruega, Arábia Saudita, China, entre outros (QUEBAUD, BALLISTA e MACHADO Jr., citados por LEITE, 2001).

No Brasil, o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído em 1986, pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Sua pesquisa consistiu em estudar o uso do reciclado para produção de argamassas (PINTO,1986).

Segundo HANSEN, citado por LIMA (1999), para que se aplique um agregado no concreto é preciso que este atenda às exigências gerais de algumas especificações:

- Deve ser suficientemente resistente para o uso no tipo de concreto em que for empregado;
- Deve ser dimensionalmente estável conforme as modificações de umidade;
- Não deve reagir com o cimento ou com o aço usado nas armaduras;
- Não deve conter impurezas reativas;
- Deve ter forma de partículas e granulometria adequadas à produção de concreto com boa trabalhabilidade.

Para utilização de material reciclado como agregado para concreto devem ser realizadas misturas experimentais do mesmo modo que estas misturas são feitas para concretos convencionais. Deve ser estabelecida a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, porém, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível (LEITE, 2001).

As características dos concretos com reciclados variam mais que a de concretos convencionais, pois além das variações ligadas à relação a/c e ao consumo de aglomerantes, há ainda as mudanças determinadas por variações na composição e outras características físico-químicas dos resíduos reciclados. Apesar disto, pode-se obter concretos com reciclado adequados a diversos serviços de construção, desde que se tomem cuidados com a produção do agregado e do novo concreto (escolha do resíduo, classificação e separação dos contaminantes, controle de qualidade, adoção de procedimentos corretos de aplicação, análise das condições de exposição e outros cuidados) (LIMA, 1999).

2.2 APLICAÇÕES

Como o concreto reciclado já vem demonstrando um bom desempenho numa série de usos em obras urbanas, com a obtenção de custos bastante vantajosos, é possível programar sua utilização em concretos para: bases de pavimentos, estruturas residenciais com $f_{ck} < 20\text{MPa}$ e produção de artefatos pré-moldados em concreto (tubos, lajes, blocos).

No Japão, dois terços do resíduo de concreto demolido já é utilizado para pavimentação de rodovias. Todavia, já existe um plano para que seja estimulado o uso deste resíduo para produção de novos concretos (VÁSQUEZ e BARRA, 2000). Muitos países estão adotando esta solução: utilizar cada vez mais os resíduos de construção, e tentar incorporá-lo em usos cada vez mais nobres.

A partir de 1988 a Comunidade Européia executou um grande número de obras em concreto obtido a partir de agregados reciclados, de concreto, de alvenaria, assim como da mistura de ambos. Algumas dessas obras são obras de grande porte como pode ser visto nas Figuras 1 e 2 (LEVY e HELENE, 2002).



Figura 1 - O edifício do meio ambiente; 1º edifício do Reino Unido a incorporar a tecnologia de concreto usinado com a utilização de agregados reciclados (LEVY e HELENE, 2002)



Figura 2 - Piso de alta resistência do Laboratório de Cardinton construído especialmente para analisar o efeito causado por substituição em massa de 20% de agregados reciclados de concreto e alvenaria de baixa qualidade. (LEVY e HELENE, 2002)

No Brasil, as administrações municipais de algumas cidades como Belo Horizonte e cidades do interior paulista, tem recorrido a reciclagem de resíduos de construção e demolição como forma de equacionar o problema da geração de entulhos, que vem se transformando em problema de grandes proporções nas maiores metrópoles do país.

LATTERZA (1998), realizou um estudo com a utilização de concreto produzido com agregado graúdo reciclado na fabricação de painéis leves de vedação. Neste estudo foram feitas avaliações do desempenho dos painéis nos ensaios à flexão com a finalidade de se obter uma aplicação prática do concreto reciclado. O autor concluiu que o emprego do agregado graúdo reciclado em substituição, total ou em parte, do equivalente natural em concretos de baixa resistência é perfeitamente viável.

Em Guarulhos, interior de São Paulo, um piso de concreto com 12.500m^3 de volume existente no terreno onde foi construído o condomínio Villaggio Maia, foi totalmente reciclado, sendo o agregado utilizado sob a forma de blocos de fundação e de concreto, muros, lajes, contramarcos de janelas e outros pré-moldados (Figuras 3 a 5), (CAPELLO, 2006).

Ainda segundo CAPELLO (2006), uma situação semelhante aconteceu numa obra da Racional Engenharia, no centro do Rio de Janeiro. A construção do edifício Torre Almirante, com 36 pavimentos, implicou na demolição de um esqueleto de nove pavimentos, o que gerou 7 mil m³ de entulho. A construtora montou uma usina de reciclagem que produziu toda a pavimentação da obra e ainda blocos de concreto que foram utilizados de fato na construção do edifício. Em Curitiba, um projeto-piloto do governo local possibilitou a construção de uma creche a partir dos resíduos gerados na própria obra, incrementados por sobras de outras construções feitas pela empresa Enjiu, vencedora da licitação. Restos de material cerâmico como telhas e tijolos foram reaproveitados e utilizados como emboço e argamassa para assentar tijolo.



Figura 3 - Demolição do piso existente no terreno da Obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)



Figura 4 - Usina de reciclagem no canteiro da obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)



Figura 5 - Contramarcos de janelas produzidos com RCD e empregados na obra do condomínio Villagio Maia (CAPELLO-2006)

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO RECICLADO

a) Resistência à compressão

Uma das propriedades mecânicas mais abordadas e que tem relevância na caracterização do concreto no estado endurecido é a resistência à compressão. Pode-se correlacionar diversas propriedades do concreto, tais como resistência à tração e à abrasão, e módulo de deformação longitudinal com a resistência à compressão.

Em concretos convencionais, produzidos com agregados naturais, densos e resistentes, a resistência à compressão tem enorme influência da porosidade da matriz e da zona de transição. Já em concretos reciclados, nos quais valores de resistência à compressão tendem a ser inferiores a dos convencionais, a ruptura se faz nos agregados, levando-os a serem o elemento determinante nesta propriedade para esses concretos.

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem até 80% de toda mistura (LEITE, 2001).

Segundo XIAO, et. al. (2005), existe um decréscimo na resistência à medida que se aumenta o teor de agregado reciclado. Comparando os valores da mistura sem agregado reciclado e a com 100%, este decréscimo atinge cerca de 19%.

LIMA (1999), em seus estudos, concluiu que as perdas de resistência dos concretos com reciclado em relação ao convencional mostraram-se diferentes nas pesquisas nacionais (brasileiras), variando de inexistentes até 50%.

b) Resistência à tração

No estudo elaborado por LATTERZA e MACHADO Jr. (2003), pode-se concluir que a qualidade do agregado graúdo não influenciou os resultados dos ensaios na graduação estudada (dimensão máxima de 9,5 mm). Para os autores, os concretos com agregados reciclados tiveram desempenho igual, ou ligeiramente superior, caso do concreto com 50% de substituição. Segundo os

autores, este fato, é devido à boa aderência entre a pasta e o agregado reciclado. Reforçando essa hipótese, os autores observaram nos ensaios que tanto na compressão diametral, quanto na flexão, as rupturas davam-se através dos agregados.

SHETHAMARAI e MANOHARAN (2003), obtiveram, em seus estudos, valores de resistência à tração de concretos reciclados de material cerâmico menores que os valores do concreto convencional.

c) Módulo de deformação longitudinal

Para RAVINDRARAJAH, citado por LEVY (2001), o módulo de deformação longitudinal dos concretos com agregados reciclados é menor do que o dos concretos com agregados naturais e além do mais esta diferença é maior para resistências à compressão mais elevadas. Tais reduções podem chegar a 40 % e quanto maior o teor de substituição do agregado gráudo natural pelo reciclado, e quanto menor a resistência dos concretos, maiores são as reduções observadas no módulo do concreto reciclado em relação ao de referência, de acordo com LEITE (2001).

LATTERZA e MACHADO Jr. (2003), em seu estudo sobre concreto com agregado gráudo reciclado, relataram que, quanto ao módulo de deformação longitudinal, não se observou variação entre o concreto de referência e os concretos contendo 100% e 50% de gráudos reciclados, ao contrário da análise feita pelos autores quanto à resistência à compressão. Isto pode ser devido à pasta que penetra nos poros superficiais dos reciclados, garantindo maior interação entre a pasta e o agregado. A “cura úmida interna” também pode favorecer a aderência entre a matriz de cimento e o agregado. Ainda segundo os autores, para dimensão máxima dos grãos de 9,5 mm, o comportamento, quanto às propriedades elásticas, foi semelhante para os três concretos (100% reciclado; 100% natural; e 50% de reciclado e 50%de natural).

JUAN (2004), baseado em resultados de ensaios, estabeleceu as seguintes equações para o cálculo do módulo de elasticidade em concretos reciclados com 50% e 100% de substituição :

$$E_c(50\%) = 8936 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}(50\%)} \text{ com } f_{cm}(50\%) \text{ em MPa} \quad (1)$$

$$E_c(100\%) = 7017 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}(100\%)} \text{ com } f_{cm}(100\%) \text{ em MPa} \quad (2)$$

CAPÍTULO 3 - LAJES FORMADAS POR ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS

3.1 CONCEITOS

As lajes pré-moldadas são aquelas formadas por uma parte pré-moldada de concreto armado (vigotas), um elemento de enchimento (bloco cerâmico ou poliestireno expandido-EPS) e uma capa de concreto moldada no local (Figura 6).

Esse tipo de Laje é um elemento estrutural amplamente usado em todas as regiões do país, já que as vigotas e os elementos de enchimento, por serem pré-fabricadas, são de fácil montagem e servem de forma para a capa de concreto que é moldada no local da obra. Essa característica para esse tipo de laje também traz redução na quantidade de escoras utilizadas, quando comparada com a laje maciça.

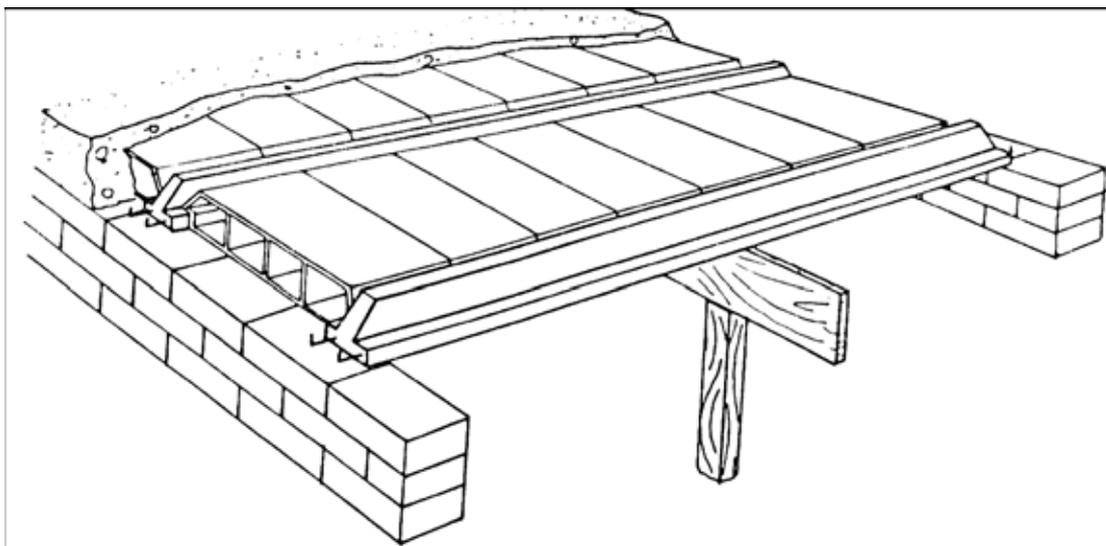
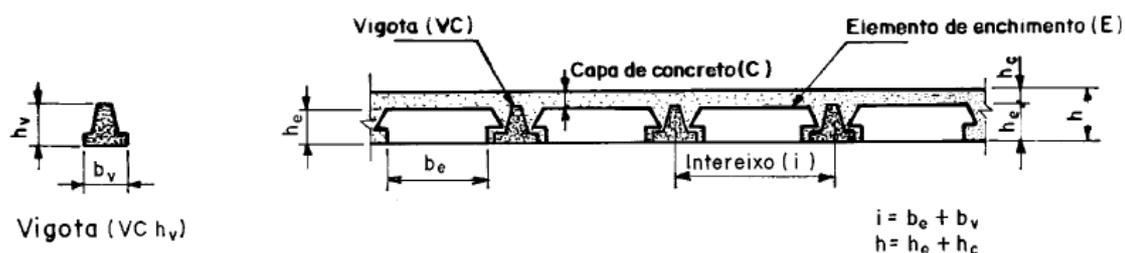


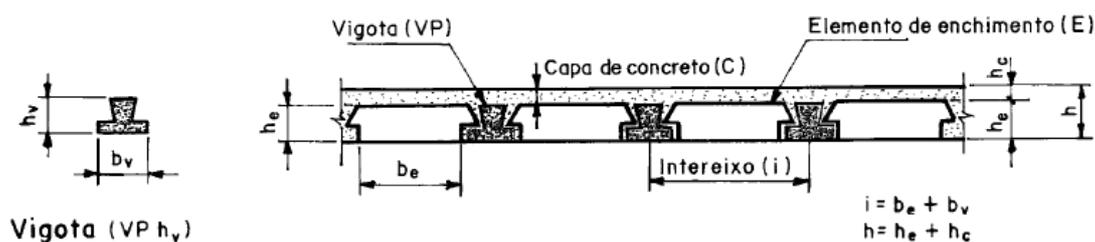
Figura 6 - Laje formada por vigotas pré-moldadas (BORGES, 1997)

Estruturalmente as lajes formadas por vigotas pré-moldadas, em função de sua geometria, são consideradas lajes nervuradas, e apesar do grande volume de concreto moldado no local, são caracterizadas como lajes pré-moldadas, portanto, laje pré-moldada nervurada.

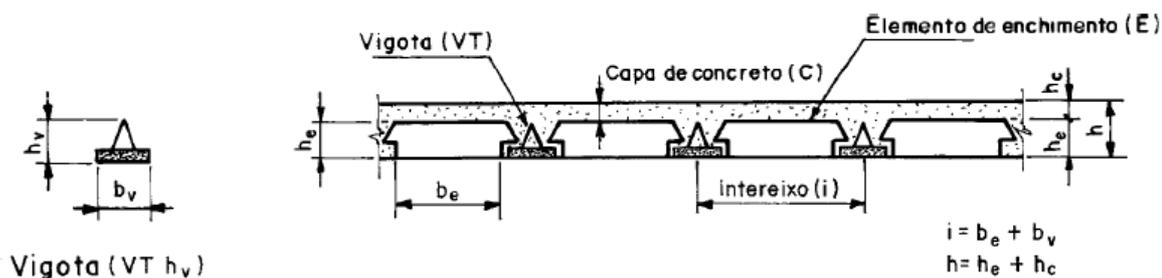
A Figura 7 apresenta as seções transversais para as lajes pré-moldadas especificadas pela NBR 14859-1 (ABNT, 2002) .



a) Lajes com vigotas tipo trilho em concreto armado



b) Lajes com vigotas tipo trilho em concreto protendido



c) Lajes com vigotas tipo treliça

Figura 7: Seções transversais de lajes pré-moldadas
NBR 14859-1-(ABNT-2002)

As lajes mostradas nas Figuras 7a e 7c são as mais utilizadas, sendo a laje com vigotas tipo trilho em concreto armado para vãos menores, atingindo um valor de até 5m, e a laje com vigota tipo treliça para vãos maiores, atingindo um valor de até 12m .

Neste trabalho serão abordadas as lajes formadas pelos seguintes elementos: vigotas pré-moldadas tipo trilho, bloco cerâmico como elemento de enchimento, armadura de distribuição e uma capa de concreto moldada no local como mostra a Figura 7a. Elas são utilizadas em pequenas obras e em obras de conjuntos habitacionais, como mostram as Figuras 8a e 8b.



Figura 8a – Habitação popular executada com laje pré-moldada tipo trilho na cidade de Aracaju-SE



Figura 8b – Detalhe da vigota pré-moldada tipo trilho utilizada em habitação popular

3.2 PRESCRIÇÕES CONSTRUTIVAS

3.2.1 ALTURA TOTAL

A figura 9 mostra a seção transversal da laje pré-moldada com vigotas tipo trilho em concreto armado, onde h_c é a altura da capa de concreto, h_o é a altura do elemento de enchimento, A_s é a armadura longitudinal da vigota e A_s distribuição é a armadura de distribuição da capa.

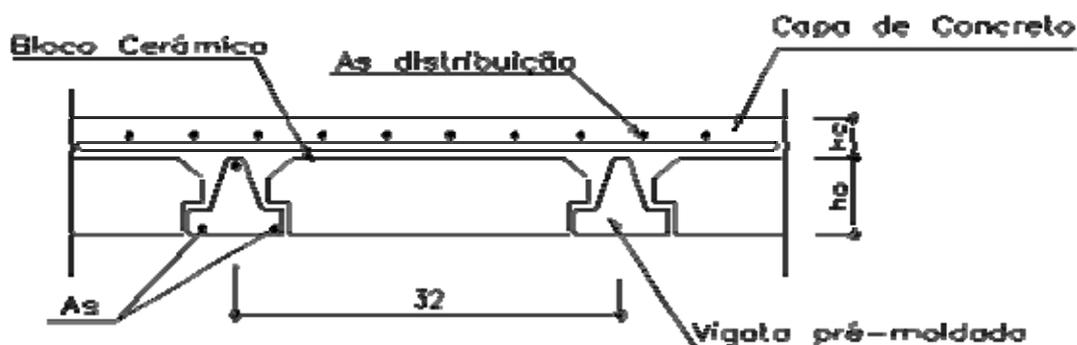


Figura 9 - Seção transversal da laje pré-moldada com vigotas tipo trilho em concreto armado

Segundo a NBR 14859-1(ABNT-2002), as alturas totais das lajes (h_o+h_c) variam, de acordo com as alturas de enchimento, como mostra a Tabela 1. Outras dimensões podem ser utilizadas, desde que atendidas todas as disposições da norma e que o fornecedor e comprador estejam de acordo.

Tabela 1-Altura total da laje - NBR 14859-1(ABNT-2002)

Altura do elemento de enchimento (h_o) - cm	Altura total da Laje (h_o+h_c) - cm
7,0	10,0; 11,0; 12,0
8,0	11,0; 12,0; 13,0
10,0	14,0; 15,0
12,0	16,0; 17,0
16,0	20,0; 21,0
20,0	24,0; 25,0
24,0	29,0; 30,0
29,0	34,0; 35,0

Neste trabalho foram utilizadas as lajes com altura total de 11cm, sendo o valor de h_o igual a 7cm e h_c igual a 4 cm.

3.2.2 ELEMENTOS DE ENCHIMENTO

Os elementos de enchimento devem ter as dimensões padronizadas, definidas na Tabela 2 e Figura 10, podendo ser maciços ou vazados e compostos por materiais leves, suficientemente rígidos, que não produzam esforços ao concreto e às armaduras.

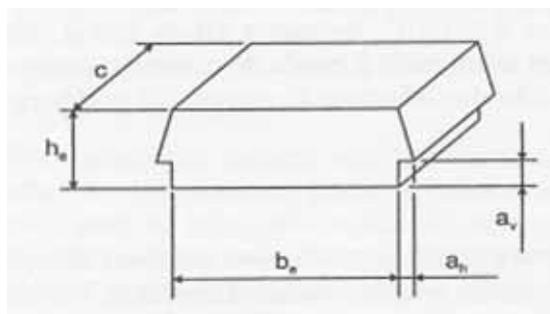


Figura 10 - Elementos de Enchimento - NBR 14859-1-(ABNT-2002)

Tabela 2-Dimensões, em cm, padronizadas dos elementos de enchimento
NBR 14859-1-(ABNT-2002)

Altura (h_e) nominal		7,0 (mínima); 8,0; 9,5; 11,5; 15,5; 19,5; 23,5; 28,5
Largura (b_e) nominal		25,0 (mínima); 30,0; 32,0; 37,0; 39,0; 40,0; 47,0; 50,0
Comprimento (c) nominal		20,0 (mínima); 25,0
Abas de encaixe	(a_v)	3,0
	(a_h)	1,5

No Brasil os elementos de enchimento mais utilizados são os produzidos a partir de poliestireno expandido (EPS) e os blocos cerâmicos.

A Figura 11 mostra o elemento de enchimento adotado neste trabalho, verifica-se que suas dimensões estão de acordo com as especificadas na Tabela 2.

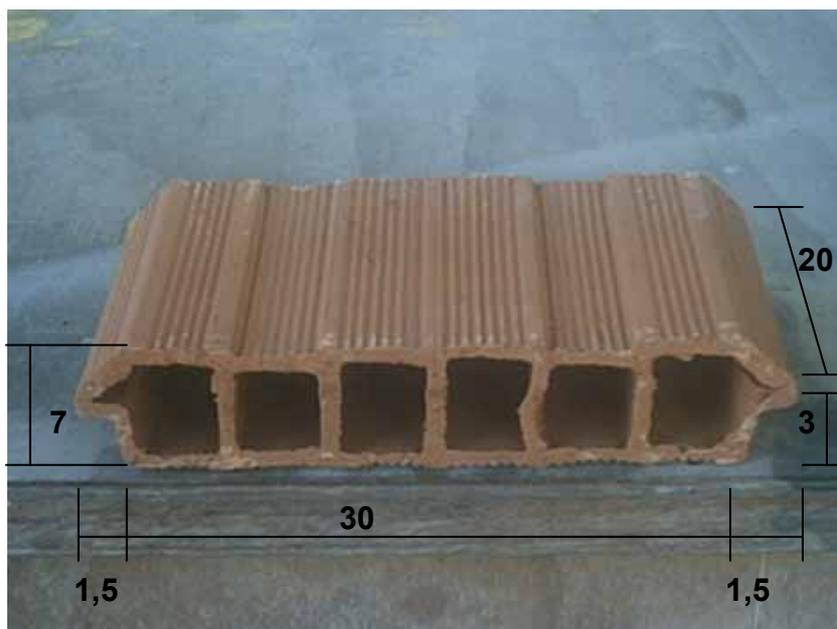
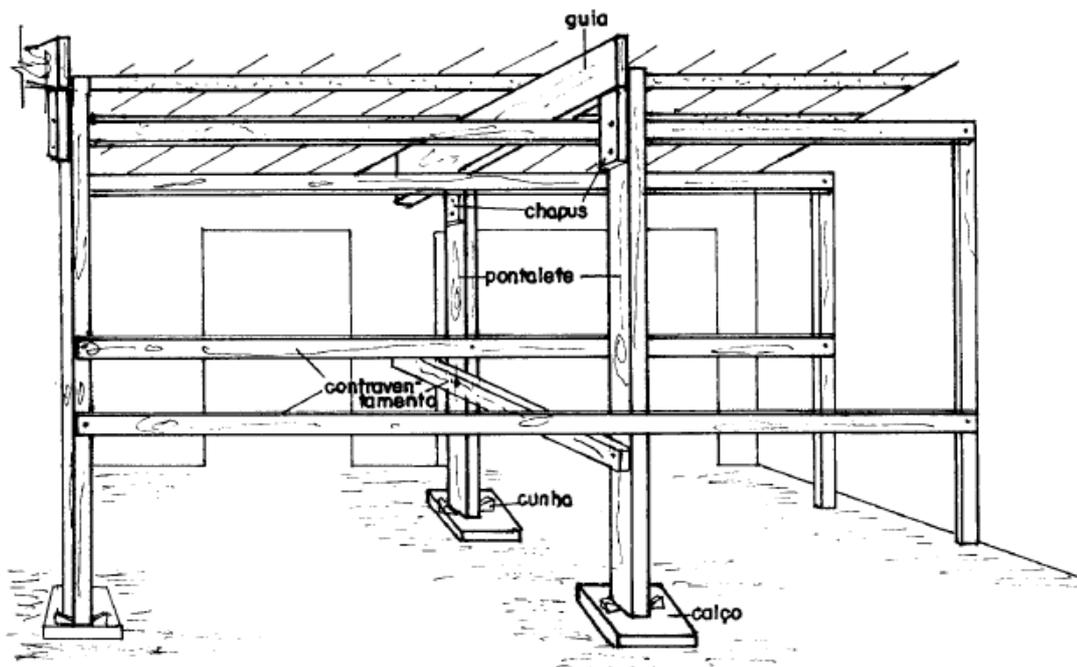


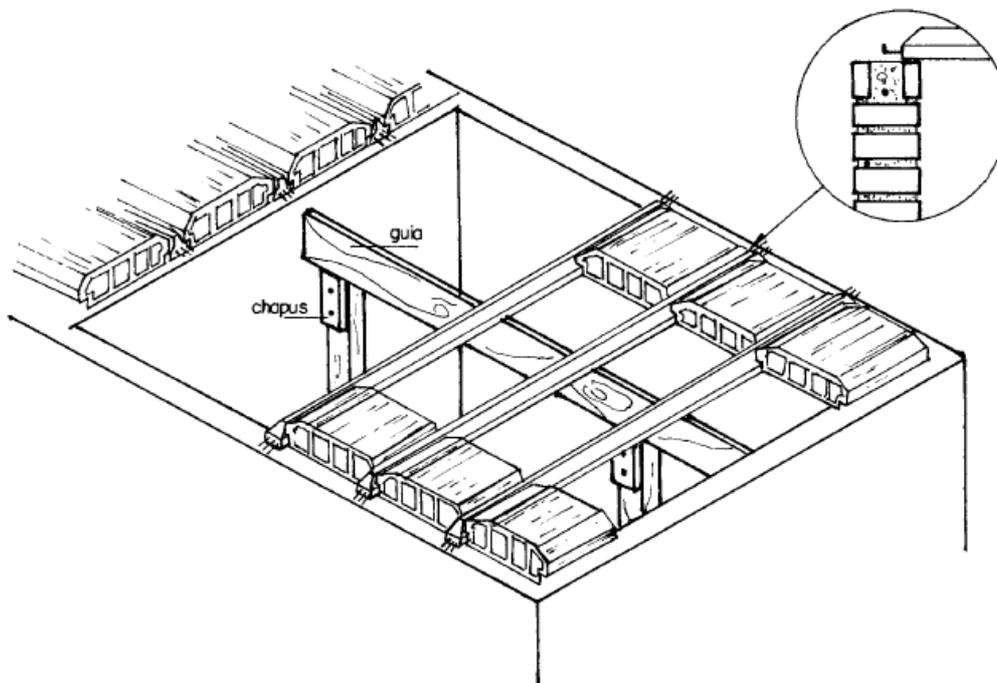
Figura 11 - Dimensões, em cm, do bloco cerâmico utilizado

3.2.3 EXECUÇÃO

Os elementos pré-moldados, nas fases de montagem e concretagem, são elementos resistentes do sistema, e possuem a capacidade de suportar, além de seu peso próprio, a ação dos elementos de enchimento, do concreto da capa e de uma pequena carga acidental. Dessa maneira, o escoramento necessário para executar uma laje desse tipo não requer um grande número de pontaletes ou escoras (Figuras 12a, 12b e 13). Além disso, para executar a concretagem da capa não é necessário o uso de fôrmas, como é o caso das lajes maciças de concreto, pois o elemento de enchimento possui essa função.



a) Detalhe dos apoios e contraventamentos



b) Perspectiva

Figura 12 – Representação esquemática do escoramento de uma laje pré-moldada



Figura 13 - Escoramento de lajes pré-moldadas

As principais vantagens desse sistema são:

- a) Eliminação de fôrmas;
- b) Redução sensível da quantidade de escoramentos;
- c) Utilização de elementos pré-moldados com armaduras pré-incorporadas em ambiente industrial;
- d) Rapidez de execução.

