

Lucas Mateus Farias de Barros

Projeto de Pesquisa
Cisalhamento em Lajes Espessas

Brasil

2025

Lucas Mateus Farias de Barros

Projeto de Pesquisa

Cisalhamento em Lajes Espessas

Este projeto de pesquisa busca investigar o cisalhamento em lajes com espessura superior a 60 centímetros e o comportamento dessas estruturas. Será proposto uma atualização à ABNT NBR 6118, alinhando-a as normas internacionais e garantindo segurança em projetos estruturais complexos.

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação

Brasil

2025

Sumário

1 Introdução

O **concreto simples** é um material não homogêneo, composto de agregados graúdos, agregados miúdos, cimento como aglomerante e água. É um excelente composto dada a sua alta resistência à compressão, entretanto é extremamente frágil à tração e por isso tem seu emprego limitado. Ao combinar o concreto simples com barras de aço, tem-se o **concreto armado**, que, a partir da interação aço e concreto, permite o ganho de resistência tanto a tração como a compressão, resultando em um comportamento mais dúctil. A introdução prévia de esforços de compressão no concreto, por meio de cordoalhas de aço, altera o estado de tensões e dá origem ao **concreto protendido**, permite a otimização do uso do material, reduzindo fissuração e deformações, além de possibilitar vãos maiores e seções mais esbeltas.([Araújo, 2023](#))

O comportamento do concreto ao cisalhamento é complexo, especialmente nos elementos sem armadura transversal. Ao contrário da flexão que é governada por teorias bem estabelecidas, como Bernoulli-Euler ou Timoshenko, o cisalhamento envolve múltiplos mecanismos de resistência que interagem de maneira não linear. De acordo com diversas teorias para o comportamento do concreto no cisalhamento, como a **Teoria do Campo de Compressão Modificada** (*Modified Compression Field Theory – MCFT*) por [Vecchio e Collins \(1986\)](#) e a **Teoria da Fissura Crítica ao cisalhamento** (*Critical Shear Crack Theory – CSCT*) como descrito por [Muttoni e Simões \(2023\)](#), a resistência ao cisalhamento após a fissuração depende diversas variáveis como descrito por:

- a) a contribuição da zona de concreto comprimido não fissurada;
- b) o efeito de pino da armadura longitudinal (*dowel action*);
- c) o atrito entre as faces da fissura, o engrenamento dos agregados (*aggregate interlock*).
- d) a contribuição da armadura transversal, quando presente.
- e) resistência residual do concreto tracionado, que é desconsiderado na Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT).

Elementos mais espessos desenvolvem fissuras com aberturas maiores, que afetam os mecanismos que dão a resistência ao cisalhamento do concreto, pois a capacidade de transferir tensões de cisalhamento através da interface da fratura diminui. De maneira geral, esse comportamento é chamado de efeito de escala (*size effect*).

A **NBR 6118:2023**, em seu item 19.4 – “*Força cortante em lajes e elementos lineares com $b_w \geq 5d$* ” – estabelece os critérios para verificação da resistência ao cisalhamento

em lajes. Em particular, o item 19.4.1 apresenta os critérios para lajes sem armadura transversal, introduzindo o fator k , definido como:

- a) para elementos em que menos de 50% da armadura inferior está ancorada até o apoio: $k = 1$;
- b) para os demais casos: $k = 1,6 - d$, não menor que 1,0, sendo d expresso em metros.

A origem desse coeficiente está associada a estudos experimentais conduzidos por [Hedman e Losberg \(1975\)](#), que identificaram a redução da resistência nominal ao cisalhamento com o aumento da altura efetiva (d), fenômeno conhecido como *efeito de escala* (*size effect*). Esse comportamento é resultado da natureza quase-frágil do concreto armado, cuja resistência ao cisalhamento diminui em elementos de maior profundidade devido à propagação instável de fissuras diagonais. O fator k tem origem empírica, derivada da análise de dados experimentais, e sua formulação visa capturar essa tendência observada.

Dado essa origem empírica, o fator k não está diretamente relacionado a um modelo mecânico específico, mas sim a uma correlação prática que reflete o comportamento observado em ensaios. Dessa forma, sua aplicação é limitada a lajes com espessura usual, ou seja, inferior a 60 centímetros, conforme orientações do **Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)**.

Atualmente, com o aumento de obras de infraestrutura, como as de linhas de metrô em São Paulo e outras cidades brasileiras, torna-se comum a presença de lajes maciças com espessura superior a 60 centímetros. Como orientado pelo **Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, nesse caso é comum o uso do Eurocode 2, visto que a norma tem incorporado o fator de escala para lajes espessas em sua seção 6.2.2(1), onde o fator k é definido como:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (1.1)$$

onde d é a altura efetiva em milímetros. Esse fator reduz a resistência ao cisalhamento em lajes espessas, refletindo o efeito de escala observado experimentalmente.

