

ESTUDO DO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

DEMIS ZAEL MOREIRA DE SOUZA

Rio Verde, GO

2023

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS**

DEMIS ZAEL MOREIRA DE SOUZA

Trabalho de curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

Rio Verde, GO

Fevereiro, 2023

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

SES82e Souza, Demis Zael Moreira
Estudo do cisalhamento em lajes alveolares
protendidas / Demis Zael Moreira Souza; orientador
Marcel Willian Reis Sales. -- Rio Verde, 2023.
45 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

1. Cisalhamento. 2. lajes alveolares. 3. equações
de cisalhamento.. I. Willian Reis Sales, Marcel,
orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: Artigo científico | |

Nome Completo do Autor: Demis Zael Moreira de Souza

Matrícula: 2018102200840076

Título do Trabalho: Estudo do Cisalhamento em Lajes Alveolares Protendidas

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 07/03/2023

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

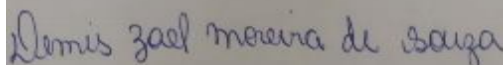
O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 06/03/2023



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Marcel William Reis Saks

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 4/2023 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 28 dia(s) do mês de fevereiro de 2023, às 14 horas e 00 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: orientador **Marcel Willian Reis Sales**, **Michell Macedo Alves**, **Pedro Filipe de Luna Cunha**, para examinar o Trabalho de Curso intitulado " Estudo do cisalhamento em lajes alveolares protendidas" do(a) estudante **Demis Zael Moreira de Souza**, Matrícula nº **2018102200840076** do Curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao(a) estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do(a) candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO mediante ao atendimento de todas as correções sugeridas pela banca. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Marcel Willian Reis Sales

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

Michell Macedo Alves

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Pedro Filipe de Luna Cunha

Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Pedro Filipe de Luna Cunha, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/02/2023 15:27:33.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/02/2023 15:26:34.
- Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/02/2023 15:25:48.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 471071

Código de Autenticação: bb85d57e6d



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

Demis Zael Moreira de Souza

**ESTUDO DO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 28 de fevereiro, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Michell Macedo Alves

Prof. Me. Pedro Filipe de Luna Cunha

Instituto Federal Goiano (IF Goiano/Rio Verde)

Instituto Federal Goiano (IF Goiano/Trindade)

Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales
Instituto Federal Goiano (IF Goiano/Rio Verde)

Rio Verde, GO

Fevereiro, 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde pelos ensinamentos fornecidos durante o processo de formação profissional. Agradeço também ao meu professor e orientador tanto pela grande contribuição em diversos capítulos da minha formação quanto por depositar confiança e me orientar de forma solícita na produção do trabalho de conclusão. Agradeço à minha família e amigos por estarem ao meu lado durante essa caminhada.

BIOGRAFIA DO ALUNO

Natural da cidade de Iporá-GO, filho de Iracema Moreira de Souza e Daniel Almeida de Souza. Graduando(a) em Engenharia Civil pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. Em 2021 começou um estágio na empresa Projeção Engenharia onde se aprofundou na execução projetos, arquitetônico e complementares. Durante o período acadêmico percebeu grande afinidade com temas relacionados à estrutura das edificações. Assim sendo, despertou a vontade de continuar pesquisando a área de estruturas, para melhor entender o comportamento de elementos estruturais mais complexos. Buscando, por meio da apresentação desse trabalho, a conclusão do bacharel em engenharia civil.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados obtidos por Sales, Ferreira e Araújo (2022).....	26
Tabela 2: Características das Lajes.....	27
Tabela 3: f_{ck} , $f_{ct,m}$ e f_{ctk} das lajes estudadas.	29
Tabela 4: Resultados obtidos pelo uso da NBR 14861:2022, utilizando $f_{ct,m}$	30
Tabela 5: Resultados obtidos pelo uso da equação proposta, utilizando $f_{ct,m}$	31
Tabela 6: Resultados obtidos pelo uso da equação proposta, utilizando f_{ck}	34
Tabela 7: Resultados obtidos pelo uso da equação proposta e pela NBR 14861:2022, utilizando f_{ctk}	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Desvio Padrão dos resultados obtidos pela equação da NBR 14861:2022.....	31
Gráfico 2: Desvio Padrão dos resultados obtidos pela equação proposta.	33
Gráfico 3: Desvio padrão utilizando a equação do Eurocode EC-2-1-1:2004, usando o f_{ck} ..	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Laje alveolar protendida	14
Figura 2: Formas possíveis dos alvéolos.....	15
Figura 3: Fissuras por flexão.....	16
Figura 4: Fissuras por tensão de cisalhamento.....	16
Figura 5: Laje alveolar protendida	20
Figura 6: Formas possíveis dos alvéolos.....	21
Figura 7: Fissuras por flexão.....	21
Figura 8: Fissuras por tensão de cisalhamento.....	22
Figura 9: Laje alveolar em piso de edifício com múltiplos pavimentos	23
Figura 10: Cordoalhas.....	24
Figura 11: Fissura oriunda da tração diagonal a partir de força aplicada a uma distância h do apoio.....	25
Figura 12: Geometria lajes retiradas do artigo de Brunesi, 2015.....	28

LISTA DE SIMBOLOS

A_c : Área de concreto da seção transversal (mm^2)

A_{sl} : Area de aço (mm^2)

B_w : Soma total da espessura da alma individual da laje alveolar pré moldada. (mm)

e : excentricidade

d : Altura útil da laje alveolar protendida

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto em 28 dias (Mpa)

f_{ctk} : Menor resistência à tração do concreto (Mpa)

$f_{ct,m}$: Resistência à tração do concreto média (Mpa)

$f_{ctm,fl}$: Valor médio da resistência à tração à flexão do concreto (MPa)

h : Altura da laje alveolar protendida

I_c : Segundo momento de área – inércia – (mm^4)

N_p : Força axial na seção transversal (kN)

V_c : Parcela de contribuição do concreto na estimativa da resistência ao cisalhamento (kN)

V_{ci} : Resistência nominal ao cisalhamento do concreto em flexão na ruptura

V_p : Parcela de contribuição da protensão na estimativa da resistência ao cisalhamento (kN)

Y_{inf} : Distância do centróide até a fibra inferior da seção transversal (mm)

σ_{cp} : Tensão normal do concreto no ponto crítico (MPa).

δ : Relação entre o momento máximo de fissuração e o momento de fissuração de protensão

ϕ : Média aritmética dos valores obtidos

ω : Desvio padrão populacional dos valores obtidos.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
1 OBJETIVO	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
4 CAPÍTULO ÚNICO	19
RESUMO	19
ABSTRACT	19
4.1 Introdução	20
4.2 Referencial Teórico	22
4.2.1 Lajes Alveolares Protendidas – Características, Esforços e Mecanismos de Ruptura	22
4.2.2 O Estudo de Sales, Ferreira e Araújo (2022)	25
4.3 Métodos	27
4.4 Resultados e discussões	30
4.5 Conclusão	37
Agradecimentos	38
Referências	38
APÊNDICES	39

RESUMO

SOUZA, D. Z. M. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, 2022. **Estudo do cisalhamento em lajes alveolares protendidas.**

Orientador: Marcel Willian Reis Sales

Acompanhando o crescimento de 9,7% em 2021 no setor da construção civil, a indústria de pré-moldados vem apresentando grande aumento na demanda por elementos estruturais pré-fabricados. O uso das lajes alveolares protendidas contribuem, por exemplo para o projeto de edificações que possuam espaços com maiores vão e mais integrados. Assim, conhecer e estudar as características das lajes alveolares protendidas se mostra fundamental. Diante disso, deve-se conhecer o comportamento da mesma quando submetidas a forças, em especial em relação ao cisalhamento. Para isso 15 lajes dispostas no estudo de 5 autores foram escolhidas para análise. De modo geral, este trabalho busca estimar a resistência ao cisalhamento para lajes alveolares protendidas, mediante o uso de 3 equações – sendo elas: a equação disponível pela ABNT NBR 14861:2022, a equação fornecida pelo Eurocode (EC-2-1-1:2004), e por último, a forma analítica proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022), que inclui em seus cálculos outros fatores como a inércia, buscando maior assertividade e refinamento dos resultados. Lajes de diversas alturas são estudadas usando estas equações. Lajes de alturas acima de 320 mm mostraram também rupturas por flexão nos trabalhos, o que pode ser avaliado a utilização destas equações que são características de ruptura por flexão devido ao cisalhamento. A determinação do método mais eficaz pode contribuir positivamente para que os projetistas consigam projetar elementos com uma boa relação custo/segurança. Mediante a análise dessas 15 lajes ensaiadas e presentes na bibliografia, pôde-se concluir que a equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022) é eficiente quanto ao dimensionamento da força cisalhante estudada e que, além disso, pode ser utilizada para o dimensionamento de tais forças para lajes de alturas superiores a 320mm.

Palavras chave: Cisalhamento, lajes alveolares, equações de cisalhamento.

ABSTRACT

SOUZA, D. Z. M. Federal Institute of Education, Science, and Technology of Goiás – Campus Rio Verde – GO, 2022. **Study of shear in prestressed hollow core slabs.**

Advisor: Marcel Willian Reis Sales

Accompanying the 9.7% growth in 2021 in the civil construction sector, the precast industry has shown a large increase in demand for prefabricated structural elements. The use of prestressed hollow core slabs contributes, for example, to the design of buildings that have spaces with larger spans and more integrated. Thus, knowing and studying the characteristics of prestressed hollow core slabs is fundamental. In view of this, one must know its behavior when subjected to forces, especially in relation to shear. For this, 15 slabs arranged in the study of 5 authors were chosen for analysis. In general, this work seeks to estimate the shear strength for prestressed hollow core slabs, using 3 equations - namely: the equation available by ABNT NBR 14861:2022, the equation provided by Eurocode (EC-2-1-1 :2004), and finally, the analytical form proposed by Sales, Ferreira and Araújo (2022), which includes other factors such as inertia in its calculations, seeking greater assertiveness and refinement of the results. Slabs of different heights are studied using these equations. Slabs with heights above 320 mm also showed bending failure in the works, which can be evaluated using these equations that are characteristics of bending failure due to shear. Determining the most effective method can positively contribute to designers being able to design elements with a good cost/safety ratio. Through the analysis of these 15 slabs tested and present in the bibliography, it could be concluded that the equation proposed by Sales, Ferreira and Araújo (2022) is efficient in terms of dimensioning the shear force studied and that, in addition, it can be used for dimensioning of such forces for slabs with heights greater than 320mm.

Keywords: Shear. Alveolar slabs. Shear equations.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil segue em constante crescimento no país. De acordo com dados obtidos pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) o segmento apresentou avanço em seu PIB de 9,7% em 2021, recuperando-se do retrospecto negativo do ano de 2020, onde o setor teve queda 6,3%. Com o notório desenvolvimento desse setor a otimização de processos e produtos relacionados a ele vem se mostrando importante.

Nesse sentido, as lajes alveolares protendidas vem ganhando espaço no setor da construção civil visto que elas reduzem o tempo de construção, bem como diminuem o desperdício de materiais, gerando eficiência no processo construtivo. A notória projeção de avanço no uso desse tipo de elemento atrai os olhares de empresas, pesquisadores e projetistas aponta Sales (2020). A figura 1, mostra um tipo de laje alveolar protendida e a nomenclatura de alguns elementos que compõe essas lajes.

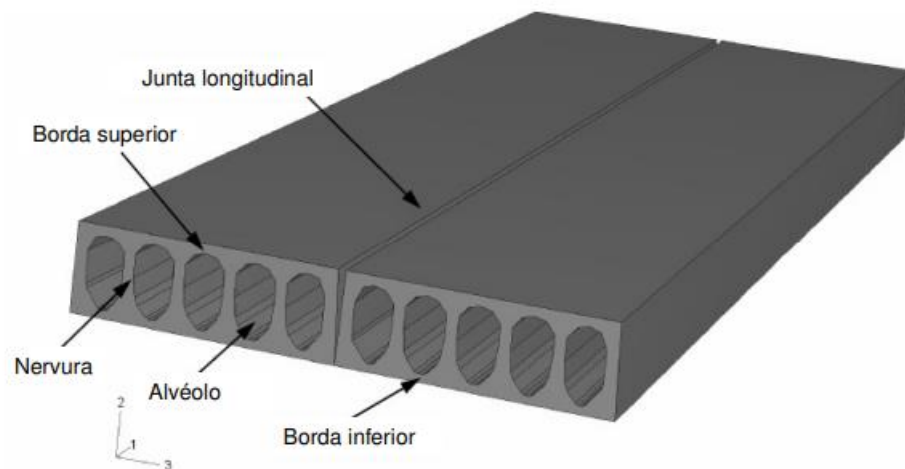


Figura 1: Laje alveolar protendida

Fonte: Catoia (2011)

Brevemente, lajes alveolares protendidas, tratam se de estruturas pré-moldadas de concreto, sendo atualmente um dos segmentos mais avançados dentro do ramo. Com a utilização delas é possível que se construa edificações e vãos tidos como grandes, na ordem de 4 m a 20 m, aponta Catoia (2011). Elas podem ser fabricadas geralmente por dois mecanismos, são eles o de extrusão e o de formas deslizante.

