

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5070>

ARTIGO ORIGINAL

Estudo comparativo sobre o projeto estrutural de lajes nervuradas e maciças em concreto armado na situação de incêndio

RESUMO: Quando comparadas às lajes maciças de concreto armado, as lajes nervuradas são projetadas de forma a aproveitar de maneira mais eficiente as qualidades existentes nos materiais que as constituem. Porém, a obrigatoriedade de verificação das estruturas em concreto armado para a situação de incêndio tende a diminuir essa vantagem econômica. Assim, este trabalho analisou o projeto de lajes maciças e nervuradas em concreto armado na situação de incêndio através das premissas das normas brasileiras. O dimensionamento das estruturas para diferentes imposições de projeto foi realizado com o auxílio do software CAD/TQS e, através de processo iterativo, foram obtidas as dimensões das lajes de forma que as flechas adquiridas fossem o mais próximo possível das flechas máximas de cada vão. As imposições de projeto foram método construtivo, vãos, classe de agressividade ambiental, resistência do concreto e tempo requerido de resistência ao fogo, totalizando 256 lajes calculadas. Após o dimensionamento e através de tabelas e figuras gerados nos softwares Excel e Origin, realizou-se um estudo comparativo entre as lajes maciças e nervuradas, podendo-se concluir que as lajes nervuradas ainda são mais econômicas que as maciças, mesmo considerando a situação de incêndio.

Palavras-chave: análise estrutural; dimensionamento estrutural; TRRF.

A comparative study between the structural design of solid and ribbed slabs in reinforced concrete in the fire situation

ABSTRACT: When compared to solid reinforced concrete slabs, ribbed slabs are designed in order to take better advantage of the qualities inherent to their materials. However, the mandatory verification of reinforced concrete structures for the fire situation tends to diminish this economic advantage. Thus, this study analyzed the design of solid and ribbed slabs in reinforced concrete in the

SUBMETIDO 25/11/2020


APROVADO 20/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/08/2021


PUBLICADO 30/06/2022

EDITOR ASSOCIADO

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

 Guilherme Riquena de Oliveira ^[1]

 Felipe Nascimento Arroyo ^[2]

 Fernando Menezes de Almeida Filho ^[3]

 André Luis Christoforo ^[4]

[1] guilhermeriquena@gmail.com

[2] lpe.arroyo@gmail.com

[3] almeidafilho@ufscar.br

[4] christoforoal@yahoo.com.br

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
Brasil.

fire situation through the premises of Brazilian standards. Structural dimensioning for different design requirements was carried out by using CAD/TQS software. The dimensions of the slabs were obtained through an iterative process so that the obtained arrows were as close as possible to the maximum arrows of each span. Constructive method, spans, class of environmental aggressiveness, concrete resistance and fire resistance time were the design requirements in a total of 256 calculated slabs. Using tables and figures generated in Excel and Origin software, a comparative study was carried out between the solid and ribbed slabs. The ribbed slabs were concluded to still be more economical than the solid ones, even considering the fire situation.

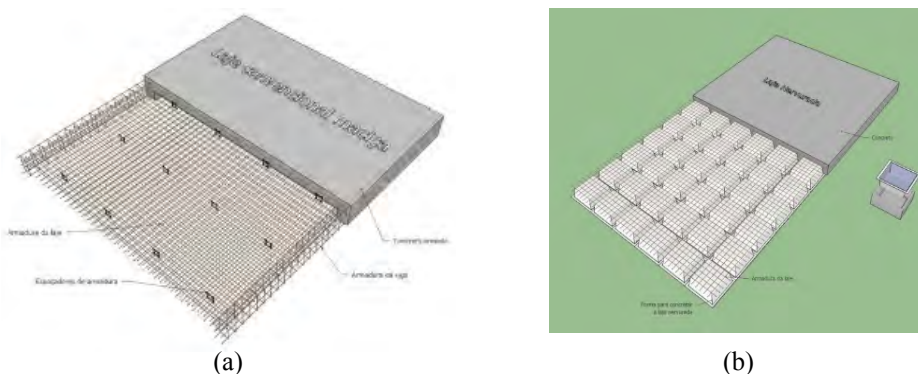
Keywords: : structural analysis; structural dimensioning; fire resistance time.

1 Introdução

A busca por novas tecnologias e métodos construtivos na construção civil é movida, em grande parte, pelos interesses em reduzir os insumos empregados nas construções, como tempo e dinheiro, e pelo interesse em melhorar as condições de ocupação das construções, visando aumentar o conforto e a segurança de seus ocupantes (PILLON *et al.*, 2018).

Ao projetar uma estrutura, seja ela em concreto armado, estrutura metálica, pré-moldada, ou pertencente a qualquer outro método construtivo, deve-se sempre ter em mente a disponibilidade de opções para solucionar as diferentes exigências de projeto (MASCARENHAS; CHRISTOFORO; CARVALHO, 2020). Ao discutir a escolha do método construtivo de lajes, a laje maciça (Figura 1a) geralmente se faz presente por ser uma estrutura simples de ser executada. Por outro lado, a utilização de lajes nervuradas (Figura 1b) ganhou seu lugar no mercado da construção civil, por reduzir o consumo dos insumos (concreto, aço e fôrma) na obra, assim como o peso próprio da estrutura final (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2019).

Figura 1 ►
Laje maciça (a) e laje nervurada (b)
Fonte: adaptado de Vasconcellos (2012a, 2012b)



Contudo, além de considerar o desempenho das estruturas, deve-se também considerar a segurança ao fazer uso dessas edificações, como por exemplo a segurança em casos de incêndio. Uma estrutura é considerada segura (resistente) quanto ao fogo quando suporta essa ação até que haja a evacuação total da edificação antes do colapso (SILVA, 2016).

Importante destacar que o incêndio, quando atinge toda a edificação, promove gradativamente a perda de resistência dos elementos estruturais, seja essa estrutura em concreto, aço ou madeira. Em condições críticas, pode ocorrer o colapso da estrutura.

Uma das maneiras de evitar ou prorrogar tal colapso em estruturas de concreto é aumentar as dimensões dos elementos estruturais, o cobrimento ou a resistência característica do concreto (BERTO, 2019). Essa verificação à situação de incêndio tem por objetivo primário minimizar os riscos à vida; como consequência, conduz-se à redução da perda patrimonial.

Em vista disso, este artigo tem como objetivo analisar a resistência ao fogo de lajes maciças e treliçadas, ambas bastante utilizadas em construções brasileiras. Para isso, 256 lajes foram calculadas com o auxílio do software CAD/TQS, adotando como variação o método construtivo, vãos, classe de agressividade ambiental, resistência do concreto e tempo requerido de resistência ao fogo.

2 Material e métodos

Para comparar o consumo de materiais utilizados nos dois diferentes métodos construtivos de lajes, foram criados modelos com características diferentes entre eles.