O [American Concrete Institute \(2019\)](#), também introduziu o efeito de escala, (λ_s) tal que:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{d}{10}}} \leq 1,0 \quad (1.2)$$

com d em polegadas. Esse fator λ_s pode reduzir a resistência ao cisalhamento em lajes usuais em até 40% e em fundações diretas espessas em até 2,5 vezes. Essa modificação têm gerado debate técnico significativo na comunidade internacional. Pesquisadores como [Marquesi et al. \(2021\)](#) apontam que a calibração deste fator foi realizada com base em um banco de dados que misturou indiscriminadamente ensaios de faixas de lajes e uma grande

quantidade de vigas de pequenas dimensões, resultando em variabilidades muito distintas quando separados.

Esta abordagem metodológica é questionável, pois lajes e vigas apresentam estados limites de últimos com comportamentos estruturais substancialmente diferentes. A inclusão de vigas de pequenas dimensões no banco de dados pode ter introduzido um viés significativo, uma vez que esses elementos não refletem adequadamente o comportamento de lajes espessas.

Diante do exposto, torna-se fundamental investigar o comportamento ao cisalhamento de lajes espessas no contexto da construção brasileira. Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de propor uma atualização para a ABNT NBR 6118 que alinhe a prática nacional às normas internacionais, com o objetivo de garantir a segurança estrutural e promover a otimização de projetos, evitando tanto o risco de rupturas frágeis quanto o superdimensionamento.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Investigar o comportamento ao cisalhamento de lajes espessas com o intuito de propor ajustes à formulação da ABNT NBR 6118, assegurando sua aplicabilidade em estruturas nacionais com elevada complexidade.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Revisão bibliográfica e normativa sobre o cisalhamento em elementos de concreto sem armadura transversal, com ênfase na evolução dos métodos de cálculo e posteriormente nos modelos mecânicos que fundamentam o efeito de escala e outros parâmetros influentes;
- b) A partir de bancos de dados experimentais, especialmente o de [Kuchma *et al.* \(2019\)](#), será avaliado o comportamento e os modos de ruptura em Estados Limites Últimos (ELU);
- c) Avaliar as formulações propostas pela [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2023\)](#), [Comité Européen de Normalisation \(2004\)](#), [American Concrete Institute \(2019\)](#) e [Fédération Internationale du Béton \(2024\)](#) do ponto de vista da resistência de lajes espessas;
- d) Desenvolver e propor uma formulação, para a resistência ao cisalhamento que incorpore de forma explícita e mecanicamente consistente o efeito de escala e outros parâmetros relevantes, visando a potencial inclusão na ABNT NBR 6118;
- e) Calibrar os coeficientes parciais de segurança da formulação proposta utilizando a Teoria da Confiabilidade Estrutural, para garantir um nível de segurança (índice de confiabilidade β) consistente com os alvos normativos para modos de ruína frágeis.

