



## **CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Mateus Hein Fürst

### **ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES EM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL E CONCRETO CONVENCIONAL**

Santa Cruz do Sul

2025

Guilherme Mateus Hein Fürst

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE  
LAJES EM CONCRETO LEVE ESTRUTURAL E CONCRETO  
CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso  
de Engenharia Civil da Universidade de  
Santa Cruz do Sul para a obtenção do título  
de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2025

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Sra. Marli Amalia Hein e o Sr. Juliano Luis Fürst que desde cedo me ensinaram os valores para uma educação de qualidade. Agradeço a eles por terem acreditado em mim e terem dedicado tempo integral para minha formação pessoal.

Gostaria de agradecer em especial minha namorada, Thaís Schuster, que esteve comigo durante toda a jornada acadêmica, me incentivando a me tornar uma pessoa melhor e um profissional mais qualificado, também me oferecendo todo suporte para que eu pudesse passar pelos momentos mais desafiadores, seja através de uma boa conversa ou de um ótimo exemplo.

Agradeço ao meu orientador, Me. Henrique Luiz Rupp, que topou o desafio de me orientar. Sua parceria e sabedoria foram importantes para que eu me desenvolvesse ao longo do trabalho. Agradeço também aos amigos Arthur Gorgen, Diogo Schwantes e José Py que me auxiliaram durante a parte prática e experimental, ajudando com sua experiência e apoio.

Por fim, agradeço aos colegas, professores, familiares e amigos que estiveram compartilhando momentos e experiências incríveis. O apoio e os momentos de descontração serviram para aliviar os momentos de estresse e ansiedade.

## RESUMO

Com o crescimento da construção civil e o desenvolvimento de novas tecnologias, materiais alternativos vêm sendo estudados com objetivos de reduzir custos e melhorar a eficiência das estruturas. Frente a isso, emerge como opção o concreto estrutural leve, que substitui os agregados graúdos por argila expandida oferecendo características de leveza e resistência a agentes externos. Por se tratar de tecnologia relativamente nova, os estudos sobre esses materiais têm uma natureza inovadora e com potencial de otimização. Visando contribuir com a evolução dessa tecnologia, que tem como objetivo a redução da carga das estruturas e consequentemente o custo de fabricação, a presente dissertação apresenta um estudo comparativo entre estruturas de concreto armado convencional e estruturas de concreto leve estrutural armadas com aço. Para a realização deste estudo teórico-experimental foram fabricados quatro protótipos de lajes, sendo uma em concreto armado com aço e três em concreto leve estrutural armado com aço. Os resultados experimentais indicaram que as lajes de concreto leve estrutural apresentaram modo de ruptura por flexão semelhante às de concreto convencional, porém com uma carga de ruptura ligeiramente inferior. Destaca-se a redução de massa específica no concreto leve, que atingiu  $17,5 \text{ kN/m}^3$ , contra  $24,0 \text{ kN/m}^3$  do traço convencional. A análise comparativa entre os valores teóricos e experimentais confirmou a previsibilidade do comportamento do material. O estudo conclui que há viabilidade do uso do concreto leve, ressaltando a importância do controle rigoroso da dosagem, especialmente quanto à absorção da argila expandida, para garantir as resistências de projeto.

**Palavras-chave:** Desempenho; Estruturas; Inovação; Concreto leve estrutural; Lajes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha do Tempo.....	14
Figura 2 - Concreto.....	15
Figura 3 - Barras de Aço CA-50.....	18
Figura 4 - Concreto leve: a) com agregado leve; b) celular; e c) sem finos.....	21
Figura 5- Relação entre resistência à compressão e granulometria da argila expandida	23
Figura 6 - Ilustração da forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais - basalto (à direita).....	24
Figura 7 - Relação entre resistência à compressão e valor de massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira .....	24
Figura 8 - Diagrama tensão-deformação de concretos com argila expandida brasileira	26
Figura 9 - Diagrama tensão-deformação, com deformação controlada, de concretos com argila expandida.....	27
Figura 10 - Representação esquemática da relação entre porosidade e permeabilidade	28
Figura 11 - Laje pré-moldada com lajota cerâmica.....	32
Figura 12 - Laje pré-moldada com EPS .....	33
Figura 13 - Laje alveolar .....	34
Figura 14 - Laje nervurada .....	35
Figura 15 - Laje maciça .....	36
Figura 16 - Ensaio de Stuttgart .....	40
Figura 17 -Dimensões da laje .....	42
Figura 18 - Croqui fôrmas .....	43
Figura 19 - Armadura da laje.....	44
Figura 20 - Montagem das fôrmas.....	46
Figura 21 - Montagem da armadura .....	47
Figura 22 - Fôrma montada e preparada.....	48
Figura 23 - Concretagem finalizada .....	49
Figura 24 - Laje de concreto.....	50
Figura 25 - Barras de aço a serem tracionadas .....	51
Figura 26 - Corpo de prova durante ensaio .....	52
Figura 27 - Corpo de prova rompido .....	53
Figura 28 - Laje testemunho .....	54
Figura 29 - Laje concreto leve estrutural 1 .....	55

Figura 30 - Laje de concreto leve estrutural 1 durante o ensaio.....	55
Figura 31 - Laje de concreto leve estrutural 1 rompida.....	56
Figura 32 - Laje LCLE rompida.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela B.1 Características das barras CA-50.....	19
Tabela 2 - Tabela B.3 Requisitos mecânicas de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.....	20
Tabela 3 - Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente para concreto leve estrutural. ....	21
Tabela 4 - Valores do coeficiente $\gamma_n$ adicional para lajes em balanço .....	38
Tabela 5 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas .....	38
Tabela 6 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes .....	39
Tabela 7 - Volume de concreto.....	41
Tabela 8 - Quantitativo concreto convencional .....	42
Tabela 9 - Quantitativo concreto leve estrutural .....	43
Tabela 10 -Quantitativo de armadura .....	45
Tabela 11 - Resultados de tração em barras de aço .....	52
Tabela 12 - Resultados ensaio de compressão .....	53
Tabela 13 - Cargas e momentos de ruptura .....	56
Tabela 14 Resultado ensaio de flexão .....	58

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Análise de resultados .....	59
Gráfico 2 Tensão x Deformação.....	60

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**ABCIC** – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto;

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

**ACI** – American Concrete Institute;

**ASTM** – American Society for Testing and Materials;

**CA** – Concreto Armado (Referente às categorias de aço, ex: CA-50);

**CC** – Concreto Convencional;

**CLE** – Concreto Leve Estrutural;

**CP** – Corpo de Prova;

**ELU** – Estado-Límite Último;

**EPS** – Poliestireno Expandido;

**FE** – Fator de Eficiência;

**LCLE** – Laje de Concreto Leve Estrutural;

**NBR** – Norma Brasileira;

**NM** – Norma Mercosul;

**UNISC** – Universidade de Santa Cruz do Sul;

**Cm** – Centímetro;

**Kg** – Quilograma;

**kN** – Quilonewton;

**m** – Metro;

**mm** – Milímetro;

**MPa**- Megapascal.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_c$  – Área da seção transversal de concreto;
- $A_s$  – Área de armadura de tração;
- $A_{s,min}$  – Armadura mínima;
- $b_w$  – Largura da alma da viga ou largura da laje;
- $d$  – Altura útil da seção;
- $E$  – Módulo de elasticidade (ou deformação);
- $f_c$  – Resistência à compressão do concreto;
- $f_{ck}$  – Resistência característica do concreto à compressão;
- $f_{cm}$  – Resistência média do concreto à compressão;
- $f_{yk}$  – Resistência característica de escoamento do aço;
- $h$  – Altura total da peça ou espessura da laje;
- $K_c$  – Coeficiente para dimensionamento à flexão;
- $K_s$  – Coeficiente para cálculo de armadura;
- $l_{ef}$  – Vão efetivo;
- $M_d$  – Momento fletor de cálculo;
- $M_{est,rup}$  – Momento estimado de ruptura;
- $P$  – Carga aplicada;
- $x$  – Posição da linha neutra;
- $\alpha$  – Coeficiente relacionado ao diagrama retangular de tensões (Tabela 13)
- $\beta_x$  – Relação da linha neutra ( $x/d$ );
- $\gamma$  – Massa específica;
- $\gamma_c$  – Coeficiente de ponderação da resistência do concreto
- $\gamma_n$  – Coeficiente adicional para lajes em balanço;
- $\gamma_s$  – Coeficiente de ponderação da resistência do aço;
- $\lambda$  – Coeficiente de redistribuição ou fator de bloco de tensões;
- $\rho_{min}$  – Taxa mínima de armadura.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Área e limitação do tema.....	12
1.2 Justificativa .....	12
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo Geral .....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 Concreto Armado .....	13
2.2 Concreto .....	14
2.3 Agregados.....	16
2.4 Aço .....	18
2.5 Concreto leve estrutural.....	20
2.5.1 Resistência mecânica e massa específica .....	22
2.5.1.1 Resistência a compressão e massa específica .....	22
2.5.1.2 Resistência a tração .....	25
2.5.1.3 Curva tensão-deformação e módulo de deformação .....	25
2.5.1.4 Durabilidade do concreto leve .....	27
2.5.2 Produção e Dosagem .....	28
2.6 Tipos de elementos estruturais .....	29
2.6.1 Pilar.....	30
2.6.2 Viga .....	30
2.6.3 Lajes.....	31
2.6.3.1 Laje pré-moldada com lajota cerâmica .....	31
2.6.3.2 Lajes pré-moldadas com EPS.....	32
2.6.3.3 Laje alveolar.....	33
2.6.3.4 Lajes nervuradas .....	34
2.6.3.5 Laje maciça .....	35
2.7 Dimensionamento de lajes .....	36
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 Quantitativo de material.....	41
3.1.1 Concreto / Concreto leve estrutural.....	41

<b>3.1.2 Fórmula.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1.3 Armadura longitudinal e distribuição .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 Dimensionamento .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3 Execução das lajes .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.1 Montagem de formas.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2 Montagem das armaduras .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.3 Concretagem .....</b>	<b>47</b>
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. Ensaio de tração nas barras.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Ensaio de compressão concreto .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. Ensaio de flexão nas lajes.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4. Cálculo de carga e momento estimados de ruptura .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5. Resultado do ensaio de flexão nas lajes .....</b>	<b>58</b>
<b>4.6. Análise de resultados.....</b>	<b>58</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

Do surgimento até meados da década de 1980, o concreto convencional como conhecemos, uma mistura de agregados miúdos, graúdos, cimento e água, permaneceu sem maiores inovações que modificassem seu desempenho referente as suas principais características tais como resistência mecânica à tração e compressão, módulo de elasticidade e massa específica, propriedades estas que estão ligadas diretamente com o concreto e sua durabilidade. (Pereira, 2008; Borja, 2011; Angelin *et al.*, 2013a).

Entretanto com o avanço tecnológico o concreto passou por grandes evoluções que segundo pesquisadores, como Díaz *et al.* (2010), Rossignolo (2009), Ibrahim *et al.* (2013) e Bektas *et al.* (2012), foram proporcionadas devido à utilização de novos equipamentos e desenvolvimento de novas técnicas, assim como a utilização de materiais alternativos ao tradicionais como a argila expandida. Dentre os materiais novos, destacam-se os aditivos redutores de água e a areia fina que proporcionam melhorias nas propriedades vinculadas a durabilidade dos concretos (Neville *et al.*, 2013).

Com o desenvolvimento destas novas técnicas e materiais, resultou em um estudo da utilização do concreto leve estrutural, caracterizado pelo excelente desempenho no que tange a massa específica e mantendo a resistência mecânica.

A utilização do concreto leve estrutural mostra-se vantajosa devido à sua reduzida massa específica, que acarreta uma diminuição significativa no peso próprio das estruturas de concreto e, por consequência, uma maior otimização econômica nas estruturas de fundações. Pesquisadores como Her-Young (2009), Borja (2011) e Ma *et al.* (2013) salientam ainda que a utilização de concreto leves estruturais traduz-se em maior produtividade. Tal fato deve-se ao seu peso inferior comparado aos concretos convencionais, gerando otimização quanto a logística de transporte de componentes pré-fabricados durante a fase de execução, indicando uma potencial redução no custo final da obra.

Com o objetivo de contribuir para a evolução das estruturas de concreto leve estrutural armado, esta pesquisa apresenta uma análise comparativa entre lajes de concreto convencional armada com aço e lajes compostas por concreto leve estrutural e armadas com aço.

## **1.1 Área e limitação do tema**

Este trabalho será desenvolvido na área de estruturas de concreto armado, ressaltando o comportamento lajes em concreto leve estrutural armadas com aço, submetidas ao ensaio de flexão. Com a obtenção dos resultados será feita uma análise comparativa entre a tecnologia estudada e o concreto convencional.

## **1.2 Justificativa**

A análise do comportamento estrutural de lajes em concreto leve estrutural armado com aço é de suma importância para o setor de construção civil. Suas vantagens, como a baixa densidade e conforto térmico, justificam a utilização recorrente em estruturas civis, mais especificamente em lajes e elementos pré-fabricados. A fim de explorar todo o potencial desse material, é essencial um conhecimento mais amplo de como esses elementos reagem sob diferentes aplicações de cargas. Fatores determinantes, incluindo a dosagem do concreto, sua microestrutura e a interação entre os materiais, definem a resistência e o desempenho final da peça. Sendo assim, o estudo aprofundado de tais parâmetros permite a elaboração de projetos mais leves e eficientes, otimizando o consumo de recursos e contribuindo com o avanço das tecnologias construtivas.

Além do mais, a combinação de ensaios práticos aliados a uma base teórica sólida é essencial para validar e aperfeiçoar os modelos preditivos, garantindo que os cálculos de dimensionamento correspondam ao desempenho observado em laboratório e campo. Essa metodologia é particularmente importante para compreender os mecanismos de colapso dessas estruturas sob cargas críticas, incluindo o surgimento de fissuras, o esmagamento do material e a falha de aderência entre concreto e sua armadura. Este estudo pode contribuir também para o aprimoramento e a revisão de recomendações técnicas e normas quanto a utilização do concreto leve estrutural armado com aço.

## **1.3 Objetivos**

Os objetivos do respectivo estudo estão classificados em geral e específicos e são apresentados nos itens seguintes.