Devido à utilização do software CAD/TQS, foi possível estudar um grande número de casos, considerando a variação de vãos, métodos construtivos, classes de agressividade e tempos requeridos de resistência ao fogo, totalizando 256 lajes estudadas.

Para a comparação dos dados obtidos, foram gerados tabelas e gráficos com o auxílio do software Excel.

A seguir é apresentada a metodologia empregada para obtenção dos dados referentes aos dois tipos de laje estudados. Primeiramente, definiu-se as características adotadas para os diferentes modelos em concreto armado na situação de incêndio:

- Método construtivo: alternou-se o método construtivo entre lajes nervuradas com utilização de poliestireno expandido (EPS) como material inerte e lajes maciças, ambas em concreto armado;
- Vão livre: foram dimensionadas lajes com vãos variando de 3 a 10 metros;
- Classe de agressividade ambiental (CAA): foram criados modelos com as 4 diferentes classes de agressividade – CAA I, CAA II, CAA III e CAA IV;
- Classe de resistência do concreto: as classes de concreto C20, C25, C30 e C40 foram adotadas, seguindo a recomendação do item 2.1.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica a utilização de diferentes classes mínimas de concreto de acordo com a agressividade ambiental do local da construção; e
- Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF): foram adotados tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos, buscando estudar o efeito do dimensionamento em situação de incêndio para diferentes alturas de construção.

Tendo definido os casos, foram gerados os diferentes modelos no software CAD/TQS, cuja licença estudantil foi disponibilizada pela empresa responsável. Nessa etapa, configurou-se o software de forma a dimensionar as estruturas para as diferentes situações de agressividade ambiental e diferentes alturas de projeto (até 12 metros).

Através de um processo iterativo, dimensionou-se cada laje fixando-se o deslocamento vertical máximo como referência a ser alcançada, mas não ultrapassada, buscando utilizar da forma mais eficiente possível o momento de inércia de cada laje. Para maior precisão na determinação das flechas, foi utilizada a análise por grelha não linear.

Após o dimensionamento das estruturas, fez-se um levantamento das quantidades empregadas de material para as diferentes lajes nas diversas situações estudadas. O

quantitativo de aço foi obtido através do dimensionamento e detalhamento de armaduras positivas gerado pelo próprio CAD/TQS. O levantamento da volumetria de concreto utilizada foi realizado com o auxílio de planilhas programadas no Excel.

Obtidos os dados referentes aos diferentes casos, foi possível a construção de tabelas e gráficos através do software Excel, de forma a possibilitar um estudo comparativo entre lajes maciças e nervuradas em diferentes situações.

Com a ajuda dos gráficos gerados, discutiu-se a viabilidade das lajes nervuradas e maciças para as diferentes imposições de projeto.

2.1 Planta baixa e geometria dos elementos

Utilizou-se lajes de dimensões quadradas, ou seja, a relação entre os vãos l_x/l_y esteve sempre abaixo de 1,5. Assim, todas as lajes foram armadas em duas direções.

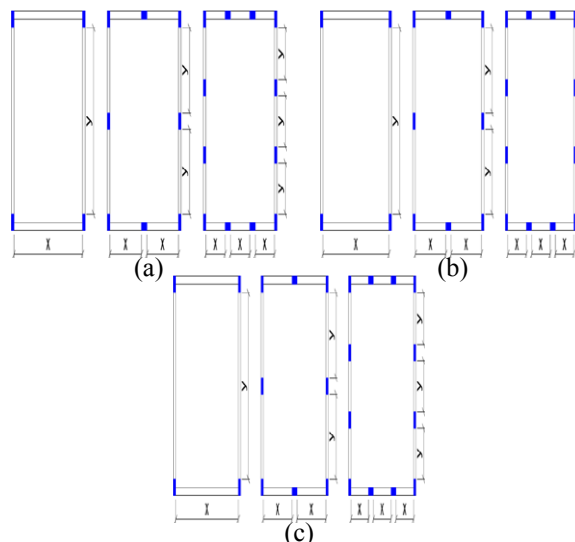
Os vãos livres (distância entre as faces internas das vigas) considerados neste estudo foram de 3 a 10 metros (valores inteiros), ou seja, foram estudadas lajes para 8 diferentes vãos.

Para as situações de vínculo das lajes, foi considerado que todas elas estão simplesmente apoiadas em todas as vigas de contorno.

Dessa maneira, este trabalho buscou realizar um estudo comparativo para um grande número de casos, padronizando as dimensões e disposição de alguns elementos estruturais, tais como vigas e pilares, de forma a deixar a comparação entre os diferentes tipos de lajes mais simples.

As vigas e pilares foram todos de dimensão 19 cm x 40 cm. A disposição dos pilares na estrutura foi feita de maneira a reduzir as deformações verticais das vigas. A Figura 2 exibe a disposição de pilares adotada. Vale destacar que neste trabalho não foi estudado o dimensionamento dos pilares e vigas na situação de incêndio.

Figura 2 ►
Modelo de disposição de pilares para diferentes vãos: de 3 a 4 metros (a), de 5 a 8 metros (b) e de 9 a 10 metros (c).
Fonte: dados da pesquisa



Na Figura 2, os valores de “x” e “y” representam a distância entre pilares em cada situação. A Tabela 1 exibe as distâncias adotadas entre pilares.

Tabela 1 ►

Distância entre pilares para os diferentes vãos adotados.

Fonte: dados da pesquisa

Vãos (m)	Modelo	x (m)	y (m)
3	(a)	3,00	2,58
4	(a)	4,00	3,58
5	(b)	2,30	2,09
6	(b)	2,80	2,59
7	(b)	3,30	3,09
8	(b)	3,80	3,59
9	(c)	2,73	2,59
10	(c)	3,07	2,93

No pré-dimensionamento das lajes maciças, foi utilizada a relação vista em Carvalho e Figueiredo (2019), de vão/40 para a espessura das lajes.

Quanto às lajes nervuradas, utilizou-se a relação vão/30 para a altura combinada de capa e nervuras. A distância entre eixos das nervuras foi mantida abaixo dos 65 cm, pois, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, sendo possível utilizar apenas armadura de distribuição para a capa das lajes nervuradas.

2.2 Entrada de dados no software

Ao dimensionar estruturas no software CAD/TQS, tem-se a possibilidade de alterar diversas características da edificação a ser projetada. Abaixo são comentadas as escolhas adotadas para as diferentes imposições de projeto para os elementos de laje dimensionados.

Como modelo estrutural do edifício, foi escolhido o modelo IV (modelo de vigas e pilares, flexibilizando conforme critérios), significando que, nas lajes, somente os efeitos gerados pelas ações verticais serão calculados.