3 Síntese bibliográfica

A resistência ao cisalhamento em elementos de concreto sem armadura transversal é um tema amplamente estudado na engenharia estrutural, dada a sua complexidade e importância para a segurança das estruturas. Diversas normas internacionais, como o Eurocode 2 ([Comité Européen de Normalisation, 2004](#)), o ACI 318 ([American Concrete Institute, 2019](#)) e o fib Model Code 2010 ([Fédération Internationale du Béton, 2024](#)), abordam esse tema com diferentes enfoques e metodologias. A ABNT NBR 6118:2023 ([Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023](#)) também apresenta diretrizes específicas para a verificação do cisalhamento em lajes, mas sua aplicabilidade em lajes espessas tem sido objeto de debate. A literatura técnica destaca a importância do efeito de escala (*size effect*) na resistência ao cisalhamento, especialmente em lajes espessas. Estudos experimentais, como os conduzidos por [Hedman e Losberg \(1975\)](#), evidenciam que a resistência ao cisalhamento diminui com o aumento da espessura da laje, um fenômeno que não é adequadamente capturado pelas fórmulas tradicionais baseadas em dados de lajes esbeltas. Modelos mecânicos, como a Teoria do Campo de Compressão Modificada (*MCFT*) por [Vecchio e Collins \(1986\)](#) e a Teoria da Fissura Crítica ao cisalhamento (*CSCT*) por [Muttoni e Simões \(2023\)](#), oferecem uma compreensão mais profunda dos mecanismos de resistência ao cisalhamento, incorporando fatores como a contribuição do concreto comprimido, o efeito de pino da armadura longitudinal e o atrito entre as faces da fissura. Esses modelos sugerem que a resistência ao cisalhamento é influenciada por múltiplos fatores, incluindo a geometria do elemento, a qualidade do concreto e a presença de armaduras. A revisão das normas internacionais revela uma tendência crescente de incorporar o efeito de escala nas formulações para a resistência ao cisalhamento. O Eurocode 2, por exemplo, introduz um fator de redução baseado na espessura da laje, enquanto o ACI 318 adota uma abordagem semelhante com um fator λ_s . Essas modificações refletem uma tentativa de alinhar as práticas de projeto com os dados experimentais mais recentes. No contexto brasileiro, a aplicação da ABNT NBR 6118:2023 em lajes espessas é limitada pela ausência de uma consideração explícita do efeito de escala. A recomendação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) para o uso do Eurocode 2 em lajes com espessura superior a 60 centímetros destaca a necessidade de uma revisão normativa que atenda às demandas das obras de infraestrutura contemporâneas. Em suma, a síntese bibliográfica aponta para a necessidade de uma investigação aprofundada sobre o comportamento ao cisalhamento de lajes espessas, com o objetivo de propor ajustes à ABNT NBR 6118 que incorporem os avanços teóricos e experimentais recentes, garantindo a segurança e a eficiência dos projetos estruturais no Brasil.

4 Hipótese de Pesquisa

Com base na literatura recente e nas discussões normativas internacionais, levantam as seguintes hipóteses:

4.1 Hipótese 1

A resistência ao cisalhamento de lajes espessas (> 60 cm) sem armadura transversal é superestimada pelas fórmulas atuais da ABNT NBR 6118:2023, devido à ausência da consideração adequada do efeito de escala (size effect), fenômeno já incorporado em algumas normas internacionais. A pesquisa buscará quantificar essa superestimação, comparando os resultados previstos pela norma brasileira com dados experimentais de lajes espessas.

4.2 Hipótese 2

A variabilidade da resistência ao cisalhamento em lajes espessas, medida pelo coeficiente de variação (COV) dos resultados experimentais normalizados por um modelo teórico robusto, apresenta um comportamento distinto daquele observado em elementos esbeltos. A pesquisa investigará se esta variabilidade é maior ou menor, quantificando o impacto do volume de concreto na dispersão estatística da resistência e suas implicações para os coeficientes de segurança.

4.3 Hipótese 3

A calibração da equação e formulação da norma brasileira, considerando bancos de dados de testes experimentais específicos em lajes de grande espessura, evitando o uso desnecessário de armadura transversal.

5 Metodologia

A seguinte metodologia será seguida para a produção da pesquisa.

- a) Estudo detalhado da evolução histórica e das bases conceituais das disposições de cisalhamento nas normas ABNT NBR 6118, Eurocode 2, ACI 318 e fib Model Code 2010;
- b) A análise crítica das teorias, como:
 - Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT);
 - Modelos de Biela e Tirante e Modelos de Dente (Tooth Models);
 - a Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento (CSCT).

que servirão de base para o desenvolvimento de uma formulação mecanicamente consistente para a ABNT NBR 6118, em vez de uma abordagem empírica;

- c) Será utilizado como base principal o banco de dados desenvolvido e analisado pelo Comitê Conjunto ACI–ASCE 445 e pelo Comitê Alemão para Concreto Estrutural (*DAbStb*), que fundamentou as alterações do ACI 318–19, conforme detalhado por [Kuchma et al. \(2019\)](#) que pode ser obtido após demanda ao comitê ACI–DAbStb disponível em (<https://dafstb.de/aci-dafstb.html>). Serão selecionados ensaios com lajes de espessura superior a 60 centímetros para a análise;
- d) Será realizada uma análise estatística completa das razões para cada norma, calculando a média (indicador de acurácia), o desvio padrão e o coeficiente de variação (COV, indicador de precisão);
- e) Desenvolvimento de formulações que possam ser incorporadas à norma brasileira, incluindo a aplicabilidade para elementos estruturais espessos;
- f) A calibração dos coeficientes parciais de segurança da nova proposta será realizada com base na Teoria da Confiabilidade Estrutural. Serão definidos um estado limite de falha e as variáveis aleatórias relevantes, como a resistência do concreto e as cargas atuantes. O objetivo será atingir um índice de confiabilidade (β) alvo, consistente com o que é preconizado para rupturas frágeis, similar ao adotado na ABNT NBR 6118;
- g) Para o caso de uma única formulação para a resistência ao cisalhamento de elementos não armados, a fórmula será calibrada para não modificar o resultado atual para lajes esbeltas, dado o ótimo desempenho histórico da [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2023\)](#) nesse campo;

- h) Avaliar, a partir dos dados de variabilidade da resistência, espessura, posição do aço no concreto, entre outros, se a formulação obtida se mantém segura para a variabilidade presente na aplicação real desse tipo de estrutura.