As lajes alveolares protendidas são compostas pela parte da estrutura em concreto e pela parcela da protensão. Atualmente as lajes alveolares protendidas são produzidas com uma

variada gama de alturas, desde 100 mm até as de uso especial de 400 mm. Sua fabricação é feita através de uma pista, conhecida como pista de protensão ou concretagem, afirma Sales (2020). As lajes podem variar quanto à altura, geometria dos alvéolos, diâmetro deles, quantidade de nervuras, dentre outros aspectos e dependem da forma de moldagem dessas lajes, conforme figura 2:



Figura 2: Formas possíveis dos alvéolos.

Fonte: Pajari (2005, p. 9)

Assim, conhecer e estudar as características das lajes alveolares protendidas se mostra fundamental. Diante disso, deve-se conhecer o comportamento das mesmas quando submetidas a esforços, em especial em relação ao cisalhamento. De acordo com Sales (2020), as propriedades dos elementos presentes na composição desse tipo de laje, como as propriedades do concreto, bem como as características geométricas, formas dos alvéolos, circulares ou não, altura e tipo de fabricação corroboram e podem influenciar o comportamento das lajes quando submetidas ao cisalhamento. Sales (2020) afirma que a maneira que tais lajes referidas se comportam possuem certa complexidade, devido ao fato de que, dependendo do modo de produção realizado, da forma dos alvéolos, diferentes formas de ruptura são possíveis.

As lajes alveolares protendidas não possuem armadura para resistir ao cisalhamento, onde, nelas, os elementos que a compõem são necessários para garantir a resistência das mesmas. Assim, as cordoalhas devem possuir boa aderência, transferindo a protensão ao concreto (SALES, 2020).

Segundo Sales, Ferreira e Araújo (2022), a ruptura em lajes alveolares protendidas podem ocorrer, geralmente, através de dois mecanismos, sendo em um primeiro caso por flexão pura e outro por tensão de cisalhamento. Ainda segundo o autor a resistência ao cisalhamento, para o estado de limite último, sofre influência direta das fissuras e, para o caso da ruptura por tensão de cisalhamento acontece em partes da laje onde ainda não houveram fissuras por flexão pura. Nesse segundo caso de ruptura foi constatado que ocorre quando a tensão na seção se iguala à resistência à tensão de cisalhamento do concreto, ocorrendo isso o elemento rompe

abruptamente. Os dois modos de ruptura para lajes alveolares protendidas são mostrados nas figuras 3 e 4, respectivamente.

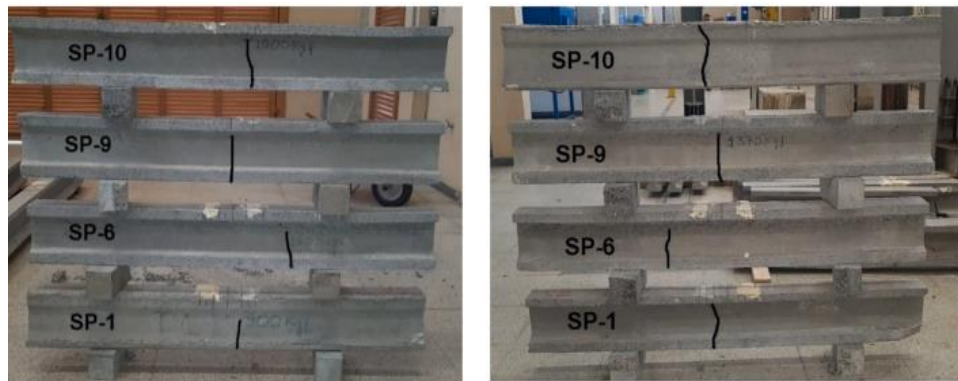


Figura 3: Fissuras por flexão.

Fonte: (Sales, Ferreira e Araújo, 2022).

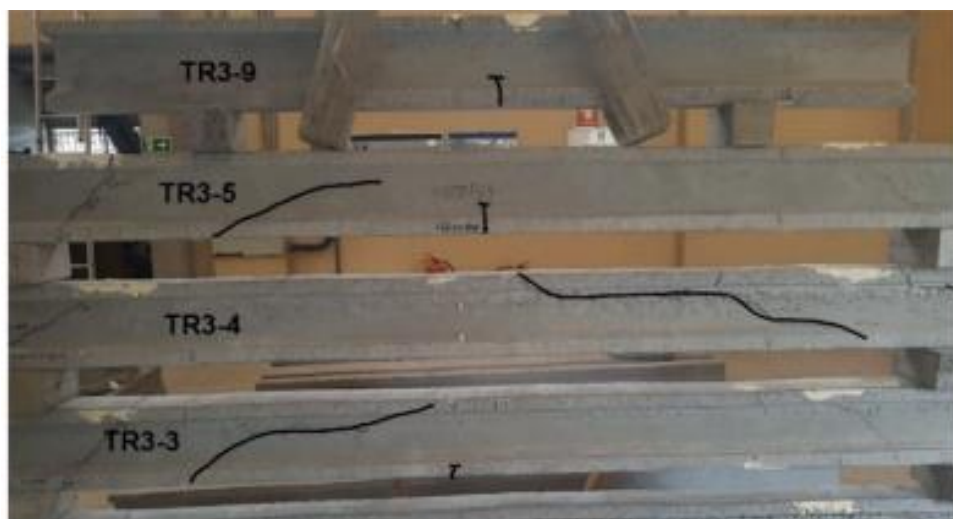


Figura 4: Fissuras por tensão de cisalhamento.

Fonte: (Sales, Ferreira e Araújo, 2022).

Como pode-se observar nas figuras 3 e 4, fissuras por flexão possuem o comportamento de surgirem na vertical com angulação de 90° em relação ao elemento, já por tensão de cisalhamento aparecem diagonalmente, com angulação de 45° do elemento.

No presente estudo, 15 lajes ensaiadas nos trabalhos de 5 autores foram escolhidas para uma análise entre 3 equações – a equação disponível pela ABNT NBR 14861:2022, Eurocode EC-2-1-1:2004 e a equação analítica proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022) verificando a estimativa de forma analítica da resistência ao cisalhamento por flexão, e cisalhamento considerando as parcelas de contribuição da protensão e do concreto. Os resultados obtidos

foram comparados com os valores experimentais das lajes ensaiadas. Além disso, foram escolhidas lajes com altura superior a 320mm – não estudadas por Sales, Ferreira e Araújo (2022), – para verificar a estimativa da resistência ao cisalhamento e verificar se essas equações estudadas podem ser utilizadas de forma eficaz para as lajes alveolares com essa dimensão.

Assim sendo, de modo geral, esse trabalho visa contribuir com o dimensionamento e projeto de lajes alveolares protendidas, verificando qual método possui resultados mais assertivos e seguros para que os projetistas possam projetar tais lajes com uma melhor relação custo/segurança.

1 OBJETIVO

2.1 Geral

Analisar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas disponíveis nas bibliografias, a partir de equações presentes nas normativas e na bibliografia.

2.2 Específicos

- Analisar o comportamento das lajes alveolares protendidas quando submetidas a esforços cisalhantes;
- Comparar as equações presentes nas normativas NBR 14861:2022 e Eurocode (EC-2-1-1:2004) com a formulação analítica de Sales, Ferreira e Araújo (2022) presentes na literatura, mediante a análise de lajes ensaiadas e expostas na bibliografia, verificando o comportamento dessas equações mediante aos resultados experimentais presentes na base de dados.
- Verificar na equação da NBR 14861:2022 e no equacionamento proposto qual é a influência do $f_{ct,m}$ e do f_{ctk} na estimativa da resistência.
- Verificar a estimativa de resistência ao cisalhamento das equações em relação aos resultados experimentais para lajes com altura superior a 320 mm.

3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 1486:2022; **Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos** - Rio de Janeiro, 2022.

BRUNESI, E; BOLOGNINE D; NASCIMBENE R. **Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: numerical and experimental comparisons.** Materials and Structures, 2015.

CATÓIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão** - Tese para obtenção do título de doutor em Ciências – programa de engenharia civil (estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP, São Carlos, 2011.

Comitê de Normas Europeias CEN. EN 1992-1-1/2004; - **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings** - Bruxelas, Bélgica, 2004.

FUSCO, P.B. **Estruturas de concreto – Solicitações tangenciais.** 1ª ed. São Paulo. Pini; 2008.

PAJARI, M. **Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure** – Editora VTT Building and Transport, ESPOO, 2005

PIB DA CONSTRUÇÃO CIVIL FECHA O ANO COM CRESCIMENTO DE 9,7%, A MAIOR ALTA EM 11 ANOS; **Agência CBIC**; Março, 2022; Disponível em: <<https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2023.

SALLES, R. W; **Estudo numérico-experimental da influência dos mecanismos na resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas** – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – São Carlos, 2020

SALLES, R. W. M; FERREIRA, A. M; ARAÚJO, L. D; **Evaluation of shear strength of pre-stressed hollow core slab** – Institution of Structural Engineers – Elsevier, - Goiânia, Brasil, 2022.

TAWADROUS, R; MORCOUS, G; **Shear Strength of Deep Hollow-Core Slabs** – ACI Structural, Journal Technical Paper, Title No. 115-S53, 2018.

T.N. HANG, N.; KANG, H. T.; TETSUSHI, K. **Investigations on web-shear behavior of deep precast, prestressed concrete.** Engineering Structures – Elsevier, 2019.

4 CAPÍTULO ÚNICO

Estudo do cisalhamento em lajes alveolares protendidas

Study of shear in prestressed hollow core slabs

RESUMO

Acompanhando o crescimento de 9,7% em 2021 no setor da construção civil, a indústria de pré-moldados vem apresentando grande aumento na demanda por elementos estruturais pré-fabricados. O uso das lajes alveolares protendidas contribuem, por exemplo para o projeto de edificações que possuam espaços com maiores vão e mais integrados. Assim, conhecer e estudar as características das lajes alveolares protendidas se mostra fundamental. Diante disso, deve-se conhecer o comportamento da mesma quando submetidas a forças, em especial em relação ao cisalhamento. Para isso 15 lajes dispostas no estudo de 5 autores foram escolhidas para análise. De modo geral, este trabalho busca estimar a resistência ao cisalhamento para lajes alveolares protendidas, mediante o uso de 3 equações – sendo elas: a equação disponível pela ABNT NBR 14861:2022, a equação fornecida pelo Eurocode (EC-2-1-1:2004), e por último, a forma analítica proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022), que inclui em seus cálculos outros fatores como a inércia, buscando maior assertividade e refinamento dos resultados. Lajes de diversas alturas são estudadas usando estas equações. Lajes de alturas acima de 320 mm mostraram também rupturas por flexão nos trabalhos, o que pode ser avaliado a utilização destas equações que são características de ruptura por flexão devido ao cisalhamento. A determinação do método mais eficaz pode contribuir positivamente para que os projetistas consigam projetar elementos com uma boa relação custo/segurança. Mediante a análise dessas 15 lajes ensaiadas e presentes na bibliografia, pôde-se concluir que a equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022) é eficiente quanto ao dimensionamento da força cisalhante estudada e que, além disso, pode ser utilizada para o dimensionamento de tais forças para lajes de alturas superiores a 320mm.

Palavras-chave: Cisalhamento, lajes alveolares, equações de cisalhamento.

ABSTRACT

Accompanying the 9.7% growth in 2021 in the civil construction sector, the precast industry has shown a large increase in demand for prefabricated structural elements. The use of prestressed hollow core slabs contributes, for example, to the design of buildings that have spaces with larger spans and more integrated. Thus, knowing and studying the characteristics of prestressed hollow core slabs is fundamental. In view of this, one must know its behavior when subjected to forces, especially in relation to shear. For this, 15 slabs arranged in the study of 5 authors were chosen for analysis. In general, this work seeks to estimate the shear strength for prestressed hollow core slabs, using 3 equations - namely: the equation available by ABNT NBR 14861:2022, the equation provided by Eurocode (EC-2-1-1 :2004), and finally, the analytical form proposed by Sales, Ferreira and Araújo (2022), which includes other factors such as inertia in its calculations, seeking greater assertiveness and refinement of the results. Slabs of different heights are studied using these equations. Slabs with heights above 320 mm also showed bending failure in the works, which can be evaluated using these equations that are characteristics of bending failure due to shear. Determining the most effective method can positively contribute to designers being able to design elements with a good cost/safety ratio. Through the analysis of these 15 slabs tested and present in the bibliography, it could be concluded that the equation proposed by Sales, Ferreira and Araújo (2022) is efficient in terms of dimensioning the shear force studied and that, in addition, it can be used for dimensioning of such forces for slabs with heights greater than 320mm.