Na escolha do concreto, utilizou-se a Tabela 2. Para as diferentes classes de agressividade ambiental (I a IV), adotou-se os valores mínimos de relação água/cimento (0,65; 0,60; 0,55 e 0,45 para as classes I, II, III e IV, respectivamente) e classe do concreto (20, 25, 30 e 40 MPa para as classes I, II, III e IV, respectivamente). Já para o aço, de forma geral, foi escolhido o CA50 com tensão de escoamento de 500 MPa.

Tabela 2 ►

Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 18)

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto	≥20	≥25	≥30	≥40

Como dito anteriormente, foram utilizados blocos de EPS como material inerte para a montagem das lajes nervuradas, e, por conta do baixo peso específico desses blocos em comparação ao do concreto armado, optou-se por não considerar a influência dos blocos de EPS nas ações de projeto.

Adotou-se neste trabalho o método tabular para o dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Assim, para a escolha do cobrimento a ser utilizado, confrontou-se as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 15200 (ABNT, 2012), de forma a considerar caso a caso qual cobrimento adotar (para as lajes). A Tabela 3 apresenta o cobrimento nominal mínimo exigido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 3 ▶

Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal mínimo em milímetros.

Fonte: adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 18)

Elemento	CAA			
	I	II	III	IV
Laje	20	25	35	45
Viga/pilar	25	30	40	50

No método tabular, basta que as dimensões mínimas dos elementos estruturais dimensionados sejam superiores àquelas das Tabelas 4 a 12 da NBR 15200 (ABNT, 2012), lembrando que o dimensionamento previsto deve também respeitar a NBR 6118 (ABNT, 2014) (Tabela 3).

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), as dimensões mínimas são, normalmente, a largura das vigas, a espessura das lajes, as dimensões das seções transversais de pilares e tirantes e, principalmente, a distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face do concreto exposta ao fogo (c_1).

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), as Tabelas de 6 a 10 fornecem as espessuras mínimas para lajes e capas de lajes nervuradas com aquecimento na face inferior, bem como o valor de c_1 das armaduras inferiores, em função dos TRRFs. Os valores de “ h ” indicados são os mínimos para garantir a função corta-fogo.

Para este trabalho, considerou-se o uso de lajes maciças e nervuradas simplesmente apoiadas. Dessa forma, as Tabelas 4 e 5 tratam das lajes maciças e nervuradas simplesmente apoiadas, respectivamente.

Tabela 4 ▶

Dimensões mínimas para lajes maciças simplesmente apoiadas.

Fonte: adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012, p. 17)

TRRF min	h [mm]	c_1 [mm]		
		Armada em duas direções		Armada em uma direção
		$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 \leq l_y/l_x \leq 2$	$l_y/l_x > 2$
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40

Tabela 5 ▶

Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas.

Fonte: adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012, p. 19)

TRRF min	Nervuras Combinações de b_{min}/c_1 [mm/mm]			Capa h/c_1 [mm/mm]
	1	2	3	
30	80/15	-	-	60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20

Vale observar que, nesta pesquisa, não se considerou cobertura mínimo para armadura de distribuição.

Nas cargas e ações, para adotar os ponderadores e fatores de redução para os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), utilizou-se as Tabelas 11.1 e 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 65), considerando combinação de ação normal em local com baixa concentração de pessoas. Dessa forma, adotou-se como ponderador de ações (γ_f) o valor de 1,4 e, para os fatores de redução ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , os valores 0,5; 0,4 e 0,3, respectivamente.

Para as ações permanentes, foram considerados o peso específico do concreto armado como sendo de 25 kN/m³ e, como sobrecarga permanente (g_2 – revestimentos superior e inferior da laje), o valor de 1,0 kN/m².

Com relação às ações variáveis (q), considerou-se o valor indicado pela NBR 6120 (ABNT, 2019) para lajes de uso residencial, ou seja, 1,5 kN/m².

2.3 Critérios de projeto

Para facilitar a replicação dos resultados aqui obtidos, optou-se por utilizar os valores “default” da versão 22 do software CAD/TQS. Isso foi possível porque o programa já adota valores indicados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para o dimensionamento das estruturas em concreto armado. O mesmo é válido para a verificação de estruturas em situação de incêndio, que se apoia no método tabular segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012).

2.4 Grelha não linear

Como dito anteriormente, as lajes foram consideradas como grelha não linear. Segundo o manual do TQS, “A análise por grelha não linear de um pavimento permite que as flechas e fissuras das lajes e vigas sejam analisadas com um maior rigor, num processo iterativo e incremental” (TQS INFORMÁTICA, 2014, p. 355).

Foi nessa etapa que se comparou as flechas obtidas com as máximas indicadas pela relação $l/250$. Ao comparar as flechas obtidas e as flechas limites, buscou-se que os elementos tivessem o máximo de deformação sem que se ultrapassasse os limites, fazendo com que os elementos utilizassem o máximo possível de seu momento de inércia.

3 Resultados e discussão

3.1 Variação do peso próprio das lajes

A relação de peso próprio das lajes para diferentes vãos é um indicativo muito interessante, pois pode ser fator crucial na escolha da melhor solução estrutural, já que o peso próprio das lajes tem impacto direto no dimensionamento de vigas, que, por sua vez, afetam no dimensionamento dos pilares, resultando na influência no dimensionamento das fundações.

As Figuras de 3 a 6 foram construídas de forma a demonstrar as variações mínimas e máximas de peso próprio das lajes para diferentes CAAs. Para melhorar a visualização dessas variações, foram adotadas apenas as curvas referentes aos TRRFs de 30 e 120 minutos, pois assim é possível contemplar os valores mínimos e máximos obtidos para cada vão.

Figura 3 ▶

Varição do peso próprio das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-I.
 Fonte: dados da pesquisa

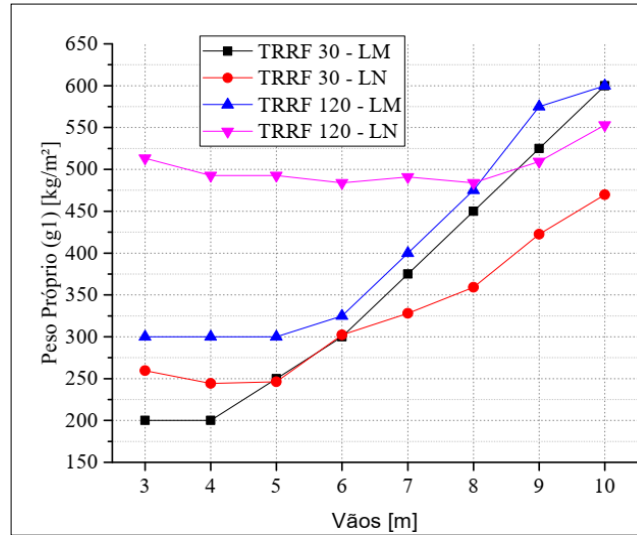


Figura 4 ▶

Varição do peso próprio das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-II.
 Fonte: autoria própria

