## UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ALAN SANTOS DA MAIA** 

# ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À FLEXÃO DE LAJES PRÉ-FABRICADAS COM ENCHIMENTOS CONVENCIONAIS E LAJES SOLARES

## UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

#### ALAN SANTOS DA MAIA

# ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À FLEXÃO DE LAJES PRÉ-FABRICADAS COM ENCHIMENTOS CONVENCIONAIS E LAJES SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel, em Engenharia Civil, pela Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Orientadora: Profª. Ma. Sandra Denise Krüger Alves.

JOINVILLE 2017

## TERMO DE APROVAÇÃO

#### ALAN SANTOS DA MAIA

## ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL À FLEXÃO DE LAJES PRÉ-FABRICADAS COM **ENCHIMENTOS CONVENCIONAIS E LAJES SOLARES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

**BANCA EXAMINADORA:** 

a. Ma. Sandra Denise Krüger Alves (Orientadora) Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Prof. Dr. Itamar Ribeiro Gomes (Examinador)

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Profa. Ma. Fernanda Aparecida João (Examinadora) Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 30 de junho de 2017.

"Partíamos antes que o sol surgisse, e ainda sonolentos, conversávamos ao longo de todo o caminho. Lembro-me das ruas esburacadas que levavam-nos à escola. Não tratavam-se de alguns metros, eram longos dezessete quilômetros guiando-me sobre a velha bicicleta. Quis a infelicidade que não estivesses aqui para acompanhar minha história. Ainda assim, como não poderia ser diferente, agradeço-a e dedico-lhe esta conquista, minha vó."

À Maria Izabel da Maia (In memoriam)

#### **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Osni e Joelma, que dedicaram suas vidas em prol da minha, agradeço por esta forma intensa de amor e compreensão. Que meus filhos venham a sentir por mim, ao menos uma pequena parcela do imenso orgulho que sinto por vocês.

Aos meus irmãos, Aline e Alisson, agradeço pela união, por sempre vislumbrarem os mesmos objetivos e transformarem nossas conversas em histórias inesquecíveis.

À minha namorada, Larissa, por estar ao meu lado em todos os momentos difíceis, acreditando neste sonho e em tudo que ainda temos pela frente.

À professora Sandra, que aceitou fazer parte deste trabalho, orientando e sofrendo com os curtos prazos que tínhamos, agradeço pela atenção que me foi fornecida nos momentos mais importantes. Gostaria de ressaltar a honra de ter sido seu aluno e orientando.

Aos amigos: Fernando Maldaner, Fernando Wolf e Neroci Jr., agradeço por ajudarem na construção das lajes.

Aos familiares que ajudaram de alguma forma: Osni, Alisson, Alexandre, Itacir, Fabiana, Juliana e Paulo, agradeço por dedicarem parte de suas vidas por mim e meu estudo.

Por fim, mas não menos importante, deixo meus sinceros agradecimentos aos colaboradores da pesquisa: Armação treliçada Puma, Everton (Laje solar), Thayana e Nivaldo (Duarte Lajes), Cármino (Armazém 21), Fábio (Supermix), Adilson, Profa Carmeane e Vitor (Laboratório de materiais de construção). Sem a colaboração de todos vocês este estudo não seria possível.

#### **RESUMO**

MAIA, A. S. Análise comparativa entre o comportamento estrutural à flexão de lajes pré-fabricadas com enchimentos convencionais e lajes solares. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, 2017. 123 p.

Dentre os materiais que atuam como enchimento em lajes trelicadas com vigotas, os mais usuais são as lajotas cerâmicas e o Poliestireno Expandido (EPS). Ambos. exceto em casos de dimensões especiais, possuem baixo custo e excelente aceitação no mercado nacional. Entretanto, para acompanhar a tendência de inovações sustentáveis, há a necessidade de introduzir novos materiais e métodos construtivos, que contribuam para um consumo inteligente de recursos e gerem grandes avanços tecnológicos no setor da construção civil. Para tal, utilizou-se um sistema com enchimento misto, que possibilita a passagem de iluminação natural através da laie. O conjunto, que substitui parcialmente o EPS e a lajotas cerâmicas. é composto por um suporte plástico de Polipropileno, denominado lajota solar, capaz de sustentar um bloco de vidro em posição horizontal. Porém, embora não exerça função estrutural no contexto da laje, neste caso, os enchimentos impossibilitam o capeamento de concreto em alguns pontos, afetando parte da seção resistente à compressão, pois há a necessidade de deixar a superfície do bloco de vidro sem obstruções, fazendo a laje possuir comportamento, até então, desconhecido. Com o objetivo de comparar as cargas, os deslocamentos, e as capacidades resistentes entre as lajes solares e as lajes convencionais, foram fabricadas duas amostras de cada modelo. As mesmas foram dimensionadas através do software Puma Win 17.4, executadas, e ensaiadas experimentalmente à flexão simples. As lajes solares apresentaram, em média, 95% da resistência à flexão obtida nas lajes convencionais. Para a taxa de blocos solares utilizados, três por m², esta redução de 5% pode ser absorvida pelas majorações atuantes nas estruturas de concreto, de 40% (1,4). Pois, considerando a redução permitida pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o coeficiente de segurança em elementos pré-fabricados pode ser igual a 1,3. Deste modo, as variações na resistência das lajes solares tendem a ser desprezadas, ou em casos mais conservadores, pode-se utilizar um coeficiente de majoração de 1.35. combinando o valor mínimo normativo, com a perda na capacidade resistente dessas lajes. Embora inconclusivo, devido ao reduzido número de amostras, os resultados servem como base para futuros trabalhos na área. Espera-se que, com mais estudos, possam ser potencializados os números de construções sustentáveis no país.

**Palavras-Chave:** Laje treliçada com vigotas. Laje solar. Análise estrutural. Deslocamentos-limites. Construção sustentável.

#### **ABSTRACT**

MAIA, A. S. Comparative analysis between the structural behavior to the flexion of prefabricated slabs with conventional fillers and solar slabs. Graduation (Bachelor of Civil Engineering). Joinville: University of the State the Santa Catarina – UDESC, 2017. 123 p.

Among the materials that operate in trussed slabs with joists, the most usual are as ceramic tiles and Expanded Polystyrene (EPS). Both, except in cases of special dimensions, its low cost and excellent acceptance in the national market. However, to follow the trend of sustainable innovations, there is a need to introduce new materials and constructive methods that contribute to an intelligent consumption of resources and generate great technological advances in the construction sector. For this, use a mixed filling system, which allows a natural light to pass through the slab. The assembly, which partially replaces EPS and ceramic tiles, is composed of a Polypropylene plastic support, called solar tiles, capable of holding a glass block in a horizontal position. However, although there is no structural function in the context of the slab, in this case, the fillers make it impossible to be covered by concrete at some points, affecting part of the compression-resistant section, as there is a need to leave the surface of the glass block unobstructed, the structural behavior, hitherto unknown. With the objective of comparing as loads, displacements, and as resistant capacities between as solar slabs and as conventional slabs, two samples of each model were fabricated. As if they were scaled through the software Puma Win 17.4, executed and tested to the simple flexion. The average resistance of the solar slabs was, they presented 95% of conventional slabs resistance. For a rate of solar blocks used, three per m<sup>2</sup>, this reduction of 5% can be absorbed by increases in concrete structures with is 40% (1.4). For, considering a reduction allowed by NBR 6118 (ABNT, 2014), the safety factor in pre-fabricated elements can be equal to 1.3. Thus, such variations in the solar slabs tend to be neglected, or in more conservative cases, a coefficient of increase of 1.35 can be used, combining the normative minimum value, with a loss in the resistant capacity plus the laic. Although it was not determined, due to the small number of samples, the results serve as a basis for future works in this area. It's expected that with more studies that can potentiate the number of sustainable constructions in the country.

**Keywords:** trussed slabs with joists. Solar slab. Structural analysis. Limit displacement. Sustainable construction.

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Slump test	22
Figura 2 – Diagramas de momento fletor e esforço cisalhante	26
Figura 3 – Seções de cálculo para lajes nervuradas	30
Figura 4 – Comprimento da armadura de tração lb, nec.	33
Figura 5 – Estádios de deformação do concreto	34
Figura 6 – Vista e perfil das LNPVT	38
Figura 7 – Armadura treliçada.	40
Figura 8 – Vigota treliçada	41
Figura 9 – Lajota cerâmica.	42
Figura 10 – Laje solar vista internamente	44
Figura 11 – Lajota solar padrão	45
Figura 12 – Bloco de vidro translúcido com dimensões de 190x190x80mm	46
Figura 13 – Seção T mista	47
Figura 14 – Corte esquemático das lajes solares	48
Figura 15 – Prolongador	48
Figura 16 – Corte das lajes solares com prolongadores	49
Figura 17 – Laje solar em dois níveis.	50
Figura 18 – Aplicação de impermeabilizante asfáltico.	50
Figura 19 – Cobertura com telhas translúcidas.	51
Figura 20 – Tela inicial do software Puma Win 17.4	53
Figura 21 – Configurações gerais do software	53
Figura 22 – Local utilizado para construção das lajes e execução dos ensaios	54
Figura 23 – Entrada de dados L1 e L1-S	55
Figura 24 – Entrada de dados L2 e L2-S	56
Figura 25 – Disposição dos elementos de enchimentos nas amostras	57
Figura 26 – Apoio utilizado nos ensaios.	58
Figura 27 – Esquema de alicerce utilizado para sustentar as muretas	58
Figura 28 – Acabamento superior dos apoios com aplicação de argamassa	59
Figura 29 – Detalhe dos escoramentos	60
Figura 30 – Dimensões das vigotas treliçadas utilizadas	61
Figura 31 – Dimensões das lajotas cerâmicas e EPS utilizados	61

Figura 32 – Modelos de lajotas solares.	62
Figura 33 – Blocos de vidro com aspecto aquoso.	63
Figura 34 – Detalhe da amarração da armadura de distribuição	63
Figura 35 – Moldagem dos corpos de prova.	64
Figura 36 – Slump realizado com amostra retirada do caminhão betoneira	65
Figura 37 – Concretagem e nivelamento das amostras	66
Figura 38 – Lajes recém concretadas	66
Figura 39 – Realização da cura	67
Figura 40 – Flexão à quatro pontos.	68
Figura 41 – Disposição dos reservatórios em dois níveis	68
Figura 42 – Vista frontal do pallet inferior.	69
Figura 43 – Nível inferior do sistema utilizado para os ensaios à flexão	70
Figura 44 – Fluxograma para realização das medições das flechas	71
Figura 45 – Volume de água nos reservatórios.	72
Figura 46 – Paquímetro digital	73
Figura 47 – Pinturas realizadas para facilitar as medições	73
Figura 48 – Início da aplicação do carregamento em L1-S	74
Figura 49 – Registros dos deslocamentos na amostra L1	75
Figura 50 – Considerações do software Puma Win 17.4 quanto às flechas	79
Figura 51 – Verificação das fechas no ELS e ELU para as amostras L1 e L1-S	81
Figura 52 – Verificação das fechas no ELS e ELU para as amostras L2 e L2-S	81
Figura 53 – Aplicação da carga segundo o modelo de cálculo	84
Figura 54 – Aplicação da carga segundo o modelo de flexão à quatro pontos	84
Figura 55 – Vista superior da cobertura com utilização de telhas translúcidas	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficiente ψ6.	19
Quadro 2 – Sobrecargas de uso e ocupação (kN/m²)	27
Quadro 3 – Coeficiente $\gamma f 1. \gamma f 3.$	28
Quadro 4 – Coeficiente $\gamma f2$	29
Quadro 5 – Deslocamentos máximos para aceitabilidade sensorial	36
Quadro 6 – Aço utilizado em treliças pré-fabricadas.	40
Quadro 7 – Resistências à compressão mínimas exigidas aos blocos de vidro	46
Quadro 8 – Nomenclatura adotada para as amostras	54
Quadro 9 – Estimativa de custo unitário para implantação das laies solares	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de aderência	24
Tabela 2 – Modulo de elasticidade secante do concreto	36
Tabela 3 – Descrição das armaduras treliçadas	41
Tabela 4 – Resistência à compressão dos corpos de prova, em MPa	64
Tabela 5 – Resumo das flechas registradas (mm)	76
Tabela 6 – Variações entre as flechas registradas em L1 e L1-S	76
Tabela 7 – Variações entre as flechas registradas em L2 e L2-S	78
Tabela 8 – Capacidade resistente das lajes para as flechas-limites (kg)	83
Tabela 9 – Análise da capacidade resistente entre lajes L1 e L1-S, e L2 e L2-S	83
Tabela 10 – Análise da capacidade resistente entre lajes L1 e L2, e L1-S e L2-S.	83
Tabela 11 – Variação no momento resistente (kN.m)	85

## SUMÁRIO

1		14
	1.1 JUSTIFICATIVA	16
	1.2 OBJETIVOS	16
	1.2.1 Objetivo geral	16
	1.2.2 Objetivos específicos	16
2	REVISÃO	18
	2.1 CONCRETO	18
	2.1.1 Controle tecnológico	20
	2.1.2 Consistência	22
	2.1.3 Adensamento	22
	2.1.4 Cura	23
	2.2 AÇO	24
	2.3 CONCRETO ARMADO	25
	2.4 SOLICITAÇÕES externas	26
	2.5 COMBINAÇÃO DE AÇÕES	27
	2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL	29
	2.6.1 Dimensionamento à flexão	30
	2.6.2 Verificação ao cisalhamento	32
	2.6.3 Deslocamentos	33
	2.7 A PRÉ-FABRICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	37
	2.8 LAJES PRÉ-FABRICADAS	37
	2.8.1 Lajes nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas	38
	2.8.1.1 Vigotas treliçadas	39
	2.8.1.2 Elementos de enchimento	41
	2.8.1.3 Armadura de distribuição	42
	2.9 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	43
	2.10 LAJE SOLAR	44
	2.10.1 Composição	44
	2.10.2 Modelos	47
	2.10.3 Função de Piso	49
	2.10.4 Impermeabilização de laies expostas ao clima	50

	2.10.5 Cobertura com telhas translúcidas	51
3	METODOLOGIA	52
	3.1 SOFTWARE PUMA WIN 17.4	52
	3.2 DESENVOLVIMENTO	54
	3.3 CONCEPÇÃO	54
	3.4 PREPARAÇÃO DOS APOIOS	58
	3.5 FABRICAÇÃO DAS LAJES	59
	3.5.1 Escoramentos	59
	3.5.2 Especificações das vigotas, lajotas cerâmicas e EPS	60
	3.5.3 Especificações das lajotas solares e blocos de vidro	62
	3.5.4 Armadura de distribuição	63
	3.5.5 Concreto usinado em central dosadora	63
	3.5.6 Concretagem e Cura	65
	3.6 ENSAIOS	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5	CUSTO	86
6	CONCLUSÃO	89
	6.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICES	96
	ANEXOS	110

## 1 INTRODUÇÃO

A pré-fabricação de lajes instituiu um novo conceito no setor da construção civil, no qual se passou a planejar empreendimentos com menor tempo de execução e maior qualidade do produto final. Devido ao controle tecnológico de fabricação destes elementos, há possibilidade de utilização de peças com seções transversais reduzidas e arranjos estruturais mais leves, acarretando em um menor peso próprio e cargas reduzidas nas fundações. Cunha (2012) explica que um dos segmentos da pré-fabricação, as lajes nervuradas com vigotas, proporcionam significativa diminuição no custo final da obra em virtude do alívio de cargas.

No Brasil, um dos sistemas mais utilizados em edificações, de pequeno e médio porte, são as lajes nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas (LNPVT). Segundo Gaspar (1997), estas lajes são formadas basicamente por um sistema de vigotas pré-fabricadas, de pequena seção transversal, dispostas regularmente entre si, com o espaço vazio entre duas vigotas preenchido com material de enchimento inerte e capeamento de concreto sobre todo o conjunto. Santos e Piana (2010) atribuem a esse sistema de laje uma redução no uso de escoramentos, além de facilitar o manuseio e a montagem no canteiro de obras. Flório (2004, p.4) cita, ainda, algumas das vantagens que tornam as lajes pré-fabricadas uma opção economicamente viável:

[...] dispensam o uso de fôrmas das lajes, são de fácil manuseio e montagem (podem ter seus elementos transportados com o uso de força humana e máquinas primitivas, como cordas e roldanas etc.), em quase todas as cidades existem fábricas de lajes pré-fabricadas e, se bem dimensionados e executados, apresentam desempenho compatível com as necessidades previstas e com segurança.

Em 2002, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou as primeiras normas brasileiras referentes a este modelo de laje. Deste modo, o sistema ganhou critérios mais rígidos de qualidade e segurança, da fabricação à execução dos projetos. Passou-se, então, a estabelecer parâmetros mínimos para o aço, concreto e os elementos de enchimento que compõem as LNPVT.

Embora não sejam considerados componentes estruturais no contexto da laje, os enchimentos passaram a ser fabricados para atender cargas de trabalho oriundas

da montagem e concretagem. Assim, qualquer material inerte pode ser utilizado para tal função, desde que as condições mínimas de normatização sejam asseguradas (FLÓRIO, 2004).

[...] resistência característica à carga mínima de ruptura de 1,0kN, suficiente para suportar esforços de trabalho durante a montagem e concretagem da laje [...] Para elementos de enchimento com 7,0 cm a 8,0 cm de altura, admite-se resistência característica para suportar a carga mínima de ruptura de 0,7kN (ABNT, 2002, p. 6).

Embora o modelo de lajes pré-fabricadas diminua a produção de resíduos, a grande maioria das atividades na construção ainda tem impacto negativo quanto ao consumo energético e a utilização racional dos recursos naturais (ACKER, 2002). Porém, é possível observar uma tendência para o crescimento de tecnologias sustentáveis e com uso integrado de materiais e métodos, que modifiquem a situação atual de ineficiência da grande maioria das construções (AGOPYAN; JOHN, 2011). Neste contexto, muitos estudos já avaliaram a utilização de diferentes materiais para tal finalidade. Em seu trabalho, Silvério (2009) propôs a substituição do sistema convencional de lajotas cerâmicas (LC) ou Poliestireno Expandido (EPS), por embalagens recicláveis, obtendo excelentes resultados estruturais nas lajes ensaiadas.

Visando integrar sustentabilidade e economia à pré-fabricação, em 2011, a empresa Laje Solar do Brasil projetou um novo enchimento misto. Trata-se de um suporte plástico de Polipropileno (PP), capaz de abrigar um bloco de vidro em suas abas internas, permitindo a passagem de luz solar através das LNPVT. Esta inovação pode gerar até 80% de economia de energia elétrica para fins de iluminação, além de contar com alto apelo arquitetônico (LAJE SOLAR, 2016b). Porém, para que seja mantido o objetivo principal, a translucidez, o bloco de vidro não deve ser coberto, fazendo-se necessária a dispensa da capa de concreto sobre cada ponto de instalação desta tecnologia. Observou-se, então, a necessidade de elucidar os profissionais da construção civil a respeito das mudanças estruturais com a retirada parcial do concreto de capeamento. Aspectos como as deformações excessivas e a resistência dos materiais propriamente ditos, são imprescindíveis para a concepção do arranjo estrutural a ser desenvolvido pelo responsável técnico.

#### 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o longo ciclo de vida das edificações, é interessante planejalas para atender aos requisitos de confiabilidade, eficiência e racionalidade no uso de recursos naturais. Entretanto, Agopyan e John (2011) definem como complexas as análises de diretrizes e tecnologias a serem empregadas na construção civil. Este fato evidencia-se devido a informalidade dos profissionais que atuam em edificações de pequeno e médio porte no Brasil. As mudanças tecnológicas que buscam adentrar ao nicho da construção moldada *in loco*, tendem a bater de frente com o comodismo construtivo dos materiais usuais, fazendo o desenvolvimento sustentável andar a passos lentos.

Doniak e Gutstein (2011) mencionam que o potencial energético ainda é pouco explorado no setor da construção civil, pois as inovações necessitam de inúmeros requisitos para entrarem no mercado. Embora a substituição de materiais usuais por novas tecnologias seja algo desejado, do ponto de vista sustentável, há necessidade de incentivos à pesquisas científicas para proporcionar respaldo aos profissionais da área sobre as vantagens e riscos associados. Este fato evidencia-se no modelo de lajes solares, pois, embora possua efetivo apelo estético e alto potencial sustentável, ainda não há conhecimento sobre suas capacidades estruturais, quando submetidas aos estados-últimos de tensão.

#### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 Objetivo geral

Comparar a resistência à flexão simples, entre lajes pré-fabricadas com enchimentos convencionais e lajes solares, através da análise experimental dos deslocamentos (flechas).

#### 1.2.2 Objetivos específicos

 a. Construir quatro modelos de LNPVT e ensaiá-las à flexão normal simples, sendo duas delas lajes com enchimentos convencionais (lajotas cerâmicas e EPS) e duas lajes solares;

- b. Comparar os deslocamentos obtidos e determinar as cargas responsáveis por gerar as flechas máximas admissíveis;
- c. Avaliar o comportamento estrutural das lajes, através das flechas registradas, quando submetidas a cargas acima do limite de deslocamento;
- d. Estudar a necessidade de aplicação de um coeficiente de majoração especial para este modelo de laje;
- e. Elaborar uma estimativa de custo de implantação do sistema de lajes solares;
- f. Apresentar uma introdução ao dimensionamento de LNPVT no software Puma Win 17.4.

#### 2 REVISÃO

#### 2.1 CONCRETO

Neville e Brooks (2013) conceituam o concreto como uma massa produzida a partir do uso de um meio cimentante e água. Entretanto, o cimento possui um alto custo, e o concreto preparado através da mistura simples desses dois elementos, gera grandes retrações e fissuras. Para evitar esta e outras patologias, no concreto mais usual acrescenta-se uma quantidade de agregados, como a areia e a brita. A proporção entre os constituintes desta mistura é conhecida como traço, que tem relação direta com a fluidez e a resistência do concreto.