Keywords: Shear. Alveolar slabs. Shear equations.

4.1 Introdução

A construção civil segue em constante crescimento no país. De acordo com dados obtidos pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) o segmento apresentou avanço em seu PIB de 9,7% em 2021, recuperando-se do retrospecto negativo do ano de 2020, onde o setor teve queda 6,3%. Com o notório desenvolvimento desse setor a otimização de processos e produtos relacionados a ele vem se mostrando importante.

Nesse sentido, as lajes alveolares protendidas vem ganhando espaço no setor da construção civil visto que elas reduzem o tempo de construção, bem como diminuem o desperdício de materiais, gerando eficiência no processo construtivo. A notória projeção de avanço no uso desse tipo de elemento atrai os olhares de empresas, pesquisadores e projetistas, aponta Sales (2020). A figura 5, mostra um tipo de laje alveolar protendida e a nomenclatura de alguns elementos que a compõe.

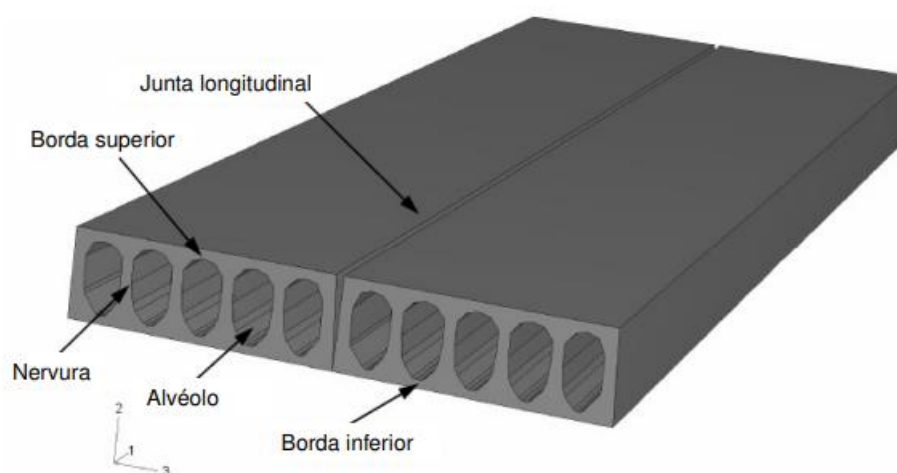


Figura 5: Laje alveolar protendida

Fonte: Catoia (2011)

Brevemente, lajes alveolares protendidas, tratam-se de estruturas pré-moldadas de concreto, sendo atualmente um dos segmentos mais avançados dentro do ramo. Com a utilização delas é possível que se construa edificações e vãos tidos como grandes, na ordem de 4 m a 20 m segundo Catoia (2011). Elas podem ser fabricadas geralmente por dois mecanismos, são eles o de extrusão e o de formas deslizante.

As lajes alveolares protendidas são compostas pela parte da estrutura em concreto e pela parcela da protensão. Atualmente as lajes alveolares protendidas são produzidas com uma variada gama de alturas, desde 100 mm até as de uso especial de 400 mm. Sua fabricação é feita através de uma pista, conhecida como pista de proteção ou concretagem, afirma Sales (2020). As lajes podem variar quanto à altura, geometria dos alvéolos, diâmetro deles, quantidade de nervuras, dentre outros aspectos e dependem da forma de moldagem dessas lajes, conforme figura 6:



Figura 6: Formas possíveis dos alvéolos.

Fonte: Pajari (2005, p. 9)

Assim, conhecer e estudar as características das lajes alveolares protendidas se mostra fundamental. Diante disso, deve-se conhecer o comportamento das mesmas quando submetidas a esforços, em especial em relação ao cisalhamento. Segundo Sales (2020), as propriedades dos elementos presentes na composição desse tipo de laje, como as propriedades do concreto, bem como as características geométricas, formas dos alvéolos, circulares ou não, altura e tipo de fabricação corroboram e podem influenciar o comportamento das lajes quando submetidas ao cisalhamento. Sales (2020) afirma que a maneira que tais lajes referidas se comportam possuem certa complexidade, devido ao fato de que, dependendo do modo de produção realizado, da forma dos alvéolos, diferentes formas de ruptura são possíveis.

As lajes alveolares protendidas não possuem armadura para resistir ao cisalhamento, onde, nelas, os elementos que a compõem são necessários para garantir a resistência das mesmas. Assim, as cordoalhas devem possuir boa aderência, transferindo a protensão ao concreto (SALES, 2020).

Segundo Sales, Ferreira e Araújo (2022), a ruptura em lajes alveolares protendidas podem ocorrer, geralmente, através de dois mecanismos, sendo em um primeiro caso por flexão e outro por tensão de cisalhamento. Ainda segundo o autor a resistência ao cisalhamento, para o estado de limite último, sofre influência direta das fissuras e, para o caso da ruptura por tensão de cisalhamento acontece em partes da laje onde ainda não houveram fissuras por flexão pura. Nesse segundo caso de ruptura foi constatado que ocorre quando a tensão na seção se iguala à resistência à tensão de cisalhamento do concreto, ocorrendo isso o elemento rompe abruptamente. Os dois modos de ruptura para lajes alveolares protendidas são mostrados nas figuras 7 e 8, respectivamente.



Figura 7: Fissuras por flexão.

Fonte: (Sales, Ferreira e Araújo, 2022).

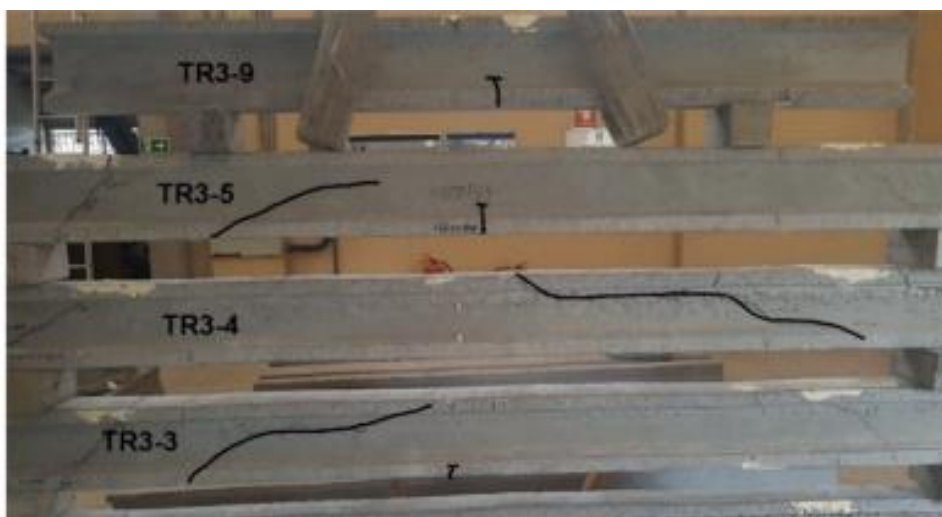


Figura 8: Fissuras por tensão de cisalhamento

Fonte: (Sales, Ferreira e Araújo, 2022).

Como pode-se observar nas figuras 3 e 4, fissuras por flexão possuem o comportamento de surgirem na vertical com angulação de 90° em relação ao elemento, já por tensão de cisalhamento aparecem diagonalmente, com angulação de 45° do elemento.

No presente estudo, 15 lajes ensaiadas nos trabalhos de 5 autores foram escolhidas para uma análise entre 3 equações – a equação disponível pela ABNT NBR 14861:2022, Eurocode EC-2-1-1:2004 e a equação analítica proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022) verificando a estimativa de forma analítica da resistência ao cisalhamento por flexão, e cisalhamento considerando as parcelas de contribuição da protensão e do concreto. Os resultados obtidos foram comparados com os valores experimentais das lajes ensaiadas. Além disso, foram escolhidas lajes com altura superior a 320mm – não estudadas por Sales, Ferreira e Araújo (2022), – para verificar a estimativa da resistência ao cisalhamento e verificar se essas equações estudadas podem ser utilizadas de forma eficaz para as lajes alveolares com essa dimensão.

Assim sendo, de modo geral, esse trabalho visa contribuir com o dimensionamento e projeto de lajes alveolares protendidas, verificando qual método possui resultados mais assertivos e seguros para que os projetistas possam projetar tais lajes com uma melhor relação custo/segurança.

4.2 Referencial Teórico

4.2.1 Lajes Alveolares Protendidas – Características, Esforços e Mecanismos de Ruptura

A indústria de pré-fabricados vem apresentando grande aumento na demanda de elementos estruturais. Isso se deve ao fato de que o setor construtivo vem requerendo cada vez mais a otimização dos processos, buscando reduzir custos, tempo de execução, evitar desperdícios e trazer cada vez mais segurança e comodidade aos usuários das edificações, pontes, dentre outros espaços que precisem de elementos estruturais, como mostrado na figura 9. Nesse sentido, um elemento que vem ganhando cada vez mais espaço dentro do segmento são as lajes alveolares protendidas. Com a utilização delas é possível que se construa ambientes com vãos livres de até 20 m, aponta Catóia (2011). Isso é de grande interesse a arquitetos, por exemplo, que por meio delas podem propiciar ambientes mais integralizados em seus projetos.



Figura 9: Laje alveolar em piso de edifício com múltiplos pavimentos

Fonte: (Catoia, 2011).

As lajes alveolares protendidas vem sendo objeto de estudo para alguns engenheiros, pesquisadores na área de estruturas, no entanto, ainda há muito para se discorrer sobre o tema. Dito isso, conhecer sobre o que a literatura já dispõe sobre o assunto é fundamental para o andamento desse trabalho, conhecendo mais também dessas lajes e seu comportamento diante de diversos fatores.

Segundo T.N. Hang, Kang-Hai e Tetsushi (2019), as lajes com alvéolos e protendidas são bastante utilizadas em diversos ramos da construção como em escritórios, comercialmente e industrialmente, como lajes de piso ou lajes de telhados. Ainda segundo o autor a sua produção pode ser por vários métodos, usualmente os mais utilizados são o de fundição molhada, formas deslizantes, e por extrusão, esse último é o mais utilizado. Para o autor, o entanto, esse método impede que no projeto dessas lajes sejam previstas armaduras para combater o cisalhamento, como os estribos.

Para T.N. Hang, Kang-Hai e Tetsushi (2019), pela falta de armadura transversal nessas lajes, a resistência ao cisalhamento do elemento depende unicamente da resistência à tensão do concreto. Também, com a presença dos alvéolos, sejam eles circulares ou não, infere diretamente na resistência ao cisalhamento das lajes, onde o autor observou que, além dessas lajes serem mais suscetíveis a ruptura por cisalhamento, as que possuem vazios maiores são em ordem ainda mais propensas.

Na composição das lajes alveolares há a presença de cordoalhas protendidas, dispostas em uma ou mais camadas na parte inferior das nervuras, no entanto, pode existir casos onde seja necessário a adição delas na parte superior, a depender da especificidade de utilização do projeto aponta Catóia (2011), as cordoalhas são dispostas com uma excentricidade (e) em relação ao centro de gravidade da peça, como mostrado na figura 10.

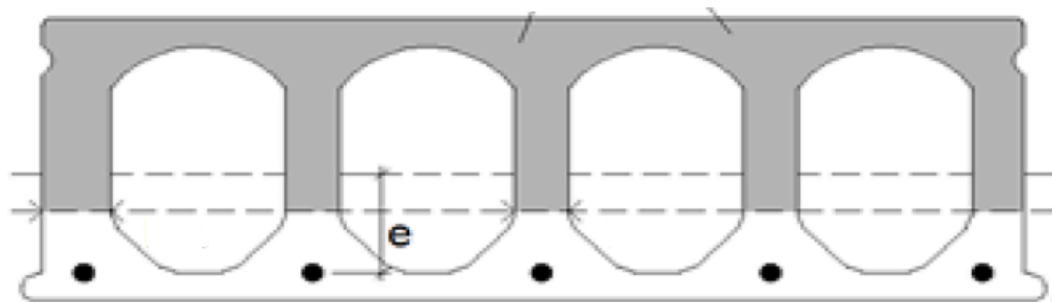


Figura 10: Cordoalhas.

Fonte: (Sales, 2020) adaptada.

Para Fusco (2008), lajes que não possuem armaduras para resistir ao cisalhamento, como estribos, a ocorrência de fissuras não necessariamente inviabilizam a utilização da peça, uma vez que a incidência delas é relativamente menor quando comparado com a ocorrência em vigas. Desse modo, ainda segundo esse autor, a ruptura somente ocorrerá após o aparecimento da fissura crítica, normalmente inclinada a 45° , devido à ação de forças cortantes.