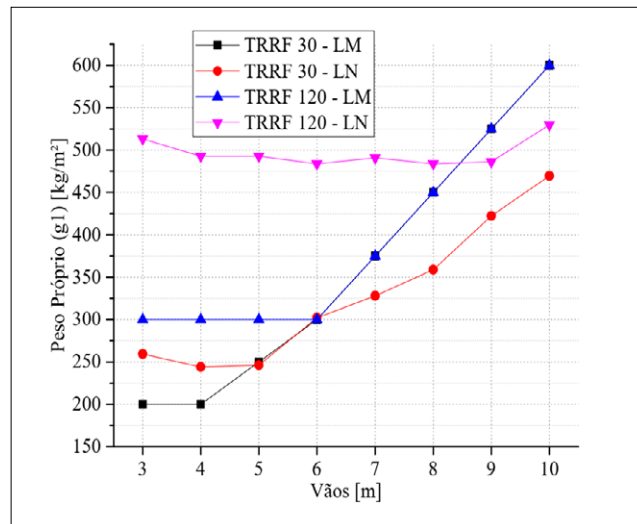


Figura 5 ▶

Varição do peso próprio das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-III.
 Fonte: dados da pesquisa

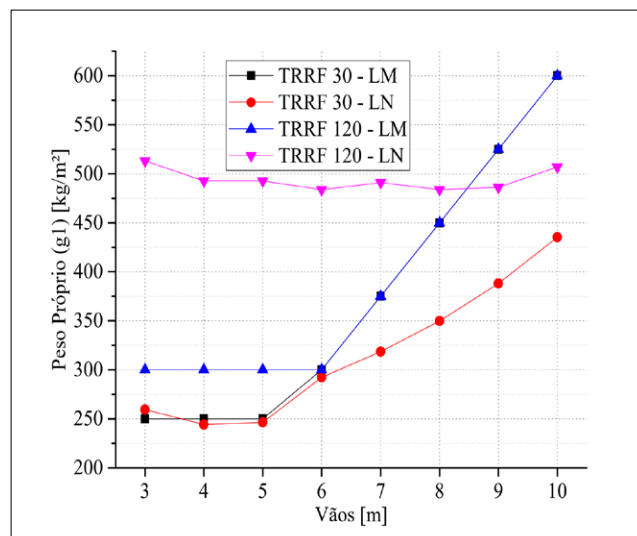
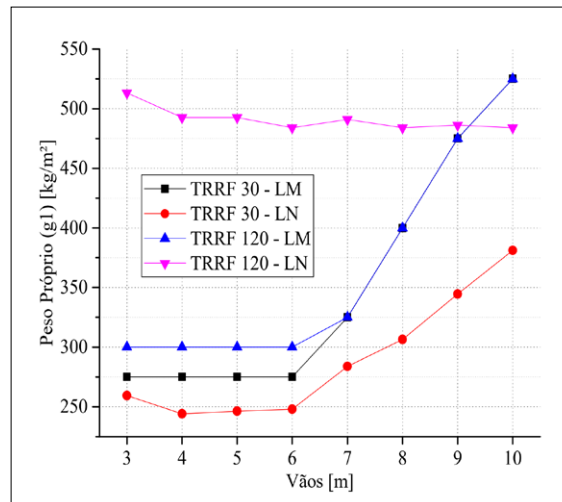


Figura 6 ►

Varição do peso próprio das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-IV.
 Fonte: dados da pesquisa



Para as lajes maciças, pode-se observar duas principais características com relação à variação do peso próprio: a verificação de incêndio tem influência significativa no dimensionamento para vãos de até 6 metros (7 metros no caso com CAA-IV) e, em contrapartida, para vãos maiores, a resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) definida para o projeto tem maior relevância no dimensionamento das lajes.

Para as lajes nervuradas, é possível visualizar a diferença significativa no emprego de concreto para diferentes tempos de incêndio (TRRFs). Além disso, o aumento do f_{ck} utilizado não impacta tanto quanto no caso de lajes maciças. Assim, pode-se entender que, quanto maior o TRRF, menor será a relevância do f_{ck} adotado para o projeto de lajes nervuradas.

3.2 Variação das armaduras

Nas Figuras 7 a 10, estão indicadas as áreas de aço dimensionadas e detalhadas para as diferentes seções de lajes maciças e nervuradas.

Para uma melhor comparação do consumo de aço para os diferentes casos, considerou-se como indicativo a área de armadura dimensionada por seção. No caso das lajes maciças, para o levantamento do quantitativo de aço foi considerado apenas o dimensionamento e detalhamento da armadura positiva. Já quanto às lajes nervuradas, foi considerada a armadura positiva presente em cada nervura, nas abas laterais, e a armadura de distribuição da capa.

Figura 7 ►

Área de armadura da seção das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-I.
 Fonte: dados da pesquisa

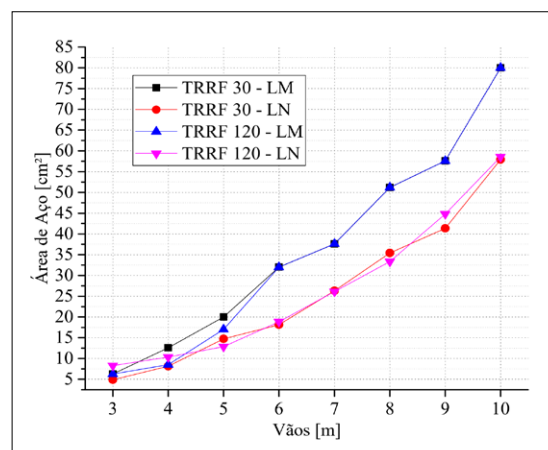


Figura 8 ▶

Área de armadura da seção das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-II.
 Fonte: dados da pesquisa

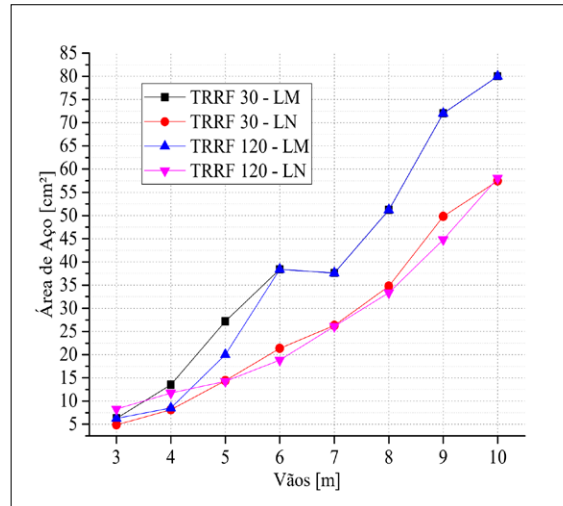


Figura 9 ▶

Área de armadura da seção das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-III.
 Fonte: dados da pesquisa