O concreto é um dos produtos mais utilizados no mundo, pois alia desempenho e durabilidade a um baixo custo produtivo:

[...] é um material extraordinário, de qualidades plásticas bastante conhecidas, pois se amolda praticamente a qualquer forma. Tem boa resistência à compressão, resiste bem ao fogo e é muito durável, podendo desempenhar o papel de material estrutural por séculos, se utilizado adequadamente (GRAZIANO, 2005, p.15).

Em termos estruturais, o concreto tem a resistência característica à compressão  $(f_{ck})$  como principal propriedade no estado sólido. Neville e Brooks (2013) classificam o adensamento, a relação água/cimento, temperatura e a idade do concreto, como sendo os maiores influenciadores na variação do  $f_{ck}$ .

Especifica-se em projeto um valor requerido a qual o concreto utilizado deve possuir 28 dias após a concretagem e, para realização de tal controle de resistência, é calculado o valor médio dos ensaios de compressão  $(f_{cj})$  realizados em corpos de prova. Leva-se em consideração aspectos como os de controle de dosagem e da quantidade de amostras ensaiadas. As Equações 1 e 2 definem duas estimativas distintas para a determinação da resistência média do concreto, segundo indicado na NBR 12655 (ABNT, 2006).

$$f_{ci} = f_{ck} + 1,65.S_d \tag{1}$$

$$f_{ck_{est}} = \psi_6 . f_1 \tag{2}$$

Onde:

- $f_{cj}$  Resistência média do concreto à compressão a j dias de idade, em MPa;
- f<sub>ck</sub> Resistência característica do concreto à compressão, em MPa;
- Valor do desvio-padrão da dosagem, em MPa, variando de acordo com o modo de preparo, descritos nas condições A, B e C;
- $f_{ck_{est}}$  Média estatística dos valores obtidos nos ensaiados dos corpos de prova;
- Ψ<sub>6</sub> Valor de adequação para caracterização de poucas amostras, de 2 a 5 corpos de prova, conforme indicado no Quadro 1. Nos casos em que há 6 ou mais amostras disponíveis para cada idade j, deve-se consultar a NBR 12655 (ABNT, 2006);
- $f_1$  Menor valor encontrado de  $f_{ck}$  entre as amostras.

Condição Número de exemplares (n) de preparo 2 7 8 12 3 6 10 14 ≥16 0.82 0,86 0.89 0,91 0,92 0,94 0,95 0,97 0,99 1,00 Α 1,02 BouC 0,75 0,80 0,84 0,87 0,89 0,91 0,93 0,96 0,98 1,00 1,02

Quadro 1 – Coeficiente  $\psi_6$ .

Fonte: ABNT (2006).

As condições de preparo são classificadas, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), em A, B ou C:

Condição A – (aplicável às classes C10 a C80): o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados –  $(S_{\rm d}=4.0)$ ;

Condição B – (aplicável às classes C10 até C25): o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume;

— (aplicável às classes C10 até C20): o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. A umidade do agregado miúdo é determinada pelo menos três vezes durante o serviço do mesmo turno de concretagem. O volume de agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado — ( $S_d = 5,5$ )

Condição C – (aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15): o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto – ( $S_d = 7,0$ ).

Ainda, para garantir a segurança nos dados estatísticos, a NBR 12655 (ABNT, 2006) estabelece que o desvio-padrão para o cálculo da resistência de dosagem não poderá ser menor que 2,0 MPa. Portanto, a parcela mínima a ser acrescida à resistência  $f_{\rm ck}$  será de 3,3 MPa (1,65 x 2,0).

#### 2.1.1 Controle tecnológico

O controle tecnológico do concreto refere-se à verificação da dosagem e qualidade dos materiais empregados em sua composição. "Consiste nas operações de execução do concreto, desde o armazenamento dos materiais, sua medida de mistura, bem como na verificação das quantidades utilizadas [...]" (ABNT, 1996, p.2).

O programa de controle tecnológico deve ser elaborado em função do grau de responsabilidade da estrutura, das condições agressivas existentes no local da obra, do conhecimento prévio das características dos materiais disponíveis para a execução das obras e outras condições estabelecidas pelos responsáveis pelo controle (ABNT, 1992, p.3).

Embora possa haver o controle quando dosado *in loco*, o conceito tecnológico do concreto está diretamente associado a dosagem realizada em usinas

especializadas. Quando do recebimento do concreto usinado em obra, deve-se retirar uma amostragem do material, suficientemente capaz de atender a realização do teste de consistência e da moldagem dos corpos de prova. Os corpos, no formato cilíndrico, com diâmetro de 10,0 cm e altura igual a 20 cm, posteriormente são utilizados em ensaios de resistência. Tendo sido registrado o local de uso do concreto recebido, em caso de comprovação de baixa resistência, a zona afetada deve passar por novo estudo e reforço estrutural (ESO, 2010).

O Gráfico 1 indica o comportamento do concreto quando submetido ao ensaio de compressão normal simples (axial). Há linearidade entre a tensão exercida e a deformação ( $\epsilon$ ) sofrida pela peça, em valores menores ou iguais a 30% do valor da tensão de ruptura. Após este trecho a variação entre aumento de  $\sigma$  e de  $\epsilon$  não é linear, pois há modificação dos domínios em que a amostra se encontra.

Ruptura à compressão axial Ruptura à flexão simples  $f_c$   $0,3f_c$   $0,3f_c$   $0,3f_c$ Diagrama de ensaio à compressão  $0,3f_c$ Diagrama idealizado

Gráfico 1 – Curva tensão-deformação para o concreto.

Fonte: Carvalho et al. (2000).

A ruptura axial ocorre quando a tensão assume valores que causem  $\varepsilon$  = 2,0‰, sendo de maior valia para análise de pilares. Por outro lado, a flexão simples solicita de forma mais acentuada as peças de concreto, como vigas e lajes, onde a estrutura sofre com a ação dos momentos internos, que aumentam sua intensidade com o quadrado da distância entre a aplicação do esforço normal e os pontos de apoio. Portanto, a flexão apresenta uma deformação 75% superior ( $\varepsilon$  = 3,5‰) à compressão axial. Ainda neste contexto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) menciona que, no estado limite-último, o concreto possui resistência à tração muito inferior à de compressão, tendo essa colaboração desconsiderada em casos em que a seção

está sujeita a flexão, pois as fibras inferiores de uma viga, por exemplo, são tracionadas nesta situação.

#### 2.1.2 Consistência

Neville e Brooks (2013) cita a consistência do concreto como uma de suas principais propriedades no estado fresco. Ela está relacionada à coesão dos elementos e a mobilidade da massa. Este indicador é obtido através do ensaio de abatimento tronco de cone, conhecido como *Slump test* (Figura 1).

Figura 1 – *Slump test.* 

abatimento concreto desmoldado

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2013).

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2006) o ensaio inicia-se com uma amostra, um pouco maior do que o volume da fôrma tronco cônica, extraída diretamente do caminhão. Todos os equipamentos utilizados devem ser molhados para que a água do concreto não seja perdida. Posteriormente, põe-se a fôrma sobre uma chapa metálica e, pressionando-a com os pés, e adicionasse a amostra coletada em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes sequenciais. O desmolde é feito na vertical e a medida de abatimento é a diferença de nível entre a parte superior do concreto desmoldado e o ponto mais alto do tronco de cone invertido.

#### 2.1.3 Adensamento

O processo de adensamento visa acomodar o concreto na fôrma e expulsar o ar incorporado à mistura quando o mesmo é recém-lançado. A NBR 14931 (ABNT, 2004, p. 21), estabelece procedimentos e cuidados para garantir a qualidade final

dos elementos concretados sem que haja o aparecimento de zonas com falhas de concretagem:

Durante e imediatamente após o lançamento, o concreto deve ser vibrado ou apiloado contínua e energicamente com equipamento adequado à sua consistência. O adensamento deve ser cuidadoso para que o concreto preencha todos os recantos das fôrmas. Durante o adensamento devem ser tomados os cuidados necessários para que não se formem ninhos ou haja a segregação dos materiais. Deve-se evitar a vibração da armadura para que não se formem vazios ao seu redor, com prejuízos da aderência.

Em casos em que não haja disponibilidade de equipamentos para a realização de vibração mecânica, há possibilidade de utilizar apiloamento, ou seja, o adensamento manual da massa de concreto. Deve-se atentar para as zonas críticas em que o agregado possui diâmetro ligeiramente menor do que o espaço entre as barras das armaduras.

#### 2.1.4 Cura

Após o lançamento e adensamento do concreto, é necessário que os elementos recebam cuidados especiais na fase de endurecimento e ganho de resistência. Neville e Brooks (2013) conceituam este procedimento como sendo o resguardo da água necessária para as reações de endurecimento do concreto. Graziano (2005, p.152) descreve a importância do procedimento de cura:

Deve-se proteger a estrutura da insolação e do vento, que podem, aliadas ao calor de hidratação da reação química do cimento, evaporar a água necessária à manutenção das reações de hidratação, ou provocar fenômenos de micro fissuração devido à retração por secagem.

Ainda neste contexto, Andrade (2015, p. 34) menciona que, quando há perda da água do concreto nas fases iniciais, pode haver comprometimento da qualidade do produto quando endurecido. Existem muitas variações de materiais e métodos utilizados no processo de cura, sendo os mais usuais: a imersão das peças em água, molhar regularmente as superfícies, cobrir com mantas ou materiais similares, não realizar a desforma e aplicar membrana ou pintura de proteção.

Conforme explica Azevedo (2011), além da fissuração que a omissão do processo de cura gera nas peças de concreto, é importante salientar o aumento da porosidade e, por consequência, a exposição da armadura. Embora não esteja expresso em norma um determinado intervalo de tempo, a cura varia de acordo com a temperatura média do local onde o concreto está sendo utilizado. Há bibliografias que sugerem um período entre 7 e 14 dias para garantir uma cura satisfatória.

#### 2.2 AÇO

De acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2007), o aço é composto por uma liga metálica de aço e carbono, que atribui ductilidade e permite dobra das armaduras compostas por este material. Os fios, com diâmetros menores do que 6,0 mm, e barras, com seções transversais superiores a estas, são classificados de acordo com sua resistência característica ao escoamento ( $f_{yk}$ ). Este indicador é dado em kgf/mm² e acompanha o prefixo CA, referente ao uso no concreto armado. As classes CA-50 e CA-60 são largamente utilizadas, possuindo resistência de 50 kgf/mm² e 60 kgf/mm², respectivamente, equivalente a 500 e 600 MPa.

O acabamento da superfície dos fios e barras pode ser liso, entalhado ou provido de nervuras. A aderência destes materiais com o concreto deve ser relacionada pelo fator  $\eta_1$ , que é dado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), e expresso através da Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de aderência.

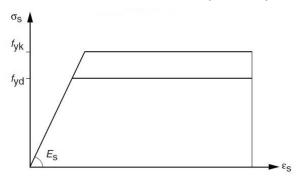
Tipo de superfície	$\eta_1$
Lisa	1,0
Entalhada	1,4
Nervurada	2,25

Fonte: ABNT (2014).

A norma cita que na falta de valores fornecidos pelo fabricante, deve-se adotar um módulo de elasticidade  $(E_s)$  igual a 210 GPa, que representa a inclinação da curva tensão-deformação mostrada no Gráfico 2. Esta curva

simplificada pode ser utilizada nos estados-limites de serviço e último, com o valor de  $f_{yd}$  sendo a resistência de cálculo, que deve ser inferior à do patamar de escoamento de  $f_{vk}$ .

Gráfico 2 – Tensão-deformação do aço.



Fonte: ABNT (2014).

#### 2.3 CONCRETO ARMADO

O concreto armado é a união do concreto convencional com armadura embutida, sem prévia tensão. Esta combinação, segundo Graziano (2005), faz-se necessária devido à baixa eficiência que o concreto tem em regiões tracionadas. Acker (2002) e Flório (2004) citam o concreto armado como um dos materiais mais utilizados no mundo, pois seus componentes são facilmente encontrados e têm um baixo custo produtivo.

A regulamentação de estruturas compostas por concreto armado é estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Ela estabelece, por exemplo, que os cobrimentos mínimos das armaduras devem ser respeitados ao longo de toda peça, e para garantir a aderência do concreto nas barras, evitando falhas de concretagem, a dimensão característica do agregado não pode ser superior a 20% da espessura nominal do cobrimento.

Este trabalho não tem por objetivo avaliar as já conhecidas propriedades do concreto armado, mas sim seu desempenho quando utilizado em elementos préfabricados submetidos à flexão.

### 2.4 SOLICITAÇÕES EXTERNAS

Os esforços atuantes nas estruturas podem ser classificados em distribuídos ou concentrados. O carregamento distribuído é ocasionado devido ao peso próprio, revestimentos, uso e ocupação, além de eventuais solicitações acidentais e do vento. Ainda, na concepção do arranjo estrutural podem ocorrer lançamentos de vigas e pilares apoiados em outras vigas, causando esforços concentrados nestas regiões. Utiliza-se os diagramas de momento fletor e esforço cisalhante (cortante) para localizar os pontos mais solicitados nas estruturas. A Figura 2 demonstra o efeito de duas cargas concentradas aplicadas em uma viga biapoiada. Nota-se que, no caso do momento fletor, os maiores valores são constantes no trecho entre estas cargas, e coincidem com os esforços cisalhantes nulos, condição conhecida como flexão-pura. Se as cargas estiverem sendo aplicadas no eixo longitudinal e ortogonalmente ao plano da laje, o esforço causado é denominado flexão simples. Caso a força resultante seja dada como uma composição de cargas excêntricas, deve-se utilizar a metodologia de cálculo de flexão oblíqua, que não será abordada neste trabalho por gerar momento de torção ao longo das peças.

A seção transversal deve ser dimensionada para atender as solicitações causadas pelos carregamentos e tornar a estrutura estável. "Os esforços resistentes desenvolvidos pela seção devem equilibrar os esforços solicitantes de cálculo" (PORTO; FERNANDES, 2015, p. 15).

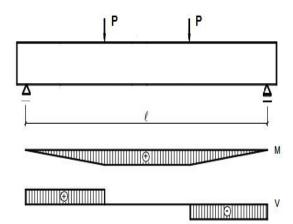


Figura 2 – Diagramas de momento fletor e esforço cisalhante.

Fonte: adaptada de LEONHARDT e MÖNNIG (1982, apud BASTOS, 2017).

O modelo acima pode ser utilizado para o cálculo de lajes nervuradas unidirecionais, pois a NBR 6118 (ABNT, 2014) menciona que as nervuras, quando armadas em uma única direção, devem ser consideradas independentes no modelo estrutural. Caso contrário, quando há utilização de nervuras em ambos os eixos, o modelo admite dimensionamento através do método das grelhas, onde adota-se cálculo análogo às lajes maciças.

De acordo com a NBR 6120 (ABNT, 1980) o carregamento deve levar em consideração as sobrecargas decorrentes do uso e ocupação (SC), à qual as lajes estarão sujeitas. O Quadro 2 traz alguns destes valores, deixando em aberto situações mais específicas em que há quantidade de público ou equipamentos com alto grau de variabilidade.

Quadro 2 – Sobrecargas de uso e ocupação (kN/m²)

8 Corredores	Com acesso ao público Sem acesso ao público	3 2
9 Cozinhas não residenciais	3	
10 Depósitos	A ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais conforme o indicado em 2.2.1.3	-
11 Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro Despensa, área de serviço e lavanderia	1,5 2
12 Escadas	Com acesso ao público Sem acesso ao público (ver 2.2.1.7)	3 2,5
13 Escolas	Anfiteatro com assentos fixos Corredor e sala de aula Outras salas	3 2
14 Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2

Fonte: ABNT (1980).

## 2.5 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), na composição dos carregamentos devem ser consideradas as probabilidades de duas ou mais ações atuarem em conjunto nas estruturas, em um determinado período de tempo. As ações podem ser classificadas em permanentes, variáveis ou excepcionais, e devem

ser ponderadas através do coeficiente  $\gamma_f$  (Equação 3), de acordo com a combinação realizada.

$$\gamma_f = \gamma_{f1}.\gamma_{f2}.\gamma_{f3} \tag{3}$$

O produto  $\gamma_{f1}$ .  $\gamma_{f3}$  relaciona a variabilidade do valor da ação e as aproximações feitas nas elaborações de projetos estruturais, conforme mostrado no Quadro 3. São classificadas como carregamentos favoráveis (F) as ações que tendem a aliviar as solicitações cuja as peças estejam sujeitas, atuando no sentido contrário a estes esforços, e gerando tensões resultantes menores do que as iniciais. Já as desfavoráveis (D) atuam na mesma direção dos esforços críticos, tendo necessidade de majorar seus efeitos com maior intensidade (ABNT, 2014). Entretanto, para cargas permanentes de pequena variação e de combinações normais, o valor de 1,4 (40%) para casos desfavoráveis, pode ser reduzido para 1,3 (30%) em estruturas pré-moldadas.

Quadro 3 – Coeficiente  $\gamma_{f1}$ .  $\gamma_{f3}$ .

	Ações										
Combinações de ações	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração				
	D	F	G	T	D	F	D	F			
Normais	1,4 a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0			
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0			
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0			

onde

D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.

Fonte: ABNT (2014).

O coeficiente  $\gamma_{f2}$  representa a probabilidade de ocorrência simultânea de uma ação em relação as demais, e por possuir valores menores do que 1,0, causa minoração na ponderação dos efeitos (Quadro 4). Adota-se  $\gamma_{f2}$  igual a  $\psi_0$  para

Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

combinações frequentes ou  $\gamma_{f2}$  igual a  $\psi_2$  para combinações quase permanentes. Carvalho e Pinheiro (2013) enfatizam que as combinações devem ser feitas de modo a causar as condições mais desfavoráveis dentro das indicações normativas. Com o conhecimento das maiores cargas, devem ser realizadas as verificações a segurança dos estados limites.

**Ações** Ψο  $\psi_1^a$ Ψ2 Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem 0,5 0.4 0.3 fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas b Cargas acidentais de Locais em que há predominância edifícios de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos 0,7 0,6 0.4 períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas c Biblioteca, arquivos, oficinas 0,8 0,7 0,6 e garagens Pressão dinâmica do vento nas Vento 0 0,6 0,3 estruturas em geral Variações uniformes de temperatura Temperatura 0.6 0.5 0.3 em relação à média anual local

Quadro 4 – Coeficiente  $\gamma_{f2}$ .

Fonte: ABNT (2014).

#### 2.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

O objetivo do dimensionamento, da verificação e do detalhamento, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), é garantir a segurança em relação aos estados-limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), em cada uma de suas partes e da estrutura como um todo. Quando atingidos, os estados-limites fazem com que os elementos estruturais apresentem desempenho inadequados às finalidades da construção. Basicamente, o ELU diz respeito às condições de segurança, enquanto o ELS determina parâmetros de durabilidade, utilização e conforto que a estrutura deve proporcionar. No caso das lajes com nervuras pré-fabricadas, os estados-limites últimos de capacidade resistente das seções sob flexão e de deformações

a Para os valores de ψ<sub>1</sub> relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.

b Edifícios residenciais.

c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

excessivas, são determinantes na concepção de projetos e dimensionamento das nervuras.

Quando não se utiliza *softwares* para execução de projetos estruturais, os cálculos para os dimensionamentos e verificações das vigotas que compõe as lajes nervuradas, seguem o roteiro apresentado por Ferreira R. (2015), baseado nas premissas da NBR 6118 (ABNT, 2014). Esta proposição possui caráter preliminar, requerendo um estudo mais aprofundado para vãos superiores a 6,0 m ou situações de vãos contínuos. Para casos mais abrangentes, na seção 3.1 é introduzida a utilização do *software* computacional para dimensionamentos de LNPVT.

#### 2.6.1 Dimensionamento à flexão

Para o cálculo da armadura longitudinal, responsável por combater os esforços de flexão, é preciso determinar a posição da linha neutra (x), através de  $K_{\rm md}$  e da altura útil da seção, segundo a Equação 4. As duas possibilidades para seção de cálculo são mostradas na (Figura 3), e dependem da relação entre a altura da mesa  $(h_{\rm f})$  e de x.

Seção Retangular

Seção T"

Figura 3 – Seções de cálculo para lajes nervuradas.

Fonte: adaptada de Ferreira T. (2016).

$$x = K_x. d (4)$$

Onde:

$$K_x$$
 Dado por  $[1,25 - (1,563 - 3,376.K_{md})^{\frac{1}{2}}];$ 

d Altura útil, compreendida entre o eixo da armadura de tração e o topo da seção transversal;

 $K_{md}$  Dado por  $M_{sd}/(b_f.d^2.f_{cd})$ ;

M<sub>sd</sub> Momento solicitante de cálculo para a maior combinação;

b<sub>f</sub> Largura colaborante da mesa;

 $f_{cd}$  Resistência minorada à compressão do concreto, igual a  $f_{ck}$  /1,4;

f<sub>ck</sub> Resistência característica à compressão do concreto.

A área de aço responsável por combater as solicitações internas de tração é dada em função da relação entre  $(h_f)$  e o valor de x. Se  $h_f \geq 0.8.x$ , então a linha neutra passará pela mesa e a armadura deve ser calculada através da Equação 5.

$$A_s = M_{sd}/(K_z. d. f_{vd})$$
 (5)

Onde:

M<sub>sd</sub> Momento solicitante de cálculo para a maior combinação;

 $K_z$  É dado por 1 – 0,4. (x / d);

d Altura útil:

 $f_{yk}$  Resistência do aço à tração (escoamento);

 $f_{yd}$  Resistência minorada do aço à tração (escoamento), dado por  $f_{yk}$  /1,15.

Caso contrário, se  $h_{\rm f} < 0.8.\,\mathrm{x}$ , então a linha neutra estará posicionada na nervura, e a viga deve ser calculada como uma seção "T", com área da armadura dada pela composição dos momentos resistidos pelas abas e pela alma da seção transversal (Equação 6).

$$A_{s} = \frac{M_{abas}}{\left[d - \left(\frac{h_{f}}{2}\right)\right] \cdot f_{yd}} + \frac{M_{alma}}{K_{z} \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$(6)$$

Onde:

 $M_{abas}$  Momento resistido pelas abas, igual a 0,85.  $f_{cd}$ .  $(b_f-b_w)$ .  $h_f$ .  $(d-(h_f/2))$ ;

M<sub>alma</sub> Momento resistido pela alma, sendo dado por: M<sub>sd</sub> – M<sub>abas</sub>.