Rupturas devido ao cisalhamento se devem à combinação de esforços cortantes e momentos fletores, havendo a existência de pequenas flechas e baixa ductilidade do elemento, a ruína acontece de forma abrupta, sem avisos, tornando um grande imbróglio para os projetistas estruturais, aponta Catóia (2011)

Segundo Catóia (2011), as lajes alveolares protendidas possuem distintas formas de ruptura. A autora cita em seu trabalho mecanismos como cisalhamento com tensão no ponto crítico da nervura da peça, quando o seu valor é maior que a resistência do concreto à tração, cisalhamento em região com fissuras, havendo a superposição dos efeitos de cisalhamento, flexão e escorregamento, dentre outras formas.

Para Sales (2020), em qualquer seção transversal de uma laje haverá a ocorrência de momento fletor e esforço cortante. Nesse sentido, quando se analisa o elemento no estágio 1, nota-se que não houve fissuração na peça, não plastificando a seção. Por isso, para o autor, as tensões são dadas no primeiro estágio e a teoria convencional da resistência dos materiais é válida para o caso.

Ainda segundo Sales (2020), quando as tensões atuantes no elemento forem superiores a resistência à tração do concreto, ocorre o surgimento de uma fissura, com angulação entre 35° a 45° , iniciando do apoio e indo até a carga aplicada. Desse modo o cisalhamento apenas é resistido pelo concreto e pela protensão, já que como exposto não há armaduras transversais. afirmam Catóia (2011) e Sales (2020) afirmam também que a ruptura ocorre quando a peça atinge o modo conhecido como tração diagonal, e não há nesse caso fissuras oriundas da flexão, conforme figura 11.

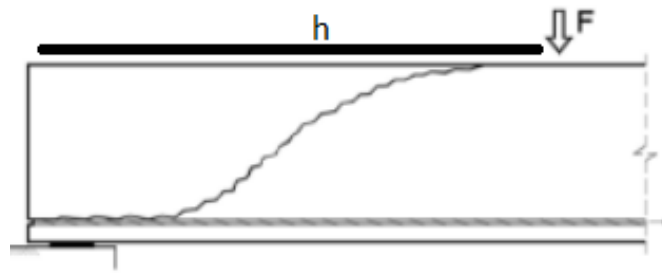


Figura 11: Fissura oriunda da tração diagonal a partir de força aplicada a uma distância h do apoio.

Fonte: (Sales, 2020) adaptado

4.2.2 O Estudo de Sales, Ferreira e Araújo (2022)

Almejando compreender o comportamento das lajes alveolares quando submetidas a esforços cisalhantes, Sales, Ferreira e Araújo (2022) promoveram um estudo a fim de determinar numérica e experimentalmente as parcelas de contribuição da proteção V_p e do concreto V_c para a composição da força de cisalhamento total que tais elementos possuem. Nesse sentido Sales, Ferreira e Araújo (2022) ensaiaram 6 séries de lajes divididas em segmentos similares a vigas. As séries I e III não possuíam protensão, já as demais sim. Os segmentos foram submetidos aos 3 testes, sendo eles o ensaio de cisalhamento, o de tensão de cisalhamento e o de cisalhamento por flexão. Os valores obtidos $V_{u,exp}$, $M_{u,exp}$ e o mecanismo de falha de cada elemento foi coletado para posterior análise.

De forma analítica o autor sugere que para a determinação mais precisa da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares protendidas é necessário que seja levado em consideração outros fatores, como inércia dos elementos, distância do centroide até a fibra mais inferior, dentre outros elementos.

Para Sales, Ferreira e Araújo (2022), o valor analítico para a resistência ao cisalhamento dos elementos pode ser determinado utilizando, inicialmente a equação 1, abaixo.

$$M_r = f_{ctm,fl} \frac{I_c}{y_{inf}} + N_p \left(\frac{I_c}{A_c y_{inf}} \right) + e$$

Eq. 1.

A partir dessa equação, a relação entre o momento de flexão máximo e o momento de ruptura foi estabelecida, tanto para a porção de concreto γ quanto para a parcela protendida δ . Assim, o momento fletor máximo atuando na laje é a soma dos momentos de ambas as parcelas, de acordo com Sales, Ferreira e Araújo (2022). Nesse sentido, a equação 3 pôde ser reescrita como:

$$V_c + V_p = \frac{\gamma}{2.5h} \frac{I_c}{y_{inf}} f_{ctm,fl} + \frac{\delta_{\alpha 1}}{2.5h} \left(\frac{I_c}{A_c y_{inf}} + e_p \right) N_p$$

Eq. 2.

Essa equação foi ainda mais refinada pelos autores, podendo ser expressa como na equação 5. Tal refinamento foi possível uma vez que os autores determinaram os valores a partir de dados colhidos experimentalmente de γ e δ .

$$V_r = 0.51 \frac{I_c}{y_{inf} h} f_{ctk,0.05} + 0.25 \left(\frac{I_c}{A_c y_{inf} h} + \frac{e_p}{h} \right) N_p$$

Eq. 3.

De forma a verificar a eficácia de tal formulação Sales, Ferreira e Araújo (2022), buscaram na norma NBR 14861:2022 e no Eurocode (EC-2-1-1:2004), as suas respectivas recomendações para quando se deseja dimensionar lajes alveolares que não possuem reforços de armaduras transversais. As equações estão dispostas em 4 e 5, respectivamente.

$$V_{ci} = 0,25 f_{ctk,0.05} (1.6 - d) (1.2 + 40 \rho_1) b_w d + 0.15 \sigma_{cp} b_w d$$

Eq. 4

$$V_c = [0.18k(100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0.15\sigma_{cp}] b_w d$$

Eq. 5

f_{ck} = Resistência característica à compressão do concreto em 28 dias (MPa).

f_{ctk} = Menor resistência à tração característica do concreto (MPa).

B_w = Soma total da espessura da alma individual da laje alveolar pré moldada. (mm)

σ_{cp} = Tensão normal do concreto no ponto crítico (MPa).

A tabela 1 a seguir mostra uma comparação entre os resultados experimentais presentes na base de dados da bibliografia disponível e os valores obtidos de forma analítica pela equação proposta pelos autores.

Tabela 1: Resultados obtidos por Sales, Ferreira e Araújo (2022).

Specimens	h (mm)	V _{test} (kN)	V _r (kN)	V _r /V _{test} (kN)	φ	ω
M1-0-3-50-N-A	160	118,04	136,95	1,16		
M1-0-3-50-N-B	160	138,32	136,95	0,99		
M2-0-3-50-S	160	151,54	136,95	0,90		
M2-0-3-81-N	160	160,84	136,95	0,85		
M2-0-5-50-N	160	130,40	136,95	1,05		
M2-0-5-81-N	160	137,66	136,95	0,99		
M2-0-5-81-S	160	132,78	136,95	1,03	0,99	0,18
116.265	265	226,50	170,59	0,75		
136.320	320	189,50	169,13	0,89		
138.320	320	298,00	272,49	0,91		
139.320	320	252,00	204,18	0,81		
200	200	90,20	140,83	1,56		
265	265	219,40	226,93	1,03		
320a	320	297,10	278,39	0,94		
320b	320	232,50	244,29	1,05		

Fonte: (Sales, Ferreira e Araújo, 2022. Adaptado)

A média de 0,99 e o desvio padrão de apenas 0,18 mostram que a equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo possui uma maior assertividade devido ao fato que ela leva em consideração valores determinados, como a inércia e a excentricidade do elemento. No caso das equações presentes nas normativas esses valores são estimados, o que infere numa menor assertividade de resultados.

4.3 Métodos

Para o estudo presente neste documento, lajes com alturas superiores a 320mm também foram analisadas. Nesse trabalho foram coletados dados referentes a lajes ensaiadas e expostas em trabalhos disponíveis na biografia. Foram coletadas informações de um total de 15 lajes. Os dados coletados foram a altura total e útil, espessura das nervuras na região de estrangulamento, quantidade de cordoalhas, área de aço, perda de protensão, tensão de protensão, resistência característica do concreto (f_{ck}). Além disso foi coletado os valores do momento de inércia, a área de concreto do elemento calculado dentre outras informações que estão relatadas nesse estudo. Essas informações foram reunidas e utilizando o auxílio do Autocad e do excel foi possível dar segmento com o estudo. A tabela 2 a seguir mostra os dados das lajes coletadas para análise e seus respectivos autores.

Tabela 2: Características das Lajes.

DADOS INICIAIS						
Autor	laje	h (mm)	d (mm)	qtd. Cordoalhas	f_{ck} (MPa)	Perdas (%)
Sales, Ferreira e Araújo, 2022	TR3-3A	210	169,9	0	60,19	24
Tawadrous e Morcou, 2017	1B	406	361,95	7	62	15
Tawadrous e Morcou, 2017	2A	406	361,95	7	62	15
Tawadrous e Morcou, 2017	3A	406	361,95	7	62	15
Tawadrous e Morcou, 2017	3B	406	361,95	7	62	15
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	200	200	150	7	54,8	5
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	265	260	210	10	71,3	5
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	320a	320	270	11	61,8	5
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	320b	320	270	11	64,3	5
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W_C	160,1	135,7	5	47	5
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y_C	199,9	174,8	6	53,45	5
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	150	115,2	6	55,94	5

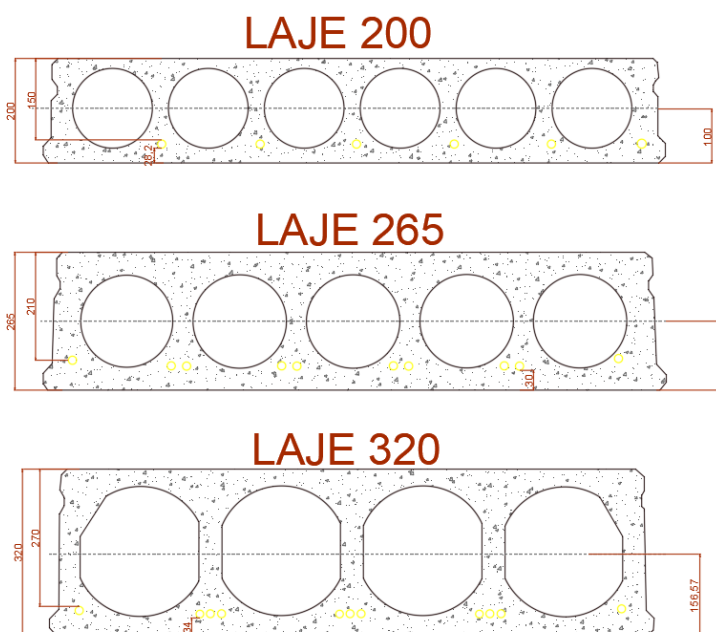
Pajari, 2005	116-265- 501 - 4	265	212,5	6	58,3	15
Pajari, 2005	179-320- 414 - 4	320	267,5	5	50	15
Pajari, 2005	180-320- 414 - 4	320	267,5	13	50	15

Onde: h=altura da laje; d=altura útil da laje.

Fonte: Próprio autor, 2023

No entanto, alguns dados não foram disponibilizados por alguns dos autores, como a inércia, excentricidade. Assim sendo, com o auxílio do Autocad foi possível determinar eventuais dados faltantes. Para as lajes de Brunese, (2015), Catóia, (2011) e Pajari (2005), foi necessário a utilização do software para o cálculo da inércia (I_c), da distância do centroide até a fibra inferior da seção transversal (Y_{inf}) e da distância entre a fibra inferior da cordoalha até a fibra inferior da laje (e_p). Além disso, para as lajes de Brunese (2015), a soma da largura das nervuras na região de estrangulamento também foi obtida dessa forma. Para o caso das lajes 179-320-414 – 4 e 180-320-414 – 4 o valor da resistência à compressão do concreto f_{ck} foi estimada. A figura 12 mostra os dados retirados das lajes com a utilização do software.

Figura 12: Geometria lajes retiradas do artigo de Brunese, Bolognini e Nascimbene, 2015.



Fonte: Brunese, Bolognini e Nascimbene (2015), adaptado.

A partir desse lançamento no software a através do comando “propmass” foi possível retirar a inércia desses elementos e das demais lajes necessárias e prosseguir com os cálculos e verificações. Além disso, devido ao fato de divergências quanto à resistência característica do concreto entre as equações, a tabela 3 a seguir foi desenvolvida e utilizada a fim simplificar os cálculos. Nela está contido o f_{ck} , utilizado pela equação do Eurocode EC-2-1-1:2004, o f_{ctk} , utilizado pela equação da NBR 14861:2022 e pela equação proposta no artigo de Sales, Ferreira e Araújo (2022). Ressaltando ainda que esses valores se correlacionam, conforme já exposto.

