

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Caroline da Silva Godois

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PUNÇÃO EM LAJES PRÉ-MOLDADAS
LOCALIZADAS EM PAVIMENTOS DE GARAGENS**

Santa Maria, RS

2023

Caroline da Silva Godois

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PUNÇÃO EM LAJES PRÉ-MOLDADAS
LOCALIZADAS EM PAVIMENTOS DE GARAGENS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS
2023

Caroline da Silva Godois

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PUNÇÃO EM LAJES PRÉ-MOLDADAS
LOCALIZADAS EM PAVIMENTOS DE GARAGENS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Aprovado em 14 de agosto de 2023:

.....
Almir Barros da Silva Santos Neto, Prof. Dr. (UFSM)
(Orientador)

.....
André Lübeck, Prof. Dr. (UFSM)

.....
Alisson Simonetti Milani, Prof. Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Sonia, que desde sempre me apoiou de todas as formas possíveis, fazendo de tudo para não desistir dos meus sonhos.

Aos meus irmãos, Priscila, João e Leonardo que estiveram comigo nos altos e baixos, me apoiando.

Aos amigos que a faculdade me deu: Paloma e Bruno. Muito obrigado pelo apoio, pelas noites de estudos e também nas noites de jogos e vinhos

À UFSM e aos professores que nesses anos, a cada semestre, sempre novos desafios.

Enfim, meu muito obrigado a todos que tornaram essa trajetória mais leve.

RESUMO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA PUNÇÃO EM LAJES PRÉ-MOLDADAS LOCALIZADAS EM PAVIMENTOS DE GARAGENS

AUTOR: CAROLINE DA SILVA GODOIS
ORIENTADOR: ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO

Este trabalho tem como objetivo analisar o fenômeno da punção em lajes pré-moldadas em garagens, considerando os carregamentos concentrados e distribuídos definidos pela norma ABNT NBR 6120 (2019). A análise da punção é de extrema importância para garantir a segurança do uso dessas lajes em estruturas de garagens, onde ocorrem carregamentos de sustentação e concentração de forças em determinadas regiões próximas aos pilares e apoios. Durante o estudo, foram investigados os efeitos da carga vertical concentrada na laje de compressão, ou seja, a capa das lajes pré-moldadas com vigotas protendidas, considerando tanto carregamentos concentrados como sobrecargas distribuídas uniformemente. A viabilidade da utilização de lajes pré-moldadas em garagens foi avaliada com base nos resultados da análise de punção. Foi feita uma comparação dos resultados com os requisitos de segurança estabelecidos pelas normas e diretrizes de projetos estruturais, bem como as necessidades das garagens em termo de carga e uso. Ao final do estudo, concluiu-se que o uso das lajes pré-moldadas com vigotas protendidas podem ser utilizadas em pavimentos de garagens.

Palavras-chave: Lajes; Punção; Dimensionamento.

ABSTRACT

EVALUATION OG THE EFFECT OF PUNCHING ON PRECAST SLABS LOCATED ON GARAGE FLOORING

**AUTHOR: CAROLINE DA SILVA GODOIS
ADVISER: ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO**

This work aims to analyze the punching phenomenon in precast slabs in garages, considering the concentrated and distributed loads defined by the ABNT NBR 6120 (2019) standard. Puncture analysis is extremely important to ensure the safety of using these slabs in garage structures, where sustaining loads and concentration of forces occur in certain regions close to pillars and supports. During the study, the effects of the vertical load concentrated on the compression slab, that is, the cover of precast slabs with prestressed beams, were investigated, considering both concentrated loads and uniformly distributed overloads. The feasibility of using precast slabs in garages was evaluated based on the results of the puncture analysis. A comparison of the results was made with the safety requirements established by the norms and guidelines of structural projects, as well as the needs of the garages in terms of load and use. At the end of the study, it was concluded that the use of precast slabs with prestressed joists can be used in garage floors

Keywords: Slabs; Punching; Dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje pré-moldada	16
Figura 2 - Laje pré-moldada de concreto armado.....	17
Figura 3 - Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos.....	18
Figura 4 - Ancoragem dos conectores tipo stud.....	22
Figura 5 - Detalhe de conectores tipo pino.....	22
Figura 6 - Efeito pino.....	23
Figura 7 - Superfícies críticas para o modelo de cálculo.....	24
Figura 8 - Perímetro crítico.....	25
Figura 9 - Determinação do F_{sd} e M_{sd}	27
Figura 10 - Perímetro crítico em pilares internos.....	28
Figura 11- Vigota e cerâmica.....	30
Figura 12- Planta de garagem de estudo.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perímetros críticos para pilares interno.....	28
Tabela 2 – Valores da vigota.....	32
Tabela 3 – Resultado das verificações.....	36
Tabela 4 – Carregamentos da vigota.....	41
Tabela 5 – Dados de reações da vigota.....	42
Tabela 6 – Classe de agressividade ambiental e qualidade do concreto.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

NBR	Norma Brasileira Registrada
\emptyset	Diâmetro da armadura
ρ	Taxa geométrica de armadura de flexão aderente
ρ_x	Taxa de armadura na direção x
ρ_y	Taxa de armadura na direção y
b	Largura da alma
b_f	Largura da mesa
C	Perímetro do pilar ou da carga concentrada
C'	Contorno crítico, afastada a $2d$ do perímetro C
C''	Contorno crítico, afastada a $2d$ da última linha da armadura de punção
C_1	Dimensão do pilar paralela a excentricidade
C_2	Dimensão do pilar perpendicular a excentricidades
$CA - 50$	Classe de armadura com resistência de escoamento de 500 MPa
$C25$	Resistência característica do concreto à compressão de 25 Mpa
C_n	Comprimento nominal
d	Altura útil da laje
d_x	Dimensão em x infinitesimal
d_y	Dimensão em y infinitesimal
h	Altura total da laje
h_f	Espessura da mesa
F_{sd}	Força norma de cálculo
f_{yd}	Valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço
f_{cd}	Resistência de cálculo compressão do concreto
f_{ck}	Resistência característica a compressão do concreto
M_{sd}	Momento desbalanceado de cálculo
τ_{sd}	Tensão de cisalhamento solicitante de cálculo
τ_{Rd1}	Tensão de cisalhamento resistente de calculo limite, em trechos sem armaduras de punção
τ_{Rd2}	Tensão resistente de compressão diagonal do concreto no perímetro C
τ_{Rd3}	Tensão resistente ao cisalhamento no perímetro C' sem armadura de punção

u Perímetro crítico de contorno considerado
 W_p Módulo de resistência plástica dos perímetros críticos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVO.....	13
1.2 Objetivo geral	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 LAJES PRÉ-MOLDADAS.....	15
2.2 PUNÇÃO	18
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA A PUNÇÃO	19
2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO DE PUNÇÃO.....	23
2.4.1 MÉTODO DA SUPERFÍCIE DE CONTROLE.....	23
2.5 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO A PUNÇÃO NBR 6118/2014.....	24
2.6 TENSÃO SOLICITANTE NAS SUPERFÍCIES CRÍTICAS.....	26
3 METODOLOGIA	30
3.1.1 TENSÃO SOLICITANTE E RESISTENTE EM TORNO DO PERÍMETRO C ...	32
3.1.2 VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO NO PERÍMETRO C'.....	32
3.2.1 TENSÃO SOLICITANTE E RESISTENTE EM TORNO DO PERÍMETRO C ...	35
3.2.2 VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO NO PERÍMETRO C'.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5 CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A norma brasileira NBR 6120 (2019) é de extrema relevância para engenheiros calculistas e projetistas das áreas de estruturas na engenharia civil, estabelecendo as cargas a serem consideradas em projetos estruturais de edificações. Nota-se que a NBR 6120 (1980), não contemplava a carga concentrada destinadas a serem aplicadas nos pavimentos de garagens para calcular os esforços e deslocamentos nas estruturas, a norma antiga baseava-se em cargas distribuídas para o dimensionamento, ao adicionar essa carga concentrada, outros efeitos, como o efeito da punção, devem ser levados em consideração. Esse estudo tem como objetivo realizar uma análise de punção em lajes pré-moldadas de vigotas protendidas aplicadas em garagens.