No cálculo da armadura necessária, apenas as barras do banzo inferior da treliça são consideradas na resistência do momento positivo. A NBR 14859 (ABNT, 2002) menciona que, caso houver necessidade, deve-se adicionar uma armadura complementar na sapata da vigota, para LNPVT.

#### 2.6.2 Verificação ao cisalhamento

De acordo com a NBR 6118 (2014), as lajes nervuradas podem precisar de armadura transversal para resistir as forças cortantes, segundo a condição apresentada na Equação 7. Nas LNPVT as barras inclinadas da treliça (sinusóides), que compõe as vigotas, exercem a função armadura cisalhante e devem ser verificadas como estribos, com espaçamento dado pela distância entre os pontos de solda (passo).

$$V_{sd} \le V_{Rd1} \tag{7}$$

Sendo a força cortante resistente de cálculo expressa na Equação 8, e a força cisalhante  $V_{\rm sd}$ , obtida pela majoração do máximo valor presente no diagrama deste esforço.

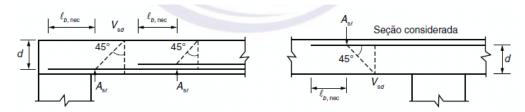
$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd}. k. (1.2 + 40. \rho_1) + (0.15. \sigma_{cp}]. b_w. d$$
 (8)

Onde:

 $au_{Rd}$  É a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento, dada por:  $au_{Rd} = (0.25.\,f_{ctk,inf})/\,\gamma_c;$ 

- $\rho_1$  Igual a  $A_{s1}/(b_w.d)$ , e não maior que |0,02|;
- K Este valor é igual a |1| se 50% da armadura de tração não chega ao apoio, ou |1,6-d| para os demais casos, não menor que |1|, com d em metros;
- $\sigma_{cp}$  Tensão axial na seção de concreto, expresso por:  $N_{sd}/A_c$ ;
- $A_{s1}$  Área da armadura de tração que se estende até não menos que (d +  $l_{b,nec}$ ) além da seção considerada, não menor do que na Figura 4;
- b<sub>w</sub> Largura mínima da seção ao longo da altura útil d;
- N<sub>sd</sub> Força longitudinal da seção devida ao carregamento.

Figura 4 – Comprimento da armadura de tração  $l_{b,nec}$ .



Fonte: ABNT (2014).

#### 2.6.3 Deslocamentos

Para realização aprofundada do estudo dos deslocamentos em lajes préfabricadas, Fazzan (2011, p.29, grifo do autor) menciona a necessidade do conhecimento sobre os conceitos dos Estádios do concreto (Figura 5).

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

"Com o aumento do carregamento, a maior tensão de tração que atua na seção transversal ultrapassa a resistência do concreto à tração, modificando o seu comportamento, conduzindo-a ao **Estádio II** (estado de fissuração)" (FAZZAN, 2011,

p.30, grifo do autor). Neste estádio, o concreto não trabalha à tração, sendo esse esforço resistido apenas pela armadura presente abaixo da linha neutra.

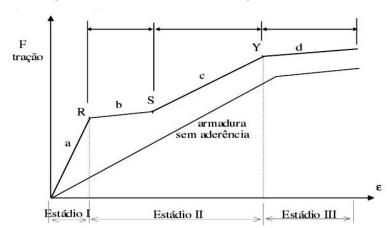


Figura 5 – Estádios de deformação do concreto.

Fonte: adaptada de LEONHARDT e MÖNNIG (1982, apud BASTOS, 2017).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a separação entre os dois comportamentos (Estádios) é definida pelo momento de fissuração, que pode ser calculado através da Equação 9.

$$M_{r} = (\alpha . F_{ct} . I_{c})/y_{t}$$
(9)

Onde:

- π Fator que correlaciona a resistência à tração na flexão com a tração direta. Para seções em formato de T o valor de α é igual a 1,2;
- I<sub>c</sub> É o momento de inércia da seção bruta de concreto;
- $F_{ct}$  Resistência à tração direta do concreto. No estado limite de deformação excessiva, considera-se que a resistência à tração direta do concreto seja igual à  $f_{ct,m}$ , dada por  $f_{ct,m} = 0.30 \cdot f_{ck}^{3/2}$ , sendo  $f_{ck}$  a resistência característica do concreto à compressão. Os valores de  $f_{ct,m}$  e  $f_{ck}$  são obrigatoriamente expressos em MPa;
  - y<sub>t</sub> Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada da seção transversal.

O modelo comportamental da estrutura pode admitir o concreto armado como linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no estádio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, no estádio II (ABNT, 2014).

No arranjo estrutural unidirecional, as nervuras formadas por vigas com seções em 'T' devem ser calculadas no sentido do apoio, desprezando a rigidez transversal e rigidez a torção. Para uma avaliação aproximada da flecha imediata nessas vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada através da Equação 10.

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \cdot \left\{ \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \cdot I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} \le E_{cs} \cdot I_c$$
 (10)

Onde:

- Inércia da seção íntegra de concreto, desconsiderando a contribuição das barras de aço na seção transversal de concreto armado (homogeneização da seção);
- $I_{II}$  Momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II, calculado com  $\alpha_e=E_s/E_{cs}$ , com  $E_s$  sendo o módulo de elasticidade do aço utilizado para armadura passiva, estabelecido na NBR 6118 (ABNT, 2014) como 210 GPa;
- E<sub>cs</sub> Módulo de elasticidade secante do concreto (Tabela 2);
- M<sub>a</sub> Momento fletor na seção crítica do vão considerado, sendo o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas, e momento no apoio para balanços;
- M<sub>r</sub> Momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas.

Tabela 2 – Modulo de elasticidade secante do concreto.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E <sub>cl</sub> (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E <sub>cs</sub> (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47

Fonte: adaptada de ABNT (2014).

As limitações impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para aceitabilidade sensorial, são expressas pelo Quadro 5.

Quadro 5 – Deslocamentos máximos para aceitabilidade sensorial.

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	

Fonte: ABNT (2014).

O valor de  $\ell$  representa o vão teórico, ou efetivo das vigotas, sendo dado pela Equação 11.

$$l = lo + a_1 + a_2 \tag{11}$$

$$a_1 \le \begin{cases} t_1/2 \\ 0.3.e \end{cases}$$
  $a_2 \le \begin{cases} t_2/2 \\ 0.3.e \end{cases}$ 

Onde:

to Vão interno;

a<sub>1</sub> e a<sub>2</sub> Colaborações dos apoios no vão efetivo;

t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub> Representam o comprimento de contato entre o apoio e as vigotas;

e Espessura da laje.

## 2.7 A PRÉ-FABRICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Doniak e Gutstein (2011) descrevem a produção de componentes préfabricados como sendo mais vantajosa que as operações concebidas no canteiro de obras. Para Acker (2002), as estruturas pré-fabricadas possuem inúmeras características positivas quando comparadas aos métodos utilizados em construções tradicionais. Este sistema, além de ter a relação água/cimento reduzida ao mínimo possível, garante a execução do adensamento e da cura, em condições controladas com auto grau de qualidade. Sendo assim, a forma mais efetiva de industrializar o setor da construção civil é transferir o trabalho realizado nos canteiros para fábricas permanentes e modernas. A produção numa fábrica possibilita processos de produção mais eficientes e racionais, trabalhadores especializados, repetição de tarefas, controle de qualidade [...] (ACKER, 2002, p.2-3).

"Atualmente evidencia-se a grande aplicabilidade da pré-fabricação em concreto em obras industriais, comerciais, habitacionais [...]" (DONIAK; GUTSTEIN, 2011, p.1570). Tendo em vista o alto grau de patologias em edificações de pequeno e médio porte no Brasil, a utilização de elementos industrializados tende a diminuir o percentual de erros executivos, principalmente devidos a mão-de-obra sem especialização e dosagens inapropriadas do concreto.

## 2.8 LAJES PRÉ-FABRICADAS

A NBR 14859 (ABNT, 2002) define as lajes pré-fabricadas como sendo elementos planos e estruturais, maciços ou nervurados, podendo ser fabricados em concreto comum ou protendido. Segundo Doniak e Gutstein (2011), o mercado oferece uma vasta gama de opções destes elementos estruturais, como por exemplo: lajes alveolares, mistas, com vigotas e os painéis.

O presente trabalho irá limitar-se ao estudo de lajes nervuradas préfabricadas com vigotas treliçadas (LNPVT) e enchimento perdido (lajotas cerâmicas e EPS).

### 2.8.1 Lajes nervuradas pré-fabricadas com vigotas treliçadas

A NBR 14859 (ABNT, 2016) descreve este tipo de laje como sendo um elemento estrutural plano, constituído por vigotas pré-fabricadas, espaçadas regularmente por enchimentos inertes, podendo ser armadas em uma direção (unidirecionais) ou duas direções (bidirecionais). A Figura 6 ilustra a vista lateral com corte transversal das LNPVT.

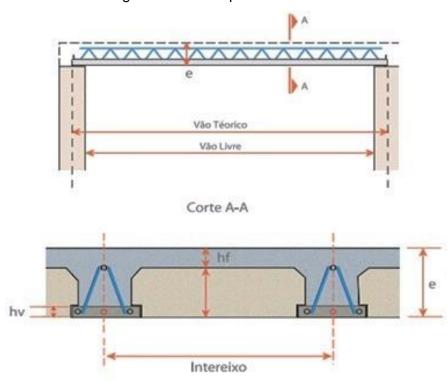


Figura 6 – Vista e perfil das LNPVT.

Fonte: Acelormittal (2010).

Este modelo de laje apresenta diversas vantagens em relação as lajes maciças, dentre as quais duas destacam-se pela representatividade:

• Diminuição no uso de escoramentos e fôrmas.

Na fase de concretagem e ganho de resistência, as lajes devem ser escoradas, pois não possuem resistência para suportar seu peso próprio e ações de cargas de montagem. Entretanto, nos modelos pré-fabricadas, a existência de

vigotas com autoportância possibilita a utilização de menos linhas de escoramentos. Ainda, as fôrmas precisam ser dispostas apenas no perímetro das lajes, pois as vigotas e os enchimentos impedem que o concreto lançado seja perdido.

### • Redução no custo da estrutura.

Para vãos até 6,0 m, o uso das LNPVT causa forte redução no custo das estruturas, pois seu baixo peso próprio solicita de forma menos intensa as vigas e pilares, que por sua vez transmitem cargas reduzidas as fundações. Pois, o concreto é parcialmente substituído por elementos de enchimento inertes, diminuindo o consumo da massa na laje e transformando a seção transversal em vigas T, podendo ser calculadas como vigas independentes.

Entretanto, as LNPVT possuem maiores deslocamentos, principalmente em lajes unidirecionais, onde os esforços são distribuídos apenas em dois apoios, gerando zonas com maiores concentrações de tensão. Deve-se atentar a necessidade de espaço para estocagem dos elementos pré-fabricados no canteiro de obras e da sua utilização quando os vãos forem superiores a 6,0 m.

## 2.8.1.1 Vigotas treliçadas

Segundo Lopes (2015), as vigotas treliçadas são formadas por uma placa delgada de concreto e armadura em forma de treliça espacial pré-fabricada. Para Figueiredo Filho e Shiramizu (2011) a treliça é constituída por um fio de aço no topo (banzo superior) e dois fios de aços paralelos na base (banzos inferiores), interligados por eletrofusão aos dois fios de aço diagonais (sinusóides), espaçados regularmente. As barras que compõe o banzo inferior têm a função de combater os esforço de tração atuante na seção transversal, enquanto a barra do banzo superior é responsável por vencer o esforço de compressão na fase de uso e de tração quando as barras ainda se encontram escoradas (SANTINE, 2005). A altura da treliça (distância entre os banzos) é calculada de forma a equilibrar os momentos atuantes na peça (Figura 7).

Armadura superior
(Banzo superior)

Passo (p)

Diagonal
(sinusóide)

Nó soldado

Armadura inferior
(Banzo inferior)

Figura 7 – Armadura treliçada.

Fonte: Faulim (2016).

A NBR 14859 (ABNT, 2016) estabelece os diâmetros mínimos à serem utilizados para fabricação das treliças eletrosoldadas, indicados no Quadro 6.

Quadro 6 – Aço utilizado em treliças pré-fabricadas.

Produto	Norma	Diâmetro nominal mínimo mm	Diâmetro nominal máximo mm	
Barras/fios de aço	NBR 7480	6,3 (CA 50)	20,0(CA 50)	
CA 50/CA 60		4,2 (CA 60)	10,0(CA 60)	
Tela de aço eletrossoldada	NBR 7481	3,4	-	
Fios de aço para protensão	NBR 7482	3,0	-	
Cordoalhas de aço para protensão	NBR 7483	3 x 3,0	3,0 -	
.37		Diagonal (sinusóide): 3,4	Diagonal (sinusóide): 7,0	
Armadura treliçada eletrossoldada	NBR 14862	Banzo superior: 6,0	Banzo superior: 12,5	
7		Banzo inferior: 4,2	Banzo inferior: 12,5	

Fonte: ABNT (2002).

A nomenclatura da treliça é dada pelo prefixo TR, acompanhado de sua altura, em cm, seguido pelo primeiro número do diâmetro do banzo superior, sinusóide e banzo inferior, respectivamente (Tabela 3).

De acordo com a NBR 14859 ABNT (2016), a placa de concreto que envolve o banzo inferior deve ter entre 30 e 40 mm de altura, com largura no intervalo de 120 e 140 mm, e comprimento variável. A especificação de tal seção visa permitir o alojamento da armadura adicional, em situações de alta solicitação do momento positivo, quando especificada em projeto a necessidade de adicioná-la.

Tabela 3 – Descrição das armaduras treliçadas.

Modelo	Altura (cm)	Φ Banzo superior (mm)	Φ sinusóide (mm)	Φ Banzo inferior (mm)
TR 8644	8	6,0	4,2	4,2
TR 8645	8	6,0	4,2	5,0
TR 12645	12	6,0	4,2	5,0
TR 12646	12	6,0	4,2	6,0
TR 16745	16	7,0	4,2	5,0
TR 16646	16	7,0	4,2	6,0
TR 20745	20	7,0	4,2	5,0
TR 20756	20	7,0	5,0	6,0
TR 25856	25	8,0	5,0	6,0
TR 25858	25	8,0	5,0	8,0
TR 30856	30	8,0	5,0	6,0
TR 30858	30	8,0	5,0	8,0

Fonte: adaptada de ABNT (2002).

. Cunha (2012) recomenda que o comprimento variável longitudinal, para este modelo de laje, deve ter no máximo 6,0 m, pois vãos superiores a este são suscetíveis a deslocamentos excessivos. A sobreposição da armadura treliçada com a base de concreto pode ser observada na Figura 8.

Base de concreto

Espessura 3 a 4 cm

Armadura adicional

Figura 8 – Vigota treliçada.

Fonte: adaptado de Acelormittal (2010).

#### 2.8.1.2 Elementos de enchimento

Além de desempenharem papel de enchimento, esses elementos servem como fôrma para o concreto de capeamento e geram alívio ao peso próprio da estrutura. Devem-se utilizar materiais não reagentes com o concreto, ou seja,

inertes. Podem ser dúcteis ou frágeis, e embora não sejam considerados como colaboradores na resistência da laje, os enchimentos devem suportar as cargas da fase de montagem e concretagem (ABNT, 2016).

Santine (2005) atribui a geometria das lajes pré-fabricadas aos elementos de enchimento. Dentre os materiais mais utilizados para tal função, estão as lajotas cerâmicas (Figura 9) e o Poliestireno Expandido – EPS.

Figura 9 – Lajota cerâmica.



Fonte: Faulim (2016).

A escolha do enchimento está relacionada, principalmente, a índices de conforto térmico e acústico, aliados ao custo e a disponibilidade para aquisição dos materiais. Embora apresente propriedades mais interessantes que a lajota cerâmica, Santine (2005, p.16) cita o principal ônus quando da escolha do EPS:

> A grande desvantagem do EPS como elemento de enchimento é com relação ao seu custo, pois o preço do metro cúbico é quase igual ao do concreto. Lajes com alturas menores, onde o elemento cerâmico é facilmente encontrado, certamente terão custos menores.

A regulamentação destes elementos é feita através da NBR 14859 (ABNT, 2016). Ela determina que tais enchimentos devam atender aos ensaios propostos, para suportar cargas de no mínimo 1,0 kN.

#### 2.8.1.3 Armadura de distribuição

Segundo a NBR 14859 (ABNT, 2016), esta armadura é responsável por redistribuir as tensões causadas por cargas concentradas ou linearmente distribuidas. Quando utilizadas em lajes treliçadas, as barras devem ser posicionadas transversalmente sobre as mesmas, podendo, ainda, optar-se pela utilização de malhas eletrosoldadas. Para os aços usuais, CA-50 e CA-60, é indicada uma área mínima de 0,6 cm²/m, com espaçamento máximo entre barras de 33 cm (3Φ por metro), sendo vedada a utilização de diâmetros menores do que 5,0 mm para tal função.

## 2.9 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A caracterização de uma construção sustentável está ligada ao uso de tecnologias que proporcionem menores impactos ao meio ambiente e aos usuários. Segundo Acker (2002), para se alcançar a sustentabilidade na construção é imprescindível a incorporação da inovação. "A definição mais simples que se tem para inovação é a do conhecimento novo colocado em prática, isto é, o conhecimento aplicado e adotado pelos setores produtivos" (AGOPYAN; JOHN, 2011, p.21). "Construir de forma sustentável consiste em minimizar o consumo de recursos naturais e maximizar a sua reutilização" (LOPES, 2015, p.24).

[...] fica evidente a contribuição do desenvolvimento de materiais mais eficientes e de sistemas construtivos mais racionais e com comportamento conhecido através da execução de protótipos, a fim de garantir a sua relação qualidade/custo e, possivelmente, agregando a relação eficiência/sustentabilidade (CREMA; PELISSER, 2014, p. 2).

Agopyan e John (2011) citam a economia de energia como um tema sustentável tradicional e salientam o surgimento de novos conceitos e ferramentas para a análise nas áreas de energia, conforto térmico e iluminação.

Observa-se, hoje, um grande esforço de desenvolvimento de novos materiais e até de melhorias de materiais existentes. Os focos principais incluem a redução dos impactos ambientais na produção ou durante a fase de uso, bem como a incorporação de novas funções a produtos existentes (materiais multifuncionais) (AGOPYAN; JOHN, 2011, p.73).

Reis (2015) ressalta que a sustentabilidade na construção civil possui várias fases ao longo do desenvolvimento do empreendimento, sendo imprescindível manter os pilares da segurança, economia, função social e preservação ambiental, a fim de viabilizar o produto e torná-lo verdadeiramente disponível para o uso.

#### 2.10 LAJE SOLAR

Em critérios práticos, as lajes solares são definidas como elementos com dupla função; estrutural e de iluminação. São LNPVT com enchimento misto, intercalando elementos convencionais à blocos de vidro embutidos em suportes plásticos. A utilização do vidro traz o conceito sustentável às edificações, pois a iluminação natural que este material causa, tende a reduzir o consumo de energia elétrica durante o dia (Hanna, 2011). A Figura 10 mostra o acabamento do ambiente interno após a instalação da laje solar, destacando seu alto apelo estético e luminoso.



Figura 10 – Laje solar vista internamente.

Fonte: Laje Solar (2016a).

## 2.10.1 Composição

A laje solar é composta pela substituição parcial dos elementos de enchimentos convencionais (lajota cerâmica e EPS) por suportes plásticos com abas internas, projetadas para acomodar um bloco de vidro em posição horizontal (Figura 11). O termoplástico utilizado para fabricação dos suportes é o Polipropileno (PP), um material de baixo custo, reciclável e de alta qualidade. "O PP apresenta resistência excepcional às rupturas por flexão e fadiga, resistência química e ótimas propriedades elétricas" (ARAÚJO, 2010, p.24). O processo de fabricação de peças compostas pelo termoplástico é descrito por Salmoria *et al* (2014, p. 262):

No ciclo de moldagem por injeção, o resfriamento inicia-se simultaneamente com a injeção do termoplástico na cavidade. O material é resfriado desde o instante em que tem contato com as paredes da cavidade, as quais se encontram a uma temperatura menor. A etapa de resfriamento se estende além da etapa de recalque, até o momento em que a peça está suficientemente fria para ser extraída, normalmente abaixo da temperatura de amolecimento do termoplástico.

Figura 11 – Lajota solar padrão.



Fonte: Laje Solar (2016b).

O conceito sustentável está diretamente ligado aos blocos de vidro, pois, quando translúcidos, podem ser utilizados para entrada de iluminação natural em ambientes fechados, gerando menores consumos de energia elétrica e trazendo maior eficiência às edificações. Marroquim *et al.* (2014, p. 64) menciona a necessidade de um estudo cauteloso na utilização do vidro como material de vedação:

O estudo de iluminação natural deve ser observado com a devida atenção para que a luz natural não cause problemas de ofuscamento ou ganhos excessivos de calor, o que poderia implicar em maior consumo de energia elétrica devido à necessidade de climatização e/ou iluminação artificial.

Entretanto, diferentemente do vidro de vedação comum, estes blocos possuem alto desempenho quanto a isolamento térmico e acústico. Devido ao processo fabril, no interior das faces fundidas de vidro forma-se uma zona de ar rarefeito, onde há maior dificuldade da transferência de calor e ondas sonoras (SGB, 2016). A Figura 12 mostra um dos inúmeros modelos de blocos disponíveis no mercados nacional, com lados iguais e espessura de 80 mm.

Figura 12 – Bloco de vidro translúcido com dimensões de 190x190x80mm.



Fonte: SGB (2016).