Tabela 3: f_{ck} , $f_{ct,m}$ e f_{ctk} das lajes estudadas.

DADOS AUXILIARES			
Autor	f_{ck} (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	f_{ctk} (MPa)
Sales, Ferreira e Araújo, 2022	60,19	4,69	3,28
Tawadrous e Morcou, 2017	62	4,7	3,29
Tawadrous e Morcou, 2017	62	4,7	3,29
Tawadrous e Morcou, 2017	62	4,7	3,29
Tawadrous e Morcou, 2017	62	4,7	3,29
Brunesi, Bolognini e Nascimbene, 2015	54,8	4,33	3,03
Brunesi, Bolognini e Nascimbene, 2015	71,3	5,16	3,61
Brunesi, Bolognini e Nascimbene, 2015	61,8	4,69	3,28
Brunesi, Bolognini e Nascimbene, 2015	64,3	4,81	3,37
Catóia, 2011	47	3,9	2,73
Catóia, 2011	53,45	4,26	2,982
Catóia, 2011	55,94	4,39	3,073
Pajari, 2005	58,3	4,51	3,157
Pajari, 2005	50 (1)	4,071	2,8497
Pajari, 2005	50(1)	4,071	2,8497

(1) Valor de f_{ck} estimado

Fonte: Próprio autor.

Posterior ao lançamento dos dados de entrada, foram realizados cálculos a fim de se encontrar tanto a parcela da força devida à contribuição das protensão quanto pela do concreto, V_p e V_c , respectivamente. Além disso, esses valores foram somados para a obtenção do valor total da força (V_{total}), isso para o caso analítico. Através dos valores experimentais (V_{exp}) coletados das lajes ensaiadas pelos autores, foi feita uma análise entre o resultado obtido analiticamente e o valor experimental encontrado, por meio da relação entre V_{total} e V_{exp} .

Para o caso das lajes retiradas no estudo de Tawadrous e Marcous (2017) foram escolhidas lajes que possuem a altura de 406 mm, isso para verificar os resultados das equações citadas para esses elementos – que segundo Sales, Ferreira e Araújo (2022), não rompem por flexão pura, mas sim por tração diagonal.

No caso da equação da NBR 14861:2022 e da equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022) será feito uma análise utilizando o $f_{ct,m}$ (mais próximo da resistência a flexão) e outra análise usando o f_{ctk} (mais próximo da resistência ao cisalhamento) para verificar qual é o mais recomendado para ambas as equações.

4.4 Resultados e discussões

A partir dos dados coletados das lajes, utilizando as equações do Eurocode EC-2-1-1:2004, da NBR 14861:2022 e formulada por Sales, Ferreira e Araújo (2022), foi possível estimar o valor da resistência ao cisalhamento das lajes escolhidas. Inicialmente, foi utilizado a resistência característica de rupturas por flexão $f_{ct,m}$. Na Tabela 4, tem-se os valores encontrados para V_c , V_p , V_{total} , a relação V_{total}/V_{exp} , a média e o desvio padrão para os resultados encontrados, respectivamente, para o caso da NBR 14861:2022.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo uso da NBR 14861:2022, utilizando $f_{ct,m}$.
(VERIFICAÇÃO EQUAÇÃO DA NBR 14861)

Autor	Laje	V_c	V_p	V_{NBR}	V_{exp}	$V_{total,NBR}/V_{exp}$	ϕ	ω
Salles, Ferreira e Araújo, 2022	TR3-3A	19,45	6,29	25,74	22,56	1,14		
Tawadrous & Morcou, 2017	1B	302,72	129,28	432,00	261,56	1,65		
Tawadrous & Morcou, 2017	2A	302,72	129,28	432,00	296,25	1,46		
Tawadrous & Morcou, 2017	3A	302,72	129,28	432,00	292,25	1,48		
Tawadrous & Morcou, 2017	3B	302,72	129,28	432,00	292,69	1,48		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	200	108,4	29,53	137,92	90,2	1,53	1,14	0,32
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	265	169,73	41,01	210,74	219,4	0,96		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	320a	219,94	78,47	298,4	297,1	1,00		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	320b	215,19	73,39	288,58	232,5	1,24		
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W_C	82,80	17,48	100,28	144,05	0,70		
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y_C	140,38	60,52	200,91	163,46	1,23		
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	111,07	28,02	139,08	134,46	1,03		
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	123,47	20,87	144,34	226,50	0,64		
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	154,29	23,22	177,52	262,50	0,68		

Pajari, 2005	180-320- 414 - 4	206,72	64,06	270,78	305,00	0,89
--------------	---------------------	--------	-------	--------	--------	------

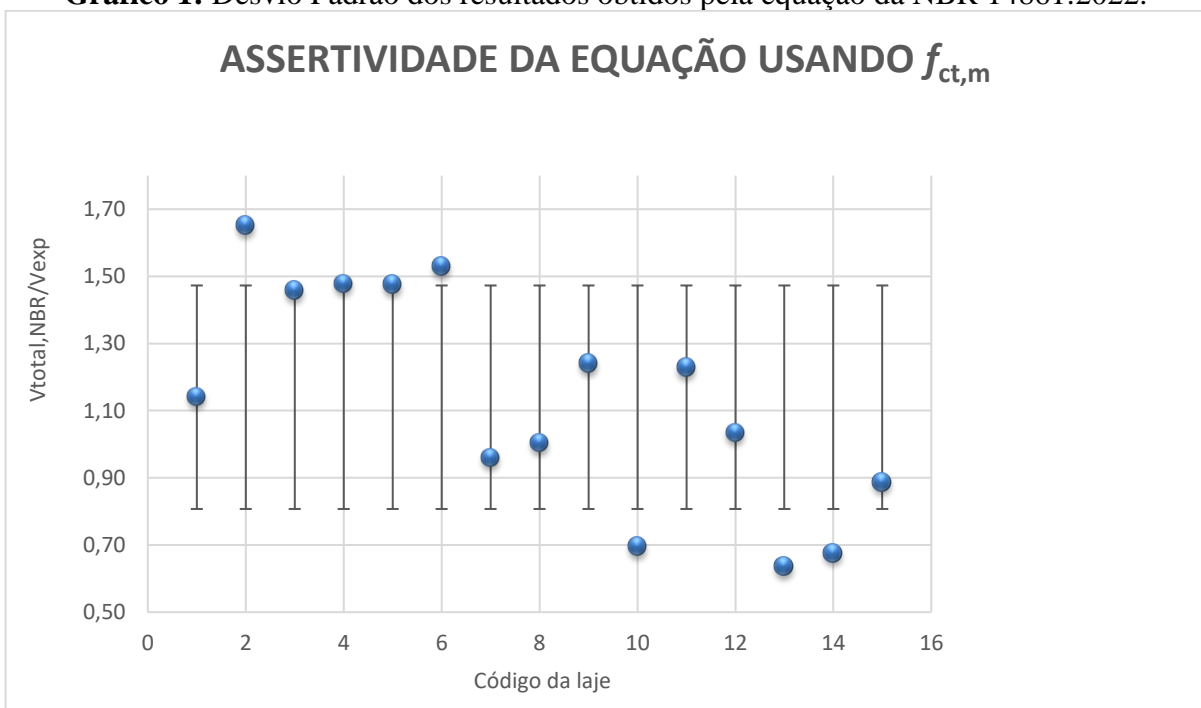
Onde: V_c =Parcela de contribuição do concreto; V_p =Parcela de contribuição das cordoalhas (protensão); $V_{total,nbr}$ =Soma das contribuições do concreto e da protensão (para o caso da equação da NBR 14861:2022); V_{exp} = Valor da força obtido experimentalmente para cada laje ensaiada; $\bar{\varphi}$ =média aritmética dos valores obtidos; ω =desvio padrão populacional dos valores. Valores das forças em kN.

Fonte: Autoria própria.

A estimativa da resistência pelo equacionamento da NBR 14861:2022 obteve uma média de 1,14 e um desvio padrão de 0,32, quando utilizado o $f_{ct,m}$.

O gráfico 1 mostra a dispersão dos resultados, baseado no desvio padrão para quando se é usado o $f_{ct,m}$. Sendo $V_{total,NBR}/V_{exp}$.

Gráfico 1: Desvio Padrão dos resultados obtidos pela equação da NBR 14861:2022.



Fonte: Autoria Própria.

Para o caso das 15 lajes estudadas, 33,33% das lajes quando utilizado a equação da NBR 14861:2022 obtiveram resultados fora dos limites do desvio padrão. Isso pode resultar em uma maior variabilidade e diminuição da confiabilidade dos resultados. Através dos resultados foi possível observar que a equação da NBR 14861:2022, quando utilizado o $f_{ct,m}$ não é conservadora (não é a favor da segurança) em relação ao dimensionamento das forças. Quando analisado a média dos resultados usando o $f_{ct,m}$ observa-se que a mesma não atua a favor da segurança para tal elemento estrutural.

Utilizando também o $f_{ct,m}$, as lajes coletadas foram analisadas por meio da equação analítica proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022), os resultados obtidos estão na tabela 5, abaixo.

Tabela 5: Resultados obtidos pelo uso da equação proposta, utilizando $f_{ct,m}$.

VERIFICAÇÃO ANALÍTICA PELA EQUAÇÃO PROPOSTA								
Autor	Laje	V_c	V_p	$V_{total,eq}$	V_{exp}	$\frac{V_{total,eq}}{V_{exp}}$	ϕ	ω
Salles, Ferreira e Araújo, 2022	TR3-3A	8,03	12,81	20,80	22,56	0,92		
Tawadrous & Morcou, 2017	1B	132,98	129,36	262,30	261,56	1,00		
Tawadrous & Morcou, 2017	2A	132,98	129,36	262,30	296,25	0,89		
Tawadrous & Morcou, 2017	3A	132,98	129,36	262,30	292,25	0,90		
Tawadrous & Morcou, 2017	3B	132,98	129,36	262,30	292,69	0,90		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	200	68,21	65,09	133,30	90,20	1,48	0,90	0,23
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	265	120,38	92,81	213,20	219,40	0,97		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	320a	111,20	101,27	212,50	297,10	0,72		
Brunesi, Bolognine, Nascimbene, 2015	320b	114,05	101,27	215,30	232,50	0,93		
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W_C	119,85	58,74	178,60	144,05	1,24		
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y_C	81,93	63,47	145,40	163,46	0,89		
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	58,08	49,99	108,10	134,46	0,80		
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	100,34	51,84	152,20	226,50	0,67		
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	96,62	38,67	135,30	262,50	0,52		
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	96,62	100,53	197,10	305,00	0,65		

Onde: V_c =Parcela de contribuição do concreto; V_p =Parcela de contribuição das cordoalhas (protensão); $V_{total,eq}$ =Soma das contribuições do concreto e da protensão (para o caso da equação proposta); V_{exp} = Valor da força obtido experimentalmente

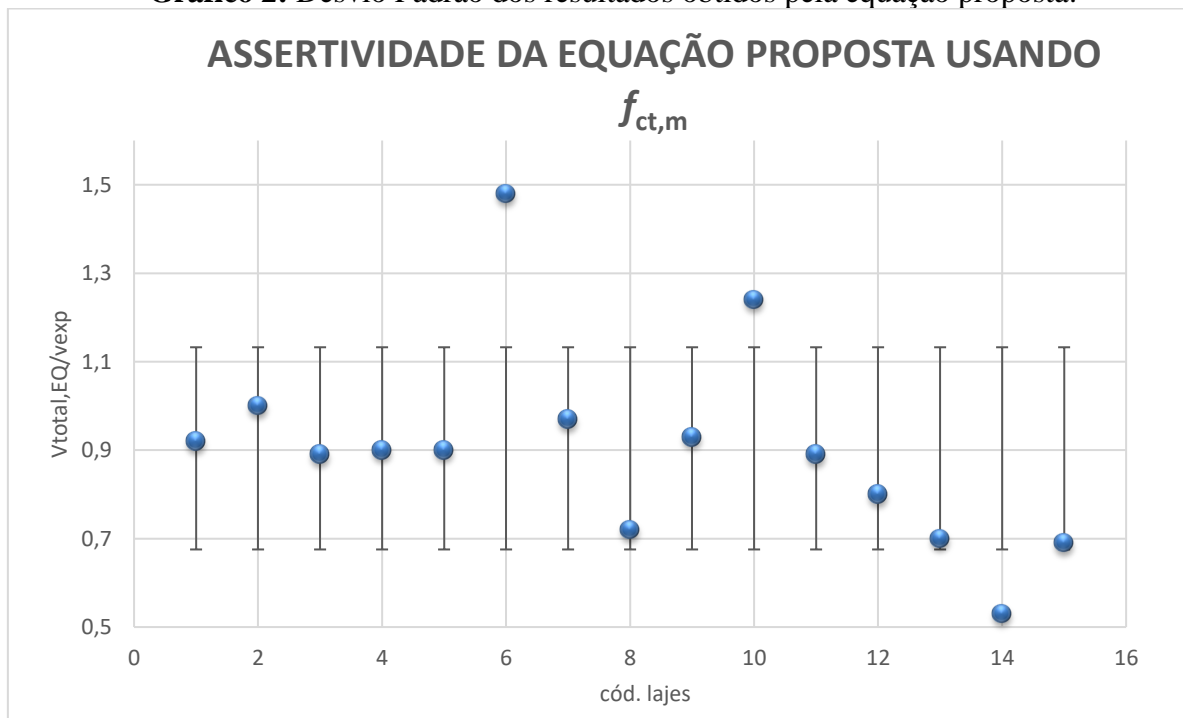
para cada laje ensaiada; φ =média aritmética dos valores obtidos; ω =desvio padrão populacional dos valores. Valores das forças em kN.