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho visa o dimensionar e executar lajes em concreto armado e concreto leve estrutural armado, seguindo preceitos da NBR6118:2023. Na sequência, estes componentes serão submetidos a ensaios laboratoriais a fim de confrontar os resultados obtidos com os modelos de cálculo teórico.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho traz como objetivos específicos:

- Dimensionar e executar protótipos de lajes, utilizando concreto convencional e concreto leve estrutural, ambas armadas com aço convencional;
- Submeter os elementos supracitados ao ensaio de Stuttgart;
- Identificar e apresentar uma análise comparativa entre os materiais empregados;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Concreto Armado

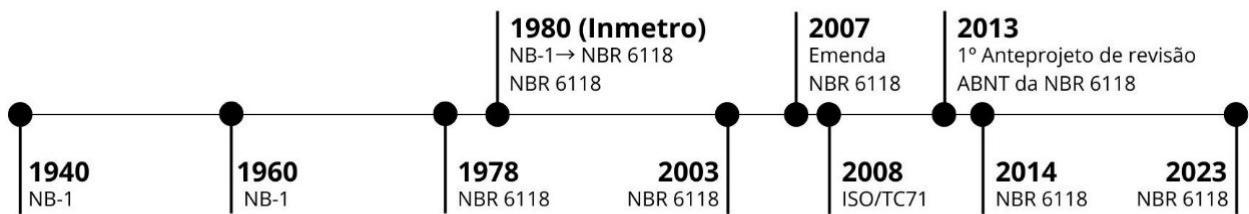
O concreto armado destaca-se como o material construtivo de maior utilização em escala global, uma preferência justificada por sua combinação vantajosa de desempenho, economia e facilidade de execução. A composição do material, que une o concreto a barras de aço internas, é essencial para seu comportamento estrutural. Essa união serve para suprir a deficiência natural do concreto em resistir a esforços de tração, onde o aço atua para melhorando o desempenho dos elementos estruturais. (FERNANDES e PORTO 2015).

Segundo Vasconcelos (1985), o histórico sobre a introdução do concreto armado no Brasil é incerto, mas o primeiro registro conhecido data de 1904, na cidade do Rio de Janeiro. O autor relata, com base em publicações da época, que o uso pioneiro do material — então chamado de "cimento armado" — ocorreu em construções residenciais no bairro de Copacabana. A responsabilidade pela obra foi do engenheiro Carlos Poma, cuja empresa já havia patenteado uma variante do sistema Monier para a utilização do material em 1892.

De acordo com Fernandes e Porto (2015), acredita-se que os primeiros cálculos em estruturas de concreto armado no Brasil, seria o projeto de uma ponte sobre o rio Maracanã no Rio de Janeiro-RJ, desenvolvido por Carlos Euler e seu auxiliar Mario de Andrade Martins Costa em meados de 1908. Os mesmos autores ainda citam que:

Para projeto e dimensionamento das estruturas em concreto armado, foi desenvolvida, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em 1940, a NB-1: cálculo e execução de obras de concreto armado. Essa norma previa o dimensionamento em serviço baseado nas tensões admissíveis e no estado-limite último. Devido à constante evolução dos materiais e das técnicas referentes ao concreto armado, foi preciso revisar a norma com uma certa periodicidade (FERNANDES E PORTO, 2015).

**Figura 1 - Linha do Tempo**



Fonte: Autor

A ampla adoção do concreto armado na construção, conforme aponta Pereira (2015), deve-se a um conjunto de fatores: sua superior performance sob compressão, a baixa exigência de manutenção futura e uma menor dependência de mão de obra especializada, o que o diferencia de alternativas como as estruturas metálicas e alvenaria estrutural. No entanto, sua aplicação impõe desafios significativos. A fabricação *"in loco"* exige um rigoroso controle dos processos de mistura e cura para garantir que a resistência projetada seja alcançada. Além disso, a gestão do canteiro é impactada pelo volume de resíduos gerados e pela necessidade de acomodar o tempo de cura do material no cronograma da obra, embora aditivos possam ser usados para acelerar essa etapa.

## 2.2 Concreto

Conforme apontam Mehta e Monteiro (2008), o concreto destaca-se como o material compósito de maior aplicação na construção civil. Embora sua resistência seja inferior à do aço, o material oferece benefícios significativos, como a alta durabilidade em contato com a água, a grande versatilidade para ser moldado em diversas formas e dimensões, e um custo relativamente baixo.

A definição de concreto, segundo Araujo (2010), vai além da simples mistura de cimento, água e agregados. Visando propriedades particulares, a composição pode ser enriquecida com aditivos químicos (como retardadores de pega) e adições minerais (como

escórias e pozolanas). Esses materiais extras são utilizados para conferir ao concreto características aprimoradas, moldando seu comportamento conforme a necessidade da aplicação.

Segundo Neville (1997), a resistência do concreto é comumente vista como sua propriedade mais crucial, embora o autor ressalte que, em certas aplicações outras características como durabilidade e permeabilidade podem ser mais relevantes. Ele explica que a resistência funciona como um bom indicador da qualidade geral do material, por estar diretamente ligada à microestrutura da pasta de cimento. Além disso, a resistência é um elemento fundamental no projeto estrutural e é sempre especificada para fins de controle. O autor ainda reforça que a relação água/cimento (A/C) é um parâmetro essencial para o controle de qualidade do concreto. Essa relação deve ser rigorosamente monitorada, pois, se for muito alta, pode comprometer a resistência mecânica do material; por outro lado, uma relação A/C muito baixa pode prejudicar a trabalhabilidade e a uniformidade da mistura.

Embora o concreto simples, conforme Figura 2, seja reconhecido por sua elevada resistência à compressão, grande versatilidade de moldagem, boa proteção contra incêndios e baixo custo de execução e manutenção, o material também possui limitações significativas. (ALMEIDA, 2002).

**Figura 2 - Concreto**



Fonte: Disponível em:< <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/concreto-com-pega-programada>>

Dentre as limitações do concreto, pode-se citar seu elevado peso próprio e sua fragilidade quando submetido à tração, o que o torna suscetível à fissuração. Outro desafio

está no seu processo de execução, que depende da utilização de fôrmas e de um sistema de escoramento para a moldagem dos elementos estruturais. Segundo Pinheiro (2004):

A baixa resistência à tração pode ser contornada com o uso de adequada armadura, em geral constituída de barras de aço, obtendo-se o concreto armado. Além de resistência à tração, o aço garante ductilidade e aumenta a resistência à compressão, em relação ao concreto simples. (PINHEIRO, 2004)

Mehta e Monteiro (2008), ressaltam que para otimizar o desempenho do concreto, diversos aditivos químicos e adições são empregados. A sílica ativa, por exemplo, é um componente que contribui significativamente para o aumento da resistência à compressão. Outros materiais estudados com frequência incluem os aceleradores de pega e os incorporadores de ar, cada qual com uma função específica na melhoria das propriedades do compósito.

### **2.3 Agregados**

Agregados para a construção civil consistem em materiais granulares de forma e volume irregulares, como brita, cascalho e areias, tanto de origem natural quanto de moagem de rochas. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (2009), esses materiais também podem incluir resíduos reciclados e produtos industriais, entre outros. Conforme a NBR7211:2022, a classificação de agregados é feita com base no tamanho de seus grãos. O agregado miúdo é caracterizado por ter grãos que passam por uma peneira de 4,75 mm, enquanto o agregado graúdo é a fração que atravessa a peneira de 75 mm, mas não a de 4,75 mm.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os agregados podem compor cerca de 60% a 80% do volume da mistura, o que influencia no comportamento do concreto quanto a retração, à resistência, densidade e tamanho. Segundo os autores a forma dos grãos podem definir as características desejadas para um concreto. Os mesmos ainda citam que agregados graúdos independentemente de sua origem podem ser incorporados a mistura, com objetivo de reduzir custos sem prejudicar as principais características desejadas em uma estrutura de concreto.

A areia, tecnicamente denominada agregado miúdo, é um componente granular essencial na matriz do concreto, cuja função primordial é o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados graúdos. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a distribuição granulométrica, a morfologia e a textura superficial de suas partículas exercem influência direta nas propriedades do concreto em seu estado fresco. Partículas de origem

natural, como as areias de rio, tendem a apresentar formas mais arredondadas e uma textura mais lisa, o que favorece a mobilidade da mistura e reduz a demanda de água, impactando positivamente a trabalhabilidade. Em contrapartida, agregados miúdos obtidos por processos de britagem apresentam grãos de maior angularidade e superfície mais rugosa, características que, embora possam contribuir para um maior travamento interno e, consequentemente, para a resistência mecânica, exigem um controle mais rigoroso do fator água/cimento para garantir a fluidez necessária (NEVILLE, 2016).

No que tange à sua aplicação, a presença da areia é indispensável para assegurar a coesão e a homogeneidade da mistura cimentícia, atuando diretamente na prevenção de fenômenos patológicos como a segregação e a exsudação do concreto. Conforme salienta Bauer (2019), uma curva granulométrica contínua e bem graduada do agregado miúdo é fundamental para se obter uma matriz densa e com poucos vazios, resultando em um concreto de baixa permeabilidade e, por conseguinte, maior durabilidade. Além de conferir plasticidade à argamassa que envolve a brita, a areia contribui significativamente para a resistência à compressão do concreto endurecido e para a qualidade do acabamento superficial das peças concretadas, sendo um material imprescindível na composição de concretos estruturais, argamassas de assentamento e revestimento, e outros compósitos cimentícios.

Já a brita é definida como agregado graúdo, sendo o principal responsável pela resistência a esforços mecânicos. Segundo Neville (2016), as propriedades do agregado graúdo, tais como a resistência da rocha de origem, sua composição mineralógica e, especialmente, sua forma e textura superficial, são determinantes para o desempenho do concreto endurecido. Diferentemente dos seixos rolados de origem fluvial, a brita é obtida por meio da cominuição de rochas, o que resulta em partículas de elevada angularidade e superfície rugosa. Essa morfologia, conforme apontam Mehta e Monteiro (2008), promove um melhor travamento mecânico (*interlock*) com a pasta de cimento, aprimorando a aderência na zona de transição e contribuindo significativamente para o aumento da resistência à compressão e ao cisalhamento do concreto.

A aplicação da brita na dosagem do concreto vai além da simples função de material de enchimento. Sua correta especificação granulométrica, conforme as diretrizes da NBR7211:2022, é crucial para se alcançar um empacotamento otimizado das partículas, o que minimiza o índice de vazios e, consequentemente, reduz o consumo de pasta de cimento para um determinado volume, trazendo benefícios econômicos e técnicos, como a diminuição da

retração por secagem (BAUER, 2019). Adicionalmente, o módulo de elasticidade do agregado graúdo influencia diretamente o módulo de elasticidade do concreto, sendo um fator preponderante no controle de deformações da estrutura. Desta forma, a seleção criteriosa da brita é uma etapa fundamental no projeto de dosagem, impactando não apenas a resistência mecânica, mas também a durabilidade, a massa específica e o comportamento reológico do concreto (ISAIA, 2011).

## 2.4 Aço

Segundo Fernandes e Porto (2015), o aço empregado na execução do concreto armado segue parâmetros normatizados pela ABNT. Os autores reforçam que:

Para elaboração de projetos estruturais em concreto armado, são utilizados aços classificados como CA-25 e CA-50, para barras, ou CA-60 para fios, em que: CA= Concreto Armado + número que se segue = valor característico da resistência de escoamento do aço em  $\text{kN}/\text{cm}^2$  ou  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ . (FERNANDES E PORTO, 2015)

A NBR7480:2024, define barras de aço como produtos com diâmetro nominal de 5,0 mm ou superior, que a sua fabricação é feita exclusivamente por laminação a quente, sem processos posteriores de deformação mecânica. Já os fios são produtos com diâmetro nominal de 10,0 mm ou inferior, obtidos a partir do fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

**Figura 3 - Barras de Aço CA-50**



Fonte: Disponível em:< <https://gsn.gerdau.com/pt-br/produtos/vergalhao-gerdau>>

De acordo com Araújo (2010), as barras de aço podem ser classificadas como lisas ou nervuradas. As barras lisas possuem uma aderência reduzida ao concreto e seu uso é limitado à categoria CA-25. Já as barras da categoria CA-50 devem, obrigatoriamente, ser nervuradas, e a configuração geométrica dessas nervuras é padronizada pela NBR7480:2024. Para a

categoria de fios CA-60, as superfícies podem ser lisas, entalhadas ou nervuradas, todas com o objetivo de otimizar a aderência ao concreto.

Além das características mencionadas anteriormente, a norma NBR 7480:2024 detalha outras propriedades importantes das barras de aço CA-50 em suas tabelas conforme Tabela 1 e Tabela 2. Esse padrão estabelece os critérios para as especificações técnicas do material, englobando aspectos como resistência, ductilidade e desempenho sob diferentes condições de uso. As tabelas a seguir oferecem uma visão abrangente das qualidades do aço CA-50, destacando sua adequação para diversas aplicações na construção civil.

**Tabela 1 - Tabela B.1 Características das barras CA-50**

Diâmetro nominal mm		Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Série <sup>a</sup>	Barras	Massa nominal <sup>b</sup> kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm <sup>2</sup>	Perímetro mm
Fina	6,3	0,245	± 6%	31,2	19,8
	8,0	0,395	± 6%	50,3	25,1
Média	10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4
	12,5	0,963	± 6%	122,7	39,3
Grossa	16,0	1,578	± 5%	201,1	50,3
	20,0	2,466	± 5%	314,2	62,8
Extra grossa	22,0	2,984	± 4%	380,1	69,1
	25,0	3,853	± 4%	490,9	78,5
	32,0	6,313	± 4%	804,2	100,5
	40,0	9,865	± 4%	1256,6	125,7

<sup>a</sup> Faixa de diâmetros de barras de aço destinados a armaduras para concreto armado.  
<sup>b</sup> A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7 850 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Tabela B.1 da ABNT NBR 7480:2024

**Tabela 2 - Tabela B.3 Requisitos mecânicas de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado**

Categoria do aço	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento <sup>g</sup>		Ensaio de aderência	
	Resistência característica de escoamento <sup>a</sup> $f_{yk}$ MPa <sup>e</sup>	Limite de resistência <sup>b</sup> $f_{st}$ MPa <sup>e</sup>	Alongamento após ruptura em 10 $\phi$ <sup>c</sup> A %	Alongamento total na força máxima <sup>d</sup> $A_{gt}$ %	Diâmetro do pino ou cutelo mm	Coeficiente de conformação superficial mínimo $\eta$		
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\phi < 10$ mm	$\phi \geq 10$ mm
CA-25	250	1,20 $f_y$	18	—	2 $\phi$	4 $\phi$	1,0	1,0
CA-50	500	1,10 $f_y$	8	5	3 $\phi$	6 $\phi$	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 $f_y$ <sup>f</sup>	5	—	5 $\phi$	—	1,0	1,5
CA-70	700	1,10 $f_y$	8	5	3 $\phi$	6 $\phi$	1,0	1,5

<sup>a</sup> Valor característico do limite superior de escoamento  $f_{yk}$  obtido a partir do LE ou  $\delta_e$  da ABNT NBR ISO 6892-1.  
<sup>b</sup> O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (LR ou  $\delta_t$  da ABNT NBR ISO 6892-1).  
<sup>c</sup>  $\phi$  é o diâmetro nominal, conforme 3.5.  
<sup>d</sup> O alongamento deve ser verificado por meio do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima ( $A_{gt}$ ).  
<sup>e</sup> Para efeitos práticos de aplicação desta Norma, pode-se admitir 1 MPa = 0,1 kgf/mm<sup>2</sup>.  
<sup>f</sup>  $f_{st}$  mínimo de 660 MPa.  
<sup>g</sup> O ensaio de dobramento deve ser feito a 180° conforme a ABNT NBR 17005.