Como desvantagens destacam-se valores dos deslocamentos transversais, bem maiores que os apresentados pelas lajes maciças e a exigência de um cálculo rigoroso, caso seja necessário a localização de paredes sobre a laje sem que exista uma viga como suporte.

3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DE LAJES PRÉ-MOLDADAS

No dimensionamento da laje pré-moldada desconsidera-se a contribuição do elemento de enchimento (bloco cerâmico ou EPS), que não tem função estrutural. Dessa forma, o elemento estrutural passa a ser composto de vigotas mais a capa de concreto possuindo um comportamento semelhante ao de uma laje nervurada.

3.3.1 LAJES NERVURADAS

As lajes nervuradas são lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais podem ser colocados materiais inertes, de forma a tornar plana a superfície externa. Os materiais inertes devem ter peso específico reduzido em comparação com o peso específico do concreto, podendo ser empregados blocos cerâmicos, blocos de concreto leve ou isopor. Alternativamente, como mostra a Figura 14, os espaços entre as nervuras podem ser preenchidos com fôrmas industrializadas que, após sua retirada, deixam à vista as nervuras da laje.



Figura 14 - Laje nervurada sem o elemento de enchimento
(ATEX do Brasil)

De uma maneira geral, as lajes nervuradas são usadas para vencer grandes vãos, sendo necessário formar um sistema estrutural altamente eficiente, constituído por um conjunto de nervuras dispostas em uma ou duas direções, com espaçamentos regulares entre si.

A Figura 15 mostra o detalhe da seção transversal de uma laje nervurada, onde h_f é a altura da capa de concreto, h_t é altura total (altura da capa + altura da nervura), b_w é a largura da nervura, l_o é a distância entre as nervuras e b_f é a largura efetiva da mesa da seção T.

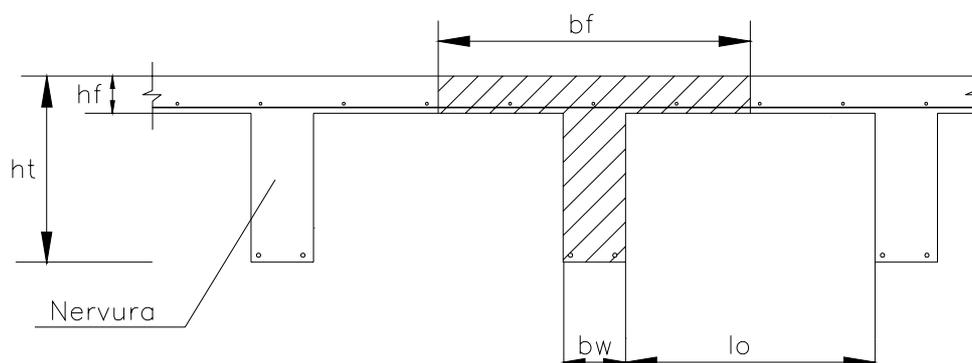


Figura 15 - Detalhe de uma laje nervurada

De acordo com a NBR-6118 (ABNT, 2004), no cálculo de lajes nervuradas devem ser observadas as seguintes prescrições:

- A espessura da mesa, quando não houver tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre nervuras e não menor que 3 cm.
- O valor mínimo absoluto deve ser 4 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5 mm.
- A espessura das nervuras não deve ser inferior a 5 cm.
- Nervuras com espessura menor que 8 cm não devem conter armadura de compressão.

Para o projeto das lajes nervuradas devem ser obedecidas as seguintes condições:

- a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;

b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

Na definição da seção transversal da laje nervurada é feita uma analogia em que a capa de concreto moldado *in loco* é uma laje maciça e as nervuras formam um conjunto de vigas. Utilizando-se os preceitos da NBR 6118 (ABNT-2004), a parte de laje a ser considerada como elemento de viga será determinada, conforme nomenclatura da Figura 15, a partir da seguinte expressão:

$$b_f = b_w + 2.b_1 \quad (3)$$

Onde:

$$b_1 \leq \begin{cases} 0,1a \\ 0,5l_o \end{cases}$$

O valor de l_o é dado pela distância entre as nervuras. E o parâmetro a depende da distância entre momentos fletores nulos, podendo ser estimado em função do comprimento do vão teórico L do tramo, considerado através das seguintes expressões:

- tramo simplesmente apoiado: $a = 1,00.L$
- tramo com momento em uma só extremidade: $a = 0,75.L$
- tramo com momentos nas duas extremidades: $a = 0,60.L$
- tramo em balanço: $a = 2.L$

Conhecido o carregamento atuante, os esforços solicitantes nas lajes isoladas unidirecionais podem ser obtidos considerando o modelo de viga bi-apoiada e quando houver continuidade nos apoios intermediários, pode ser utilizado o modelo de viga contínua desde que se tenha segurança da capacidade da laje em transmitir os momentos fletores negativos.

Mesmo que a laje tenha sido dimensionada simplesmente apoiada, é

recomendada a adoção de uma armadura construtiva sobre os apoios, e com isto reduzir a fissuração da mesma nestas regiões.

O dimensionamento é feito verificando a segurança das lajes nervuradas em relação aos estados limites, de acordo com os preceitos da NBR-6118 (ABNT-2004).

Na verificação do estado limite de deformação excessiva, deve ser utilizada a combinação quase permanente das ações, podendo ser escrita da seguinte maneira:

$$F_{d,ser} = \sum F_{gk} + \psi_2 F_{qk} \quad (4)$$

Onde:

$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço

F_{gk} ações permanentes, podendo ser peso próprio da laje, peso de alvenarias e revestimentos, etc.

F_{qk} ações principais acidentais, podendo ser cargas variáveis, sobrecarga de utilização, etc.

ψ_2 é o fator de redução de combinação quase freqüente para ELS

Os deslocamentos máximos (flechas) medidos a partir do plano que passa pelos apoios estão limitados aos valores fornecidos pela NBR-6118 (ABNT-2004). A Tabela 3 mostra os limites dos deslocamentos para aceitabilidade sensorial.

Tabela 3 - Limites de deslocamentos para aceitabilidade sensorial - NBR-6118 (ABNT-2004)

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$

3.3.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Uma vez obedecidas as prescrições da NBR-6118 (ABNT-2004) para lajes nervuradas, o cálculo da laje pré-moldada pode ser feito como se as vigotas mais a capa de concreto fossem vigas com seção transversal em forma de T conforme é indicado na Figura 16.

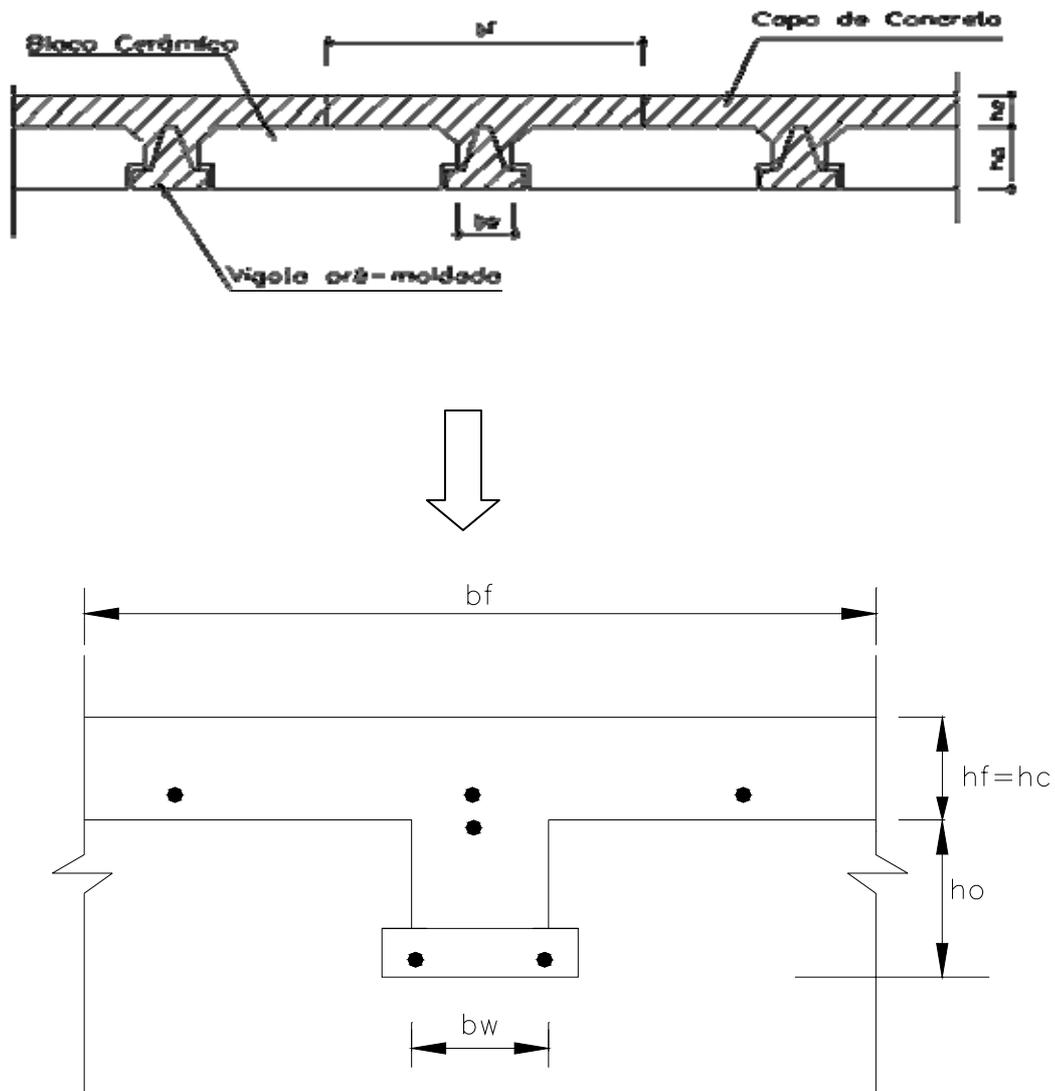


Figura 16 - Seção T equivalente para as lajes pré-moldadas.

Segundo o item 5.4 da NBR 14859-1(ABNT-2002), as vigotas devem ter uma largura mínima tal que resulte, quando montadas em conjunto com os elementos de enchimento, uma nervura com largura mínima de 4,0cm.

Para identificar um processo de cálculo que possa ser utilizado com facilidade, segurança e que resulte em valores próximos aos reais para pavimentos com lajes formadas por vigotas pré-moldadas, foi realizado por CARVALHO e FIGUEIREDO (2004) um estudo teórico que traz uma análise detalhada sobre o comportamento de três situações diferentes (Figura17):

- a) Laje pré-moldada composta de elementos totalmente independentes, ou seja, a laje é modelada como se fosse um conjunto de vigas simplesmente apoiadas onde a capa de concreto apenas aumenta a largura da mesa e, não proporciona rigidez na direção transversal;
- b) Laje pré-moldada devidamente solidarizada com a capa de concreto;
- c) Laje Maciça.

Na Figura 17 as vigas V1, V2, V3 e V4 foram consideradas indeslocáveis na vertical, para efeito de cálculo.

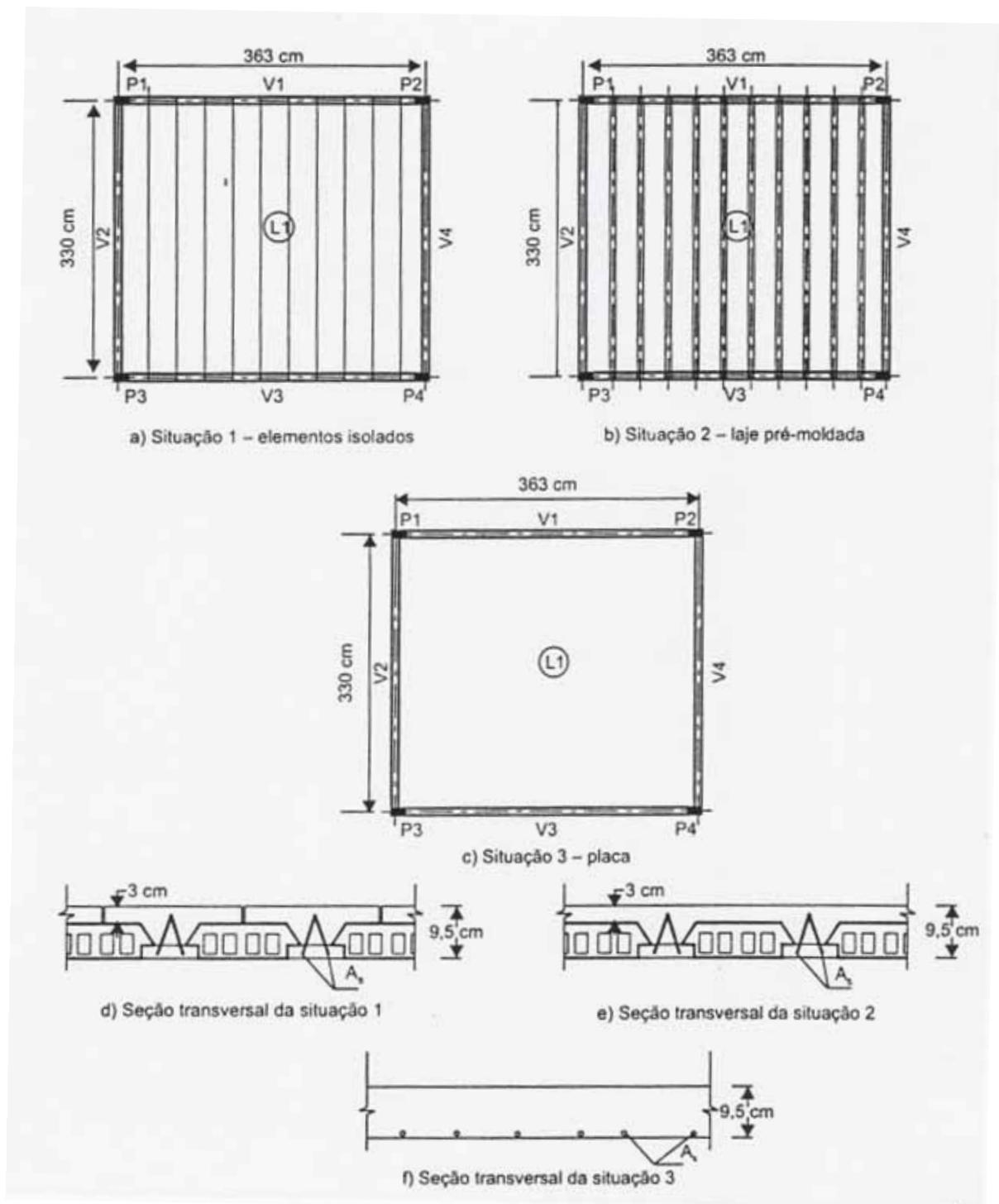


Figura 17- Situações analisadas – (CARVALHO e FIGUEIREDO -2004)

Verificou-se que os deslocamentos são maiores quando todos os elementos trabalham de forma isolada – caso a – e menores quando se considera o efeito de placa – caso c. A laje pré-moldada – caso b – apresentou um comportamento intermediário, porém bem mais próximo do caso a – elementos isolados.

Com base nos resultados anteriores FLÓRIO (2004) conclui que é perfeitamente aceitável a consideração de lajes unidirecionais nervuradas pré-moldadas comportando-se como elementos independentes, justificando o emprego de um modelo matemático simplificado, que consiste em um conjunto de vigas paralelas que trabalham praticamente independentes para o dimensionamento à flexão e a verificação do estado de deformação excessiva.

Ensaio realizado por PIETRO (1993) mostraram que as deflexões reais em lajes pré-moldadas com vigotas tipo trilho foram menores que as teóricas calculadas através do modelo de vigas isoladas, considerando-as como vigas de seção T com o valor de b_f igual ao intereixo resultante da interação da nervura com capeamento.

3.3.3 MOMENTO LIMITE PARA UMA SEÇÃO T

Segundo a NBR 6118 (ABNT-2004) o estado limite último para uma viga de concreto armado é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios definidos na Figura 18. Os domínios representam as diversas possibilidades de ruína da seção. A cada par de deformações específicas de cálculo ε_c e ε_s correspondem um esforço normal, se houver, e um momento fletor atuantes na seção.

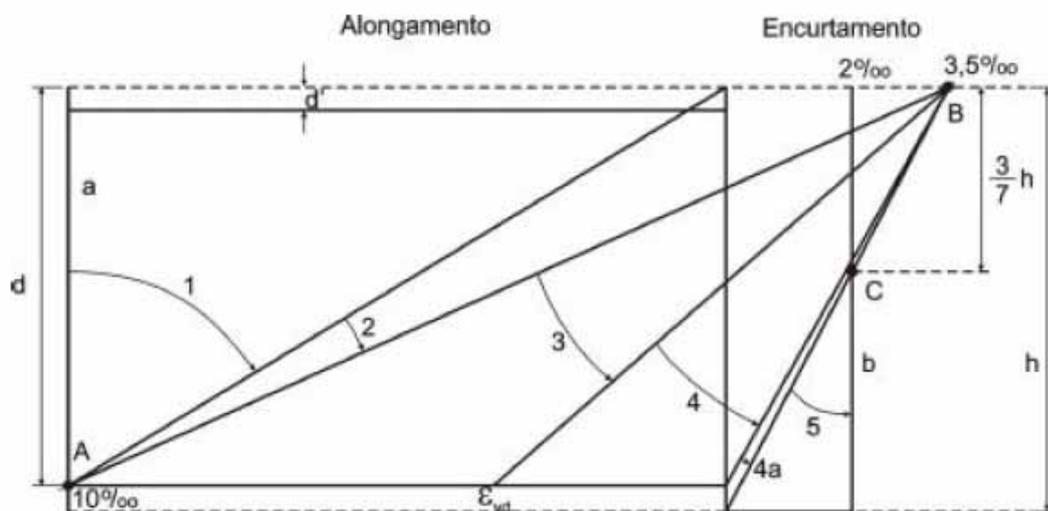


Figura 18 – Domínios de estado limite último de uma seção transversal

Para a determinação da resistência de cálculo de uma dada seção transversal, é preciso saber em qual domínio está situado o diagrama de deformações específicas de cálculo dos materiais (aço e concreto).

O dimensionamento de uma peça em concreto armado deve preferencialmente, ser feito no domínio 3, já que nesta situação, a deformação da armadura tracionada é pelo menos igual à deformação de início de escoamento. Assim, a ruptura do concreto ocorre simultaneamente com o escoamento da armadura. Esta é a situação desejável para projeto, pois os dois materiais são aproveitados inteiramente e, além disso, não há risco de ruína não avisada.

As peças que chegam ao estado último no domínio 3 são chamadas de normalmente armadas na fronteira entre os domínios 3 e 4.

O domínio 3 é limitado pela condição

$$\frac{0,0035}{X_{3\text{lim}}} = \frac{\varepsilon_{yd}}{d - X_{3\text{lim}}} \quad (5)$$

Resultando na posição limite da linha neutra

$$\frac{X_{3\text{lim}}}{d} = \frac{0,0035}{\varepsilon_{yd} + 0,0035} \quad (6)$$

Utilizando a distribuição retangular simplificada para as tensões de compressão proposta pela NBR 6118 (ABNT-2004) em substituição ao

diagrama parábola-retângulo, onde a altura do retângulo é dada por $0,8X$ (X é a posição da linha neutra), a seção estará comprimida desde a borda superior até uma profundidade igual a $0,8X_{lim}$.

Para $h_f \geq 0,8X_{lim}$, apenas a mesa estará comprimida e, neste caso, o dimensionamento é idêntico ao de uma seção retangular com largura b_f e altura h como mostra a Figura 19.

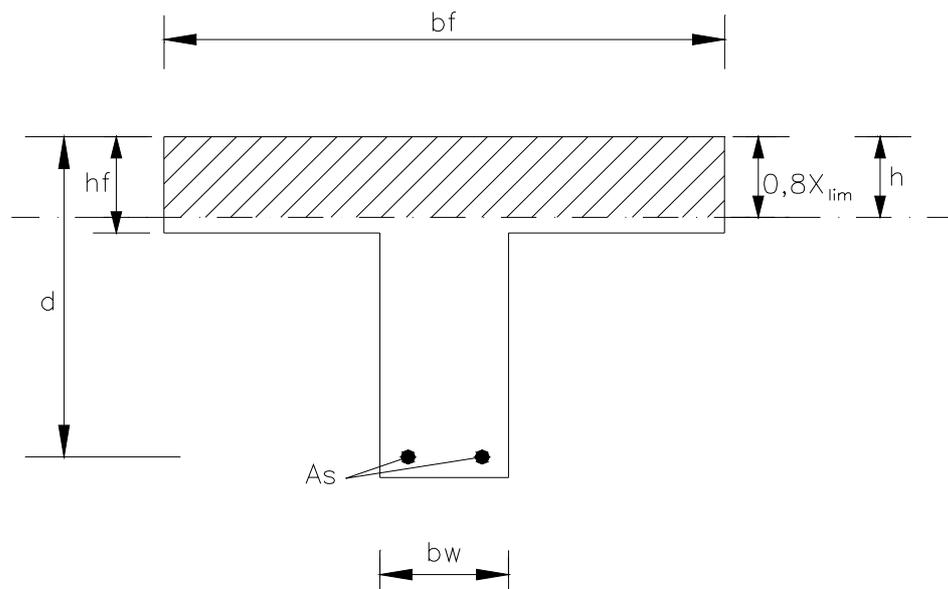


Figura 19 – Seção T com mesa comprimida

Para esta situação, através das equações de equilíbrio, tem-se que o momento limite é dado por:

$$M_{d\ lim} = 0,8b_f X_{lim} (d - X_{lim}) \sigma_{cd} \quad (7)$$

Onde:

X_{lim} é a posição da linha neutra

b_f é a largura da mesa

d é a altura útil

σ_{cd} é tensão de compressão do concreto

Com $h_f < 0,8X_{lim}$ tem-se a mesa e parte da nervura comprimidos, conforme mostra a Figura 20. Para esta situação o valor do momento limite é dado pela equação (8).

