



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
ENGENHARIA CIVIL

ALTAIR ALVES GOMES

**Análise comparativa entre as flechas ocorridas em lajes treliçadas com uso de vigotas
convencionais e a Trelifácil®**

Delmiro Gouveia

2023

ALTAIR ALVES GOMES

Análise comparativa entre as flechas ocorridas em lajes treliçadas com uso de vigotas convencionais e a Trelifácil®

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Karlisson André Nunes da Silva.

Delmiro Gouveia

2023

Folha de Aprovação

ALTAIR ALVES GOMES

Análise comparativa entre as flechas ocorridas em lajes treliçadas com uso de vigotas convencionais e a Trelifácil®

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão e aprovado em 27 de junho de 2023.



Documento assinado digitalmente
KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA
Data: 24/08/2023 10:44:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Karlisson André Nunes da Silva, UFAL – Campus Sertão (Orientador)

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
KARLISSON ANDRE NUNES DA SILVA
Data: 24/08/2023 10:42:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Karlisson André Nunes da Silva, UFAL – Campus Sertão (Orientador)



Documento assinado digitalmente
NORA NEI JESICA OLIVEIRA SANTANA
Data: 24/08/2023 11:57:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Engenheira Civil - Nora Nei Jesica Oliveira Santana



Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA
Data: 24/08/2023 11:49:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Engenheiro Civil MSc. Jorge Luis Oliveira Silva

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

G633a Gomes, Altair Alves

Análise comparativa entre as flechas ocorridas em lajes treliçadas com uso de vigotas convencionais e a Trelifácil® / Altair Alves Gomes. - 2023.

81 f. : il.

Orientação: Karlisson André Nunes da Silva.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2023.

1. Engenharia Civil. 2. Construção civil. 3. Concreto armado. 4. Laje treliçada. 5. Treliça. 6. Trelifácil. I. Silva, Karlisson André Nunes da. II. Título.

CDU: 624.012.45

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida recebido e pela força de continuar seguindo adiante.

Aos meus pais, João Alves Gomes (memória) e Josefa Rodrigues Gomes, por todo o esforço que fizeram desde meu nascimento, para que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos, Maria de Jesus Alves e Odair Alves que sempre me apoiaram.

À minha mãe do coração Ilda Gama, que me acolheu em sua casa num momento de incertezas e me encorajou.

Quero agradecer aos amigos que a UFAL me proporcionou: Beatriz Marques; Belane Guimarães; Douglas Oliveira; Gabriel Pereira; Iêda Pereira; Mônica Costa; Rickelly Gonçalves; Victor Melo, pelos desafios, incentivos e conquistas obtidos em cada disciplina. Aos amigos que conheci nos estágios e que compartilhamos grandes momentos de aprendizado: Adriano Vieira; Brunna Souza; Edton Costa; Kimberlly Ferreira; Laura Ferreira; Matheus Barros.

Ao engenheiro civil Rodrigo Sá, por todo o suporte dado no meu primeiro estágio, no Hospital Regional do Alto Sertão (HRAS). Ao engenheiro civil e secretário municipal de planejamento do município de Delmiro Gouveia, Marciel Penha, pelos conhecimentos compartilhados. Aos engenheiros civis Júnior Gomes e Cecília Moreira pela confiança e oportunidade de estágio na MOG Engenharia.

Agradeço à minha namorada, Fábiana Ferreira, presente de Deus que conheci nos últimos períodos do curso, a qual tenho enorme admiração e apreço, e que me trouxe leveza e inspiração.

Agradeço a todos os profissionais da UFAL que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação.

Sou grato ao professor Karlisson Silva pelo convite aceito em ser o orientador deste trabalho e pela confiança depositada à minha proposta.

RESUMO

Sendo um material composto pela junção de outros materiais, o concreto é um excelente aliado na construção civil, por apresentar boa trabalhabilidade (de acordo com a necessidade do projeto) e facilidade de replicação em qualquer parte do mundo. Combinado ao aço, é formado o concreto armado onde é possível moldar vários elementos com formas e características desejadas, tais como estruturas: pilares, vigas, lajes, painéis e paredes. Contudo, há limitações na aplicação do concreto estrutural, sejam elas de projeto, construção, econômicas ou que envolvam a segurança da estrutura e de seus usuários. O concreto deve atender alguns critérios e especificações de segurança estabelecidos em normas brasileiras, regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para este trabalho, serão realizadas comparações dentro de um sistema construtivo específico para lajes, o de lajes treliçadas, que é muito empregado no Brasil. A análise será feita, verificando as flechas visuais desenvolvidas, entre lajes treliçadas construídas com vigotas tradicionais e lajes construídas com o sistema Trelifácil®, que é um produto recente no mercado, a fim de observar sua eficiência em relação às vigotas comuns. Os resultados obtidos mostram uma eficiência em cerca de 50% na redução das flechas formadas nas lajes confeccionadas com o uso da Trelifácil® em relação às com vigotas comuns, desconsiderando a contribuição da base de concreto presente nestas vigotas. Ao considerar a base de concreto, a eficiência da Trelifácil® cai e assume valor negativo, ficando em torno de 15% menor que as vigotas comuns, significando um aumento nas flechas.

Palavras-chave: Construção Civil. Concreto Armado. Lajes treliçadas. Flechas. Treliça. Trelifácil®.

ABSTRACT

As a material composed by the junction of other materials, the concrete is an excellent ally in civil construction, because it has good workability (according to the needs of the project) and is easy to replicate anywhere in the world. Combined with steel, reinforced concrete is formed where it is possible to mold various elements with desired shapes and characteristics, such as structures: pillars, beams, slabs, panels and walls. However, there are limitations in the application of structural concrete, whether they are design, construction, economic or involving the safety of the structure and its users. Concrete must meet some safety criteria and specifications established in Brazilian standards, governed by the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). For this work, comparisons will be made within a specific building system for slabs, the lattice slabs, which is widely used in Brazil. The analysis will be done, verifying the deflection developed, between truss slabs built with traditional joists and slabs built with the Trelifácil® system, which is a recent product on the market, in order to observe the efficiency of this in relation to that one. The results obtained show an efficiency of about 50% in the reduction of the deflections formed in the slabs made using Trelifácil® compared to those with common joists, disregarding the contribution of the concrete base present in these joists. When considering the concrete base, the efficiency of Trelifácil® drops and takes on a negative value, being around 15% lower than common joists, meaning an increase in the deflections.

Keywords: *Civil Construction. Reinforced Concrete. Lattice Slab. Deflections. Truss. Trelifácil®.*

“A suma felicidade do homem encontra-se na contemplação da verdade”

(São Tomás de Aquino)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classes de resistência de concretos estruturais.....	19
Figura 2: Diagrama tensão-deformação idealizado	22
Figura 3: Estádio I de deformação do concreto.....	23
Figura 4: Estádio II de deformação do concreto	23
Figura 5: Estádio III de deformação do concreto	24
Figura 6: Simplificação do diagrama parabólico retangular	24
Figura 7: Linha neutra, borda comprimida e borda tracionada.....	25
Figura 8: Linha neutra, borda comprimida e borda tracionada.....	26
Figura 9: Flecha total em elemento linear ou de placa	31
Figura 10: Flecha imediata, flecha diferida no tempo e flecha final.....	32
Figura 11: Corpos de prova com juntas frias horizontais, diagonais e verticais.....	33
Figura 12: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 7 dias.....	34
Figura 13: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 14 dias.....	35
Figura 14: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 28 dias.....	35
Figura 15: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 7 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão	36
Figura 16: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 14 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão.....	36
Figura 17: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 28 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão.....	37
Figura 18: Elementos constituintes uma laje treliçada	38
Figura 19: Vigotas treliçadas dispostas sobre vãos para confecção de lajes.....	39
Figura 20: Elementos de uma laje treliçada	40
Figura 21: Corte e detalhes de uma laje treliçada.....	40
Figura 22: Detalhes e elementos de uma armadura treliçada.....	41
Figura 23: Detalhes da vigota treliçada.....	42
Figura 24: Perfil de uma vigota treliçada	42
Figura 25: Detalhes dos enchimentos	43
Figura 26: Escoramento para sistema de laje treliçada.....	44

Figura 27: Laje com flecha acentuada.	44
Figura 28: (a) O Produto Trelifácil® – (b) Dimensões da Trelifácil®	45
Figura 29: Elementos da Trelifácil®	45
Figura 30: Trelifácil® dispostas em vãos para confecção de lajes	46
Figura 31: Comparação de concretagem entre treliça comum e Trelifácil®	46
Figura 32: Representação gráfica da Hipótese 1 (considerando o concreto da base da vigota) ...	48
Figura 33: Representação gráfica da Hipótese 2 (desprezando o concreto da base da vigota)	49
Figura 34: Representação gráfica da Hipótese 3 (uso da Trelifácil®)	49
Figura 35: Largura da nervura considerada	49
Figura 36: Viga de seção “T” composta por vigota treliçada e capa de concreto	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$	28
Tabela 2: Coeficiente γ_{f2}	29
Tabela 3: Valores dos coeficientes γ_c e γ_s	29
Tabela 4: Limites para deslocamentos	32
Tabela 5: Divisão dos CPs por ensaios, formação de junta fria e idade do concreto	34
Tabela 6: Dimensões e tolerâncias (medidas em “mm”) padronizadas para vigotas treliçadas ..	43
Tabela 7: Características do Concreto e do Aço	58
Tabela 8: Características das treliças.....	58
Tabela 9: Características dos enchimentos	59
Tabela 10: Características das lajes	59
Tabela 11: Cargas de Peso Próprio (kN/m ²) para cada laje com capa de 5 cm.....	60
Tabela 12: Cargas de Contrapiso, Piso, Forro e Utilização comuns para todas as lajes	60
Tabela 13: Carregamento total e por vigota para cada laje (Hipóteses 1, 2 e Trelifácil®)	62
Tabela 14: Combinação normal última, Momento fletor e armaduras	62
Tabela 15: Armaduras efetivas (Hipóteses 1 e 2)	62
Tabela 16: Armaduras efetivas (usando Trelifácil®).....	63
Tabela 17: Combinações quase permanente de ações.....	64
Tabela 18: Características Geométricas das lajes - Estádio I	65
Tabela 19: Características Geométricas das lajes - Estádio II.....	68
Tabela 20: Momento atuante e de fissuração para as lajes	69
Tabela 21: Resultado das flechas para as lajes.....	72
Tabela 22: Comparação dos resultado das flechas para as lajes	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparação das flechas para a Hipótese 1	74
Gráfico 2: Comparação das flechas para a Hipótese 2	74
Gráfico 3: Resultado geral do aumento e redução percentual nas flechas	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	50
Equação 2	50
Equação 3	50
Equação 4	51
Equação 5	51
Equação 6	52
Equação 7	52
Equação 8	52
Equação 9	53
Equação 10	53
Equação 11	53
Equação 12	53
Equação 13	53
Equação 14	53
Equação 15	54
Equação 16	54
Equação 17	55
Equação 18	55
Equação 19	56
Equação 20	56
Equação 21	57
Equação 22	59
Equação 23	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Problema da Pesquisa	17
1.2. Objetivo geral	17
1.3. Objetivos específicos	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Concreto	18
2.2. Resistência Mecânica Característica do Concreto à Compressão (f_{ck})	19
2.3. Módulos de Elasticidade (E) do Concreto e do Aço	19
2.4. Estados Limites	20
2.4.1. Estado-Limite Último (ELU)	20
2.4.2. Estados Limites de Serviço (ELS)	21
2.5. Estádios de Deformação do Concreto	21
2.5.1. Fissuração	21
2.5.2. Estádio I	22
2.5.3. Estádio II	23
2.5.4. Estádio III	24
2.5.5. Linha Neutra	25
2.5.6. Características geométricas de seções no Estádio I	25
2.5.7. Características geométricas de seções no Estádio II	26
2.6. Ações	26
2.6.1. Ações Permanentes	27
2.6.2. Ações Variáveis	27
2.6.3. Ações Excepcionais	27
2.7. Coeficientes de Ponderação das Ações e Valores de Cálculo de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8681:2003	28
2.7.1. Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU)	29
2.7.2. Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite de serviço (ELS)	30
2.8. Momento de Fissuração e Inércia de Branson	30
2.9. Flechas	31
2.9.1. Flecha Imediata	31
2.9.2. Flecha diferida no tempo	31
2.9.3. Limites para flechas	32
2.10. Junta Fria de Concretagem	32
2.11. Lajes Pré-fabricadas	38
2.11.1. Vantagens e Desvantagens	38
2.11.2. Lajes Treliçadas	39
2.11.3. Elementos de uma laje treliçada	41
2.12. Sistema Trelifácil®	45
3. METODOLOGIA	48
3.1. Cálculo do Módulo de elasticidade do concreto	50
3.1.1. Módulo de elasticidade inicial	50
3.1.2. Módulo de elasticidade secante	50

3.2. Características geométricas da seção	51
3.2.1. Características geométricas de seções no Estádio I	51
3.2.2. Características geométricas de seções no Estádio II	52
3.2.3. Cálculo do Momento de Fissuração	54
3.2.4. Cálculo da Inércia média de Branson	54
3.2.5. Cálculo da Flecha Imediata	55
3.2.6. Cálculo da Flecha diferida no tempo	56
3.2.7. Cálculo da Flecha total	57
3.3. Apresentação dos cálculos para a laje L1	57
3.3.1. Módulos de elasticidade do concreto	57
3.3.2. Características dos materiais utilizados	58
3.3.3. Determinação das cargas	59
3.3.4. Resultado das armaduras de tração	62
3.3.5. Cálculo das flechas	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.1. Sugestões para pesquisas futuras	76
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

O ato de se abrigar está presente na evolução humana desde os tempos mais longínquos, tendo como objetivo primário a sua proteção em relação aos perigos externos, seja dos animais selvagens ou das intempéries (LOURENÇO e BRANCO, 2012). Inicialmente, o homem não tinha um abrigo fixo, era nômade e permanecia temporariamente numa região enquanto houvesse do que se alimentar, exercia as atividades de caçar e coletar o que o local oferecia. Durante esse tempo, ele se recolhia em abrigos naturais, como cavernas e grutas esculpidas em montanhas. Quando ocorria a escassez do alimento, ele partia em busca de outras terras. (MAZOYER e ROUDART, 2010)

Com o passar do tempo, devido aos conhecimentos e habilidades adquiridos e aprimorados, tais como o plantio – agricultura – e a criação de animais – pecuária – (MAZOYER e ROUDART, 2010), o homem passou a permanecer na região e ali viver em comunidade. Por meio dessa mudança, veio a necessidade de construir abrigos (as cavernas não existiam em todos lugares e a localização das mesmas nem sempre eram favoráveis). Neste processo, o homem foi testando vários materiais, utilizando o que a região dispunha, desde madeira (galhos e troncos de árvores), folhas, fibras vegetais (cipós e palhas), argila, pedras (LOURENÇO e BRANCO, 2012), e foi percebendo que nem todos apresentavam as qualidades e dimensões desejadas para construir seus lares, sendo necessária a transformação e padronização dos materiais.

Séculos passaram e, com eles, o homem desenvolveu técnicas de construção e as aperfeiçoou. Até então, o homem utilizava materiais com dimensões enormes, ao exemplo dos blocos de pedra utilizados na construção de imponentes templos, castelos, mausoléus (pirâmides) associados a um tipo de material similar ao concreto que temos hoje. Veio o advento da revolução industrial e, com ela, as inovações tecnológicas, dentre elas o concreto armado que, segundo Andrade (2016), surgiu na França, entre 1849 e 1861, sendo o resultado da combinação de uma argamassa de cimento e barras/fios/tela de aço. Com esse novo material, o homem pôde vencer obstáculos maiores utilizando um material capaz de ser moldado e assumir dimensões reduzidas e desejadas.

A partir deste ponto, várias construções passaram a utilizar o concreto armado como base principal, tais como: pontes; reservatórios e prédios. Estes últimos, em especial, se estendendo verticalmente, receberam o nome de arranha-céu, dada às suas alturas cada vez maiores. As edificações com vários andares, onde cada piso está em um nível diferente do outro em relação ao solo, é realidade presente em muitos centros urbanos, até mesmo nos interiores.

Seja destinado ao comércio ou à moradia, deve-se ter muita atenção ao conceber o projeto estrutural de uma edificação, uma vez que os processos construtivos, em particular os das lajes (maciças, nervuradas, treliçadas, etc.), devem ser escolhidos com base nas técnicas disponíveis que proporcionem melhor economia e segurança.

O mal dimensionamento de lajes acarretam uma série de patologias, comprometendo o desempenho da estrutura e gerando desconfortos aos usuários da edificação, pois, nessas condições os elementos apresentam fissuras, causadas por flechas excessivas, o que gera a sensação de insegurança. Na pior das hipóteses a estrutura pode entrar em ruína e causar grandes danos materiais e até humanos. Por isso, as flechas são um ponto de grande importância a ser considerado no dimensionamento das lajes.