Fonte: Tabela B.3 da ABNT NBR 7480:2024

## 2.5 Concreto leve estrutural

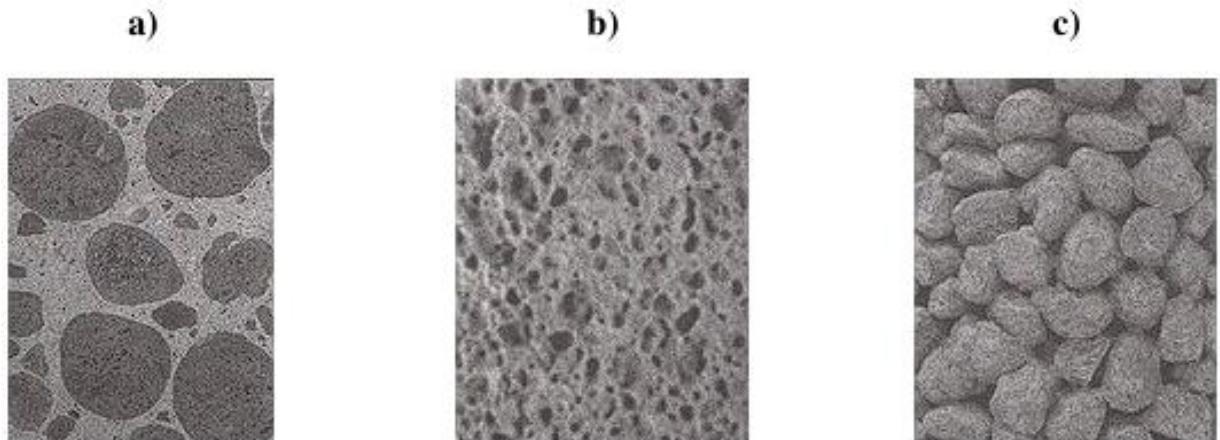
De acordo com Petrucci (1995), o avanço contínuo da tecnologia em todos os setores, e de forma particular na construção civil, impulsionou o desenvolvimento de novos materiais que pudessem atender às novas demandas das obras. Uma das principais desvantagens do concreto tradicional em comparação com materiais concorrentes é seu elevado peso próprio, o que levou ao surgimento dos concretos leves.

Segundo Rossignolo (2009), a diminuição da massa específica do concreto, a redução das cargas estruturais, a economia com fôrmas e a redução de custos logísticos e de montagem são os benefícios centrais do concreto leve estrutural. Por essas razões, sua aplicação é comum em vários setores da construção civil, como em obras pré-fabricadas.

Com base na classificação de Maycá et al. (2008), os concretos leves podem ser categorizados de três formas distintas. A primeira é o concreto com agregado leve, que consiste na substituição total ou parcial dos agregados convencionais por materiais mais leves e é o único tipo que consegue atingir resistências adequadas para fins estruturais. A segunda categoria é o concreto celular ou aerado, formado pela adição de agentes que criam bolhas de ar na pasta de cimento; embora seja uma técnica comum, ela é questionada por autores como Rossignolo (2009), Borja (2011) e Ibrahim et al. (2013), sob o argumento de que o material se

forma na pasta e não no concreto em si. Por fim, existe o concreto sem finos, produzido apenas com aglomerante e agregado graúdo, cuja resistência depende diretamente da qualidade do agregado e do consumo de cimento, sendo ideal para aplicações como painéis divisórios, sistemas de drenagem e sub-bases de quadras esportivas. Na Figura 4, pode-se observar a estrutura de cada classificação através de uma imagem microscópica.

**Figura 4 - Concreto leve: a) com agregado leve; b) celular; e c) sem finos.**



Fonte: Rossignolo (2009).

A principal característica que distingue o concreto leve do convencional é a sua massa específica reduzida, que se situa abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>. No que tange à resistência, existem diferentes especificações normativas. De acordo com o comitê ACI 213R-03 (2003), o concreto leve estrutural deve alcançar uma resistência à compressão superior a 17 MPa aos 28 dias. Por outro lado, a norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 é mais rigorosa, estabelecendo que a resistência mínima para qualquer concreto ser considerado estrutural é de 20 MPa.

A NM 35:1995, apresenta valores mínimos de resistência a compressão em relação a massa específica aparente, conforme Tabela 3.

**Tabela 3 - Valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente para concreto leve estrutural.**

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) – Valores mínimos	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> ) – Valores mínimos
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: Autor, adaptado NM 35:1995.

A normativa ainda determina limites para a massa unitária dos agregados leves empregados em concretos estruturais. Quando medidos no estado seco e solto, os agregados miúdos não devem ultrapassar 1120 kg/m<sup>3</sup>, enquanto para os agregados graúdos o valor máximo é de 880 kg/m<sup>3</sup>.

Outro benefício fundamental do uso de agregados leves é a redução da massa específica do concreto, o que gera vantagens econômicas notáveis. Segundo o relatório ACI 213R (2003), estudos nos Estados Unidos mostraram que, em estruturas pré-moldadas, a economia final pode ser mais de sete vezes superior ao custo extra do material. Essa diferença de custos deriva da otimização logística e da maior facilidade no transporte e na produção de um concreto mais leve.

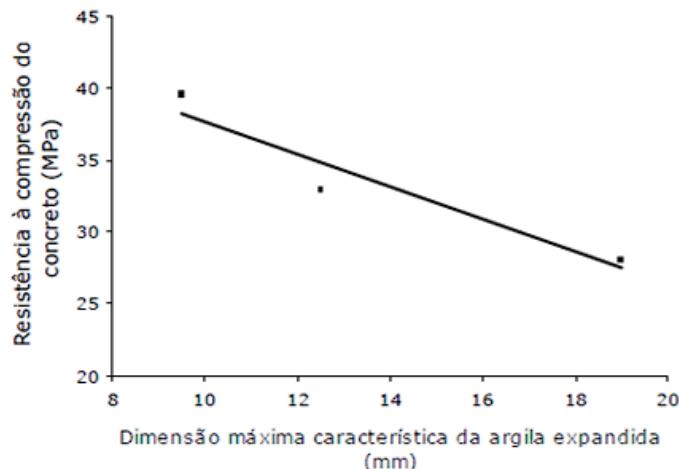
## **2.5.1 Resistência mecânica e massa específica**

O desempenho final do concreto é um reflexo direto tanto da qualidade de seus materiais constituintes quanto da aderência entre eles. Visto que os agregados representam cerca de 50% da mistura, a utilização de agregados leves no lugar dos convencionais resulta em modificações substanciais nas propriedades do compósito (ROSSIGNOLO, 2009).

### **2.5.1.1 Resistência a compressão e massa específica**

Rossignolo (2003) aponta a resistência à compressão como a propriedade fundamental na análise de concretos leves para fins estruturais, destacando sua dependência do tipo e da granulometria do agregado (Figura 5). A influência da granulometria é particularmente acentuada nesses materiais em comparação com os concretos tradicionais, fato explicado pela relação inversa entre a massa específica e o tamanho das partículas em agregados leves, como a argila expandida.

**Figura 5- Relação entre resistência à compressão e granulometria da argila expandida**



Fonte: Evangelista *et. al* (1996)

Embora resistências à compressão de 20 a 34 MPa (aos 28 dias) sejam usuais, patamares superiores, na faixa de 40 a 48 MPa, podem ser alcançados sob condições controladas, como as encontradas em usinas de pré-moldados e protendidos. A obtenção dessas resistências mais altas depende do uso de um elevado teor de cimento combinado com agregados de alta qualidade e granulometria limitada (máximo de 9 a 13 mm) (METHA; MONTEIRO,2008).

De acordo com Rossignolo (2009), os critérios mais comuns para avaliar um concreto leve estrutural são sua resistência à compressão, sua massa específica e o Fator de Eficiência (que associa as duas, FE), sendo que todos esses parâmetros dependem diretamente da natureza e da granulometria do agregado leve utilizado.

$$FE = \frac{Re}{\gamma}$$

Onde:

FE = Fator de eficiência (MPa.dm<sup>3</sup>/kg)

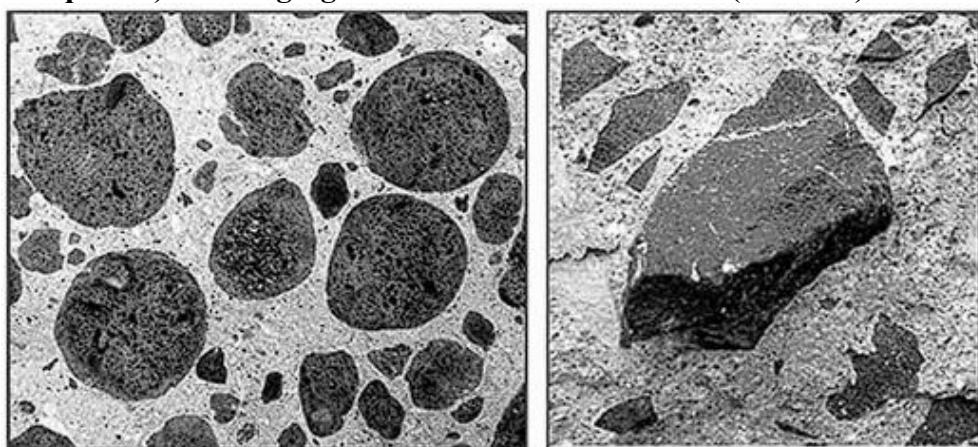
Re = Resistência à compressão (MPa)

$\gamma$  = massa específica (kg/cm<sup>3</sup>)

Rossignolo (2009) também afirma que, o modo como o concreto se rompe depende muito do tipo de agregado utilizado. No caso de agregados basálticos, que possuem um módulo de deformação muito mais alto que o da argamassa, a fratura tende a ocorrer na zona de transição, contornando o agregado e separando as fases. Em contrapartida, nos concretos com agregados leves, a compatibilidade entre os módulos de deformação do agregado e da

argamassa é maior. Isso permite um melhor aproveitamento da resistência da argamassa, fazendo com que a ruptura se inicie no próprio agregado, de forma semelhante ao que ocorre em concretos convencionais de alta resistência, conforme Figura 6.

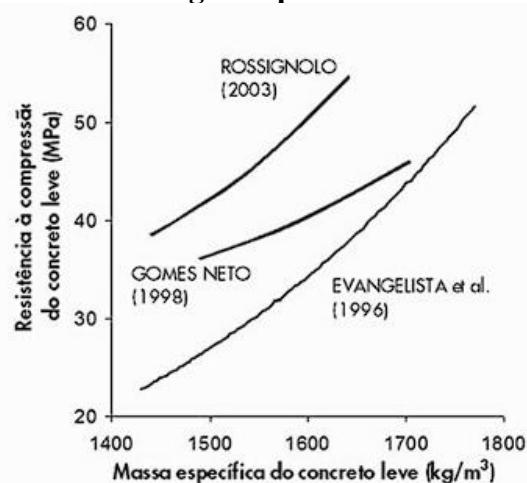
**Figura 6 - Ilustração da forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais - basalto (à direita)**



Fonte: Rossignolo (2009).

Segundo Angelin (2014), no cenário brasileiro, a argila expandida demonstra ser uma opção economicamente viável, principalmente quando se busca produzir concretos com resistência à compressão de até 50 MPa, resultando em uma massa específica que geralmente varia entre 1400 e 1800 kg/m<sup>3</sup>, conforme Figura 7.

**Figura 7 - Relação entre resistência à compressão e valor de massa específica do concreto leve com argila expandida brasileira**



Fonte: Rossignolo (2009).

A autora ainda traz que, apesar desses limites de viabilidade comercial, pesquisas no Brasil já atingiram patamares de resistência muito mais elevados. Um marco notável na década de 1990 foi o trabalho de Gomes Neto (1998), que registrou um concreto de 73 MPa de resistência à compressão. Esse resultado foi obtido com um concreto de argila expandida que apresentava 1720 kg/m<sup>3</sup> de massa específica, um consumo de cimento de 1200 kg/m<sup>3</sup> e agregados com dimensão máxima de 6,3 mm.

Metha e Monteiro (2008) explicam que a resistência à compressão de concretos leves é uma função direta do teor de cimento e que, portanto, essa propriedade pode ser otimizada por meio da substituição do agregado miúdo leve por areia natural de boa qualidade.

### **2.5.1.2 Resistência a tração**

De acordo com Rossignolo e Oliveira (2007), a resistência à tração em concretos leves tende a ser inferior à dos concretos convencionais, o que é atribuído aos vazios internos dos agregados leves. No caso da argila expandida, essa porosidade pode chegar a 50% do volume. Em linha com essa observação, Angelin et al. (2013a) também constataram que para concretos com argila expandida nacional, os valores de resistência à tração por compressão diametral variam na faixa de 6% a 9% da resistência à compressão.

### **2.5.1.3 Curva tensão-deformação e módulo de deformação**

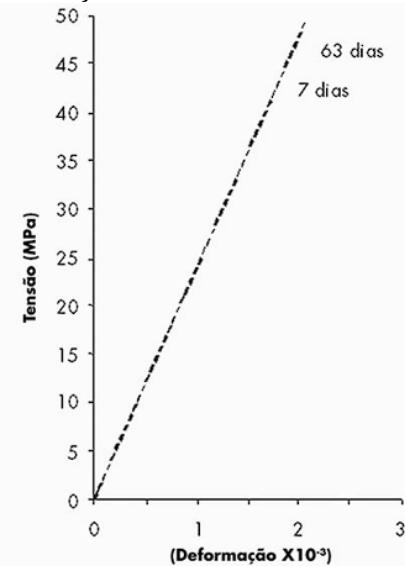
Angelin (2014), ressalta que propriedade tem ligação direta com o volume de agregado leve utilizado para fabricação. A autora ainda diz que, para um desempenho superior do concreto em seu regime elástico, é desejável que haja uma maior compatibilidade entre os módulos de deformação da matriz cimentícia e do agregado.