As lajes pré-moldadas possuem uma camada de concreto chamada de capa que pode ser suscetível à punção quando estiver com cargas concentradas altas. A capa é a camada de concreto que fica sobre as vigotas de aço, que são utilizadas para fornecer suporte estrutural à laje. Quando cargas concentradas elevadas, como geradas por colunas ou pilares, são aplicadas na superfície da laje, a área da capa de concreto que está diretamente sob essas cargas fica submetidas a concentrações de tensão. Se a resistência da capa de concreto não for adequada para suportar essas cargas concentradas, pode ocorrer o efeito de punção.

Neste estudo, foi aplicada a norma NBR 6120 (2019) que apresenta importantes atualizações no dimensionamento de lajes de garagens para a Categoria I, essa categoria é destinada a veículos com peso bruto total ou igual a 30 kN e inclui a consideração de uma carga concentrada específica de 12 kN, conforme determinado na própria norma.

CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2014) descrevem as lajes sob o ponto de vista estrutural, mencionando as vantagens das lajes maciças em relação as pré-moldadas, como a possibilidade de colocação de tubulações elétricas e outras instalações antes da concretagem, além da melhor distribuição das reações em todas as vigas de contorno, otimizando o aproveitamento das vigas.

As considerações feitas por DIEHL (2018) sobre a análise das lajes, fica evidente a importância de um projeto bem elaborado para garantir a segurança estrutural dos edifícios, especialmente no que diz respeito às lajes de garagens. A realização da análise de punção em lajes pré-moldadas aplicadas em garagens é fundamental para

assegurar que a estrutura esteja adequadamente dimensionada e preparada para suportar as solicitações específicas desse ambiente, proporcionando a confiabilidade e durabilidade à construção.

Nesse contexto, este trabalho visa contribuir para o conhecimento e aprimoramento das práticas de projetos e construção, fornecendo informações técnicas relevantes e atualizadas sobre o dimensionamento e a verificação de punção em lajes pré-moldadas destinadas ao uso em garagens. A análise rigorosa desses elementos estruturais é essencial para garantir a segurança e o desempenho da edificação como um todo, bem como acompanhar as exigências normativas e as constantes inovações nas áreas da engenharia civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo proposto neste trabalho desempenha um papel de suma relevância, uma vez que aborda uma temática essencial para a indústria da construção civil, especialmente no campo de projetos estruturais em engenharia civil. Com o crescimento contínuo de lajes pré-moldadas no mercado, torna-se cada vez mais crucial que os engenheiros e profissionais da área tenham um conhecimento aprofundado e atualizado sobre esse sistema estrutural.

Esse estudo proposto vem ao encontro das necessidades do setor, uma vez que busca fornecer informações fundamentais e atualizadas sobre aplicação de lajes pré-moldadas sujeita a carga de veículos. Os resultados e conclusões obtidos a partir desse trabalho podem contribuir para o aprimoramento das práticas de projetos e construção.

1.2 OBJETIVO

1.2 Objetivo Geral

Realizar verificações da punção em lajes pré-moldadas com vigotas protendidas para o uso em garagens, considerando o carregamento para veículo da Categoria I.

1.3 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, será abordado o seguinte objetivo específico:

- Aplicação da metodologia usada pela NBR 6118/2014 no estudo de caso do uso de lajes pré-moldadas com vigotas protendidas em garagens direcionada para a capa resistente da estrutura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LAJES PRÉ-MOLDADAS

As lajes pré-moldadas são elementos estruturais amplamente utilizadas na construção civil, caracterizados por serem fabricados em indústrias especializadas e posteriormente instaladas no local da obra (Figura 1). Essas lajes são produzidas em condições controladas, o que permite mais precisão, qualidade e eficiência no processo construtivo.

Uma das vantagens é a rapidez e execução, como são fabricadas em fábricas podem ser produzidas em grande quantidade e entregues prontas para serem instaladas no canteiro de obras. Isso reduz o tempo de construção e acelera o cronograma de obra, resultando em economia de tempo e recursos.

Além da agilidade, as lajes pré-moldadas também oferecem outras vantagens, como redução da quantidade de escoramentos necessários durante a execução. Como já são estruturas resistentes, elas podem ser instaladas imediatamente durante a execução, permitindo continuidade das atividades na obra sem grandes interferências.

Outro benefício é a uniformidade e consistência do produto, por serem fabricadas em ambiente controlado, as lajes pré-moldadas tem alta qualidade e acabamento padronizado, o que contribui para uma estrutura mais homogênea e com menos variações na execução e também são versáteis, podendo ser encontrada em diferentes formatos, espessuras e dimensões. Isso possibilita a atender a uma ampla gama de necessidades estruturais e arquitetônicas, adaptando-se a tipos de projetos e requisitos específicos.

Figura 1 – Laje pré-moldada.



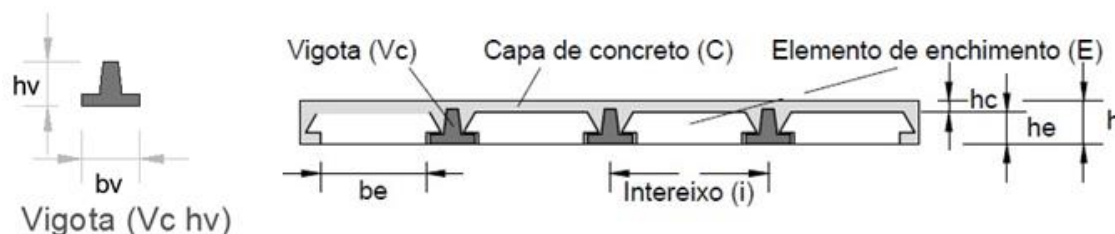
Fonte: Lajes Carioca

Embora as lajes pré-moldadas ofereçam diversas vantagens no processo construtivo, é importante considerar suas desvantagens. Algumas das principais desvantagem são:

- Limitação de vãos: elas têm dimensões padronizadas, o que pode resultar em limitações dos vãos que podem ser cobertos por esses elementos. Em algumas situações, pode ser necessário recorrer a vigas secundárias ou outras soluções para completar a estrutura
- Detalhamento e adaptações: algumas adaptações arquitetônicas ou alterações no projeto estrutural podem ser mais difíceis de implementar com lajes pré-moldadas, uma vez que elas são fabricadas com antecedência e podem não ser facilmente modificadas no canteiro de obras;
- Custo inicial: embora as lajes pré-moldadas possam oferecer economia de tempo na execução, o custo inicial do material pode ser maior do que a de sistemas convencionais de lajes moldadas in loco. Essa diferença pode ser significativa, dependendo das especificações do projeto e da disponibilidade de materiais na região.

Segundo CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2014), as ações das lajes pré-moldadas geralmente consideradas apenas nas vigas onde os elementos da laje se apoiam, desconsiderando as ações destas nas vigas paralelas aos elementos (Figura 2).

Figura 2 – Laje pré-moldada de concreto armado.