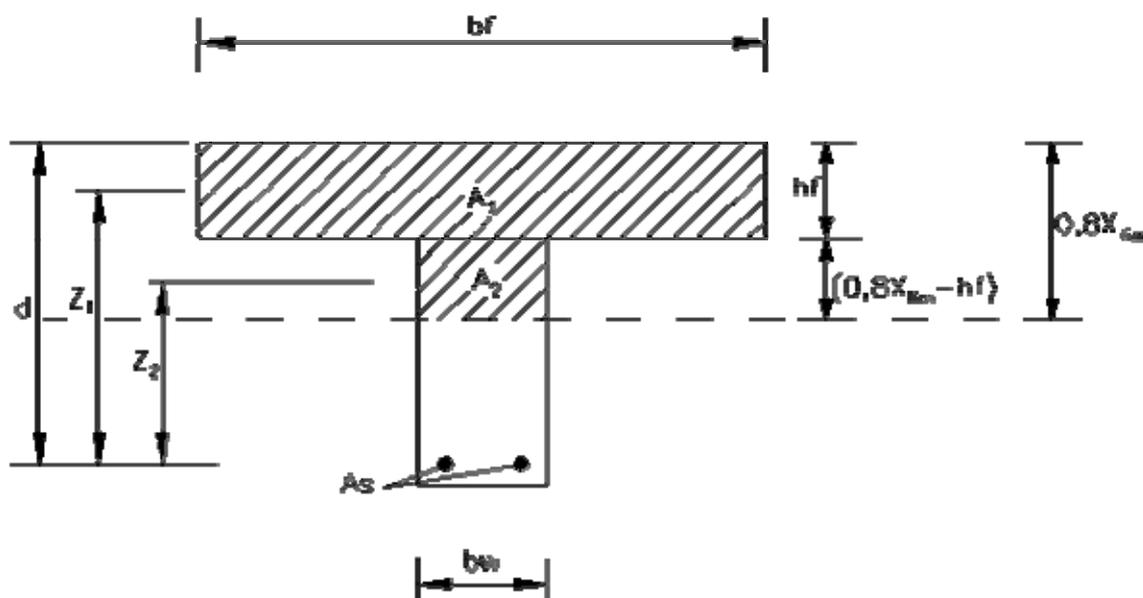


Figura 20 – Seção T com a mesa e parte da nervura comprimidos

$$M_{d\lim} = (A_1 Z_1 + A_2 Z_2) \sigma_{cd} \quad (8)$$

3.3.4 ARMADURA LONGITUDINAL

A quantidade de armadura longitudinal, para as seções transversais em forma de T, conhecidos o valor da profundidade da linha neutra (X_{lim}), a tensão de compressão no concreto (σ_{cd}), a largura da mesa (b_f) e o tipo de aço (f_{yd}), é determinada, a partir do equilíbrio das forças atuantes na seção de acordo com o domínio 3 estabelecido pela NBR-6118 (ABNT, 2004), conforme são apresentadas nas equações (9) e (10).

Para $h_f \geq 0,8X_{lim}$:

$$A_s = \frac{0,8b_f X_{lim} \sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (9)$$

Para $h_f < 0,8X_{lim}$:

$$A_s = \frac{(A_1 + A_2)\sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (10)$$

3.3.5 CÁLCULO DA ARMADURA DA MESA

Segundo a NBR 14859-1(ABNT-2002), deve ser colocada uma armadura de distribuição posicionado na capa, nas direções transversal e longitudinal, para a distribuição das tensões oriundas de cargas concentradas e para o controle da fissuração. Essa armadura deve ter seção de no mínimo $0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ para os aços CA-25, de $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$ para os aços CA-50 e CA-60 e tela soldada contendo pelo menos três barras por metro.

3.3.6 CÁLCULO DA ARMADURA DE CISALHAMENTO

Para as lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm (a grande maioria das lajes pré-moldadas), as nervuras podem ser verificadas ao cisalhamento com critérios de lajes. Neste último caso os estribos poderão ser dispensados desde que $\tau_{wd} \leq \tau_{wu1}$.

Sendo

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{b_w \cdot d} \quad (11)$$

$$\tau_{wu1} = k(1,2 + 40\rho_1)\tau_{rd} \quad (12)$$

Onde

$$\tau_{rd} = 0,25f_{ctd} \quad (13)$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad (14)$$

- Para elementos onde 50% da armadura inferior não chega até o apoio: $k = |1|$
- Para os demais casos: $k = |1,6 - d|$, não menor que $|1|$, com d em metros.

3.4 DEFLEXÕES DE LAJES

3.4.1 INTRODUÇÃO

Para as vigas que possuem comportamento elástico linear, o valor do máximo deslocamento imediato pode ser determinado através da linha elástica do elemento fletido, admitindo-se as hipóteses iniciais de pequenos deslocamentos, das seções permanecerem planas após a deformação e também a possibilidade de ser desprezada a parcela de deformação devida ao efeito de esforço cortante.

Seja uma viga prismática sujeita à flexão pura, a curvatura da superfície neutra pode ser expressa por (Figura 21):

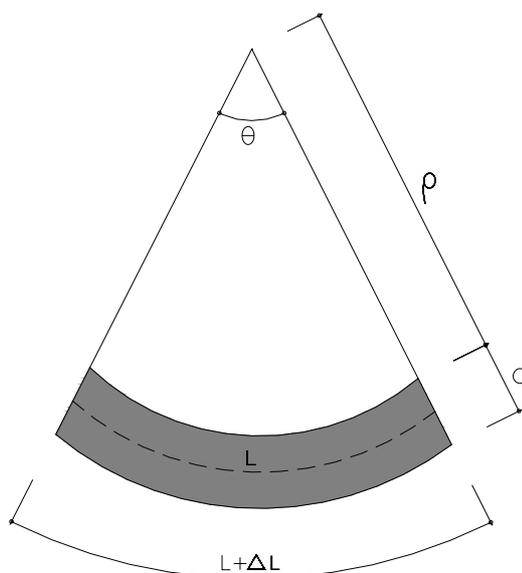


Figura 21 - Curvatura de um elemento fletido

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (15)$$

Onde:

$M(x)$ – Momento fletor ;

E – Módulo de elasticidade;

I – Momento de inércia da seção transversal.

A partir da equação (15), o cálculo do maior deslocamento – definido como flecha pela NBR 6118 (ABNT,2004) – em uma laje unidirecional submetida a 2 cargas concentradas, considerando a altura constante e o modelo de viga isolada resulta:

$$a = \frac{M}{24E_{cs}.I}(3l^2 - 4u^2) \quad (16)$$

Onde:

$$a = y_{\max} = \text{Flecha máxima}$$

$$M = P.u \quad (17)$$

sendo :

P – Carga concentrada

u - Distância entre o apoio e a carga

l – Vão da viga

E_{cs} – Módulo de elasticidade secante do concreto dado por:

$$E_{cs} = 4760\sqrt{fck} \quad (fck \text{ em MPa}) \quad (18)$$

I - Momento de Inércia

No caso das peças em concreto armado a determinação da flecha através da equação (16) precisa ser corrigida, pois o material não é homogêneo, e mesmo sob ações de serviço, existe a possibilidade da viga ter parte do concreto fissurado, o que diminui a rigidez das seções nessas regiões. Sendo assim, uma viga em concreto armado pode trabalhar parte no estágio I e parte no estágio II (Figura 22).



Figura 22 - Viga em concreto armado simplesmente apoiada sob ações de serviço- (CARVALHO e FIGUEIREDO 2004)

No estágio I o concreto resiste às tensões de tração juntamente com a armadura e o diagrama de tensões no concreto é linear. Para momentos maiores que o momento de fissuração (M_r) a partir do qual podem surgir fissuras de flexão na seção, o concreto tracionado não tem a capacidade de resistir às tensões, admitindo-se assim que toda a tração seja resistida pelo aço, essa situação é chamada de estágio II puro. A inércia dessas seções nessa situação são menores que as no estágio I .

O comportamento momento x deflexão de elementos estruturais de concreto armado sujeitos à flexão é esquematizado na Figura 23.

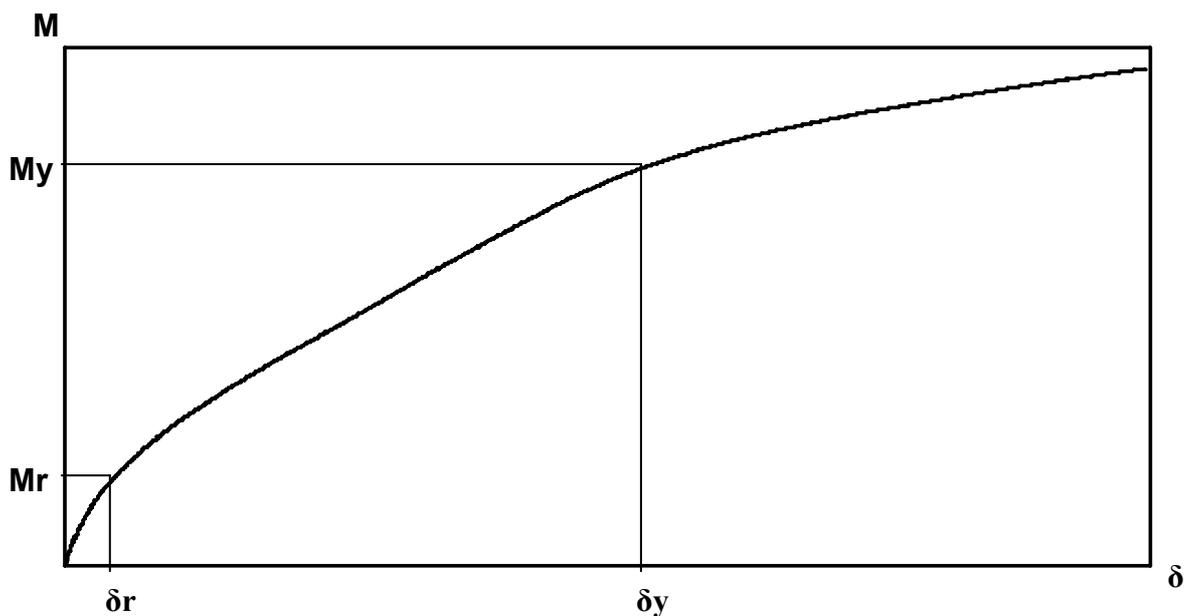


Figura 23 - Gráfico momento x deslocamento de um elemento de concreto armado sob flexão

O trecho entre 0 e M_r representa o estágio I, sendo M_r o momento de fissuração. O trecho entre M_r e M_y caracteriza o estágio II e o trecho acima de M_y mostra o escoamento da armadura.

Verifica-se portanto que as seções de peças em concreto armado trabalham nos estádios I ou II quando são solicitadas pelas ações de serviço, e como em uma viga existem seções trabalhando nas duas situações, sua rigidez é influenciada pelo momento e pelo grau de fissuração do concreto. Assim, para a determinação da flecha imediata é necessário obter uma inércia que reflita essa condição e possibilite a solução da equação (16).

3.4.2 CÁLCULO DE FLECHAS EM VIGAS SEGUNDO A NBR6118-2004

A separação entre o estágio I e o estágio II é definida pelo momento de fissuração M_r . Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (19)$$

Onde:

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta: $\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T.

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

y_t - é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

I_c - é o momento de inércia da seção bruta;

f_{ct} - é a resistência à tração direta do concreto; dado por:

$$f_{ct} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (20)$$

Para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada a seguir:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (21)$$

onde:

I_{II} - é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II,

calculado com $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$; (22)

Ma - é o 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;

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

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

Para a solução da equação (21) é necessário determinar as equações para o cálculo das propriedades geométricas de uma seção T.

- a) Seção T no estágio I, sem considerar a presença da armadura (Figura 24).

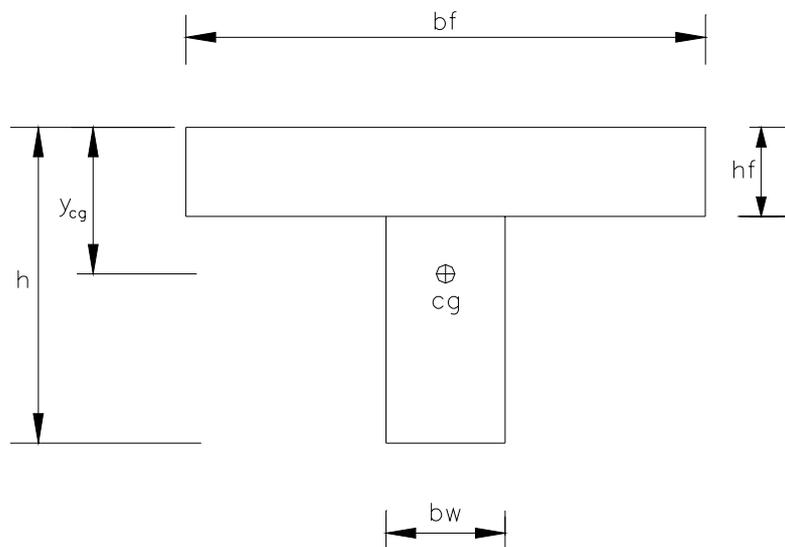


Figura 24 - Seção no estágio I, sem considerar a presença da armadura

Área da seção Geométrica

$$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h \quad (23)$$

Centro de Gravidade:

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2}}{A_g} \quad (24)$$

Momento de inércia à flexão:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + b_w \cdot h \left(y_{cg} - \frac{h}{2} \right)^2 \quad (25)$$

b) Seção T no estágio I, com armadura total A_s (Figura 25).

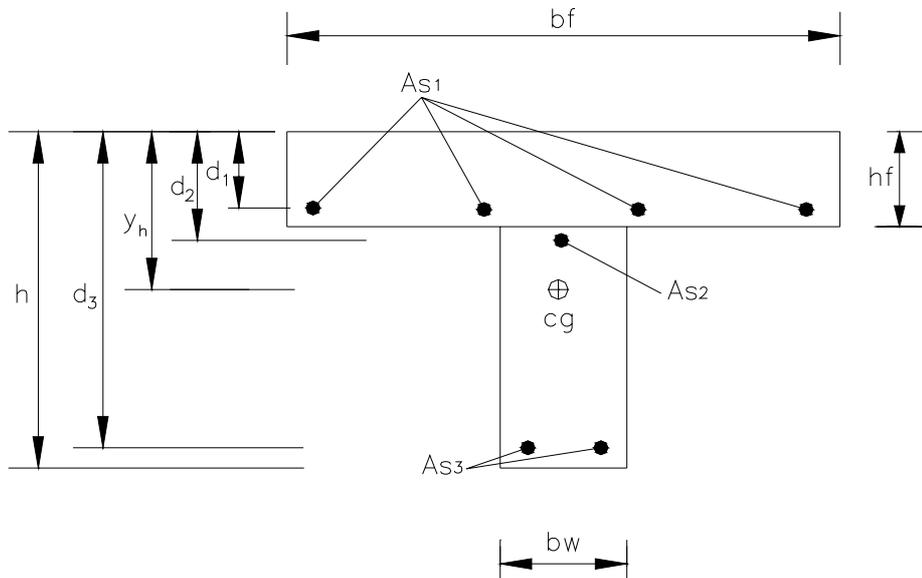


Figura 25- Seção no estágio I, com armadura

A relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto é calculada através da equação (22).

Área da seção homogeneizada

$$A_h = (b_f - b_w).h_f + b_w.h + A_s.(\alpha_e - 1) \quad (26)$$

Onde

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} \quad (27)$$

Centro de Gravidade:

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2} + A_s(\alpha_e - 1).d_{med}}{A_h} \quad (28)$$

Onde:

$$d_{med} = \frac{(A_{s1}d_1) + (A_{s2}d_2) + (A_{s3}d_3)}{A_{s1} + A_{s2} + A_{s3}} \quad (29)$$

Momento de inércia à flexão:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f \left(y_h - \frac{h_f}{2} \right)^2 + b_w.h \left(y_h - \frac{h}{2} \right)^2 + A_s.(\alpha_e - 1).(y_h - d_{med})^2 \quad (30)$$

c) Seção no estágio II, com armadura total A_s (Figura 26)

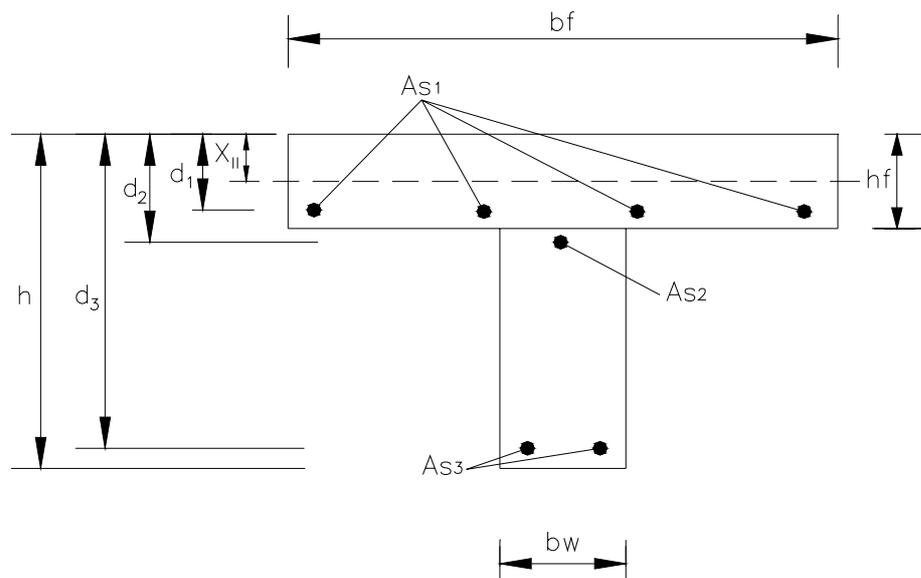


Figura 26 - Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

Linha neutra em serviço - (X_{II})

$$a_1 X_{II}^2 + a_2 X_{II} + a_3 = 0 \quad (31)$$

Sendo:

$$a_1 = \left(\frac{b_w}{2} \right) \quad (32)$$

$$a_2 = h_f(b_f - b_w) + \alpha_e A_s \quad (33)$$

$$a_3 = -d_{med} \alpha_e A_s - \frac{h_f^2}{2} (b_f - b_w) \quad (34)$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} \quad (35)$$

Momento de inércia

Para $X_{II} < h_f$

$$I_{x,II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot As (X_{II} - d_{med})^2 \quad (36)$$

Para $X_{II} > h_f$

$$I_{x,II} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \left(X_{II} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \alpha_e \cdot As \cdot (X_{II} - d)^2 \quad (37)$$

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 AGREGADO RECICLADO

O material utilizado na produção do concreto reciclado foi beneficiado e caracterizado por LIMA, et. al. (2007) com resíduos obtidos na cidade de Feira de Santana. Para a caracterização dos agregados foram coletadas quatro amostras em dois bairros do município de Feira de Santana - Ba, totalizando 20 m^3 de resíduos de construção e demolição. A Figura 27 mostra a caracterização gravimétrica do resíduo utilizado.

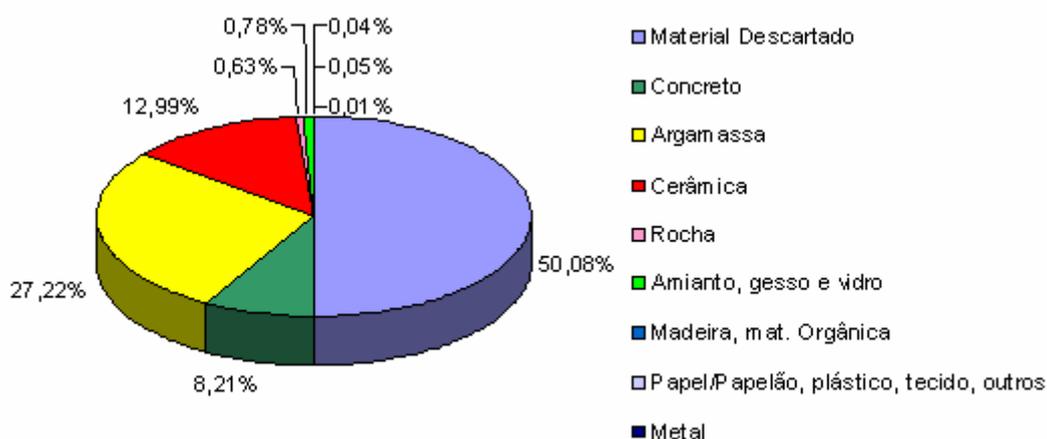


Figura 27 - Caracterização gravimétrica do resíduo

Considerando apenas o material inerte que corresponde a 49,05% da amostra total, 55,49% equivale à argamassa, 26,49% a material cerâmico, 16,73% a concreto e, finalmente, 1,28% à rocha.

Os agregados graúdos e miúdos, obtidos após o beneficiamento e britagem do entulho, utilizados na fabricação do concreto são mostrados nas Figuras 28 e 29.



Figura 28 - Agregado graúdo reciclado

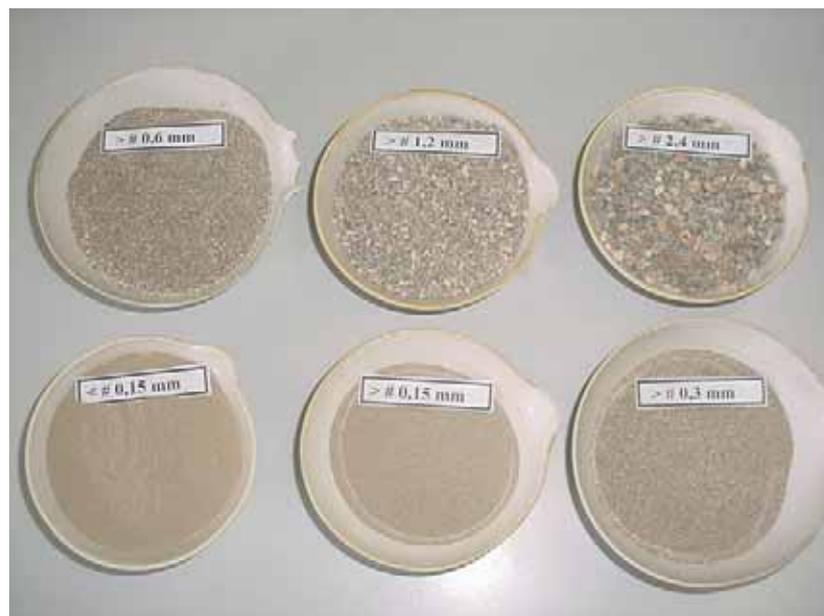


Figura 29 - Agregado miúdo reciclado

A Tabela 4 apresenta a massa específica e o módulo de finura dos agregados utilizados na produção dos concretos.

Tabela 4 – Massa específica e módulo de finura dos agregados

Agregados	γ_s (g/cm ³)	MF
Areia Fina	2,61	1,68
Areia Lavada	2,64	2,69
Brita 9,5mm	2,76	5,43
AMR	2,51	2,56
AGR	2,55	6,08

AMR - Agregado Miúdo Reciclado

AGR - Agregado Graúdo Reciclado

MF – Módulo de Finura

A taxa de absorção do AMR foi de 21% e a do AGR foi de 10%, com uma taxa de compensação de 40% para os dois agregados.