A NBR 14899 (ABNT, 2002) estabele as resistências mínimas à compressão que os blocos de vidro devem possuir. O Quadro 7 traz algumas variações quanto às medidas, formas e resistências que devem ser atendidas pelos fabricantes. O índice E engloba todos os blocos com formatos retangulares, porém, elementos com geometria quadrada foram subdivididos na categoria B.

Para utilização em conjunto com as lajotas solares, os blocos de vidro devem possuir medidas de 190x190x80mm (largura x altura x espessura), pois as abas internas do suporte plástico possuem abertura padrão com este formato.

Quadro 7 – Resistências à compressão mínimas exigidas aos blocos de vidro.

	rma Comprimento conforme tabela 1	Resistência à compressão exigida dos blocos de vidro				
Forma		Ensaio feito na latera	saio feito na lateral conforme método II			
roma		10.000000000000000000000000000000000000	individual	Valor médio MPa	Valor minimo individual MPa	
В	90 - 149	5,5	4,0	7,0	6,0	
В	150 - 239	5.0	3,5	7,0	6,0	
В	240 - 300	4,5	3,0	7,0	6,0	
E	Todos	5,0	3,5	7,0	6,0	

Fonte: adaptado de ABNT (2002d).

O método I diz respeito a utilização dos blocos no sentido horizontal, onde os elementos tem esforços atuantes diretamente sobre as faces do vidro. Já o método II aborda a utilização no sentido vertical, usual em paredes e divisórias, onde as solicitações ocorrem ao longo da espessura. Nota-se que o bloco utilizado possui largura dentro do intervalo 150-239 mm, devendo possuir uma resistência mínima à

compressão de 3,5 MPa, para amostras individuais, e média de 5,0 MPa. Entretanto, por estarem localizados na zona de compressão das abas (Figura 13), quando as lajes são dimensionadas como seção T, os blocos podem ser solicitados lateralmente, ou seja, no sentido vertical. Para este caso, as resistências à compressão mínimas são de 6,0 e 7,0 MPa, e devem ser suficientes para que a tensão exercida pelas lajes seja inferior a estas. Caso contrário, os blocos podem, teoricamente, apresentar fissuras que comprometam a sua utilização.

Seção de concreto

50% da seção lateral do bloco de vidro

3,5 a 5,0 MPa

Figura 13 – Seção T mista.

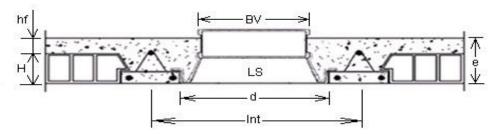
Fonte: adaptada de LAJE SOLAR (2016a).

#### **2.10.2 Modelos**

Os modelos padrões de lajotas solares possuem dimensões de 7 cm de altura (H7) e larguras de 25, 30 e 37, capazes de atender à intereixos de 37 ± 2, 42 ± 2 e 47 ± 2, respectivamente. Tais variações ocorrem devido a largura da sapata da vigota, que por sua vez deve possuir entre 12 e 14 cm. Tais dimensões foram desenvolvidas para facilitar a substituição dos enchimentos convencionais, já comercializados e normatizados, como a lajota cerâmica e o EPS (LAJE SOLAR,

2016a). A Figura 14 mostra um corte esquemático da disposição dos itens que constituem este tipo de laje.

Figura 14 – Corte esquemático das lajes solares.



Fonte: adaptada de LAJE SOLAR (2016a).

#### Onde:

LS Lajota solar;

H Altura do elemento de enchimento;

hf Capa de concreto adicionada in loco;

e Espessura total da laje, dada por:  $H + h_f$ ;

d Comprimento entre faces de duas vigotas;

Int Distância entre os eixos de duas vigotas (intereixo);

BV Bloco de vidro.

Em lajes com espessuras superiores a 12 cm (enchimento + capeamento) devem ser utilizados prolongadores (PR), conforme Figura 15, acoplados às lajotas solares padrões. Segundo o fabricante, estes acessórios atendem a um empilhamento máximo de três peças, suficiente para lajes com até 25 cm de espessura (e).

Figura 15 – Prolongador.



Fonte: Adaptada de LAJE SOLAR (2016b).

A Figura 16 ilustra a utilização de dois prolongadores em corte esquemático. Este estudo não comtempla ensaios com utilização de tais adaptações, pois lajes com grandes alturas são requeridas para locais com cargas elevadas e vãos superiores aos encontrados em situações residenciais.

PR PR

Figura 16 – Corte das lajes solares com prolongadores.

Fonte: Adaptada de LAJE SOLAR (2016a).

As uniões entre os suportes de Polipropileno e os blocos de vidro devem ser realizadas com silicone de uso geral, aplicados nas abas internas e na vedação lateral. Além de unir as peças, o silicone impede o deslocamento dos blocos na fase de concretagem. Quando esta condição não é garantida, o adensamento pode fazer com que o concreto seja depositado na interface entre a lajota solar e o bloco de vidro.

### 2.10.3 Função de Piso

Embora possua algumas similaridades com os domos e claraboias, as lajes solares diferem-se em um aspecto fundamental em edificações com mais de um pavimento (Figura 17). Segundo Laje Solar (2016a), quando necessário, ao contrário de outros métodos de iluminação natural, esta tecnologia desempenha papel de piso para o pavimento superior. Esta característica tem um nicho de mercado concentrado em edificações de dois a três andares, que possuam pequena área de projeção e poucas aberturas de portas e janelas, como os sobrados geminados.

Para estes casos, o processo de execução deve atentar-se ao nivelamento das superfícies do bloco de vidro e do revestimento utilizado. Para tanto, o fabricante recomenda a utilização de um molde provisório de EPS em substituição ao bloco de vidro, nas fases de concretagem da laje e execução do contra piso. Passadas estas

etapas, deve-se realizar a colocação do revestimento cerâmico, sem que estes cubram o molde e, posteriormente, efetuar a retirada do EPS. Tanto nas laterais internas da lajota quanto nas laterais externas do bloco de vidro, deverá ser utilizada argamassa de uso externo e posicionado o bloco no espaço vazio formado pela retirada do EPS (LAJE SOLAR, 2016c).



Figura 17 – Laje solar em dois níveis.

Fonte: LAJE SOLAR (2016b).

### 2.10.4 Impermeabilização de lajes expostas ao clima

O processo de impermeabilização é responsável por proteger as estruturas das ações do tempo a qual estejam expostas (Figura 18). No caso das lajes, por possuírem geometria plana e de grandes dimensões, tendem a apresentar maiores patologias se comparadas a outros componentes estruturais, como vigas e pilares.



Figura 18 – Aplicação de impermeabilizante asfáltico.

Fonte: LAJE SOLAR (2016c).

Para evitar o aparecimento de vazamentos e mofo causados pelo aumento da umidade no interior das edificações, o fabricante indica a aplicação de impermeabilizante de base asfáltica no entorno dos blocos de vidro. A aplicação deve ser feita em, no mínimo, duas camadas transversamente sobrepostas.

#### 2.10.5 Cobertura com telhas translúcidas

A opção de utilizar coberturas com telhados não impossibilita a implantação das lajes solares. Para estes casos, o sistema deve ser compatibilizado com telhas translúcidas que permitam a passagem da luz natural por ambos os níveis. O mercado oferece uma infinidade de modelos e composições para estas telhas, como por exemplo, as plásticas e as de vidro. A Figura 19 mostra a incidência luminosa em uma cobertura com telhas de vidro.



Figura 19 – Cobertura com telhas translúcidas.

Fonte: LAJE SOLAR (2016c).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para realização do presente trabalho deu-se com a busca de referências diretamente ligadas a lajes solares e sua utilização. Entretanto, a primeira dificuldade do estudo ocorreu nesta fase, pois não havia resultados técnicos sobre a composição, utilização ou regulamentação das lajes solares, salvo dados de instalação fornecidos pelo fabricante.

O escopo desta análise ia de encontro a indicadores de iluminação e aumento da temperatura interna. Porém, atentou-se para a falta de conhecimento sobre suas propriedades estruturais, sobretudo, do efeito que a retirada parcial do concreto resistente à compressão, na mesa da seção, poderia ocasionar na laje.

Neste sentido, o projeto passou a trabalhar com a necessidade de se utilizar amostras em escala real, possibilitando a obtenção de um modelo empírico para determinação da resistência à flexão destas lajes. Para tal, foram fabricadas quatro lajes com dimensões iguais, mas com variação nos enchimentos, sendo duas solares.

As lajes foram dimensionadas como LNPVT, através do *software* Puma Win 17.4, e executadas dentro das dependências da Universidade do Estado de Santa Catarina. Posteriormente, as mesmas foram ensaiadas a flexão normal, registrandose as flechas obtidas para dez carregamentos distintos. Os dados possibilitaram a comparação entre as cargas responsáveis por fazer a estrutura chegar aos estadolimites.

### 3.1 SOFTWARE PUMA WIN 17.4

As lajes utilizadas neste estudo foram dimensionadas através do *software* Puma Win – Versão 17.4. Os parâmetros de cálculo do programa baseiam-se nas diretrizes indicadas nas normas: NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 14859 (ABNT, 2002). O *software* possui interface de fácil compreensão, da entrada à saída de dados. Na tela principal, antes mesmo do lançamento da estrutura, atenta-se para o item "Configurações Gerais" (Figura 20), no qual os parâmetros de controle e disposições construtivas foram inseridos.

PumaWin - Versão 17.4

Software de apolo ao dimensionamento, determinação do quantitativo e preço de venda de lajes com elementos pré-fabricados com armação treliçada

Noval ae

Armação Treliçada

Tres de lajes

Configue o Sobre

Sobre

Sobre

Auualizado conforme a NBR 6118:2014

Figura 20 – Tela inicial do software Puma Win 17.4.

Fonte: O autor.

As configurações gerais permitem ajustes em diversos itens constituintes das LNPVT, conforme ilustra a Figura 21. Para elucidar o leitor sobre os parâmetros adotados na verificação da estrutura, o Apêndice A traz um roteiro sobre as considerações utilizadas no *software*.

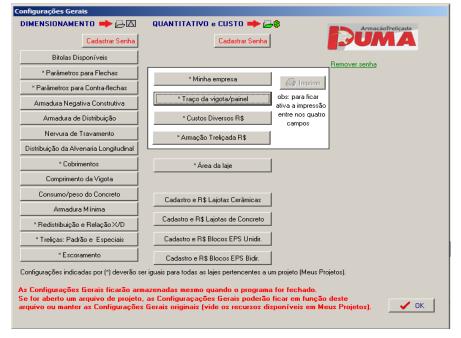


Figura 21 – Configurações gerais do software.

#### 3.2 DESENVOLVIMENTO

Para possibilitar o manuseio dos materiais, da montagem à execução dos ensaios à flexão, o trabalho foi realizado em um espaço ao ar livre, com área de aproximadamente 34 m², indicado na Figura 22, e localizado dentro das dependências da Universidade do Estado de Santa Catarina, no campus do Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), em Joinville.

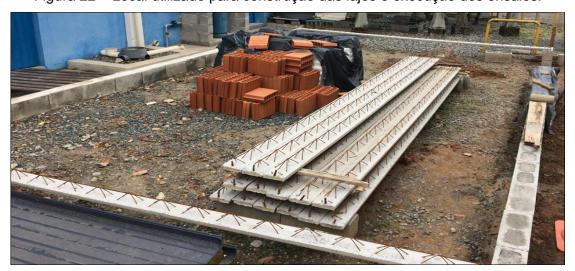


Figura 22 – Local utilizado para construção das lajes e execução dos ensaios.

Fonte: O autor.

# 3.3 CONCEPÇÃO

As amostras foram nomeadas com o prefixo L, seguido do número 1 para enchimento de EPS e 2 para as lajotas cerâmicas. Para as amostras de lajes solares acrescentou-se a letra S (Quadro 8).

Quadro 8 – Nomenclatura adotada para as amostras.

Sigla	Tipo da amostra	Enchimento
L1	Referencial 1	EPS
L1-S	Comparativa 1	EPS + lajotas solares
L2	Referencial 2	Lajotas cerâmicas
L2-S	Comparativa 2	Lajotas cerâmicas + lajotas solares

As amostras L1 e L1-S foram dimensionadas com enchimentos integralmente formados por EPS, pois o programa não concebe a utilização da recente tecnologia solar. Neste mesmo sentido L2 e L2-S, enchidas por lajotas cerâmicas, também foram consideradas iguais para fins de lançamento no *software* e posteriores comparações. As Figuras 23 e 24 mostram algumas das condições estabelecidas para gerar as análises estruturais das lajes.

Optou-se por não incluir revestimentos, contra-piso ou outras cargas permanentes às amostras, exceto o peso próprio, que em L1 foi igual a 167,7 kgf/m² e L2 igual a 203,4 kgf/m². Sendo assim, na entrada de dados do *software*, os demais itens permanentes foram inseridos com valores iguais a zero. Houve a consideração de carregamento acidental, com uma sobrecarga de 150kgf/m² (1,5kN/m²), seguindo os preceitos da NBR 6120 (ABNT, 1980) para uso em edifícios residenciais (dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro), conforme foi indicado no Quadro 2 da Seção 2.4.

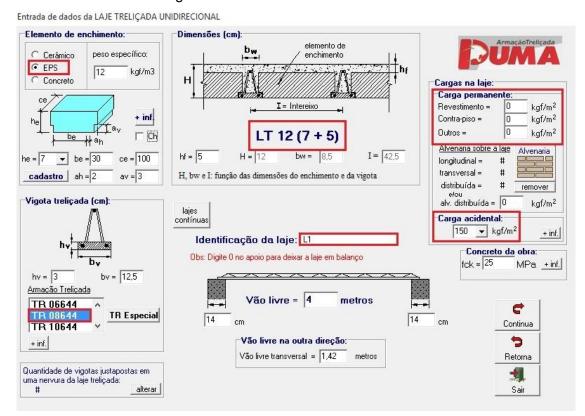


Figura 23 – Entrada de dados L1 e L1-S.

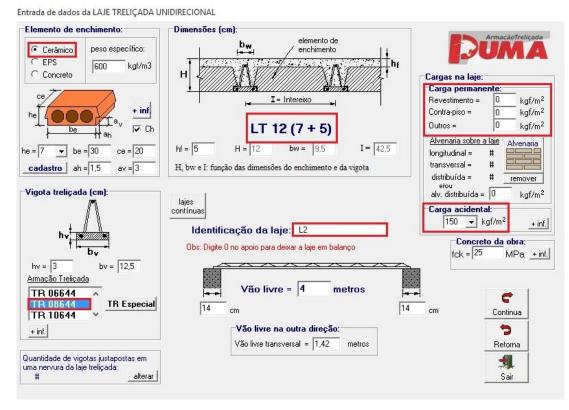


Figura 24 – Entrada de dados L2 e L2-S.

Fonte: O autor.

Contraintuitivamente ao modelo de dimensionamento manual, no qual utilizam-se equações para a determinação da treliça, o *software* funciona com a escolha prévia da mesma, que caso não atenda as solicitações, será acrescida de armadura complementar. Deste modo, para tornar o estudo o mais abrangente possível, utilizou-se a treliça TR 8644, de grande utilização em residências de pequeno e médio porte, por possuir baixo custo e disponibilidade em praticamente todo território nacional. Entretanto, devido ao vão teórico de 4,07 m, o programa indicou a necessidade do acréscimo de uma barra de aço CA-50, com diâmetro de 10 mm, à ser posicionada no sentido longitudinal na sapata das vigotas.

Para dispor as lajotas solares nas amostras L1-S e L2-S, foram observados alguns cuidados para que o vidro, utilizado em conjunto com as mesmas, não limitasse a realização dos ensaios. Os três principais pontos considerados são descritos a seguir:

 Em virtude do caráter comparativo deste estudo, as barras das armaduras de distribuição precisariam ser igualmente espaçadas. Entretanto, para que não coincidissem com os blocos de vidro, onde não há concretagem, esta armadura teve de ser compatibilizada em todas as lajes;

- A altura final da laje utilizada foi igual a 12,0 cm, e para este caso, sem revestimentos, os blocos de vidro ficariam sobressalientes 2,0 cm acima do capeamento de concreto. Porém, para a aplicação do carregamento, havia necessidade de transmitir os esforços diretamente sobre uma seção contínua de concreto, o que não ocorreria se as cargas atuassem sobre as seções dos blocos de vidro:
- Para não ocasionar uma distribuição de tensões desproporcional entre os apoios, houve a necessidade de posicionar os elementos solares de forma simétrica em relação aos eixos das lajes.

Diante das considerações apresentadas, utilizou-se a configuração mostrada na Figura 25, com cada laje solar dispondo de 18 pontos de incidência de iluminação.

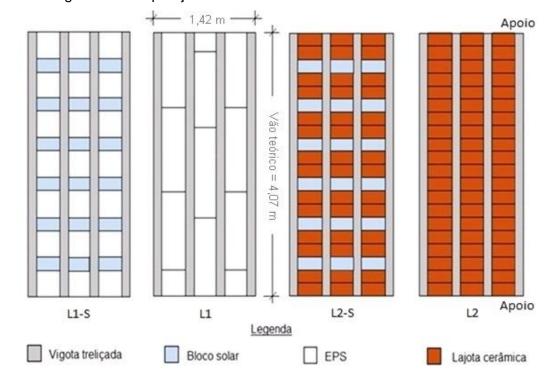


Figura 25 – Disposição dos elementos de enchimentos nas amostras.

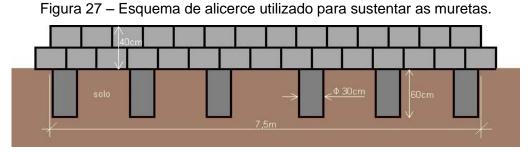
## 3.4 PREPARAÇÃO DOS APOIOS

O dimensionamento das lajes foi realizado considerando-as como biapoiadas, e para fornecer tal condição, foram construídas duas muretas com extensão de 7,5 m cada, utilizando blocos estruturais de concreto com espessura de 14 cm. Os blocos receberam adição de concreto produzido *in loco* entre seus furos (Figura 26) e foram ancorados ao solo por seis pequenas estacas, conforme esquema apresentado na Figura 27. Devido ao custo, e por tratar-se de um trabalho acadêmico, optou-se por construir apenas duas fiadas de blocos, deixando as lajes afastadas, aproximadamente, 40 cm do nível do terreno.



Figura 26 – Apoio utilizado nos ensaios.

Fonte: O autor.



Fonte: O autor.

As aferições dos níveis e do esquadro foram executadas diversas vezes ao longo da construção, pois a existência de possíveis imperfeições poderiam afetar os resultados finais deste estudo, comprometendo seu caráter comparativo. Embora o esquadro tenha possibilitado um espaçamento constante de 4,0 m, entre as faces

internas das muretas, as superfícies continham imperfeições devidas ao assentamento e a rebarbas dos blocos, o que causou pequenas variações de nível. Deste modo, para possibilitar um acabamento plano, houve a necessidade de regularizar a parte superior das muretas com argamassa (traço 1:2:3). A Figura 28 mostra a superfície obtida ao final desta etapa.

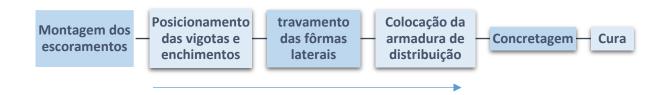


Figura 28 – Acabamento superior dos apoios com aplicação de argamassa.

Fonte: O autor.

# 3.5 FABRICAÇÃO DAS LAJES

Este processo envolveu uma sequência lógica construtiva conforme descrito no fluxograma abaixo:



#### 3.5.1 Escoramentos

A fim de promover estanqueidade às lajes nas fases de concretagem e ganho nas resistências do concreto endurecido, foram utilizadas três linhas de escoras para cada amostra. A linha média, distante 2,0 m da face interna dos apoios, recebeu uma contra-flecha de 1,0 cm, enquanto as outras duas, localizadas a 1,0 e 3,0 m de um dos apoios, receberam contra-flecha de 0,5 cm. A Figura 29 mostra as diversas fases do escoramento, da montagem ao posicionamento das vigotas.



Figura 29 – Detalhe dos escoramentos.

Fonte: O autor.

Este procedimento teve o objetivo de deslocar a laje no sentido contrário ao da gravidade, para que o efeito do peso próprio, quando da retirada dos escoramentos, deixe-a alinhada com o nível dos apoios. Os dados utilizados para aplicação da contra-flecha foram fornecidos pelo *software* Puma Win 17.4, e para possibilitar medidas mais precisas, utilizou-se uma mangueira de nível e linhas auxiliares de *nylon* no posicionamento das escoras.

### 3.5.2 Especificações das vigotas, lajotas cerâmicas e EPS

As vigotas possuíam altura de 3,0 cm, largura de 12,5 cm e concreto classe C25 nas bases. A Figura 30 mostra o detalhe de suas dimensões, e da armadura complementar de 10 mm. O comprimento das vigotas foi de 4,14 m, enquanto a barra adicional possuía 4,24 m devido as dobras de 5 cm em suas extremidades. A

treliça utilizada, TR 8644, como descrito na seção 4.1, foi composta por fios de 4,2 mm nos sinusóides (diagonais) e banzos inferiores, e de 6,0 mm no banzo superior.



Figura 30 – Dimensões das vigotas treliçadas utilizadas.

Fonte: O autor.

Foram utilizadas lajotas cerâmicas H7, com 7 cm de altura e peso específico de 600 kg/m³ (2,5 kg cada). A seção transversal dos elementos convencionais apresentados na Figura 31 são iguais, contendo variação apenas no comprimento das peças. O EPS, com um peso específico de 12 kg/m³, 50 vezes mais leve que as lajotas cerâmicas, mostra a clara diminuição nas cargas que chegam às fundações, até mesmo entre os modelos de LNPVT.

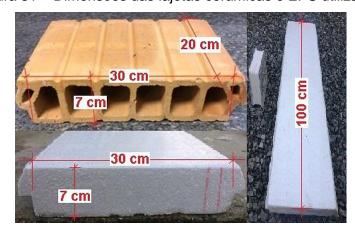


Figura 31 – Dimensões das lajotas cerâmicas e EPS utilizados.