Já Rossignolo (2009), traz a ideia de que devido ao fato de os agregados leves possuírem um módulo de deformação relativamente baixo, o concreto leve resultante também apresenta um módulo de deformação inferior ao dos concretos convencionais. O autor ainda cita que:

Normalmente, o valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação do concreto com massa específica normal, para valores de resistência à compressão variando entre 20 MPa e 50 MPa. Segundo Rossignolo (2005), essa relação também se aplica aos concretos com argila expandida brasileira. (ROSSIGNOLO, 2009)

A pesquisa de Rossignolo (2005) revela uma diferença notável no comportamento tensão-deformação entre concretos leves e convencionais. Enquanto os concretos com agregados convencionais apresentam um comportamento elástico-linear até cerca de 60% de sua carga máxima, aqueles produzidos com argila expandida nacional mantêm essa linearidade até um patamar significativamente maior, de aproximadamente 80% da carga de ruptura, conforme Figura 8.

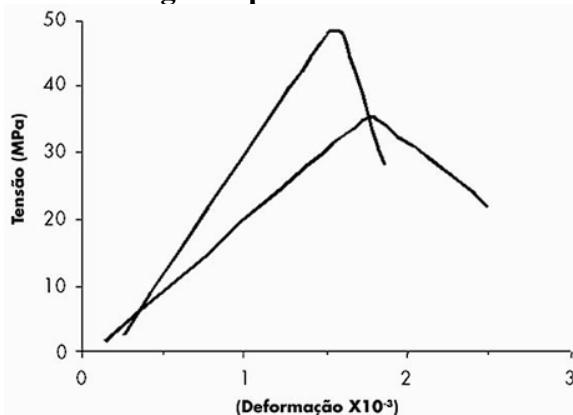
**Figura 8 - Diagrama tensão-deformação de concretos com argila expandida brasileira**



Fonte: Rossignolo (2005).

Estudos de Rossignolo (2003) e Borja (2011), baseados em curvas tensão-deformação com deformação controlada, revelam duas tendências nos concretos leves com argila expandida. Primeiramente, o trecho ascendente da curva torna-se mais linear à medida que a resistência do concreto aumenta. Em contrapartida, o ramo descendente, observado após a ruptura, apresenta uma queda mais acentuada e íngreme (Figura 9).

**Figura 9 - Diagrama tensão-deformação, com deformação controlada, de concretos com argila expandida**



Fonte: Rossignolo (2003).

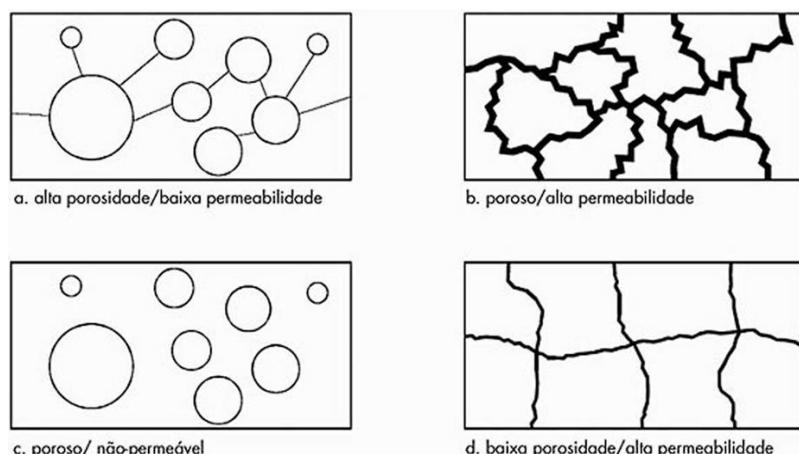
#### 2.5.1.4 Durabilidade do concreto leve

Existe uma percepção comum, mas equivocada, de que a utilização de agregados porosos aumenta a permeabilidade do concreto, reduzindo sua resistência a agentes agressivos. No entanto, múltiplas pesquisas internacionais refutam essa ideia (Holm; Bremner, 1994; EuroLightCon, 1998; Chandra; Berntsson, 2002). De forma semelhante, estudos focados na argila expandida brasileira também indicam que o emprego desse agregado não implica, necessariamente, em uma perda de durabilidade para o concreto (ROSSIGNOLO,2009).

De acordo Rossignolo (2009), a durabilidade do concreto leve está diretamente ligada à microestrutura porosa de seu agregado. Portanto, para uma correta avaliação, é fundamental determinar a natureza dessa porosidade: se os poros são interconectados (formando um sistema aberto e permeável) ou se são isolados (constituindo um sistema fechado), o que permite analisar sua real porosidade e permeabilidade.

Angelin (2014), ressalta que a utilização de agregados porosos não implica, necessariamente, em um concreto mais permeável ou menos durável. Isso ocorre porque a permeabilidade, que permite o transporte de agentes agressivos, depende da conectividade entre os poros, e não apenas da porosidade total. Um material pode ter muitos poros, mas se eles forem isolados, ele se comportará de maneira estanque, esta diferença pode ser observada na Figura 10.

**Figura 10 - Representação esquemática da relação entre porosidade e permeabilidade**



Fonte: EuroLightCon (1998)

Contrariando a expectativa, pesquisas comparativas indicam que concretos produzidos com agregados leves podem ser tão ou mais impermeáveis aos fluidos quanto os concretos convencionais. De acordo com Chandra e Berntsson (2002), este desempenho pode ser explicado por uma combinação de fatores, incluindo o uso de uma menor relação água/aglomerante, a redução da microfissuração interna e melhoria na qualidade da zona entre transição pasta-agregado (ANGELIN, 2014).

A pesquisa de Rossignolo (2005) demonstra que a distribuição de tensões internas mais homogênea nos concretos com argila expandida atenua a formação de microfissuras. Esse fenômeno resulta em um comportamento tensão-deformação que permanece linear até, no mínimo, 80% da carga última. Consequentemente, a permeabilidade do concreto leve, associada a essa microfissuração, só começa a se elevar a partir desse patamar de 80%, um desempenho superior ao dos concretos convencionais, nos quais esse processo se inicia em 60%.

### 2.5.2 Produção e Dosagem

Embora os métodos de dosagem para concretos convencionais possam ser adaptados para concretos com agregados leves, sua aplicação exige a consideração de fatores adicionais, como a meta de atingir uma massa específica particular e as propriedades intrínsecas do agregado, incluindo sua absorção de água, a variação de massa com a dimensão e sua influência geral no desempenho do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Rossignolo (2009), uma estratégia para otimizar a dosagem de concretos leves consiste em combinar o uso de agregado graúdo leve com um agregado miúdo convencional, como a areia. Ao realizar um ajuste granulométrico cuidadoso entre os dois, é possível obter melhorias significativas, como maior coesão, menor segregação e um aumento na resistência à compressão, quando comparado a concretos que utilizam apenas agregados leves. O contraponto dessa técnica, no entanto, é um aumento inevitável na massa específica final do concreto.

Rossignolo (2009) ainda afirma que de forma análoga aos concretos convencionais, aditivos e adições minerais podem ser empregados para aprimorar ou modificar as propriedades dos concretos leves estruturais. Contudo, o uso de aditivos líquidos, como os redutores de água, requer uma atenção especial à capacidade de absorção dos agregados, principalmente se eles não estiverem pré-saturados. Nesses casos, parte do aditivo pode ser absorvida pelo agregado, diminuindo sua eficácia na pasta. Uma técnica para mitigar esse problema é adicionar o aditivo na fase final da mistura, pouco antes de o concreto ser lançado.

Outro fator fundamental para a dosagem de qualquer variação do concreto convencional, é a relação água e cimento, conforme traz Rossignolo (2009):

Um ponto importante do processo de dosagem dos concretos leves é a definição da relação água/cimento efetiva, em função da absorção de água dos agregados. No caso dos concretos com agregados convencionais, a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento é definida no momento da mistura dos materiais. Com isso, a água presente nos agregados deve ser descontada da água a ser adicionada no momento da mistura. (ROSSIGNOLO, 2009)

De acordo com EuroLightCon (1998) e Tezuka (1973), a absorção de água de agregados leves pode ser estimada ao submergir os agregados em água. Para concretos específicos — com relação a/c de aproximadamente 0,4 e slump entre 100 e 200 mm — a taxa de absorção medida após uma hora pode ser utilizada como um parâmetro para definir a quantidade de água a ser adicionada na mistura. Por conveniência, esse procedimento de uma hora de imersão acabou sendo adotado na prática também para concretos leves que não se enquadram nessas características.

## 2.6 Tipos de elementos estruturais

Os elementos estruturais básicos de um edifício compõem um sistema integrado, começando pelas lajes, que, conforme define Botelho (2003), são as superfícies que primeiro recebem os carregamentos e os transferem às vigas. Pinheiro (2021) define as vigas como os

elementos lineares que vencem vãos e transmitem as cargas das lajes aos pilares, resistindo principalmente à flexão. Os pilares, definidos por Vasconcelos (1978) como elementos verticais que trabalham sob compressão, têm a função de conduzir todo o peso recebido para as fundações, que são a base de todo o sistema.

### **2.6.1 Pilar**

Os pilares são elementos estruturais lineares, predominantemente verticais, cuja função primordial é receber as cargas transmitidas pelas vigas e lajes e conduzi-las de forma segura aos elementos de fundação. Conforme a abordagem de autores clássicos como Vasconcelos (1978), o esforço que atua nesses elementos é, na maioria das vezes, a força normal de compressão, fazendo com que trabalhem como os "suportes" da edificação. Botelho (2003) reforça essa ideia ao descrevê-los como os componentes responsáveis por dar continuidade ao caminho das cargas, levando todo o peso dos andares superiores em sua jornada final até o solo.

Além da definição funcional, a norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 estabelece um critério geométrico preciso para a classificação de um elemento como pilar. Segundo a norma, pilares são elementos lineares em que as forças de compressão são preponderantes e cuja altura (ou comprimento) é superior a três vezes a maior dimensão da sua seção transversal. Essa condição matemática é o que formalmente distingue um pilar de elementos mais robustos, como os blocos, garantindo que o seu dimensionamento considere adequadamente os efeitos de segunda ordem e a análise da estabilidade, como a flambagem.

### **2.6.2 Viga**

De acordo com Pinheiro (2021), as vigas são elementos estruturais lineares, geralmente dispostos na horizontal, que desempenham a função de receber as cargas das lajes e das paredes, vencendo os vãos entre os apoios para transferi-las aos pilares. Conforme o autor, seu dimensionamento é realizado para resistir predominantemente aos esforços de flexão e à força cortante (cisalhamento). Fusco (2007), em sua obra sobre a arte de armar as estruturas, detalha como a disposição das armaduras de aço dentro da viga é projetada especificamente para combater esses esforços, garantindo que o elemento tenha um comportamento seguro e dúctil.

Do ponto de vista normativo, a NBR 6118:2023 define viga como um elemento linear em que a flexão é a ação preponderante. A norma estabelece também um critério geométrico para essa classificação: o comprimento do elemento (vâo) deve ser, no mínimo, três vezes superior à maior dimensão da sua seção transversal. Essa distinção é fundamental, pois garante que o elemento seja analisado e dimensionado segundo a teoria clássica de vigas, diferenciando-o de elementos curtos ou de grande altura, como as vigas-parede, que possuem um comportamento estrutural distinto e exigem um modelo de cálculo específico.

### 2.6.3 Lajes

Botelho (2003) diz que, as lajes são elementos estruturais de superfície, geralmente planos e horizontais, que constituem os pisos e coberturas de uma edificação, sendo responsáveis por receber diretamente as cargas de uso, como pessoas, móveis e seu próprio peso. Conforme o autor, a laje é o primeiro elemento a receber os carregamentos, transferindo-os para as vigas que a sustentam. Já Araújo (2014), em seus estudos, explica que o comportamento estrutural predominante nas lajes é a flexão em duas direções, o que as caracteriza como elementos que trabalham em um estado plano de tensões.

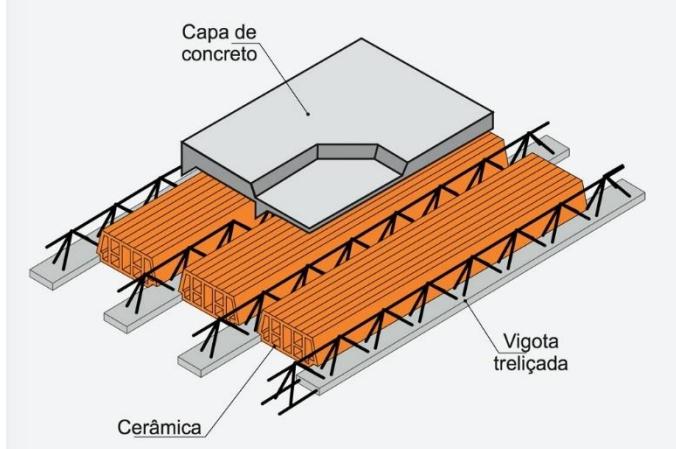
A NBR6118:2023 define tecnicamente as lajes como elementos de superfície, ou placas, cuja menor dimensão em planta é, no mínimo, três vezes superior à sua espessura. Este critério geométrico é fundamental para garantir que o elemento se comporte como uma placa bidimensional, onde os esforços de flexão são preponderantes sobre os de cisalhamento. A norma distingue ainda vários tipos de lajes, como as maciças, nervuradas e lisas, cada uma com um modelo de cálculo e detalhamento específico para assegurar seu desempenho e segurança.

#### 2.6.3.1 Laje pré-moldada com lajota cerâmica

Segundo Botelho (2003), a laje pré-moldada com lajota cerâmica (Figura 11), comumente conhecida como laje treliçada, é um sistema estrutural misto composto por vigotas treliçadas pré-fabricadas, lajotas cerâmicas como elementos de enchimento e uma capa de concreto moldada no local. O autor ainda explica que, após a cura, a vigota e a capa de concreto formam uma seção transversal monolítica em formato de "T", na qual as lajotas atuam principalmente como fôrma para o concreto e não possuem função estrutural. O

dimensionamento e a verificação deste sistema, que se comporta como uma laje nervurada unidirecional, devem seguir rigorosamente as prescrições da NBR 6118:2023, que estabelece os requisitos para o cálculo de lajes nervuradas, estruturas compostas e as verificações de segurança nos estados limites último e de serviço.