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

A crescente utilização desse tipo de estrutura em diversas obras é uma tendência relevante na construção civil. No entanto, é importante destacar que a aplicação dessas lajes em garagens requer uma atenção especial em relação à área de utilização. As garagens são ambientes sujeitos a cargas concentradas, como as provenientes dos veículos estacionados. Isso significa que as lajes utilizadas nesses espaços sujeitas a esforços específicos, demandam uma análise criteriosa para garantir a segurança estrutural da mesma.

A análise da capacidade de resistência à punção é particularmente relevante em garagens, uma vez que as áreas expostas a cargas pontuais significativas, como aquelas provenientes das rodas dos veículos. Um dimensionamento inadequado ou uma falta de atenção nesse aspecto podem comprometer a integridade da estrutura e sua capacidade de suportar essas cargas concentradas.

Para os cálculos das ações a NBR 6120 (2019) diz que em cada área de garagem, é necessário fazer a sinalização indicando a velocidade máxima permitida, a carga máxima permitida (PBT- Peso Bruto Total) e a altura máxima dos veículos. Recomenda-se que a velocidade máxima sugerida para a circulação na garagem seja de 10 Km/h, com base na prática comum e na Tabela 13 (Figura 3), contida nesta mesma norma indica as ações em garagens e as demais áreas de circulação de veículos.

Sobre a identificação dos veículos que pertencem a cada categoria, além do PBT e da altura máxima disponível do acesso à garagem, a NBR 6120 (2019) exemplifica que a Categoria I compreende no máximo veículos de passeio blindados, desde que a blindagem não ultrapasse 15% do PBT do veículo.

Tratando-se da aplicação das cargas concentradas, para a Categoria I a carga concentrada de 12 KN é aplicada em uma área de atuação de 10 cm x 10 cm.

Figura 3 – Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos

Tabela 13 – Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Categoria	PBT kN	Carga uniformemente distribuída kN/m ²	Altura máx. m	Cargas concentradas Q_k kN	Força horizontal F_x^e kN	Força horizontal F_y^e kN	Altura H de aplicação das forças F_x e F_y^e m
I ^a	≤ 30	3	2,3	12 ^b	100	50	0,5
II ^f	≤ 90	5	2,6	60 (Figura 3)	180	90	0,5
III	≤ 160	7	3,0	100 (Figura 4)	240	120	1,0
IV	> 160	10	> 3,0	170 (Figura 5) 255 (Figura 6)	320	160	1,0
V ^c	≤ 230	10	≥ 4,5	170 (Figura 5)	320 ^d	160 ^d	1,0 ^d

Fonte: NBR 6120 (2019)

2.2 PUNÇÃO

A punção em lajes pré-moldadas é um fenômeno crítico que deve ser considerado no projeto estrutural e ocorre quando a laje não é capaz de suportar os esforços de cisalhamento gerados nas regiões onde há concentração de cargas gerando possíveis falhas ou rupturas. Na literatura não se tem muitos estudos aplicados para lajes pré-moldadas em concreto aplicado em garagens. Segue uma breve fundamentação teórica para a punção e verificação da mesma.

De acordo com a NBR 6118 (2014), a punção é classificada como Estado Limite Último ocorrido no entorno de forças concentradas, gerado em um mecanismo de cisalhamento crítico. Portanto, para realizar uma análise estrutural de lajes, é necessário utilizar um procedimento numérico apropriado, com diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno, por exemplo.

Esses métodos numéricos permitem calcular as distribuições de tensão e deformação na laje, especialmente nas regiões próximas a pilares ou apoios, onde a punção é mais crítica, dessa forma, é possível garantir a segurança e eficiência das lajes, dimensionando-as corretamente para evitar ocorrência de punção e garantir a estabilidade da estrutura como um todo.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Os resultados de inúmeros ensaios indicam que a resistência à punção de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento é influenciada principalmente pela resistência à compressão do concreto, pela taxa de armadura de flexão tracionada, pelo tamanho e geometria do pilar e pelo *size effect*, ou efeito de tamanho, numa tradução livre, que é a redução da tensão resistente ao cisalhamento da laje com o aumento da altura útil (IBRACON, 2012).

O efeito da punção em lajes lisas de concreto armado sofre influência de diversos fatores. Além do grande problema da ligação laje pilar estar situada em uma região de nós, a variação na forma, textura, tamanho do agregado, com os fenômenos de micro fissuração (micro fissurações que ocorrem na zona de transição entre agregados e a pasta de cimento endurecida, antes mesmo que a peça ou modelo ser submetido ao carregamento externo), determinantes do comportamento não-linear do concreto, aliada à presença das barras das armaduras de aço estrutural conduzem o material concreto armado a uma heterogeneidade de materiais e comportamentos que agravam a identificação do sistema (RABELLO, 2010).

Resistência do concreto

A ruptura por cisalhamento de um elemento de concreto, sem armaduras de combate a esse esforço é governada, dentre outros fatores, pela resistência a tração do concreto. Como para fins de projeto de uma estrutura o estabelecimento da resistência a compressão é o passo inicial desse processo e as formulações normativas costumam relacionar à resistência a tração do concreto como uma função de sua resistência a compressão (IBRACON, 2015).

Espessura da laje

A superfície de ruptura por punção ocorre ao logo de uma superfície cônica na estrutura. Quando se busca combater o efeito da punção aumentando a espessura da laje, existem duas opções possíveis: aumentar a espessura em toda a laje ou concentrar o aumento apenas na região do pilar, o que é conhecido como capitel ou engrossamento da laje (RABELLO, 2010).

Ao se modificar a altura útil para toda a laje, as ações permanentes também aumentam, portanto aumenta-se a tensão resistente, mas também as tensões solicitantes, de tal forma que o processo não se torna vantajoso tanto economicamente quanto tecnicamente. Mas o uso de capitéis pode apresentar a perda das vantagens oferecidas pelo teto liso e prejudicar em alguns aspectos arquitetônicos (RABELLO, 2010).

Dimensões e formato do pilar

De acordo com LEONHARDT (1977), a geometria e as dimensões do pilar têm influência direta na resistência de uma laje, pois determinam a forma como as tensões são distribuídas na ligação entre a laje e o pilar. A relação da resistência entre os pilares e as lajes pode variar consideravelmente, esse fato se torna ainda mais relevante quando se trata de pilares presos em cantos e bordas da estrutura.

No caso de pilares quadrados, os pilares retangulares com uma relação entre o lado maior e o lado menor, maior que 2 apresentam uma ruína mais abrupta. Isso ocorre porque o tamanho do cone de punção é menor, e a resistência da ligação também é reduzida devido às tensões concentradas nos lados de menor dimensão.

Os autores afirmam, adicionalmente, que em termos de formato, os pilares retangulares tem uma resistência cerca de 15% menos em comparação com os pilares circulares da mesma área. Essa redução de resistência ocorre devido a concentração de tensão nos cantos dos pilares retangulares (MELGES, 2001).

Armadura de punção

Sem dúvida, o emprego de armaduras de punção é indiscutível capaz de ampliar a resistência da ligação entre laje e o pilar. Essa categoria de armadura apresenta uma diversidade de tipos e formatos, proporcionando a adoção de lajes mais finas e a necessidade de utilizar capitéis ou aumentar a espessura da laje.

Os benefícios da utilização da armadura de punção são aprimorar a resistência e a ductilidade da ligação entre laje e pilar. Essa melhoria implica que sua ruptura não ocorrerá de maneira frágil e abrupta, permitindo que a estrutura se deforme antes de romper, proporcionando um aviso prévio. Apesar das vantagens, é fundamental tomar cuidados especiais ao empregar a armadura de punção, uma vez, que a folga na

ancoragem e a disposição inadequada das armaduras podem causar escorregamentos, levando a perda de sua função estrutural (RABELLO, 2010).