Fonte: Autoria própria.

O equacionamento de Sales, Ferreira e Araújo, (2022) obteve uma média de 0,90 e um desvio padrão de 0,23, quando utilizado o $f_{ct,m}$.

No gráfico 2 é mostrado a dispersão dos resultados, baseados no desvio padrão quando foi utilizado o $f_{ct,m}$. Sendo exposto a relação $V_{total,eq}/V_{exp}$.

Gráfico 2: Desvio Padrão dos resultados obtidos pela equação proposta.



Fonte: Autoria Própria.

Observando os resultados encontrados de forma analítica pela equação proposta (3) nota-se que quando utilizado o $f_{ct,m}$ os valores obtidos se mostram ligeiramente conservadores, colaborando para a segurança dos elementos estruturais. Isso pode ser observado quando se analisa a média dos resultados. Além disso, o desvio padrão obtido para as 15 lajes testadas mostra que a equação proposta (3) possui uma boa assertividade quanto aos resultados obtidos. Devido a equação levar em conta em seu dimensionamento fatores como a inércia das lajes, excentricidade, a altura entre fibra inferior da cordoalha até a fibra inferior mais tracionada, contribuem para que ela possua um refinamento ainda maior em relação aos seus resultados.

Analisando o gráfico, nota-se que equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022), por sua vez teve um total de 20% das lajes testadas fora dos limites de dispersão. Isso contribui para que o equacionamento seja mais preciso quanto à determinação das forças

Em relação ao método utilizado pela norma Eurocode EC-2-1-1:2004, uma vez que a mesma não utiliza o $f_{ct,m}$ nem o f_{ctk} , apenas uma análise foi feita. A tabela 6 expõe os valores encontrados quando utilizado a resistência característica f_{ck} .

Tabela 6: Resultados obtidos pelo uso da equação do Eurocode 2, utilizando f_{ck} .

PLANILHA PADRÃO A SER USADA (VERIFICAÇÃO EQUAÇÃO DO EUROCODE 2)								
Autor	Laje	V_c	V_p	V_{EN}	V_{exp}	$V_{total,EN}/V_{exp}$	ϕ	ω
Salles, Ferreira e Araújo, 2022	TR3-3A	10,84	6,29	17,14	22,56	0,76		
Tawadrous & Morcous, 2017	1B	162,45	129,28	291,73	261,56	1,12		
Tawadrous & Morcous, 2017	2A	162,45	129,28	291,73	296,25	0,98		
Tawadrous & Morcous, 2017	3A	162,45	129,28	291,73	292,25	1,00		
Tawadrous & Morcous, 2017	3B	162,45	129,28	291,73	292,69	1,00		
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	200	64,43	29,53	93,96	90,20	1,04		
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	265	88,10	41,01	129,11	219,4	0,59	0,76	0,24
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	320a	118,24	78,47	196,71	297,10	0,66		
Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015	320b	114,59	73,39	187,98	232,5	0,81		
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W_C	50,14	17,48	67,62	144,05	0,47		
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y_C	82,54	60,52	143,06	163,46	0,88		
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	67,95	28,02	95,97	134,46	0,71		
Pajari, 2005	116-265-501-4	68,60	20,87	89,47	226,50	0,4		
Pajari, 2005	179-320-414-4	75,58	23,22	98,81	262,50	0,38		
Pajari, 2005	180-320-414-4	108,12	64,06	172,19	305,00	0,56		

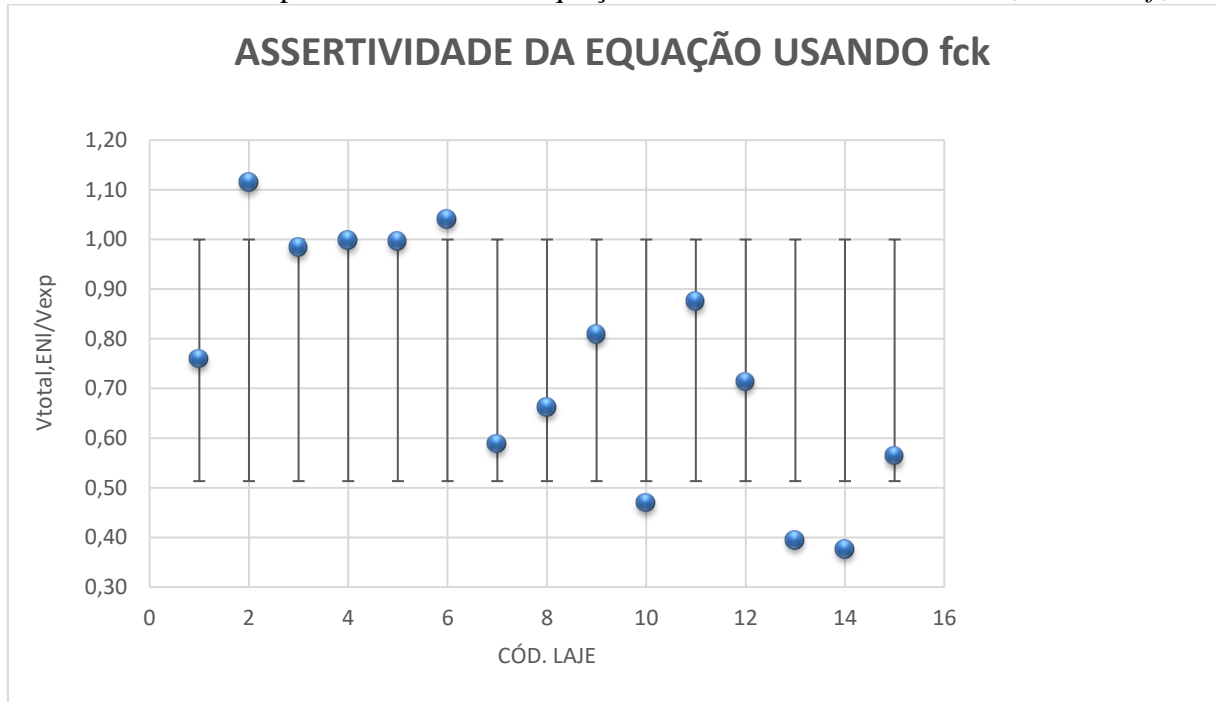
Onde: V_c =Parcela de contribuição do concreto; V_p =Parcela de contribuição das cordoalhas (protensão); $V_{total,EN}$ =Soma das contribuições do concreto e da protensão (para o caso da equação do Eurocode 2); V_{exp} = Valor da força obtido experimentalmente para cada laje ensaiada; ϕ =média aritmética dos valores obtidos; ω =desvio padrão populacional dos valores. Valores das forças em kN.

Fonte: Autoria própria.

O equacionamento do Eurocode EC-2-1-1:2004 obteve uma média de 0,76 e um desvio padrão de 0,24, quando utilizado o f_{ck} .

Para o caso da formulação do Eurocode EC-2-1-1:2004 o gráfico 3 expõe os resultados, utilizando-se o f_{ck} .

Gráfico 3: Desvio padrão utilizando a equação do Eurocode EC-2-1-1/2004, usando o f_{ck} .



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos pela utilização da equação do Eurocode (EC-2-1-1:2004) foram 33,33% fora dos limites do desvio padrão. Analisando os valores obtidos é possível observar que a norma Eurocode (EC-2-1-1:2004) apresenta resultados significativamente mais conservadores do que a NBR 14861:2022 e de que a equação proposta (3). Ainda, por esse método, observa-se que o desvio padrão obteve valor semelhante ao do equacionamento proposto (3). No entanto, mesmo tal equação sendo altamente conservador e a favor da segurança, ela não se mostra eficaz quanto à relação custo/segurança, uma vez que colabora para o superdimensionamento dos elementos estudados.

Apenas para as equações da norma NBR 14861:2022 e a formulação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022), os valores de $f_{ct,m}$ foram substituídos pela f_{ctk} . A tabela 7 mostra os valores obtidos de V_{total} para ambos os casos, bem como a média (ϕ) e o desvio padrão (ω).

Tabela 7: Resultados obtidos pelo uso da equação proposta (3) e pela NBR 14861:2022, utilizando f_{ctk} .

Autor	Laje	V_{exp}	$V_{total,NBR}$	$V_{total,EQ}$	$V_{total,NBR}/V_{exp}$	$V_{total,EQ}/V_{exp}$
Salles, Ferreira e Araújo	TR3-3A	22,56	19,91	18,40	0,88	0,82
Tawadrous & Morcous, 2017	1B	261,56	341,19	222,40	1,30	0,85

Tawadrous & Morcou, 2017	2A	296,25	341,19	222,40	1,15	0,75
Tawadrous & Morcou, 2017	3A	292,25	341,19	222,40	1,17	0,76
Tawadrous & Morcou, 2017	3B	292,69	341,19	222,40	1,17	0,76
Brunesi, Bolognina e Nascimbene, 2015	200	90,2	105,40	112,80	1,17	1,25
Brunesi, Bolognina e Nascimbene, 2015	265	219,4	159,82	177,10	0,73	0,81
Brunesi, Bolognina e Nascimbene, 2015	320a	297,1	232,42	179,10	0,78	0,60
Brunesi, Bolognina e Nascimbene, 2015	320b	232,5	224,03	181,10	0,96	0,78
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W-C	144,05	75,44	142,60	0,52	0,99
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y_C	163,46	158,79	120,80	0,97	0,74
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	134,46	105,77	90,60	0,79	0,67
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	226,5	107,30	122,10	0,47	0,54
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	262,50	120,72	106,30	0,46	0,40
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	305	194,68	168,20	0,64	0,55
					ϕ	0,88
					ω	0,27

Fonte: Autoria própria.

Para o caso onde optou-se pelo uso do f_{ctk} fica evidente que ambas as equações prezam pela segurança do elemento estrutural – lajes. Observando os valores dos desvios padrões para ambos os casos, temos que a equação da NBR 14861:2022 nos fornece um desvio padrão de 0,27 e da forma analítica proposta (3) temos o desvio padrão de 0,19. Ambas estão trabalhando a favor da segurança, quando é usado o f_{ctk} .

Por fim, do estudo dos autores Tawadrous e Marcous (2017) foram escolhidas as lajes que possuíam altura superior a 320 mm. Essa escolha foi feita afim de verificar se as equações analisadas poderiam ser usadas no dimensionamento desses elementos de maior espessura, uma vez que algumas bibliografias afirmam que o mecanismo de ruptura dessas lajes ocorre apenas por fissuras advindas de tração diagonal, sendo que elas foram desconsideradas no estudo de Sales, Ferreira e Araújo (2022). Para a norma NBR 14861:2022 tanto quando utilizado o $f_{ct,m}$ quanto usando o f_{ctk} , os resultados não foram conservadores, onde para as 4 lajes com altura

superior a 320mm a relação $V_{total,NBR}/V_{exp}$ foi de 1,65, 1,46, 1,48, 1,48, respectivamente. A equação de Sales, Ferreira e Araújo (2022) foi eficaz no dimensionamento de $V_{total,EQ}$ onde para as 4 lajes com altura superior a 320mm os valores obtidos foram de 1,12; 0,98; 1,00; 1,00, respectivamente. A equação proposta conseguiu determinar com assertividade e ligeiro conservadorismo os resultados da força para cada elemento, sendo de 1,00, 0,89, 0,90, 0,90, respectivamente.