**Figura 11 - Laje pré-moldada com lajota cerâmica**

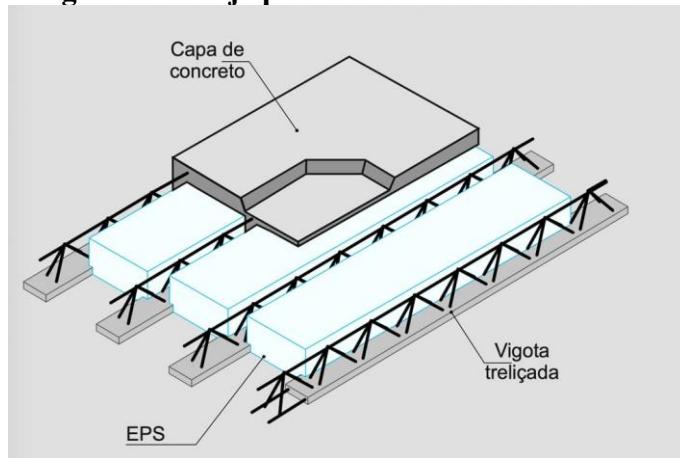


Fonte: Disponível em:< <https://lajesjundiai.com.br/produtos/laje-trelicada-ceramica>>

#### 2.6.3.2 Lajes pré-moldadas com EPS

De acordo com Pinheiro (2021), a laje pré-moldada com EPS (Poliestireno Expandido) exemplificada na Figura 12, é um sistema construtivo que utiliza vigotas treliçadas pré-fabricadas, blocos de EPS como elemento de enchimento inerte e uma capa de concreto moldada in loco. Botelho (2003), acrescenta que os blocos de EPS não possuem função estrutural, servindo apenas para formar os vazios da laje, reduzir significativamente o peso próprio da estrutura e melhorar o isolamento térmico e acústico. De acordo com a NBR 6118 (2023), este sistema deve ser calculado e detalhado como uma laje nervurada unidirecional, onde as vigotas e a capa de concreto atuam de forma monolítica para resistir aos esforços de flexão, devendo-se atender a todas as prescrições normativas para a geometria das nervuras e as verificações de segurança.

**Figura 12 - Laje pré-moldada com EPS**



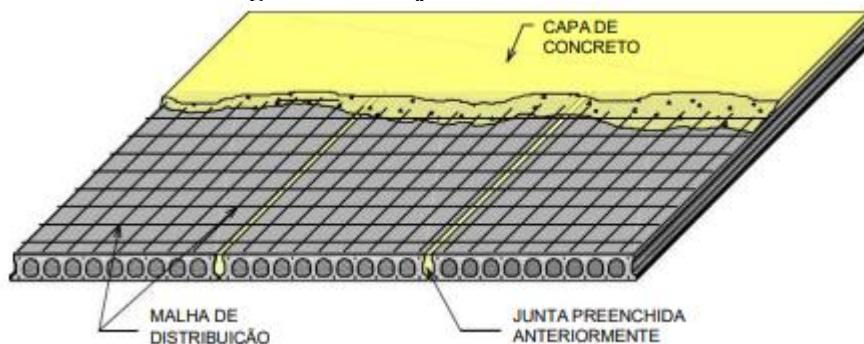
Fonte: Disponível em:< <https://lajesjundiai.com.br/produtos/laje-trelicada-isopor>>

O sistema de lajes pré-moldadas com enchimento de EPS é muito similar, tanto em metodologia quanto em execução, ao tradicional sistema de lajes com lajotas cerâmicas. A distinção fundamental, conforme Incobraz (2016), reside no material de preenchimento: blocos de poliestireno expandido (isopor) em vez de tijolos cerâmicos. O uso do EPS em lajes nervuradas, sejam elas unidireccionais ou bidimensionais, oferece vantagens significativas, como a redução considerável dos custos com escoramento, mão de obra e uma otimização do tempo de construção.

#### **2.6.3.3 Laje alveolar**

A ABCIC (2011), define a laje alveolar (Figura 13) como um elemento de concreto pré-fabricado e geralmente protendido, caracterizado por possuir vazios longitudinais contínuos (os alvéolos) que reduzem significativamente seu peso próprio sem comprometer de forma expressiva sua capacidade de vencer grandes vãos. Essa otimização da seção transversal torna o sistema ideal para obras que exigem rapidez construtiva e rigoroso controle de qualidade industrial. Autores como Pinheiro (2021) a classificam como uma solução eficiente dentro dos sistemas de lajes, especialmente para projetos de vãos maiores, como em edifícios comerciais, industriais e garagens.

**Figura 13 - Laje alveolar**



Fonte: *Tatu Pré-moldados (2025)*

O dimensionamento das lajes alveolares deve atender às prescrições combinadas de duas normas brasileiras principais: a NBR 6118:2023, que estabelece os critérios gerais para o projeto de estruturas de concreto, e a NBR 9062:2017, que trata especificamente do projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Essas normas definem a metodologia para a verificação da segurança nos estados limites último (flexão e cisalhamento nos apoios) e de serviço (cálculo de deformações), exigindo que as propriedades da seção transversal, como a inércia, sejam calculadas considerando-se a presença dos alvéolos.

#### **2.6.3.4 Lajes nervuradas**

A laje nervurada (Figura 14), é um sistema estrutural composto por um conjunto de vigas (as nervuras), que se cruzam ou são dispostas paralelamente, e são conectadas por uma laje superior de pequena espessura, chamada de mesa ou capa. Conforme Araújo (2014), o princípio fundamental deste sistema é a otimização da seção transversal, removendo o concreto da zona de tração entre as nervuras, onde sua contribuição estrutural para resistir à flexão é pouco significativa. Essa concepção resulta em uma estrutura mais leve e com grande rigidez, capaz de vencer vãos maiores em comparação com uma laje maciça de mesma altura, podendo ter os espaços entre as nervuras preenchidos por materiais inertes, como o EPS ou blocos cerâmicos.

Para que um sistema seja projetado como laje nervurada, a NBR 6118:2023 estabelece critérios geométricos mínimos e obrigatórios. A norma determina que a distância entre os eixos das nervuras não deve ultrapassar 110 cm, a largura da nervura deve ser de no mínimo 5 cm e a espessura da mesa (laje superior) não pode ser inferior a 1/15 da distância entre os eixos das nervuras, respeitando um mínimo absoluto de 5 cm. O cumprimento desses

requisitos permite que o conjunto seja dimensionado à flexão como um sistema de vigas "T" associadas, garantindo que a mesa atue eficazmente como a aba de compressão das nervuras e assegurando o comportamento monolítico da estrutura.

**Figura 14 - Laje nervurada**



Fonte: Disponível em:< <https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/laje-nervurada/>>

#### **2.6.3.5 Laje maciça**

De acordo com Botelho (2003), as lajes maciças (Figura 15), são os elementos estruturais de superfície mais tradicionais, caracterizadas por serem uma placa de concreto com espessura constante, preenchida em toda a sua seção. Conforme o autor, sua função principal é receber as cargas de uso diretamente em sua face e distribuí-las para as vigas de apoio. Pinheiro (2021) complementa, explicando que, por serem elementos de placa, as lajes maciças geralmente trabalham em um regime de flexão biaxial, ou seja, resistem a esforços e se deformam nas duas direções ortogonais do plano, o que lhes confere grande robustez e monolitismo com o restante da estrutura.

De acordo com Fernandez e Porto (2015), as condições de vínculo nas bordas de lajes maciças são classificadas em três tipos principais:

- Borda Livre: Caracteriza-se pela ausência total de suporte, como ocorre na extremidade de uma laje em balanço.
- Borda Apoiada (Apoio Simples): Impede os deslocamentos verticais da laje, contudo, permite que a borda rotacione livremente sobre o apoio.
- Borda Engastada (Engaste): Oferece a restrição mais completa, impedindo tanto os deslocamentos verticais quanto as rotações na borda da laje.

Fusco (2007) traz que, o comportamento sob flexão exige que a laje seja armada com uma malha de aço, posicionada para combater as tensões de tração, essa malha é composta por uma armadura inferior (positiva) para resistir aos momentos fletores no centro dos vãos e uma armadura superior (negativa) sobre os apoios (vistas), onde a laje tende a se tracionar na face de cima. Essa disposição cuidadosa do aço é o que garante a integridade e a capacidade resistente do elemento, sendo o esforço de cisalhamento geralmente absorvido pela seção de concreto em lajes de espessura comum.

O dimensionamento e a verificação das lajes maciças são definidos pela NBR 6118:2023. A norma estabelece os modelos de cálculo para a determinação dos esforços, que podem variar desde métodos simplificados e tabelas clássicas até análises computacionais mais avançadas, como o Método dos Elementos Finitos. Além disso, a norma impõe critérios essenciais para a segurança e o bom desempenho, como a definição de espessuras e taxas de armaduras mínimas para evitar rupturas frágeis.

**Figura 15 - Laje maciça**



Fonte: Disponível em:< <https://galvaminas.com.br/tipos-de-laje-e-suas-vantagens/>>

## 2.7 Dimensionamento de lajes

Para dimensionamento e verificação de lajes, a NBR 6118:2023 estabelece que para determinar os esforços resistentes das seções submetidas a momentos fletores e forças normais, deve-se utilizar os princípios estabelecidos nos itens 17.2.1 a 17.2.3. A norma ainda estabelece que nas regiões de apoio de lajes, deve-se garantir boas condições de ductibilidade atendendo às disposições do item 14.6.4.3.

O item 14.6.4.3 da NBR 6118:2023 trata dos critérios de ductilidade e dos limites para a redistribuição de momentos, sendo suas prescrições válidas para vigas e lajes. Segundo o texto normativo, existe uma relação fundamental entre a capacidade de rotação de um

elemento e a posição de sua linha neutra no Estado-Limite Último (ELU). Essa relação é de proporcionalidade inversa: quanto menor for a profundidade da linha neutra em relação à altura útil ( $x/d$ ), maior será a capacidade de rotação do elemento. Com o objetivo de assegurar um desempenho dúctil apropriado para esses elementos, a norma estipula limites específicos para a posição da linha neutra, onde:

$$a) x/d \leq 0,45 \text{ para concretos com } F_{ck} \leq 50 \text{ MPa};$$

Equação (1)

$$b) x/d \leq 0,35 \text{ para concretos com } 50 < F_{ck} \leq 90 \text{ MPa};$$

Equação (2)

Partindo do ponto de conhecimento dos momentos fletores máximos atuantes na estrutura (laje), a NBR 6118:2023 cita que para o dimensionamento à flexão simples deverá ser seguir o método de dimensionamento semelhante ao de vigas, propondo faixas com largura de um metro. Utilizando equações com coeficientes tabelados  $K^2$ , sendo necessário a determinação do coeficiente  $K_c$  através da expressão:

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d}$$

Equação (3)

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d}$$

Equação (4)

Com  $M_d$  em  $kN.cm$  e  $d$  em  $cm$ .

A NBR 6118:2023 estabelece que podemos determinar os coeficientes  $\beta_x$  e  $K_s$  além do domínio da laje através de tabelas auxiliares. Com  $\beta_x (= x/d)$  podemos determinar a linha neutra, a fim de verificar os valores limites para a relação  $x/d$ , de acordo com equação 1.

O item 13.2.4.1 da NBR 6118:2023, estabelece os limites mínimos para espessura de lajes maciças, de acordo com:

- 7 cm para cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN;

- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, como mínimo de  $l/42$  para lajes de piso bi apoiadas e  $l/50$  para lajes de piso contínua;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora capitel;

O material normativo também especifica que para dimensionar o balaço, os esforços solicitantes considerados devem ser multiplicados por um coeficiente adicionar  $\gamma_n$ , de acordo com a Tabela 4

**Tabela 4 - Valores do coeficiente  $\gamma_n$  adicional para lajes em balanço**

h cm	$\geq 19$	18	17	16	15	14	13	12	11	10
$\gamma_n$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45

Onde

$$\gamma_n = 1,95 - 0,05 * h$$

h é a altura da laje, expressa em centímetros (cm)

Fonte: Autor, adaptado NBR 6118:2023

A fim de dimensionar a armadura presente na seção, a NBR 6118:2023 estabelece os parâmetros máximos e mínimos. Para armadura máxima, a soma das armaduras de compressão e tração ( $A_s + A'_s$ ) não pode ser maior do que 4% da área de concreto de seção devendo ainda garantir as condições de ductilidade.

Para o dimensionamento da armadura mínima, a NBR 6118:2023 determina que para lajes devemos seguir a Tabela 5 e a Tabela 6.

**Tabela 5 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas**

$f_{ck}$ Mpa	Valores de $\rho_{min}$ (%)														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

Os valores de  $\rho_{min}$  estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50,  $d/h = 0,8$ ,  $\gamma_c = 1,4$  e  $\gamma_s = 1,15$ . Caso esses fatores sejam diferentes,  $\rho_{min}$  deve ser recalculado

$$\rho_{min} = A_{s,min}/A_c$$

Fonte: Autor, adaptado Tabela 17.3 da NBR 6118:2023

**Tabela 6 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes**

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativa	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - \rho_p \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,67\rho_{min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de borda sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min}$	$\rho_s \geq 0,67\rho_{min} - \rho_p \geq 0,5\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - \rho_p \geq 0,5\rho_{min}$	$\rho_s \geq \rho_{min} - 0,5\rho_p \geq 0,5\rho_{min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\% \text{ da armadura principal}$ $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5\rho_{min}$		-
onde $\rho_s = A_s/b_w$ e $\rho_p = A_p/b_w h$ NOTA: Os valores de $\rho_{min}$ são definidos em 17.3.5.2			

Fonte: Autor, adaptado Tabela 19.1 da NBR 6118:2023

Para a armadura de flexão, a NBR 6118:2023 determina que o diâmetro das barras seja limitado a  $h/8$ . O espaçamento da armadura principal também é controlado, sendo o máximo permitido de  $2h$  (2x a altura) ou 20 cm (o que for menor) nas regiões críticas de momentos fletores. A norma também veta o escalonamento da armadura positiva em lajes maciças (armadas em uma ou duas direções), exigindo que todas as barras sejam levadas integralmente até os apoios, com uma ancoragem mínima de 4 cm para além do eixo de apoio.