A norma brasileira NBR 6118 (2014) recomenda que no caso de a estabilidade global da estrutura depender da resistência da laje é punção, deve-se prever uma armadura, mesmo que a ligação passe pela verificação de punção. Essa armadura deve equilibrar no mínimo 50% da força de reação proveniente da laje no pilar. Um exemplo de armadura são os conectores tipo stud ou pino.

O conector do tipo pino possui extremidades alargadas, isso para melhorar a ancoragem destes. O uso de pino tipo stud é recomendado pela norma brasileira e apresenta as seguintes vantagens:

- São fáceis de instalar, mesmo em lajes esbeltas;
- Não interferem na coloração e no posicionamento das armaduras dos pilares e de flexão das lajes;
- Possibilitam ancoragem mecânica satisfatória nas duas extremidades do pino, possibilitando que a armadura atinja toda a sua capacidade resistente antes da ruptura;
- Aumentam a resistência e a ductibilidade da ligação.

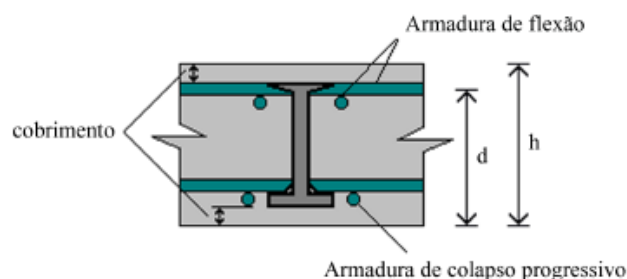
Para validar as vantagens mencionadas, é crucial levar em consideração algumas questões importantes, como a ancoragem das armaduras. Conforme ilustrado na Figura 4 e Figura 5, a extremidade mais alargada dos pinos de ancoragem deve ultrapassar tanto a armadura de flexão negativa quanto a positiva. O cumprimento dessa condição é essencial, pois uma ancoragem inadequada comprometeria a eficácia da armadura.

Em caso de ocorrência de ruptura por punção, a linha de ruptura pode percorrer o espaço entre a face superior e inferior da laje e a face do pino de ancoragem. Se essa situação acontecer, a ruptura pode ocorrer após a última linha dos pinos, resultando em uma área não solicitada da armadura, portanto, não aproveitada até o seu limite de escoamento. Esse cenário pode prejudicar a ductibilidade necessária para o sistema estrutural.

Para garantir a resistência adequada e a devida ductibilidade na ligação laje-pilar, é fundamental observar o correto posicionamento e ancoragem das armaduras de punção, seguindo as diretrizes e recomendações pertinentes, assegurar a

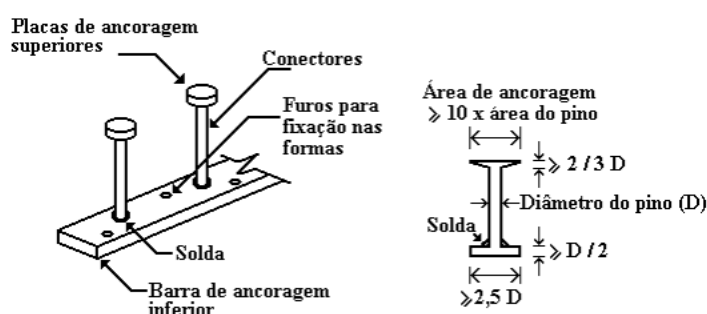
ancoragem adequada das armaduras de punção é uma consideração crucial que deve ser respeitada durante o projeto e a construção da estrutura

Figura 4 – Ancoragem dos conectores tipo stud



Fonte: LIMA, 2001.

Figura 5 – Detalhe de conectores tipo pino



Fonte: MELGES, 1995

Taxa de armadura de flexão

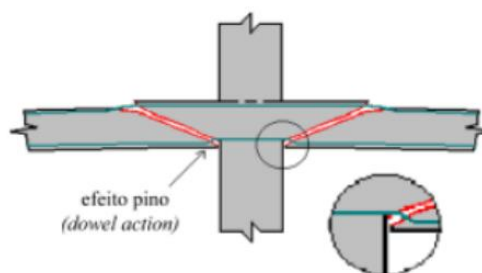
A taxa de armadura de flexão é calculada como a proporção entre a área de armadura de flexão tracionada e a área de concreto, esta última obtida multiplicando a altura útil da laje por uma largura específica.

O aumento de armadura de flexão resulta em uma ampliação da zona comprimida, contribuindo para a diminuição da fissura na ligação laje-pilar devido a flexão, o que é vantajoso, pois promove a formação de mecanismo para a transmissão de cisalhamento. Além disso, essa medida reduz a espessura das fissuras de flexão,

facilitando a transferência de forças por meio do engrenamento dos agregados (IBRACON, 2015).

De acordo com FUSCO (1984), a taxa de armadura de flexão exerce influência no efeito de pino da armadura longitudinal após o início da fissuração da borda tracionada da peça. Esse efeito é ilustrado na Figura 6. Para que essa condição ocorra, é fundamental que a ancoragem da armadura de flexão seja realizada além da superfície de ruptura de punção, FUSCO (1984) também relata que uma taxa de armadura maior resulta em uma menor incidência de fissuras. Ou seja, o aumento da quantidade de armadura de flexão tende a reduzir a formação de fissuras na estrutura.

Figura 6 – Efeito pino



Fonte: IBRACON, 2015

2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO A PUNÇÃO

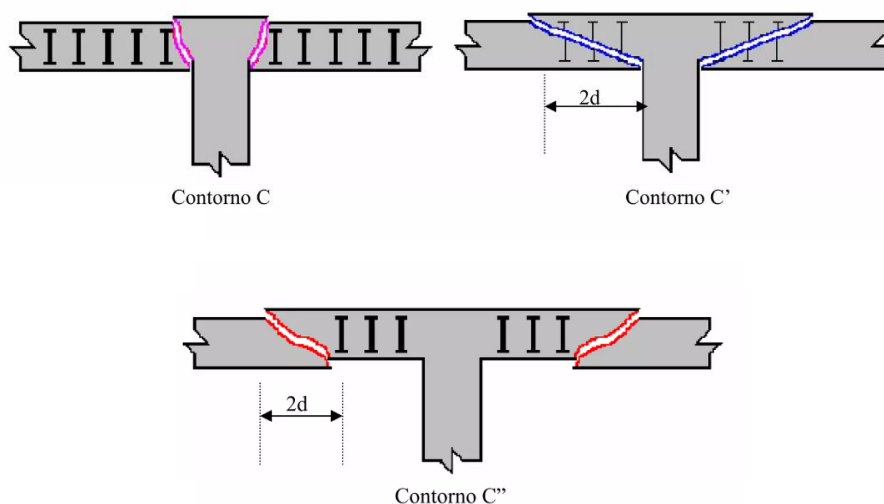
O método mais amplamente conhecido e desenvolvido para verificação a punção na ligação entre laje-pilar é o método da superfície de controle, sendo a base para diversos códigos normativos, incluindo os brasileiros, europeus, americanos, entre outros. Sua principal vantagem reside na sua aplicabilidade, pois pode ser adaptado para qualquer configuração de pilar. No entanto, é importante mencionar que se trata de uma solução empírica que requer calibração por meio de ensaios experimentais.