Para a execução deste projeto de pesquisa, serão necessárias as seguintes infraestruturas:

- a) Acesso a bases de dados acadêmicas e técnicas, como Scopus, Web of Science, Google Scholar, entre outras, para a revisão bibliográfica;
- b) Software estatísticos ou linguagens de programação adequadas para a análise dos dados experimentais.

6 Cronograma

O cronograma previsto para a execução do projeto de pesquisa é apresentado a seguir:

- a) Mês 1 à Mês 4 do projeto – Revisão bibliográfica;
- b) Mês 4 à Mês 8 do projeto – Análise do banco de dados;
- c) Mês 8 à Mês 12 do projeto – Preparação da documentação necessária para a qualificação;
- d) Mês 12 à Mês 14 do projeto – Análise inicial da formulação proposta;
- e) Mês 14 à Mês 18 do projeto – Verificação da formulação proposta;
- f) Mês 18 à Mês 20 do projeto – Análise do índice de confiabilidade β para ruptura frágeis e calibração dos coeficientes;
- g) Mês 20 à Mês 24 do projeto – Produção da dissertação.

straight on right=1 on left=0 [/pgfgantt/link] ([xshift=-0.2pt],) – (,);

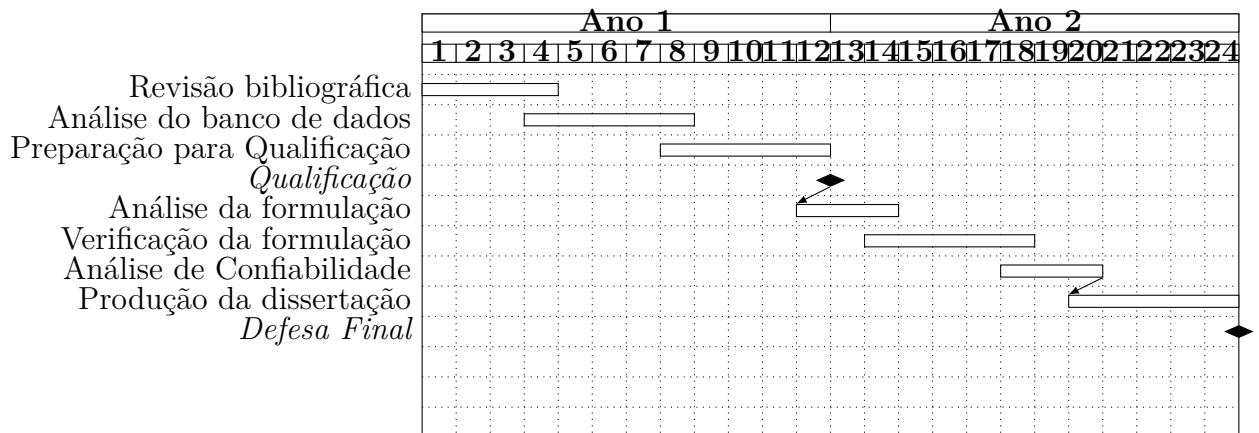


Figura 1 – Gráfico de Gantt representando o cronograma de atividades da pesquisa.

7 Resultados Esperados

Essa pesquisa busca abordar uma lacuna crítica na engenharia estrutural brasileira: a verificação do cisalhamento em lajes espessas (≥ 60 centímetros). Conforme discutido anteriormente, a extrapolação das fórmulas da ABNT NBR 6118:2023 para tais estruturas pode comprometer a segurança, uma preocupação crescente diante da execução de obras de infraestrutura cada vez mais complexas, como as das linhas de metrô de São Paulo. A necessidade de alinhar a prática nacional às normas internacionais, que já incorporam o efeito de escala, justifica a presente investigação.

Ao final desta pesquisa, espera-se obter como principal resultado uma formulação para a resistência ao cisalhamento em lajes espessas, que possa ser incorporada na ABNT NBR 6118 em próximas revisões. Tal contribuição busca impactar a engenharia brasileira em três frentes:

- a) Atualização normativa, alinhando a norma brasileira com o estado da arte internacional;
- b) Fornecimento de uma ferramenta de verificação mais segura e precisa para engenheiros projetistas, evitando tanto o superdimensionamento custoso quanto o risco de rupturas frágeis;
- c) Aprofundamento do entendimento sobre o efeito de escala e o comportamento de estruturas de concreto em situações não cobertas adequadamente pela literatura técnica nacional.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, 2019.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Dunas, 2023. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: [s. n.], 2023.