4.5 Conclusão

Ao analisarmos as equações disponíveis pela NBR 14861:2022 (4), do Eurocode EC-2-1-1:2004 (5), e o equacionamento proposto (3), pôde-se concluir que a última possui um bom nível de assertividade quanto à estimativa da resistência ao cisalhamento, pois quando utilizado o $f_{ct,m}$ a média de valores obtidos para as lajes ensaiadas foi de 0,90. Além disso a variação dos valores obtidos foi baixa e o desvio padrão foi de 0,23. A equação da NBR 14861:2022, quando utilizado o $f_{ct,m}$, não foi conservadora à estimativa, de modo que a equação (4) se mostrou contra a segurança. De modo que é recomendável que se utilize apenas o f_{ctk} para estimar a resistência ao cisalhamento das lajes, quando utilizado a equação da NBR 14861:2022. A equação (4) não se mostrou eficaz para dimensionar lajes cujas alturas são superiores a 320 mm, e se mostrou também, contra a segurança de tal elemento estrutural, assim sendo ela não é recomendável para essa situação. A equação (5), por sua vez, obteve resultados conservadores, no entanto, devido ao seu alto conservadorismo ela pode contribuir para que a estrutura seja de alto valor de execução. Quando utilizado o f_{ctk} a equação (4) mostrou um desempenho maior e a média (φ) dos resultados foi de 0,88 – a favor da segurança – porém ela apresentou grande variação entre cada elemento e seu desvio padrão (ω) foi de 0,27. Além disso, novamente a equação (4) não foi eficaz na obtenção das forças para as lajes com altura superior a 320mm, de modo que a mesma não pode ser utilizada para esse caso.

Foi possível observar que quando utilizado o f_{ctk} a equação proposta (3) manteve-se conservadora e ainda obteve êxito nos resultados de dimensionamento da força para lajes com altura superior a 320mm. Assim sendo (3) também pode ser utilizada para esse elemento estrutural com essas dimensões.

Assim sendo é possível concluir que a equação proposta pelo autor Sales, Ferreira e Araújo (2022) apresentou boa precisão em relação à estimativa da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares protendidas, sendo que a mesma alia segurança e otimiza o dimensionamento desse elemento. Fato possível devido a um maior nível de refinamento de (3), onde é levado em consideração fatores como a inércia, distância entre as cordoalhas e a fibra inferior mais tracionada, dentre outros aspectos.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 1486:2022; **Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos** - Rio de Janeiro, 2022.

BRUNESI, E; BOLOGNINE D; NASCIMBENE R. **Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: numerical and experimental comparisons.** Materials and Structures, 2015.

CATÓIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão** - Tese para obtenção do título de doutor em Ciências – programa de engenharia civil (estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC-USP, São Carlos, 2011.

Comitê de Normas Europeias CEN. EN 1992-1-1/2004; - **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings** - Bruxelas, Bélgica, 2004.

FUSCO, P.B. **Estruturas de concreto – Solicitações tangenciais.** 1ª ed. São Paulo. Pini; 2008.

PAJARI, M. **Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure** – Editora VTT Building and Transport, ESPOO, 2005

PIB DA CONSTRUÇÃO CIVIL FECHA O ANO COM CRESCIMENTO DE 9,7%, A MAIOR ALTA EM 11 ANOS; **Agência CBIC**; Março, 2022; Disponível em: <https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos>. Acesso em: 28 de janeiro de 2023.

SALLES, R. W; **Estudo numérico-experimental da influência dos mecanismos na resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas** – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – São Carlos, 2020

SALLES, R. W. M; FERREIRA, A. M; ARAÚJO, L. D; **Evaluation of shear strength of pre-stressed hollow core slab** – Institution of Structural Engineers – Elsevier, - Goiânia, Brasil, 2022.

TAWADROUS, R; MORCOUS, G; **Shear Strength of Deep Hollow-Core Slabs** – ACI Structural, Journal Technical Paper, Title No. 115-S53, 2018.

T.N. HANG, N.; KANG, H. T.; TETSUSHI, K. **Investigations on web-shear behavior of deep precast, prestressed concrete.** Engineering Structures – Elsevier, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Geometria.

Geometria – Lajes Catóia (2011)

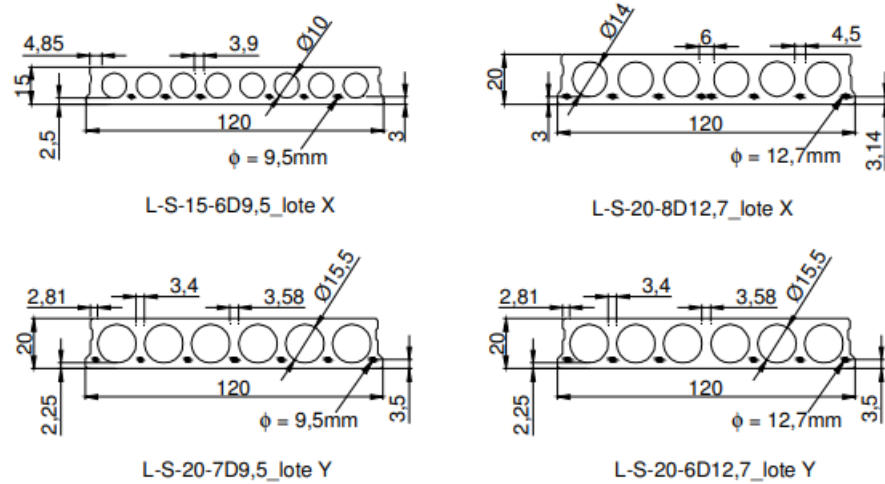


Figura 5.8: Tipologia das lajes sem capa pertencentes aos lotes X e Y, com suas respectivas identificações.

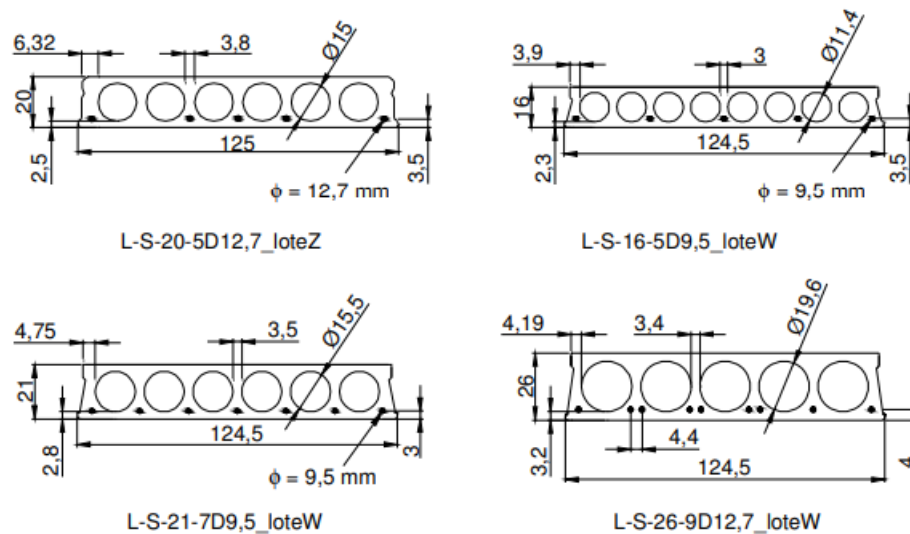


Figura 5.9: Tipologia das lajes sem capa pertencentes aos lotes Z e W, com suas respectivas identificações.

Fonte: Catóia (2011).

Geometria – Lajes Pajari (2005)

Type	Parameters	Depth mm	Core code
4		320	421
5		500	422

Code	H	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	r ₁	r ₂	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈
601	200	150	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0
602	200	155	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0
501	265	185	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0
502	265	191	0	0	0	0	0	39,5	0	0	0	0	0	0	0
503	320	185	0	0	0	0	0	67,5	0	0	0	0	0	0	0
401	320	229	0	0	0	0	0	40,5	0	0	0	0	0	0	0
410	320	220	0	0	0	122	122	38	69,24	105,52	69,24	0	0	0	0
411	320	222	0	0	0	123	123	36	70	106	70	0	0	0	0
412	370	220	0	0	0	122	122	63	69,24	105,52	69,24	0	0	0	0
413	400	225	0	0	0	112,5	112,5	40	112,5	95	112,5	0	0	0	0
414	400	223	0	0	0	111,5	111,5	35	111,5	102	111,5	0	0	0	0
415	400	222	0	0	0	123	123	36	70	186	70	0	0	0	0
416	400	221	97	0	0	125	0	40	62	191,44	66,56	0	0	0	0
421	320	229	0	41	0	126	126	35	73,41	103,2	73,41	84	71	21,57	0
422	500	215	70	40	86	120	0	48	72,5	248	66,67	50,5	250,36	80	6,86

APÊNDICE B – Dados referentes ao cálculo da inércia das lajes de Catóia (2011) e Brunesi (2015) – Inércia (I) coletada com o auxílio do AutoCad

Laje de 200 mm, Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015:

```

Comando: _erase 1 encontrado
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área:                123252.3476
Perímetro:           5651.3653
Caixa delimitadora: X: -603.1156 -- 592.0440
                   Y: -94.9912 -- 105.4495
Centroide:           X: 0.0000
                   Y: 0.0000
Momentos de inércia: X: 617797633.9641
                   Y: 15466105368.3786
Produto de inércia: XY: -12297143.3136
Raios de giro:       X: 70.7987
                   Y: 354.2362
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
                   l: 617787449.6633 em [1.0000 0.0008]
                   J: 15466115552.6789 em [-0.0008 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>: |

Laje de 265 mm, Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015

```

Comando: *Cancelar*
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área:                180594.3493
Perímetro:           5681.1630
Caixa delimitadora: X: 240279.5077 -- 241476.4445
                   Y: 170339.9024 -- 170604.9050
Centroide:           X: 240876.7065
                   Y: 170470.6990
Momentos de inércia: X: 5248120148269100
                   Y: 1.0478E+16
Produto de inércia: XY: -7.4156E+15
Raios de giro:       X: 170470.7241
                   Y: 240876.9601
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
                   l: 1546819964.2789 em [1.0000 -0.0001]
                   J: 22067004494.7211 em [0.0001 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>: |

Laje de 320a e 320b mm, Brunesi, Bolognine e Nascimbene, 2015:

```

Comando: *Cancelar*
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: Especificar canto oposto: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área:                172382.6767
Perímetro:           6016.7771
Caixa delimitadora: X: 238529.9401 -- 239691.7677
                   Y: 169756.1599 -- 170076.1563
Centroide:           X: 239113.2034
                   Y: 169912.7362
Momentos de inércia: X: 4976748460357299
                   Y: 9856021318271977
Produto de inércia: XY: -7.0036E+15
Raios de giro:       X: 169912.7760
                   Y: 239113.4508
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
                   l: 2329290613.3103 em [1.0000 0.0009]
                   J: 20392170310.6897 em [-0.0009 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>: |

Laje L26-S-16-5D9-W-C de Catóia (2011):

```

Comando: *Cancelar*
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: Especificar canto oposto: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área: 144032.1223
Perímetro: 5692.5273
Caixa delimitadora: X: -616.2664 -- 614.2086
Y: -101.3140 -- 108.6860
Centroide: X: 0.0000
Y: 0.0000
Momentos de inércia: X: 774017024.0000
Y: 18702899120.0000
Produto de inércia: XY: -5839104.0000
Raios de giro: X: 73.3070
Y: 360.3502
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
l: 774015122.3124 em [1.0000 0.0003]
J: 18702901021.6874 em [-0.0003 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>:

Laje L4-5-20-6D12,7-Y_C de Catóia (2011):

Laje L1-S-15-6D9,5-X_C de Catóia (2011)

```

Comando: _.erase 1 encontrado
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área: 108786.4272
Perímetro: 5282.6092
Caixa delimitadora: X: -599.9323 -- 598.9285
Y: -72.8638 -- 76.0543
Centroide: X: 0.0000
Y: 0.0000
Momentos de inércia: X: 281000960.0000
Y: 13493595520.0000
Produto de inércia: XY: -2879488.0000
Raios de giro: X: 50.8237
Y: 352.1896
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
l: 281000332.4585 em [1.0000 0.0002]
J: 13493596147.5414 em [-0.0002 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>: |

Laje 116-265-501 – 4 – (265mm) de Pajari (2005):

```

Comando: _.erase 1 encontrado
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: 1 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área: 176940.1762
Perímetro: 5764.9479
Caixa delimitadora: X: -581.9232 -- 588.6856
Y: -130.9518 -- 134.0482
Centroide: X: 0.0000
Y: -0.0008
Momentos de inércia: X: 1531716080.4101
Y: 21594320493.5957
Produto de inércia: XY: 2157096.1219
Raios de giro: X: 93.0413
Y: 349.3466
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
l: 1531715848.3690 em [1.0000 -0.0001]
J: 21594320725.5229 em [0.0001 1.0000]

```

PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>:

Laje 179-320-414 – 4 e Laje 180-320-414 – 4 (320mm) de Pajari (2011):