4.1.2 CONCRETO

Foram produzidos três tipos de concreto: o primeiro foi chamado de concreto REF e corresponde ao concreto de referência produzido com agregados naturais, o segundo foi denominado RCD-50 e foi produzido com 50% de substituição dos agregados naturais miúdos e graúdos pelos respectivos agregados reciclados, e por fim o terceiro concreto denominado RCD-100 que foi produzido com 100% de substituição dos agregados naturais miúdos e graúdos pelos respectivos agregados reciclados.

Os traços utilizados para a produção dos concretos foram elaborados para concretos com uma resistência à compressão de 20MPa aos 28 dias, com um teor de argamassa de 62%. A Tabela 5 mostra o traço para cada tipo de concreto.

Todos os concretos utilizados foram confeccionados com o cimento CP-V-ARI, com $\gamma_s = 3,13$ g/cm³.

Tabela 5 – Traços dos concretos.

Concreto	Traço unitário em massa (Kg)						
	Cimento	Areia Fina 60%	Areia Lavada 40%	AMR	Brita 9,5mm	AGR	a/c
REF	1,00	1,91	1,27	-	2,57	-	0,80
RCD-50	1,00	0,95	0,64	1,59	1,28	1,28	0,98
RCD-100	1,00	-	-	3,10	-	2,50	1,15

Foram realizados em todas as séries ensaios de resistência à compressão dos concretos com 7, 14 e 28 dias e de módulo de elasticidade aos 28 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos

Concreto	fc 7dias (MPa)	fc 14dias (MPa)	fc 28dias (MPa)	E 28 dias (GPa)
REF	17,8	20,7	24,25	32,1
RCD 50	15,2	17,4	22,7	22,6
RCD 100	14,0	17,9	20,5	20,9

Verifica-se através da Tabela 6, que os concretos reciclados (RCD50 e RCD100) possuem resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias, menores que o concreto de referência (REF), e quanto maior a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, maior é a diferença da resistência à compressão e do módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos reciclados em relação ao concreto de referência.

4.2 PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

O programa experimental consistiu em duas partes. Inicialmente, para se avaliar o comportamento das vigas T formadas a partir de vigotas tipo trilho, produzidas por fabricantes da cidade de Feira de Santana, mais uma capa de concreto, foram moldadas no laboratório da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), três vigas que foram submetidas a ensaios de flexão aos 7 dias, com carregamento aplicado nos terços do vão. Os modelos foram classificados da seguinte forma: **série T1, série T2 e série T3**.

Em seguida foram moldadas três lajes pré-moldadas formadas por vigotas e capa de concreto produzidas no laboratório da UEFS. As lajes foram submetidas à ensaios de flexão aos 14 dias e foram classificadas da seguinte forma: **série L1, série L2 e série L3**.

A Tabela 7 mostra as características de cada série produzida.

Tabela 7 – Características de cada série

Denominação da Série	Tipo de Elemento	Concreto da Vigota	Concreto da Capa	Teor de Substituição
T1	Viga T	Convencional	Convencional	-
T2	Viga T	Convencional	Reciclado	50%
T3	Viga T	Convencional	Reciclado	100%
L1	Laje	Convencional	Convencional	-
L2	Laje	Reciclado	Reciclado	50%
L3	Laje	Reciclado	Reciclado	100%

4.2.1-VIGAS T

a) Dimensões

Foram executadas três séries (T1, T2 e T3), com dimensões previstas de 30 cm de largura e 300 cm de comprimento, e altura total de 11cm. Na Tabela 8 são apresentadas as dimensões reais, após o processo de moldagem, das séries. Na Figura 30 apresenta-se a seção típica da viga T utilizada nos ensaios e na Figura 31 após a moldagem em laboratório.

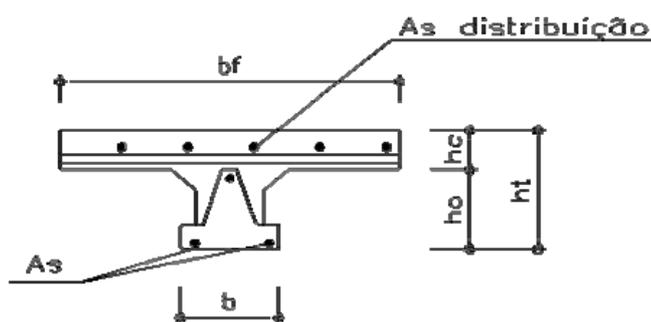


Figura 30 – Seção T utilizada no ensaio



Figura 31 – Seção T após a moldagem antes do ensaio

Tabela 8 – Dimensões reais das seções T ensaiadas

Séries	b_f (cm)	h_c (cm)	h_o (cm)	h_t (cm)	b (cm)
Série T1	33,00	4,30	7,00	11,30	9,18
Série T2	33,00	4,70	7,00	11,70	9,07
Série T3	33,00	4,00	7,00	11,00	9,12

b) Fôrma e Armadura

Para a moldagem das capas de concreto foram utilizadas fôrmas de madeira (Figura 32).

A armação das vigotas tipo trilho foi composta por 2 barras de 5,0 mm na parte inferior e 1 barra de 5,0 mm na parte superior determinada pelo fabricante. A armadura de distribuição colocada na capa de concreto foi de 5,0 mm a cada 20 cm.



Figura 32 – Fôrma de madeira utilizada para a moldagem da viga T

c) Vigotas

As vigotas tipo trilho utilizadas nas três séries foram produzidas com concreto convencional e foram adquiridas já moldadas a partir de um fabricante da cidade de Feira de Santana.

4.2.2 LAJES

a) Dimensões

Foram executadas lajes, com dimensões previstas de 100 cm de largura e 300 cm de comprimento. A Figura 33 apresenta a seção típica da laje utilizada nos ensaios e a Figura 34 após a moldagem em laboratório.

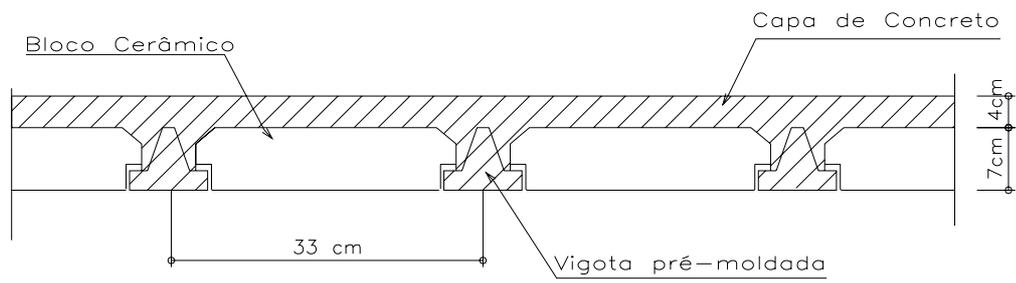


Figura 33 – Seção da laje



Figura 34 – Laje após a moldagem

b) Armadura

A armação das vigotas tipo trilho foi composta por 2 barras de 5,0mm na parte inferior e 1 barra de 5,0 mm na parte superior , a armadura de distribuição colocada na capa de concreto foi de 5,0mm a cada 20cm, como mostram as Figuras 35 e 36.



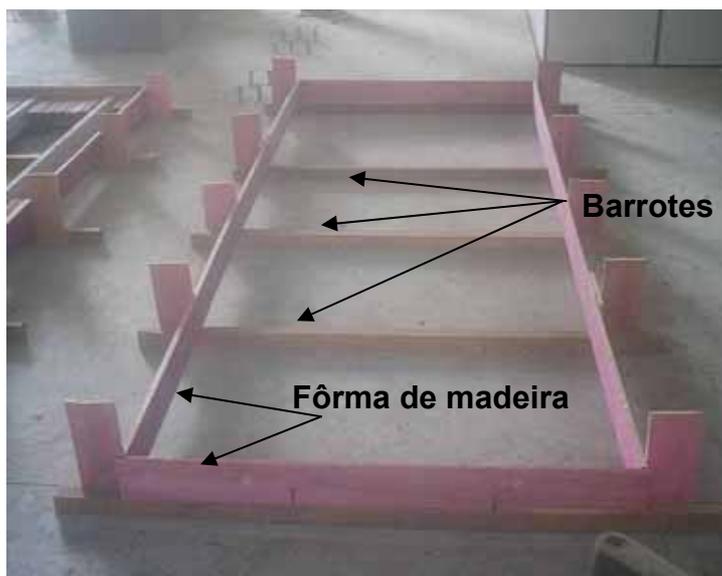
Figura 35 – Armação da vigota



Figura 36 – Armadura de distribuição

c) Fôrma

Para a moldagem das lajes de concreto foram utilizadas fôrmas de madeira dispostas junto às laterais dos modelos e nos apoios. Para dar a altura desejada nos apoios, as vigotas pré-moldadas e os elementos de enchimento foram colocados sobre barrotes de madeira espaçados a cada oitenta centímetros, o que simulou os pontaletes utilizados como escoras na construção das lajes (Figuras 37a e 37b).



a) Fôrma de Madeira



b) Laje posicionada na fôrma

Figura 37 – Fôrma utilizada para a moldagem da laje

As fôrmas utilizadas para a moldagem das vigotas foram metálicas com seção transversal tipo trilho como mostra a Figura 38a. Para garantir o cobrimento das armaduras espaçadores plásticos foram colocados de modo a evitar o contato com a fôrma. (Figura 38 b).



Figura 38 a) Fôrma da vigota



Figura 38 b) Espaçadores plásticos

d) Moldagem, Adensamento e Cura.

Após a montagem das armaduras nas fôrmas metálicas foram feitas as moldagens das vigotas para cada tipo de série (L1, L2 e L3). O concreto foi fabricado em betoneira de capacidade 320 L e depois transportado através de carrinhos e lançados nas fôrmas com conchas metálicas (Figuras 39 e 40).



Figura 39 - Betoneira utilizada para a fabricação dos concretos



Figura 40 – Moldagem das vigotas.

Ensaio de abatimento do tronco de cone foram realizados antes de cada lançamento para a verificação da trabalhabilidade de cada concreto. (Figura 41).



Figura 41 – Ensaio de abatimento de cone

O adensamento das vigotas foi feito através de uma mesa vibratória conforme mostram as Figuras 42 e 43.

Após a concretagem, as vigotas permaneceram nas fôrmas por 7 dias e a cura se deu com a umidificação periódica dos elementos com o uso de uma mangueira.



Figura 42 – Mesa vibratória utilizada para adensamento das vigotas



Figura 43 – Vigotas após a vibração

A montagem da laje constituiu nas seguintes etapas (Figura 44):

- Posicionamento das vigotas pré-moldadas;
- Colocação dos elementos de enchimento;
- Colocação do ganchos (2 barras de \varnothing 12.5mm) para a movimentação;
- Colocação da armadura de distribuição.

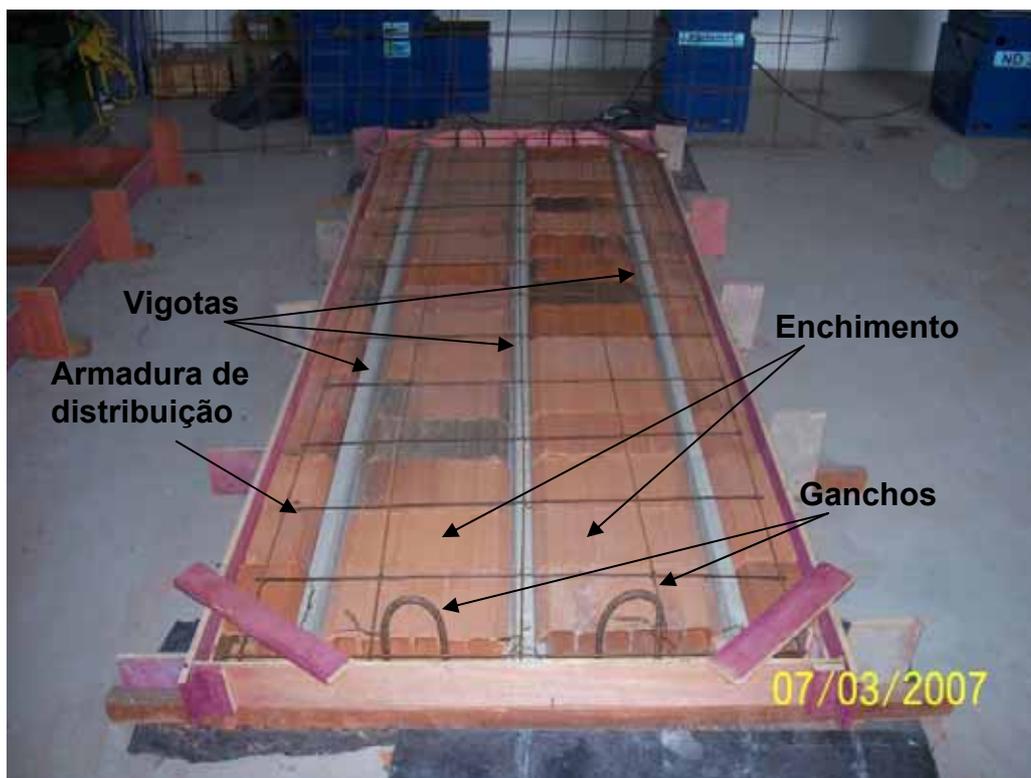


Figura 44 – Laje pronta para ser concretada.

Assim como nas vigotas, o concreto para cada capa foi fabricado em betoneira, transportado através de carrinhos e lançados nas fôrmas com pás e conchas metálicas como mostra a Figura 45.

O traço utilizado na fabricação dos concretos das vigotas e das capas das lajes de cada série foi o mesmo utilizado para a produção das vigas T e está apresentado na Tabela 5.



Figura 45 – Concretagem da Laje

A figura 46 mostra o adensamento das lajes feito com a utilização de um vibrador de agulha. Para a laje produzida com concreto reciclado com 100% de substituição (L3), verificou-se uma grande dificuldade na moldagem da capa, pois a absorção dos agregados tornou o concreto “seco” e pouco trabalhável.

Após a concretagem, as lajes permaneceram nas fôrmas por 7 dias e a cura se deu com a umidificação periódica dos elementos com o auxílio de uma mangueira.



Figura 46 – Adensamento da laje com o uso de vibrador

e) Transporte das Lajes Para a Posição do Ensaio

Como as faixas de lajes não foram construídas na sua posição definitiva de ensaio, foi necessária a utilização de um dispositivo para içamento e transporte (Figuras 47 e 48).

O dispositivo de içamento foi composto basicamente por vigas de aço, correntes, cintas de tecido e um pórtico móvel unidos de tal forma com a laje que, quando içados, os esforços que surgem na laje são iguais àqueles existentes no momento do ensaio (Figura 49).

As lajes foram içadas da seguinte maneira:

- Primeiro, duas cintas de tecido foram amarradas nos ganchos existentes nas extremidades da laje.
- Posteriormente essas cintas foram fixadas em ganchos soldados na mesa inferior da viga metálica.
- Por fim, uma cinta foi amarrada na mesa superior da viga metálica, que se encontrava alinhada com o eixo longitudinal da laje, e colocada sobre o gancho do pórtico móvel.



Figura 47 – Transporte da laje até o local do ensaio



Figura 48 – Momento do posicionamento da laje no local do ensaio

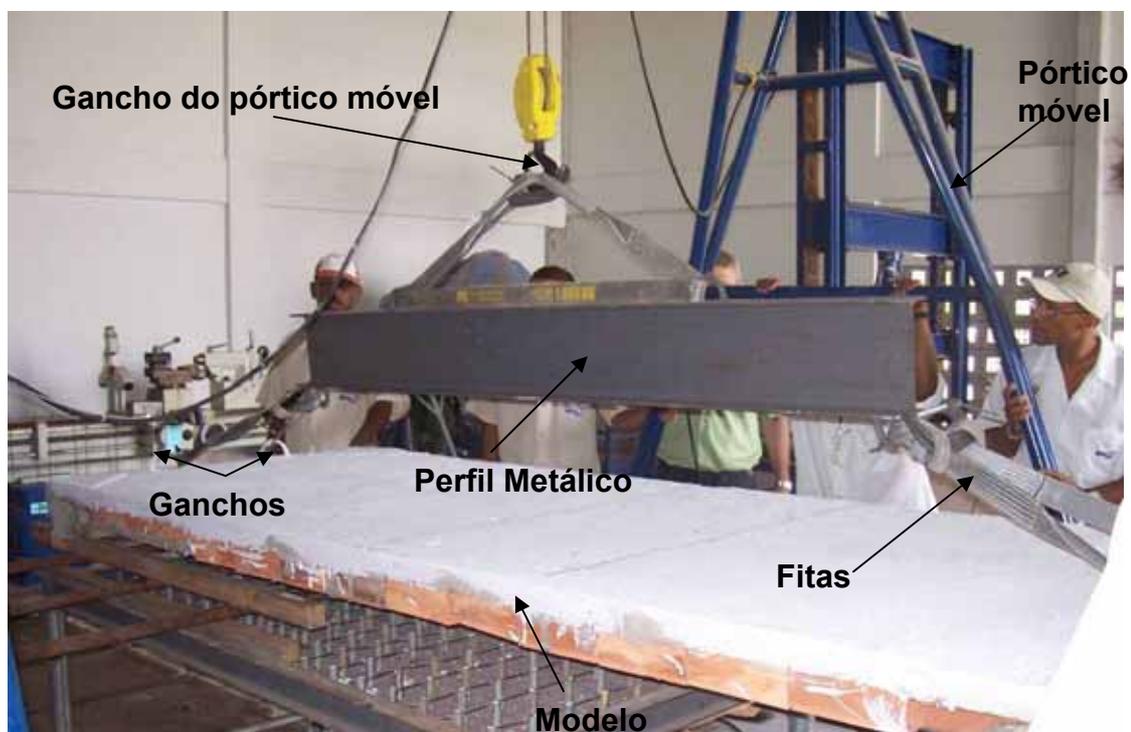


Figura 49 – Detalhe do içamento

4.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios à flexão das vigas T e das lajes foram realizados no Laboratório de Estruturas da UEFS. A estrutura de reação das forças foi composta por pórtico metálico e uma laje de reação em concreto armado.

As vigas T e as Lajes foram submetidas à ação de uma força concentrada, aplicada de cima para baixo, substituindo-se a força uniformemente distribuída por 2 forças concentradas, aplicadas aproximadamente nos terços do vão, segundo o esquema de carregamento mostrado nas Figuras 50 e 51.

A força atuante foi aplicada através de um atuador hidráulico de capacidade 250 kN, com uma velocidade de carregamento igual a 2 mm/min.



Figura 50 – Esquema de carregamento das vigas T



Figura 51 – Esquema de carregamento das lajes

Durante cada etapa de aplicação da carga, foram registrados os deslocamentos ocorridos e a força relativa a eles. Um sistema de aquisição de dados computadorizado registrou as leituras indicadas pela célula de carga e pelos LVDTs de 100mm de curso. A Figura 52 mostra o sistema de aquisição de dados.



Figura 52 – Sistema de aquisição de dados

Os ensaios de flexão simples foram realizados considerando-se que os elementos estruturais estariam simplesmente apoiados nas bases de apoio, para garantir esta condição foram colocadas barras circulares de aço sobre os perfis que liberaram movimento de rotação dos protótipos nos apoios, como mostra a Figura 53.

Para não danificar o aparato utilizado com a ruptura dos elementos estruturais, os ensaios foram finalizados quando o LVDT central marcou um deslocamento correspondente a 40mm. Esse valor é superior a qualquer dos limites de deslocamento máximo permitidos pela normalização brasileira.



Figura 53 – Rotação do elemento estrutural no apoio

4.3.1 ENSAIOS DAS VIGAS T

O ensaios foram realizados em protótipos de comprimento igual a 300 cm apoiados em duas bases, definindo-se um vão teórico de 270 cm, como mostra a Figura 54.

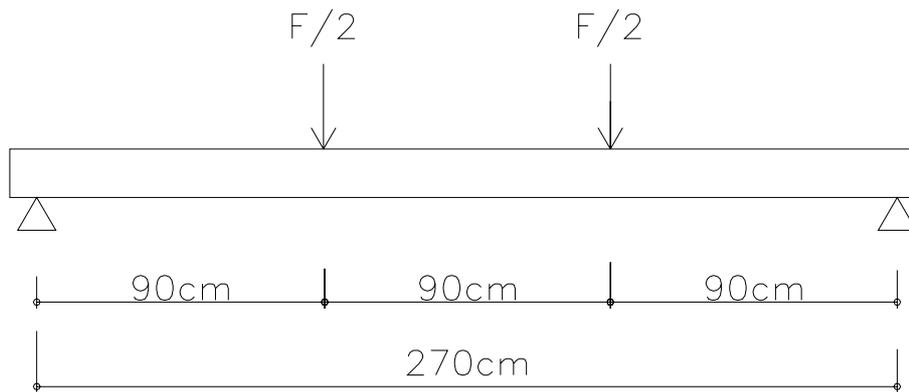


Figura 54 – Esquema de carregamento das vigas T

Para se fazer aplicação e medição da força aplicada na viga T foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 5 kN.

Os deslocamentos transversais da seção T foram medidos por meio de um transdutor linear de deslocamento (LVDT) posicionado no ponto central da viga. As Figuras 55 e 56 mostram o aparato e a instrumentação utilizados no ensaio das vigas T.

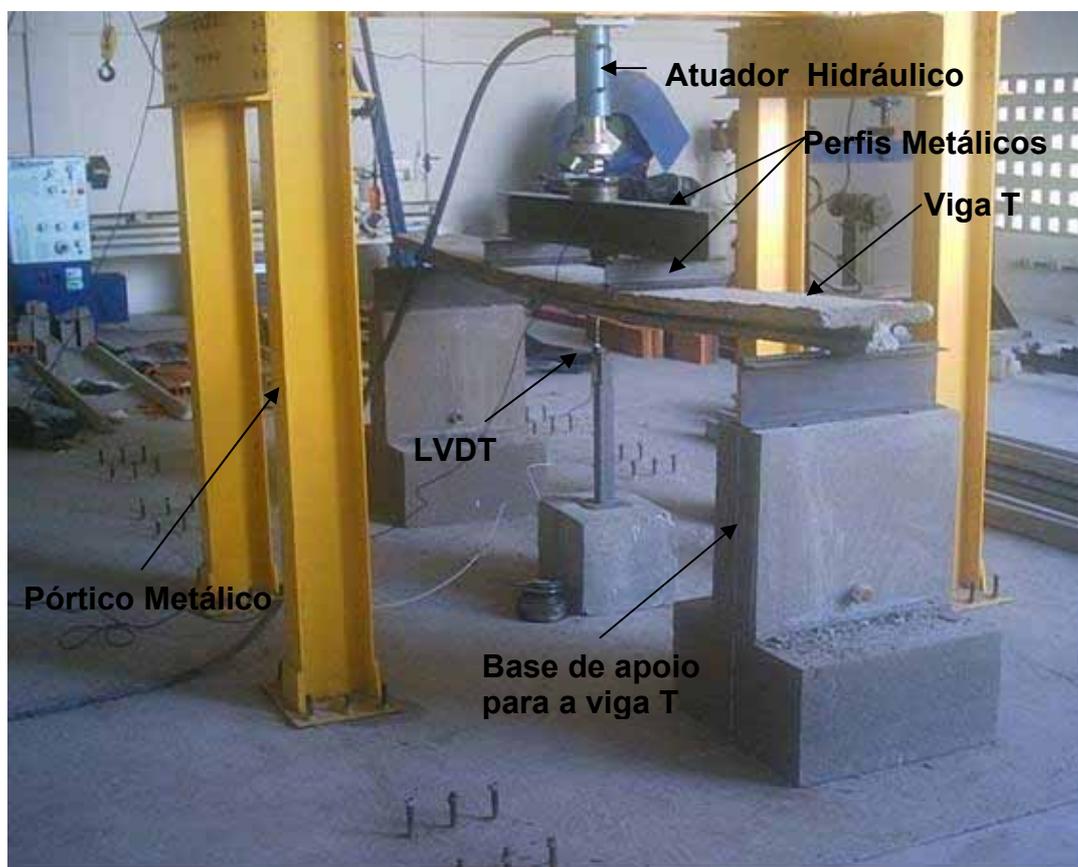


Figura 55 – Aparato utilizado no ensaio da viga T

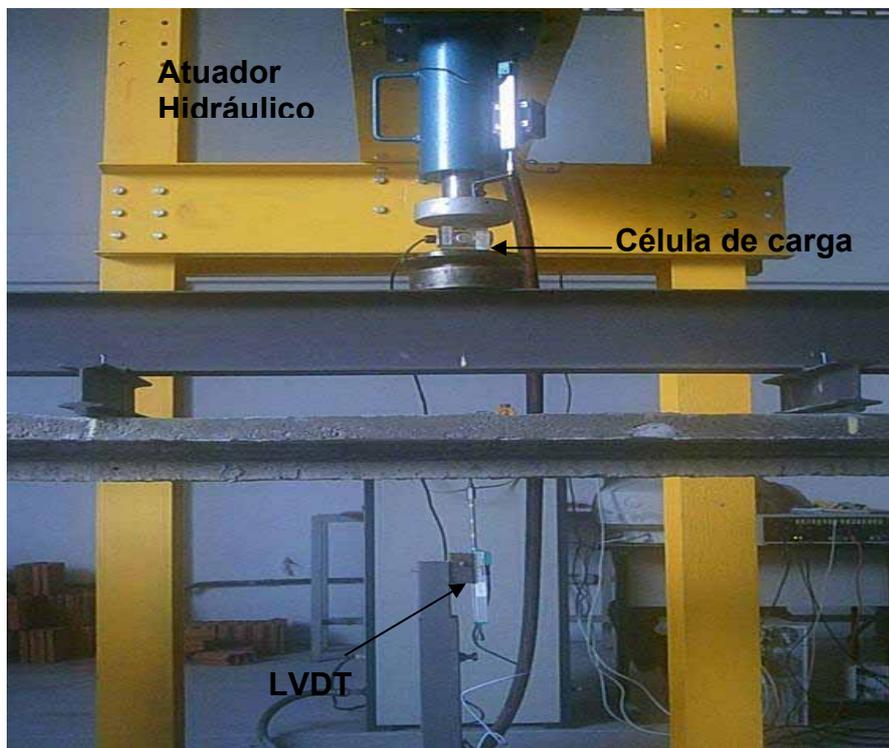


Figura 56 – Instrumentação utilizada no ensaio da viga T

4.3.2 ENSAIOS DAS LAJES

As lajes produzidas com 300 cm de comprimento foram apoiadas em bases de concreto. O vão teórico resultante foi de 285 cm como mostra a Figura 57.