1.1. Problema da Pesquisa

O sistema de laje treliçada utilizado comumente no Brasil é uma ótima escolha em relação ao sistema de lajes maciças, pois agiliza a construção e, ainda, gera economia de materiais (concreto utilizado na capa e nas bases das vigotas). Contribui, também, para a redução do peso próprio da estrutura, pois o material utilizado como enchimento, na região de tração, possui menor peso específico que o concreto armado.

Contudo, este sistema, por possuir menor rigidez (devido às regiões de tração em quem não há concreto estrutural entre as vigotas) que o de laje maciça, apresenta algumas limitações, especialmente, quando se trata de vencer grandes vãos, o que está diretamente ligado na formação de flechas consideráveis.

1.2. Objetivo geral

Analisar a eficiência da aplicação do sistema Trelifácil® na confecção de lajes piso em relação ao sistema usual de lajes treliçadas com vigotas com base de concreto, no que tange a redução das flechas.

1.3. Objetivos específicos

Avaliar a contribuição da junta fria formada entre o concreto da base das vigotas comuns e o concreto lançado na confecção da laje in loco.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme o item 14.4.1 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, elementos estruturais lineares possuem seu comprimento longitudinal superando a maior dimensão da seção transversal em pelo menos três vezes. As vigotas treliçadas, utilizadas na confecção de lajes treliçadas, se enquadram nessa definição. Estes elementos são submetidos predominantemente ao esforço de flexão, e com isso são desenvolvidas deformações verticais, deslocamentos perpendiculares ao seu comprimento. Essas deformações são representadas por flechas, definidas como um deslocamento máximo no elemento estrutural.

Os fatores que influenciam na magnitude das flechas são vários. O *American Concrete Institute* (ACI) 435R-95 (2003) cita alguns deles, como o carregamento; o vão e as condições de apoio do elemento estrutural; as propriedades geométricas de sua seção transversal; as propriedades dos materiais utilizados; a fissuração, a retração e a fluência do concreto; as taxas de armadura de tração e de compressão e o processo de execução e cura da estrutura. Dos fatores citados, o vão e o carregamento os fatores que colaboram direta e proporcionalmente para a variação dos deslocamentos.

Com relação ao concreto, material utilizado na confecção de estruturas, a propriedade que apresenta interferência direta no cálculo das flechas imediatas é o módulo de elasticidade, como aborda o item 17.3.2.1 da ABNT NBR 6118:2014.

2.1. Concreto

Para Mehta e Monteiro (2008), o concreto é um material que possui em sua composição um meio aglomerante, onde os grãos de agregados estão unidos. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água. Segundo Carvalho e Filho (2014), o concreto é um material composto por cimento, agregados e água. No qual, ao juntar esses materiais entre si, resultam:

- ✓ Pasta: cimento + água;
- ✓ Argamassa: pasta + agregado miúdo;
- ✓ Concreto simples: argamassa + agregado graúdo.

2.2. Resistência Mecânica Característica do Concreto à Compressão (f_{ck})

Segundo Mehta e Monteiro (2008), define-se a resistência de um material como a capacidade de resistir às tensões solicitadas sem se romper. A sigla f_{ck} é a abreviação da expressão em inglês *feature compression know* (em tradução livre: resistência à compressão conhecida do concreto – GIL, PALENCIA, MONTEIRO E GARCÍA, 2022).

A ABNT NBR 6118:2014 define a resistência do concreto como a resistência característica à compressão que o concreto alcançará após 28 dias do seu processo de cura, e é determinada tomando corpos de prova em um espaço amostral em que, no máximo, 5% destes podem apresentar valores inferiores ao desejado.

O concreto estrutural é classificado em dois grupos pela ABNT NBR 8953:2015 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, conforme apresentado na **Figura 1**.

Figura 1: Classes de resistência de concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: ABNT NBR 8953:2015

2.3. Módulos de Elasticidade (E) do Concreto e do Aço

Conhecido também como módulo de *Young*, o módulo de elasticidade (E) é a propriedade mecânica de um material que depende, diretamente, de sua constituição (metal, borracha, concreto, etc.). Este módulo relaciona a ação das tensões impostas ao material com sua deformação (PACHECO, 2019).

Por ser um composto formado por diversos materiais, com cada um possuindo um módulo de elasticidade distinto, o concreto apresenta característica heterogênea e isso faz com

que sua curva tensão-deformação ocorra de maneira não linear. Mehta e Monteiro (2008) falam que a relação entre resistência e módulo de elasticidade do concreto está diretamente relacionado ao seu grau de porosidade, quanto mais poroso é o concreto, menor será sua resistência e, por conseguinte, menor será seu módulo de elasticidade.

Para o cálculo das estruturas, de modo a garantir a segurança e a estabilidade global, a ABNT NBR 6118:2014 apresenta dois módulos de elasticidades para o concreto: o **módulo de elasticidade tangente inicial** (E_{ci}) e o **módulo de elasticidade secante** (E_{cs}).

O módulo de elasticidade tangente inicial é uma característica que depende, principalmente, da classe de resistência do concreto (f_{ck}) e das propriedades do agregado graúdo utilizado. Segundo a ABNT NBR 6118:2014, item 8.2.8, na impossibilidade de realização de ensaios para determinação de seu valor, pode-se estimá-lo por meio de uma expressão que será apresentada no capítulo 3 deste trabalho. O módulo de elasticidade secante é utilizado, de maneira especial, para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço (ELS). Este módulo depende do valor do módulo tangente inicial.

Com relação ao módulo de elasticidade do aço, a ABNT NBR 6118:2014 diz, em seu item 8.3.5, que na falta de ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante, seu valor pode ser admitido igual a 210 GPa.

2.4. Estados Limites

Estado Limite é a condição que define se o uso de uma estrutura é impróprio, seja por razões de segurança, funcionalidade ou estética, desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de funcionamento por motivo da ruína de um ou mais de seus componentes (GUIA DA ENGENHARIA, 2018). Falando de outro modo, é o estado em que a estrutura deixa de atender os requisitos para um funcionamento de forma plena e adequada ou até mesmo quando seu uso é interrompido por razão de um colapso na estrutura. Em seu item 10.2, a ABNT NBR 6118:2014, apresenta dois tipos de estados limites: Estado-Limite Último (ELU) e Estado-Limite de Serviço (ELS).

2.4.1. Estado-Limite Último (ELU)

O ELU relaciona-se ao estado em que a estrutura já não pode mais ser utilizada devido ao colapso de sua capacidade resistente e, conseqüente, risco iminente à segurança de seus usuários. Segundo a ABNT NBR 8681:2003 Ações e segurança nas estruturas – Procedimento,

item 4.1.1, devem ser considerados, usualmente, no projeto estrutural, os estados limites últimos caracterizados por: perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido; ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático; instabilidade por deformação; instabilidade dinâmica.

2.4.2. Estados Limites de Serviço (ELS)

Os ELS são os critérios de segurança que estão relacionados ao conforto para os usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de um modo geral. Estando a estrutura fora dos padrões normais de funcionamento. A ABNT NBR 8681:2003, no item 4.1.2, considera para o período de vida útil da estrutura, os estados limites de serviços que caracterizam: danos ligeiros ou localizados, que comprometam o aspecto estético da construção ou a durabilidade da estrutura; deformações excessivas que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético; vibração excessiva ou desconfortável.

A mesma norma ainda diz que os ELS são decorrentes de ações em que as combinações podem assumir três diferentes ordens de grandeza de permanência na estrutura, sendo elas:

- **combinações quase permanentes:** combinações que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, da ordem da metade deste período;
- **combinações frequentes:** combinações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 10^5 vezes em 50 anos, ou que tenham duração total igual a uma parte não desprezível desse período, da ordem de 5%;
- **combinações raras:** combinações que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura.

2.5. Estádios de Deformação do Concreto

2.5.1. Fissuração

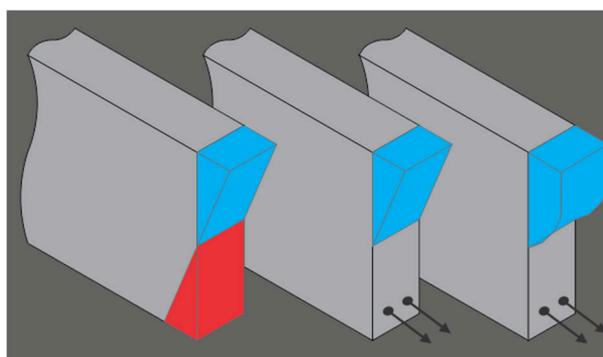
Barbosa (2010) diz que a fissuração é uma característica do concreto e que, em uma peça de concreto armado, o grau de fissuração irá depender da intensidade do carregamento atuante,

da qualidade do concreto, da quantidade de armadura, do processo de cura, da desforma e do escoramento.

Os estádios de deformação são situações cujo elemento de concreto solicitado trabalha até atingir sua ruptura em determinado ponto. São fases que uma seção de concreto passa quando submetida a diversos carregamentos e são divididas em três: Estádio I, Estádio II e Estádio III (PINHEIRO, MUZARD e SANTOS, 2003). O diagrama possui um trecho inicial, linear, em que há uma proporcionalidade entre as tensões e as deformações. Em determinado ponto, o gráfico assume a forma de uma parábola idealizada. Neste ponto, o concreto, após atingir uma deformação específica, começará a plastificar.

A **Figura 2** apresenta um resumo contendo a distribuição de tensões em seções que caracterizam os três estádios.

Figura 2: Diagrama tensão-deformação idealizado



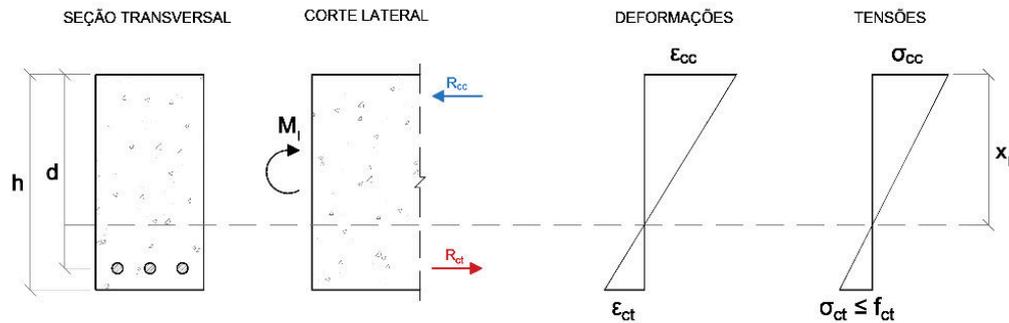
Fonte: Spot Cursos (2022)

2.5.2. Estádio I

Esta fase corresponde ao início do carregamento. As tensões normais que surgem são de baixa magnitude e dessa forma o concreto consegue resistir às tensões de tração. Tem-se um diagrama linear de tensões, ao longo da seção transversal da peça, sendo válida a lei de Hooke. É no estágio I que é feito o cálculo do momento de fissuração, que separa o estágio I do estágio II. Conhecido o momento de fissuração, é possível calcular a armadura mínima, de modo que esta seja capaz de absorver, com adequada segurança, as tensões causadas por um momento fletor de mesma magnitude (PINHEIRO, MUZARD e SANTOS, 2003).

A **Figura 3** apresenta a configuração deste estádio.

Figura 3: Estádio I de deformação do concreto



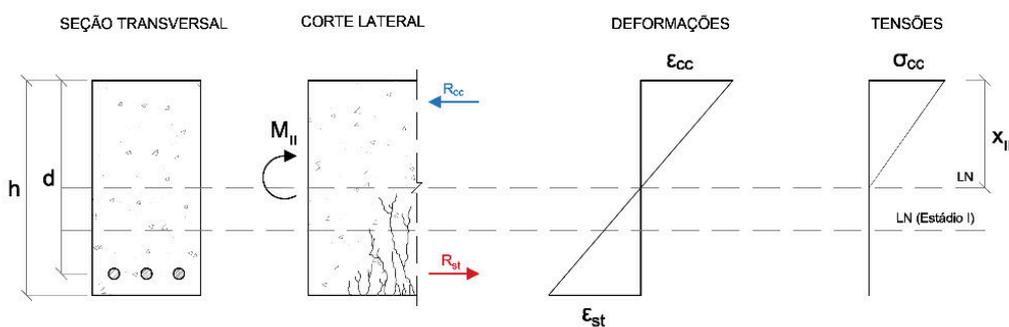
Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2003)

2.5.3. Estádio II

Pinheiro, Muzard e Santos (2003) dizem que “neste nível de carregamento, o concreto não mais resiste à tração e a seção se encontra fissurada na região de tração. A contribuição do concreto tracionado deve ser desprezada”. Denominado de estado de fissuração, o Estádio II (**Figura 4**) ainda apresenta o diagrama de tensões com distribuição linear, permanecendo válida a Lei de Hooke.

Neste estágio são realizadas verificações do ELS, como por exemplo: ELS abertura de fissuras e ELS deformações excessivas (flechas). A armadura sofre um aumento de tensão, podendo escoar ou não.

Figura 4: Estádio II de deformação do concreto

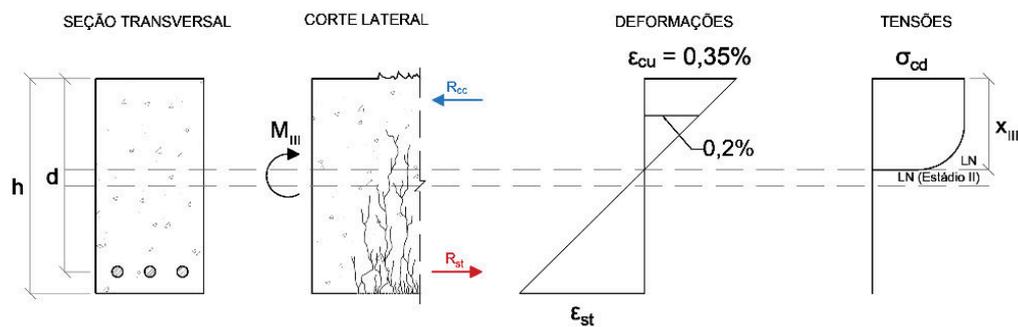


Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2003)

2.5.4. Estádio III

O início deste Estádio é caracterizado pela plastificação da região comprimida do concreto. O elemento se encontra bastante fissurado, próximo de atingir a ruptura. A distribuição de tensões deixa de ser linear, com o diagrama assumindo a forma de uma parábola retangular (PINHEIRO, MUZARD e SANTOS, 2003). Todas as tensões de tração são resistidas pelo aço. A carga aplicada gera fissuras na região tracionada. (Figura 5).

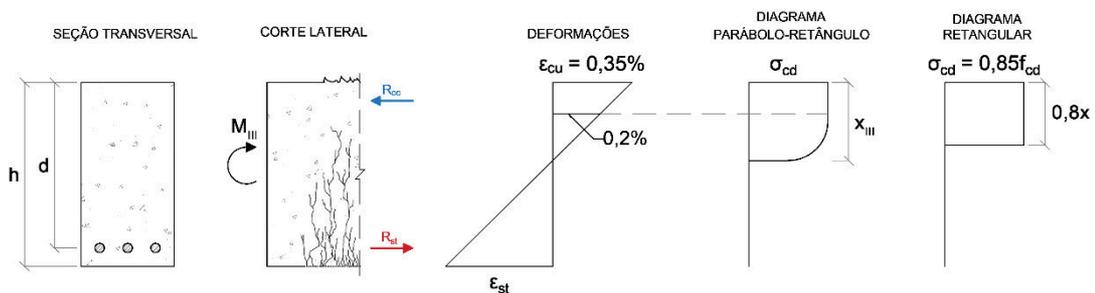
Figura 5: Estádio III de deformação do concreto



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2003)

A ABNT NBR 6118:2014, na alínea “e” do item 17.2.2, permite uma simplificação deste diagrama adotando um diagrama retangular equivalente (Figura 6) para concretos das classes C20 a C50. Neste estágio é realizado o dimensionamento no ELU.

Figura 6: Simplificação do diagrama parabólico retangular

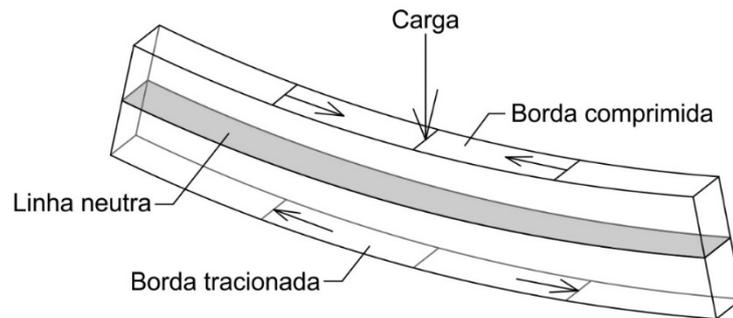


Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2003)

2.5.5. Linha Neutra

A localização da posição da linha neutra é importante na análise dos esforços pois neste ponto as tensões de compressão e tração são consideradas nulas (SOUSA, 2021). Esta linha separa as regiões onde ocorre essas tensões, conforme mostra a **Figura 7**.