Fonte: O autor.

As vigotas, tão como os enchimentos convencionais, foram gentilmente disponibilizados pelo fabricante local, Duarte Lajes, como forma de incentivo à pesquisa acadêmica e de novos materiais sustentáveis.

### 3.5.3 Especificações das lajotas solares e blocos de vidro

A Figura 32 ilustra as variações de lajotas solares disponíveis no mercado. Cada modelo atende a um intereixo distinto (37 cm, 42 cm, 47 cm), podendo correr variações de ± 2 cm, conforme descrito na seção 2.10.2. Neste trabalho, foram utilizadas lajotas solares com largura de 30 cm e altura padrão de 7 cm, compatíveis com as seções das lajotas cerâmicas e do EPS. Entretanto, o comprimento das lajotas é variável, sendo igual a 23 cm no modelo utilizado, superior em 3 cm aos elementos cerâmicos. Esta diferença se dá por uma leve inclinação na parede lateral do suporte e da abertura mínima necessária de 19 cm, para que o mesmo seja capaz de abrigar um bloco de vidro em suas abas internas.

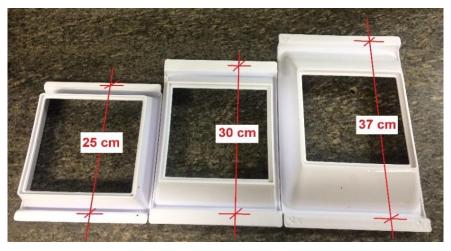


Figura 32 – Modelos de lajotas solares.

Fonte: O autor.

As amostras foram gentilmente disponibilizadas pelo fabricante (Laje Solar do Brasil), para que as mesmas pudessem fazer parte dos ensaios e dar início ao primeiro trabalho acadêmico sobre este material. Os blocos de vidro utilizados também foram obtidos através de doações. O distribuidor deste material, Armazém 21, enviou amostras da linha água, projetadas por Bormioli Rocco, com dimensões de 190x190x80 mm e propriedades descritas no Anexo A. Este modelo possui dissipação dos raios solares, pois a forma do vidro, com aspecto de água, dispersa a luminosidade que incide nos ambientes internos. A aparência do bloco de vidro pode ser vista na Figura 33.



Figura 33 – Blocos de vidro com aspecto aquoso.

Fonte: O autor.

## 3.5.4 Armadura de distribuição

Para esta armadura foram utilizados aços CA-60 com bitolas de 5,0 mm, e espaçados a cada 32 cm no sentido transversal às vigotas (Figura 34). As barras foram amarradas às treliças com arame cozido, para evitar a movimentação das mesmas no período de concretagem.



Figura 34 – Detalhe da amarração da armadura de distribuição.

Fonte: O autor.

## 3.5.5 Concreto usinado em central dosadora

O concreto utilizado na fabricação das lajes foi cedido pela central dosadora Supermix. A resistência à compressão do concreto solicitada junto à empresa foi de 25 MPa, para uma idade de 28 dias após a concretagem. Entretanto, com a

moldagem de 13 corpos de prova (Figura 35) e posteriores ensaios, contatou-se uma resistência à compressão superior à requerida.



Figura 35 - Moldagem dos corpos de prova.

Fonte: O autor.

A Tabela 4 traz o resultado dos testes de carga realizados no laboratório de materiais de construção da presente universidade. Ainda, os Apêndices D, E, F e G apresentam os relatórios dos ensaios de compressão fornecidos pelo equipamento hidráulico responsável pela aplicação da carga.

Tabela 4 – Resistência à compressão dos corpos de prova, em MPa.

CP		ldade	j (dias)	
	7	14	21	28
1	28,47	-945		1.507
2	24,56 25,74			
3	25,74			
4	20 - 10 - 1	34,76		
5	2	34,76 34,45		
6	2	33,58		
7	23	100	36,33	
8	22		35,61	
9	22	:	31,02	
10	(6)	(5)	6	41,07
11	(0)			37 97
12	8		8	33,73
13	8			41,69

Fonte: O autor.

Com base nos valores obtidos, foi possível utilizar as Equações 1 e 2, apresentadas na seção 2.1, para estimar a resistência à compressão do concreto aos 28 dias (Equações 12 e 13). Foi utilizado, de acordo com a NBR 12655 (ABNT,

2006), um desvio-padrão igual a 4,0 (Condição A de preparo) e coeficiente  $\psi_6$  igual a 0,89, para quatro corpos de prova ensaiados aos 28 dias.

$$F_{ck_{est}} = 33,73.0,89 = 30,02 \text{ MPa}$$
 (12)

$$f_{c.28} = 25 + 1,65.4,0 = 31,6 \text{ MPa}$$
 (13)

Considerou-se o menor valor entre os dois métodos, 30,02 MPa, garantindo que o concreto utilizado nas lajes, tivessem resistência à compressão superior à de projeto (25 MPa).

O procedimento para realização do *slump test* foi executado segundo as indicações normativas, com utilização de fôrma apropriada, devidamente saturada e enchida por três camadas do material recém-despejado do caminhão. Cada uma das camadas foram submetidas à 25 golpes, e a leitura apontou um abatimento de 9 cm, com baixa trabalhabilidade, podendo ocorrer variações de ± 2 cm. Parte do ensaio pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 – *Slump* realizado com amostra retirada do caminhão betoneira.



Fonte: O autor.

#### 3.5.6 Concretagem e Cura

A concretagem ocorreu no dia 19 de abril de 2017, posterior a um longo período de chuvas, tornando desnecessária a prévia saturação das lajotas e fôrmas. A calha do caminhão betoneira possuía cerca de 1 m de alcance, sendo feito o

lançamento do concreto diretamente a esta distância, e posteriormente espalhado por toda extensão das lajes (Figura 37).



Figura 37 – Concretagem e nivelamento das amostras.

Fonte: O autor.

O nível e a altura do capeamento foram garantidos por taliscas de madeira, com 5 cm de espessura, posicionadas sobre as lajotas cerâmicas e do EPS, servindo de gabarito para a utilização de réguas com desempenos de alumínio. Após o término da concretagem foi necessária à limpeza da superfície dos blocos de vidro, pois o endurecimento da massa sobre os mesmos impediria a função de iluminação. A Figura 38 mostra o aspecto das lajes logo após a limpeza dos blocos, ainda úmidas e com a massa em estado fresco.



Figura 38 – Lajes recém concretadas.

O processo de cura do concreto foi realizado através do método de irrigação (Figura 39), formando uma película fina de água sobre as amostras. Esta manutenção hídrica ocorreu por 10 dias ininterruptos, evitando as fissurações e outras patologias associadas à retração do concreto.



Figura 39 – Realização da cura.

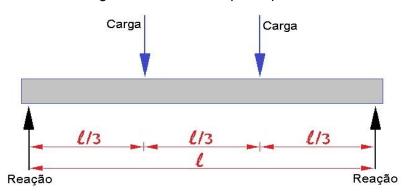
Fonte: O autor.

Passados 28 dias, foram realizadas as desformas e retirada dos escoramentos das lajes, constatando-se a ausência de falhas de concretagem e uma avaliação visual satisfatória. Este fato ocorreu devido ao cuidado na execução da vibração manual, nivelamento e acabamento das lajes.

#### 3.6 ENSAIOS

As lajes foram ensaiadas à flexão normal, submetendo-as ao método de aplicação de cargas à quatro pontos. Neste ensaio, o elemento estrutural é submetido a dois carregamentos lineares e iguais, com espaçamento de 1/3 e 2/3 do vão teórico ( $\ell$ ), de acordo com a (Figura 40). Os quatro pontos indicados pela nomenclatura do ensaio, fazem alusão às duas cargas aplicadas e às duas reações de apoio atuantes no elemento.

Figura 40 – Flexão à quatro pontos.



Fonte: O autor.

O carregamento foi produzido por reservatórios cilíndricos (tonéis), com um peso próprio de 8 kg e capacidade para comportar 200 litros de água cada. Considerando a densidade da água igual a 1,0, a conversão do volume em massa é proporcional, e o peso do líquido em cada reservatório totalizou 200 kg. Os tonéis foram utilizados em duas camadas sobrepostas (Figura 41), cada uma com cinco unidades, sendo um reservatório central e quatro de canto.

58 cm 38 cm

Figura 41 – Disposição dos reservatórios em dois níveis.

Fonte: O autor.

A transmissão das cargas geradas pelos reservatórios foi transmitida às lajes por um *pallet*. Este suporte de madeira foi construído utilizando duas terças

principais, quatro secundárias e tábuas, para que os tonéis fossem acomodados e permanecessem estáveis quando enchidos por água. O peso próprio do *pallet* foi igual a 75,9 kg, com uso de madeira de pínus saturada (400kg/m³). A Figura 42 mostra a vista frontal do suporte inferior, indicando as dimensões entre os eixos das terças secundárias.

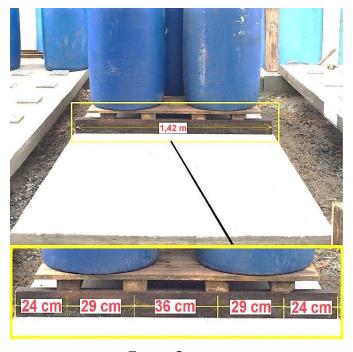


Figura 42 – Vista frontal do pallet inferior.

Fonte: O autor.

Um segundo *pallet* foi utilizado entre os dois níveis de reservatórios. Embora possuísse aparência mais fina que o primeiro (inferior), este suporte apresentou 73,7 kg, pois a madeira utilizada foi a itaúba, que possui peso específico de 1070 kg/m³, cerca de 2,7 vezes superior ao pínus. Entretanto, ambos os *pallets* foram considerados com uma caga média de 75 kg, facilitando a análise dos dados obtidos e o posterior lançamento em tabelas e gráficos.

Apenas o suporte de madeira inferior teve contato direto com a laje, tendo o pallet superior a exclusiva função de estabilizar os tonéis do segundo nível. Deste modo, as dimensões apresentadas limitaram-se a descrever o pallet inferior, com detalhe do espaçamento entre terças e de suas seções transversais. Sendo assim, a Figura 43 ilustra estes dados, além das dimensões dos reservatórios, do vão da laje, dos apoios, e toda estrutura utilizada na execução dos ensaios no nível inferior.

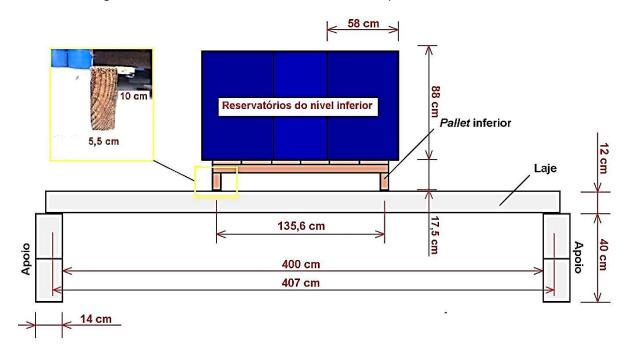


Figura 43 – Nível inferior do sistema utilizado para os ensaios à flexão.

Fonte: O autor.

As medições das flechas foram realizadas para dez carregamentos distintos, com intervalo de 30 minutos entre duas leituras consecutivas. O fluxograma apresentado na Figura 44 explica a metodologia deste procedimento, onde as variações no acréscimo de cargas são constantes, exceto no primeiro carregamento do nível inferior, e o superior (315 e 1430 kg). A variação, nestes casos, leva em consideração, além da água (200 kg), o peso próprio dos materiais de apoio (*pallets* e tonéis), que somam 115 kg, conforme indicado abaixo:

## 1º carregamento do nível inferior:

- Pallet inferior com madeira de pínus (75 kg);
- 5 tonéis de 8 kg cada (40 kg);
- Enchimento do tonel central inferior (200 kg).

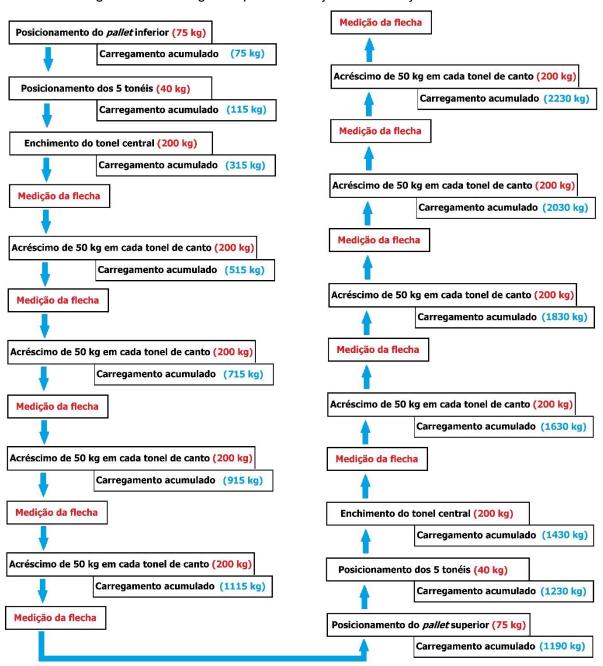
## 1º carregamento do nível superior:

Carregamento total inferior (1115 kg);

- Pallet superior com madeira de itaúba (75 kg);
- 5 tonéis de 8 kg cada (40 kg);
- Enchimento do tonel central superior (200 kg).

Salvo as duas exceções apresentadas, as demais medições foram feitas para carregamentos com variações constantes de 200 kg.

Figura 44 – Fluxograma para realização das medições das flechas.



A Figura 45 ilustra o processo de enchimento dos reservatórios, sendo os de canto acrescidos por 50 litros de água por rodada de medição. Para obter este controle de volume, ainda em solo, um dos tonéis foi enchido com água controlada por seu valor em massa, através de uma balança de precisão. Deste modo foi possível a realização de uma escala métrica entre volume e altura. Os valores correspondentes a 50, 100, 150 e 200 litros, foram marcados em uma ripa de madeira e introduzidos dentro dos reservatórios. Para dar velocidade ao processo de enchimento, 10 tonéis foram posicionados no solo e previamente enchidos de água por mangueiras, tendo este volume sido posteriormente transportado por baldes para os reservatórios sobre as lajes.

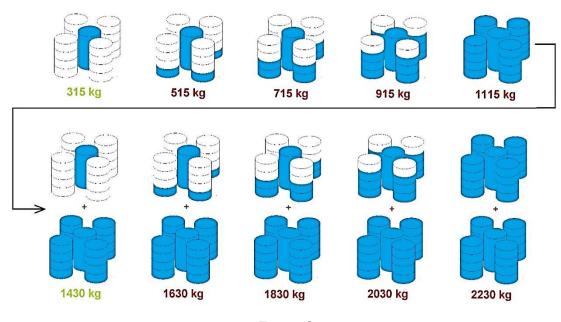


Figura 45 – Volume de água nos reservatórios.

Fonte: O autor.

Foi utilizado um paquímetro digital (Figura 46) para realização das medições. A aferição foi feita em quatro moedas de 5 centavos, com diâmetro de 22,00 mm e espessura de 1,65 mm. Registraram-se variações de 0,02 mm, podendo estar associadas a pequenas falhas do equipamento ou desgaste do material medido, sendo desconsideradas devido à ordem de grandeza.

O equipamento digital teve significativa importância na obtenção dos dados, pois, devido à baixa altura a que as lajes se encontravam, as leituras dos deslocamentos requereriam mais tempo e menor precisão com paquímetro comum.

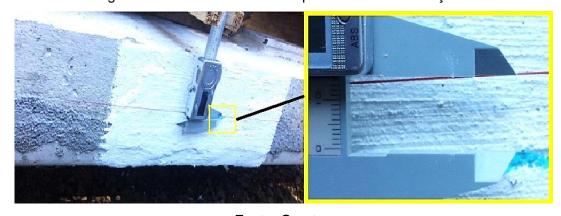
Figura 46 – Paquímetro digital.



Fonte: O autor.

O aspecto acinzentado presente nas lajes tornaria as leituras extremamente difíceis, pois as abas medidoras do paquímetro possuem coloração semelhante. Para evitar tal complicação, foi efetuada a pintura na cor branca no eixo lateral das lajes. Neste trecho, uma marcação em azul foi feita sobre a pintura. Ainda, duas pequenas estacas de madeira foram cravadas no solo, externamente aos apoios, esticando um fio de *nylon*, sem que o mesmo tocasse a laje e sofresse influência dos carregamentos. Este fio foi alinhado com a marcação em azul, ficando a uma distância de 5 mm da laje e servindo de referência para as medições. O *nylon* também teve sua coloração natural alterada para a cor vermelha, para que a diferenças de tonalidades auxiliassem no posicionamento do paquímetro (Figura 47).

Figura 47 – Pinturas realizadas para facilitar as medições.



Fonte: O autor.

O primeiro ensaio foi realizado na amostra L1-S, e fez-se o uso de uma fita com catraca reguladora (Figura 48), para travar os reservatórios uns aos outros, pois ainda não se conhecia o comportamento dos mesmos quando dispostos em dois níveis. Entretanto, notou-se que a fita não seria necessária nos demais ensaios, pois o conjunto permaneceu extremamente estanque. O peso da mesma não foi considerado devido à sua ordem de grandeza.



Figura 48 – Início da aplicação do carregamento em L1-S.

Fonte: O autor.

As amostras foram ensaiadas na sequencia abaixo, com intervalos de 4 dias entre as amostras L1 e L1-S, 7 dias entre L1-S e L2, e 4 dias entre L2 e L2-S, totalizando 15 dias entre o primeiro e último ensaio.



# **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os deslocamentos de L1, segunda laje a ser ensaiada, podem ser vistos na Figura 49. Optou-se por não apresentar as fotos de todos os ensaios, pois as mesmas possuem muitas semelhanças, tornando-as redundantes e visualmente dispensáveis ao estudo. Entretanto, todas as flechas foram devidamente detalhadas na Tabela 5.

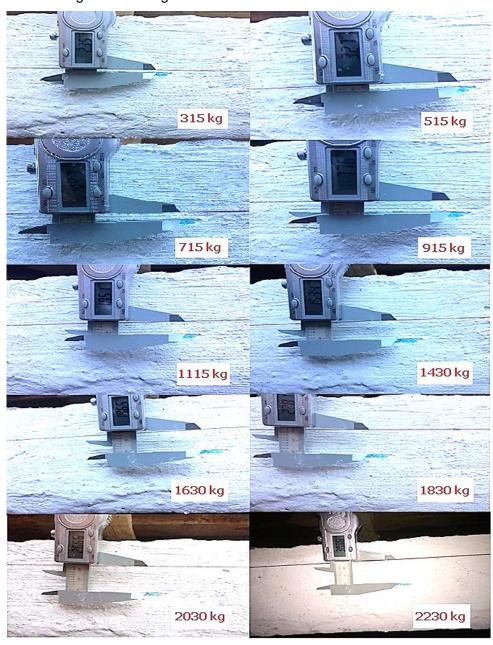


Figura 49 – Registros dos deslocamentos na amostra L1.

Tabela 5 – Resumo das flechas registradas (mm).

Cargas (kg)	L1	L1-S	L2	L2-S
315	2,35	1,69	1,34	1,88
515	3,27	3,65	2,92	3,13
715	4,97	5,81	4,56	5,42
915	7,76	8,94	7,11	8,26
1115	10,51	11,30	10,02	11,29
1430	15,34	15,90	14,79	15,33
1630	19,65	19,68	18,98	19,51
1830	22,81	23,99	22,14	23,04
2030	26,66	28,16	26,23	26,92
2230	30,08	31,01	29,07	29,76

Fonte: O autor.

Notou-se que a amostra L2, constituída integralmente por lajotas cerâmicas, apresentou os melhores resultados, com deslocamento de 1,34 mm para a carga inicial (315 kg), e 29,07 mm para carga máxima imposta (2230 kg).

A Tabela 6 apresenta diferenças entre as flechas registradas em L1 (referencial), e sua amostra comparativa L1-S. O deslocamento inicial de L1 foi igual a 2,35 mm, com variação de 0,66 mm, representando variação de 28,1% superior em relação a L1-S. Entretanto, esse comportamento não permaneceu linear nas demais medições, pois as flechas posteriores ficaram abaixo de L1-S.

Tabela 6 – Variações entre as flechas registradas em L1 e L1-S.

Cargas (kg)	Variações (mm)	Percentual
315	-0,66	-28,1 %
515	0,38	11,6 %
715	0,84	16,9 %
915	1,18	15,2 %
1115	0,79	7,5 %
1430	0,56	3,7 %
1630	0,03	0,2 %
1830	1,18	5,2 %
2030	1,50	5,6 %
2230	0,93	3,1 %

Fonte: O autor.

O Gráfico 3 compara as variações diretas entre as flechas de L1 e L1-S, com uma curva oscilatória, registrando diferenças crescentes até 915 kg, decrescentes

de 915 à 1630 kg, e voltando a apresentar maiores variações para cargas superiores.



Gráfico 3 – Variação entre as flechas de L1 e L1-S.

Fonte: O autor.

O carregamento de 1630 kg se mostrou crítico para as duas amostras, tendo deslocamentos praticamente iguais e variação tendendo a zero neste ponto.

As correlações entre as cargas atuantes e o percentual das variações são apresentadas no Gráfico 4. Este comportamento revela a perda da representatividade de cada incremento de flecha no montante dos deslocamentos, como pode ser notado na carga de 2030 kg, onde foi registrada a maior variação, de 1,5 mm, representando uma diferença de apenas 5,6% entre as lajes. A média dos 10 deslocamentos registrados para as amostras L1 e L1-S foi de 0,8 mm



Gráfico 4 – Percentual da variação entre as flechas de L1 e L1-S.

As análises feitas para L1 e L1-S foram repetidas nas amostras L2 e L2-S, com dados das variações mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Variações entre as flechas registradas em L2 e L2-S.