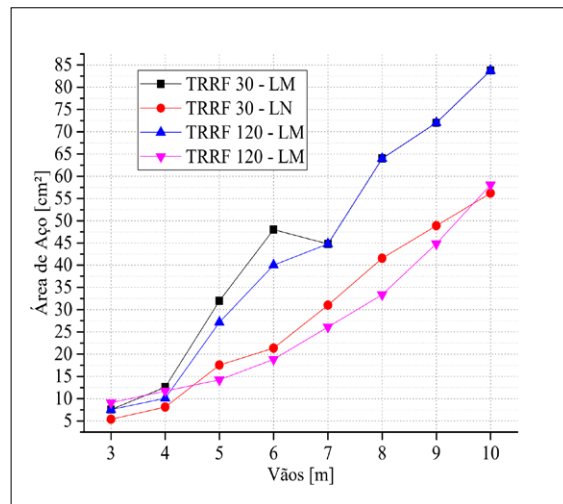
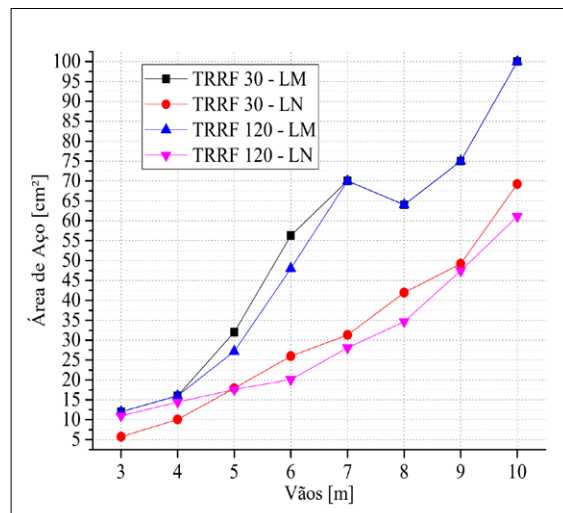


Figura 10 ▶

Área de armadura da seção das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-IV.
 Fonte: dados da pesquisa



A partir dessas figuras, quanto às lajes maciças, é possível observar que a variação do dimensionamento das armaduras está diretamente relacionada à variação da espessura adotada, ou seja, ao adotar maiores fck , foi possível reduzir as espessuras das lajes. Somado a essa situação, o aumento do cobrimento exigido por norma acaba por diminuir o braço de alavanca possuído pelas armaduras positivas, aumentando, assim, a área de armadura passiva necessária para a seção.

Com relação às lajes nervuradas, tem-se que o dimensionamento para o conjunto de armaduras positivas e de distribuição não sofre grande influência para diferentes tempos de incêndio ou para diferentes classes de agressividade ambiental.

Comparativamente, as lajes nervuradas aqui dimensionadas consomem menos aço que as lajes maciças para vãos maiores de 5 metros em todos os casos. Esse efeito é devido ao melhor desempenho na utilização dos materiais, proporcionado pela redução de consumo de concreto para a zona tracionada das lajes, assim como pela criação de nervuras, as quais proporcionam maior braço de alavanca para a armadura positiva, reduzindo o consumo de aço. Além disso, para as capas foi dimensionada armadura mínima de distribuição, por conta da pequena distância imposta entre as nervuras.

3.3 Altura das lajes

Com as Figuras de 11 a 14, representou-se a variação das alturas adotadas para as diferentes lajes. Entende-se como altura das lajes maciças a própria espessura das lajes; com relação às lajes nervuradas, a altura considerada é a soma da altura das nervuras com a espessura da capa. Vale observar que neste trabalho não foi levado em consideração o desempenho de sistemas construtivos segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013).

Figura 11 ►
Altura das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-I.
Fonte: dados da pesquisa

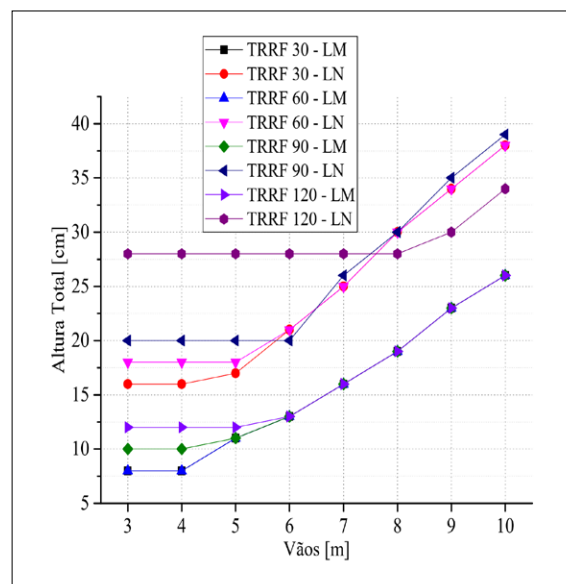


Figura 12 ►

Altura das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-II.
 Fonte: dados da pesquisa

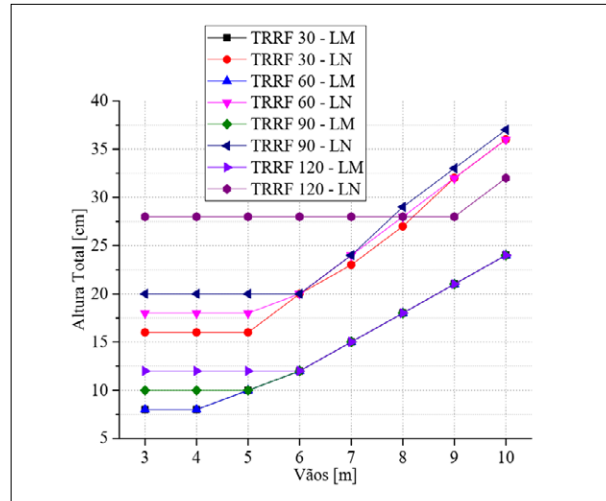


Figura 13 ►

Altura das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-III.
 Fonte: dados da pesquisa