Figura 7: Linha neutra, borda comprimida e borda tracionada.

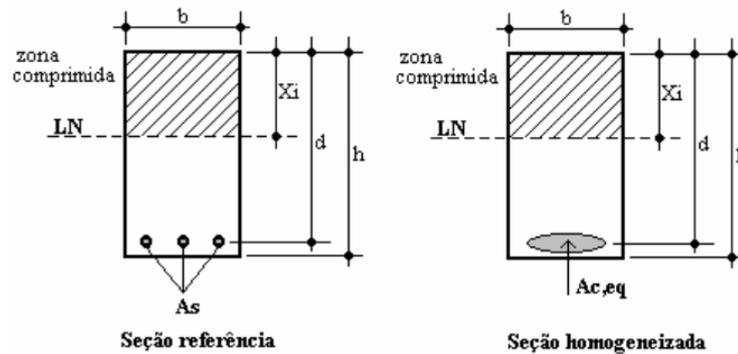


Fonte: Nelso Schneider (2019)

2.5.6. Características geométricas de seções no Estádio I

Carvalho e Filho (2014) falam que no dimensionamento das peças de concreto armado é necessário que o concreto e o aço trabalhem em conjunto, como uma peça solidária, de modo que os esforços sejam transmitidos de um material para o outro. Para isso, a aderência entre o concreto e as barras de aço deve ser assegurada. Com a solidarização entre os materiais, a armadura presente na peça contribui para a ligeira alteração da posição do centro de gravidade da seção (y_g) e, também, de sua inércia (I_I). Para compensar essa situação é realizada a homogeneização da seção, que é a consideração de uma área de concreto equivalente ($A_{c,eq}$) à área de aço existente (A_s), ou seja, a área de aço é convertida em uma área de concreto equivalente, como mostrado na **Figura 8**.

Figura 8: Linha neutra, borda comprimida e borda tracionada.



Fonte: Camacho (2009)

Conforme Alves (2018), após a homogeneização da seção é possível calcular as características geométricas da seção, como: área homogeneizada, centroide e momento de inércia. Essas características são importantes na verificação da deformação excessiva do ELS.

2.5.7. Características geométricas de seções no Estádio II

Assim como realizado para o Estádio I, é necessário calcular o momento de inércia para o Estádio II, uma vez que, conforme apresentado no item 2.5.3, neste estágio, atua um momento fletor que supera o momento de fissuração da seção, com isso, reduzindo a seção de concreto que, na zona tracionada, se encontra fissurada em toda a extensão da peça e, assim, tendo sua contribuição desprezada, ficando a armadura responsável por resistir o esforço de tração. Para se calcular o momento de inércia no Estádio II, é necessário conhecer a posição da linha neutra (x_{II}).

2.6. Ações

Carvalho e Filho (2014) denominam ação “como qualquer influência ou conjunto de influências que é capaz de produzir estado de tensão ou deformação em uma estrutura”. O item 4.2.1 da ABNT NBR 8681:2003 classifica as ações em três categorias, de acordo com sua variabilidade no tempo: **permanentes, variáveis e excepcionais**.

2.6.1. Ações Permanentes

São as ações que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida da construção. Também são consideradas permanentes as ações que aumentam no tempo, tendendo a um valor-limite constante (ABNT NBR 6118:2014, item 11.3).

As ações permanentes são divididas em: direta e indireta. Ações permanentes diretas: constituídas pelo peso próprio da estrutura, pelos pesos elementos construtivos fixos, das instalações permanentes e dos empuxos permanentes (ABNT NBR 6118:2014, item 11.3.2). Ações permanentes indiretas: são constituídas pelas deformações impostas por retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e protensão (ABNT NBR 6118:2014, item 11.3.3).

2.6.2. Ações Variáveis

O item 4.2.1.2 da ABNT NBR 8681:2003 diz que “Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenação, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Em função de sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais”.

As ações variáveis são classificadas em variáveis diretas e variáveis indiretas. Ações variáveis diretas: São constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção pela ação do vento e da água (ABNT NBR 6118:2014, item 11.4.1). Ações variáveis indiretas: são causadas por variações uniformes e não- uniformes de temperatura e por ações dinâmicas (ABNT NBR 6118:2014, item 11.4.2).

2.6.3. Ações Excepcionais

Consideram-se como excepcionais as ações decorrentes de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Os incêndios, ao invés de serem tratados como causa de ações excepcionais, também podem ser levados em conta por meio de uma redução da resistência dos materiais constitutivos da estrutura (ABNT NBR 8681:2003, item 4.2.1.3).

A ABNT NBR 6118:2014, no item 11.2.1, destaca: “Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados limites últimos e os de serviço.”

2.7. Coeficientes de Ponderação das Ações e Valores de Cálculo de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8681:2003

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, item 11.7, as ações devem ser consideradas majorando-as pelos respectivos coeficientes de ponderação γ_f . Os valores para $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$ é apresentado na **Tabela 1** (Tabela 11.1 da ABNT NBR 6118:2014).

Tabela 1: Coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

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

onde

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

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Os valores para $\gamma_f = \gamma_{f2}$ é apresentado na **Tabela 2** (Tabela 11.2 da ABNT NBR 6118:2014).

Tabela 2: Coeficiente γ_{f2}

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para valores de ψ_1 relativos as pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.

^b Edifícios residenciais.

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.7.1. Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU)

Conforme traz o item 11.6.3 da ABNT NBR 6118:2014, os valores de cálculo das ações (F_d) são determinados tomando seus valores característicos, majorando-os pelos seus coeficientes de ponderação γ_f (Tabela 1 e Tabela 2).

Os valores de cálculo f_d das resistências são obtidos a partir dos valores característicos, minorando-os pelos respectivos coeficientes de ponderação γ_m do material analisado. Para o concreto, o valor do coeficiente de ponderação das resistências, γ_m , recebe o nome γ_c e para o aço, γ_m assume a nomenclatura γ_s . Os valores assumidos por γ_c e γ_s são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos coeficientes γ_c e γ_s

Combinações	Concreto γ_c	Aço γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.7.2. Coeficientes de ponderação das ações no estado-limite de serviço (ELS)

O Estado-Limite de Serviço está relacionado com: durabilidade, aparência, conforto do usuário, funcionalidade da estrutura. De acordo com ABNT NBR 6118:2014, não é necessário aplicar a redução das resistências no estado-limite de serviço, assim, $\gamma_m = 1,0$. Os fatores de combinação ψ_0 , indicados na Tabela 11.2 da ABNT NBR 6118:2014 estão apresentados na **Tabela 2**, juntamente com os fatores de redução ψ_1 e ψ_2 referentes às combinações de serviço, sendo:

γ_{f2} : 1 para combinações raras;

γ_{f2} : ψ_1 para combinações frequentes;

γ_{f2} : ψ_2 para combinações quase permanentes.

De acordo com o item 5.1.5 da ABNT NBR 8681:2003: “nas combinações de serviço são consideradas todas as ações permanentes, inclusive as deformações impostas permanentes, e as ações variáveis correspondentes a cada um dos tipos de combinações”.

Como visto no item 2.4.2 deste capítulo, as combinações de ações para o ELS são: combinações quase permanente; combinações frequentes e combinações raras. Para o cálculo das flechas e verificação da deformação excessiva (ELS-DEF) é utilizada a combinação quase permanente, que, de acordo com o item 4.1.2.2 da ABNT NBR 8681:2003, envolve as ações que podem atuar durante grande parte da vida útil da estrutura. Nesta combinação, todas as ações variáveis são tidas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{Qk}$.

2.8. Momento de Fissuração e Inércia de Branson

O momento de fissuração, previsto na ABNT NBR 6118:2014, é o limite que separa o Estádio I e Estádio II. Pode-se considerar que ele é o momento máximo que a seção pode suportar sem que ocorra fissuração na peça. O momento de fissuração é utilizado no cálculo da Inércia de Branson, que é a inércia média para peças de concreto armado que estão trabalhando, parcialmente, nos Estádios I e II de deformação.

2.9. Flechas

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2015), flecha é o deslocamento transversal máximo de uma barra reta ou placa. Este deslocamento depende, principalmente, dos carregamentos impostos, tamanho do vão considerado, condições de vinculação, efeito das ações das cargas de longa duração e fluência do concreto, no qual a peça se deforma, formando uma “barriga”. Vigas e lajes, são os principais elementos onde a verificação das flechas se faz necessária. A **Figura 9** ilustra a flecha total nesses elementos.

Figura 9: Flecha total em elemento linear ou de placa



Fonte: Engenheiro Planilheiro (2019).

No dimensionamento de lajes com vigotas treliçadas, de acordo com Carvalho e Filho (2014), o cálculo das flechas é de suma importância, pois é um fator que mais apresenta desafios. A flecha total é composta por duas parcelas: as deformações ocorridas da deformação imediata e da deformação ao longo da ação do tempo.

2.9.1. Flecha Imediata

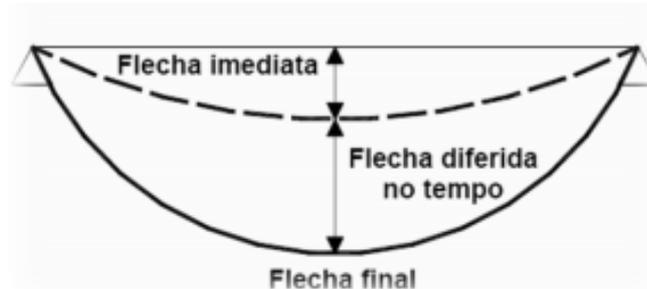
É a flecha que surge no momento de aplicação dos esforços (CAMACHO, 2005). Em seu cálculo é considerada a peça trabalhando, simultaneamente, nos Estádios I e II, em que apresenta seções não fissuradas e fissuradas, utilizando para isso a rigidez equivalente. A flecha imediata depende das condições de vinculações dos apoios da estrutura.

2.9.2. Flecha diferida no tempo

A flecha diferida no tempo é causada pela ação de cargas de longa duração, no qual o elemento estrutural é submetido. Essa deformação ocorre devido os efeitos de fluência e retração do concreto (MANFREDINI, 2003). Para Almeida (2010), a magnitude desse deslocamento tende a ser maior que o deslocamento imediato.

A **Figura 10** mostra as flechas imediata e diferida juntamente com a flecha final que é resultante da soma das anteriores.

Figura 10: Flecha imediata, flecha diferida no tempo e flecha final



Fonte: Mais Engenharia (2017).

2.9.3. Limites para flechas

Os limites para deslocamentos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014, em sua Tabela 13.3, estão apresentados na **Tabela 4**.

Tabela 4: Limites para deslocamentos

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

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

2.10. Junta Fria de Concretagem

O ACI *Committee* 116 (2000) define junta fria como uma descontinuidade em um elemento de concreto, resultante da concretagem de uma peça com camadas de concreto com idades diferentes entre elas, essa diferença pode ser de horas ou dias. Na junta fria é possível observar uma linha separando as camadas de concreto, em que uma delas entrou na fase de pega (endurecimento) primeiro que a outra, o que inviabiliza a perfeita aderência entre elas.

De acordo com Kosmatka et al. (apud ABARCA e PINEDO, 2021, p. 21), a formação da junta fria pode diminuir a integridade estrutural do elemento de concreto. Abarca e Pinedo

(2021), estudaram a influência das juntas frias na resistência do concreto solicitado a esforços de tração indireta e compressão.

Eles analisaram juntas horizontais, verticais e diagonais com diferenças de 1 hora, 3 horas e 6 horas de sua formação em corpos de provas (CPs) com idades de 7, 14 e 28 dias de cura. Para cada configuração de junta fria, os autores moldaram 54 CPs, com 6 adicionais (padrão, sem junta fria), totalizando 180 CPs. Em seguida, os autores realizaram 90 ensaios à compressão e 90 à tração indireta por compressão diametral. A **Figura 11** mostra os corpos de provas moldados com as juntas frias.

Figura 11: Corpos de prova com juntas frias horizontais, diagonais e verticais



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Abarca e Pinedo (2021) dividiram os 90 ensaios à compressão e tração indireta da seguinte maneira: 27 ensaios para CPs com junta horizontal (CPs-H); 27 ensaios para CPs com junta vertical (CPs-V); 27 ensaios para CPs com junta diagonal (CPs-D) e 9 ensaios para CPs sem juntas.

A **Tabela 5** mostra a divisão desses ensaios com suas subdivisões.

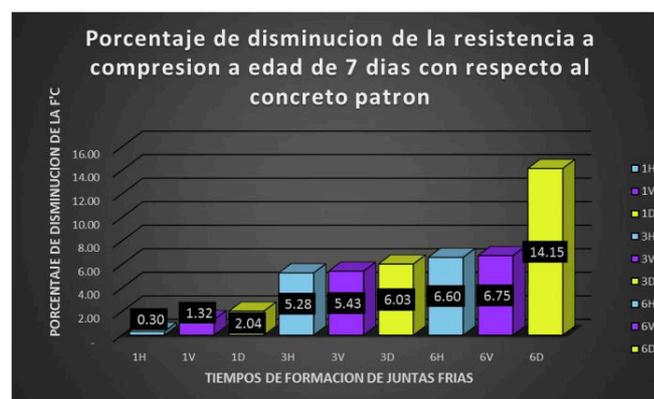
Tabela 5: Divisão dos CPs por ensaios, formação de junta fria e idade do concreto

JUNTAS		ENSAIO À COMPRESSÃO				ENSAIO À TRAÇÃO INDIRETA			
		IDADE DO CONCRETO			TOTAL	IDADE DO CONCRETO			TOTAL
FORMAÇÃO	TIPO	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS		7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	
1 HORA	HORIZONTAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	VERTICAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	DIAGONAL	3	3	3	9	3	3	3	9
3 HORAS	HORIZONTAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	VERTICAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	DIAGONAL	3	3	3	9	3	3	3	9
6 HORAS	HORIZONTAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	VERTICAL	3	3	3	9	3	3	3	9
	DIAGONAL	3	3	3	9	3	3	3	9
SEM JUNTA	-	3	3	3	9	3	3	3	9
TOTAL DE CPs ENSAIADOS		-			90	-			90

Fonte: O Autor (2022, Adaptado de ABARCA e PINEDO, 2021)

Os resultados obtidos por Abarca e Pinedo (2021) para os ensaios à compressão estão apresentados nas **Figura 12**, **Figura 13** e **Figura 14**.

Figura 12: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 7 dias

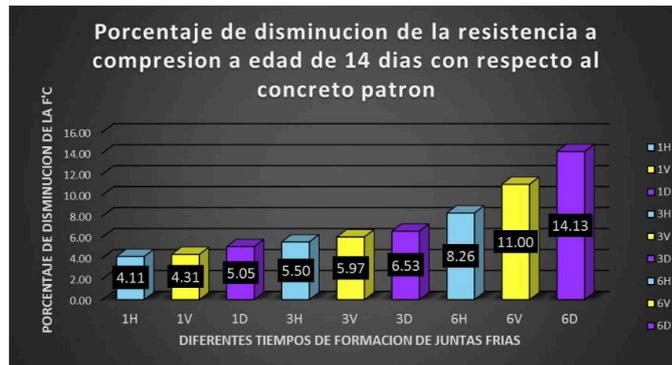


Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Dentre os corpos de prova moldados para a idade de cura de 7 dias, o grupo que apresentou maior redução na resistência do concreto foi o CPs-D, independentemente do tempo de formação. O grupo com juntas de 6 horas apresentou o maior percentual de redução, 14,

15%. Para se ter uma ideia, em um projeto onde o concreto precisaria atingir o f_{ck} de 25 MPa, locais onde houvessem a junta fria 6D teriam apenas 21,46 MPa.