BARROS, Vinicius Paes de; BECK, André Teófilo; BITTENCOURT, Túlio Nogueira. Cisalhamento unidirecional de peças em concreto armado sem armadura transversal: análise do erro de modelo da NBR6118:2014. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 14, n. 1, e14112, 2021. DOI: [10.1590/S1983-41952021000100012](https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000100012).

CLADERA, A.; MARÍ, A.; BAIRÁN, J. M.; RIBAS, C.; OLLER, E.; DUARTE, N. The compression chord capacity model for the shear design and assessment of reinforced and prestressed concrete beams. **Structural Concrete**, Berlin, v. 17, n. 6, p. 1017–1032, 2016.

COLLINS, M. P.; BENTZ, E. C.; POLAK, M. A.; VECCHIO, F. J. An adequate theory for the shear strength of reinforced concrete structures. **Magazine of Concrete Research**, v. 60, n. 9, p. 635–650, 2008.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels: [s. n.], 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Model Code for Concrete Structures 2020**. Lausanne: fib - International Federation for Structural Concrete, 2024. ISBN 978-2-88394-175-5.

HEDMAN, G.; LOSBERG, A. **Shear strength of reinforced concrete slabs**. Gothenburg, Sweden, 1975.

KUCHMA, Daniel A.; WEI, Sihang; SANDERS, David H.; BELARBI, Abdeldjelil; NOVAK, Lawrence C. Development of the One-Way Shear Design Provisions of ACI 318-19 for Reinforced Concrete. **ACI Structural Journal**, Farmington Hills, v. 116, n. 4, p. 285–295, jul. 2019. DOI: [10.14359/51716739](https://doi.org/10.14359/51716739).

LEONHARDT, Fritz. **On the reduction of shear reinforcement as derived from the Stuttgart shear tests 1961-1963**. Artigo apresentado no 7º congresso do IABSE. 1964. Disponível em: <http://retro.seals.ch/digbib/view?pid=bse-cr-001:1964:7::1948>. Acesso em: 15 fev. 2025.

MARQUESI, Matheus; STUCCHI, Fernando; CARVALHO, Matheus; SILVA, Carolina. One way shear and punching shear without stirrups. *In: ANAIS do fib Symposium*. Lisboa: [s. n.], 2021.

MAUÉS, F. P.; ANDRADE, L. N.; FERREIRA, M. P. Análise de uma metodologia de modelagem proposta para lajes lisas de concreto armado sem e com armadura de cisalhamento. *In: ANAIS do XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*. Foz do Iguaçu: ABMEC, 2020. Online.

MÖRSCH, Emil. **Concrete-Steel Construction (Der Eisenbetonbau)**. 3. ed. New York: The Engineering News Publishing Company, 1909. Tradução de E. P. Goodrich. Edição revisada e aumentada da edição alemã de 1908.

MUTTONI, A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. **ACI Structural Journal**, Farmington Hills, v. 105, n. 4, p. 440–450, 2008.

MUTTONI, Aurelio; SIMÕES, João Tiago. **Shear and punching shear according to the Critical Shear Crack Theory: background, recent developments and integration in codes**. v. 16. [S. l.]: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2023. DOI: [10.1590/S1983-41952023000300002](https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000300002).

RINKE, Mario. Institutions Within a New Material: Early Reinforced Concrete in Switzerland and Germany. *In: MASCARENHAS-MATEUS, João (ed.). Changing Cultures: European Perspectives on the History of Portland Cement and Reinforced Concrete, 19th and 20th Centuries*. London: CRC Press, 2023. cap. 1.4, p. 109–126. DOI: [10.1201/9781003368656](https://doi.org/10.1201/9781003368656).

RITTER, Wilhelm. **Die Bauweise Hennebique**. Zürich: Zürcher & Furrer, 1899. Sonder-Abdruck aus der "Schweizerischen Bauzeitung" 1899. Band XXXIII Nr. 5, 6 und 7.

ROMBACH, G. A.; KOHL, M.; NGHIEP, V. H. Shear Design of Concrete Members without Shear Reinforcement—A Solved Problem? **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 14, p. 134–140, 2011.

VECCHIO, F. J.; COLLINS, M. P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. **ACI Journal Proceedings**, Farmington Hills, v. 83, n. 2, p. 219–231, mar. 1986.