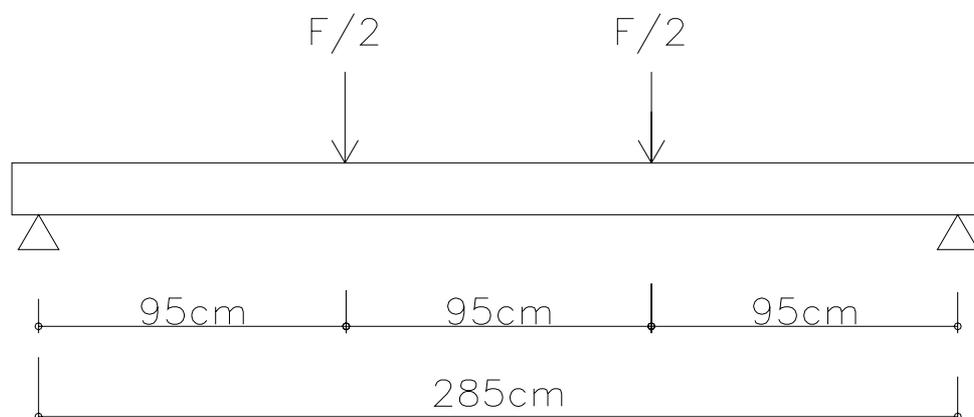


Figura 57 - Esquema de carregamento das lajes

No caso das lajes, para a aplicação e medição da força foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 300 kN.

Os deslocamentos transversais das lajes foram medidos por meio de três transdutores lineares de deslocamento (LVDT) posicionados no ponto central, e nos terços da laje.

A Figura 58 mostra todo o aparato utilizado no ensaio das lajes.

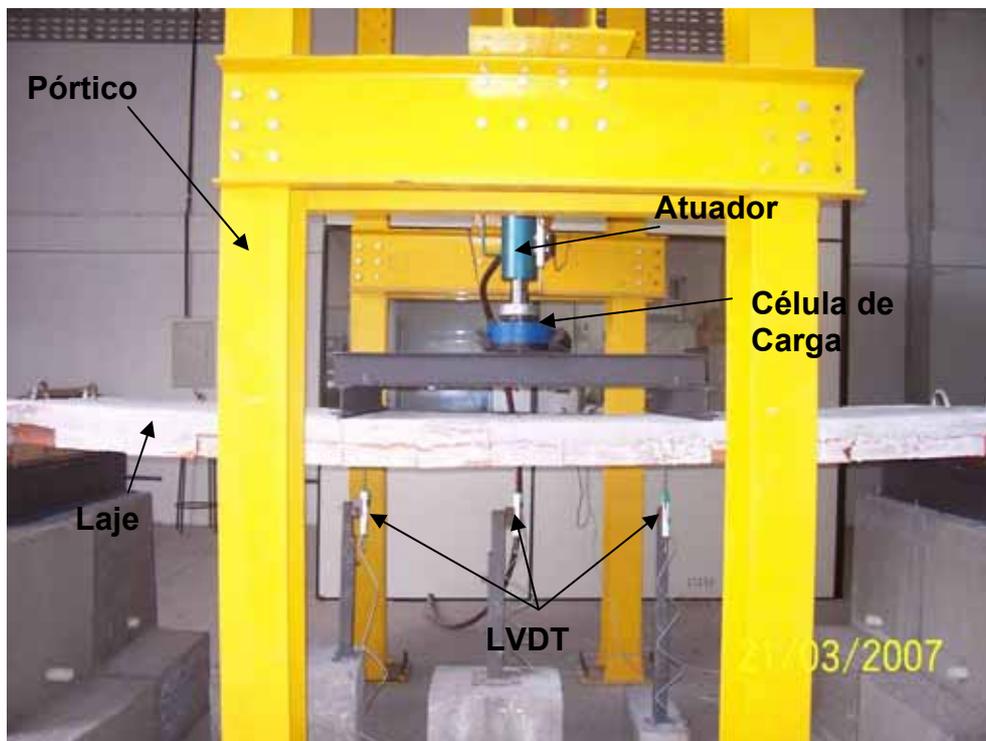


Figura 58 – Aparato utilizado no ensaio das lajes

A Figura 59 mostra a laje no momento do ensaio com uma deflexão visivelmente excessiva.



Figura 59 – Laje com deflexão excessiva

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DAS VIGAS T

O desempenho, à flexão, das três vigas ensaiadas pode ser avaliado através das Tabelas 9 e 10 e Figura 60.

A Tabela 9 mostra as características gerais de cada viga T e os valores do momento de fissuração teórico e experimental.

Tabela 9 – Características das vigas T

VIGAS T	Armadura	Φ (mm)	Área de aço (cm ²)	Momento de Inércia (cm ⁴)		XII (cm)	Mr (KN.m) Teórico	Mr (KN.m) Experim.
				Estádio I	Estádio II			
SÉRIE T1 REF.	A. Inf.	2Φ5.0	0,392	1940,67	335,54	1,86	0,33	0,43
	A.Sup.	1Φ5.0	0,196					
	A. Distr.	3Φ5.0	0,588					
SÉRIE T2 RCD 50%	A. Inf.	2Φ5.0	0,392	2168,67	403,11	1,98	0,32	0,45
	A.Sup.	1Φ5.0	0,196					
	A. Distr.	3Φ5.0	0,588					
SÉRIE T3 RCD 100%	A. Inf.	2Φ5.0	0,392	1813,37	391,57	2,06	0,29	0,35
	A.Sup.	1Φ5.0	0,196					
	A. Distr.	3Φ5.0	0,588					

A Inf.- Armadura inferior da vigota
A Sup.- Armadura superior da vigota
A.Distrib. - Armadura de distribuição
Mr Experim. – Momento de fissuração experimental

A Tabela 10 apresenta os resultados das cargas de serviço teórica e experimental determinadas a partir da flecha limite para os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso da NBR 6118 (ABNT, 2004). O valor da carga P_{serv} teórico foi obtido a partir da equação (16) para $a = l/350$

Tabela 10 – Cargas de serviço teórica e experimental

VIGAS T	f_c (7dias) MPa	E (7dias) GPa	P_{serv} (KN) Teórica	P_{serv} (KN) Experimental
SÉRIE T1 REF.	17,8	20,0	0,97	1,63
SÉRIE T2 RCD 50%	15,2	18,8	1,02	1,79
SÉRIE T3 RCD 100%	14,0	15,0	0,82	1,33

P_{serv} = Carga de serviço correspondente a flecha limite considerando os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso da NBR 6118 (ABNT,2004) correspondente a $1/350=2700/350=7,7\text{mm}$

A determinação dos módulos de elasticidade dos concretos aos sete dias apresentados na Tabela 10, foi realizada através da equação (18), para o concreto convencional (série T1), e através das equações (1) e (2) para o concretos reciclados das séries T2 e T3 respectivamente.

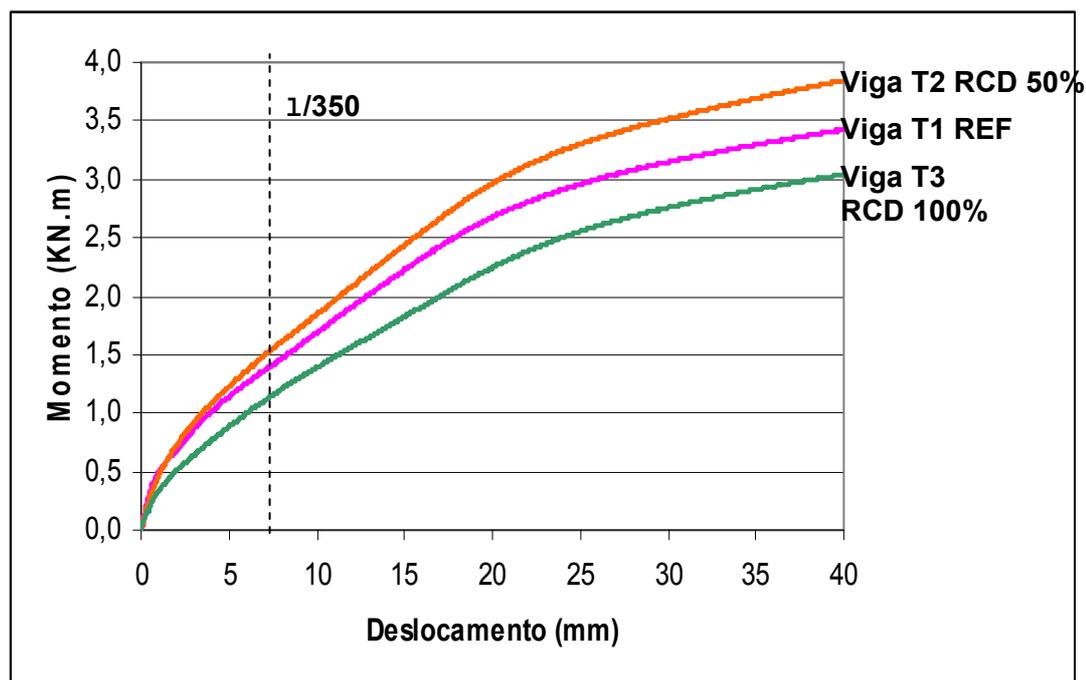


Figura 60 – Gráfico momento x deslocamento para as três vigas T

a) Influência do agregado reciclado

Comparando os resultados experimentais das três séries através da Tabela 9, verifica-se que o momento de fissuração da viga T2 produzida com concreto RCD 50% aumentou em 4,6% em relação a viga T1 de referência. A viga T3 produzida com concreto RCD 100% apresentou um momento de fissuração 22% menor que a viga T2 e 18,6% menor que a viga T1.

Com relação as cargas de serviços experimentais apresentados na Tabela 10, observa-se um aumento de 10% na carga de serviço da viga T2, produzida com concreto RCD 50% em comparação com a viga T1 de referência. O menor valor de carga de serviço foi verificado na viga T3 produzida com RCD 100%, nesta série, a redução chegou a 15,5% em comparação com a viga T1 e a 19,6% se comparada a viga T2.

O comportamento carga x deslocamento no meio do vão das vigas T apresentado na Figura 60, mostra que as curvas possuem o mesmo formato para as três vigas T, sendo formadas basicamente por três segmentos: o primeiro ocorre quando o concreto da face tracionada ainda não fissurou, caracterizando a fase elástico-linear. Em seguida, há uma mudança de inclinação da curva, evidenciando uma perda de rigidez em função do início do processo de fissuração (fase elasto-plástica) e, por fim, a fase plástica em que se observa um maior aumento nos deslocamentos sem grandes incrementos de carga.

Comparando as três curvas através da Figura 60, observa-se que a viga T2 produzida com concreto RCD com 50% de substituição apresentou deslocamentos menores, para o mesmo carregamento, que a viga T1 produzida com o concreto de referência, apesar do concreto RCD50% apresentar um valor teórico do módulo de elasticidade aos 7 dias menor que o do concreto de referência.

Existe uma expectativa de melhora no desempenho da viga T2 produzida com o concreto RCD com 50% de substituição em relação ao concreto de referência, segundo LEITE-2001, ocorre porque em concretos convencionais nos quais os agregados naturais utilizados apresentam resistência e densidade satisfatórias, todo o conjunto passa a contribuir benéficamente para o aumento da resistência. Entretanto, ao analisar-se a estrutura de concretos com agregados reciclados, observa-se que, apesar da matriz e da zona de transição

do concreto terem sido igualmente melhoradas, o elo frágil da mistura passa a ser o grão do agregado e, portanto, quanto maior o teor de substituição, maior é a redução observada na resistência. Por outro lado, à medida que a relação a/c aumenta, a porosidade da matriz e da zona de transição do concreto convencional aumentam também e a densidade e resistência do agregado graúdo natural tem a sua influência muito diminuída, diferente do agregado reciclado, que passa a ter os valores destas propriedades semelhantes aos da matriz do concreto, deixando de ser assim o elo frágil do sistema. Neste ponto, as características relacionadas com o agregado que passam a ter influência são a sua distribuição granulométrica, textura, forma e taxa de absorção. O agregado reciclado, como se sabe, apresenta maior absorção, textura mais rugosa, forma mais irregular e granulometria mais contínua e esses fatores contribuem para o aumento da aderência pasta/agregado, ou seja, a zona de transição de concretos reciclados com relações a/c mais altas é melhor que a zona de transição de concretos convencionais com semelhantes proporções, e todo conjunto passa a atuar na absorção e distribuição das tensões de forma semelhante, ajudando a aumentar a resistência dos concretos reciclados com altas relações a/c.

A viga T3 produzida com o concreto RCD com 100% de substituição apresentou deslocamentos maiores que as vigas T1 e T2, como apresentado nas curvas da Figura 60, .

Os resultados obtidos experimentalmente mostram que para deslocamentos menores que 1/350, flecha limite para os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso, prescritos pela NBR 6118 (ABNT, 2004), a viga T produzida com concreto reciclado com 50% de substituição possui praticamente o mesmo comportamento da viga T produzida com concreto de referência, já que os gráficos dessas duas vigas neste trecho estão bem próximos.

b) Valores teóricos x Valores experimentais

Comparando os valores teóricos com os experimentais da Tabela 9, observa-se que o valor do momento de fissuração experimental da série T1 é 30,3% maior que o momento de fissuração calculado teoricamente através da equação (19). Para a série T2 esse aumento corresponde a 40,6% e para a

série T3 o aumento foi de 20,6%. Verifica-se que em todas as séries, o valor do momento de fissuração teórico está bem próximo do valor experimental.

Observa-se através da Tabela 10 que, em todas as séries, as cargas de serviço teóricas foram menores que as cargas de serviço determinadas experimentalmente. Para a série T1 produzida com concreto convencional, a carga de serviço experimental foi 68% maior que a carga de serviço teórica. No caso dos concretos reciclados das séries T2 e T3 o aumento da carga de serviço experimental em relação a teórica foi de 75,5% e 64,6% respectivamente.

c) Modelagem da curva momento x deflexão

Para a determinação teórica da curva momento x deflexão das vigas T ensaiadas adotou-se o modelo descrito no capítulo 3 para $h_f \geq 0,8X_{lim}$, em que foram utilizadas as equações (19), (20) e (21), para a determinação do momento de fissuração, da resistência à tração e da inércia equivalente, respectivamente. A determinação do módulo de elasticidade dos concretos aos sete dias foi realizada através da equação (18), para o concreto convencional (série T1), e através das equações (1) e (2) para o concretos reciclados das séries T2 e T3 respectivamente.

As Figuras 61, 62 e 63 apresentam as curvas momento x deslocamento obtidas experimentalmente e teoricamente na seção central de cada série. Os gráficos foram gerados até o valor máximo de 8 mm para o deslocamento, já que acima deste valor a peça não atende mais as condições de serviço proposta pela normalização brasileira para a aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso.

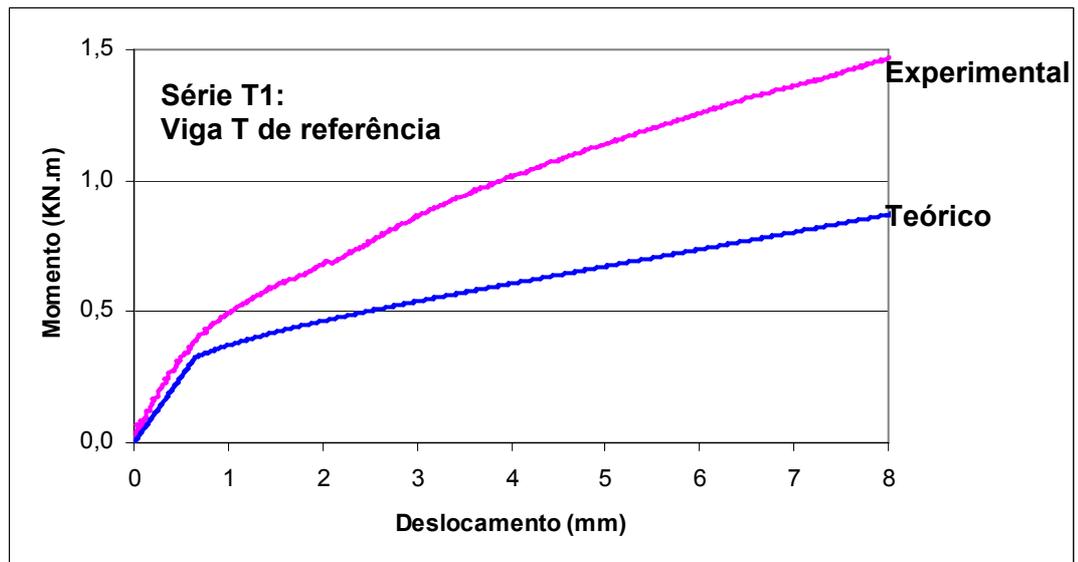


Figura 61 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto de referência

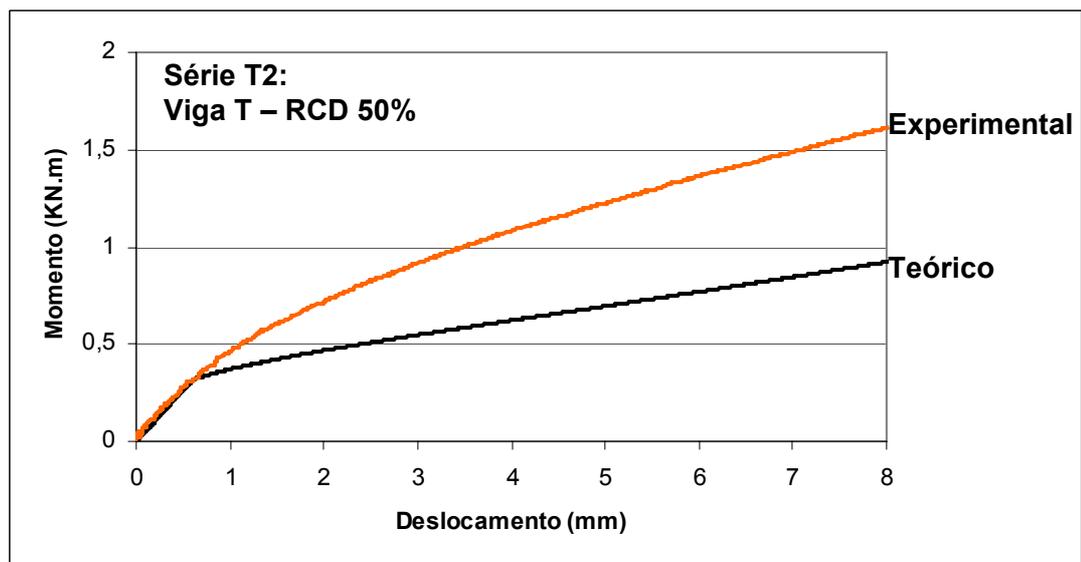


Figura 62 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto reciclado com 50% de substituição

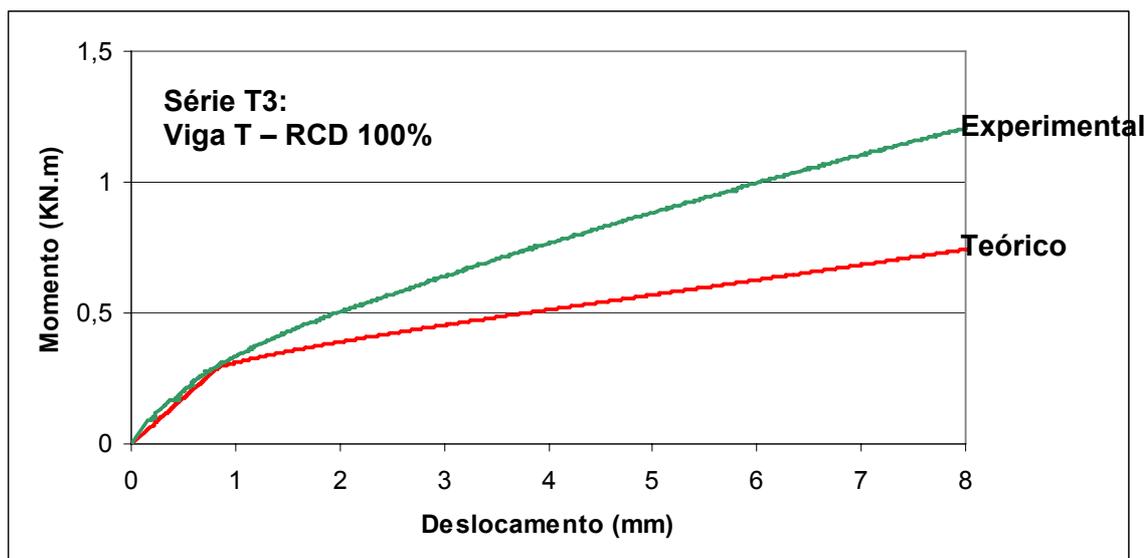


Figura 63 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da viga T produzida com concreto reciclado com 100% de substituição

Comparando as curvas teóricas com as experimentais através das Figuras 61, 62 e 63, observa-se para todas as séries uma boa aproximação das curvas no estágio I. No estágio II observou-se uma tendência de afastamento das curvas.

Um valor mais conservativo para os resultados teórico era esperado, considerando a simplificação adotada no cálculo dos deslocamentos.

5.2 ANÁLISE DAS LAJES

O desempenho, à flexão, das três lajes ensaiadas pode ser avaliado através das Tabelas 11, 12 e Figura 64.

A Tabela 11 mostra as características gerais de cada laje e os valores do momento de fissuração teórico e experimental.

Tabela 11 – Características das Lajes

VIGAS T	Arma- dura	Φ (mm)	Área de aço (cm ²)	Momento de Inércia (cm ⁴)		XII (cm)	Mr (KN.m) Teórico	Mr (KN.m) Experim.
				Estádio I	Estádio II			
SÉRIE L1 REF.	A. Inf.	6Φ5.0	1,176	6121,64	914,26	1,67	1,16	2,2
	A.Sup.	3Φ5.0	0,588					
	A. Distr.	5Φ5.0	0,98					
SÉRIE L2 RCD 50%	A. Inf.	6Φ5.0	1,176	6144,74	989,14	1,74	1,04	1,2
	A.Sup.	3Φ5.0	0,588					
	A. Distr.	5Φ5.0	0,98					
SÉRIE L3 RCD 100%	A. Inf.	6Φ5.0	1,176	6432,4	1200,7	1,98	1,09	1,4
	A.Sup.	3Φ5.0	0,588					
	A. Distr.	5Φ5.0	0,98					

A Inf.- Armadura inferior da vigota
A Sup.- Armadura superior da vigota
A.Distrib. - Armadura de distribuição
Mr Experim. – Momento de fissuração experimental

A Tabela 12 apresenta os resultados das cargas de serviço teórica e experimental determinadas a partir da flecha limite para os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso da NBR-6118 (ABNT, 2004). O valor da carga P_{serv} teórico foi obtido a partir da equação (16) para $a = l/350$.