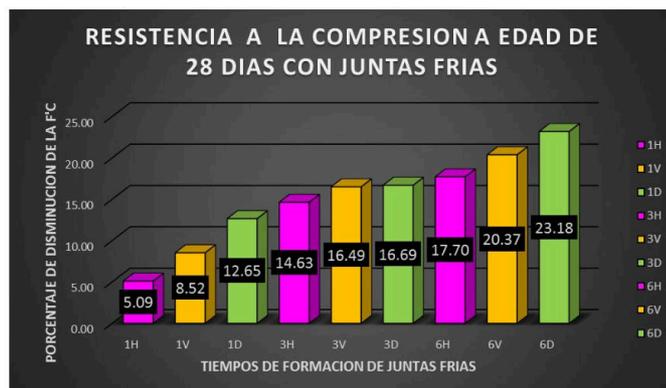
Figura 13: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 14 dias



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Os resultados para os CPs com idade de cura de 14 dias, apresentaram o mesmo padrão que os CPs de 7 dias, com o grupo CPs-D tendo os maiores fatores redutores da resistência do concreto, para todos os tempos de formação de juntas frias; sendo o grupo 6D o de maior valor, com 14,13%, que é um valor, praticamente, igual ao do grupo 6D de 7 dias.

Figura 14: Redução percentual da resistência à compressão dos corpos de prova com juntas frias em relação à amostra padrão na idade de 28 dias



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Para os CPs com idade de cura de 28 dias, os resultados, novamente, apresentaram a mesma ordem do anterior, no qual o grupo CPs-D é o de maiores valores de redução de resistência do concreto, seja para juntas de 1 hora, 3 horas ou 6 horas. O grupo 6D, mais uma

vez, se mostrou como o de maior redução percentual, com 23,18%. Os resultados obtidos por Abarca e Pinedo (2021) para os ensaios à tração indireta estão apresentados nas **Figura 15**, **Figura 16** e **Figura 17**.

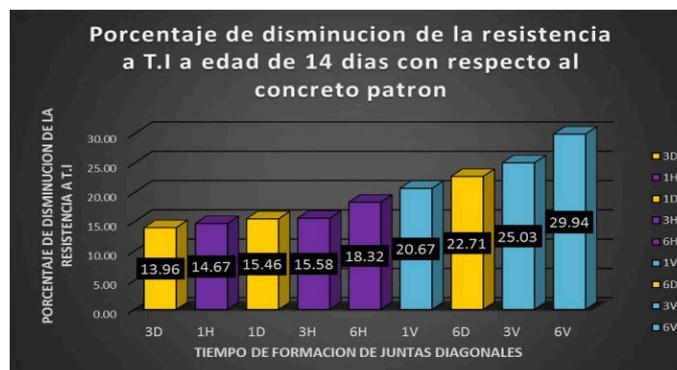
Figura 15: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 7 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Para os ensaios de tração indireta, com CPs aos 7 dias de cura, diferente do que aconteceu com os ensaios à compressão, desta vez é o grupo CPs-V que apresentou maiores percentuais de redução de resistência do concreto. O grupo com juntas frias de 6 horas de formação (6V) é o que tem a maior redução, 25,68%.

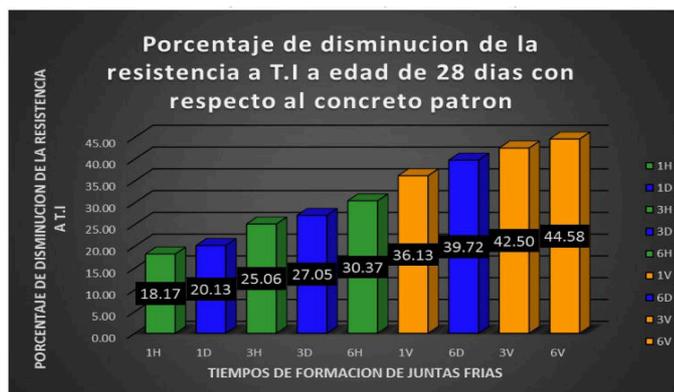
Figura 16: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 14 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Para os CPs aos 14 dias de cura, segue o mesmo que o ensaio anterior, em que o CPs-V apresenta maiores valores de redução percentual de resistência do concreto. O grupo com juntas frias de 6 horas de formação é o que tem a maior redução, 29,94%.

Figura 17: Variação do percentual de redução da resistência à tração indireta aos 28 dias de idade das juntas frias horizontais, verticais e diagonais, com diferentes tempos de formação em relação ao concreto padrão



Fonte: Abarca e Pinedo (2021)

Os resultados para os CPs com idade de cura de 28 dias, apresentaram o mesmo resultado que o ensaio anterior, onde o grupo CPs-V tem os maiores valores de redução percentual de resistência do concreto. O grupo 6V apresenta a maior redução, 44,58%.

Em relação à resistência à compressão para todas as juntas frias, os autores, Abarca e Pinedo (2021), concluíram que quanto maior for o tempo de formação da junta fria e quanto mais velho for o concreto, maior será a redução de sua resistência, com destaque para as juntas diagonais, que apresentaram o maior percentual, 23,18% aos 28 dias e juntas de 6h. Para a resistência à tração indireta, constataram o mesmo, que a redução da resistência do concreto aumenta com o tempo de formação das juntas e com o avanço da idade do concreto, ficando o destaque para as juntas verticais, com 44,58% aos 28 dias e juntas de 6h.

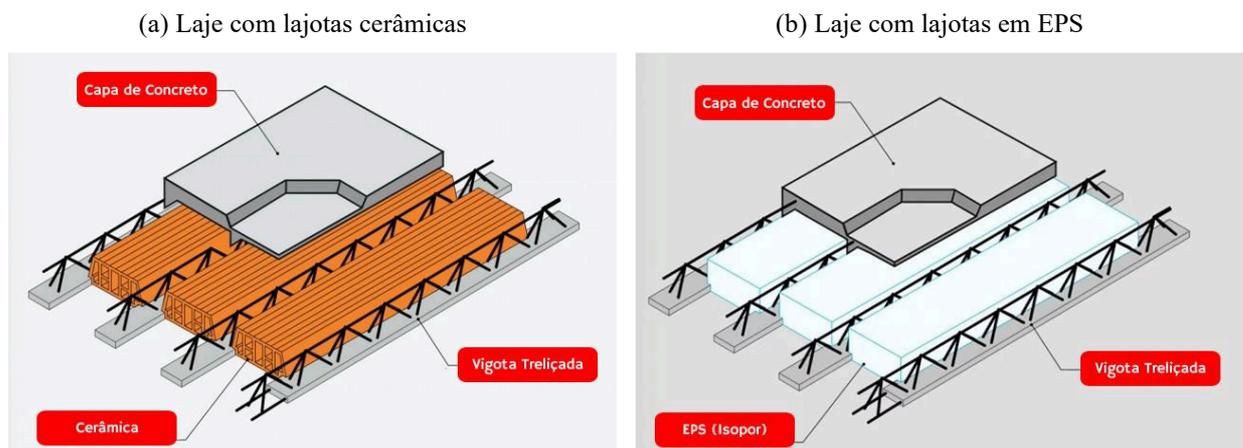
A ABNT NBR 6118:2014 diz no seu item 21.6: “Sempre que não for assegurada a aderência e a rugosidade entre o concreto novo e o existente, devem ser previstas armaduras de costura, devidamente ancoradas em regiões capazes de resistir a esforços de tração”

2.11. Lajes Pré-fabricadas

A ABNT NBR 14859-1:2016 Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos define, no item 3.12, que as lajes pré-fabricadas são elementos estruturais planos, constituídos por elementos pré-fabricados, estruturais e inertes de enchimento e/ou de forma permanente, armaduras e concreto, podendo ser maciça, nervurada unidirecional ou nervurada bidirecional, com de seção “T” ou duplo “T”, capaz de vencer vãos e suportar carregamentos conforme as especificações do projeto.

Para Carvalho e Filho (2014), as lajes pré-fabricadas são constituídas basicamente de três elementos: as vigotas pré-fabricadas, que constituem as nervuras principais em uma única direção; o enchimento, que são as lajotas de cerâmica ou placas de isopor, usualmente conhecidas como EPS (Poliestireno Expandido); e por uma capa de concreto moldada no local. A **Figura 18** ilustra esses elementos.

Figura 18: Elementos constituintes uma laje treliçada



Fonte: Lajes Rami (2021)

2.11.1. Vantagens e Desvantagens

Em relação às lajes maciças, de acordo com Flório (2004) e Pereira (2018), as lajes pré-fabricadas no sentido unidirecional apresentam as vantagens e desvantagens elencadas a seguir.

Vantagens:

- ✓ Menor peso próprio;
- ✓ Menor consumo de concreto, aço, formas e escoras;
- ✓ Menor tempo de execução;
- ✓ Maior oferta no mercado.

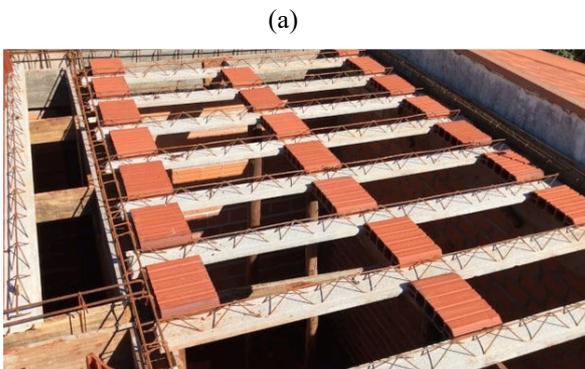
Desvantagens:

- ✓ Concentra a maior parte das cargas em uma única direção;
- ✓ Demanda maior cuidado durante o processo de concretagem;
- ✓ Possuem valores bem maiores para os deslocamentos transversais (flechas).

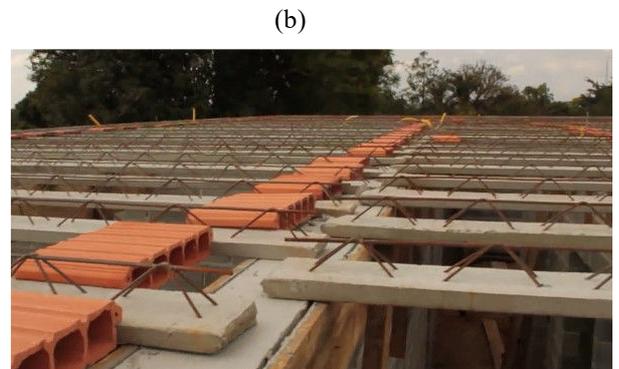
2.11.2. Lajes Treliçadas

Para Pereira (2021) e Pinheiro (2022), a laje treliçada é um sistema construtivo que utiliza um tipo de laje pré-moldada composto por vigotas de concreto armado com uma estrutura de treliça como armadura. Nos vãos entre esta estrutura utiliza-se algum material de preenchimento, podendo ser de blocos cerâmicos ou poliestireno expandido EPS (conhecido como isopor). Esses elementos são solidarizados por uma capa de concreto no topo. A **Figura 19** traz a disposição construtiva de uma laje treliçada.

Figura 19: Vigotas treliçadas dispostas sobre vãos para confecção de lajes



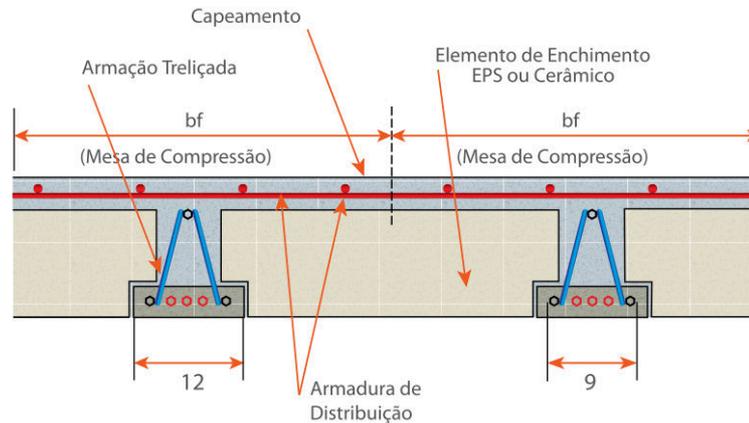
Fonte: Escola Engenharia (2021)



Fonte: Cerâmica Mônaco (2023)

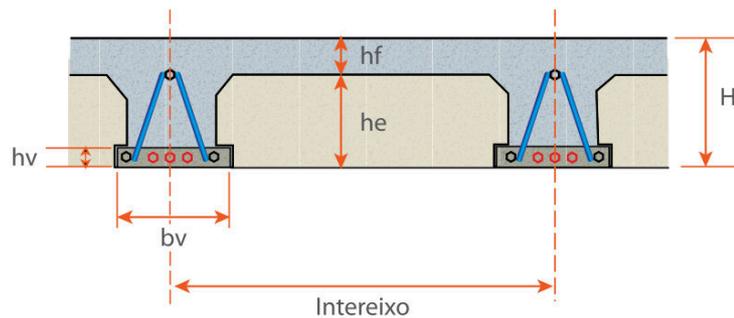
As **Figura 20** e **Figura 21** apresentam, respectivamente, os elementos e detalhes de uma laje treliçada.

Figura 20: Elementos de uma laje treliçada



Fonte: ArcelorMittal (2010)

Figura 21: Corte e detalhes de uma laje treliçada



Fonte: ArcelorMittal (2010)

As siglas apresentadas nas **Figura 20** e **Figura 21** estão descritas abaixo:

H : Altura total da laje;

h_f : Altura da capa de concreto da laje;

h_e : Altura do enchimento/vigota;

h_v : Altura da base da vigota;

b_v : Largura da base da vigota;

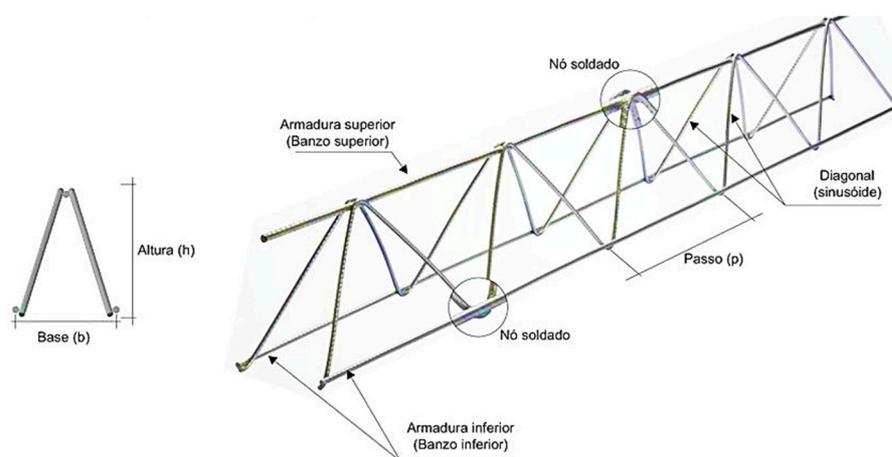
b_f : Intereixo (largura da mesa colaborante de concreto).

2.11.3. Elementos de uma laje treliçada

A laje treliçada é composta pelos seguintes elementos: armadura treliçada; vigotas treliçadas (também chamadas de trilhos); enchimento (lajota ou EPS); nervuras e capa de concreto.

A armadura treliçada “é uma estrutura metálica espacial prismática em que se utilizam fios de aço Belgo 60 Nervurado (CA60), soldados por eletrofusão ou caldeamento, de modo a formar um elemento rígido composto de duas treliças planas, inclinadas e unidas pelo vértice superior”. (Manual Técnico de Lajes Treliçadas, ArcelorMittal, 2010). Essa treliça deve obedecer aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 14859-3:2017 Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armaduras treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas – Requisitos. A **Figura 22** mostra a constituição da treliça.

Figura 22: Detalhes e elementos de uma armadura treliçada



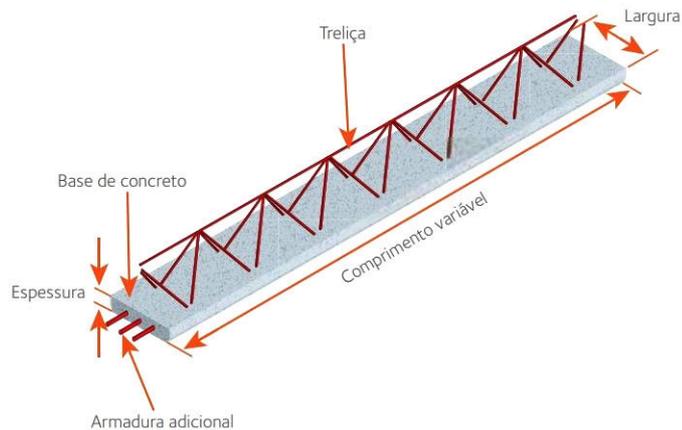
Fonte: Grupo Presence (2017)

As vigotas treliçadas, de acordo com a ArcelorMittal (2010), é o conjunto formado pela treliça metálica e uma base de concreto. A ABNT NBR 14859-1:2016, no item 4.1.3, define vigota treliçada como todo elemento pré-fabricado constituído de concreto estrutural e armadura treliçada eletrossoldada, capaz de alojar, quando necessário, armadura passiva inferior de tração.