2.4.1 MÉTODO DA SUPERFÍCIE DE CONTROLE

O método da superfície de controle baseia-se no cálculo de uma tensão uniforme solicitante de punção em uma superfície específica perpendicular ao plano

médio da laje localizada a uma distância específica da face do pilar ou da área carregada. Esse valor do esforço solicitante é então comparado com um parâmetro de resistência do concreto determinado para aquela região. Se o esforço resistente naquele perímetro for maior que o esforço solicitante, não é necessário o uso de armadura de punção, podemos ver na Figura 7 as superfícies críticas de acordo com o modelo de superfície de controle, pela NBR 6118 (2014).

Figura 7 - Superfícies críticas para o modelo de cálculo.



Fonte: SANTOS, 2021

2.5 CRITÉRIOS DE VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO DA NBR 6118 (2014)

A NBR 6118 (2014) tem como modelo de cálculo proposto é a verificação do cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno das forças concentradas (Figura 8).

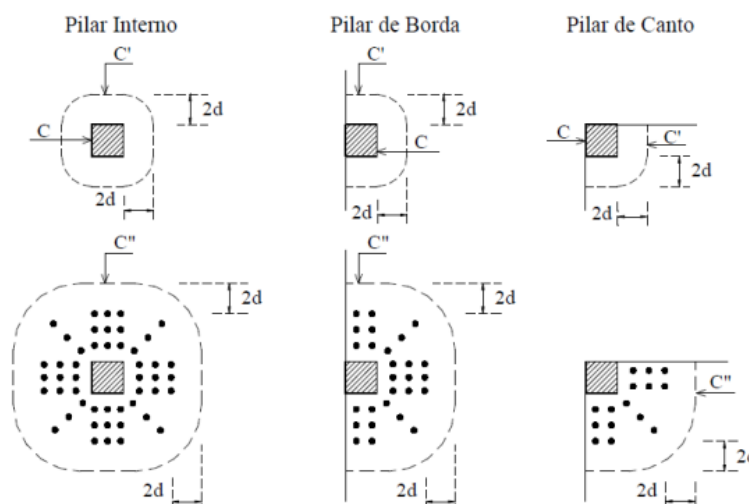
Na primeira superfície crítica (contorno C) de um pilar ou carga concentrada, a verificação da tensão da diagonal do concreto deve ser realizada, por meio da análise da tensão de cisalhamento. Essa verificação é aplicável tanto em lajes com armaduras quanto em lajes sem armadura.

Na segunda superfície crítica (contorno C') localizada a uma distância $2d$ do pilar ou carga concentrada, é necessário verificar a capacidade de ligação à punção, que está associada à resistência à tração diagonal do concreto. Essa verificação também é realizada através da análise da tensão de cisalhamento no contorno C'. Se

necessário, a ligação deve ser protegida por meio da inserção de armadura transversal.

Na terceira superfície crítica (contorno C'') só é necessária quando há a presença de armadura transversal. Essa verificação é semelhante a situação da segunda superfície crítica, porém, suporta uma superfície de ruptura mais afastada do ponto de aplicação da carga concentrada. Nesse caso, uma análise considera a capacidade de ligação a punção, levando em conta a resistência a tração diagonal do concreto e a influência da armadura transversal.

Figura 8 - Perímetro crítico



Fonte: LIMA, 2001

As superfícies mencionadas estão associadas a regiões onde existe o risco de falha por punção, entre a face do pilar e o início da armadura, dentro da região onde há a presença de armadura. A NBR 6118 (2014) determina as seguintes verificações:

1. Para quando não for prevista a armadura de punção, realizam-se duas verificações: é verificada a compressão diagonal do concreto no contorno C e verificação da punção, associada a ruína por punção no contorno C'.

- Compressão no concreto no contorno C, limitada pela expressão:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd}$$

Onde

$\alpha_v = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$, com f_{ck} em megapascal.

- Punção no contorno C':

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3}$$

2. Quando por prevista a armadura de punção, realizam-se três verificações: é necessária a verificação em ambos os casos do primeiro mais a verificação de punção no contorno C", ou seja, a verificação da resistência ao cisalhamento na região sem armadura de punção, usando a 2d da última linha de armadura de cisalhamento.

- Compressão do concreto no contorno C, limitada pela expressão:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2}$$

- Punção no contorno C':

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd3}$$

- Punção no contorno C":

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1}$$

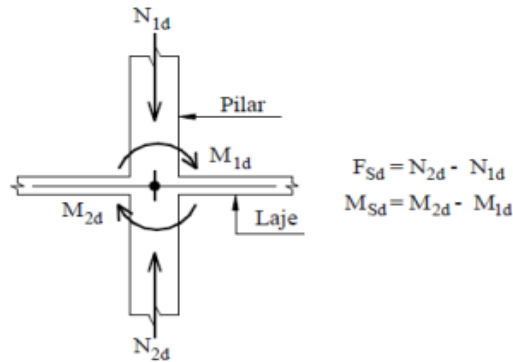
De acordo com a NBR 6118/2014, o cálculo da tensão cisalhante resistente dependerá da posição do pilar em relação à laje. Existem quatro casos possíveis: pilar interno com carregamentos simétrico, pilar interno com momento, pilar de borda e pilar de canto. A norma especifica modelos específicos para cada um desses casos, considerando suas configurações e condições de carga.

2.6 TENSÃO SOLICITANTE NAS SUPERFÍCIES CRÍTICA

Ao calcular as tensões solicitantes na superfície crítica, é essencial levar em consideração a posição dos pilares na estrutura, sejam eles internos, de borda ou de canto, bem como o tipo de carregamento e a geometria dos pilares, esses fatores influenciam significativamente as forças de cisalhamento atuante na região crítica da laje, sendo fundamentais para uma análise precisa e segura. A abordagem deste estudo será direcionada apenas para pilares internos simétricos.

- Pilar Interno com carregamento Simétrico

Figura 9 – Determinação do F_{sd} e M_{sd}



Fonte: LIMA, 2001

Quando o efeito do carregamento pode ser considerado simétrico nos pilares internos, conforme a Figura 9, a influência da flexão nos pilares pode ser desprezada. Nesse caso, a tensão de cisalhamento que atua no contorno C' apresenta uma distribuição uniforme, conforme demonstrado na Equação (3.1).

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (3.1)$$

Sendo:

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (3.2)$$

Onde:

τ_{sd} é a tensão cisalhante solicitante de cálculo no contorno considerado;

F_{sd} é a força ou reação de punção de cálculo;

u é o perímetro de contorno crítico C' , externo ao ponto C da área de aplicação da força e distante $2d$, no plano da laje;

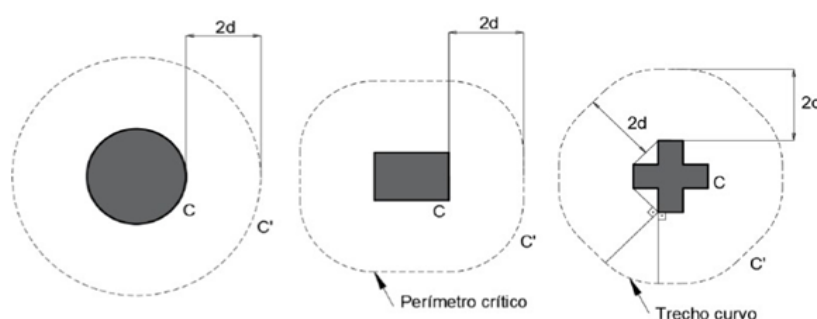
$u \cdot d$ é a área da superfície crítica

d é a altura útil da laje ao longo do contorno crítico C' ;

d_x e d_y são alturas úteis nas duas direções ortogonais, nas direções x e y .

A força de punção F_{sd} pode ser reduzida da força aplicada na face oposta da laje, desde que seja dentro do contorno considerado na verificação, seja C ou C' , conforme a Figura 10.