Cargas (kg)	Variações (mm)	Percentual
315	0,54	28,7 %
515	0,21	6,7 %
715	0,86	15,9 %
915	1,15	13,9 %
1115	1,27	11,2 %
1430	0,54	3,5 %
1630	0,53	2,7 %
1830	0,90	3,9 %
2030	0,69	2,6 %
2230	0,69	2,3 %

Fonte: O autor.

O Gráficos 5 apresenta um comportamento irregular, ainda mais oscilatório em relação ao observado nas primeiras amostras. A amplitude entre seus pontos máximos e mínimos é mais discreta no trecho central, onde as diferenças diminuem somente após a carga de 1115 kg (200 kg superior aos 915 kg de L1 e L1-S). A variação final permaneceu com diferença constante de 0,69 mm para os dois últimos carregamentos, o que indica a tendência de um comportamento estrutural semelhante entre as lajes para estas condições. A média dos 10 deslocamentos registrados para as lajes L2 e L2-S foi de 0,7 mm.

Gráfico 5 – Variação entre as flechas de L2 e L2-S.



O Gráfico 6 confirma a premissa utilizada para análise das variações percentuais, onde a diminuição dos valores é explicada pela parcela ínfima de contribuição dos deslocamentos parciais no montante das flechas acumuladas. Percebeu-se que, para as lajes com lajotas cerâmicas, este comportamento praticamente estabilizou-se após a carga de 1430 kg.



Gráfico 6 – Percentual da variação entre as flechas de L2 e L2-S.

Fonte: O autor.

Como visto anteriormente na seção 2.6.3, as lajes não devem ultrapassar os deslocamentos impostos pelos estados-limites, para que as estruturas não apresentem patologias ou entrem em colapso. Entretanto, segundo o *software* Puma Win 17.4, o cálculo para obtenção das flechas é praticamente impossível, pois considera inúmeros fatores variáveis em sua formulação, gerando resultados puramente estimativos (Figura 50).

Figura 50 – Considerações do software Puma Win 17.4 quanto às flechas.

O cálculo exato da FLECHA e por conseguinte da CONTRAFLECHA é praticamente impossível, pois leva em conta vários fatores: qualidade e tipo do concreto, disposições construtivas, variabilidade das cargas, condições ambientais, processos de cálculo dentre outros.

Deste modo, os valores devem ser vistos como valores estimados e dentro de uma margem aceitável de segurança.

Não é levada em conta a deformabilidade do apoio (vigas), devendo ser verificado pelo projetista da estrutura. Este programa não faz a verificação dos estados limites de rotação, formação e abertura de fissuras e nem de vibrações excessivas. Para estas verificações, recomenda-se o cálculo com a laje integrada à estrutura.

O software forneceu os valores das flechas estimadas, sendo as mesmas calculadas sob a influência de diversos fatores, e com os carregamentos obtidos através das combinações nos estados-limites.

O programa indicou os valores referentes ao peso próprio das amostras L1 e L2, sendo iguais a 167,7 e 203,4 kgf/m², respectivamente. Para o valor da carga acidental, decorrente do uso nas edificações residências, foi considerada uma solicitação de 150 kgf/m², conforme indicado no Quadro 2 da Seção 2.4.

As combinações das ações quase permanentes foram feitas no ELS (estadolimite de serviço), com os valores das cargas de revestimento, contrapiso e alvenarias iguais a zero, como realizado no lançamento das estruturas. O ELU (estado-limite último) avaliou o efeito da carga acidental, majorando-a como efeito principal atuante nas lajes. Os valores das cargas ponderadas são descritos a seguir:

#### ELS (L1 e L1-S)

$$\begin{split} F_{L1,ELS} &= 2,34.\,(PP) + 3,00.\,(PER) + 3,00.\,(ALV) + 2,34\,.\,(ACID)\,.\,0,3 \\ F_{L1,ELS} &= 2,34\,.\,(167,7) + 3,00.\,(0) + 3,00.\,(0) + 2,34\,.\,(150,0)\,.\,0,3 \\ F_{L1,ELS} &= 497,7\,\,kgf/m^2 \end{split}$$

### ELS (L2 e L2-S)

$$\begin{split} F_{L2,ELS} &= 2,34.\,(PP) + 3,00.\,(PER) + 3,00.\,(ALV) + 2,34\,.\,(ACID)\,.\,0,3 \\ F_{L2,ELS} &= 2,34\,.\,(203,4) + 3,00.\,(0) + 3,00.\,(0) + 2,34\,.\,(150,0)\,.\,0,3 \\ F_{L2,ELS} &= 581,3\,\,kgf/m^2 \end{split}$$

### ELU (L1, L1-S, L2 e L2-S)

$$F_{L1,2,ELU} = 2,34. (ACID)$$
  
 $F_{L1,2,ELU} = 2,34. (150,0)$   
 $F_{L1,2,ELU} = 351,0 \text{ kgf/m}^2$ 

Os carregamentos nos estados-limites foram nomeados como  $F_{L2,ELS}$  e  $F_{L1,2,ELU}$ , e tiveram o intuito de comparar as flechas calculadas às flechas admissíveis, seguindo as condições normativas para aceitabilidade sensorial dos deslocamentos. Tais variações nos elementos estruturais não deveriam ser superiores a  $\ell$  /250, para combinações quase permanentes, e  $\ell$  /350 para as acidentais. As verificações efetuadas pelo *software*, entre as condições de cálculo e seus respectivos limitantes, podem ser vistas nas Figuras 51 e 52.

Figura 51 – Verificação das fechas no ELS e ELU para as amostras L1 e L1-S.

	adas (cm	Ii.	limites	CmE		
0.04 - P.D. 0.00 - P.F.D. 0.00 - 1111 0.04 - 1010 - 0.0					s/ contraflecha	c/ contraflecha
2,34 * PP + 3,00 * PER + 3,00 * ALV + 2,34 * ACID * 0,3	1,55	vão consid. não		= 1,6 o que 5 cm	OK	ОК
2,34 * ACID	1,09	vão consid. não		= 1,1 o que 5 cm	ОК	ок
Não há alvenaria sobre laje.						

Fonte: O autor.

Figura 52 – Verificação das fechas no ELS e ELU para as amostras L2 e L2-S.

Cálculo e verificação da flecha da laje:	Flechas		Flec		flecha calculada <	flecha limite ?
Cargas: 2,34 * PP + 3,00 * PER + 3,00 * ALV + 2,34 * ACID * 0	calculadas (cm ),3 1,77	vão consid.	500000000		s/ contraflecha não OK	c/ contraflecha OK
2,34 * ACID	1,07	vão consid. não		= 1,1 o que 5 cr	OK	OK
Não há alvenaria sobre laje.						

Fonte: O autor.

A laje L2 apresentou a necessidade de aplicação de uma contra-flecha de 1,0 cm, pois a mesma não atendeu a condição de  $\ell$  /250. Embora este fato não tenha sido requerido para a laje L1, ela teve a mesma contra-flecha aplicada, para que as amostras possuíssem geometrias iguais e pudessem ser comparadas quanto a seus deslocamentos.

As amostras foram avaliadas de acordo com o enchimento base (EPS ou lajota cerâmica), e posteriormente de forma geral (todas entre si), para que os

resultados comparados fossem claros e representativos para esta análise. Para tal, os Gráficos 7 e 8 apresentam as curvas entre as cargas e suas respectivas flechas.

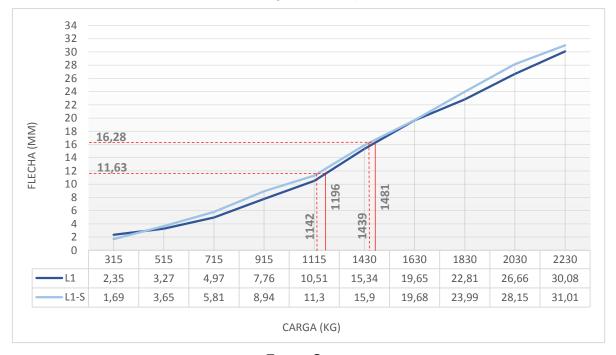


Gráfico 7 – Carga x Flecha para L1 e L1-S.

Fonte: O autor.



Gráfico 8 - Carga x Flecha para L2 e L2-S.

Deste modo, aplicando o vão teórico ( $\ell$ ), de 4070 mm, foi possível rebater os valores das flechas admissíveis sobre as curvas, e assim determinar as cargas responsáveis por elevar as amostras aos deslocamentos-limites. A Tabela 8 traz os dados obtidos através da análise gráfica das medições.

Tabela 8 – Capacidade resistente das lajes para as flechas-limites (kg).

Flech as admissíveis (mm)		L1	L1-S	L2	L2-S
<b>ℓ</b> /350	11,63	1196	1142	1219	1156
<b>ℓ</b> /250	16,28	1481	1439	1504	1475

Fonte: O autor.

A laje L2 apresentou a maior resistência à flexão entre as amostras, seguida por L1, L2-S e L1-S. As variações entre as cargas e seus valores percentuais foram divididas em duas comparações distintas. A primeira diz respeito às diferenças entre as lajes de referência e suas respectivas lajes solares (Tabela 9), enquanto a segunda compara as duas lajes solares separadamente às lajes convencionais (Tabela 10).

Tabela 9 – Análise da capacidade resistente entre lajes L1 e L1-S, e L2 e L2-S.

Flech as admissíveis (mm)		L1 e L1-S	3	L2 e L2-S	
rieciias autilis	siveis (min)	Variação (kg) %		Variação (kg)	%
<b>ℓ</b> /350	11,63	54	4,7	63	5,4
<b>ℓ</b> /250	16,28	42	2,9	29	2,0

Fonte: O autor.

Tabela 10 – Análise da capacidade resistente entre lajes L1 e L2, e L1-S e L2-S

Flechas admissíveis (mm)		L1 e L2		L1-S e L2-S	
		Variação (kg)	%	Variação (kg)	%
<b>ℓ</b> /350	11,63	23	1,9	14	1,2
<b>ℓ</b> /250	16,28	23	1,6	36	2,5

Fonte: O autor.

Os dados revelam variações com maiores discrepâncias entre as amostras convencionais e as lajes solares. Ainda assim, o percentual de variação máxima foi de 5,4% (63 kg), sendo praticamente irrelevante na resistência à flexão da estrutura,

uma vez que este valor foi aplicado de forma linear sobre a laje, tendo influência ainda menor se distribuído por m².

O dimensionamento das lajes foi realizado com a atuação de cargas distribuídas sobre os elementos. Já nos ensaios, o sistema de aplicação de cargas ocorreu de forma concentrada, aplicados sobre dois pontos. Entretanto, desconsiderando os efeitos dos acúmulos de tensões nessas regiões, as lajes puderam ser comparadas quanto a seus momentos máximos. Os diagramas genéricos das duas aplicações de cargas são apresentados nas Figuras 53 e 54.

Q (kN/m)

4070 m

V (kN)

-V (kN)

M (kN.m)

Figura 53 – Aplicação da carga segundo o modelo de cálculo.

Fonte: O autor.

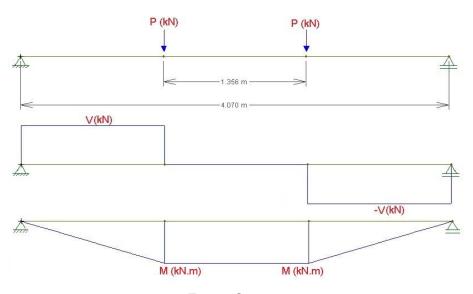


Figura 54 – Aplicação da carga segundo o modelo de flexão à quatro pontos.

Para gerar os diagramas, as cargas distribuídas de cálculo (Q) foram obtidas através das majorações dos estados-limites. Por outro lado, as cargas concentradas (P) foram encontradas nos ensaios de flexão, conforme mostrado anteriormente na Tabela 8. Os valores de P tiveram de ser divididos por 2, pois cada terça do *pallet* inferior recebeu 50% do valor total da carga aplicada. Ainda, os valores foram convertidos para kN, sendo P expresso nesta unidade, e Q em (kN/m). A Tabela 11 mostra os momentos de cálculo e os obtidos, com suas respectivas variações.

Tabela 11 – Variação no momento resistente (kN.m).

	Cargas	<b>ℓ</b> /350	Momento (kN.m)	<b>ℓ</b> /250	Momento (kN.m)
1.4	Р	5,980	8,115	7,405	10,049
L1	Q	3,510	7,268	4,977	10,305
	10 st		0,847		-0,256
140	Р	5,710	7,748	7,195	9,764
L1-S	Q	3,510	7,268	4,977	10,305
			0,480		-0,541
1.0	Р	6,095	8,271	7,520	10,205
L2	Q	3,510	7,268	5,813	12,036
	5 S	0 00 00	1,003	728	-1,831
100	Р	5,780	7,843	7,375	10,008
L2-S	Q	3,510	7,268	5,813	12,036
	P1 6	256 6	0,575		-2.028

Fonte: O autor.

A variação nos momentos mostrou-se superior para as cargas causadoras do ELU. Este comportamento pode ser explicado pelo alto impacto inicial das cargas concentradas sobre as lajes. Por ouro lado, após o ELS, as variações foram negativas, com os momentos de cálculo sendo superiores aos atingidos, onde as lajes já apresentavam-se estabilizadas.

### 5 CUSTO

A estimativa do custo para implantação das lajes solares foi baseada em valores médios anunciados por grandes lojas do ramo da construção civil. Entretanto, este orçamento contempla apenas os pontos de implantação da tecnologia, não entrando nos méritos das LNPVT. Os valores apresentados podem sofrem variações devido a fatores relacionados a quantidade, transporte, demanda e economia atual.

Quando se optar pela utilização destas lajes sob telhados, deve-se levar em consideração o uso de telhas translúcidas, com indicação de 6 unidades sobre cada bloco de vidro, conforme ilustrado na Figura 55. Os valores unitários para implantação das lajes solares são descritos no Quadro 9.

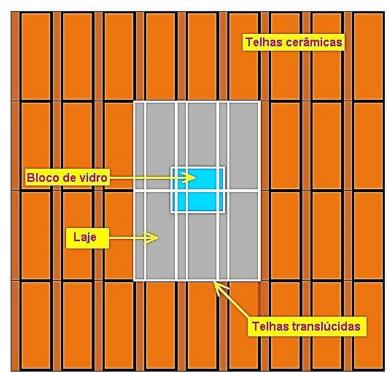


Figura 55 – Vista superior da cobertura com utilização de telhas translúcidas.

Item	Descrição	Rendimento p/ bloco	Custo (R\$)	Custo Unitário (R\$ / un)
Lajota Solar - H7	30 cm (cx. c/10 un.)	1 un.	280,00	28,00
Bloco de vidro	19x19 cm (cx. c/ 6 un.)	1 un.	75,00	12,50
Silicone	Uso geral 280 g	28 g	20,00	2,00
Impermeabilizante	Asfáltico 3,6 kg	120 g	42,00	1,40
<del>.</del>	30 - 300	Custo unitário	total (C)	43,9
Telha plástica	Portuguesa 230x410mm	6 un.	22,00	132,00
- 1	Custo unitário total com u	utilização de telha	a plástica	175,90
Telha de vidro	Portuguesa 233x400mm	6 un.	48,00	288,00
	Custo unitário total com u	tilização de telha	de vidro	331,90

Quadro 9 – Estimativa de custo unitário para implantação das lajes solares.

Fonte: O autor.

Cada uma das duas amostras solares avaliadas, L1-S e L2-S, continha área de 5,78 m², com 18 blocos instalados, cerca de 3 pontos por m². Para este arranjo, o custo por m² ( $C_{\rm m}$ ) é estimado através da Equação 13, que relaciona o valor unitário por ponto de instalação (sem telhas), com a quantidade de blocos ( n ).

$$C_{\rm m} = C.n = 43,90 \,(R\$/un).3 \,(un/m^2) = 131,70 \,(R\$/m^2)$$
 (13)

As telhas possuem rendimento de 12 peças por m² de cobertura. Sendo assim, os três blocos de vidro por m² requereriam apenas 4 telhas por ponto de utilização, superior em duas peças às utilizadas neste orçamento. Entretanto, no exemplo mostrado anteriormente (Figura 53), o bloco é considerado isolado, não devendo ter as quantidades de telhas reduzidas para esta situação, para que haja incidência solar dentro do ambiente por um maior período de horas do dia.

Para altura das lajes convencionais utilizadas neste estudo (L12, 7+5), estimou-se um valor médio por m² de R\$ 62,00 e R\$ 71,00, respectivamente, para lajotas cerâmicas e EPS. Estes valores contabilizaram as vigotas, os enchimentos, concreto de capeamento, armadura de distribuição (barras transversais 5,0mm a cada 32 cm), madeiramento de travamento e escoras.

Todos os itens citados na composição do orçamento das lajes convencionais também estão presentes nas lajes solares. Sendo assim, deve-se somar o valor de

ambas para obtenção do custo real destas lajes. Ainda, é imprescindível analisar com cuidado tais valores, pois segundo o fabricante, as lajes solares podem proporcionar até 80% de economia no consumo de energia elétrica (para fins de iluminação), o que lhes dá um tempo de retorno, que embora desconhecido, pode fazer com que o investimento inicial na implantação da tecnologia seja recuperado.

A correlação dos valores estimados para as amostras utilizadas neste trabalho encontram-se abaixo:

Custo estimado para L1	71,0 R\$ /m²
Custo estimado para L1-S	71,0 + 131,70 = 202,7 R\$ /m²
Custo estimado para L2	62,0 R\$ /m²
Custo estimado para L2-S	62, 0 + 131,70 = 193,70 R\$ /m <sup>2</sup>

# 6 CONCLUSÃO

Através de análises detalhadas, foi possível estabelecer uma comparação estrutural entre as quatro lajes ensaiadas à flexão simples. Os modelos foram compostos por lajes treliçadas com vigotas, com duas delas possuindo enchimento à base de EPS, e outras duas com lajotas cerâmicas. A duas lajes, com enchimentos distintos, foram acrescentados suportes plásticos e blocos de vidro, formando as lajes solares.

A execução dos ensaios foi realizada com a aplicação de dez carregamentos sequenciais, com registro das flechas para cada etapa, até a carga máxima de 2230 kg. Os dados foram organizados de forma a compará-los, primeiramente, entre si, e em um segundo plano, ao dimensionamento obtido no *software* Puma Win 17.4.

Baseando-se nas indicações normativas, as flechas referentes aos estadoslimites de serviço (ELS), e últimos (ELU), puderam ser associadas à curva cargaflecha das amostras, obtendo-se os esforços responsáveis por fazê-las atingir tais estados.

Notou-se que as lajes solares apresentaram cargas-limites com variações médias inferiores a 5%, em relação às convencionais. Entretanto, sabendo-se que as majorações existentes nas estruturas de concreto são da ordem de 40%, e que em estruturas pré-fabricadas podem ser reduzidas para 30%, tal variação tende a ser desprezada nos dimensionamentos. Também, para casos mais conservadores, pode-se adotar uma ponderação intermediária, de 35%, para que sejam levados em consideração os demais fatores não abordados por este trabalho.

Houveram pequenas variações entre os deslocamentos obtidos. Para as amostras de EPS, a média entre as flechas foi de 0,8 mm para cada acréscimo de carga. Já para as lajotas cerâmicas, a média desses deslocamentos foi de 0,7 mm. Os carregamentos adicionados após os estados-limites não causaram fissuras nas lajes, mas geraram um deslocamento máximo de 31,01 mm.

As comparações entre os momentos de cálculo e os obtidos empiricamente foram próximas. Ainda que tenham sido avaliadas puramente para uma visão geral, os resultados mostraram uma variação pequena e constante, sendo superiores até o ELU, e inferiores no ELS.

Ressalta-se que o presente estudo possuiu caráter inconclusivo, pois, para obtenção de dados inquestionáveis, seriam necessárias amostragens mais representativas das lajes avaliadas. Ainda, não pode-se afirmar que o número de blocos de vidro possuiu influência linear na perda de resistência à flexão da laje, e por consequência, que o aumento da quantidade destes elementos por m², teria um comportamento semelhante ao obtido.

Avaliaram-se, também, aspectos econômicos. O custo de implantação do sistema de lajes solares foi estimado como sendo igual a R\$ 43,90 por unidade, ou R\$ 131,70 por m², além do custo das lajes convencionais. Apesar do valor representativo, deve-se atentar à economia de energia luminosa que este modelo de laje pode proporcionar. Só assim, então, pode-se avaliar o custo benefício e o tempo de retorno do investimento de forma correta.

Ainda que não haja um conhecimento pleno sobre as lajes solares, o estudo preliminar demostrou resultados coesos, e de extrema relevância para novos estudos. Todavia, foi possível elucidar os profissionais da área sobre o processo construtivo, custo estimado de implantação, e principalmente, quanto a segurança destas estruturas.

#### 6.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS POSTERIORES

Como visto nas seções anteriores, as lajes solares possuem inúmeras particularidades, das quais o comportamento estrutural teve sua primeira análise realizada. Entretanto, para gerar um conhecimento pleno sobre estas lajes, é necessário que novos estudos, além de se aprofundarem ainda mais no âmbito estrutural, também abordem aspectos arquitetônicos, temoacústicos, de iluminação, patológicos, e de sustentabilidade.

#### Estruturais:

- Ensaios com lajotas solares para diferentes intereixos;
- Ensaios com um número maior de amostras de lajes, e com dimensões distintas;
- Ensaios com lajes amostras de prolongadores;
- Variação na altura das lajes e uso de prolongadores

- Aumento no número de blocos por m²;
- Ensaios com lajes solares bidirecionais;
- Utilização em lajes inclinadas;
- Simulação computacional deste modelo de laje por elementos finitos.

# Arquitetônicas e termoacústicas:

- Análise dos cômodos indicados para instalação das lajes solares;
- Estudo do aumento da temperatura interna.

# <u>Iluminação:</u>

- Incidência luminosa;
- Cálculo luminotécnico, para a determinação da quantidade de blocos por ambiente.

### Patológicos:

- Vibrações e possíveis infiltrações.