Visando atender as especificações das ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 8953:2015 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência e ABNT NBR 12655:2006 Concreto de cimento Portland - Preparo, controle,

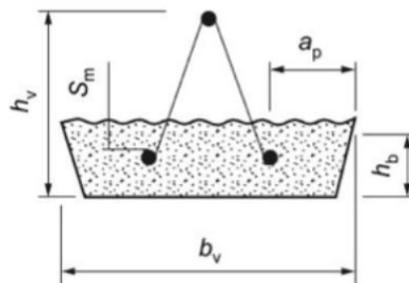
recebimento e aceitação, o concreto que compõe as bases das vigotas deve ter no mínimo 20 MPa de resistência, ou superior, caso especificado em projeto estrutural. O concreto utilizado para a concretagem da laje deve atender os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014. A **Figura 23** apresenta os elementos e dimensões da base de uma vigota, a **Figura 24** mostra o seu perfil.

Figura 23: Detalhes da vigota treliçada



Fonte: ArcelorMittal (2010)

Figura 24: Perfil de uma vigota treliçada



Fonte: ABNT NBR 14859-1:2016

As definições das siglas apresentadas na **Figura 24** são mostradas abaixo:

h_v : Altura mínima da base de concreto;

b_v : Largura mínima da base de concreto;

a_p : Largura mínima do apoio;

h_b : Altura mínima do apoio.

A **Tabela 6** mostra as dimensões e tolerâncias mínimas para vigotas treliçadas.

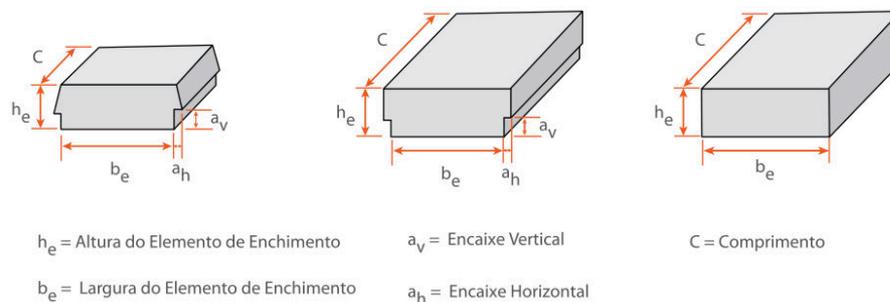
Tabela 6: Dimensões e tolerâncias (medidas em “mm”) padronizadas para vigotas treliçadas

Largura mínima (b_v)	Altura mínima (h_v)	Largura mínima do apoio (a_p)	Altura mínima do apoio (h_b)
130 ± 5	75 ± 2	15 ± 1	30 ± 1

Fonte: ABNT NBR 14859-1:2016

O enchimento, segundo o item 3.2 da ABNT NBR 14859-2:2016 Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma – Requisitos, os elementos de enchimento são elementos não estruturais, pré-fabricados, constituídos de materiais inertes de vários tipos, maciços ou vazados, arranjados intercaladamente entre as vigotas, cuja funções principais são: servir de forma para o concreto, reduzir o volume de concreto e, com isso, o peso próprio da laje. Os elementos de enchimento devem seguir as dimensões e tolerâncias estabelecidos na ABNT NBR 14859-2:2016. A **Figura 25** apresenta os detalhes dos elementos de enchimento.

Figura 25: Detalhes dos enchimentos



Fonte: ArcelorMittal (2010)

Na fase de montagem das vigotas sobre o vão onde será concretada a laje, o escoramento é um fator importante. Este deve ser determinado no projeto de execução da laje, considerando o tipo de pré-laje e as cargas na fase de montagem e concretagem. A **Figura 26** ilustra como seria o escoramento em uma laje treliçada.

Figura 26: Escoramento para sistema de laje treliçada



Fonte: O autor (2023).

Como exemplo de deformação por flecha em laje treliçada é apresentado, na **Figura 27**, um caso real. A laje analisada possui o vão medindo 4,50 m, cuja flecha, como destacado na figura, tem valor de 5 cm. Este deslocamento vertical corresponde a $L/90$, que é um valor bem acima de $L/250$, limite máximo permitido pela ABNT NBR 6118:2014, como demonstrado na **Tabela 4** do item 2.9.3.

Figura 27: Laje com flecha acentuada.

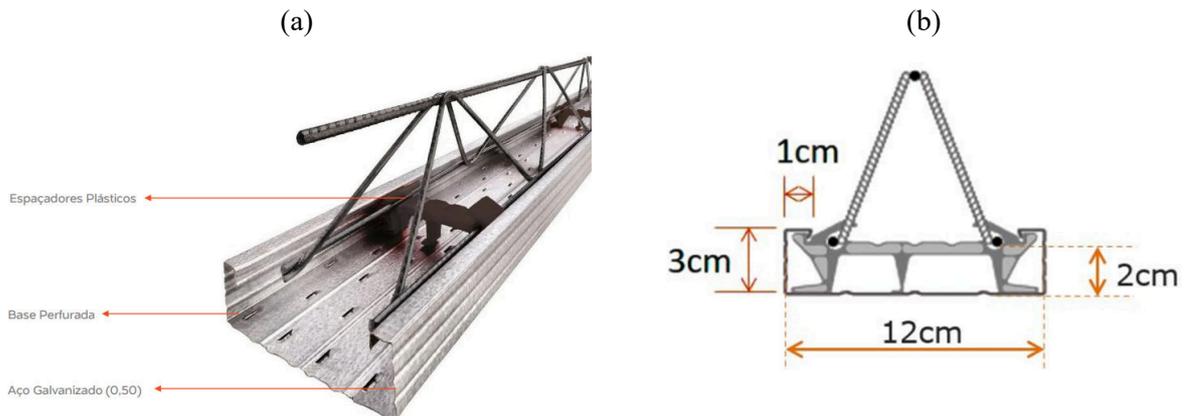


Fonte: Pádua (2023)

2.12. Sistema Trelifácil®

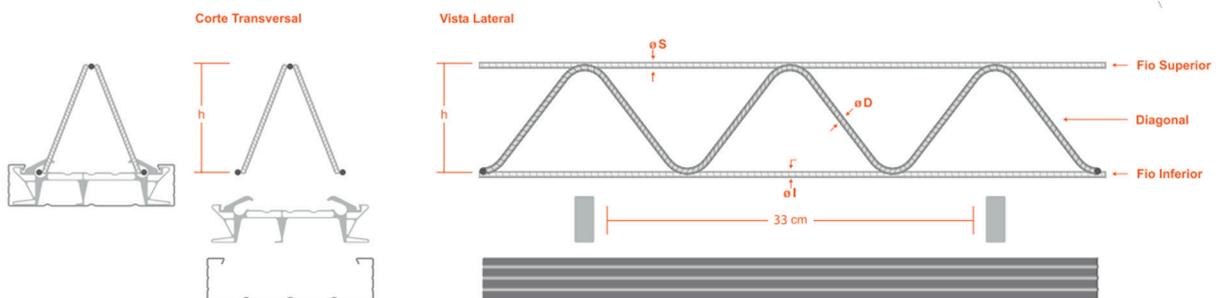
De acordo com ArcelorMittal (2018), fabricante do produto Trelifácil®, a mesma é constituída de uma forma metálica, espaçadores de plástico e treliça. As **Figura 28** e **Figura 29** mostram os elementos do sistema Trelifácil®.

Figura 28: (a) O Produto Trelifácil® – (b) Dimensões da Trelifácil®



Fonte: ArcelorMittal (2018)

Figura 29: Elementos da Trelifácil®



Fonte: ArcelorMittal (2018)

A ArcelorMittal (2018), diz que o sistema Trelifácil® “visa substituir o uso das vigotas tradicionais de concreto, tendo como foco principal a agilidade na confecção das lajes – uma vez que o molde é muito mais leve que a vigota com a base de concreto –, o vencimento de vãos maiores, a uniformização na concretagem (formando um único bloco sem a presença de solda fria no concreto – monólito) e a diminuição das flechas.”

O fabricante elenca os seguintes diferenciais técnicos principais: leveza, praticidade, qualidade e simplicidade na aplicação, destacando a leveza da Trelifácil®, apontando-a com o

peso linear em cerca de 80% menor que uma vigota comum. A **Figura 30** mostra a disposição construtiva de lajes utilizando a Trelifácil®.

Figura 30: Trelifácil® dispostas em vãos para confecção de lajes



Fonte: ArcelorMittal (2021)

O fabricante aponta, ainda, outra característica importante da Trelifácil®: “a sua aplicação proporciona menor deformação das lajes, pois é feito um único processo de concretagem. Dessa forma, todos os fios da treliça e demais elementos da laje são concretados em uma única seção monolítica, garantindo a homogeneidade da estrutura.” Utilizando a Trelifácil®, é possível realizar uma concretagem única do pano de laje, eliminando a formação de junta fria, como mostrado na **Figura 31**.

Figura 31: Comparação de concretagem entre treliça comum e Trelifácil®



Fonte: ArcelorMittal (2018)

A Trelifácil®, segundo o manual da ArcelorMittal (2018), pode ser aplicada em todas as alturas de lajes constituídas por treliças, de 8 a 30 cm (de H8 a H30), em vãos de 6 m e 11 m, com espaçamento máximo de 1,5 m para as escoras de uma mesma linha. As vantagens propostas pela ArcelorMittal são as seguintes:

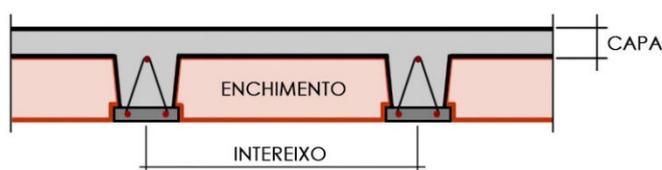
- Praticidade e simplicidade na montagem;
- Redução de até 81% do peso no transporte, armazenagem, movimentação e montagem das lajes. Redução dos prazos de execução e custos operacionais da obra.
- Melhor condição ergonômica e maior segurança do operador;
- Armadura treliçada ArcelorMittal com certificações ABNT, de produto (ABNT NBR 14859-3:2017) e rótulo ecológico (PE-148);
- Eliminação das perdas por quebra no manuseio;
- Aproveitamento de 100% das fôrmas, permitindo emendas para atendimento de maiores vãos;
- Alta precisão dimensional e qualidade assegurada pelos produtos ArcelorMittal que compõem a solução;
- Menor deformação das lajes pela concretagem única de todos os elementos da solução;
- Uniformidade no posicionamento das armaduras treliçadas, o que garante o cobrimento solicitado na norma ABNT NBR 6118:2014.

3. METODOLOGIA

São dimensionadas 3 lajes-piso, com vãos de 3,0 m; 3,5 m e 4,0 m para ambos os sistemas construtivos de lajes treliçadas: o de vigotas tradicionais e o Trelifácil®. Para cada vão são analisadas 3 hipóteses a fim de realizar a comparação entre as flechas obtidas. As hipóteses são as apresentadas a seguir. Com base no item 3.2 da ABNT NBR 6118:2014, o estado limite de serviço que será verificado neste trabalho é o: ELS-DEF: Estado-limite de deformações excessivas.

Hipótese 1: lajes confeccionadas utilizando o sistema com vigotas treliçadas comuns, considerando a contribuição da base de concreto presente, admitindo a uniformidade do concreto em toda a peça (vigota, nervura e capa) e a perfeita aderência na região da junta fria, supondo um concreto de ótima qualidade, com amplo controle de qualidade. A **Figura 32** mostra a consideração citada.

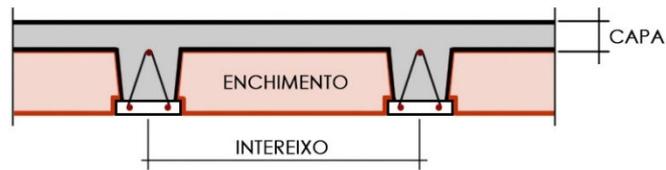
Figura 32: Representação gráfica da Hipótese 1 (considerando o concreto da base da vigota)



Fonte: O Autor (2023)

Hipótese 2: lajes utilizando o sistema com vigotas treliçadas comuns, desconsiderando a contribuição da base de concreto, o desprezando, tendo como argumento a falta de um controle de qualidade na confecção do concreto e das vigotas treliçadas (construtiva), a incerteza na garantia de um padrão de confecção das vigotas, levando em consideração o efeito da junta fria (abordado no item 2.10 deste trabalho) entre o concreto da vigota pré-moldada e o concreto lançado na construção da laje e, devido, à incerteza da comprobabilidade entre a resistência e o módulo de elasticidade do concreto que compõem a vigota e o lançado na obra. A **Figura 33** mostra a consideração proposta.

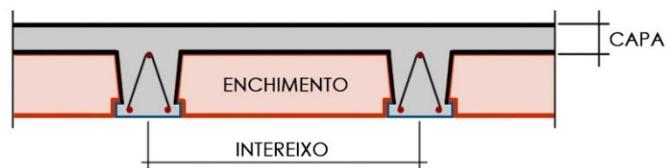
Figura 33: Representação gráfica da Hipótese 2 (desprezando o concreto da base da vigota)



Fonte: O Autor (2023)

Hipótese 3: lajes utilizando o sistema Trelifácil®. A **Figura 34** ilustra a hipótese.

Figura 34: Representação gráfica da Hipótese 3 (uso da Trelifácil®)



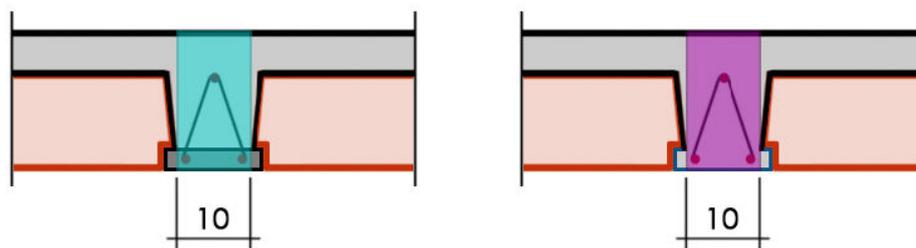
Fonte: O Autor (2023)

Como visto na **Tabela 6**, a base da vigota comum possui largura mínima de 13 cm e largura do apoio para o material de enchimento de 1,5 cm, o que resulta numa nervura concretada com 10 cm de largura. De acordo com a **Figura 28**, a largura da base da Trelifácil® é 12 cm e a largura do apoio é 1 cm, resultando nos mesmos 10 cm de largura para a nervura concretada. Essa nervura será considerada para os cálculos das flechas. A **Figura 35** mostra a largura da nervura.

Figura 35: Largura da nervura considerada

(a) Nervura na vigota comum

(b) Nervura na Trelifácil®



Fonte: O Autor (2023)

Para o cálculo e verificação das flechas foi utilizada, para as cargas, a combinação quase permanente (P_{qp}). Considerou-se a seção transversal como “T” (vigota e capa). As lajes terão

suas vinculações consideradas como simplesmente apoiadas. Na etapa final, os valores obtidos das deformações excessivas (flechas) serão comparados entre elas para cada hipótese.

3.1. Cálculo do Módulo de elasticidade do concreto

3.1.1. Módulo de elasticidade inicial

Seu valor pode ser estimado, para concretos de classe até C50, conforme a **Equação 1**, com E_{ci} e f_{ck} em MPa e idade superior ou igual a 28 dias (ABNT NBR 6118:2014).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Onde α_E é o coeficiente referente ao tipo de agregado, valendo:

$\alpha_E = 0,7$ para arenito;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio.

3.1.2. Módulo de elasticidade secante

O módulo de elasticidade secante pode ser calculado pela **Equação 2** (ABNT NBR 6118:2014), dependendo do módulo de elasticidade tangente inicial e de um fator α_i , que, por sua vez, tem relação com o f_{ck} .

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (2)$$

Onde:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (3)$$

3.2. Características geométricas da seção

Uma informação necessária para o cálculo e verificação das flechas são as características geométricas da seção no Estádio I e no Estádio II.

3.2.1. Características geométricas de seções no Estádio I

Como visto no item 2.5.2, no Estádio I, a Lei de Hooke continua válida, o que significa que existe linearidade entre tensão e deformação, e, garantia de aderência entre o concreto e o aço, suas deformações específicas são as mesmas ($\varepsilon_c = \varepsilon_s$).

A área equivalente de concreto em relação à de aço é descrita pela **Equação 4** (CARVALHO e FILHO, 2014).