Figura 10 – Perímetro crítico em pilares internos



Fonte: NBR 6118 (2014)

Para atender a generalização das verificações imposta pela norma brasileira, são necessárias algumas formulações adicionais para o dimensionamento completo contra o efeito de punção. Segundo FERREIRA (2005), essas formulações incluem a origem das excentricidades, dos perímetros críticos e dos módulos de resistência plástica para os diferentes perímetros de controle. Essas informações são essenciais para garantir a segurança e a eficiência no dimensionamento das estruturas, considerando os efeitos críticos de punção, segue a Tabela 1 com as equações:

Tabela 1 – Perímetros críticos para pilares internos

Contorno Crítico	Perímetro Crítico u
C	$u = 2 \cdot (C_1 + C_2)$ (3.5)
C'	$u = 2 \cdot (C_1 + C_2) + 4\pi \cdot d$ (3.6)
C''	$u = 2 \cdot (C_1 + C_2) + 4\pi \cdot d + 2\pi \cdot i$ (3.7)

Fonte: FERREIRA,2005

- Taxa de armadura:

A taxa de armadura de flexão tracionada é inserida como a relação entre a área de armadura de flexão tracionada e a área de concreto da laje. A área de concreto é determinada multiplicando a altura útil da laje por uma largura específica a ser considerada. Em resumo, a taxa de armadura de flexão tracionada é a proporção da armadura de tração em relação a área de concreto da laje levando em conta a largura utilizada para o cálculo da área de concreto. E é expressa na equação 3.8

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \quad (3.8)$$

Onde:

ρ_x e ρ_y são as taxas de armaduras nas duas direções ortogonais:

- Na largura igual a dimensão ou área carregada do pilar acrescida de 3d para cada um dos lados;
- No caso de proximidade da borda, prevalece a distância até a borda, quando menor que 3d;
- ρ é a taxa geométrica de armadura de flexão aderente (armadura não aderente deve ser desprezada).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em abordar as lajes pré-moldadas unidirecionais como objeto de estudo. Essas lajes são elementos estruturais planos projetados para suportar cargas em uma única direção. Esse tipo de estrutura é composto por vigotas e materiais de enchimento, formando um sistema integrado de suporte e distribuição de cargas. Para obter um melhor entendimento estrutural dessas lajes, será feita uma análise do dimensionamento da vigota à flexão, com as dimensões conforme a Tabela 2.

Após a realização da verificação da vigota à flexão, a próxima etapa consistirá no cálculo da punção na laje pré-moldada, levando em consideração as ações de garagem conforme a Categoria I da norma NBR 6120 (2019). Para realizar o cálculo de punção, será empregado o método da superfície de controle.

Para os cálculos para verificação do dimensionamento da vigota foram retiradas do catálogo da Construrohr de lajes pré-moldadas protendidas LP17 (12 + 5), conforme a Figura 11. A altura do enchimento cerâmico mais a altura da capa resistente da laje de dimensões da Tabela 2 e as reações da vigota mostradas no Anexo B.

Figura 11 – Vigota e cerâmica



Fonte: Catálogo Construrohr

Tabela 2 – Valores da vigota

Dados da Vigota (cm)	
b	12
bf	42
h	17
hf	5
Cn	2,5
ad	1,5
d	13

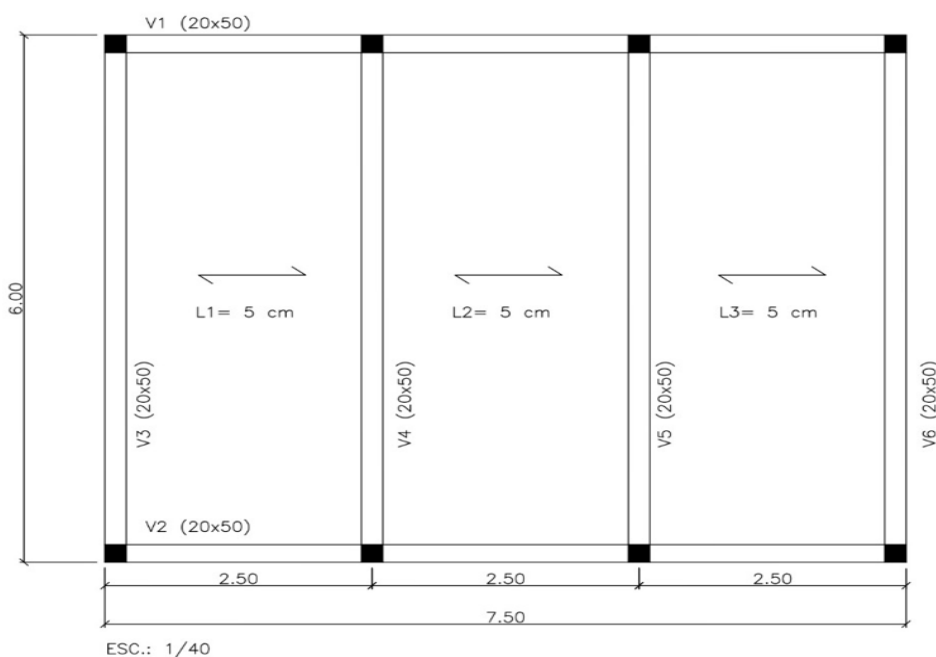
Fonte: Autor

O dimensionamento dessa vigota protendida foi feito para flexão simples pelo programa RLF FlexCisTor, estando os cálculos descritos no Anexo C.

Para a vigota de 17 cm de altura, o dimensionamento foi uma área de aço 0,53 cm² (equivalente a 2 Ø 8 mm), isso demonstra que a vigota pré-moldada protendida atualmente utilizada, com uma área de aço de 1,5 cm² (equivalente 3 Ø 8 mm) possui uma armadura excessiva para o vão em questão de 2,5m.

Como o objetivo é avaliar a punção na laje pré-moldada, definiu-se uma geometria de estrutura simples, de planta retangular, com laje pré-moldadas unidirecionais, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Planta de garagem de estudo deste trabalho



Fonte: Autor

3.1 VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO

Para a verificação da punção na laje pré-moldada, inicialmente será efetuada uma análise da capa resistente da laje, considerando sua espessura de 5 cm. Em conformidade com a norma 6120 (2019), será levada em conta a carga concentrada de 12 kN, delimitada em uma região específica de dimensões 10 cm x 10 cm.

Para o cálculo serão necessários os seguintes dados:

- $F_{sd} = 12 \text{ kN} \times 1,4 = 16,8 \text{ kN}$;
- Seção a ser analisada: 10 cm x 10 cm; $C_1 = 10 \text{ cm}$; $C_2 = 10 \text{ cm}$;
- Altura da capa: $c = 5 \text{ cm}$
- Altura útil da laje na direção x e na direção y e altura média: $dx = 4,75 \text{ cm}$;
 $dy = 4,25 \text{ cm}$; $d = 4,5 \text{ cm}$;
- Resistência característica a compressão do concreto: $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$;
- Diâmetro da armadura de distribuição: $\emptyset 5,0 \text{ mm c}/20 \text{ cm}$;
- $A_s = 0,20 \text{ cm}^2$; (ANEXO A);
- Perímetro de contorno crítico C da seção: $u = 40 \text{ cm}$; (Equação 3.5)
 $u = 2 \cdot (C_1 + C_2) = 2 \cdot (10 + 10) = 40 \text{ cm}$
- Perímetro de contorno crítico C': $u = 96,5 \text{ cm}$; (Equação 3.6),
 $u = 2 \cdot (C_1 + C_2) + 4\pi \cdot d = 2 \cdot (10 + 10) + 4\pi \cdot 4,5 = 96,5 \text{ cm}$
- Classe de agressividade II (ANEXO D).