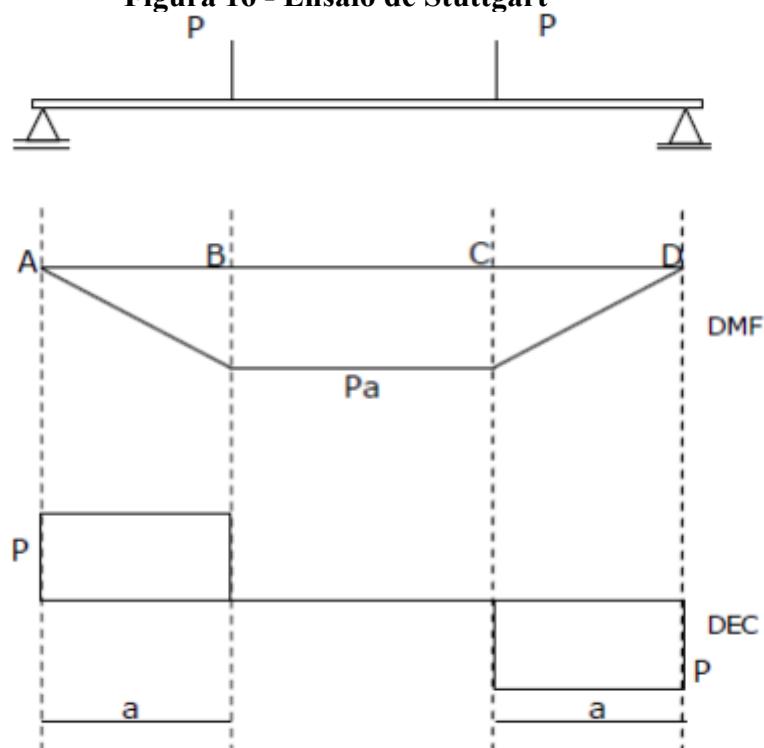
Finalmente, para lajes unidireccionais, a armadura de distribuição é dimensionada com um teto de 20% da armadura principal e um espaçamento que não pode exceder 33 cm.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como foco principal a comparação entre o concreto convencional e o concreto leve estrutural. Para tal comparação, foram desenvolvidos em laboratório um total de quatro protótipos: sendo uma laje armada com aço CA-50 e concreto convencional, que fora utilizada como testemunho. As demais lajes armadas com aço CA-50 e concreto leve estrutural nomeadas de LCLE 1 a LCLE3.

Para a análise comportamental das propriedades mecânicas dos materiais, cada protótipo foi submetido ao ensaio de flexão através do método de Stuttgart. Este ensaio consiste na aplicação de cargas concentradas simetricamente, aplicadas gradualmente até a ruptura. Além da aplicação de carga, o protótipo é apoiado em dois apoios equidistantes conforme Figura 16 (biapoiada) que neste trabalho fora adotado distâncias de 40cm.

**Figura 16 - Ensaio de Stuttgart**



Fonte: Marques (2016)

Para avaliação, os critérios adotados abrangem as cargas de rutura as vantagens no processo de fabricação e o comportamento pós fissuração das lajes. Com base nos resultados, será viável avaliar e comparar cada protótipo a fim de determinar a viabilidade do concreto leve estrutural.

### 3.1 Quantitativo de material

O correto dimensionamento dos materiais é essencial para o sucesso de um projeto, pois garante economia devido a uma eficiência na utilização dos materiais, evitando desperdícios por excessos. Além de que este controle preciso garante que a execução ocorra como planejado, gerando qualidade e segurança.

#### 3.1.1 Concreto / Concreto leve estrutural

Para calcular a quantidade de concreto a ser utilizado, é de suma importância determinar o volume dos protótipos executados. Diante disso o cálculo deste volume está apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Volume de concreto**

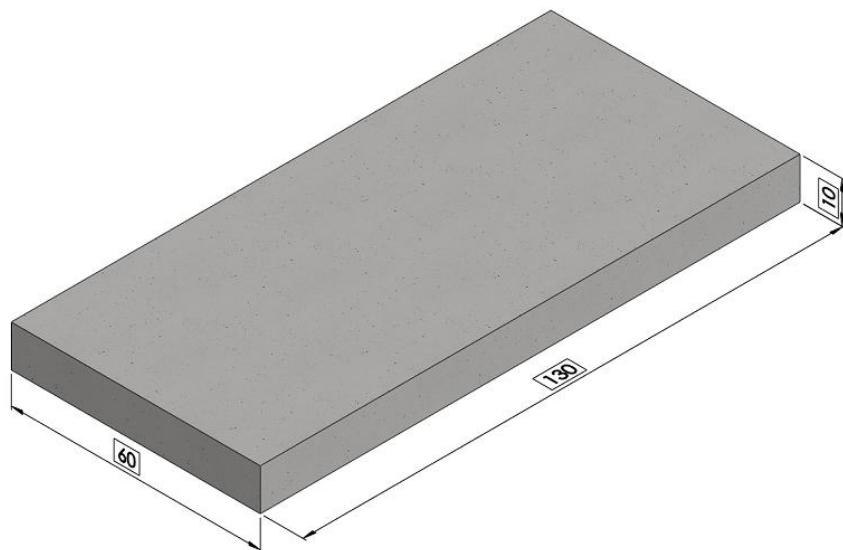
Volume de concreto			
$V = a * b * c$			
a	Largura (Bw)	0,60	m
b	Comprimento (C)	1,30	m
c	Altura (h)	0,10	m
v	Volume da laje	0,078	$m^3$
Quantidade de vigas			
Laje de concreto convencional		1	Un
Laje de concreto leve estrutural		3	Un
Volumes adicionais			
Volume para corpos de prova (por CP)		0,016	$m^3$
Porcentagem de perda de material		15%	
<b>Volume Total</b>		<b>0,38</b>	$m^3$

Fonte: Autor

O volume calculado de concreto deu-se através do volume referente às formas das lajes (Figura 17), assim como para moldagem dos corpos de prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Para uma maior segurança de que o material fosse suficiente,

foi aplicado uma margem de 15%, a fim de compensar o material retido na betoneira e o material do *slump test*.

**Figura 17 -Dimensões da laje**



Fonte: Autor

Com o volume calculado, adotamos dois traços de diferentes composições para realização dos protótipos. O primeiro traço adotado tem como resistência característica 30 MPa, sendo ele o concreto convencional composto de: cimento CP V ARI, areia média, brita nº 1 e água, em com uma proporção conforme Tabela 8 - Quantitativo concreto convencional Tabela 8. O segundo traço, concreto leve estrutural tem como resistência característica de 30 MPa, de acordo com o fornecedor de agregado (anexo 1), a mistura teve como materiais adotados o cimento CP V ARI, CP2, areia média, areia artificial argila expandida C1506, aditivo poli funcional e água, conforme Tabela 9.

**Tabela 8 - Quantitativo concreto convencional**

<b>Quantitativo de material (concreto convencional)</b>			
Cimento CP V Ari	109	kg	
Areia média	170	kg	
Brita Nº1	255	kg	
Água	50	l	

Fonte: Autor

**Tabela 9 - Quantitativo concreto leve estrutural**

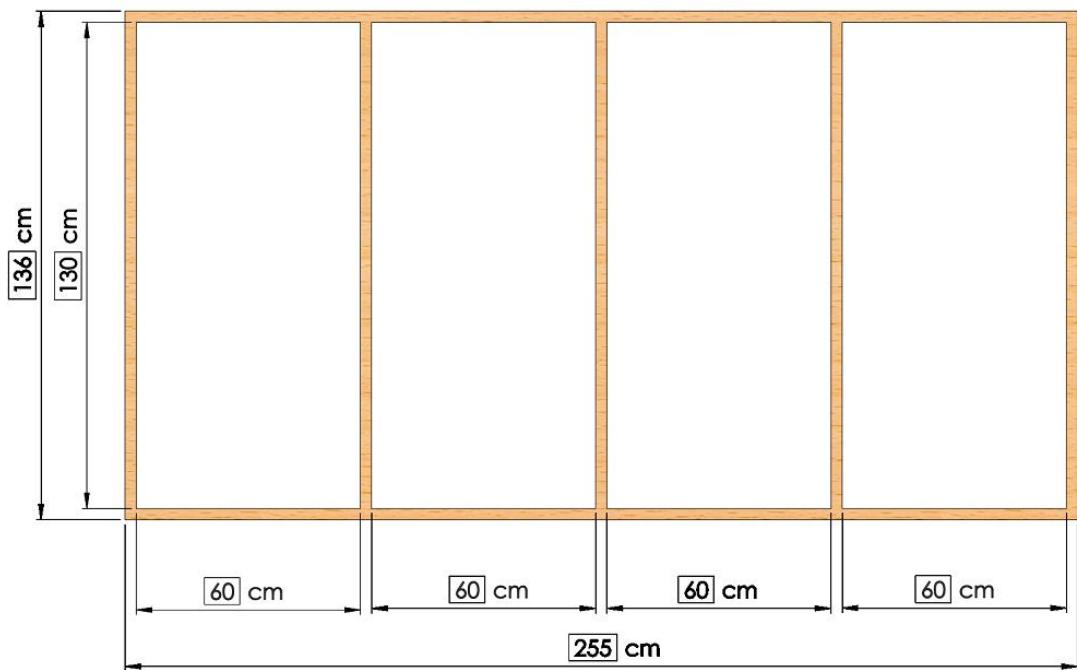
<b>Quantitativo de material (concreto leve estrutural)</b>			
Cimento CP V Ari	148	kg	
Areia média	248	kg	
Areia artificial	63	kg	
Argila expandida C1506	118	kg	
Aditivo poli funcional	1,2	ml	
Água	70	l	

Fonte: Autor

### 3.1.2 Fôrma

Para quantificar o material para fabricação das fôrmas, realizado um projeto seguindo as especificações da laje estudada, que como ressaltado anteriormente, possui 10 cm x 60 cm x 130 cm, com isso resultando no croqui presente na Figura 18.

**Figura 18 - Croqui fôrmas**



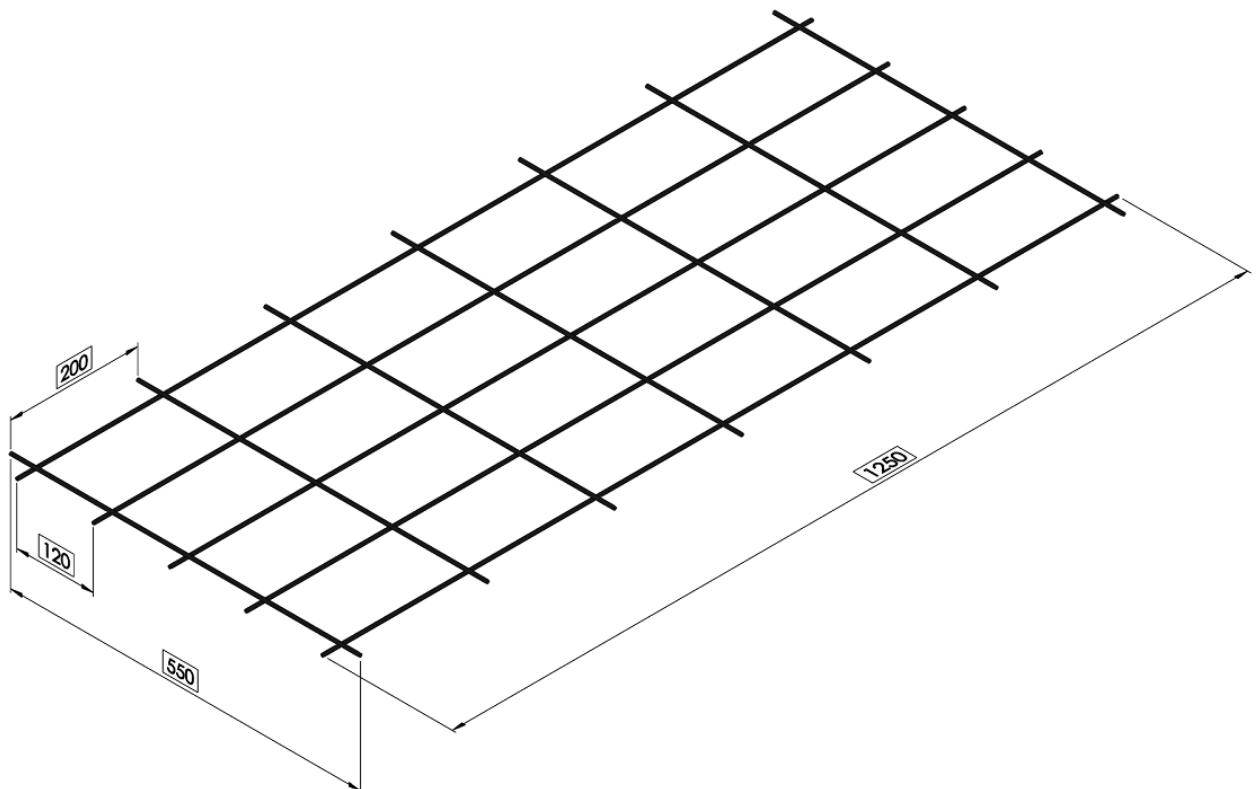
Fonte: Autor

O material utilizado na confecção das formas foram guias de 10 cm de altura, que proporcionaram resistência e estabilidade para a concretagem. Foram utilizados um total de 12 metros lineares de guia, não sendo necessário o fundo da forma de maneira a reduzir o consumo.

### 3.1.3 Armadura longitudinal e distribuição

Para quantificar o aço necessário para cada uma das lajes, foi selecionado a bitola de Ø5,00 mm tanto para o aço longitudinal quanto o aço de distribuição. A partir da disposição conforme Figura 19, a quantidade necessária de aço foi de 10,1 metros por laje, conforme Tabela 10.

**Figura 19 - Armadura da laje**



Fonte: Autor

**Tabela 10 -Quantitativo de armadura**

Quantitativo de armadura			
Barra de aço CA50 Ø5,00 mm	5	1,25	m
	7	0,55	m
<b>Total por laje</b>		10,1	m

Fonte: Autor

### 3.2 Dimensionamento

As lajes do presente trabalho possuem 130 cm de comprimento 60 cm de largura e 10 cm de altura, conforme ilustrado na Figura 17(p. 42). O dimensionamento da laje deu-se com base na NBR6118:2023. Conforme a norma pode-se calcular o vão efetivo através da equação:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2$$

Equação (5)

Desta forma foi considerado o apoio à 5 cm das extremidades da laje e um vão no total de 130 cm, totalizando um vão efetivo de 120 cm.

Para dimensionar a armadura longitudinal mínima e também a máxima para flexão foi seguido as recomendações da norma supracitada. A determinação da armadura mínima dá-se através da taxa de 0,15% da área de concreto, que para lajes utilizamos 100 cm x 10 cm (determinação da NBR6118:2023), totalizando uma área de 1,5 cm<sup>2</sup>/m. Para armadura máxima de flexão, utiliza-se uma taxa de 4% da área de concreto, obtendo um valor de 40 cm<sup>2</sup>/m.

Entretanto devido as limitações da prensa a ser utilizada no ensaio de flexão (Stuttgart) a largura da laje adotada foi de 60 cm, sendo assim necessitado de 0,9 cm<sup>2</sup> de área de aço, totalizando 5 barras de Ø5,00 mm com área efetiva de 0,98 cm<sup>2</sup>.

### 3.3 Execução das lajes

Execução dos protótipos estudados foi realizado no Laboratório da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) localizado no Bloco 50 da instituição. Todos os processos descritos na sequência foram realizados seguindo os procedimentos de segurança necessário,

principalmente com a utilização de equipamentos de proteção individual, garantindo a integridade e segurança dos envolvidos nas atividades.