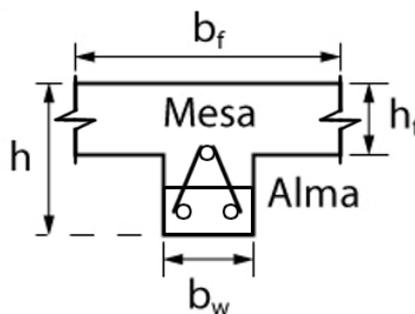
$$A_{c,eq} = \alpha_e \cdot A_s \quad (4)$$

Onde α_e é um fator que relaciona o módulo de elasticidade do concreto com o do aço.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (5)$$

A seguir são apresentadas as equações para cada uma das características necessárias para peças de seção “T” (**Figura 36**). Para aplicar as equações em peças de seção retangular, basta fazer $b_f = b_w$ ou $h_f = 0$.

Figura 36: Viga de seção “T” composta por vigota treliçada e capa de concreto



Fonte: O autor (2023)

Onde:

- Mesa: para os casos em que se trata de interação entre viga e laje, equivale a parcela da laje. Também é denominada de flange;
- Alma: para os casos em que se trata de interação entre viga e laje, equivale a própria viga. Também é denominada de nervura;
- b_f : largura da mesa (intereixo);
- b_w : largura da alma;
- h_f : espessura da mesa (capa);
- h : altura total da viga.

Área homogeneizada da seção (A_h):

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \quad (6)$$

Centroide da seção homogeneizada (y_g):

$$y_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot \frac{h_f^2}{2} + b_w \cdot \frac{h^2}{2} + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h} \quad (7)$$

Momento de inércia da seção homogeneizada (I_I):

$$I_I = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_g - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_g - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (y_g - d)^2 \quad (8)$$

3.2.2. Características geométricas de seções no Estádio II

Para se calcular o momento de inércia no Estádio II, é necessário conhecer a posição da linha neutra (x_{II}). As equações a seguir são apresentadas por Carvalho e Filho (2014) para o cálculo da inércia no Estádio II de uma peça com seção “T”. Para aplicação em peças de seção

retangular, basta fazer $b_f = b_w$ ou $h_f = 0$ ou, ainda, $A_s' = 0$ (A_s' é a armadura de compressão, caso haja).

A posição da linha neutra, para essa situação, é obtida pela **Equação 9**.

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} \quad (9)$$

Onde:

$$a_1 = \frac{b_f}{2} \quad (10)$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' + \alpha_e \cdot A_s \quad (11)$$

$$a_3 = -d' \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A_s' - d \cdot \alpha_e \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w) \quad (12)$$

O momento de inércia da seção no Estádio II vai depender se a posição da linha neutra da peça está passando dentro ou fora da mesa. As **Equações 13 e 14** mostram as formulações para essas duas situações, respectivamente.

1ª situação: linha neutra dentro da mesa ($x_{II} \leq h_f$):

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' \cdot (x_{II} - d')^2 \quad (13)$$

2ª situação: linha neutra fora da mesa ($x_{II} > h_f$):

$$I_{II} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \cdot \left(x_{II} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (14)$$

3.2.3. Cálculo do Momento de Fissuração

Dado pela **Equação 15**, o momento de fissuração é utilizado no cálculo da Inércia de Branson.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_I}{y_t} \quad (15)$$

Onde:

α : é o coeficiente que correlaciona a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, onde pode assumir os seguintes valores:

$\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;

$\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido;

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

f_{ct} : é resistência à tração direta do concreto e, conforme presente no item 8.2.5 da ABNT NBR 6118:2014;

I_I : é o momento de inércia da seção bruta de concreto. Também pode ser tomado como o momento de inércia no estágio I com a armação incorporada;

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

3.2.4. Cálculo da Inércia média de Branson

É dada pela **Equação 16**.

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{II} \quad (16)$$

Onde:

I_I : é o momento de inércia da seção bruta de concreto (ou no Estádio I);

I_{II} : é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II;

M_r : é o momento de fissuração do elemento estrutural;

M_a : é o momento fletor atuante na seção crítica do vão considerado, para cada combinação de ação;

O momento fletor atuante na estrutura (M_a) é calculado conforme **Equação 17**.

$$M_a = \frac{PL^2}{8} \quad (17)$$

Onde:

P : é a carga aplicada à estrutura, considerando a combinação de ação em análise;

L : é o vão considerado.

3.2.5. Cálculo da Flecha Imediata

Como visto no capítulo 2.10.1, a flecha imediata depende das condições de vinculações dos apoios da estrutura e, no geral, é calculada conforme a **Equação 18**.

$$a_i = \beta \frac{PL^4}{(EI)_{eq}} \quad (18)$$

Onde:

β : é o coeficiente que depende das condições de vinculações (tipos de apoios) da estrutura;

P : é a carga aplicada à estrutura, considerando a combinação de ação em análise;

L : é o vão considerado;

$(EI)_{eq}$: é a rigidez equivalente da peça, considerando os Estádios I e II.

Para lajes com vinculações de apoios simples, o cálculo da flecha imediata é realizado utilizando $\beta = \frac{5}{384}$, resultando em:

$$a_i = \frac{5}{384} \cdot \frac{PL^4}{(EI)_{eq}}$$

A rigidez equivalente é dada pela **Equação 19**.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot I_m \leq E_{cs} \cdot I_I \quad (19)$$

Onde:

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

I_m : é a inércia média de Branson.

3.2.6. Cálculo da Flecha diferida no tempo

A obtenção de seu valor é dada pela **Equação 20**.

$$a_f = \frac{\Delta\xi}{(1 + 50 \cdot \rho')} \quad (20)$$

Onde:

$\Delta\xi$: coeficiente função do tempo, sendo $\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$;

Sendo:

$\xi(t) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32}$, para valores de $t \leq 70$ meses;

$\xi(t) = 2$, para valores de $t > 70$ meses.

ρ' : é a taxa de armadura de compressão no trecho considerado.

Em que:

$$\rho' = \frac{As'}{bd}$$

3.2.7. Cálculo da Flecha total

A flecha total é determinada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator $(1 + a_f)$, conforme mostra a **Equação 21**.

$$a_t = a_i \cdot (1 + a_f) \quad (21)$$

3.3. Apresentação dos cálculos para a laje L1

Serão apresentados o passo a passo do cálculo da laje L1, considerando as três hipóteses, e, os resultados obtidos para as demais lajes. O dimensionamento, para os dois sistemas construtivos, seguirá às normas técnicas nacionais vigentes e se deu de igual modo, conforme as equações que serão apresentadas no decorrer destes capítulo.

3.3.1. Módulos de elasticidade do concreto

Módulo de elasticidade inicial

O f_{ck} escolhido para o concreto foi 25 MPa, utilizando granito como agregado graúdo, $\alpha_E = 1,0$ (ABNT NBR 6118:2014).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

$$E_{ci} = 1 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25}$$

$$E_{ci} = \mathbf{28000 \text{ MPa}}$$

Módulo de elasticidade secante

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$$

Onde:

$$\alpha_i = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1$$

$$\alpha_i = \left(0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} \right) \leq 1$$

$$\alpha_i = 0,8625 \leq 1 \text{ (OK!)}$$

$$E_{ci} = 28000 \text{ MPa} \quad (\text{calculado no item 3.3.1.1})$$

Logo:

$$E_{cs} = 0,8625 \cdot 28000$$

$$E_{cs} = 24150 \text{ MPa}$$

3.3.2. Características dos materiais utilizados

A **Tabela 7** apresenta as características do concreto e do aço. Estes dados são comuns para as Hipóteses 1 e 2 e para as lajes com a Trelifácil® (Hipótese 3).

Tabela 7: Características do Concreto e do Aço

CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO					
f_{ck} (MPa)	TIPO DE AGREGADO	α_E – FATOR AGREGADO	E_{ci} - MÓDULO ELASTICIDADE INICIAL (MPa)	α_i – FATOR MÓDULO	E_{cs} - MÓDULO ELASTICIDADE SECANTE (MPa)
25	GRANITO	1,0	28000,00	0,86	24150,00
CARACTERÍSTICAS DO AÇO					
f_{yk} (MPa)	Es - MÓDULO ELASTICIDADE AÇO (MPa)				
500	210000				

Fonte: O autor (2023)

A seguir são apresentadas as características dos elementos utilizados nos cálculos de todas as lajes. Na **Tabela 8** temos os dados das treliças.

Tabela 8: Características das treliças

LAJE	MODELO	H - ALTURA (cm)	PESO LINEAR (kN/m)
L1	TR-08646	8,0	0,00961
L2	TR-10646	10,0	0,00989
L3	TR-12646	12,0	0,01017

Fonte: O Autor (2022, retirado de manual de lajes treliçadas)

Na **Tabela 9** são apresentados os dados dos enchimentos (foi utilizado o EPS).

Tabela 9: Características dos enchimentos

LAJE	TIPO	h_b ALTURA (cm)	b_e LARGURA (cm)	c_e COMPRIMENTO (cm)	b_f INTEREIXO (cm)	PESO (kN/m ²)
L1	EPS	8,0	40,0	40,0	49,0	0,013
L2	EPS	10,0	40,0	40,0	49,0	0,016
L3	EPS	12,0	40,0	40,0	49,0	0,020

Fonte: O autor (2023)

Na **Tabela 10** são mostradas as características para as lajes.

Tabela 10: Características das lajes

LAJE	L - VÃO (cm)	h_f - CAPA (cm)	h - ALTURA TOTAL (cm)	h _w - ALTURA NERVURA C/ VIGOTA COMUM (cm)			b_w - LARGURA NERVURA (cm)
				HIPÓTESE 1	HIPÓTESE 2	HIPÓTESE 3 (TRELIFÁCIL®)	
L1	300	5,0	13,0	8,0	5,0	8,0	10,0
L2	350	5,0	15,0	10,0	7,0	10,0	10,0
L3	400	5,0	17,0	12,0	9,0	12,0	10,0

Fonte: O autor (2023)

3.3.3. Determinação das cargas

Os carregamentos resultantes foram iguais para cada grupo de lajes nas três hipóteses, com exceção do peso próprio. O cálculo do peso próprio (*PP*), considerando apenas o concreto armado, é determinado fazendo a soma do peso próprio da capa com o da nervura. Isso pode ser feito fazendo a multiplicação do peso específico do concreto armado ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$) pela soma da altura da capa (h_f); com a altura da nervura (h_w), coluna 5 da Tabela 9, multiplicada pela razão entre a largura da nervura (b_w) e o intereixo (b_f); e com a altura da base da vigota (h_v) multiplicada pela razão entre a largura da vigota (b_v) e o intereixo (b_f); conforme mostra a **Equação 22**.

$$PP_{Li} = \gamma \cdot \left[h_c + h_w \cdot \frac{b_w}{b_f} + h_v \cdot \frac{b_v}{b_f} \right] \quad (22)$$

Assim, para a Laje L1, considerando capa de 5 cm, temos:

$$PP_{L1} = 25 \cdot \left[0,05 + 0,05 \cdot \frac{0,1}{0,49} + 0,03 \cdot \frac{0,12}{0,49} \right]$$

$$PP_{L1} = 25 \cdot 0,05 + 25 \cdot 0,0102 + 25 \cdot 0,0073$$

$$PP_{L1} = 1,25 + 0,26 + 0,18$$

$$PP_{L1} = 1,69 \text{ kN/m}^2$$

Os resultados dos pesos próprios de cada laje são mostrados na **Tabela 11**.

Tabela 11: Cargas de Peso Próprio (kN/m²) para cada laje com capa de 5 cm

LAJE	PESO ESPECÍFICO DO CONCRETO ARMADO (kN/m ³)	CAPA	NERVURA	PESO TOTAL
L1	25	1,25	0,44	1,68
L2			0,54	1,79
L3			0,64	1,89

Fonte: O autor (2023)

A **Tabela 12** mostra os valores das cargas de contrapiso, piso, forro e utilização.

Tabela 12: Cargas de Contrapiso, Piso, Forro e Utilização comuns para todas as lajes

PISO E CONTRAPISO	
CONTRAPISO	
MATERIAL	ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA
PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	21,0
ESPESSURA (m)	0,03
PESO (kN/m ²)	0,63
PISO	
TIPO DE REVESTIMENTO	CERÂMICO
PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)	18,0
ESPESSURA (m)	0,011
PESO 1 (kN/m ²)	0,20
ARGAMASSA COLANTE (kN/m ³)	20,0
ESPESSURA (m)	0,005
PESO 2 (kN/m ²)	0,10
PESO TOTAL DO PISO (kN/m ²)	0,30
PESO TOTAL (kN/m²)	0,93
FORRO - TABELA 8 (ABNT NBR 6120:2019 Ações para o cálculo de estruturas de edificações)	
MATERIAL	PVC
PESO (kN/m ²)	0,10
CARGA DE USO - TABELA 10 (ABNT NBR 6120:2019)	
TIPO	SALA DE ESTAR; DORMITÓRIO
PESO (kN/m ²)	1,50

Fonte: O autor (2023)

O carregamento permanente total (P_{perm}) para cada laje é considerado fazendo o somatório do peso próprio (**Tabela 11**) com o peso linear da treliça metálica (**Tabela 8**) dividido pelo intereixo, para converter em unidade de peso por área; o peso do material de enchimento (**Tabela 9**) e os valores dos pesos dos materiais do piso, contrapiso e forro da **Tabela 12**.

$$P_{perm} = PP + \frac{P_{treliça}}{b_f} + P_{enchimento} + P_{contrapiso} + P_{piso} + P_{forro}$$

Fazendo o cálculo para a laje L1, tem-se:

$$P_{perm,L1} = 1,66 + \frac{0,010}{0,49} + 0,013 + 0,63 + 0,30 + 0,10$$

$$\mathbf{P_{perm,L1} = 2,75 \text{ kN/m}^2}$$

Para o dimensionamento das lajes treliçadas é necessário converter o resultado obtido para carga linear, que será distribuída por vigota. Para isso, basta multiplicar o valor pelo intereixo.

Fazendo o cálculo para a laje L1, tem-se:

$$P_{perm,L1} = 2,75 \cdot b_f$$

$$P_{perm,L1} = 2,75 \cdot 0,49$$

$$\mathbf{P_{perm,L1} = 1,35 \text{ kN/m}}$$

Para o carregamento acidental, faz-se o mesmo procedimento de multiplicar o valor pelo intereixo.

Assim:

$$P_{L1,acidental} = P_{acidental} \cdot b_f$$

$$P_{L1,acidental} = 1,50 \cdot 0,49$$

$$\mathbf{P_{L1,acidental} = 0,74 \text{ kN/m}}$$

A **Tabela 13** traz o resumo dos carregamentos totais permanentes e acidentais por laje e por vigota.

Tabela 13: Carregamento total e por vigota para cada laje (Hipóteses 1, 2 e Trelifácil®)

LAJE	POR LAJE		POR VIGOTA (NERVURA)	
	CARGA PERMANENTE (kN/m ²)	CARGA ACIDENTAL (kN/m ²)	CARGA PERMANENTE (kN/m)	CARGA ACIDENTAL (kN/m)
L1	2,75	1,50	1,35	0,74
L2	2,86	1,50	1,40	0,74
L3	2,97	1,50	1,45	0,74

Fonte: O autor (2023)

3.3.4. Resultado das armaduras de tração

Com os valores das cargas, foi realizado o dimensionamento das lajes para combater o esforço de flexão e verificou-se, também, sua resistência ao cisalhamento. Para o dimensionamento, foi considerado o ELU, com utilização da combinação normal última, resultando nos valores de armadura apresentados na **Tabela 14**.

Tabela 14: Combinação normal última, Momento fletor e armaduras

LAJE	COMBINAÇÃO NORMAL ÚLTIMA (kN/m)	Md (kN.cm)	As (cm ²)	
			Hipóteses 1 e 2	Trelifácil®
L1	2,92	327,95	0,721	0,838
L2	2,99	457,50	0,857	0,974
L3	3,06	612,08	1,001	1,117

Fonte: O autor (2023)

A armadura da treliça metálica não foi suficiente para atender ao esforço proporcionado pelo momento fletor, por isso foi necessário utilizar barras adicionais para complementar a armadura, resultando na armadura efetiva total mostrada nas **Tabela 15** e **Tabela 16**.

Tabela 15: Armaduras efetivas (Hipóteses 1 e 2)

LAJE	As _{vigota} (cm ²)	As _{residual} (cm ²)	φ ₁ [Bitola] (mm)	QTD DE BARRAS ADICIONAIS	As _{efet} (cm ²)
L1	0,565	0,159	6,3	1 BARRA	0,88
L2	0,565	0,295	6,3	1 BARRA	0,88
L3	0,565	0,436	6,3	2 BARRAS	1,19

Fonte: O autor (2023)

Tabela 16: Armaduras efetivas (usando Trelifácil®)

LAJE	$A_{svigota}$ (cm ²)	$A_{sresidual}$ (cm ²)	ϕ_1 [Bitola] (mm)	QTD DE BARRAS ADICIONAIS	$A_{s,efet}$ (cm ²)
L1	0,565	0,281	6,3	1 BARRA	0,88
L2	0,565	0,415	6,3	2 BARRAS	1,19
L3	0,565	0,557	6,3	2 BARRAS	1,19

Fonte: O autor (2023)

3.3.5. Cálculo das flechas

Com todos os dados das lajes já levantados e definidos, tais como altura total e altura da capa, tipo de treliça e enchimento, seção da peça, carregamentos e área de aço efetiva, considerando que o dimensionamento no ELU foi efetuado e aprovado; são realizados os cálculos para a verificação no ELS, com foco no ELS-DEF. As características das seções para o Estádios I e II serão calculadas de acordo com as equações apresentadas nos itens 3.2.1 e 3.2.2, considerando a seção como “T”.