3.1.1. TENSÃO SOLICITANTE E RESISTENTE EM TORNO DO PERÍMETRO C:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} = \frac{16,8}{40 \cdot 4,5} = 0,093 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 0,93 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{25}{250}\right) \cdot \frac{2,5}{1,4} = 0,434 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 4,34 \text{ MPa}$$

Quando a tensão solicitante do concreto $\tau_{sd} < \tau_{Rd2}$ é menor que a resistência de cálculo, significa que o concreto está suportando a carga com segurança. Nesse caso, não há risco de ruptura do concreto em torno do perímetro C.

3.1.2. VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO NO PERÍMETRO C'

$$q = \frac{\text{faixa}}{\text{espaçamento}}$$

A armadura usada na direção x e y é $\varnothing 5.0$ mm c/20, a quantidade de barras fica:

$$q = \frac{3.4,5 + 10 + 3.4,5}{20} = 1,85$$

A quantidade de barras nas duas direções: $1,85 \cdot 2 = 3,7 \cong 3$ barras

Por critérios de segurança, a quantidade de barras será arredondada para menos, fazendo com que a tensão resistente a ser calculada seja menor que a real.

Cálculo da taxa de armadura de flexão:

$$\rho_x = \frac{3.0,2}{4,75 \cdot 37} = 0,003$$

$$\rho_y = \frac{3.0,2}{4,25 \cdot 37} = 0,004$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} = \sqrt{0,003 \cdot 0,004} = 0,004$$

O cálculo da tensão resistente é influenciado pelo fator de escala (k), esse fator leva em consideração o efeito da espessura da laje (altura útil) na resistência á punção e é limitado a 2 para alturas úteis menores que 20 cm, os fatores de escala maiores que 2 podem levar a uma diminuição no nível de segurança.

$$k = \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \leq 2$$

$$k = \left(1 + \sqrt{\frac{20}{4,5}} \right) = 3,1$$

O valor do fator de escala $k = 3,1$ é maior que o limite, logo se considera o valor de $k = 2$ para o cálculo.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} = \frac{16,8}{96,5 \cdot 4,5} = 0,039 \frac{kN}{cm^2} = 0,39 MPa$$

$$\tau_{Rd1} = 0,13 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{20}{4,5}} \right) \cdot (100 \cdot 0,004 \cdot 25)^{1/3} = 0,56 MPa$$

Como $\tau_{sd} < \tau_{Rd1}$ a laje pré-moldada, com capa de 5 cm não precisa de armadura de punção.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa dos esforços, o presente estudo contemplará mais uma verificação para diferentes alturas da capa resistente da laje pré-moldada. Além da altura inicial, será considerada a altura de 4 cm.

3.2 VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO PARA CAPA DE 4 cm:

- $F_{sd} = 12 \text{ kN} \times 1,4 = 16,8 \text{ kN}$;
- Seção a ser analisada: 10 cm x 10 cm; $C_1 = 10 \text{ cm}$; $C_2 = 10 \text{ cm}$;
- Altura da capa: $c = 4 \text{ cm}$
- Altura útil da laje na direção x e na direção y e altura média: $dx = 3,75 \text{ cm}$; $dy = 3,25 \text{ cm}$; $d = 3,5 \text{ cm}$;
- Resistência característica a compressão do concreto: $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$;
- Diâmetro da armadura de distribuição: $\emptyset 5,0 \text{ mm}$ c/20 cm;
- $A_s = 0,20 \text{ cm}^2$; (ANEXO A)

- Perímetro de contorno crítico C da seção: $u = 40$ cm; (equação 3.5)
- Perímetro de contorno crítico C': $u = 83,9$ cm; (equação 3.6),
- Classe de agressividade II (ANEXO D).
- $K = 3,4$, para cálculo será considerado $K = 2$
- $\rho = 0,005$

3.2.1. TENSÃO SOLICITANTE E RESISTENTE EM TORNO DO PERÍMETRO C:

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u \cdot d} = \frac{16,8}{40 \cdot 3,5} = 0,12 \frac{kN}{cm^2} = 1,2 MPa$$

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{25}{250}\right) \cdot \frac{2,5}{1,4} = 0,434 \frac{kN}{cm^2} = 4,34 MPa$$

$\tau_{Rd2} \geq \tau_{sd}$, está em conformidade com a norma.

3.2.2. VERIFICAÇÃO DA PUNÇÃO NO PERÍMETRO C':

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u \cdot d} = \frac{16,8}{83,9 \cdot 3,5} = 0,06 \frac{kN}{cm^2} = 0,6 MPa$$

$$\tau_{Rd1} = 0,13 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,005 \cdot 25)^{1/3} = 0,6 MPa$$

$\tau_{Rd1} = \tau_{sd}$, a estrutura está operando em seu limite de resistência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para obter uma visão geral dos resultados, a Tabela 3 apresenta os seguintes resultados após as análises:

Tabela 3 – Resultado das verificações

Capa (cm)	Perímetro C		Perímetro C'	
	$\tau_{sd}(MPa)$	$\tau_{Rd2}(MPa)$	$\tau_{sd}(MPa)$	$\tau_{Rd1}(MPa)$
4	1,2	4,34	0,60	0,60
5	0,93	4,34	0,39	0,56

Fonte: autor

A verificação da tensão solicitante e resistente em torno do perímetro C, $\tau_{sd} < \tau_{Rd2}$ para as duas situações vistas, estão em conformidade com a NBR 6118 (2014), uma situação desejável e segura na análise de punção. Isso indica que a tensão solicitante é menor do que a resistência de cálculo, proporcionando uma margem de segurança confortável. Essa condição significa que a estrutura possui capacidade suficiente para resistir as forças de punção atuantes naquela região sem a necessidade de reforço estrutural.

Para a verificação da punção em torno do C' na capa resistente da laje pré-moldada de 4 cm de altura, $\tau_{Rd2} = \tau_{sd}$, significa que a estrutura está operando em seu limite de resistência, ou seja, as forças ou cargas que atuam sobre a estrutura estão sendo igualadas pelas capacidades de resistência dos materiais e da geometria do elemento estrutural.

Essa análise é de extrema importância na engenharia estrutural, pois garante que as ligações sejam dimensionadas e reforçadas para as solicitações de cisalhamento. O cumprimento adequado das verificações de punção ajuda a garantir a segurança e estabilidade da estrutura, evitando falhas e acidentes indesejáveis.

5 CONCLUSÕES

Em conclusão, a verificação da tensão em torno do perímetro C as duas capas resistentes da laje pré-moldada, demonstrou que o dimensionamento da armadura de flexão e da área da superfície de controle utilizada no cálculo foram adequados. A estrutura apresentou uma margem de segurança confortável em relação as forças de punção atuantes na região.

Além disso, após a verificação da punção em torno do perímetro C' para as diferentes alturas de capa resistente da laje pré-moldada, os valores obtidos foram considerados aceitáveis para o dimensionamento à punção aplicados em pavimentos de garagens. Esses resultados estão em conformidade com a NBR 6118 (2014), indicando que a estrutura atende aos critérios de segurança e resistência para suportar as cargas e condições específicas de uso nesse ambiente.

Podemos concluir que as capas resistentes de 4 cm, 5 cm podem ser aplicadas em lajes pré-moldadas de pavimentos de garagens da Categoria I, conforme estabelecido na norma NBR 6120 (2019) para a carga aplicada de 12 kN, dimensionamento e verificação à punção da norma NBR 6118 (2014). Entre as duas alturas calculadas, a capa resistente de 5 cm é a indicada para a utilização nos pavimentos de garagens.