Tabela 12 – Cargas de serviço teórica e experimental

LAJES	fc (14dias) MPa	E (14dias) GPa	P_{serv} (KN) Teórica	P_{serv} (KN) Experimental
SÉRIE L1 REF.	20,7	21,65	2,82	5,43
SÉRIE L2 RCD 50%	17,4	19,68	2,62	5,01
SÉRIE L3 RCD 100%	17,9	15,60	2,55	5,68

P_{serv} = Carga de serviço correspondente a flecha limite, considerando os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso da NBR 6118:2004 correspondente a $l/350=2850/350=8,0$ mm

A determinação dos módulos de elasticidade dos concretos aos quatorze dias apresentados na Tabela 12, foi realizada através da equação (18), para o concreto convencional (série L1), e através das equações (1) e (2) para o concretos reciclados das séries L2 e L3 respectivamente.

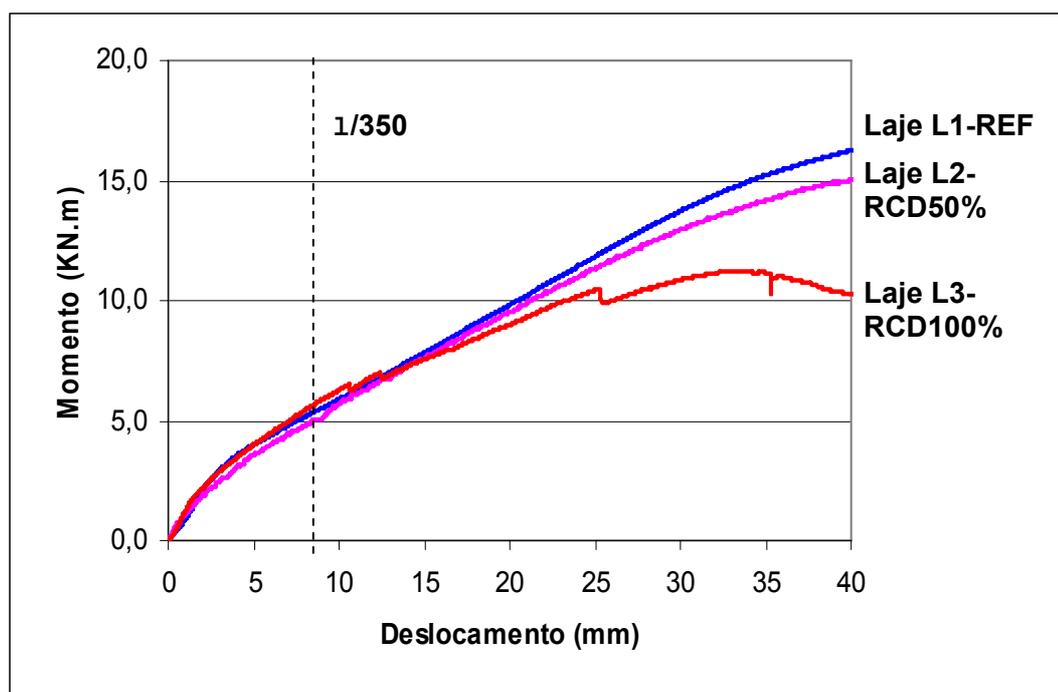


Figura 64 – Gráfico momento x deslocamento para as séries L1, L2, L3

a) Influência do agregado reciclado

Comparando os resultados experimentais das três séries através da Tabela 11, verifica-se que o momento de fissuração da laje L1 produzida com concreto de referência apresentou um valor 83,3% maior que o momento de fissuração da laje L2 produzida com RCD 50% e 57,1% em relação a laje L3 produzida com concreto RCD 100%. As lajes L2 e L3 produzidas com concretos reciclados apresentaram valores próximos para o momento de fissuração, a diferença entre a série L3 e L2 foi de 16,6%,

Para as cargas de serviços experimentais apresentadas na Tabela 12, observa-se um aumento de 8% na carga de serviço da Laje L1, produzida com concreto de referência em comparação com a laje L2 produzida com RCD 50%. O maior valor de carga de serviço foi verificado na laje L3 produzida com

RCD 100%, nesta série, o aumento chegou a 4,6% em comparação com laje L1 e a 13,37% se comparada a laje L2.

O comportamento momento x deslocamento no meio do vão das lajes das séries L1, L2 e L3 apresentado na Figura 64, mostra que, assim como nas vigas T as curvas são formadas basicamente por três segmentos: o primeiro ocorre quando o concreto da face tracionada ainda não fissurou, caracterizando a fase elástico-linear, em seguida, há uma mudança de inclinação da curva evidenciando uma perda de rigidez em função do início do processo de fissuração (fase elasto-plástica) e, por fim, a fase plástica em que se observa um maior aumento nos deslocamentos sem grandes incrementos de carga.

Comparando as três curvas através da Figura 64, verifica-se que as três lajes possuem comportamentos bem parecidos, com os gráficos quase coincidentes no trecho elástico, apesar dos concretos reciclados possuírem um módulo de elasticidade teórico, aos 14 dias, menor que o do concreto de referência. Quando as lajes se aproximam do estágio II observa-se um afastamento das curvas.

O comportamento aproximado, na fase elástica, das três lajes produzidas com concretos diferentes, em que o módulo de elasticidade dos concretos reciclados é menor que o do concreto de referência, pode ser justificado, porque, assim como foi comentado no item 5.1-a) deste capítulo, em concretos convencionais com alto fator a/c , os agregados naturais utilizados apresentam resistência e densidade satisfatórias e todo o conjunto passa a contribuir para o aumento da resistência. Já em concretos com agregados reciclados, a fragilidade está no grão do agregado, entretanto, nesses concretos observa-se uma melhora na zona de transição. Por outro lado, à medida que a relação a/c aumenta, a porosidade da matriz e da zona de transição do concreto convencional aumentam também e a densidade e resistência do agregado gráudo natural tem a sua influência muito diminuída, diferente do agregado reciclado, que passa a ter os valores destas propriedades semelhantes aos da matriz do concreto, deixando de ser assim o elo frágil do sistema. Neste ponto, as características relacionadas com o agregado que passam a ter influência são a sua distribuição granulométrica, textura, forma e taxa de absorção, como o agregado reciclado apresenta maior absorção, textura mais rugosa, forma

mais irregular e granulometria mais contínua e conseqüentemente um aumento da aderência pasta/agregado, a zona de transição de concretos reciclados com relações a/c mais altas é melhor que a zona de transição de concretos convencionais com semelhantes proporções, sendo assim, todo o conjunto passa a atuar na absorção e distribuição das tensões de forma semelhante, ajudando a aumentar a resistência dos concretos reciclados com altas relações a/c.

Para valores de momentos maiores que 10KN.m, percebe-se que a série L1 produzida com o concreto de referência possui deslocamentos menores que as séries L2 e L3 produzidas com concreto RCD 50% e concreto RCD 100% respectivamente. A série L2, também para momentos acima de 10KN.m, apresentou deslocamentos menores que os da série L3.

Apesar dos concretos reciclados das lajes das séries L2 e L3 possuírem módulos de elasticidades teóricos, aos 14dias, menores que o módulo do concreto de referência, o comportamento das lajes principalmente na

Para os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso a NBR-6118 (ABNT, 2004), estabelece que o limite de flecha das lajes e vigas em serviço é dado por $1/350$, no caso das lajes ensaiadas este limite corresponde a 8,0 mm. Pode-se observar através da Figura 65 que as lajes possuem praticamente o mesmo comportamento para valores de deslocamentos menores que o limite estabelecido por norma.

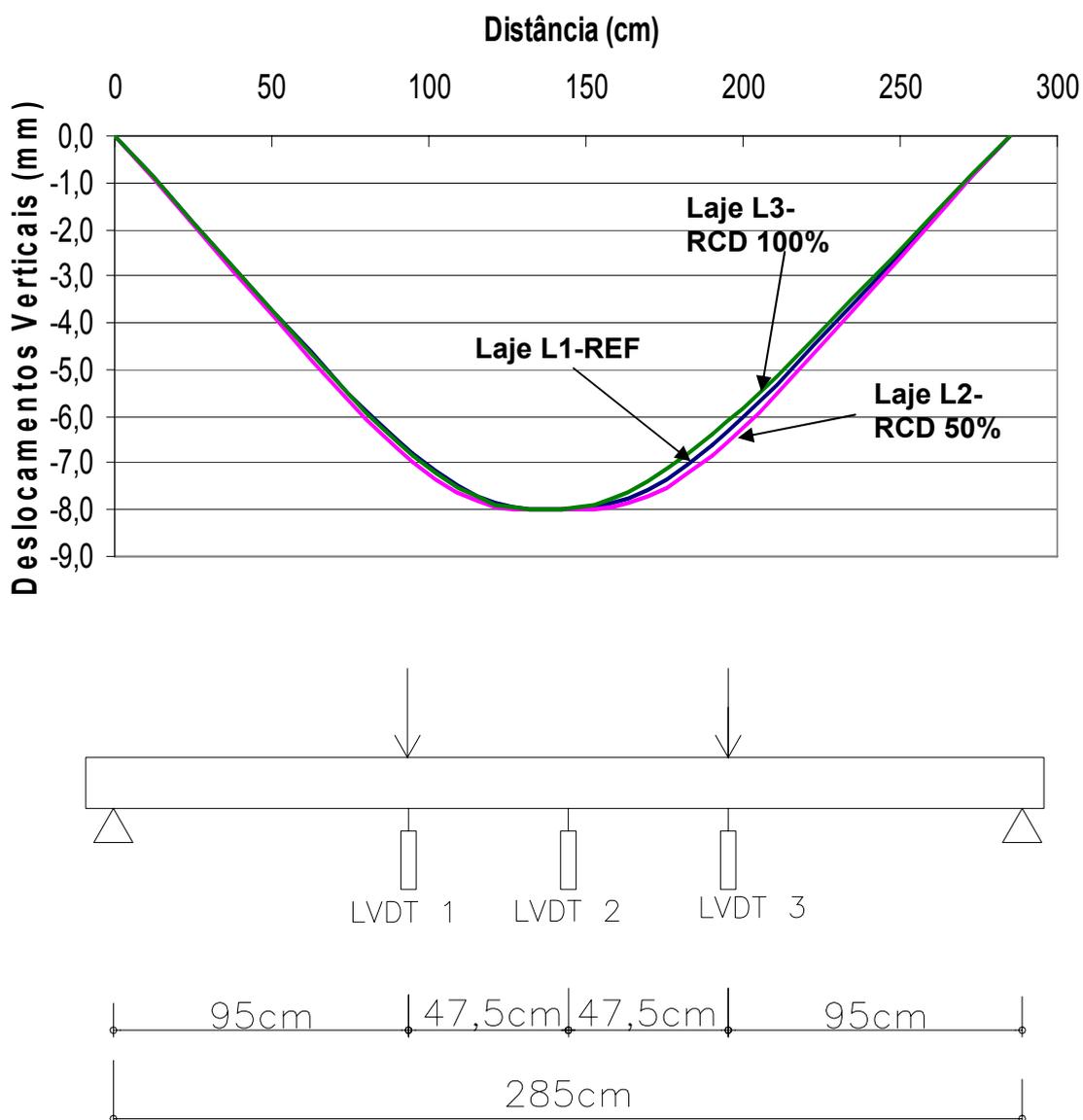


Figura 65 – Deslocamentos verticais na direção longitudinal das lajes L1, L2, L3 até a flecha limite de 8,0 mm

b) Valores teóricos x Valores experimentais

Comparando os valores teóricos com os experimentais da Tabela 11, observa-se que o valor do momento de fissuração experimental da série L1 é 89,6% maior que o momento de fissuração calculado teoricamente através da equação (19). Para a série L2 esse aumento corresponde a 15,4% e para a série L3 o aumento foi de 28,4%.

Observa-se através da Tabela 12 que, em todas as séries, as cargas de serviço determinadas experimentalmente foram bem maiores que as cargas de serviço teóricas. Para a série L1 esse aumento foi de 92,5%, no caso do concreto reciclado da série L2 o aumento foi de 91,2% e para a laje produzida com concreto RCD 100% (série L3), a carga experimental de serviço foi duas vezes maior que a carga de serviço teórica.

c) Modelagem da curva momento x deflexão

Para a determinação teórica da curva momento x deflexão das vigas T ensaiadas adotou-se o modelo descrito no capítulo 3 para $h_f \geq 0,8X_{lim}$, em que foram utilizadas as equações (19), (20) e (21), para a determinação do momento de fissuração, da resistência à tração e da inércia equivalente, respectivamente. A determinação do módulo de elasticidade dos concretos aos 14 dias foi realizada através da equação (18), para o concreto convencional (série L1), e através das equações (1) e (2) para o concretos reciclados das séries L2 e L3, respectivamente.

As Figuras 66, 67 e 68 apresentam as curvas momento x deslocamento obtidas experimentalmente e teoricamente na seção central de cada série. Assim como nas vigas T, os gráficos foram gerados até o valor máximo de 8 mm para o deslocamento, já que acima deste valor a peça não atende mais as condições de serviço propostas pela normalização brasileira para a aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso.

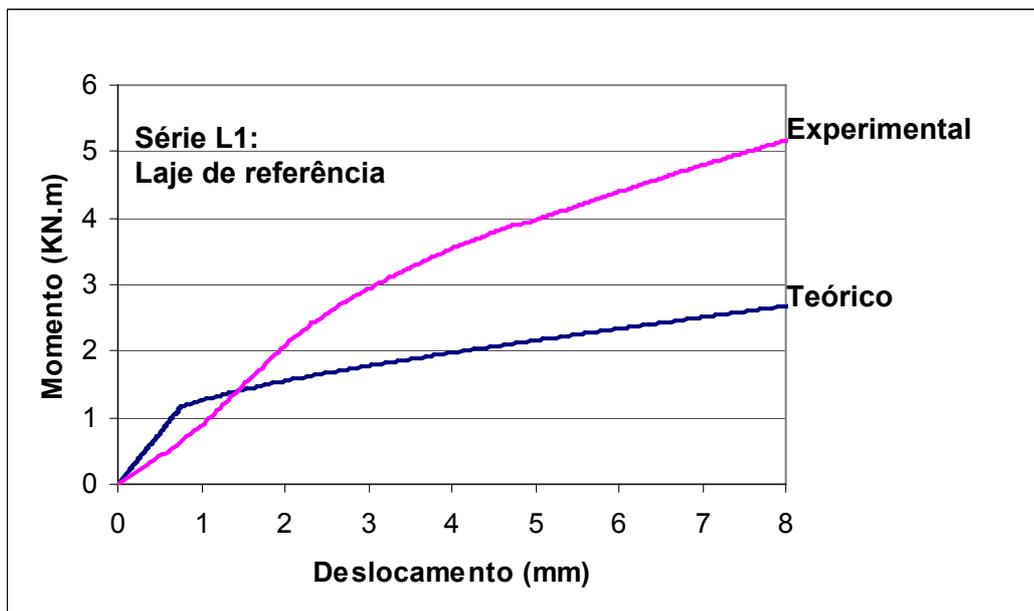


Figura 66 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L1

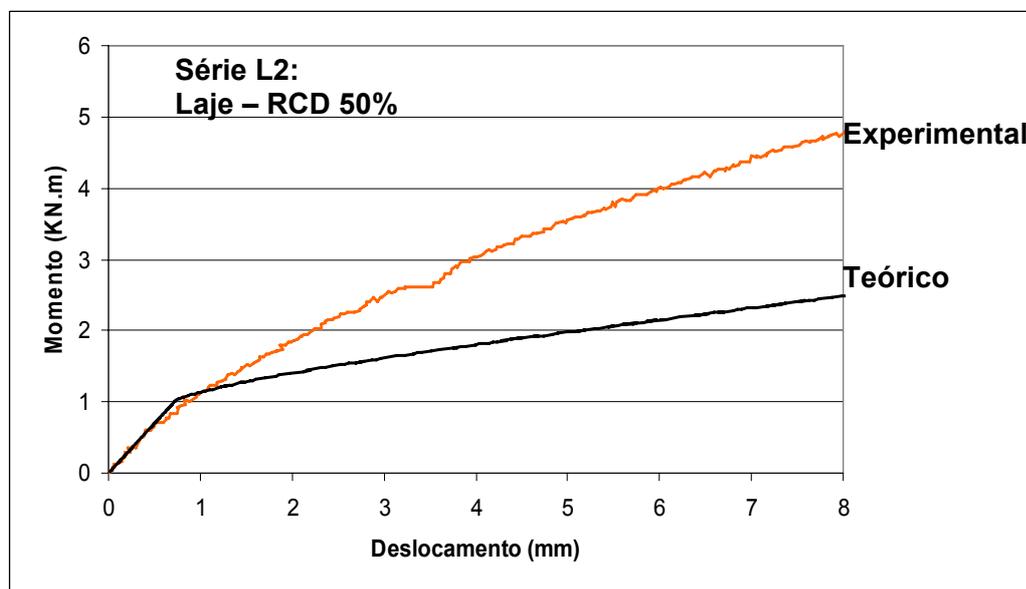


Figura 67 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L2

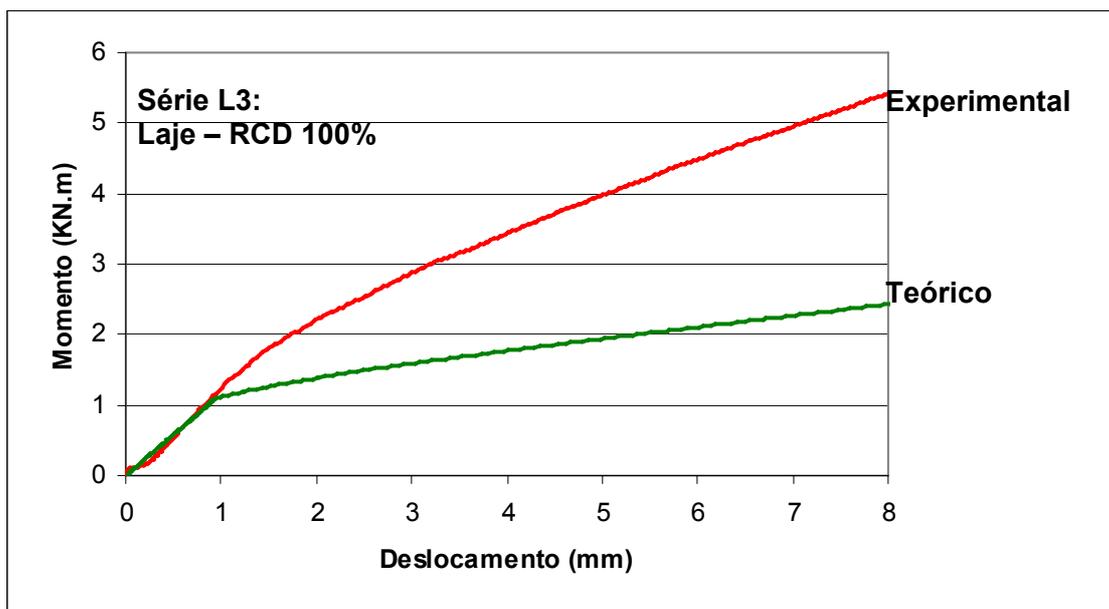


Figura 68 – Gráfico momento x deslocamento experimental e teórico da série L3

Comparando o comportamento das curvas teórica e experimental das lajes representadas pelas séries L1, L2 e L3 com as curvas teórica e experimental das vigas T representadas pelas séries T1, T2 e T3, verifica-se uma melhor aproximação entre as curvas, no modelo de viga T, já que não houve neste sistema estrutural a interferência do elemento de enchimento, no caso das lajes, as curvas teórica e experimental apresentam um afastamento maior, possivelmente por uma influência do elemento de enchimento (lajota cerâmica), que não foi levada em consideração no modelo teórico.

Ensaio à flexão realizados por LATTERZA (1998) em painéis leves de vedação produzidos com concretos reciclados de demolição e construção, apresentaram um comportamento semelhante ao comportamento das lajes ensaiadas neste trabalho, com um melhor comportamento dos painéis produzidos com concretos reciclados com 50% de substituição em relação aos painéis de vedação produzidos com concreto convencional. A Figura 69 mostra os resultados dos ensaios produzidos por LATTERZA (1998).

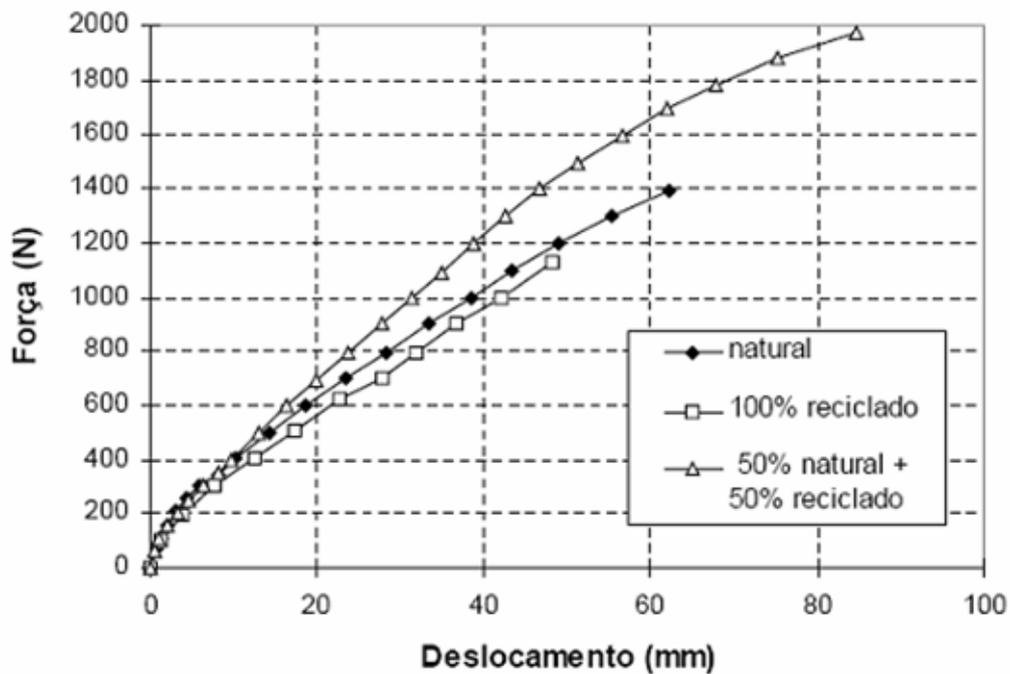


Figura 69 - Gráfico força x deslocamento transversal para os 3 tipos de painéis – (LATTERZA-1998)

d) Fissuração

As fissuras observadas visualmente foram marcadas em cada laje no final da realização do ensaio, com o modelo ainda carregado e na posição de ensaio. Todas as fissuras surgiram na parte inferior da laje, transversalmente à base da vigota.

As figuras 70 e 71 apresentam as configurações das fissuras da laje de referência produzida com concreto convencional.