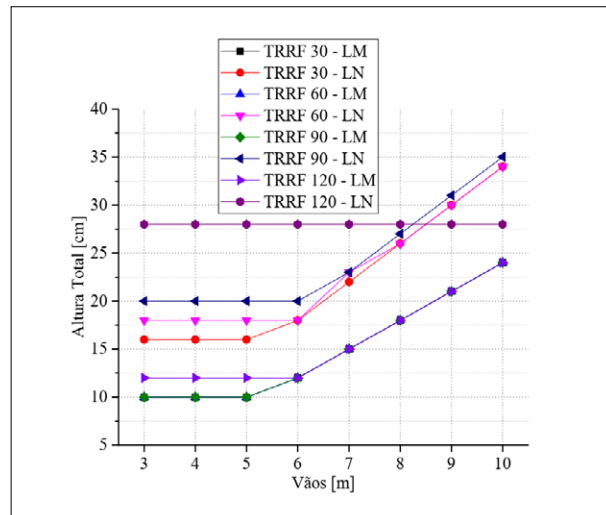
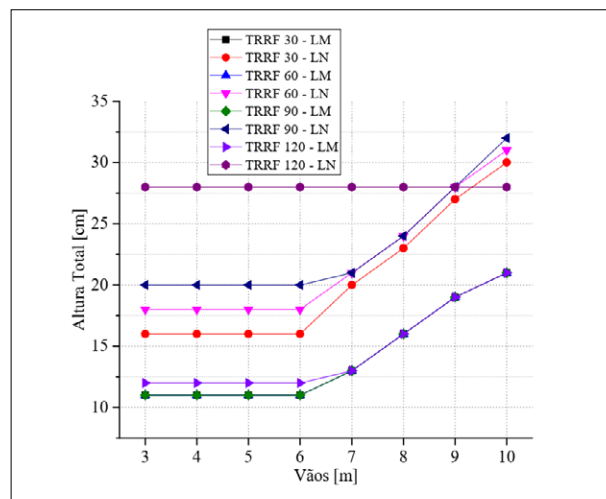


Figura 14 ►

Altura das lajes maciças (LM) e nervuradas (LN) para diferentes TRRFs e CAA-IV.
 Fonte: dados da pesquisa



Com relação à altura das lajes, tem-se que a variação das alturas é muito parecida entre os dois tipos de lajes (proporcionalmente). A exceção ocorre no caso das lajes nervuradas com TRRF de 120 minutos, cuja altura se mantém praticamente uniforme até o vão de 8 metros. No caso das lajes nervuradas para TRRF de 120 minutos e CAA-IV, é possível observar que o dimensionamento geométrico das lajes para todos os vãos foi adotado segundo as dimensões mínimas indicadas pelo método tabular.

3.4 Relação do consumo de concreto entre lajes maciças e nervuradas

A seguir, nas Figuras 15 a 18, são apresentadas as relações de consumo de concreto entre as lajes maciças e nervuradas para os diferentes casos.

Para a construção desses gráficos, dividiu-se o volume de concreto utilizado nas lajes maciças pelo consumo de concreto utilizado nas nervuradas. Em cada gráfico, expôs-se o consumo de concreto para os diferentes tempos de incêndio de forma a melhor visualizar a influência da verificação de incêndio no dimensionamento das lajes.

Vale observar que os valores aqui expostos podem ser lidos da seguinte maneira: valores maiores que 1, maior consumo de concreto pela laje maciça; valores inferiores a 1, a laje nervurada consome mais concreto. Como é possível notar, o consumo de concreto é bem distribuído entre as lajes, mas, para vãos maiores, o consumo da laje maciça tende a ser maior.

Figura 15 ►

Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRFs e CAA-I.
Fonte: dados da pesquisa

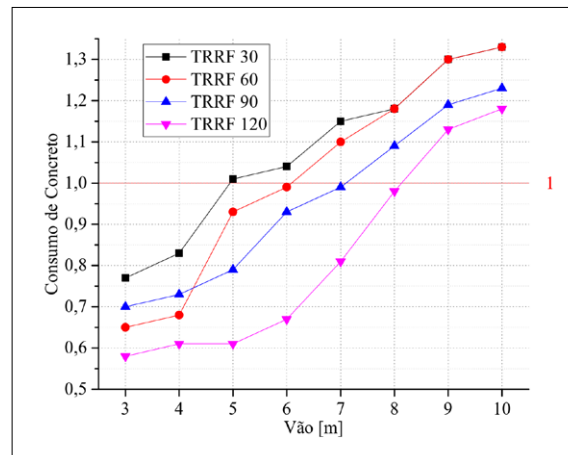


Figura 16 ►

Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRFs e CAA-II.
Fonte: dados da pesquisa

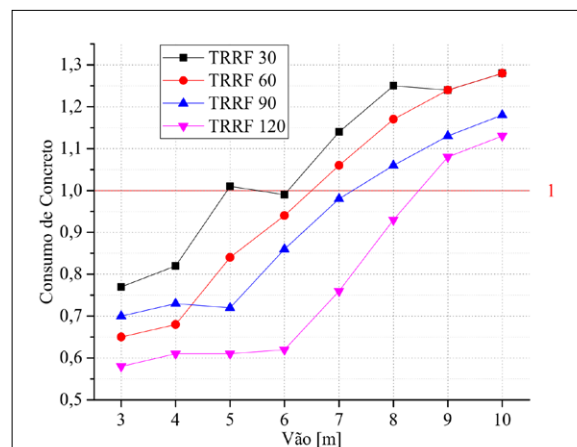


Figura 17 ►

Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRFs e CAA-III.

Fonte: dados da pesquisa

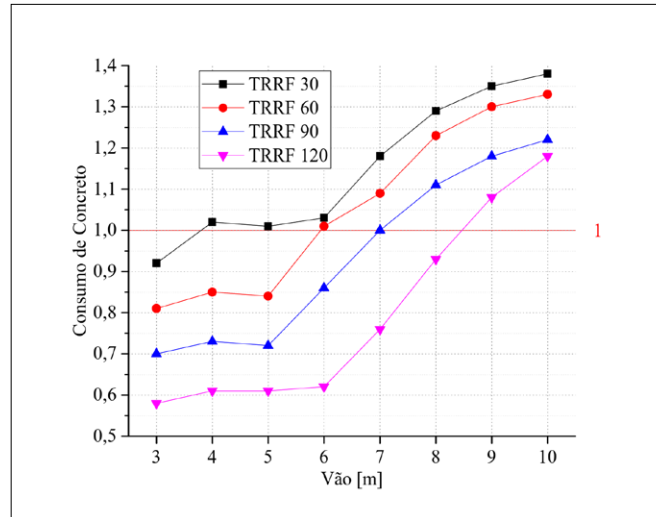
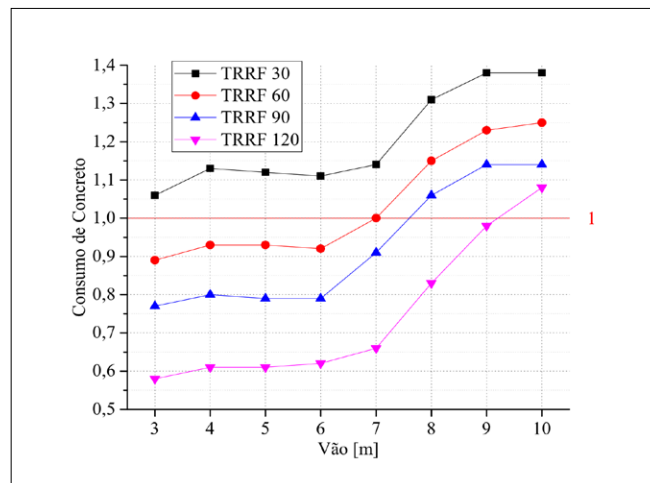


Figura 18 ►

Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRFs e CAA-IV.