### **3.3.1 Montagem de formas**

Para montagem das formas, foi utilizado o material solicitado através do quantitativo realizado (guias de 10cm de altura), nas quais foram realizados os cortes com as medidas necessárias para a montagem. Para auxiliar o momento do corte foram utilizados um esquadro, uma trena de 5 metros e um lápis para marcação. Após a marcação realizada foi utilizado uma serra circular para executar o corte, gerando 5 peças de 130 cm x 10 cm e 2 peças com 255cm x 10 cm.

Com as peças em mãos foi dado início a montagem das formas, utilizando um martelo e pregos 19 mm x 39 mm. A montagem seguiu conforme croqui previamente realizado (Figura 18), como pode-se observar na Figura 20.

**Figura 20 - Montagem das fôrmas**

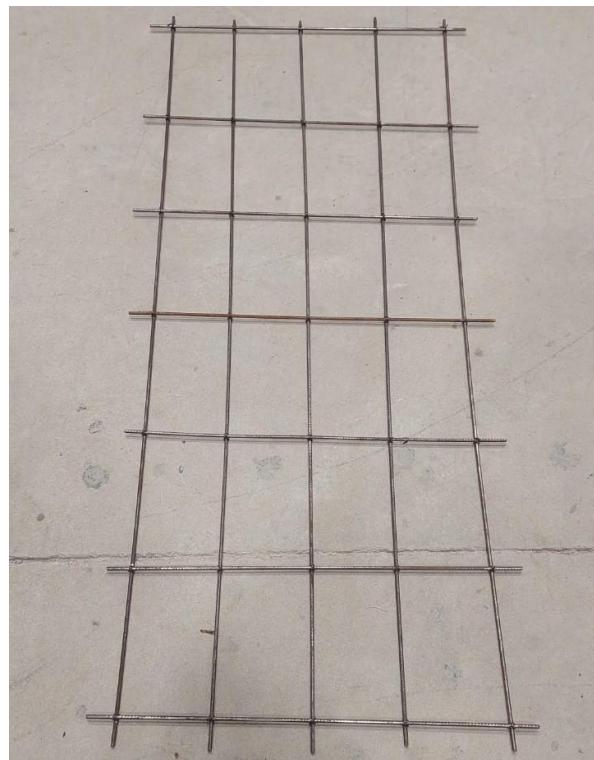


Fonte: Autor

### **3.3.2 Montagem das armaduras**

Para execução das armaduras foi utilizado o aço CA-50 de 5 mm de diâmetro, conforme quantitativo, nas quais foram realizados os cortes com as medidas necessárias para a montagem. Para auxiliar o momento do corte das peças foram uma trena de 5 metros, um giz de cera para marcação e uma tesoura tipo alicate para cortar vergalhão. Após executar o corte e gerar 20 peças de 125 cm e 28 peças com 55cm foi realizada a amarração das peças conforme Figura 21, utilizando um arame recocido 16. As peças foram armadas com espaçamento de 12 cm para as 5 barras da armadura principal e com 20cm para as 7 barras de distribuição.

**Figura 21 - Montagem da armadura**



Fonte: Autor

### **3.3.3 Concretagem**

O processo de concretagem começou com a separação dos materiais utilizados para cada traço, conforme quantitativo exposto nas Tabela 8 e Tabela 9, deixando os materiais pesados e agrupados em baldes. Devido ao volume necessário para concretar as lajes, foram

feitas três betonadas de concreto em uma betoneira de 250 litros, sendo uma de concreto convencional e duas de concreto leve estrutural, dividida igualmente para facilitar o processo de pesagem.

Feita a separação dos materiais, inicia-se o processo de preparação da fôrma para recebimento do concreto, sendo colocado a lona ao sob a forma para ser utilizada como base com intuito de evitar o contato do concreto com o solo. Após a montagem, a fôrma foi cuidadosamente inspecionada para certificar seu posicionamento e travamento. Esta verificação é fundamental para que a peça estrutural final mantenha o alinhamento e as dimensões projetadas. Em seguida, aplica-se um desmoldante na face interna do madeiramento, criando uma película que impede a aderência do concreto e facilita sua posterior remoção. Para aumentar a rigidez do conjunto, a parte superior da fôrma é reforçada com travas de madeira, garantindo sua estabilidade durante a concretagem.

**Figura 22 - Fôrma montada e preparada**



Fonte: Autor

Uma vez que a fôrma estava pronta, iniciou-se a preparação dos concretos (convencional e leve estrutural) para as lajes. Para isso, dosaram-se com precisão os materiais — cimento, areia, brita, argila, aditivo e água — seguindo os traços pré-estabelecidos para garantir a resistência desejada.

O processo de mistura começou com a adição dos agregados (brita e areia – concreto convencional, argila expandida e areia – concreto leve estrutural) e da água na betoneira. Somente após a completa homogeneização desses materiais, o cimento foi incorporado para

formar uma massa uniforme. A consistência foi monitorada durante a mistura, ajustando-se a quantidade de água quando necessário. Para validar a qualidade, o teste de abatimento (slump test) foi realizado, resultando em 18 cm, o que confirmou a boa trabalhabilidade do concreto.

Com a mistura pronta, o concreto foi transportado em carrinho de mão e lançado de forma controlada na fôrma. Simultaneamente, foram moldados quatro corpos de prova por batelada (betoneira), que servirão para o posterior ensaio de compressão e verificação da resistência.

Logo após o lançamento, um vibrador foi utilizado para adensar o concreto, eliminando o ar aprisionado e garantindo a compactação ideal da massa. O processo foi finalizado com o sarrafeamento e nivelamento da superfície da viga, um acabamento que também facilita a execução de ensaios futuros na peça.

**Figura 23 - Concretagem finalizada**



Fonte: Autor

Finalizado o processo de concretagem, as lajes entraram na etapa de cura úmida, que se estende por 3 dias. Durante este período, a peça é mantida constantemente umedecida para assegurar a hidratação completa do cimento, um fator essencial para o ganho de resistência e para prevenir fissuras antes da remoção da fôrma.

Ao término desse prazo, a fôrma foi removida. Este processo de desforma, que inclui a retirada das travas e dos corpos de prova, foi executado com cautela para não danificar as arestas ou a superfície do concreto, deixando as lajes prontas para os ensaios.

Após a desforma, a hidratação continua: os corpos de prova são colocados em um tanque para cura submersa, enquanto as lajes seguem sendo molhadas periodicamente. Essa umidade contínua é vital para que o material continue a desenvolver sua resistência conforme o esperado.

**Figura 24 - Laje de concreto**



Fonte: Autor

#### 4 RESULTADOS

O principal objetivo dos ensaios realizados era avaliar o desempenho das lajes de concreto leve estrutural armado. Buscou-se também comparar os resultados obtidos com os de lajes de concreto convencional armadas, analisando as características e diferenças de resistência entre os modelos, com objetivo de fundamentar o uso do concreto leve estrutural como alternativa para construção civil.

#### **4.1. Ensaio de tração nas barras**

A execução do ensaio de tração às barras de aço teve como objetivo avaliar a resistência à tração e a deformação do aço empregado para a armadura das lajes. Ensaio que consiste em prender as barras com uma garra nas extremidades e aplicar forças de extensão nos corpos de prova. Durante o ensaio foram monitorados parâmetros que possibilitaram avaliações mais detalhadas do aço empregado, tais como: tensão de escoamento, tensão de ruptura e deformação.

**Figura 25 - Barras de aço a serem tracionadas**



Fonte: Autor

Com o objetivo de assegurar a precisão e a validade estatística dos resultados, o procedimento experimental foi conduzido em triplicata, utilizando-se para isso três corpos de prova de 20 cm de comprimento. A adoção desta metodologia de repetição é fundamental para reduzir a influência de erros aleatórios e, consequentemente, aumentar a confiabilidade dos resultados. Uma vez concluída a fase de testes, os resultados para as barras de aço foram compilados, destacando-se os valores de tensão máxima e de tensão de escoamento conforme Tabela 11.

**Tabela 11 - Resultados de tração em barras de aço**

Ensaio de tração nas barras				
Aço Ø5,0 mm	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de Escoamento média (MPa)	Tensão máxima media (MPa)
CP1	683,20	711,14	681,26	711,13
CP2	675,82	705,16		
CP3	684,76	717,11		

Fonte: Autor

#### **4.2. Ensaio de compressão concreto**

A execução do ensaio de compressão ao concreto teve como objetivo avaliar a resistência à compressão dos traços produzidos e empregados na produção das lajes. O ensaio que consiste na compressão simples dos corpos de provas. Durante o ensaio foram monitorados parâmetros que possibilitaram avaliações mais detalhadas dos concretos empregado, tais como: tensão de ruptura e módulo de elasticidade.

Para cada traço produzido (concreto convencional e concreto leve estrutural) foram moldados 4 corpos de prova por betonada, totalizando 12 corpos de prova (4 CC, 8 CLE). Os resultados obtidos para cada traço podem ser observados na Tabela 12 a seguir.

**Figura 26 - Corpo de prova durante ensaio**



Fonte: Autor

**Figura 27 - Corpo de prova rompido**



Fonte: Autor

**Tabela 12 - Resultados ensaio de compressão  
Ensaio de compressão nos CP's**

<b>Betonada (concreto convencional)</b>		Média (MPa)
CP1	38,10 MPa	35,76
CP2	31,41 MPa	
CP3	37,76 MPa	
<b>Betonada 1 (concreto leve estrutural)</b>		Média (MPa)
CP1	20,81 MPa	21,54
CP2	21,87 MPa	
CP3	21,93 MPa	
<b>Betonada 2 (concreto leve estrutural)</b>		Média (MPa)
CP1	21,06 MPa	21,75
CP2	21,85 MPa	
CP3	22,33 MPa	

Fonte: Autor

Com este ensaio realizado, obteve-se dados cruciais sobre as características de cada modelo de concreto estudado submetido à compressão, possibilitando uma análise mais rica

em detalhes da qualidade das misturas. Por fim, vale notar que o desempenho do concreto é condicionado por diversos fatores em sua execução. A qualidade dos materiais, seu teor de umidade, o método de preparo e o tempo de cura influenciam diretamente a resistência que será alcançada.

#### 4.3. Ensaio de flexão nas lajes

A fim de garantir a resistência mínima dos protótipos para o ensaio de flexão, as lajes passaram por um processo de cura por 14 dias. Em seguida, os ensaios de compressão nos corpos de prova confirmaram que a resistência média das misturas era satisfatória, permitindo o avanço para a próxima etapa experimental.

O primeiro protótipo a ser submetido ao ensaio de Stuttgart (flexão) foi a laje de testemunho, moldada com concreto convencional e armada com aço, conforme Figura 28.

**Figura 28 - Laje testemunho**



Fonte: Autor

Após a execução do ensaio na laje testemunho (concreto convencional), foram realizados os ensaios nas lajes de concreto leve estrutural, identificadas pelas numerações 1, 2 e 3.

**Figura 29 - Laje concreto leve estrutural 1**



Fonte: Autor

**Figura 30 - Laje de concreto leve estrutural 1 durante o ensaio**



Fonte: Autor

**Figura 31 - Laje de concreto leve estrutural 1 rompida**



Fonte: Autor

As lajes de concreto leve estrutural 1, 2 e 3, foram submetidas aos mesmos procedimentos da laje testemunho, sendo possível verificar durante o ensaio o seu rompimento, sendo ocasionado por flexão devido ao surgimento de fissuras na região inferior central, as fissuras têm origem na face tracionada e se desenvolvem rumo à face comprimida da laje, de acordo com o que é demonstrado na Figura 31.

#### **4.4. Cálculo de carga e momento estimados de ruptura**

Considerando que o objetivo do cálculo era prever a condição de rompimento da estrutura no ensaio, as resistências dos materiais foram utilizadas sem a minoração dos fatores de segurança. Desta forma, adotou-se a resistência à compressão do concreto ( $F_{cm}$ ) em  $\text{kN/cm}^2$  e a tensão de escoamento do aço ( $F_{yk}$ ) em  $\text{kN/cm}^2$ , ambas determinadas experimentalmente. Sendo assim têm-se como carga e momento de rupturas estimados conforme Tabela 13.

**Tabela 13 - Cargas e momentos de ruptura**

**Dados:**

b	60	Cm
d	7	Cm
$F_{cm}$ (concreto convencional)	3,58	$\text{kN/cm}^2$
$F_{cm}$ (concreto leve estrutural 1)	2,15	$\text{kN/cm}^2$

Fcm (concreto leve estrutural 2)	2,18	kN/cm <sup>2</sup>
$\alpha$	0,85	
$\lambda$	0,80	
Fyk	68,13	kN/cm <sup>2</sup>
As	0,98	cm <sup>2</sup>
l	120	cm

### Laje concreto convencional

1º Passo: Definir “x”

$$x = \frac{As * fyd}{\alpha * \lambda * fcd * b}$$

X=	0,458	cm
----	-------	----

2º Passo: Calcular momento estimado de ruptura

$$M_{est,rup} = As * fyd * (d - 0,4 x)$$

M est, rup=	455,15	kN*cm
-------------	--------	-------

3º Passo: Calcular carga de ruptura

$$\frac{P}{2} = \frac{M_{est,rup}}{\frac{l}{3}}$$

P=	22,76	kN
----	-------	----

### Laje concreto leve estrutural

1º Passo: Definir “x”

$$x = \frac{As * fyd}{\alpha * \lambda * fcd * b}$$

X (betonada 1)=	0,76	cm
-----------------	------	----

X (betonada 2)=	0,75	cm
-----------------	------	----

2º Passo: Calcular momento estimado de ruptura

$$M_{est,rup} = As * fyd * (d - 0,4 x)$$

M est, rup (betonada 1)=	447,08	kN*cm
--------------------------	--------	-------

M est, rup (betonada 2)=	447,28	kN*cm
--------------------------	--------	-------

3º Passo: Calcular carga de ruptura

$$\frac{P}{2} = \frac{M_{est,rup}}{\frac{l}{3}}$$

P (betonada 1) =	22,35	kN
P (betonada 2) =	22,36	kN

Fonte: Autor

Destaca-se que a carga referente ao peso próprio do elemento estrutural não foi computada nos cálculos, visto que sua influência é considerada desprezível para a análise do comportamento da laje.

#### 4.5. Resultado do ensaio de flexão nas lajes

Após a realização dos ensaios de flexão nos corpos de prova das lajes em concreto leve estrutural e da laje testemunho em concreto convencional, é apresentado na Tabela 14 a comparação dos valores estimados de ruptura e momento (cálculo) com os valores obtidos através dos ensaios.