Combinações quase permanentes de serviço

Esta combinação é utilizada na verificação de deformação excessiva (ELS-DEF) com todas as ações variáveis tidas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{Qk}$. A combinação quase permanente é dada pela **Equação 23**.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} F_{Qj,k} \quad (23)$$

A combinação (P_{qp}) para a laje L1 é, com $\psi_2 = 0,3$ (valor retirado da **Tabela 2**):

$$P_{qpL1} = 1,35 + \psi_2 \cdot 0,74$$

$$P_{qpL1} = 1,35 + 0,3 \cdot 0,74$$

$$\mathbf{P_{qpL1} = 1,572 \text{ kN/m}}$$

Na **Tabela 17**, são apresentados os valores das combinações de ações por vigota.

Tabela 17: Combinações quase permanente de ações

LAJE	COMBINAÇÃO QUASE PERMANENTE - P_{qp} (kN/m)
L1	1,58
L2	1,62
L3	1,67

Fonte: O autor (2023)

Seção homogeneizada (Equação 6)

Determinação da Razão modular:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$$

Com:

$$E_s = 210000 \text{ MPa} \quad (\text{Módulo de elasticidade do aço. Tabela 7})$$

$$E_{cs} = 24150 \text{ MPa} \quad (\text{Módulo de elasticidade secante do concreto, calculado no item 3.3.1})$$

Assim, para concreto de f_{ck} igual a 25 MPa, temos:

$$\alpha_e = \frac{210000}{24150}$$

$$\alpha_e = 8,7$$

Portanto:

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1)$$

$$A_h = (49 - 10) \cdot 5 + 10 \cdot 13 + 0,88 \cdot (8,7 - 1)$$

$$A_h = 195 + 130 + 6,776$$

$$A_h = 331,78 \text{ cm}^2$$

Centro de gravidade (Equação 7)

$$y_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot \frac{h_f^2}{2} + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_h} + \frac{A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h}$$

$$y_g = \frac{(49 - 10) \cdot \frac{5^2}{2} + 10 \cdot \frac{13^2}{2}}{331,78} + \frac{0,88 \cdot (8,7 - 1) \cdot 11,5}{331,78}$$

$$y_g = 4,01 + 0,24$$

$$y_g = 4,25 \text{ cm}$$

Momento de inércia da seção bruta (Equação 8)

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

$$I_I = \frac{(49 - 10) \cdot 5^3}{12} + \frac{10 \cdot 13^3}{12} + (49 - 10) \cdot 5 \cdot \left(4,25 - \frac{5}{2}\right)^2 + 10 \cdot 13 \cdot \left(4,25 - \frac{13}{2}\right)^2 + 0,88 \cdot (8,7 - 1) \cdot (4,25 - 11,5)^2$$

$$I_I = 406,25 + 1830,83 + 597,19 + 658,13 + 356,16$$

$$I_I = 3848,56 \text{ cm}^4$$

A **Tabela 18** apresenta os resultados das características geométricas da seção para o estádio I de todas as lajes.

Tabela 18: Características Geométricas das lajes - Estádio I

CASOS	LAJE	A _h - ÁREA DA SEÇÃO ESTÁDIO I (cm ²)	Y _g - CENTRO DE GRAVIDADE (cm)	I _I - MOMENTO DE INÉRCIA À FLEXÃO - SEÇÃO BRUTA (cm ⁴)
Hipótese 1	L1	331,78	4,25	3848,56
	L2	351,75	4,84	5854,10
	L3	374,15	5,54	8699,65
Hipótese 2	L1	301,75	3,53	2091,36
	L2	321,75	4,04	3373,83
	L3	344,15	4,68	5444,34
Trelifácil®	L1	331,75	4,22	3731,17
	L2	354,15	4,87	5843,18
	L3	374,15	5,51	8477,90

Fonte: O autor (2023)

Profundidade da linha neutra (Equação 9)

Será desconsiderada a contribuição da armadura de compressão ($A'_s = 0$) para os cálculos a seguir, pois ela é inexistente.

$$a_1 = \frac{b_f}{2}$$

$$a_1 = \frac{49}{2}$$

$$\mathbf{a_1 = 24,5 \text{ cm}}$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + \alpha_e \cdot A_s + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s$$

$$a_2 = 5 \cdot (49 - 10) + 8,7 \cdot 0,88 \quad ; \quad (\text{com } A'_s = 0)$$

$$a_2 = 195 + 7,656$$

$$\mathbf{a_2 = 202,656 \text{ cm}^2}$$

$$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w) + d' \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s$$

$$a_3 = -11,5 \cdot 8,7 \cdot 0,88 - \frac{5^2}{2} \cdot (49 - 10) \quad ; \quad (\text{com } A'_s = 0)$$

$$a_3 = -88,05 - 487,5$$

$$\mathbf{a_3 = -575,55 \text{ cm}^3}$$

Assim, a LN, para o Estádio II é:

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1}$$

$$x_{II} = \frac{-202,656 \pm \sqrt{202,656^2 - 4 \cdot 24,5 \cdot (-575,55)}}{2 \cdot 24,5}$$

$$x_{II} = \frac{-202,656 + \sqrt{202,656^2 - 4 \cdot 24,5 \cdot (-575,55)}}{2 \cdot 24,5}$$

$$x_{II} = \frac{-202,656 + 312,207}{49}$$

$$x_{II} = \frac{109,754}{49}$$

$$x_{II} = 2,24 \text{ cm} < h_f = 5,0 \text{ cm} \quad (\text{LN dentro da capa})$$

Como a posição da linha neutra está dentro da capa, a seção será considerada como retangular com $b_w = b_f$ para o cálculo do momento de inércia.

Momento de inércia da seção fissurada (Equação 13)

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s \cdot (x_{II} - d')^2$$

$$I_{II} = \frac{49 \cdot 2,24^3}{3} + 8,7 \cdot 0,88 \cdot (2,24 - 11,5)^2 \quad ; \quad (A'_s = 0)$$

$$I_{II} = 183,57 + 656,48$$

$$I_{II} = 840,05 \text{ cm}^4$$

A **Tabela 19** apresenta os resultados das características geométricas da seção para todas as lajes do Estádio II.

Tabela 19: Características Geométricas das lajes - Estádio II

CASOS	LAJE	a ₁ (cm ²)	a ₂ (cm ²)	a ₃ (cm ³)	XII - PROFUNDIDADE DA LN NO ESTÁDIO II (cm)	II - MOMENTO DE INÉRCIA À FLEXÃO - SEÇÃO FISSURADA (cm ⁴)
Hipóteses 1e 2	L1	24,5	202,656	-575,55	2,24	837,12
	L2	24,5	204,80	-590,48	2,27	1152,86
	L3	24,5	207,51	-647,75	2,43	2000,38
Trelifácil®	L1	24,5	202,63	-565,30	2,20	662,46
	L2	24,5	207,51	-613,63	2,32	1213,21
	L3	24,5	207,51	-634,31	2,39	1664,79

Fonte: O autor (2023)

Momento de fissuração (Equação 15)

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_I}{y_t}$$

Onde:

$$\alpha = 1,2 \text{ (seção "T")}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot 25^{\frac{2}{3}}$$

$$f_{ct,m} = 2,56 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,m} = \mathbf{0,256 \text{ kN/cm}^2}$$

$$I_I = \mathbf{3848,56 \text{ cm}^4} \text{ (já calculado)}$$

Distância da borda tracionada até o centroide do Estádio II

$$y_t = h - y_{CG}$$

$$y_t = 13 - 4,25$$

$$y_t = \mathbf{8,75 \text{ cm}}$$

Assim:

$$M_r = \frac{1,2 \cdot 0,256 \cdot 3848,56}{8,75}$$

$$M_r = 135,12 \text{ kN.cm}$$

Momento ativo para a combinação quase permanente (Equação 17)

$$M_a = \frac{F_{d, serv} \cdot L^2}{8}$$

$$M_a = \frac{1,57 \cdot (3,0)^2}{8}$$

$$M_a = 1,766 \text{ kN.m}$$

$$M_a = 176,6 \text{ kN.cm}$$

A **Tabela 20** mostra os resultados obtidos para todas as lajes.

Tabela 20: Momento atuante e de fissuração para as lajes

CASO	LAJE	M _a - MOMENTO ATUANTE NO VÃO (kN.cm)	y _t - DISTÂNCIA ENTRE FIBRA + TRACIONADA E A LN (cm)	M _r - MOMENTO DE FISSURAÇÃO (kN.cm)
Hipótese 1	L1	176,600	8,75	135,12
	L2	248,003	10,16	177,407
	L3	334,298	11,46	233,741
Hipótese 2	L1	176,370	6,47	99,489
	L2	248,003	7,96	130,396
	L3	334,298	9,32	179,728
Trelifácil®	L1	176,370	8,78	130,863
	L2	248,003	10,13	177,514
	L3	334,298	11,49	227,152

Fonte: O autor (2023)

Inércia média de Branson (Equação 16)

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_{II}$$

$$I_m = \left(\frac{135,12}{176,6}\right)^3 \cdot 3848,56 + \left[1 - \left(\frac{135,12}{176,6}\right)^3\right] \cdot 840,05$$

$$I_m = 2187,58 \text{ cm}^4$$

Rigidez equivalente (Equação 19)

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot I_m \leq E_{cs} \cdot I_l$$

$$(EI)_{eq} = \frac{24150}{10} \cdot 2187,58 \leq \frac{24150}{10} \cdot 3848,56$$

$$(EI)_{eq} = 5283005,7 \leq 9294272,4 \text{ (OK!)}$$

$$(EI)_{eq} = 5283005,7 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$

$$(EI)_{eq} = 528,3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

Flecha imediata (Equação 18)

O cálculo da flecha imediata é realizado com P sendo a carga de serviço $F_{d, serv} = 1,552 \text{ kN}$.

$$a_i = \frac{5}{384} \cdot \frac{PL^4}{(EI)_{eq}}$$

$$a_i = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,572 \cdot 3^4}{451,73}$$

$$a_i = 0,0031 \text{ m}$$

$$a_i = 0,31 \text{ cm}$$

Flecha diferida (Equação 20)

Para o cálculo da flecha diferida no tempo, será considerado o tempo (t) para a retirada dos escoramentos t = 28 dias. O valor dessa flecha será o mesmo para todas as lajes.

$$a_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'}$$

Sendo:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

$$\rho' = \frac{As'}{b_w \cdot d}$$

Onde:

$$\xi(t) = 2 \quad (\text{para } t > 70 \text{ meses})$$

$$\xi(t_0) = 0,68 \cdot 0,996^t \cdot t^{0,32} \quad (\text{para } t \leq 70 \text{ meses})$$

$$\xi(t_0) = 0,68 \cdot 0,996^{\left(\frac{28}{30}\right)} \cdot \left(\frac{28}{30}\right)^{0,32}$$

$$\xi(t_0) = 0,66$$

$$\rho' = 0 \quad ; \quad (As' = 0)$$

Assim:

$$a_f = \frac{2 - 0,66}{1 + 50 \cdot 0}$$

$$a_f = \frac{1,34}{1}$$

$$\mathbf{a_f = 1,34 \text{ cm}}$$

Flecha total (Equação 21)

A calculada a flecha total é:

$$a_t = a_i \cdot (1 + a_f)$$

$$a_t = 0,31 \cdot (1 + 1,34)$$

$$a_t = 0,73 \text{ cm}$$

Verificação da flecha total (Tabela 4)

Por fim, é feita a verificação da flecha total com a flecha limite estabelecida pela ABNT NBR 6118:2014, de acordo com a Figura 14 do item 2.10.4, e realizada a comparação entre as flechas das lajes para cada hipótese.

A flecha limite para a laje L1 é:

$$a_{lim} = \frac{L}{250}$$

$$a_{lim} = \frac{300}{250}$$

$$a_{lim} = 1,20 \text{ cm}$$

Na **Tabela 21**, são apresentados os resultados obtidos para as flechas de todas as lajes, para as duas hipóteses, as comparando com as flechas das lajes com vigotas Trelifácil®. As lajes da Hipótese 2 apresentaram valores de flechas maiores que a flecha limite.

Tabela 21: Resultado das flechas para as lajes

LAJE	FLECHA LIMITE a_{lim} (cm)	FLECHA TOTAL - a_{tot} (cm)		
		Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3 (Trelifácil®)
L1	1,20	0,73	1,51	0,84
L2	1,40	1,07	2,08	1,05
L3	1,60	1,26	2,13	1,42

Fonte: O autor (2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no Capítulo 3 para as flechas da Hipótese 1, apresentados na **Tabela 21**, mostraram que o uso da Trelifácil® contribuiu para o acréscimo das flechas, no pior resultado, em 14,68%, conforme mostra **Tabela 22**.

Tabela 22: Comparação dos resultado das flechas para as lajes

COMPARAÇÃO ENTRE AS HIPÓTESES	LAJE	FLECHA TOTAL - a_{tot} (cm)		REDUÇÃO
		COM VIGOTA COMUM	COM TRELIFÁCIL®	
Hipótese 1 Hipótese 3	L1	0,73	0,84	-14,68%
	L2	1,07	1,05	1,28%
	L3	1,26	1,42	-12,84%
Hipótese 2 Hipótese 3	L1	1,51	0,84	44,56%
	L2	2,08	1,05	49,31%
	L3	2,13	1,42	33,31%

Fonte: O autor (2023)

Esses resultados foram devido às seguintes considerações para as vigotas comuns:

- Contribuição da base de concreto nos cálculos dos momentos de inércias da seção no Estádio I;
- O concreto presente na base da vigota possui a mesma resistência e módulo de elasticidade que o concreto lançado in loco;
- Desprezo do efeito da junta fria na seção.

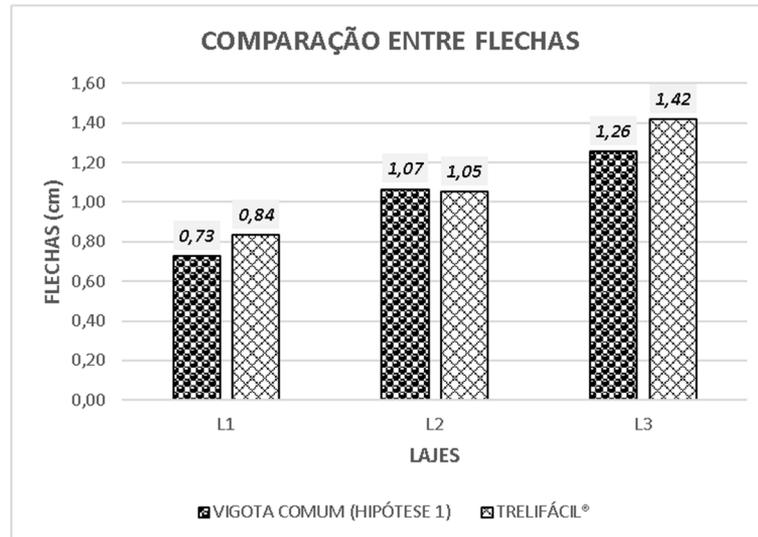
Isso se dá pelo fato que, de acordo com o fabricante e como já foi mostrado no item 2.13.5, a Trelifácil® respeita o cobrimento da armadura determinado pela ABNT NBR 6118:2014; com isso, o centro de gravidade da armadura fica mais alto em relação ao da vigota comum, o que diminui, por consequência, o valor da altura útil da seção (d).

A altura útil da seção sendo reduzida contribui diretamente para a redução dos momentos de inércia nos Estádios I e II que, na determinação da flecha imediata, acarreta em valores ligeiramente maiores, já que a rigidez equivalente (que depende das inércias citadas) é inversamente proporcional ao valor da flecha.

Já, os resultados para a Hipótese 2, **Tabela 21**, mostraram que o uso da Trelifácil® reduziu significativamente as flechas em todas as lajes, na faixa de 44,56% a 49,31% (**Tabela 22**); sendo a laje L2 a que apresentou maior redução dentre elas. Os **Gráfico 1** e **Gráfico 2**,

mostram os resultados sintetizados e o **Gráfico 3**, traz os resultados gerais do aumento e redução citados nas flechas com uso de Trelifácil®.