Fonte: dados da pesquisa



3.5 Relação do consumo de aço entre lajes maciças e nervuradas

A seguir, nas Figuras 19 a 22, são apresentadas as relações de consumo de aço entre as lajes maciças e nervuradas para os diferentes casos.

Para a construção desses gráficos, dividiu-se a área de aço da armadura utilizada na seção das lajes maciças pela área de aço presente na seção das lajes nervuradas. Em cada gráfico, expôs-se o consumo de aço para os diferentes tempos de incêndio de forma a melhor visualizar a influência da verificação de incêndio no dimensionamento das lajes.

Vale observar que os valores aqui expostos podem ser lidos da seguinte maneira: valores maiores que 1, maior consumo de aço pela laje maciça; valores inferiores a 1, a laje nervurada consome mais aço em sua armadura. Nota-se que o consumo de aço da laje maciça foi superior em praticamente todos os casos. A laje nervurada é mais econômica em relação ao aço.

Figura 19 ►

Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRFs e CAA-I.

Fonte: dados da pesquisa

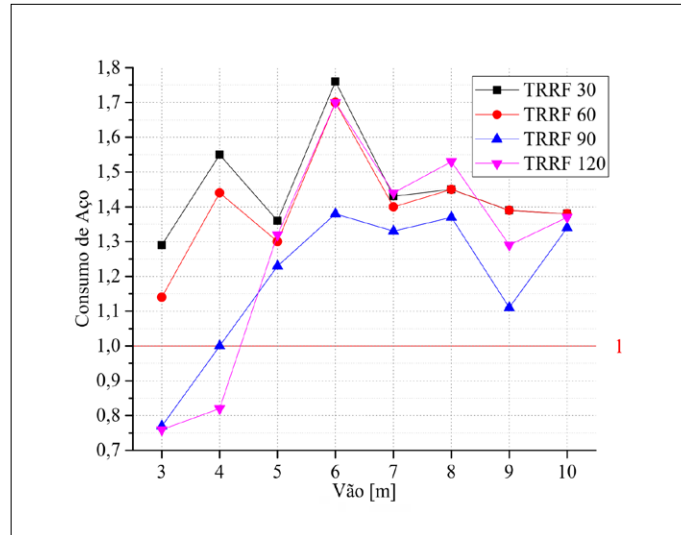


Figura 20 ►

Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRFs e CAA-II.

Fonte: dados da pesquisa

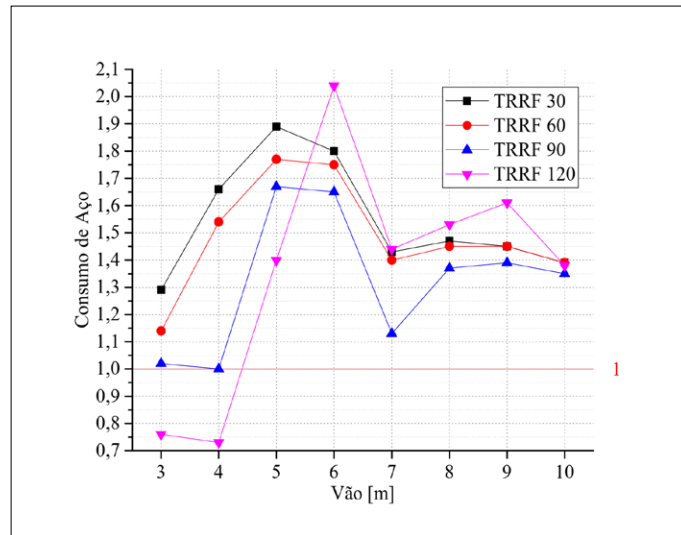


Figura 21 ►

Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRFs e CAA-III.

Fonte: dados da pesquisa

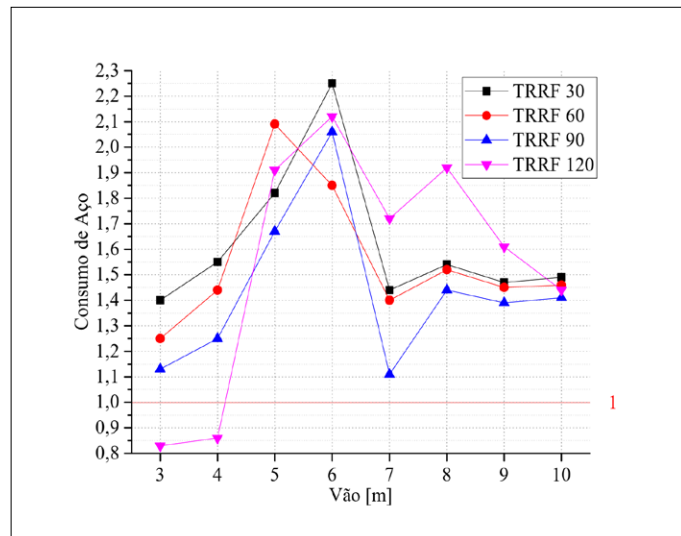
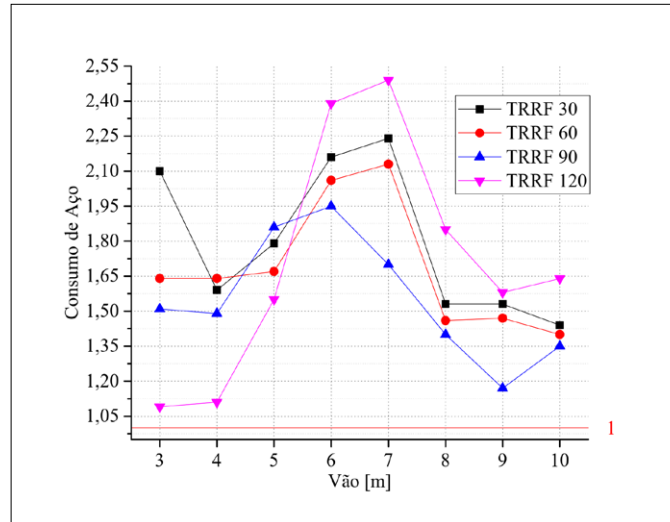


Figura 22 ►

Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRFs e CAA-IV.