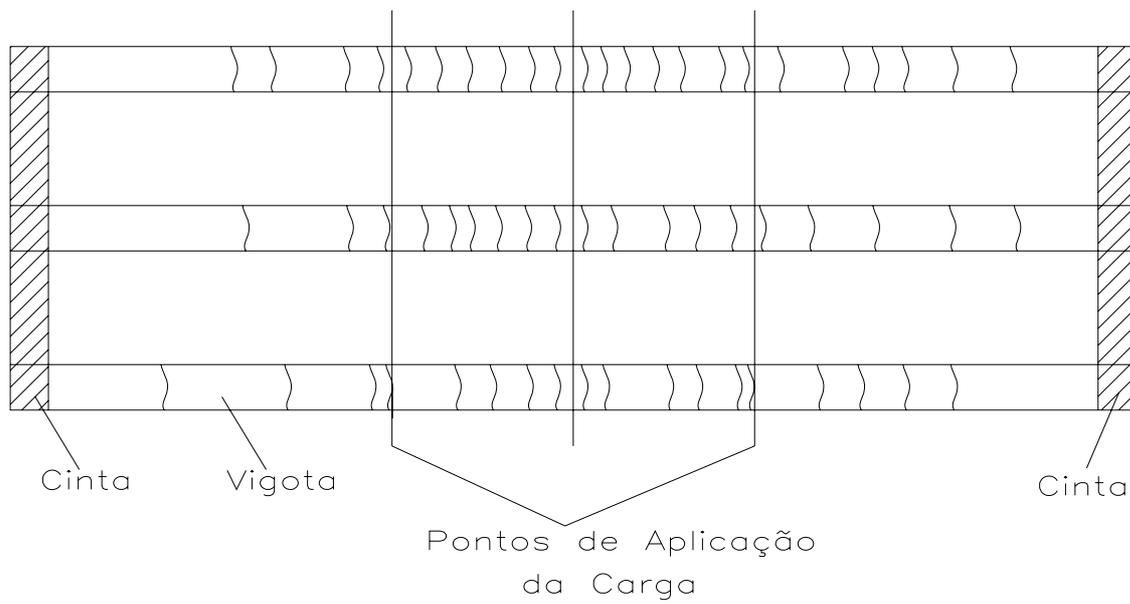


Figura 70 - Configuração das fissuras da laje de referência



Figura 71 - Fotografia da laje de referência fissurada

As Figuras 72 e 73 apresentam as configurações das fissuras da laje produzida com concreto reciclado com 50% de substituição dos agregados graúdos e miúdos.

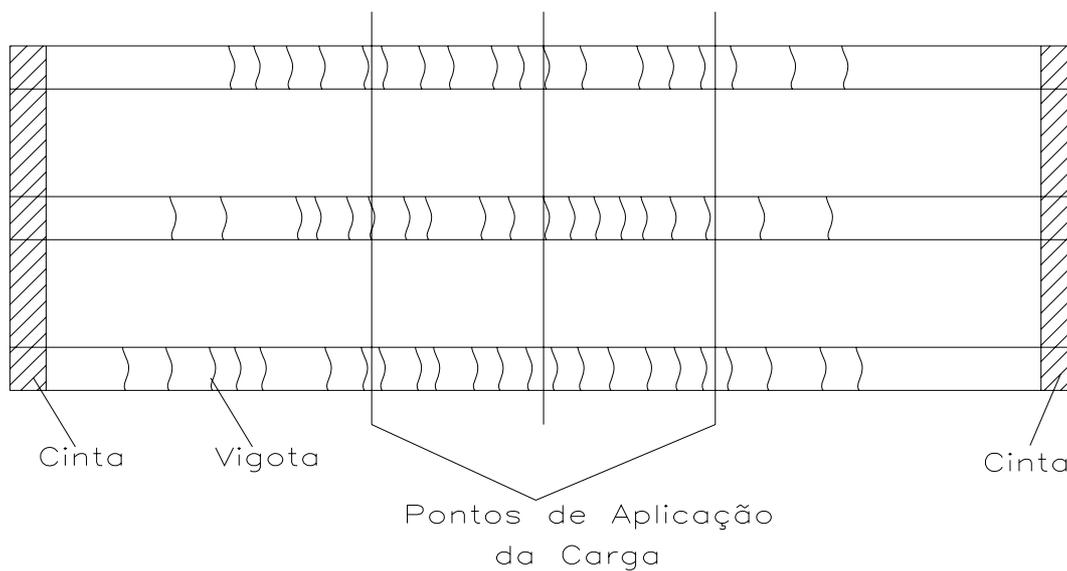


Figura 72 - Configuração das fissuras da laje produzida com concreto RCD-50%



Figura 73 - Fotografia da laje RCD-50% fissurada

As Figuras 74 e 75 apresentam as configurações das fissuras da laje produzida com concreto reciclado com 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos.

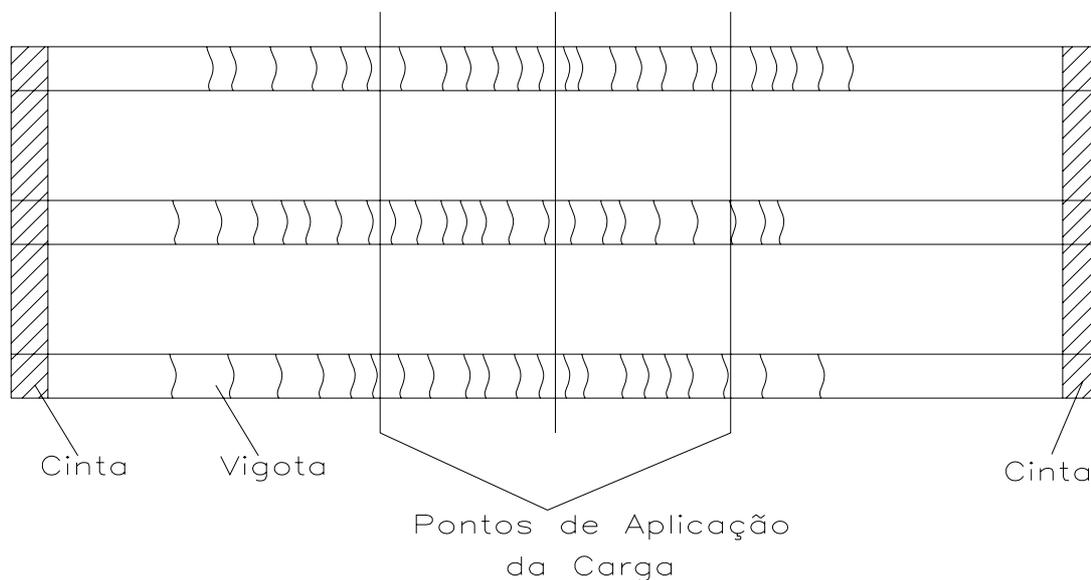


Figura 74 - Configuração das fissuras da laje produzida com concreto RCD-100%



Figura 75 - Fotografia da laje RCD-100% fissurada

Pode-se verificar através das Figuras 70 a 75, um padrão de formação das fissuras, já que houve em todas as lajes, um maior aparecimento de fissuras de flexão, principalmente entre os dois pontos de aplicação de carga.

O espaçamento médio entre as fissuras medidas em cada laje e a quantidade total de fissuras verificada em cada laje são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Espaçamento médio entre as fissuras e quantidade total de fissuras das lajes

LAJES	ESPAÇAMENTO MÉDIO ENTRE FISSURAS (mm)	QUANTIDADE TOTAL DE FISSURAS
SÉRIE L1	108,36	60
SÉRIE L2	80,13	63
SÉRIE L3	78,96	67

Observa-se através da Tabela 13 que o espaçamento entre as fissuras na laje da série L1 (Referência) é maior que nas lajes das séries L2 e L3 produzidas com concreto reciclado. A laje da série L3 produzida com concreto reciclado com 100% de substituição, apresentou o menor valor de espaçamento entre as fissuras e uma maior quantidade de fissuras dentre todas as séries ensaiadas.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se obter as seguintes conclusões:

A NBR 6118 (ABNT, 2004) estimou valores de flechas na seção central das séries T1, T2, T3 e das séries L1, L2 e L3, maiores que os valores obtidos experimentalmente.

Em todas as séries ensaiadas, os deslocamentos experimentais foram menores que os deslocamentos determinados teoricamente para valores inferiores à flecha limite de $1/350$.

O modelo teórico da NBR-6118 (ABNT, 2004) se aproximou mais do comportamento experimental das vigas T em comparação com o comportamento das lajes.

Os gráficos momento x deslocamento no meio do vão de todas as séries ensaiadas, mostraram que as curvas possuem o mesmo comportamento, sendo formadas basicamente por três segmentos: o primeiro ocorre quando o concreto da face tracionada ainda não fissurou, caracterizando a fase elástico-linear, em seguida, há uma mudança de inclinação da curva evidenciando uma perda de rigidez em função do início do processo de fissuração (fase elasto-plástica) e, por fim, a fase plástica em que se observa um maior aumento nos deslocamentos sem grandes incrementos de carga.

Os concretos reciclados das vigotas e das capas das lajes e das vigas T produzidos nesta pesquisa oferecem boas condições de fabricação e atingem valores satisfatórios de resistência à compressão.

O comportamento das lajes produzidas com concretos reciclados foi muito semelhante ao comportamento da laje de referência, para valores de deslocamentos abaixo da flecha limite estabelecido pela NBR-6118 (ABNT, 2004) para os critérios de aceitabilidade sensorial para vibrações sentidas no piso.

Observou-se um padrão de formação das fissuras em todas as lajes ensaiadas pois, houve um maior aparecimento de fissuras de flexão, principalmente entre os dois pontos de aplicação de carga.

A laje produzida com concreto reciclado com 100% de substituição apresentou grande dificuldade de moldagem na capa.

Os resultados mostram a viabilidade técnica de se empregar agregados graúdos e miúdos reciclados de construção e demolição em concretos estruturais de média resistência.

Com este trabalho, espera-se ter cumprido mais uma etapa na busca por uma alternativa válida para o aproveitamento do resíduo da construção e demolição através da utilização de agregados graúdos e miúdos reciclados em concretos estruturais, contribuindo com a qualidade ambiental, considerando-se a não deposição clandestina do entulho na malha urbana e ainda podendo significar redução de custos nas obras destinadas às classes sociais de baixa renda.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Verificar a durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados.
- Realizar um estudo experimental sobre a deflexão ao longo do tempo de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado.
- Executar ensaios de flexão com lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado variando a taxa de armadura das vigotas.
- Executar ensaios de flexão com lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado variando o a resistência à compressão e o fator a/c .
- Estudar a aderência entre a armadura e o concreto reciclado.
- Simular computacionalmente, através de uma modelagem numérica, o comportamento das lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado para se comparar com resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary – ACI 318/02**. Detroit, American Concrete Institute, 2001.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado** / José Milton de Araújo. 2ª ed. Rio Grande: Dunas, 2003.

ASSIS, Carlos Eduardo A. R. de. **Análise experimental de lajes treliçadas reforçadas pela face superior**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e seguranças nas estruturas**. NBR 8681/2003. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. NBR 6120/80. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **Concreto: ensaio de compressão de corpos -de-prova cilíndricos – Método de ensaio**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais**. NBR 14859-1/2002. Rio de Janeiro.

_____. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. NBR 9062/2001. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Projeto de estruturas de concreto- Procedimento**. NBR 6118/2004. Rio de Janeiro.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Volumes 1 e 2. 5ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos, 1994.

BORGES, J. U. **Crítérios de projeto de lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas**. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 1997.

CAIXETA, D. P. **Contribuição ao estudo de lajes pré-fabricadas co vigas treliçadas**. 1998. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – UNICAMP, Campinas-SP.

CARVALHO, Roberto Chust. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2003** / Roberto Chust Carvalho, Jansson Rodrigues de Figueiredo. São Carlos: EdUFSCar, 2001,2004.

DI PIETRO, J.E. **Projeto, execução e produção de lajes com vigotas pré-moldadas**. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 1993

DROPPA, Jr. Alonso. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. Dissertação de mestrado,

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999

DROPPA, Jr. Alonso. **“TRELIÇAS BELGO 1.0”** – Programa automático para cálculo de nervuras treliçadas distribuído pela companhia siderúrgica Belgo-Mineira – Mídia magnética. Belo Horizonte, MG.2003.

FLÓRIO, Márcio Cardozo. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2003.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Estruturas de concreto: solicitações normais/** Péricles Brasiliense Fusco. São Paulo: Pini, 1986.

GASPAR, R. **Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção**. 1997. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – USP, São Paulo.

GERDAU – **Tabelas de dimensionamento de lajes treliçadas** - São Paulo, 2002.

JUAN DE, Marta Sánchez et. al. **Influence of recycled aggregate quality on concrete properties**. Internacional RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona, 2004.

KATAOKA, Luciana Tiemi. **Estudo experimental de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas de concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. *Orientador:* Roberto Chust Carvalho

LARRANAGA, Miren Etxeberria. **Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete** – Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona, 2004.

LATTERZA, Luciano de Mello. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para a fabricação de painéis leves de vedação** – São Carlos:1998 116p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo.

LATTERZA, Luciano M.; MACHADO JR, Eloy Ferraz. **Concreto com agregado graúdo reciclado: propriedades no estado fresco e endurecido e aplicação em pré-moldados leves**. 2003.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p.Tese (Doutorado) – Escola de

Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEVY, Salomon Mony; Helene Paulo Roberto do Lago, **Evolução Histórica da utilização do Concreto como Material de Construção**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Construção Civil Boletim Técnico – Série BT/PCC, São Paulo 2002.

LIMA, P. R.; LIMA, M. B. L.; MOURA, W. A.; GONSALVES, J. P.; BORGES, M. G. **Comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado**. 49 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Bento Gonçalves, 2007. Anais, 14p.

LIMA, Paulo Roberto Lopes, **Análise não-linear da deflexão de vigas de concreto armado**. Sitientibus, Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana, 2003.

LIMA, Paulo Roberto Lopes **Análise da durabilidade de estruturas de concreto armado**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PEC/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

MARUYAMA, Ippei et al **Flexural properties of reinforced recycled concrete beams**. Internacional RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona, 2004.

MAGALHÃES, Fábio Lopes. **Estudo dos momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo nervuras com armação treliçada**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2001.

MEHTA, Povindar Kumar. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais/ Povindar Kumar Mehta, Paulo J.M.Monteiro**. São Paulo: Pini, 1994.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. 140p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos - Universidade de São Paulo.

ROCHA, Aderson Moreira da. **Novo curso prático de concreto armado / Aderson Moreira da Rocha**. Rio de Janeiro: Científica, 1986.

SANTINE, Carlos Roberto. **Projeto e construção de lajes pré-moldadas de concreto armado**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2005.

SOUZA, Vicente Custódio de. **Lajes em Concreto Armado e Protendido** / Albino Joaquim Pimenta da Cunha, Vicente Custódio Moreira de Souza. 2ª ed. Niterói: EDUFF, Rio de Janeiro: Ed. UERJ, 1998.

SUSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto: Concreto Armado** / José Carlos Sussekind. São Paulo: Globo.

TÉCHNE. **Revista mensal**, edição 112, páginas 32, 33, 34 e 35, Editora PINI, julho de 2006.

VÁSQUEZ, E.; Barra, M. Recycling of aggregates in the construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. **Proceedings...** [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000.

VIEIRA, Geilma Lima. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição** – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003 150 p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Curso Básico AltoQi Eberick 2002, Eng. Alexandre J. Vieira Rodrigues, Em. Rodrigo Broering Koerich, Eng. André Luiz Banki, Florianópolis, 2003

AltoQi, Programa para o cálculo de estruturas em concreto armado. Disponível em <<http://www.altoqi.com.br>> Acesso em: dezembro de 2005.

XIAO, Jianzhuang; SUN, Yuedong; FALKNER, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. 2005.

ANEXO

1. EXEMPLOS NUMÉRICOS

Para verificar o comportamento de diferentes configurações de lajes pré-moldadas com relação aos limites de deslocamento, apresenta-se a seguir exemplos numéricos utilizando alguns modelos de cálculo descritos nos capítulos deste trabalho.

1.1 EXEMPLO 1

Calcular a flecha imediata de uma laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto convencional simplesmente apoiada com um vão de 3,15m (figura 1) para os seguintes dados:

- Tipo de Laje : Laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto convencional e $f_{ck} = 20\text{MPa}$.
- Elemento de enchimento EPS com altura de 8cm
- Seção transversal da laje: altura da laje é igual a 12cm, sendo $h_o=8\text{cm}$ e $h_c=4\text{cm}$, $b_f = 32\text{ cm}$ e $b_w= 9\text{cm}$ (figura 2)
- Carregamento: a carga permanente (peso próprio) g_1 é igual a $1,5\text{ kN/m}^2$, a carga de revestimento g_2 é igual a $0,5\text{ kN/m}^2$ e a acidental q é igual $1,5\text{ kN/m}^2$.
- Armadura de cada vigota - $2\Phi 5.0\text{mm}$ – Área de aço igual a $0,39\text{cm}^2$

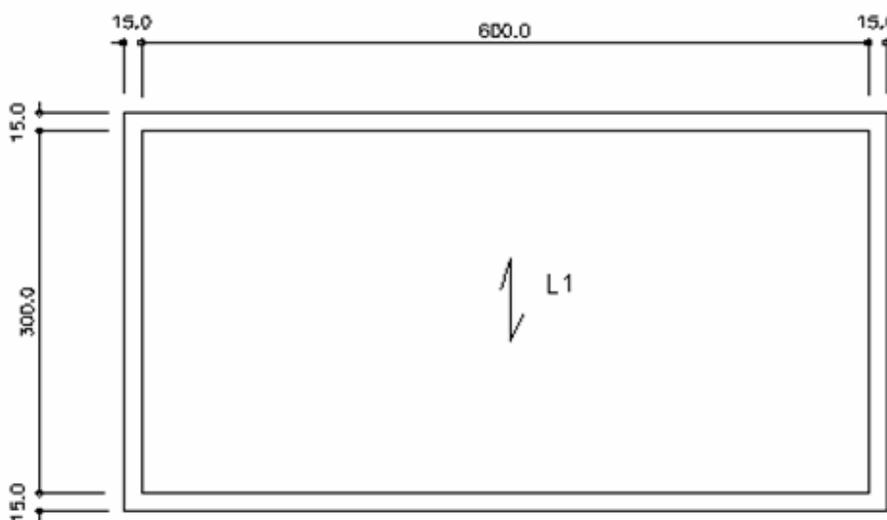


Figura 1 - Fôrma da Laje

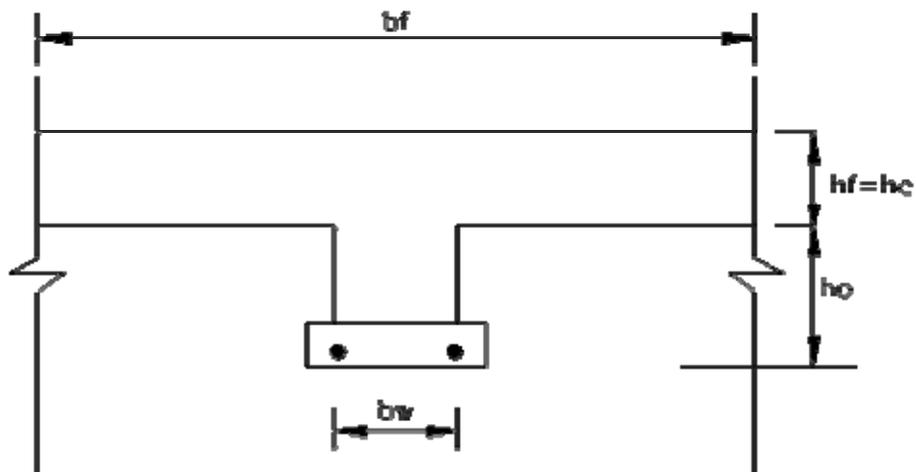


Figura 2 - seção T equivalente a capa de concreto mais a viga.

Resolução:

I - Cálculo dos Esforços

$$\bullet p = (0,5 + 1,5 + 1,5) \cdot 0,32 = 1,12 \text{ kN/m} \quad (1)$$

$$\bullet M_{\text{máx}} = \frac{pl^2}{8} = \frac{1,12 \cdot 3,15^2}{8} = 1,38 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

• Combinações quase permanentes

$$q_{d,ser} = \sum q_{gk} + \psi_2 q_{qk} = (0,5 + 1,5) \cdot 0,32 + 0,3(1,5 \cdot 0,32) = 0,784 \text{ kN/m} \quad (3)$$

$$\bullet M_{\dot{a}} = \frac{q_{dser} l^2}{8} = \frac{0,784 \cdot 3,15^2}{8} = 0,972 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

II - Cálculo das propriedades mecânicas e geométricas:

Resistência à tração

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2,21 \text{ MPa} \quad (5)$$

Módulo de elasticidade

$$E_s = 21000 \text{ MPa}$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} = 21287,36 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = 9,86 \quad (7)$$

Seção T no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

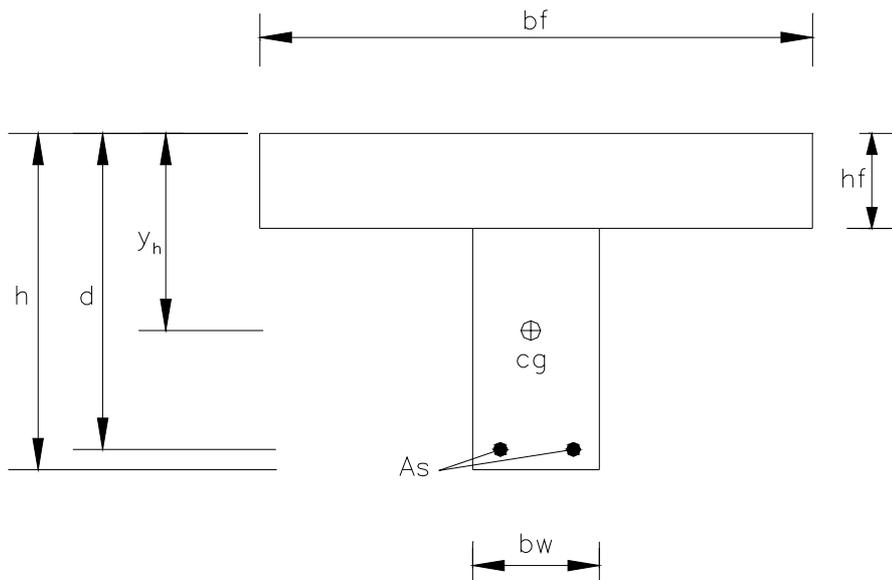


Figura 3 - Seção no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

A relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto é calculada através da equação 7.