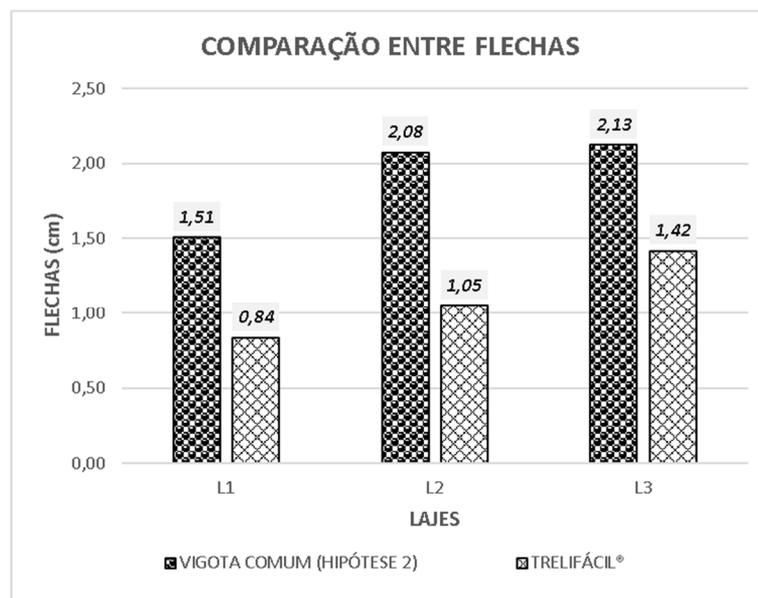
Gráfico 1: Comparação das flechas para a Hipótese 1



Fonte: O autor (2023)

Conforme mencionado anteriormente (**Tabela 22**) e como mostra as barras do **Gráfico 1**, as lajes L1 e L3 que utilizaram a Trelifácil® geraram flechas maiores que as mesmas lajes da Hipótese 1, que considera a contribuição da base de concreto presente nelas, com exceção dos resultados para as lajes L2.

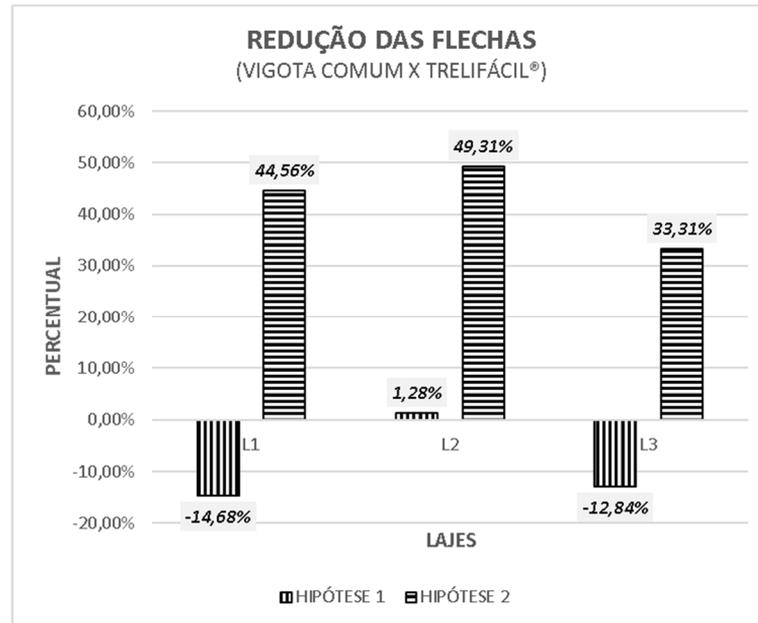
Gráfico 2: Comparação das flechas para a Hipótese 2



Fonte: O autor (2023)

O **Gráfico 2** mostra que o uso da Trelifácil® resultou em flechas menores em relação às vigotas da Hipótese 2, que desconsidera a contribuição da base de concreto presente nelas.

Gráfico 3: Resultado geral do aumento e redução percentual nas flechas



Fonte: O autor (2023)

As barras com detalhes de linhas horizontais do **Gráfico 3** traz o percentual de redução nas flechas das lajes com o uso da Trelifácil®, em comparação com as vigotas da Hipótese 1; já as barras com linhas na vertical mostram o resultado percentual do comportamento da Trelifácil® em combater as flechas, com relação às vigotas da Hipótese 2.

Como já mencionado no início deste capítulo, tendo os valores percentuais apresentados no **Gráfico 3**, o emprego de vigotas treliçadas, considerando a Hipótese 1, para a fabricação de lajes, resultou num desempenho superior ao atingido pelas vigotas Trelifácil® para as mesmas condições de cálculo: carregamentos, vãos, vinculações, seção transversal, armaduras e capa de concreto. De modo geral, o uso da Trelifácil® resultou, em sua maioria, na formação de flechas totais menores (se comparado com todas as lajes da Hipótese 2 e a L2 da Hipótese 1), apresentando melhor eficiência que as vigotas treliçadas comuns nesses casos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no estudo realizado, notou-se que o sistema Trelifácil® apresenta significativa redução das flechas totais, considerando a peça como um monólito concretado in loco, como estabelecido na Hipótese 3. Dentre os parâmetros considerados na formação das flechas, o efeito da junta fria considerada na Hipótese 2, teve grande influência em sua magnitude (49,31% a mais que a Hipótese 3), pois a presença da junta fria foi um dos fatores que determinou a desconsideração da colaboração do concreto presente na base das vigotas comuns e isso resultou em flechas mais acentuadas.

Outro ponto que vale ressaltar é em relação à altura útil (d). As lajes da Hipóteses 1 e 2 possuem a mesma altura útil entre si, e estas são maiores (embora pouco) que as da Hipótese 3, pois a posição da armadura na Trelifácil® é mais alta que nas vigotas comuns, o que torna o seu centroide, igualmente mais alto. Essa pequena diferença foi o suficiente pelos resultados das flechas entre a lajes das Hipóteses 1 e 3. Nestas duas hipóteses, a única diferença entre as lajes foi a forma galvanizada presente nas lajes com a Trelifácil®, elas possuíam as mesmas condições de carregamento, vinculação e dimensão.

Nesse sentido, o fator que definiu flechas maiores nas lajes com Trelifácil® (Hipótese 3) foi a localização do centroide da armadura, que configura altura útil menor. Os objetivos foram alcançados em parte, pois como visto no capítulo 4 as lajes da Hipótese 1 se mostraram mais eficientes apresentando flechas menores nas lajes L1 e L3.

Vale lembrar que, para se alcançar tais resultados com as vigotas comuns, é necessário haver um controle de qualidade do concreto presente em sua base, de modo a garantir pouca variação na resistência entre o concreto das bases das vigotas e o que será lançado na obra, o que resultaria em módulos de elasticidades equivalentes. Faz-se necessário, também, a garantia da perfeita aderência entre os dois concretos.

5.1. Sugestões para pesquisas futuras

A seguir é apresentada uma sugestão que possa embasar futuras pesquisas sobre o tema tratado neste trabalho:

- estudo prático considerando a viabilidade do uso do aço presente na forma como contribuição para a armadura positiva de tração e na redução das flechas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995). ACI 435R-95 - Control of Deflection in Concrete Structures (Reapproved 2000). ACI manual of concrete practice. Detroit, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 6120. Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. **NBR 14859-1: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 14859-2: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 14859-3: Lajes pré-fabricadas de concreto Parte 3: Armaduras treliçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABARCA DURAND, JHACH KELVING; PINEDO BAYONA, SENAI DA. **Influencia de juntas frías con diferentes tiempos de formación, en la resistencia a compresión y tracción del concreto $F'c=210$ kg/cm²**, Cusco. Disponível em: <<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58607>>. Acesso em: 12 de setembro de 2022.

ALVES, IGOR OLIVEIRA. **ANÁLISE PRELIMINAR DE VIGAS ALVEOLARES MISTAS PROTENDIDAS PARA DIFERENTES TIPOS DE GEOMETRIAS DE ALVÉOLOS**. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/21447/1/2018_IgorOliveiraAlves_tcc.pdf>. Acesso em: 23 de outubro de 2022.

ANDRADE, Bruno Souza Oliveira. **CONCRETO ARMADO: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS, DURABILIDADE, PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SUAS ESTRUTURAS.** Disponível em:

<<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30820/2/VERS%C3%83O%20OFICIAL%20-%20BRUNO%20TCC-REVISADA-%2029.01.16.pdf>>. Acesso em: 23 de outubro de 2022.

ARCELORMITTAL. **Trelifácil®.** Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/trelifacil>>. Acesso em 9 de julho de 2022.

AZEVEDO, PEDRO RIBEIRO. **Confinamento dado por vigas e lajes a pilares feitos com concretos de diferentes resistências ao longo da altura.** Disponível em:

<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-22102014-165727/en.php>>. Acesso em: 29 de julho de 2022.

BARBOSA, MARCELO DIEGO DE ALMEIDA. **ANÁLISE DE FLECHAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO.** Disponível

em:<http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2010/Marcelo_Barbosa_Analise%20de%20Flechas%20em%20Vigas%20de%20Concreto%20Armado.pdf>. Acesso em: 14 de dezembro de 2022.

BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. **MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.**

Disponível em: <http://www.abece.com.br/web/download/pdf/eventos_em_3_2007.pdf>. Acesso em: 23 de janeiro de 2022.

CAMACHO, Jefferson Sideny. **CONCRETO ARMADO: ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO.** Disponível em:

<<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/estados-limites-de-servico.pdf>>. Acesso 8 de setembro de 2022.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado.** São Carlos, SP.: EDUFSCAR. 2014.

COMMITTEE 116. **Cement and Concrete Terminology. Reported by ACI Committee**

116. Disponível em: <http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20116R-00%20Cement%20and%20Concrete%20Terminology_MyCivil.ir.pdf>. Acesso em: 12 de setembro de 2022.

DE PRADO GIL, JESÚS; PALENCIA, COVADONGA; SILVA MONTEIRO, NEEMIAS; MARTÍNEZ GARCÍA, REBECA. **To predict the compressive strength of self compacting concrete with recycled aggregates utilizing ensemble machine learning models** (Case Studies in Construction Materials). Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S2214509522001784/pdf>>. Acesso em: 27 de setembro de 2022.

EDITORA DUNAS. Disponível em:

<http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero_01.pdf>. Acesso em: 07 de março de 2022.

ENGENHEIRO PLANILHEIRO. **Cálculo de FLECHAS em vigas de Concreto Armado passo a passo - Introdução**. Youtube, 16 de março de 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=C4q-XpFCnX8>>. Acesso em 24 de abril de 2023.

FERREIRA, WILLER MOTA; MELO, PEDRO TOMÉ DE; PAULA, MARCELO CÂNDIDO DE. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO APLICADO EM CAMADAS**. Disponível em: <<https://rv.ifgoiano.edu.br/periodicos/index.php/gst/article/view/1209>>. Acesso em: 19 de setembro de 2022.

FLÓRIO, Márcio Cardozo. **PROJETO E EXECUÇÃO DE LAJES UNIDIRECIONAIS COM VIGOTAS EM CONCRETO ARMADO**. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4630/dissmcf.pdf?sequence=1>>. Acesso em 10 de outubro de 2022.

GUALDRÓN NIETO, JUAN DAVID; REY GARCÍA, JESSICA ALEJANDRA. **Evaluación de la resistencia a la flexión en vigas de concreto simple con presencia de juntas frías verticales e inclinadas tratadas epoxicamente**. Disponível em: <<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/9691>>. Acesso em: 29 de julho de 2022.

GUIA DA ENGENHARIA. **Estádio de deformação do concreto**. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/estadios-deformacao-concreto/>>. Acesso em: 12 de setembro de 2022.

GUIA DA ENGENHARIA. **Estados limites**. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/estados-limites/>>. Acesso em: 07 de março de 2022

GUIA DA ENGENHARIA. **Estádio de deformação do concreto**. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/estadios-deformacao-concreto/>>. Acesso em: 07 de março de 2022.

GRUPO PRESENCE. **ENTENDA UM POUCO SOBRE A LAJE TRELIÇADA**. Disponível em: <<https://grupopresence.com.br/laje-trelicada>> Acesso em: 23 de janeiro de 2022

INSTITUTO DE ENGENHARIA. Disponível em: <<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/arqnot8758.pdf>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2022

LOURENÇO, Paulo B; BRANCO, Jorge M. **Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI**. Disponível em: <http://repositorium.uminho.pt/bitstream/1822/26503/1/Lourenco_Branco.pdf>. Acesso em: 18 de dezembro de 2022.

MAIS ENGENHARIA. **O que posso fazer para reduzir o deslocamento em estruturas?**. Disponível em: <<https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/o-que-posso-fazer-para-reduzir-o-deslocamento-em-estruturas/>>. Acesso em 24 de abril de 2023.

MANFREDINI, H.J. **Avaliação do comportamento dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional**. 2003. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4247>>. Acesso em: 07 de janeiro de 2023.

MARCEL, Mazoyer; LAURENCE, Roudart. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. Trad. Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira. São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010.

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

MILANEZ, MARIANA ORTOLAN. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO NA COMPRESSÃO E FLEXÃO UTILIZANDO CONCRETO FRESCO EM DIFERENTES TEMPOS DE APLICAÇÃO**. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/2988>>. Acesso em: 29 de julho de 2022.

NELSO SCHNEIDER. **Domínios do concreto**. Disponível em: <<https://nelsoschneider.com.br/dominios-do-concreto/>>. Acesso em: 17 de abril de 2022.

NELSO SCHNEIDER. **Módulo de elasticidade do concreto**. Disponível em: <<https://nelsoschneider.com.br/modulo-de-elasticidade-concreto/>>. Acesso em: 17 de abril de 2022.

NELSO SCHNEIDER. **O que são os estádios do concreto**. Disponível em: <<https://nelsoschneider.com.br/o-que-sao-os-estadios-do-concreto/>>. Acesso em: 17 de abril de 2022.

NETO, Luiz Tomaz de Aquino; GUIMARÃES, BRUNO BRITO; SILVA, Naiany Michely Andrade. **PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DE LAJES TRELIÇADAS UNIDIRECIONAIS COM ENCHIMENTO EM EPS (POLIESTIRENO EXPANDIDO)**. Disponível em: <<http://45.4.96.19/handle/aee/382>>. Acesso em: 19 de setembro de 2022.

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

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

PACHECO, Thiago. **O ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS - UM TRATAMENTO MATEMÁTICO**. Disponível em: <https://igce.rc.unesp.br/Home/Pos-Graduacao44/programasdepos/pacheco_tl_me_rela.pdf>. Acesso em 23 de março de 2023.

PÁDUA, Marco. **REPARO EM LAJE "CELADA": EVITANDO O USO DA MARRETA**. Disponível em: <<https://profmarcopadua.net/reparolaje.pdf>>. Acesso em 19 de janeiro de 2023.

PEREIRA, Caio. **O QUE É LAJE TRELIÇADA?**. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/laje-trelizada/>>. Acesso em 23 de outubro de 2022.

PEREIRA, Matheus. **Tipos de lajes de concreto: vantagens e desvantagens**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/889035/tipos-de-lajes-de-concreto-vantagens-e-desvantagens>>. Acesso em 23 de outubro de 2022.

PHD Engenharia. **Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração**. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc54.pdf>>. Acesso em: 14 de junho de 2022.

PINHEIRO, Igor. **LAJES TRELIÇADAS: TUDO O QUE VOCÊ PRECISA SABER**. Disponível em: <<https://www.inovacivil.com.br/lajes-trelicadas-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>>. Acesso em 23 de outubro de 2022.

PINHEIRO, Libânio M., MUZARDO Cassiane D., SANTOS Sandro P. **BASES PARA CÁLCULO – CAPÍTULO 6**. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/cv714/Bases_Calculo.pdf>. Acesso em 19 de dezembro de 2022.

PORTAL DO CONCRETO. **Módulo de elasticidade definido**. Disponível em: <<https://www.portaldoconcreto.com.br/concreto-md-elasticidade-definido>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2022.

RANGELLAGE. **ArcelorMittal: Manual Técnico de Lajes Treliçadas**. Disponível em: <<http://rangellage.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Manual-Lajes-Treli%C3%A7adas.pdf>>. Acesso em 11 de novembro de 2022.

REIS, Luciano. **ESTÁDIOS DE TENSÃO**. Disponível em: <<https://spotcursos.com.br/blogs/pilares-do-concreto-armado/posts/estadios-de-tensao>>. Acesso em 14 de setembro de 2022.

SILVA, A. R. **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SOUSA, Nayla Tamires de. **FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA O CÁLCULO DA POSIÇÃO DA LINHA NEUTRA COM A VARIAÇÃO DO CARREGAMENTO CONTÍNUO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO PARA OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS E SEGURANÇA**. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Unifametro, Fortaleza, 2021.