Essa conclusão é relevante para o dimensionamento e a especificação das lajes pré-moldadas aplicada em garagens, pois demonstra viabilidade e a segurança das diferentes alturas de capa resistente. A capa de 5 cm se mostrou adequada para suportar as cargas e as condições de uso em pavimentos de garagens, apresentando um equilíbrio e eficiência construtiva.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHO, R, C.; FIGUEIREDO FILHO, J, R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4 ed. São Carlos: edUFSCar, 2014.

DIEL, A, P. **Análise comparativa de esforços e deslocamentos em lajes maciças de concreto armado através dos métodos de analogia de grelha e tabelas**. 2018. 90 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

FERREIRA. Antônio Mario. **Análise da punção e flechas em lajes maciças sem vigas de concreto armado de acordo com as prescrições da NBR 6118:2003**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Curso de engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2005.

FUSCO, Pérciles Brasiliense. **Estrutura de Concreto: Solicitações tangenciais**. São Paulo: Pini, 2008. 332 p.

IBRACON, Comitê de coordenadores. **ABNT NBR 6118:2014 Comentários e Exemplos de Aplicação**. 2015. 480. Ibracon, 2015.

LEONHARDT, F.; MONNING. E.. **Construções de concreto: Casos Especiais de Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Interciência, v.2. 1978.

LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. São Carlos. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

MELGES, João Luiz Pinheiro. **Análise experimental na punção em lajes de concreto armado e protendido**. São Carlos, 2001. 414 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MELGES, João Luiz Pinheiro. **Punção em lajes exemplos de cálculo e análise teórica experimental**. São Carlos. Tese de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, p. 34 Universidade de São Paulo, 1995.

RABELLO, F. T. **Análise comparativa de normas para punção e, lajes de concreto armado**. 2010. 248f. Dissertação (Mestrado) – Curso de engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CONSTRUROHR, **Catálogo: Lajes pré-moldadas**, Bom Princípio – RS. Disponível em: <https://construrohr.com.br/produtos-detalhe/94>. Acesso em: 8 jan. 2023.

ANEXO A – ÁREA DE AÇO

Bitola		TIPO	Área de Aço cm ²	Peso Linear kg/m
mm	pol.			
4.2		CA-60	0,14	0,109
5.0	3/16"	CA-60	0,196	0,154
6.3	1/4"	CA-50	0,31	0,245
8.0	5/16"	CA-50	0,5	0,395
10.0	3/8"	CA-50	0,785	0,617
12.5	1/2"	CA-50	1,22	0,963
16.0	5/8"	CA-50	2,01	1,578
20.0	3/4"	CA-50	3,14	2,466
25.0	1"	CA-50	4,91	3,853
32.0	1 1/4"	CA-50	8,04	6,313

Fonte: NBR 7480/96

ANEXO B – CÁLCULO DAS REAÇÕES DA VIGOTA OBTIDAS NO F-TOOLS

Tabela 4 – Carregamentos da vigota

Carregamentos	
Revestimento	1 KN/m ²
Sobrecarga (NBR 6120)	3 KN/m ²
Peso Próprio	2,4 KN/m ²
Peso Total	6,41 KN/m ²
	2,69 KN/m

Fonte: autor

Carregamento da vigota

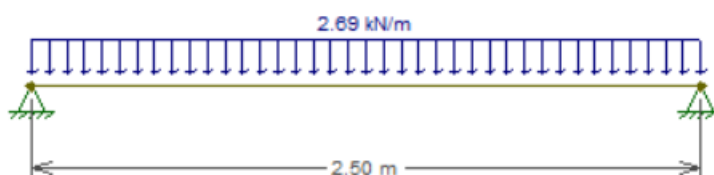


Diagrama cortante da vigota

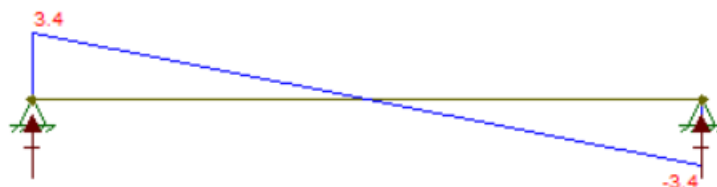


Diagrama momento fletor da vigota



ANEXO C – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO DA VIGOTA OBTIDO PELO PROGAMA RLF – FlexCisTor.

Tabela 5 – Dados das reações da vigota

Vão	2,50 m
V_s	3,40 kN
M_s	2,10 kN.m

Fonte: Autor

Fonte: Autor

ANEXO D – CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL E QUALIDADE DO CONCRETO

Tabela 6 – Classe de agressividade ambiental e qualidade do concreto

Classe de Agressividade Ambiental e Qualidade do Concreto				
CAA	Ambiente	Risco de deterioração	Concreto Armado	
			Classe	água/cimento
I - Fraca	Rural / Submersa	Insignificante	\geq C20	\leq 0.65
II - Moderada	Urbana	Pequeno	\geq C25	\leq 0.60
III - Forte	Marinho / Industrial	Grande	\geq C30	\leq 0.55
IV - Muito Forte	Industrial / Respingos de maré	Elevado	\geq C40	\leq 0.45
<i>* Fonte: Tabela 6.1 e 7.1 da ABNT NBR 6118:2014</i>				

**ANEXO E – TABELA PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO E
ESPAÇAMENTO DA ARMADURA EM FUNÇÃO DA ÁREA**

ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA (cm ² /m)						
Espaçamento (cm)	Diâmetro Nominal (mm)					
	4,2	5	6,3	8	10	12,5
5	2,77	4,00	6,30	10,00	16,00	25,00
5,5	2,52	3,64	5,73	9,09	14,55	22,73
6	2,31	3,33	5,25	8,33	13,33	20,83
6,5	2,13	3,08	4,85	7,69	12,31	19,23
7	1,98	2,86	4,50	7,14	11,43	17,86
7,5	1,85	2,67	4,20	6,67	10,67	16,67
8	1,73	2,50	3,94	6,25	10,00	15,63
8,5	1,63	2,35	3,71	5,88	9,41	14,71
9	1,54	2,22	3,50	5,56	8,89	13,89
9,5	1,46	2,11	3,32	5,26	8,42	13,16
10	1,39	2,00	3,15	5,00	8,00	12,50
11	1,26	1,82	2,86	4,55	7,27	11,36
12	1,15	1,67	2,62	4,17	6,67	10,42
12,5	1,11	1,60	2,52	4,00	6,40	10,00
13	1,07	1,54	2,42	3,85	6,15	9,62
14	0,99	1,43	2,25	3,57	5,71	8,93
15	0,92	1,33	2,10	3,33	5,33	8,33
16	0,87	1,25	1,97	3,13	5,00	7,81
17	0,81	1,18	1,85	2,94	4,71	7,35
17,5	0,79	1,14	1,80	2,86	4,57	7,14
18	0,77	1,11	1,75	2,78	4,44	6,94
19	0,73	1,05	1,66	2,63	4,21	6,58
20	0,69	1,00	1,58	2,50	4,00	6,25
22	0,63	0,91	1,43	2,27	3,64	5,68
24	0,58	0,83	1,31	2,08	3,33	5,21
25	0,55	0,80	1,26	2,00	3,20	5,00
26	0,53	0,77	1,21	1,92	3,08	4,81
28	0,49	0,71	1,12	1,79	2,86	4,46
30	0,46	0,67	1,05	1,67	2,67	4,17
33	0,42	0,61	0,95	1,52	2,42	3,79

Elaborada por PINHEIRO (1994)
Diâmetros especificados pela NBR 7480.