**Tabela 14 Resultado ensaio de flexão**

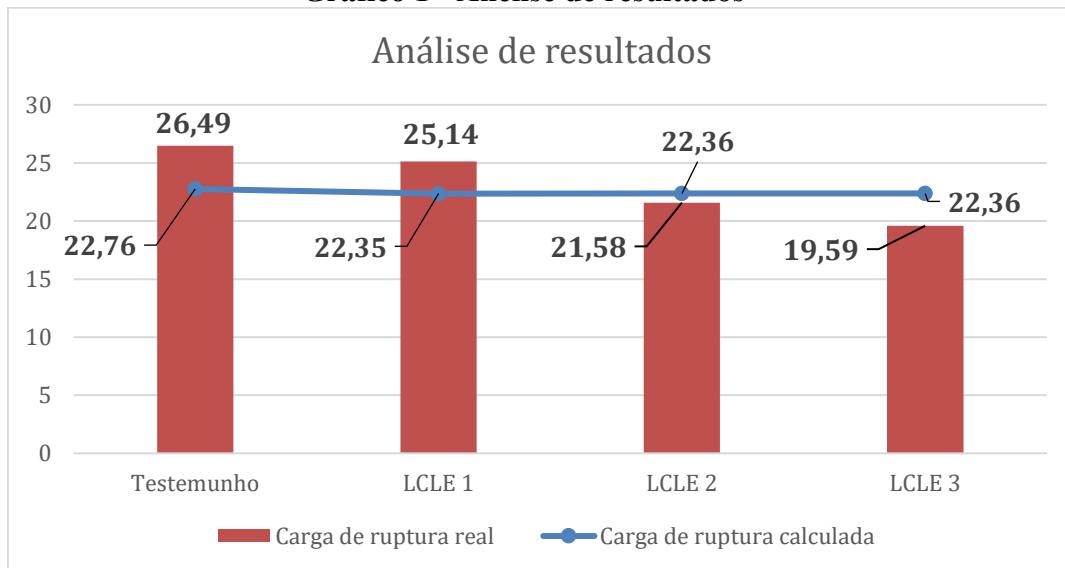
ENSAIO DE FLEXÃO NAS LAJES					
Lajes	Carga de ruptura calculada (kN)	Média Carga de ruptura calculada (kN)	Carga de ruptura real (kN)	Média Carga de ruptura real (kN)	Variação Ruptura Real x Ruptura Calculada (%)
Testemunho	22,76	-	26,49	-	16
LCLE 1	22,35	22,36	25,14	22,10	12
LCLE 2	22,36		21,58		-4
LCLE 3	22,36		19,59		-12

Fonte: Autor

#### 4.6. Análise de resultados

De acordo com os resultados apresentados acima, é possível observar no Gráfico 1 que as lajes de concreto leve estrutural não apresentaram carga de ruptura real compatível com a calculada em sua totalidade, ficando abaixo do esperado nos protótipos 2 e 3.

**Gráfico 1 - Análise de resultados**

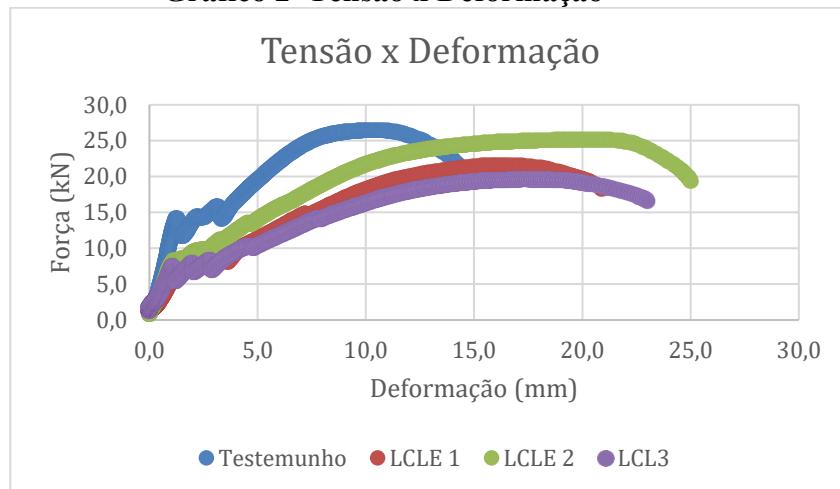


Fonte: Autor

A análise dos dados apresentados levanta a possibilidade e a viabilidade do concreto leve estrutural (LCLE) testado. Observa-se uma pequena discrepância de valores de ruptura real com os valores de ruptura calculada, em que as lajes Testemunho e LCLE 1 romperam com cargas reais superiores à de cálculo e as lajes LCLE 2 e LCLE 3 com uma carga inferior às previstas em cálculo, com variações negativas que atingiram -4% e -12%. Em comparação com a laje testemunho, as lajes de concreto leve estrutural apresentaram rompimento real com cargas inferiores.

Pode-se perceber durante a execução do ensaio as lajes de concreto leve estrutural demoraram a apresentar fissuras quando comparado com o concreto convencional conforme observado no Gráfico 2, o que corrobora com o que traz Rossignolo (2009) sobre a fissuração do concreto leve.

**Gráfico 2 Tensão x Deformação**



Fonte: Autor

Através do ensaio pode-se perceber também que o comportamento de ruptura das lajes de concreto leve estrutural e a laje de concreto convencional tiveram a mesma forma de rompimento por tração conforme Figura 32, gerando a tração no ponto abaixo do apoio central.

Analizando puramente as misturas de concreto (leve estrutural e convencional), há uma diferença significativa de resistência à compressão que é percebida devido ao método de ruptura do CP, em que o corpo de prova de concreto leve estrutural rompeu no agregado.

**Figura 32 - Laje LCLE rompida**



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

Com os ensaios realizados no presente trabalho, foi possível analisar de forma abrangente o desempenho e comportamento de lajes em concreto, utilizando tanto o concreto convencional quanto o concreto leve estrutural. Com o objetivo da pesquisa foi de avaliar a utilização do concreto leve estrutural como alternativa ao concreto convencional, foram avaliadas as propriedades mecânicas como a resistência à compressão e à flexão.

Os resultados dos ensaios de compressão simples ao concreto já indicaram diferenças significativas entre o concreto leve estrutural e o convencional. A mistura convencional apresentou um resultado de 35,76 MPa que foi acima do esperado (30MPa), já o concreto leve estrutural composto por argila expandida apresentou resistência de 21,54 MPa e 21,75 MPa, ficando 28,2% e 27,5% abaixo do valor de 30MPa esperados. Outro ponto a salientar é que a ruptura do concreto leve estrutural no ensaio de compressão deu-se de forma homogênea, rompendo a mistura e agregado (argila expandida) ao meio, diferente do concreto convencional que apresentou ruptura na interface da mistura com o agregado graúdo (brita 1) preservando o agregado.

Esta diferença de resistência encontrada no concreto leve estrutural (esperado x real) deu-se devido ao método de produção e controle do concreto, em que o fato de deixar a argila expandida submersa em água por 24 horas gerou a diminuição da resistência do agregado, para a correção deste parâmetro deve-se utilizado a curva de Abrams (relação água/cimento x resistência à compressão).

Os resultados obtidos do ensaio de flexão indicaram que o concreto leve estrutural apresenta boas características de resistência. As lajes ensaiadas apresentaram uma média de carga de ruptura real de 22,10 kN, chegando a 98,84% da carga de ruptura calculada (22,36) na qual foi desprezada os coeficientes de minoração do concreto ( $\gamma_c$ ) e do aço ( $\gamma_s$ ).

No que tange a dimensionamento da estrutura em concreto leve estrutural pode-se concluir que neste trabalho não apresentou diferenças em relação ao concreto convencional, sendo necessário seguir todas recomendações de projeto estabelecidos pela NBR6118:2023, garantindo segurança e durabilidade das estruturas.

Pode-se concluir através desta pesquisa que há viabilidade na utilização do concreto leve estrutural como alternativa ao concreto convencional, tendo resultado satisfatório nos

ensaios de compressão e de flexão. Outro ponto importante a ser observado é a diferença de massa específica entre as misturas, o concreto leve estrutural apresentou 17,5 kN/m<sup>3</sup> sendo este valor 27,08% inferior quando comparada com a mistura convencional que possui 24,0 kN/m<sup>3</sup>, o que representa 6,5 kN a menos por metro cúbico de concreto.

Para finalizar, deixo pontos que podem ser aprofundados acerca do comportamento do concreto leve, deixo como sugestão para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Avaliar a aderência do aço ao concreto leve estrutural;
- Avaliar modulo de elasticidade do concreto leve estrutural;
- Análise de durabilidade e resistência a corrosão;
- Estudo do comportamento ao cisalhamento do concreto leve estrutural;
- Avaliar o comportamento à tração.

## **6 REFERÊNCIAS**

- ALMEIDA, L. C. de. **Estudo sobre o comportamento de concretos de alta resistência em elevadas temperaturas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.** Farmington Hills, MI, 2003.
- ANGELIN, A. F. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade de concretos leves produzidos com argila expandida.** 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- ANGELIN, A. F.; JOHN, V. M.; JOLIVET, T. C. C.; BREGANON, R. **Durabilidade de concretos estruturais leves com argila expandida: carbonatação e penetração de cloretos.** In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Gramado, 2013. *Anais* [...]. São Paulo: IBRACON, 2013.
- ARAUJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado.** 4. ed. Rio de Janeiro: Dunas, 2010.
- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado.** 5. ed. Rio de Janeiro: Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO (ABCIC). **Manual Técnico: Lajes Alveolares Protendidas.** São Paulo: ABCIC, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto — Especificação.** Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço para concreto armado — Especificação.** Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.** Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 35: Concreto leve estrutural - Requisitos.** 1995.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- BEKTAS, F.; WANG, K.; CEYLAN, H. **Use of alternative materials in concrete.** In: ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING MATERIALS, 2012.

- BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves auto adensáveis**. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- BOTELHO, M. H. C. **Concreto armado eu te amo**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. **Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology and Applications**. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2002.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Agregados para a construção civil**. Brasília: DNPM, 2009. (Série Estatísticas e Economia Mineral).
- DÍAZ, J. M.; PÉREZ, J.; GÁLVEZ, J. C. Advances in concrete technology. **Structural Concrete**, v. 11, n. 1, p. 19-27, 2010.
- EUROLIGHTCON. **Properties of Lightweight Aggregate Concrete**. Document BE 96-3942/R1, European Union – Brite EuRam III, 1998.
- FERNANDES, G.; PORTO, M. **Estruturas de Concreto Armado**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.
- GOMES NETO, J. A. A. **Desenvolvimento de concretos de alto desempenho com argila expandida pré-umedecida e sílica ativa**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. 75-Year Report on the S.S. Atlantus. **Concrete International**, v. 16, n. 11, p. 27-32, 1994.
- IBRAHIM, M. A.; YAHAYA, M. H.; UMAR, A. A. Utilization of alternative materials in concrete production. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 8, n. 5, p. 394-400, 2013.
- INCORPORADORA COBRAZ (INCOBRAZ). **Manual Técnico: Lajes Treliçadas com EPS**. 2016.
- ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.
- KIM, H. Y.; PARK, S. S.; LEE, S. J.; CHUNG, L. Productivity of lightweight concrete in construction. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2009.
- MA, Y.; WU, H.; LI, X. Study on productivity and cost-benefit of structural lightweight aggregate concrete. **Applied Mechanics and Materials**, v. 405-408, p. 1178-1181, 2013.

MAYCÁ, L. C.; SILVA, F. A.; ALMEIDA, L. C. Classificação e propriedades do concreto leve. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEREIRA, F. M. **Durabilidade do concreto: Fatores influenciadores e métodos de avaliação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PEREIRA, R. R. B. **Avaliação do pré-dimensionamento de peças estruturais de concreto armado: vigas, lajes e pilares**. 2015. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 10. ed. Porto Alegre: Globo, 1995.

PINHEIRO, L. M. **Análise de Confiabilidade de Estruturas de Concreto Armado**. 2004. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PINHEIRO, L. M.; GONGO, J. S.; REIS, L. C. P. **Concreto Armado: Projeto Estrutural de Edifícios**. São Carlos: EESC-USP, 2021.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural com argila expandida: dosagem e propriedades**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. Comportamento tensão-deformação de concretos leves estruturais de alta resistência. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Recife, 2005. *Anais* [...]. São Paulo: IBRACON, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, C. H. Resistência à tração de concretos leves estruturais. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Bento Gonçalves, 2007. *Anais* [...]. São Paulo: IBRACON, 2007.

TEZUKA, M. **Concreto leve à base de argila expandida**. 1973. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

VASCONCELOS, A. C. **Cálculo de Concreto Armado**. São Paulo: Nobel, 1978.

VASCONCELOS, A. C. **O Concreto no Brasil: Recordações e subsídios para a sua história**. São Paulo: Pini, 1985.

## Anexo 1 -- Laudo Traço Concreto leve estrurual

31/07/13

SGTec - Relatório



**Título:** CONCRETO - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739/07 Nº: 157.64824

**Interessado:** 157 - CINEXPAN INDUSTRIA E COMERCIO DE ARGILA EXPANDIDA LTDA

**Endereço:** ESTRADA DO ROCHA, 355 BAIRRO DO MURSA VARZEA PAULISTA - SP CEP:13226-300

**Obra:** CINEXPAN - FÁBRICA

ESTRADA DO ROCHA, 355 BAIRRO DO

**Endereço:** MURSA VARZEA PAULISTA - SP      **Moldagem:** Qualitec  
CEP:13226-300

**Laboratório:** Qualitec São Paulo - Av. Dr. Silvio      **Equipamento** Máquina de Ensaios Digital, marca EMC, cap.  
Margarido n.º 12 - Butantã - São Paulo - SP      **Utilizado:** 2000KN. Calibrada RBC certificado n. 010/13  
validade 01/2014

**Central:** Central: LABORATÓRIO      **Slump** 100      **Especificado** Dimensões do CP (mm): 100X200      **(mm):** Tipo de Capeamento: RETIFICA

**Data da amostragem:** 02/07/2013

N. Série	N.F.	Volume (m³)	Slump Medido (mm)	fck (MPa)	Brita	Data da Moldagem	Resistência à compressão (MPa)			Peça Concretada
1941	-	-	180	30,0	-	02/07/2013	7 Dias 09/07 36,0	28 Dias 30/07 36,9		-

**Observações:** DOSAGEM EXPERIMENTAL

**Procedimento de Amostragem:** Conforme procedimento prescrito na NBR NM 33/98 e NBR 5738/08

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) lote(s) ensaiado(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste laboratório.

São Paulo, 30 de Julho de 2013.

**Eng. Laerte Brangioni Jr.**  
**Diretor**  
**CREA: 5061239790**

Relatório Qualitec N.157.64824 - Página 1 de 1