```

Comando: _erase 1 encontrado
Comando: PROPMASS
Selecionar objetos: Especificar canto oposto: 2 encontrado
Selecionar objetos:
----- REGIÕES -----
Área: 178939.4549
Perímetro: 6096.0836
Caixa delimitadora: X: -574.2959 -- 585.6159
Y: -160.0434 -- 159.9566
Centroide: X: -0.0016
Y: 0.0000
Momentos de inércia: X: 2383222578.6075
Y: 21882707006.4570
Produto de inércia: XY: 15846912.6980
Raios de giro: X: 115.4062
Y: 349.7015
Momentos principais e direções X-Y em relação ao centroide:
I: 2383209700.0885 em [1.0000 -0.0008]
J: 21882719884.5290 em [0.0008 1.0000]
-----
PROPMASS Gravar análise em arquivo? [Sim Não] <N>: |

```

APÊNDICE C: Dados e Cálculos de entrada para a obtenção de V_c e V_p usando o $f_{ct,m}$:

Dados para cálculo de V_c e V_p para o caso da NBR 14861:2022:

PLANILHA PADRÃO A SER USADA (VERIFICAÇÃO EQUAÇÃO DA NBR 14861)															
Autor	Laje	Código	h(mm)	d (mm)	bw (mm)	Perda (%)	Qtd cord.	Asl (mm ²)	Np (N)	Ac (mm ²)	ocp (MPa)	ρ	fct,m	k	
Salles	TR3-3A	1	210	169,9	37,08	23,69	0	101	93647,632	14062	6,66	1,8413	4,69	1,43	
Tawadrous & Morcoux, 2017	1B	2	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	4,70	1,24	
Tawadrous & Morcoux, 2017	2A	3	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	4,70	1,24	
Tawadrous & Morcoux, 2017	3A	4	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	4,70	1,24	
Tawadrous & Morcoux, 2017	3B	5	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	4,70	1,24	
Brunesi, 2015	200	6	200	150	239	5	7	651	680295	123900	5,49	1,9264	4,33	1,45	
Brunesi, 2015	265	7	260	210	228	5	10	930	971850	170200	5,71	1,9769	5,16	1,39	
Brunesi, 2015	320a	8	320	270	309	5	11	1023	1069035	170500	6,27	1,6905	4,69	1,33	
Brunesi, 2015	320b	9	320	270	289	5	11	1023	1069035	170500	6,27	1,724413687	4,81	1,33	
Catóia, 2011	L26-S-16-SD9-W_C	10	160,1	135,7	288	5	5	277,5	384892,5	129085	2,98	1,484021125	3,90	1,4643	
Catóia, 2011	L4-S-20-6D12,7-Y_C	11	199,9	174,8	296	5	6	760,02	1032472,73	132400	7,80	1,787559527	4,26	1,4252	
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	12	150	115,2	370	5	6	425,28	575084,4547	131236	4,38	1,599099099	4,39	1,4848	
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	13	265	212,5	222	15	6	558	521730	176940	2,95	1,673131955	4,51	1,3875	
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	14	320	267,5	262	15	5	465	395250	178939,4549	2,21	1,465392024	4,51	1,3325	
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	15	320	267,5	278	15	13	1209	1027650	178939,4549	5,74	1,850305923	4,51	1,3325	

Dados para cálculo de V_c e V_c para o caso da equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022):

PLANILHA PADRÃO A SER USADA - VERIFICAÇÃO ANALÍTICA														
Autor	Laje	Código	d (mm)	bw (mm)	h (mm)	Yinf (mm)	fct,m	Ic (mm ⁴)	ep	Qtd cord.	Ac (mm ²)	Asl (mm ²)	Perda (%)	Np (N)
Salles	TR3-3A	1	169,9	37,08	210	104,99	4,69	74062788,0000	64,76	-	14062,0	101,0	23,69	93647,63
Tawadrous & Morcoux, 2017	1B	2	361,95	352,55	406	202,18	4,70	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	2A	3	361,95	352,55	406	202,18	4,70	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	3A	4	361,95	352,55	406	202,18	4,70	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	3B	5	361,95	352,55	406	202,18	4,70	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Brunesi, 2015	200	6	150	150	200	100	4,33	617787449,6633	28,5	7	128600	651	5	680295
Brunesi, 2015	265	7	210	160	265	127,6	5,16	1546819964,2789	30	10	170200	930	5	971850
Brunesi, 2015	320a	8	270	120	320	156,57	4,69	2329290613,3103	34	11	170500	1023	5	1069035
Brunesi, 2015	320b	9	270	120	320	156,57	4,81	2329290613,3103	34	11	170500	1023	5	1069035
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W-C	10	135,7	288	160,1	80,23	3,90	774015122,3124	23	5	129085	277,5	5	384892,5
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y-C	11	174,8	296	199,9	103,33	4,26	778944713,5019	22,5	6	132400	470,28	5	638866,4
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X-C	12	115,2	370	150	72,21	4,39	281000332,4585	22,5	6	131236	425,28	5	575084,5
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	13	212,5	222	265	132,5	4,51	1531715848,3690	40	6	176940,176	558	15	521730
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	14	267,5	262	320	160,043	4,07	2383209700,0885	42	5	178939,455	465	15	395250
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	15	267,5	278	320	160,043	4,07	2383209700,0885	42	13	178939,455	1209	15	1027650

APÊNDICE D: Dados e Cálculos de entrada para a obtenção de V_c e V_p usando o f_{ck} , para a equação do Eurocode (EC 2-1-1:2004):

Dados para cálculo de V_c e V_c para o caso da Eurocode (EC 2-1-1:2004):

PLANILHA PADRÃO A SER USADA (VERIFICAÇÃO EQUAÇÃO DO EUROCODE 2)															
Autor	Laje	Código	h(mm)	d	bw	ρ_l	k	Qtd cord.	f_{ck}	Perda (%)	Asl	Np (N)	Ac	σ_{cp}	
Salles	TR3-3A	1	210	169,9	37,08	0,0160	2,08	-	60,19	24	101	93647,632	14062	6,659623951	
Tawadrous & Morcoux,	1B	2	406	361,95	352,55	0,0108	1,74	7	62,00	15	1374,19	1520816,1	225160,85	6,754353934	
Tawadrous & Morcoux,	2A	3	406	361,95	352,55	0,0108	1,74	7	62,00	15	1374,19	1520816,1	225160,85	6,754353934	
Tawadrous & Morcoux,	3A	4	406	361,95	352,55	0,0108	1,74	7	62,00	15	1374,19	1520816,1	225160,85	6,754353934	
Tawadrous & Morcoux,	3B	5	406	361,95	352,55	0,0108	1,74	7	62,00	15	1374,19	1520816,1	225160,85	6,754353934	
Brunesi, 2015	200	6	200	150	239	0,0182	2,15	7	54,80	5	651	680295,0	123900	5,490677966	
Brunesi, 2016	265	7	260	210	228	0,0194	1,98	10	71,30	5	930	971850,0	170200	5,710047004	
Brunesi, 2017	320a	8	320	270	309	0,0123	1,86	11	61,80	5	1023	1069035,0	170500	6,27	
Brunesi, 2018	320b	9	320	270	289	0,0131	1,86	11	64,30	5	1023	1069035,0	170500	6,27	
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W-C	10	160,1	135,7	288	0,0071	2,21	5	47,00	5	277,5	384892,5	129085	2,9816981106	
Catóia, 2011	L4-5-20-6D12,7-Y-C	11	199,9	174,8	296	0,0147	2,07	6	53,45	5	760,02	1032472,7	132400	7,798132399	
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X-C	12	150	115,2	370	0,0100	2,32	6	55,94	5	425,28	575084,5	131236	4,382063266	
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	13	265	212,5	222	0,0118	1,97	6	58,30	15	558	521730,0	176940	2,948626653	
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	14	320	267,5	262	0,0066	1,86	5	50,00	15	465	395250,0	178939,4549	2,208847681	
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	15	320	267,5	278	0,0163	1,86	13	50,00	15	1209	1027650,0	178939,4549	5,743003971	

APÊNDICE E: Dados e Cálculos de entrada para a obtenção de V_c e V_p usando o $f_{ctk,0,05}$:

Dados para cálculo de V_c e V_p para o caso da NBR 14861:2022:

PLANILHA PADRÃO A SER USADA - VERIFICAÇÃO EQUAÇÃO DA NBR 14861 - (USANDO O FCTK,0.05)														
Autor	Laje	Código	h(mm)	d (mm)	bw (mm)	Perda (%)	Qtd cord.	Asl (mm ²)	Np (N)	Ac (mm ²)	σ_{cp} (MPa)	ρ	$f_{ctk,0.05}$	k
Salles	TR3-3A	1	210	169,9	37,08	23,69	0	101	93647,632	14062	6,66	1,8413	3,28	1,43
Tawadrous & Morcoux, 2017	1B	2	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	3,29	1,24
Tawadrous & Morcoux, 2017	2A	3	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	3,29	1,24
Tawadrous & Morcoux, 2017	3A	4	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	3,29	1,24
Tawadrous & Morcoux, 2017	3B	5	406	361,95	352,55	15	7	1374,19	1520816,073	225160,85	6,75	1,6308	3,29	1,24
Brunesi, 2015	200	6	200	150	239	5	7	651	680295	123900	5,49	1,9264	3,03	1,45
Brunesi, 2015	265	7	260	210	228	5	10	930	971850	170200	5,71	1,9769	3,61	1,39
Brunesi, 2015	320a	8	320	270	309	5	11	1023	1069035	170500	6,27	1,6905	3,28	1,33
Brunesi, 2015	320b	9	320	270	289	5	11	1023	1069035	170500	6,27	1,724413687	3,37	1,33
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W_C	10	160,1	135,7	288	5	5	277,5	384892,5	129085	2,98	1,484021125	2,73	1,4643
Catóia, 2011	L4-S-20-6D12,7-Y_C	11	199,9	174,8	296	5	6	760,02	1032472,73	132400	7,80	1,787559527	2,98	1,4252
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	12	150	115,2	370	5	6	425,28	575084,4547	131236	4,38	1,599099099	3,07	1,4848
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	13	265	212,5	222	15	6	558	521730	176940	2,95	1,673131955	3,16	1,3875
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	14	320	267,5	262	15	5	465	395250	178939,4549	2,21	1,465392024	2,85	1,3325
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	15	320	267,5	278	15	13	1209	1027650	178939,4549	5,74	1,850305923	2,85	1,3325

Dados para cálculo de V_c e V_p para o caso da equação proposta por Sales, Ferreira e Araújo (2022):

PLANILHA PADRÃO A SER USADA - VERIFICAÇÃO ANALÍTICA - USANDO FCTK,0.05														
Autor	Laje	Código	d (mm)	bw (mm)	h (mm)	Yinf (mm)	FCTK,0.05	Ic (mm ⁴)	ep	Qtd cord.	Ac (mm ²)	Asl (mm ²)	Perda (%)	Np (N)
Salles	TR3-3A	1	169,9	37,08	210	104,99	3,28	74062788,0000	64,76	-	14062,0	101,0	23,69	93647,63
Tawadrous & Morcoux, 2017	1B	2	361,95	352,55	406	202,18	3,29	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	2A	3	361,95	352,55	406	202,18	3,29	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	3A	4	361,95	352,55	406	202,18	3,29	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Tawadrous & Morcoux, 2017	3B	5	361,95	352,55	406	202,18	3,29	4553988027,4896	38,1	7	225160,85	1374,19	15	1520816
Brunesi, 2015	200	6	150	150	200	100	3,03	617787449,6633	28,5	7	128600	651	5	680295
Brunesi, 2015	265	7	210	160	265	127,6	3,61	1546819964,2789	30	10	170200	930	5	971850
Brunesi, 2015	320a	8	270	120	320	156,57	3,28	2329290613,3103	34	11	170500	1023	5	1069035
Brunesi, 2015	320b	9	270	120	320	156,57	3,37	2329290613,3103	34	11	170500	1023	5	1069035
Catóia, 2011	L26-S-16-5D9-W-C	10	135,7	288	160,1	80,23	2,73	774015122,3124	23	5	129085	277,5	5	384892,5
Catóia, 2011	L4-S-20-6D12,7-Y_C	11	174,8	296	199,9	103,33	2,98	778944713,5019	22,5	6	132400	470,28	5	638866,4
Catóia, 2011	L1-S-15-6D9,5-X_C	12	115,2	370	150	72,21	3,07	281000332,4585	22,5	6	131236	425,28	5	575084,5
Pajari, 2005	116-265-501 - 4	13	212,5	222	265	132,5	3,16	1531715848,3690	40	6	176940,176	558	5	583110
Pajari, 2005	179-320-414 - 4	14	267,5	262	320	160,043	2,85	2383209700,0885	42	5	178939,455	465	5	441750
Pajari, 2005	180-320-414 - 4	15	267,5	278	320	160,043	2,85	2383209700,0885	42	13	178939,455	1209	5	1148550