## Sustentabilidade:

- Economia de energia;
- Custo benefício.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACELORMITTAL. **Manual técnico de lajes treliçadas.** Belo Horizonte: 2010. 42 p. < <a href="http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manual-tecnico-trelicas.pdf">http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manual-tecnico-trelicas.pdf</a> >. Acesso em: 11 set. 2016.

ACKER, A. V. Manual de sistemas pré-fabricados de concreto. 2002. 129 p.

AGOPYAN, V; JOHN, V. M. **O** desafio da sustentabilidade na construção civil. v.5. São Paulo: Edgard Blücher Editora, 2011. 141 p.

ANDRADE, T. C. S. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. 102 p.

ARAÚJO, J. F. **Estudo de propriedades mecânicas do polipropileno moldado por injeção em insertos de resinas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura). Manaus: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010. 88 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6120:** Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, 1980. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7480:** Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação, 2007. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12.654**: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12.655**: Concreto - Preparo, controle e recebimento. 2006, 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.859:** Laje pré-fabricada – Requisitos parte 1: Lajes unidirecionais, 2002. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.859**: Lajes pré-fabricadas de concreto parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrmas – Requisitos, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento, 2004. 53 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14.899:** Blocos de vidro para a construção civil parte 1: Defifinições, requisitos e métodos de ensaio, 2002. 16 p.

- AZEVEDO, M. T. Patologia das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto:** Ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1094-1128.
- BASTOS, P. S. S. Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante: Notas de Aula. São Paulo, 2017. 79 p. < <a href="http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf">http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Cortante.pdf</a> >. Acesso em: 06 jan. 2017.
- CARVALHO, R. C. **Estrutura em concreto protendido:** cálculo e detalhamento. São Paulo: Pini Editora, 2012. 431 p.
- CARVALHO, R. C; FIGUEIREDO FILHO, J. R; FURLAN JUNIOR, S; MESQUITA, V. V. Escolha da altura de lajes com nervuras pré-moldadas para pavimentos de edificações considerando as verificações do estado limite último e de deformação excessiva. **XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural.** São Paulo, 2000. 19 p. Disponível em: < <a href="http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/LajeNerv-S8T177.pdf">http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/LajeNerv-S8T177.pdf</a> >. Acesso em: 02 jan. 2017.
- CREMA, D. B; PELISSER F. **Cálculo do desempenho térmico de lajes prémoldadas com tavelas cerâmicas e blocos de EPS.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2014. 15 p. Disponível em: < <a href="http://repositorio.unesc.net/handle/1/2965">http://repositorio.unesc.net/handle/1/2965</a> >. Acesso em: 01 nov. 2016.
- CUNHA, M. O. Recomendações para projeto de lajes formadas por vigotas com armação treliçada. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012. 119 p.
- DONIAK, I. L. O; GUSTSTEIN, D. Concreto pré-fabricado. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto:** Ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1569-1613.
- ESO. **Estágio supervisionado em obra.** Porto Alegre: Eso, 2010. Disponível em: < <a href="http://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=concreto">http://www.ufrgs.br/eso/content/?tag=concreto</a> >. Acesso em: 18 set. 2016.
- FAULIM. **Manual de cálculo para dimensionamento de lajes treliçadas**. São Paulo, 2016. Disponível em: < <a href="http://www.faulim.com.br/departamentotecnico/manuais.php">http://www.faulim.com.br/departamentotecnico/manuais.php</a> >. Acesso em: 03 maio. 2017.
- FAZZAN, J. V. Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneus. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Ilha solteira: Universidade Estadual Paulista UNESP, 2011. 169 p.
- FERREIRA, R. M. Laje nervurada unidirecional com pré-laje treliçada e elemento de enchimento. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. 65 p.

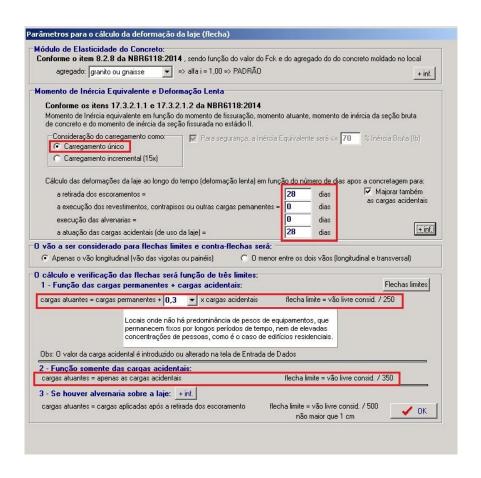
- FERREIRA, T. R. Otimização estrutural de lajes formadas por vigotas treliçadas com e sem proteção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlância UFU, 2016. 105 p.
- FIGUEIREDO FILHO, J. R; SHIRAMIZU, A. K. H. Projeto, produção e execução de edificações com lajes pré-moldadas treliçadas. **Revista Ibracon de estruturas e materiais.** São Paulo, v.4, n.4, p.123-146. out. 2011. Disponível em: < <a href="http://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/283/236">http://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/283/236</a> >. Acesso em: 25 set. 2016.
- FLÓRIO, M.C. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004. 213 p.
- GASPAR, R. Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). São Paulo: Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 1997. 103 p.
- GRAZIANO, F. P. **Projeto e execução de estruturas de concreto armado.** São Paulo: O nome da Rosa Editora, 2005. 160 p.
- HANNA, W. **Transparência e conforto:** Entrevista. [2011]. Local: Revista casa e construção. Entrevista concedida e Renata Ramos. Disponível em: < <a href="http://revistacasaeconstrucao.uol.com.br/escc/edicoes/70/artigo218951-1.asp">http://revistacasaeconstrucao.uol.com.br/escc/edicoes/70/artigo218951-1.asp</a> >. Acesso em: 14 ago. 2016.
- LAJE SOLAR. **Conhecimento Técnico Laje Solar**. São Paulo: 2016a. 11 p. (Disponível para consulta no Anexo B)
- LAJE SOLAR. **Economia e modernidade.** São Paulo: Laje Solar do Brasil, 2016b. Disponível em: < <a href="http://lajesolar.com/new/produto">http://lajesolar.com/new/produto</a> >. Acesso em: 11 ago. 2016.
- LAJE SOLAR. **Instalação.** São Paulo: Laje Solar do Brasil, 2016c. Disponível em: < https://www.youtube.com/channel/UC1ay07R43tUZy-U4djQJfZQ>. Acesso em: 11 ago. 2016.
- LOPES, A. F. O. Estudo comparativo entre lajes nervuradas moldadas no local com fôrmas de polipropileno e lajes pré-fabricadas treliçadas. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Materiais). Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2015. 161 p.
- MARROQUIM, F. M. G; CAVALCANTE, M. R. C; CASADO, C. A. C; CABÚS, R.C. Influência de laje técnica no desempenho luminoso de uma sala comercial em Maceió-AL. In: ENTAC: **XV encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, 15., 2014. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2014. p. 63-72. Disponível em: < <a href="http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/ANAIS\_ENTAC2014.pdf">http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/ANAIS\_ENTAC2014.pdf</a> >. Acesso em: 28 out. 2016.

- NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. 482 p. Tradutor: Ruy Alberto Cremonini.
- PORTO, T. B; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 50 p.
- REIS, D. **Gestão de projetos no âmbito da sustentabilidade na construção.** São Paulo: Novas Edições Acadêmicas Editora, 2015. 200 p.
- SALMORIA, G. V; AHRENS, C. H; VILLAMIZAR, F. A. Y; SABINO NETTO, A. C. Influência do desempenho térmico de moldes fabricados com compósito epóxi/alumínio nas propriedades de PP moldado por injeção. **Revista Polímeros:** Ciência e tecnologia. São Carlos, n.18, set. 2014. p. 262 269. Disponível em: < <a href="http://revistapolimeros.org.br/issues/view/volume/18/issue/3/type/0">http://revistapolimeros.org.br/issues/view/volume/18/issue/3/type/0</a> >. Acesso em: 25 out. 2016.
- SANTINE, C. R. **Projeto e construção de lajes pré-fabricadas de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2005. 165 p.
- SANTOS, A. C; PIANA, R. C. Análise numérica e experimental de vigotas prémoldadas em concreto armado para emprego em lajes nervuradas. **Acta Scientiarum Tecnology.** Cascavel, v.33, n.3, p.253-258. 2010. Disponível em: < <a href="http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/5189/5189">http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/5189/5189</a> >. Acesso em: 24 set. 2016.
- SGB. **Blocos de vidro:** linha basic. Florença: Seves Glass Block, 2016. Disponível em: < <a href="http://www.sevesglassblock.com/pt/mattone.php?SID=75&ID=639">http://www.sevesglassblock.com/pt/mattone.php?SID=75&ID=639</a> >. Acesso em: 03 nov. 2016.
- SILVÉRIO, M. D. P. Análise da utilização de materiais recicláveis em substituição às tavelas cerâmicas em laje pré-moldada. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2009. 115 p.

# **APÊNDICES**

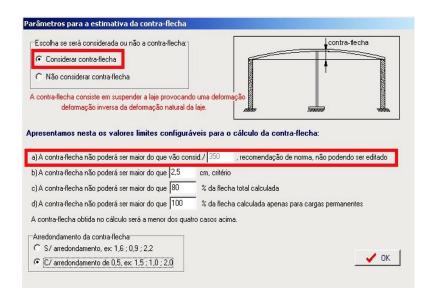
APÊNDICE A – Configurações gerais do software Puma Win 17.4 para dimensionamento das amostras.

Os parâmetros utilizados para o cálculo das flechas e contra-flechas levaram em consideração a aplicação de um carregamento único, onde as cargas solicitantes passaram a atuar nas estruturas sob um curto intervalo tempo entre as mesmas.

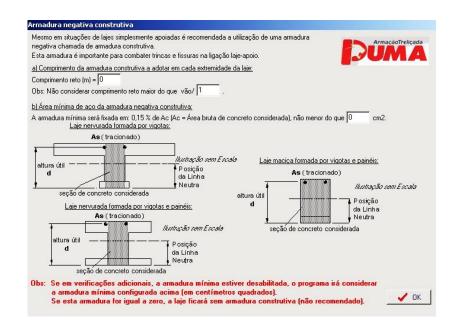


A retirada dos escoramentos e a atuação da cargas acidentais, foram lançadas no *software* como sendo iguais a 28 dias, pois planejou-se que haveria necessidade de movimentação sobre a laje neste periodo, para montagem dos *pallets* e posicionamento dos reservatórios, o que efetivamente ocorreu. Os revestimentos, contrapiso, alvenarias e outras cargas permanentes, tiveram seus tempos de atuações igualados à zero, pois os mesmos não foram considerados no dimensionamento das lajes.

A utilização de contra-flechas é opcional, sendo escolhidas neste estudo para evitar o uso de treliças superiores a TR 8644, ou especiais, o que tornaria o custo final elevado. O valor máximo para contra-flechas é de vão/ 350.



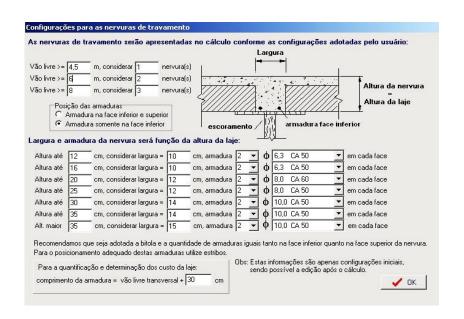
A armadura negativa construtiva não foi considerada no escopo deste trabalho, pois não houveram pontos de concretagem entre as lajes e seus apoios, para que a condição de apoio simples foi atendida. Normalmente, acrescenta-se esta armadura para evitar fissuras próximas aos apoios, o que não ocorreu, mesmo com a opção de não utilizá-la.



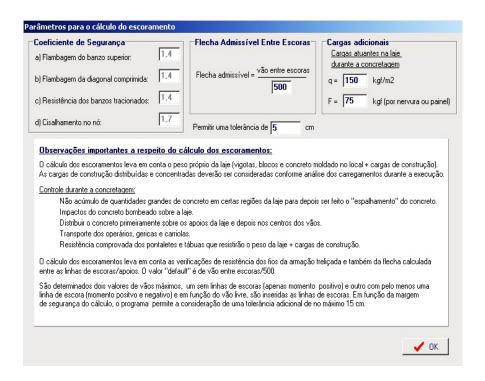
As barras de CA-60 de 5,0 mm compuzeram a armadura de ditribuição, utilizadas sentido transveral às vigotas, e espaçamento máximo de 33 cm.



As nervuras de travamento são posicionadas no sentido transversal às vigotas, para atribuir maior rigidez às lajes. O software indica a necessidade de ao menos uma nervura para um vão livre igual ou superior a 4,0 m. Entretanto, este valor foi alterado para 4,5 m, para que essa nervura não fosse considerada no dimensionamento das lajes. Esta opção foi feita para que a resistência à flexão das lajes não fosse muito altas e as cargas aplicadas pudessem causar flechas claras, e que ultrapassem os estados limites.



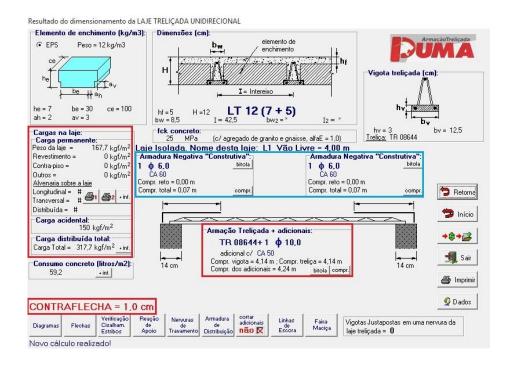
O cálculo para os escoramentos levaram em consideração quatro coeficientes de segurança, sendo três iguais a 1,4 e o cisalhamento no nó igual a 1,7, não podendo ser alterados. Foram acrescídas sobrecargas adicionais atuante sobre as lajes para absorção do peso dos trabalhadores e lançamento do concreto.



O modelo utilizado neste estudo, como supracitado nas seções anteriores, foi o de laje treliçada, com distribuição das tensões ocorrendo apenas em um dos vãos (unidirecional).



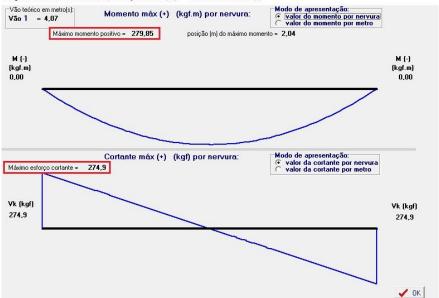
## APÊNDICE B - Resultados do dimensionamento de L1.



#### Reação da laje nos apoios -Rk (valor característico)



Diagramas de Momento Fletor (Mk) e Força Cortante (Vk) -- Valores característicos (k)



Verificação ao cisalhamento e cálculo de estribos adicionais

#### Vão longitudinal às vigotas treliçadas

Vão 1 = 4.07

Vsd = 385 Kgf

Verificação segundo critérios de lajes:

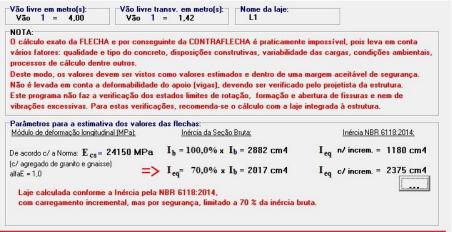
venircação segundo citerios de iajes.

Largura da nervura = 8,50 cm ; Altura da nervura = 12,00 cm ; Altura útil = 10,20 cm

VRd1 = 646 Kgf >= Vsd (OK)

OK - Não há necessidade de armadura para força cortante.

Parâmetros e cálculo das flechas e contraflechas



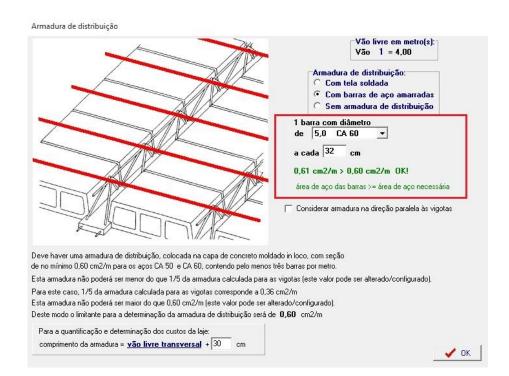
Flechas	Flechas	flecha calculada <	flecha limite ?
Jaiculauas Iciii	<u>iiiiites [Ciii].</u>	s/ contraflecha	c/ contraflecha
3 <b>1,55</b>	vão consid. / 250 = 1,6 não maior do que 5 cr	OK n	ОК
1,09	vão consid. / 350 = 1,1 não maior do que 5 cr	OK	OK
	alculadas (cm 3 1,55	Salculadas [cm];   limites [cm];	salculadas (cm):         limites (cm):         s/ contraflecha           3         1,55         vão consid. / 250         = 1,6         OK           não maior do que 5 cm

CONTRAFLECHA = 1,0 cm OPCIONAL (OK s/ contraflecha)



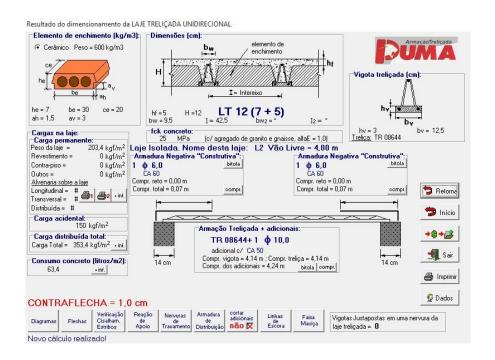
Escoramento da laie



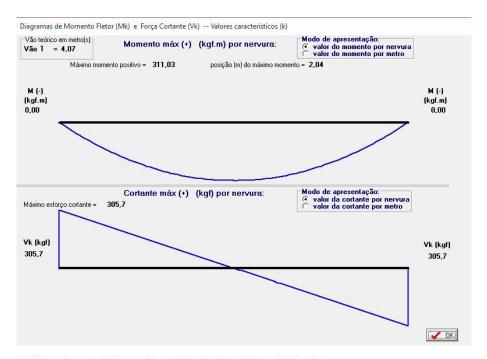


# APÊNDICE C - Resultados do dimensionamento de L2.

Os detalhes destacados por marcações nas figuras do Apêndice B, não foram feitos neste apêndice, para que o aspecto natural de dados gerados pelo *software* seja visto de forma clara e original.







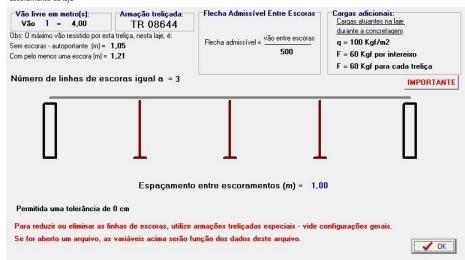
Verificação ao cisalhamento e cálculo de estribos adicionais

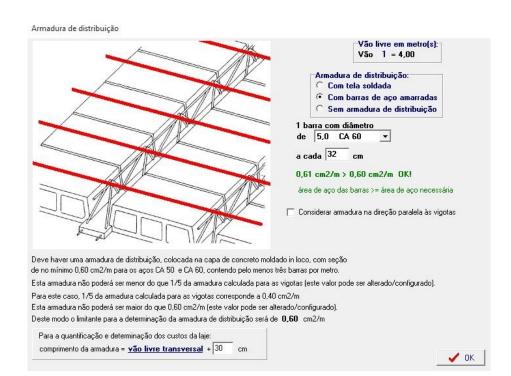


Parâmetros e cálculo das flechas e contraflechas



Escoramento da laje





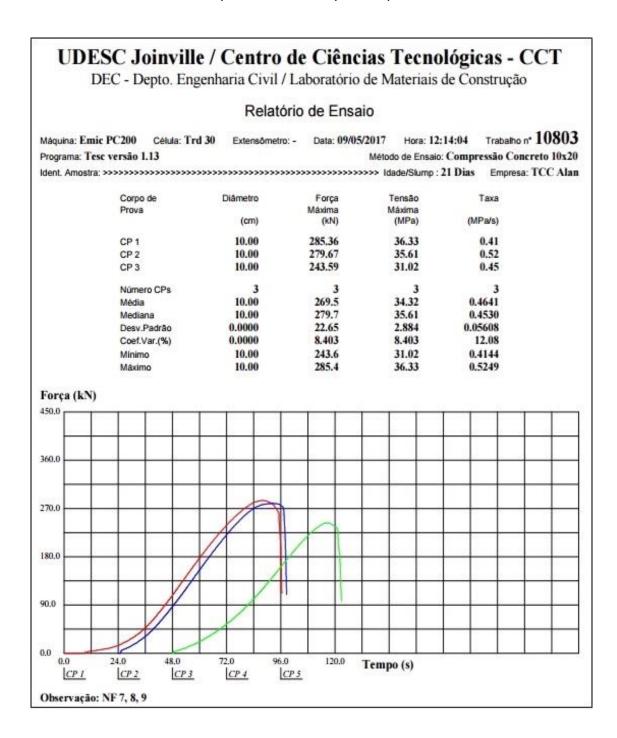
APÊNDICE D – Ensaio à compressão dos corpos de prova aos 7 dias.

#### UDESC Joinville / Centro de Ciências Tecnológicas - CCT DEC - Depto. Engenharia Civil / Laboratório de Materiais de Construção Relatório de Ensaio Máquina: Emic PC200 Célula: Trd 30 Extensômetro: - Data: 25/04/2017 Hora: 12:23:07 Trabalho nº 10761 Programa: Tesc versão 1.13 Método de Ensaio: Compressão Concreto 10x20 Ident. Amostra: >>>>>>>>>>> Idade/Slump: 7 Dias Empresa: TCC Alan Corpo de Diâmetro Tensão Taxa Máxima Prova Máxima (MPa/s) (MPa) (cm) (kN) 10.00 28.47 0.40 223.61 CP 1 CP 2 10.00 192.89 24.56 0.36 CP3 10.00 202.16 25.74 0.45 Número CPs 0.4057 Média 10.00 206.2 26.26 Mediana 10.00 202.2 25.74 0.3992 0.0000 15.75 2.006 0.04467 Desv.Padrão Coef.Var.(%) 0.0000 7.640 7.640 11.01 Minimo 10.00 192.9 24.56 0.3647 Máximo 223.6 28.47 0.4533 Força (kN) 450.0 360.0 270.0 180,0 90.0 Tempo (s) CP 5 CP I CP 2 CP 3 CP 4 Observação: NF 1, 2, 3

APÊNDICE E – Ensaio à compressão dos corpos de prova aos 14 dias.