Área da seção homogeneizada

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1) = 203,48 \text{ cm}^2 \quad (8)$$

Centro de Gravidade:

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2} + A_s (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h} = 4,27 \text{ cm} \quad (9)$$

Momento de inércia à flexão:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f \left(y_h - \frac{h_f}{2} \right)^2 + b_w.h \left(y_h - \frac{h}{2} \right)^2 + A_s.(\alpha_e - 1).(y_h - d)^2$$

$$I_g = 2363,4\text{cm}^4 \quad (10)$$

Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

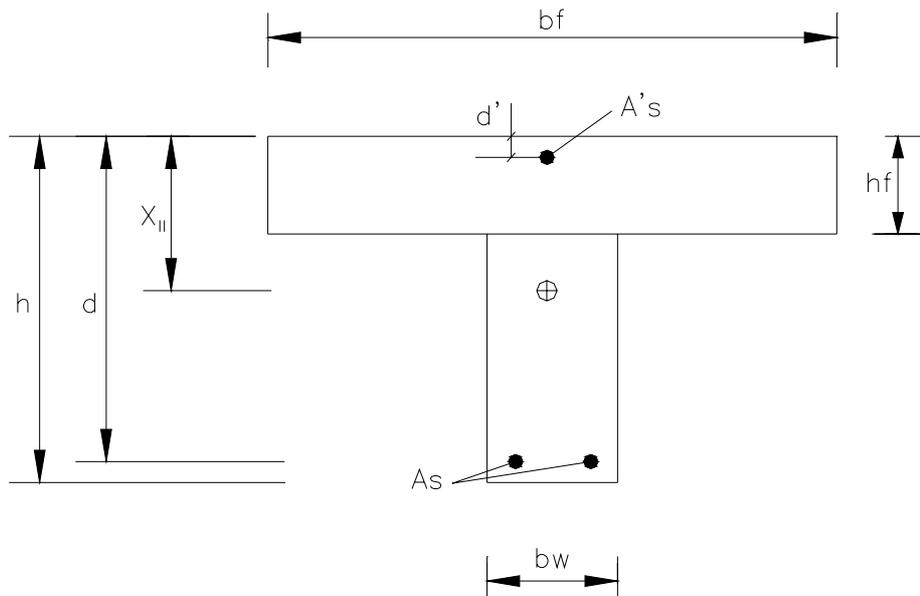


Figura 4 -Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

Linha neutra em serviço - (X_{II})

$$a_1 X_{II}^2 + a_2 X_{II} + a_3 = 0 \quad (11)$$

Sendo:

$$a_1 = \left(\frac{bf}{2} \right) = 16\text{cm} \quad (12)$$

$$a_2 = h_f (b_f - b_w) + \alpha_e A_s = 3,85\text{cm}^2 \quad (13)$$

$$a_3 = -d\alpha_e A_s - \frac{h_f^2}{2} (b_f - b_w) = -41,55\text{cm}^3 \quad (14)$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1} = 1,5\text{cm} \quad (15)$$

Momento de inércia no estágio II

Como $X_{II} < h_f$

$$I_{x,II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2 = 368,75 \text{cm}^4 \quad (16)$$

III - Cálculo da flecha imediata:

Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{cr} \cdot I_c}{y_t} = 0,81 \text{KN} \cdot \text{m} \quad (17)$$

Inércia Equivalente

$$I_{eq} = \left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 \right] I_{II} = 1527,85 \text{cm}^4 \quad (18)$$

Flecha imediata para vigas biapoiadas com cargas distribuídas uniformes.

$$a_{oe} = \frac{5q_{ser} \cdot l^4}{384 Ecs \cdot I_{eq}} = \mathbf{0,38 \text{cm}} \quad (19)$$

1.2 EXEMPLO 2

Calcular a flecha imediata de uma laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto reciclado com 50% de substituição dos agregados graúdos e miúdos, simplesmente apoiada com um vão de 3,15m (figura 5) para os seguintes dados:

- f) Tipo de Laje : Laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto reciclado com 50% de substituição dos agregados graúdos e miúdos e $f_{ck} = 20\text{MPa}$.
- g) Elemento de enchimento EPS com altura de 8cm
- h) Seção transversal da laje: altura da laje é igual a 12cm, sendo $h_o=8\text{cm}$ e $h_c=4\text{cm}$, $b_f = 32\text{ cm}$ e $b_w= 9\text{cm}$ (figura 6)
- i) Carregamento: a carga permanente (peso próprio) g_1 é igual a $1,5\text{ kN/m}^2$, a carga de revestimento g_2 é igual a $0,5\text{ kN/m}^2$ e a acidental q é igual $1,5\text{ kN/m}^2$.
- j) Armadura de cada vigota - $2\Phi 5.0\text{mm}$ – Área de aço igual a $0,39\text{cm}^2$

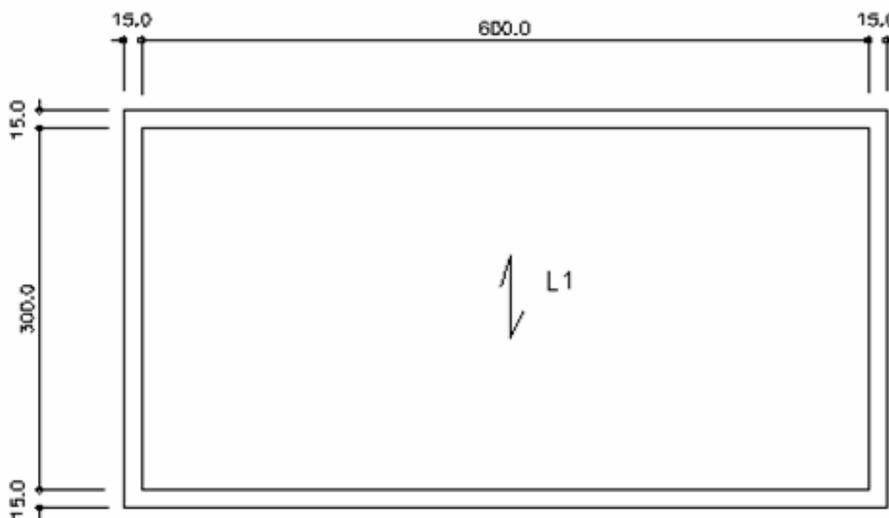


Figura 5 - Fôrma da Laje

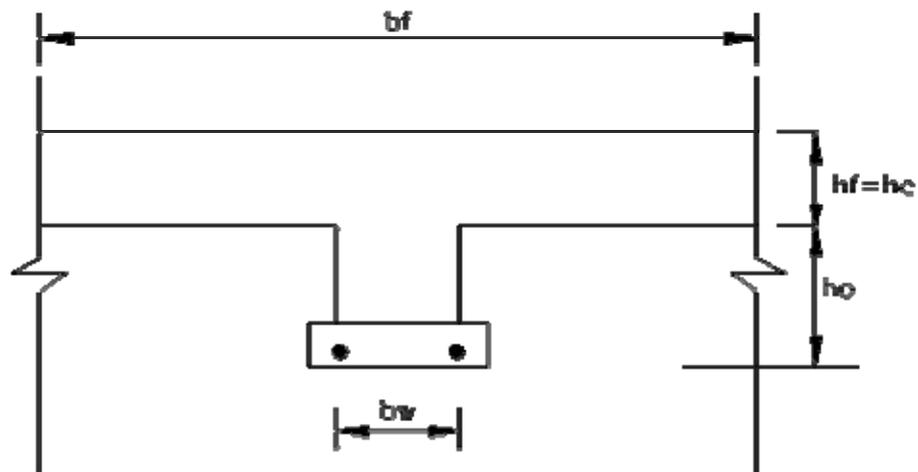


Figura 6 - seção T equivalente a capa de concreto mais a vigota.

Resolução:

I - Cálculo dos Esforços

$$\bullet p = (0,5 + 1,5 + 1,5) \cdot 0,32 = 1,12 \text{ kN} / \text{m} \quad (20)$$

$$\bullet M_{\text{máx}} = \frac{pl^2}{8} = \frac{1,12 \cdot 3,15^2}{8} = 1,38 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (21)$$

• Combinações quase permanentes

$$q_{d,ser} = \sum q_{gk} + \psi_2 q_{qk} = (0,5 + 1,5) \cdot 0,32 + 0,3(1,5 \cdot 0,32) = 0,784 \text{ kN} / \text{m} \quad (22)$$

$$\bullet M_a = \frac{q_{dser} l^2}{8} = \frac{0,784 \cdot 3,15^2}{8} = 0,972 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (23)$$

II - Cálculo das propriedades mecânicas e geométricas:

Resistência à tração - adotou-se a formulação da NBR6118:2004

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2,21 \text{ MPa} \quad (24)$$

Módulo de elasticidade

Aço:

$$E_s = 21000MPa$$

Para o concreto reciclado adotou-se a formulação proposta por JUAN-2004:

$$E_c(50\%) = 8936 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}(50\%)} \text{ com } f_{cm}(50\%) \text{ em MPa} \quad (25)$$

$$E_{cs}(50\%) = 0,85 \cdot E_c(50\%) = 0,85 \cdot 8936 \cdot \sqrt[3]{20} = 20617,42MPa \quad (26)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = 10,18 \quad (27)$$

Seção T no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

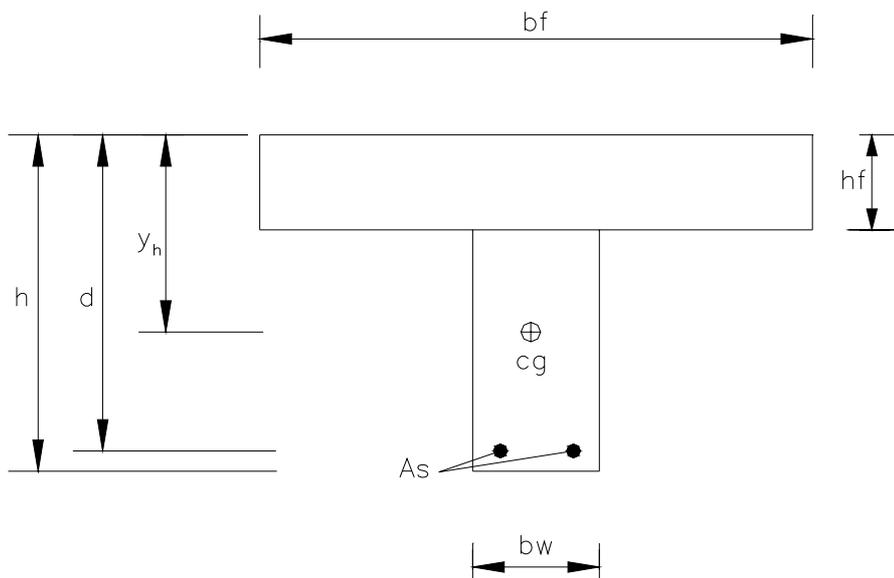


Figura 7 - Seção no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

A relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto é calculada através da equação 27.

Área da seção homogeneizada

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1) = 203,58cm^2 \quad (28)$$

Centro de Gravidade:

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2} + A_s(\alpha_e - 1).d}{A_h} = 4,28cm \quad (29)$$

Momento de inércia à flexão:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f \left(y_h - \frac{h_f}{2} \right)^2 + b_w.h \left(y_h - \frac{h}{2} \right)^2 + A_s.(\alpha_e - 1).(y_h - d)^2$$

$$I_g = 2328,71cm^4 \quad (30)$$

Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

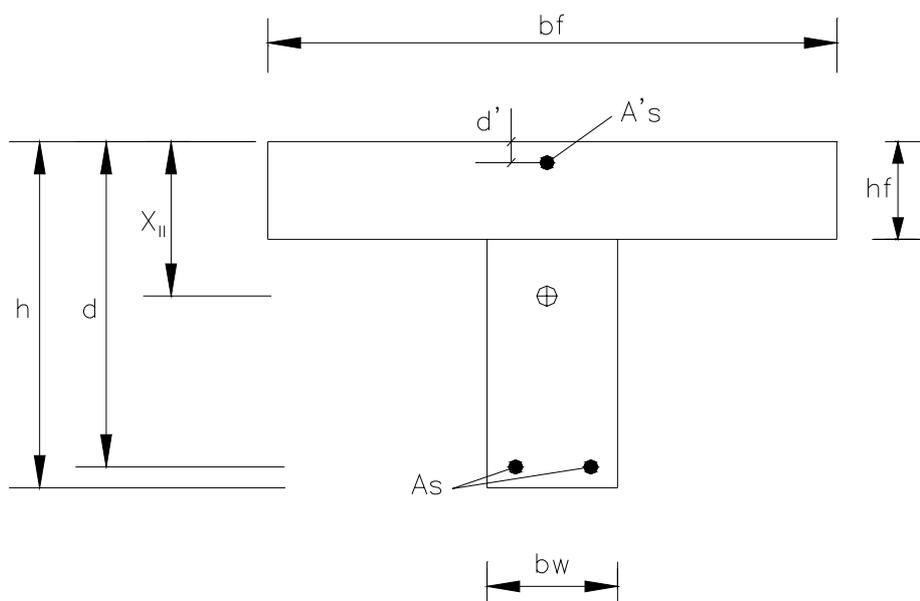


Figura 8 - Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

Linha neutra em serviço - (X_{II})

$$a_1 X_{II}^2 + a_2 X_{II} + a_3 = 0 \quad (31)$$

Sendo:

$$a_1 = \left(\frac{bf}{2} \right) = 16cm \quad (32)$$

$$a_2 = h_f(b_f - b_w) + \alpha_e A_s = 3,97cm^2 \quad (33)$$

$$a_3 = -d\alpha_e A_s - \frac{h_f^2}{2}(b_f - b_w) = -42,9\text{cm}^3 \quad (34)$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} = 1,52\text{cm} \quad (35)$$

Momento de inércia no estágio II

Como $X_{II} < h_f$

$$I_{x,II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2 = 379,55\text{cm}^4 \quad (36)$$

III - Cálculo da flecha imediata:

Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} = 0,81\text{KN} \cdot \text{m} \quad (37)$$

Inércia Equivalente

$$I_{eq} = \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3\right] I_{II} = 1545,1\text{cm}^4 \quad (38)$$

Flecha imediata para vigas biapoiadas com cargas distribuídas uniformes.

$$a_{oe} = \frac{5q_{ser} \cdot l^4}{384Ecs \cdot I_{eq}} = 0,39\text{cm} \quad (39)$$

1.3 EXEMPLO 3

Calcular a flecha imediata de uma laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto reciclado com 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos, simplesmente apoiada com um vão de 3,15m (figura 9) para os seguintes dados:

- k) Tipo de Laje : Laje pré-moldada tipo trilho fabricada com concreto reciclado com 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos e $f_{ck} = 20\text{MPa}$.
- l) Elemento de enchimento EPS com altura de 8cm
- m) Seção transversal da laje: altura da laje é igual a 12cm, sendo $h_o=8\text{cm}$ e $h_c=4\text{cm}$, $b_f = 32\text{ cm}$ e $b_w= 9\text{cm}$ (figura 10)
- n) Carregamento: a carga permanente (peso próprio) g_1 é igual a $1,5\text{ kN/m}^2$, a carga de revestimento g_2 é igual a $0,5\text{ kN/m}^2$ e a acidental q é igual $1,5\text{ kN/m}^2$.
- o) Armadura de cada vigota - $2\Phi 5.0\text{mm}$ – Área de aço igual a $0,39\text{cm}^2$

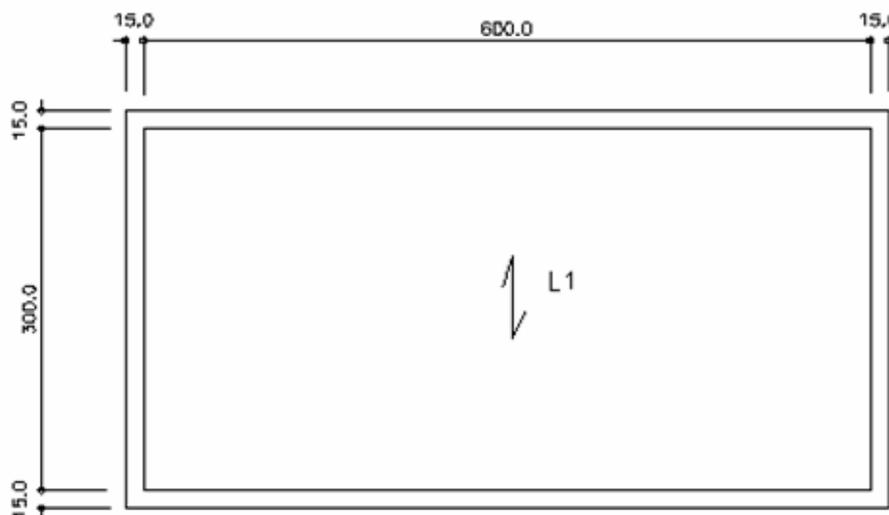


Figura 9 - Fôrma da Laje

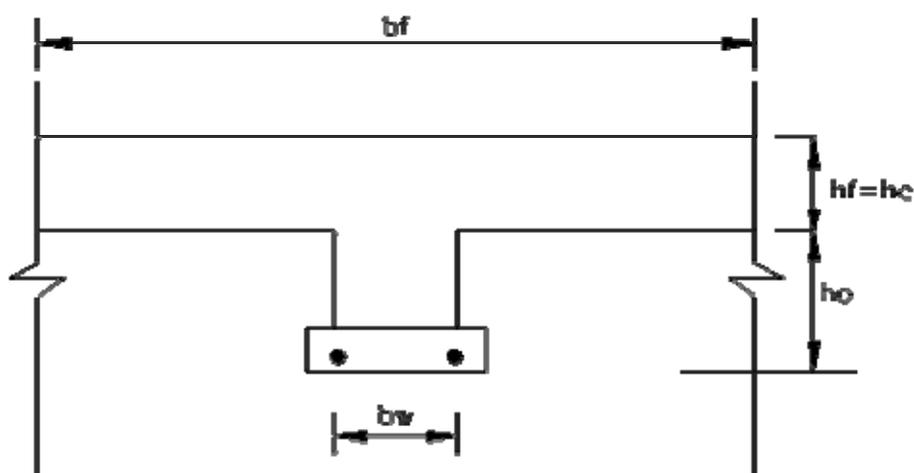


Figura 10 - seção T equivalente a capa de concreto mais a vigota.

Resolução:

I - Cálculo dos Esforços

$$\bullet p = (0,5 + 1,5 + 1,5) \cdot 0,32 = 1,12 \text{ kN/m} \quad (40)$$

$$\bullet M_{\text{máx}} = \frac{pl^2}{8} = \frac{1,12 \cdot 3,15^2}{8} = 1,38 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (41)$$

• Combinações quase permanentes

$$q_{d,ser} = \sum q_{gk} + \psi_2 q_{qk} = (0,5 + 1,5) \cdot 0,32 + 0,3(1,5 \cdot 0,32) = 0,784 \text{ kN/m} \quad (42)$$

$$\bullet M_a = \frac{q_{dser} l^2}{8} = \frac{0,784 \cdot 3,15^2}{8} = 0,972 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (43)$$

II - Cálculo das propriedades mecânicas e geométricas:

Resistência à tração - adotou-se a formulação da NBR6118:2004

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2,21 \text{ MPa} \quad (44)$$

Módulo de elasticidade

Aço:

$$E_s = 21000 \text{MPa}$$

Para o concreto reciclado adotou-se a formulação proposta por JUAN-2004:

$$E_c(100\%) = 7017 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}(100\%)} \text{ com } f_{cm}(100\%) \text{ em MPa} \quad (45)$$

$$E_{cs}(100\%) = 0,85 \cdot E_c(100\%) = 0,85 \cdot 7017 \cdot \sqrt[3]{20} = 16189,85 \text{MPa} \quad (46)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = 12,97 \quad (47)$$

Seção T no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

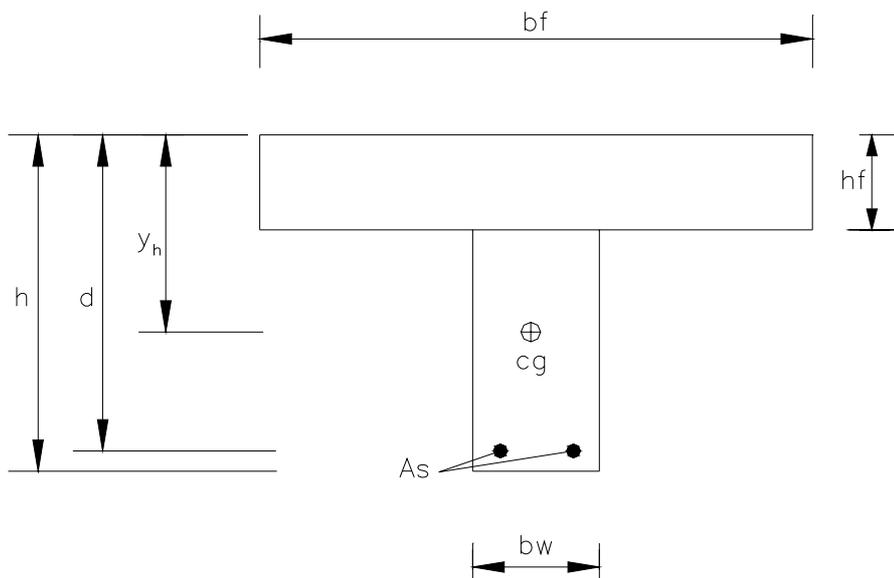


Figura 11 - Seção no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

A relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto é calculada através da equação 47.

Área da seção homogeneizada

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1) = 204,67 \text{cm}^2 \quad (48)$$

Centro de Gravidade:

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2} + A_s(\alpha_e - 1).d}{A_h} = 4,31 \text{ cm} \quad (49)$$

Momento de inércia à flexão:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w).h_f^3}{12} + \frac{b_w.h^3}{12} + (b_f - b_w).h_f \left(y_h - \frac{h_f}{2} \right)^2 + b_w.h \left(y_h - \frac{h}{2} \right)^2 + A_s.(\alpha_e - 1).(y_h - d)^2$$

$$I_g = 2414,7 \text{ cm}^4 \quad (50)$$

Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

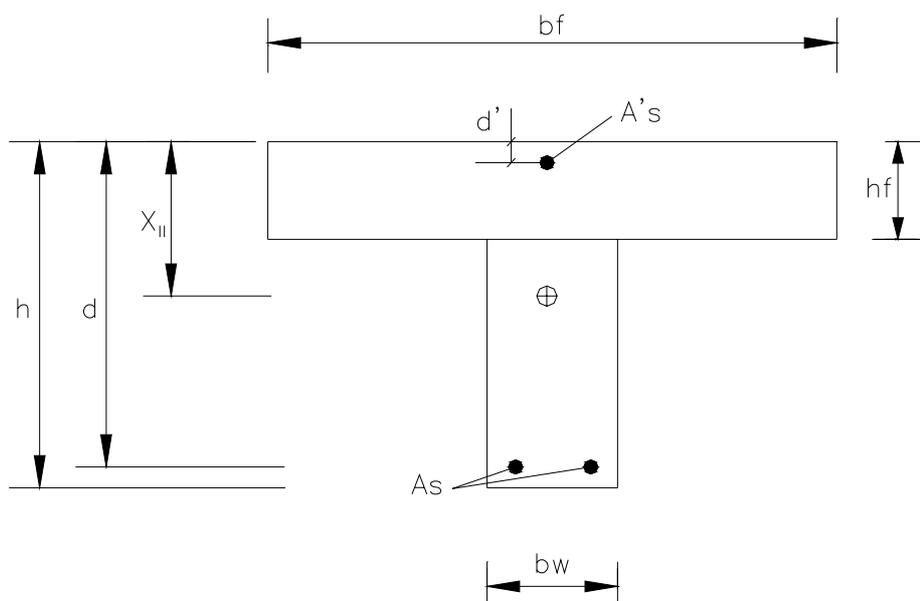


Figura 12 -Seção no estágio II, com armadura longitudinal A_s

Linha neutra em serviço - (X_{II})

$$a_1 X_{II}^2 + a_2 X_{II} + a_3 = 0 \quad (51)$$

Sendo:

$$a_1 = \left(\frac{bf}{2} \right) = 16 \text{ cm} \quad (52)$$

$$a_2 = h_f (b_f - b_w) + \alpha_e A_s = 5,06 \text{ cm}^2 \quad (53)$$

$$a_3 = -d\alpha_e A_s - \frac{h_f^2}{2}(b_f - b_w) = -54,63\text{cm}^3 \quad (54)$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} = 1,7\text{cm} \quad (55)$$

Momento de inércia no estágio II

Como $X_{II} < h_f$

$$I_{x,II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (X_{II} - d)^2 = 471,32\text{cm}^4 \quad (56)$$

III - Cálculo da flecha imediata:

Momento de fissuração

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} = 0,83\text{KN} \cdot \text{m} \quad (57)$$

Inércia Equivalente

$$I_{eq} = \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{Mr}{Ma}\right)^3\right] I_{II} = 1694,02\text{cm}^4 \quad (58)$$

Flecha imediata para vigas biapoiadas com cargas distribuídas uniformes.

$$a_{oe} = \frac{5q_{ser} \cdot l^4}{384Ecs \cdot I_{eq}} = 0,45\text{cm} \quad (59)$$

1.4 RESULTADOS FINAIS E CONCLUSÕES

1.4.1 RESULTADOS FINAIS

A tabela 1 apresenta os resultados finais da flecha imediata de cada exemplo resolvido.

Tabela 1 – Flecha imediata de cada laje

EXEMPLOS	Flecha imediata a_{oe} (cm)
EXEMPLO 1- LAJE PRODUZIDA COM CONCRETO DE REFERÊNCIA	0,38
EXEMPLO 2- LAJE PRODUZIDA COM CONCRETO RECICLADO COM 50% DE SUBSTITUIÇÃO	0,39
EXEMPLO 2- LAJE PRODUZIDA COM CONCRETO RECICLADO COM 100% DE SUBSTITUIÇÃO	0,45

1.4.2 CONCLUSÕES

Observa-se através da tabela 1 que a laje produzida com concreto reciclado com 50% de substituição dos agregados graúdos e miúdos, apresentou uma flecha imediata apenas 2,6% maior que a deformação imediata da laje produzida com concreto convencional para um mesmo valor de f_{ck} .

Para o concreto reciclado com 100% de substituição dos agregados graúdos e miúdos, o valor da flecha imediata foi 15,5% maior que a laje produzida com concreto de referência, isso ocorre porque o módulo de elasticidade deste concreto reciclado 100% é bem menor que o do concreto convencional, favorecendo o aumento da flecha imediata no sistema estrutural.

Conclui-se através dos exemplos apresentados no anexo deste trabalho, que os resultados obtidos estão de acordo com o estudo experimental apresentado no capítulo 5, onde verificou-se que até o estágio II as peças ensaiadas produziram valores de deslocamentos bem próximos para todos os

modelos. Por fim pode-se afirmar que concretos reciclados com $f_{ck} < 20$ MPa possuem um bom potencial de utilização, porém estudos mais aprofundados devem ser conduzidos.