#### UDESC Joinville / Centro de Ciências Tecnológicas - CCT DEC - Depto. Engenharia Civil / Laboratório de Materiais de Construção Relatório de Ensaio Máquina: Emic PC200 Célula: Trd 30 Extensômetro: - Data: 02/05/2017 Hora: 12:06:12 Trabalho nº 10794 Método de Ensaio: Compressão Concreto 10x20 Programa: Tesc versão 1.13 Corpo de Diâmetro Tensão Taxa Força Máxima Prova Máxima (MPa) (MPa/s) (cm) (kN) 10.00 273.01 34.76 0.50 CP 1 CP 2 10.00 270.57 34.45 0.48 10.00 263.75 33.58 CP3 0.47 Número CPs Média 10.00 269.1 34.26 0.4862 270.6 10.00 34.45 0.4818 Mediana Desv.Padrão 0.00004.801 0.6113 0.01452 0.0000 1.784 1.784 2.986 Coef.Var.(%) 10.00 263.7 33.58 0.4744 Minimo 10.00 34.76 0.5024 Máximo 273.0 Força (kN) 450,0 360.0 270.0 180.0 90.0 0.0 24.0 48.0 96.0 120.0 Tempo (s) CP 3 CP 4 Observação: NF 4, 5, 6

APÊNDICE F – Ensaio à compressão dos corpos de prova aos 21 dias.



APÊNDICE G – Ensaio à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.

#### UDESC Joinville / Centro de Ciências Tecnológicas - CCT DEC - Depto. Engenharia Civil / Laboratório de Materiais de Construção Relatório de Ensaio Trabalho nº 10819 Máquina: Emic PC200 Célula: Trd 30 Extensômetro: - Data: 16/05/2017 Hora: 11:24:47 Método de Ensaio: Compressão Concreto 10x20 Programa: Tesc versão 1.13 Corpo de Diâmetro Força Tensão Taxa Prova Máxima Máxima (MPa/s) (cm) (kN) (MPa) CP 1 10.00 322.57 41.07 10,00 298.20 37.97 0.53 CP 2 CP3 10.00 264.88 33.73 0.52CP4 10.00 327.45 41.69 0.58 Número CPs 10.00 303.3 38.61 0.5374 Média 310.4 39.52 0.5292 Mediana 10.00 Desv.Padrão 0.000028.61 3.643 0.02654 Coef.Var.(%) 0.0000 9.435 9.435 4.939 Mínimo 10.00 264.9 33.73 0.5152 Máximo 10.00 327.4 41.69 0.5759 Força (kN) 450.0 360.0 270.0 180.0 90.0 0.0 Tempo (s) CP I CP 2 CP 3 CP 4 CP 5 Observação: NF 10, 11, 12, 13

# **ANEXOS**

ANEXO A – Propriedades dos blocos de vidro utilizados nas lajes L1-S e L2-S.





# DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

(Regulamento UE n.º 305/2011)

#### CPR -ES- 029/2015

1 - Código de identificação único do produto-tipo

#### TLJOLO SOLDADO DE VIDRO

2 - Número do tipo, do lote ou da série que permita a identificação do produto (nos termos do n.º 4 do artigo

# 11.9

# B-Q 19-8 "AGUA NEUTRO"

3 - Utilização prevista do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada, tal como previsto pelo fabricante

### TIJOLOS DE VIDRO DESTINADOS AO USO EM EDIFÍCIOS E CONSTRUÇÕES

4 - Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante (nos termos do n.º 5 do artigo 11.º)

#### BORMIOLI ROCCO S.A.

#### AVENIDA DEL VIDRIO S/N 19200 -AZUQUECA DE HENARES – GUADALAJARA (ES)

5 - Nome e endereço de contacto do mandatário cujo mandato abrange os atos (nos termos do n.º 2 do artigo

# 12.9

# NÃO APLICÁVEL

6 - Sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto (tal como previsto no anexo

#### V

# SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO/CONFORMIDADE -4-

7 - Declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada
EM CONFORMIDADE COM O REGULAMENTO N.º 305/2011, A BORMIOLI S.A.

DECLARA QUE O PRODUTO ESTÁ EM CONFORMIDADE COM OS PADRÕES ESTABELECIDOS

PELA NORMA HARMONIZADA EN ISO 1051 - 1

O PRODUTO É SEGURO SE UTILIZADO DE ACORDO COM O PONTO 3

A AVALIAÇÃO FINAL DE CONFORMIDADE ESTÁ EM CONFORMIDADE COM A NORMA EN ISO 1051 - 2



# ARMAZÉM 2I

# 8- Desempenhos declarados

CARACTERÍSTICAS	DESEMPENH OS	NORMA DE REFERÊNCIA	
Resistência ao fogo	A1	EN 1350-1	
Resistência a projéteis	NPD	EN 1063	
Resistência a explosão	NPD	EN 13541	
Resistência a arrombamento	NPD	EN 356	
Resistência a variações de temperatura inesperadas e diferenças de temperatura (tensões residuais)	30K	EN 1051-2	
Resistência a vento, neve, carga permanente e imposta (tensão de compressão)	7 Nmm <sup>2</sup>	EN 1051 -1	
Isolamento do ruído aéreo direto	39.dB	EN 10140-2 - EN 717-1	
Propriedades térmicas	2,8 W/m2K	EN 673	
Propriedades radiantes: - transmissão e reflexão da luz - características de energia solar	0,83 0,12 0,77 0,11	EN 410	

# 9 - Desempenhos

# O DESEMPENHO DO PRODUTO REFERIDO NOS PONTOS 1 E 2 ESTÁ EM CONFORMIDADE COM O DESEMPENHO DECLARADO NO PONTO 8

\* \* \*

A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante, tal como especificado no ponto 4.

Leonardo Poli

(Diretor Técnico)

Azuqueca:16,07,2015





# CE

# 14

# BORMIOLI ROCCO S.A.

# AVENIDA DEL VIDRIO S/N 19200 -AZUQUECA DE HENARES - GUADALAJARA (ES)

# B-Q 19-8 "AGUA NEUTRO"

# CPR-ES-029/2015 EN 1051-2

# Tijolos de vidro destinados ao uso em edifícios e construções

CARACTERÍSTICAS		
Resistência ao fogo	AI	
Resistência a projéteis	NPD	
Resistência a explosão	NPD	
Resistência a arrombamento	NPD	
Resistência a variações de temperatura inesperadas e diferenças de temperatura (tensões residuais)	30K	
Resistência a vento, neve, carga permanente e imposta (tensão de compressão)	7 Nmm²	
solamento do ruído aéreo direto 39.dB		
Propriedades térmicas	2,8 W/m2K	
Propriedades radiantes: - transmissão e reflexão da luz - características de energia solar	0,83 0,12 0,77 0,11	

Leonardo Poli (Diretor Técnico) ANEXO B - Conhecimento Técnico Laje Solar.





Suporte para bloco de vidro em laje

# INTRODUÇÃO

O Suporte para bloco de vidro (Lajota Solar) foi desenvolvido com o objetivo de permitir que ambientes que utilizem laje possam ter claridade natural em seu interior, sem perdes a área útil no nível superior da laje, conciliando assim as vantagens e praticidade do sistema de laje a necessidade de iluminação natural e economia de energia elétrica.

Para maior versatilidade e liberdade de trabalho nossos produtos são modulares e se adequando ao tipo de laje necessário a cada ocasião e especificação de cada projeto.

No Brasil, um dos sistemas mais utilizados em e edificações de pequeno e médio porte é a laje pré-fabricada . Esse modelo de laje é construído com vigas pré-fabricadas, separadas regularmente entre si, sendo o espaço ocioso entre elas preenchido com material leve e de função não estrutural, sobre este conjunto é adicionado uma camada de concreto.

As vantagens que fazem das lajes pré-fabricadas uma opção economicamente viável, são entre outras o facilidade de manuseio e montagem (podem ter seus elementos transportados com o uso de força humana e máquinas primitivas, como cordas e roldanas etc.), é também facilmente encontrada em todos o território nacional e apresentam desempenho compatível com as necessidades previstas e com boa margem de segurança.

Para elementos de enchimento ( lajotas ), admite-se resistência característica para suportar a carga mínima de ruptura de 0,7 kN", conforme NBR 14859-1 Tendo em vista que "O material de enchimento não é considerado um material estrutural no contexto da laje. A princípio qualquer produto inerte pode ser utilizado para essa função", desde que garantida as condições mínimas normativas de resistência .

Nesse quesito nos adotamos para uso na construção de nosso produto o Polipropileno um material nobre e de extrema resistência para garantir ao nosso produto a mais elevada resistência e segurança. Trata-se de um suporte em liga plástica capaz de abrigar um bloco de vidro (com as mais diversas especificações), permitindo a passagem de luz natural através da laje, resultando em economia de energia elétrica, iluminação natural do ambientes, ganho de metragem útil na obra e maior qualidade de vida.

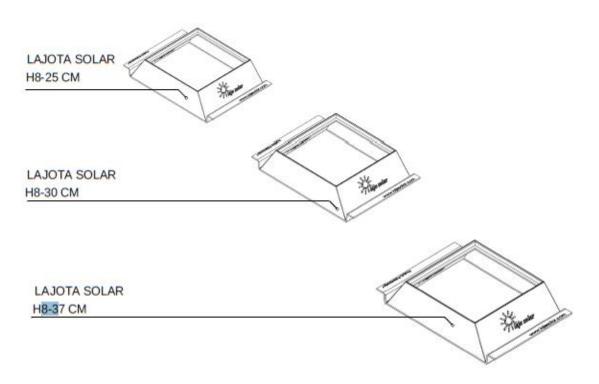
Adequando-se sempre a o cenário atual, e a tendência do mercado para com medidas simples entregar a melhor tecnologias sustentáveis disponível com uso integrado de materiais e métodos amigos do meio ambiente. Nunca se esquecendo das necessidades do setor da construção civil para o continuo desenvolvimento. e utilização racional de recursos naturais.

O presente documento visa elucidas, as características técnicas do produto bem como suas medidas e material de forma clara e objetiva.



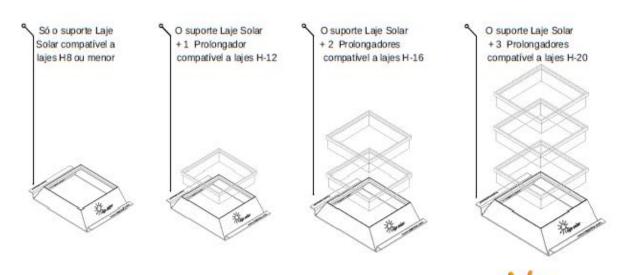
aje Solar

# **Modelos e Medidas**

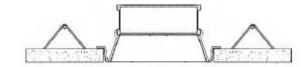




O Prolongador é um Complemento que atende a todas as alturas de enchimento, podendo ser sobreposto pelos encaixes sucessivamente atendendo a todas as altura de laje



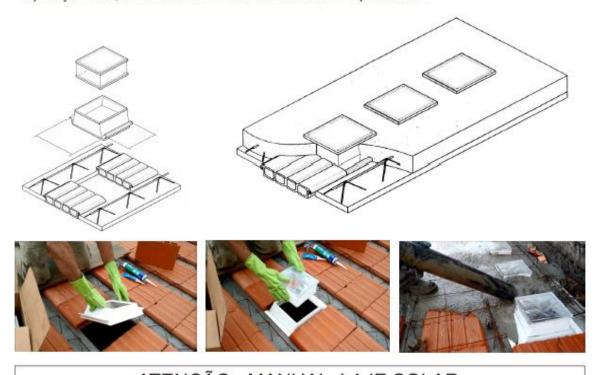
# Montagem



A montagem dos elementos pré-fabricados deve obedecer ao disposto no projeto de execução da laje e no manual de colocação e montagem da laje quanto ao arranjo físico e às especificações das vigotas pré-fabricadas e dos elementos de enchimento.

# Devem ser executados:

- a) o nivelamento dos apoios, dentro das tolerâncias de montagem especificadas;
- b) a colocação das armaduras previstas no projeto;
- c) a instalação de passadiços, quando necessários, para o trânsito de pessoal e transporte de concreto;
- d) lançamento, adensamento e cura do concreto complementar.

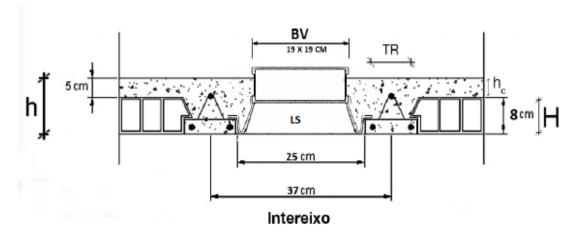


# Manual para Laje Solar sem Revestimento I - Montar a Laje 2 - Colocar a Lajota Solar 3 - Fixar com silicone o Bloco de Vidro 4 - Concretar a Laje 5 - Impermeabilizar a Laje 6 - Aplicar o Contra Piso Manual para Laje Solar com Revestimento 1 - Montar a Laje 2 - Colocar Lajota Solar 3 - Colocar o Bloco de Isopor 4 - Concretar a Laje 5 - Impermeabilizar a Laje 6 - Aplicar o Contra Piso Manual para Laje Solar com Revestimento 1 - Montar a Laje 2 - Colocar Lajota Solar 3 - Colocar o Bloco de Isopor 4 - Concretar a Laje 5 - Impermeabilizar a Laje 6 - Aplicar o Contra Piso Manual para Laje Solar com Revestimento 1 - Montar a Laje 2 - Colocar Lajota Solar 3 - Colocar o Bloco de Isopor 4 - Concretar a Laje 5 - Impermeabilização nos lugares onde foi retirado os Blocos de Isopor 9 - Assentar o Revestimento Cerámico 10 - Instalar o Bloco de vidro (Ullizando Argamassa de Uso Externo Branca) Aplicando sempre Argamassa no Bloco de Vidro e também no Orificio da Laje .



# **Vistas em Corte**

Desenho técnico Exemplo: H8-25CM LT 12



TR = armação treliçada

H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)

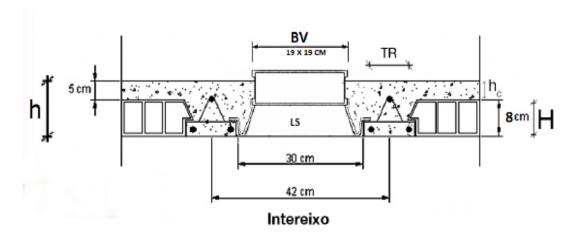
h, = altura da capa de concreto

h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto

BV = bloco de vidro

LS = lajota solar

Desenho técnico Exemplo: H8-30 CM LT 12



TR = armação treliçada

H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)

h, = altura da capa de concreto

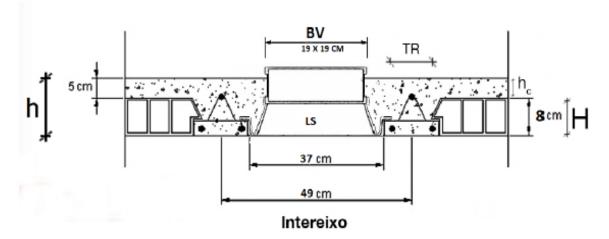
h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto

BV = bloco de vidro

LS = lajota solar



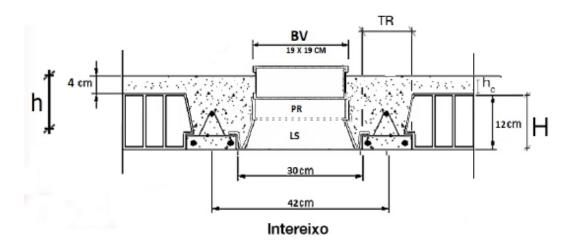
# Desenho técnico Exemplo: H8-37CM LT 12



TR = armação treliçada
H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)
h<sub>c</sub> = altura da capa de concreto
h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto



Desenho técnico Exemplo: H12-30 CM LT 16



TR = armação treliçada

H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)

h = altura da capa de concreto

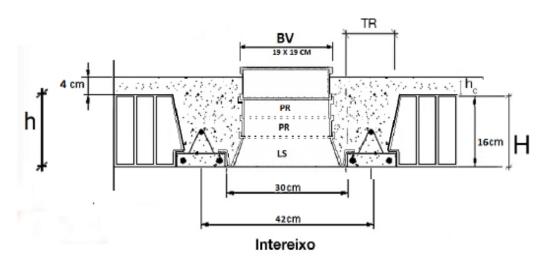
h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto

BV = bloco de vidro

LS = lajota solar

PR = prolongador

Desenho técnico Exemplo: H16-30 CM LT 20



TR = armação treliçada

H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)

h = altura da capa de concreto

h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto

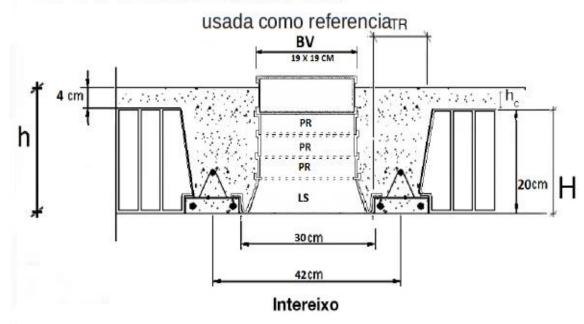
BV = bloco de vidro

LS = lajota solar

PR = prolongador



# Desenho técnico Exemplo: H20-30 CM LT24



TR = armação treliçada

H = altura do enchimento (bloco cerâmico, eps ou LAJOTA SOLAR)

h, = altura da capa de concreto

h ou LT = altura total da laje, contando com a capa de concreto

BV = bloco de vidro

LS = lajota solar

PR = prolongador

#### Dimensões padronizadas dos elementos de enchimento

#### Dimensões em centimetros

Altura (h <sub>e</sub> ) nominal	7,0 (mínima); 8,0; 9,5; 11,5; 15,5; 19,5; 23,5; 28,5	
Largura (b <sub>e</sub> ) nominal	25,0 (mínima); 30,0; 32,0; 37,0; 39,0; 40,0; 47,0; 50,0	
Comprimento (c) nominal	20,0 (mínimo); 25,0	

Abas de	(a <sub>v</sub> )	3,0
encaixe	(a <sub>h</sub> )	1,5

Elementos de enchimento constituidos por material de ruptura frágil, tais como concreto, cerâmica e concreto celular ausunavado (CCA), devem ter sua carga de ruptura à flexão determinada pelo ensaio disposto no anexo B. da NBR 14859-1

Elementos de enchimento constituídos por material de ruptura dúctil, tais como EPS e outros, devem ter sua carga de ruptura à flexão determinada pelo ensaio disposto na NBR 14859-1

Outras dimensões dos elementos de enchimento, desde que superiores à mínima padronizada, podem ser utilizadas, mediante acordo prévio e expresso entre fornecedor e comprador, desde que atendidas todas as demais disposições desta parte da NBR 14859.

O lote de elementos de enchimento fornecido deve estar acompanhado por específicação emitida pelo fabricante, onde estarão identificadas suas dimensões nesta ordem: altura, largura e comprimento.



Tolerâncias dimensionais para os elementos de enchimento

		Nominal	Real	Tolerância
				mm
		H7	7,0	-0+2
		H8	8,0	± (2,0)
	Altura cm	H10	9,5	± (3,0)
		H12	11,5	± (3,0)
		H16	15,5	± (3,0)
		H20	19,5	± (4,0)
		H24	23,5	± (4,0)
		H29	28,5	± (4,0)
		25	25	+(3,0)
		30	30	± (3,0)
Ruptura frágil	Largura cm	32	32	± (3,0)
		37	37	± (4,0)
		39	39	± (4,0)
		40	40	± (4,0)
		47	47	± (5,0)
		50	50	± (5,0)
	Comprimento cm	20	20	± (3,0)
		25	25	± (3,0)
	Altura do apoio cm	3,0	3,0	± (1,0)
	Largura do apoio cm	1,5	1,5	± (1,0)
Ruptura dúctil	Todas as dimensões		± (1,0)	

# Dimensões em centímetros

Altura do elemento de enchimento (he)	Altura total da laje (h)	
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	



# Normas Técnicas

REFERENCIAS: NBR 14859-1

Tipos de elementos pré-fabricados não estruturais.

# Definições

Para os efeitos desta parte da NBR 14859, aplicam-se as seguintes definições:

Elementos de enchimento Componentes pré-fabricados com materiais inertes diversos, sendo maciços ou vazados, intercalados entre as vigotas em geral, com a função de reduzir o volume de concreto, o peso próprio da laje e servir como fôrma para o concreto complementar.

São desconsiderados como colaborantes nos cálculos de resistência e rigidez da laje.

Esta parte da NBR 14859 fixa os requisitos para o recebimento e utilização de componentes de lajes pré-fabricadas (vigotas, elementos de enchimento e demais complementos adicionados na obra) a serem empregados na execução de estruturas laminares nervuradas unidirecionais, para qualquer tipo de edificação, de acordo com a norma NBR 9062.





# Recomendação

O projeto da laje elaborado por profissionais habilitados é composto por três partes distintas, a saber:

- a) projeto estrutural da laje;
- b) projeto de execução da laje;
- c) manual de colocação e montagem do fabricante

# Inspeção geral

Em todas as obras, os componentes da laje pré-fabricada devem ser submetidos à inspeção geral pelo comprador ou seu representante, para verificação de suas características, observando-se o disposto nesta parte da NBR 14859, além de se verificar a compatibilidade geométrica entre as vigotas e os elementos de enchimento para utilização conjunta e a compatibilidade das características dos componentes entregues com os especificados no projeto da laje

FONTE: NBR 14859-1 - maio 2002