Fonte: dados da pesquisa



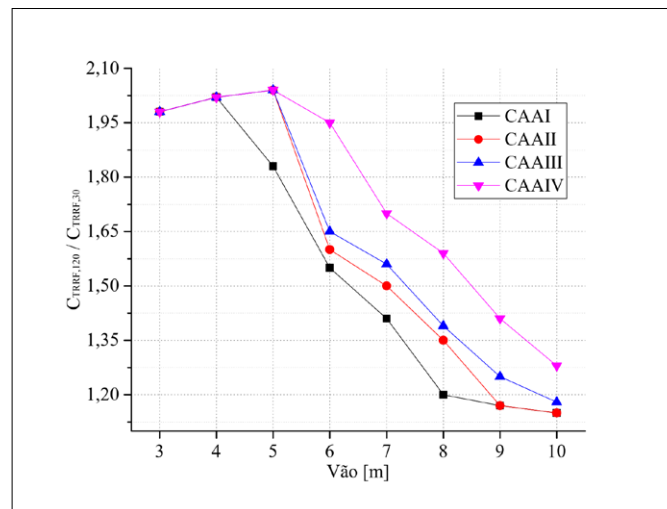
3.6 Influência do TRRF para diferentes CAAs em lajes nervuradas

A Figura 23, na sequência, foi construída com o interesse de visualizar a influência da verificação de incêndio no consumo de concreto das lajes nervuradas em diferentes situações de agressividade ambiental.

Figura 23 ►

Relação do consumo de concreto das lajes nervuradas entre os TRRFs de 120 e 30 minutos para diferentes CAAs.

Fonte: dados da pesquisa



Sua construção foi realizada através da relação de consumo de concreto das lajes nervuradas entre os casos com TRRF de 120 e 30 minutos para diferentes CAAs.

Como comentado anteriormente, adotou-se o mínimo *fck* recomendado para as diferentes classes de agressividade ambiental. Dessa forma, foi possível reduzir o consumo de material conforme o *fck* adotado foi aumentando, isso porque as dimensões das lajes puderam ser diminuídas de forma a não ultrapassar as flechas limites.

Vale lembrar que o método tabular indica dimensões mínimas para as capas das lajes, para as nervuras e também para os cobrimentos mínimos (*cI*) das armaduras, no intuito de garantir o isolamento térmico do elemento estrutural.

Ao analisar a Figura 23, tem-se que a curva CAA-I tem razões de valores inferiores às das outras curvas. Isso ocorre porque para a classe de agressividade ambiental I foi adotado f_{ck} de 20 Mpa, o que faz com que as dimensões obtidas pelo dimensionamento devido aos esforços de projeto sejam mais próximas daquelas exigidas pela verificação da estrutura à situação de incêndio. Já com relação a classes de agressividade mais altas ocorre o inverso, porque, mesmo aumentando o f_{ck} , não é possível aplicar reduções às dimensões das lajes por conta das mínimas dimensões impostas pela verificação à situação de incêndio.

Dessa forma, pode-se entender que a verificação de incêndio tem maior impacto em construções localizadas em áreas com classe de agressividade alta, devido à utilização de concreto de melhor qualidade (f_{ck} maior), o que possibilitaria menores dimensões para os elementos, porém, por conta da verificação à situação de incêndio, isso não pode ser aplicado na construção, o que resulta em maiores quantidades utilizadas de concreto e maior peso próprio das estruturas.

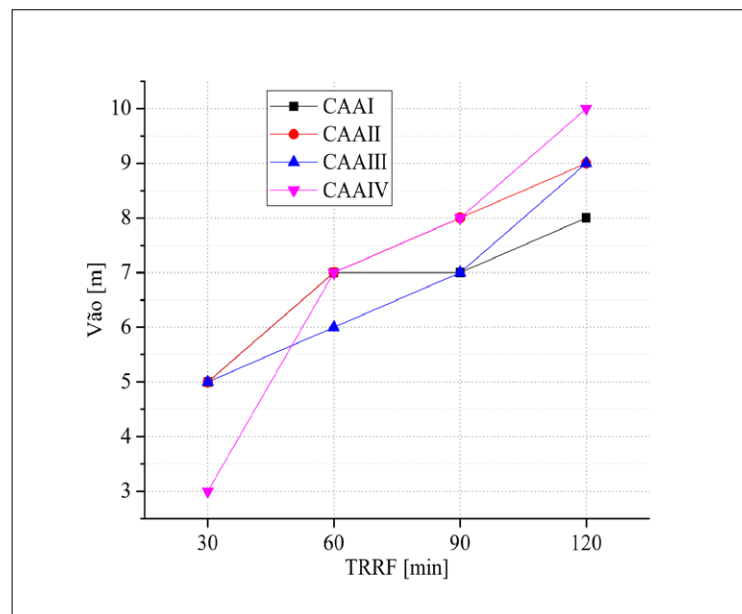
3.7 Vãos nos quais o consumo de concreto das lajes nervuradas passa a ser inferior ao das lajes maciças

Na Figura 24, estão indicados os vãos a partir dos quais as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto do que as lajes maciças para as mesmas imposições de projeto.

Figura 24 ►

Indicação dos vãos nos quais o consumo de concreto das lajes maciças passa a ser inferior ao consumo das lajes nervuradas para diferentes CAAs e tempos de incêndio.

Fonte: dados da pesquisa



Pode-se observar que, conforme o tempo de incêndio aumenta, as lajes nervuradas consomem mais concreto que as lajes maciças para vãos cada vez menores.

Para os tempos de incêndio de 60 e 90 minutos, tem-se que os vãos a partir dos quais as lajes nervuradas consomem menos concreto são os contidos entre 6 e 8 metros para qualquer classe de agressividade ambiental.

Para o tempo de incêndio de 30 minutos, as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto que as lajes maciças para vãos a partir de 5 metros, com exceção do caso com CAA-IV. Isso ocorre porque as dimensões mínimas de cobrimento (devido à

CAA-IV) fazem com que o consumo de concreto das lajes maciças aumente de forma mais significativa que o consumo das lajes nervuradas na mesma situação.

Para o tempo de incêndio de 120 minutos, os vãos nos quais as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto que as lajes maciças são os contidos no intervalo de 8 a 10 metros. Pode-se entender que, para edifícios de ocupação residencial de 10 ou mais andares, as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto para vãos maiores que 8 metros.

4 Conclusões

Com base nas tabelas e gráficos construídos a partir do levantamento de materiais empregados no projeto das diferentes lajes maciças e nervuradas, foi possível observar que, de fato, as lajes nervuradas demandam menor consumo de materiais que as lajes maciças conforme os vãos de projeto aumentam.

No dimensionamento das lajes aqui estudadas, foram levados em consideração os esforços de projeto e a verificação à situação de incêndio. Assim, foram observadas situações cuja verificação à situação de incêndio já proporciona o dimensionamento das lajes com relação aos esforços de projeto. No caso das lajes maciças, isso ocorre para lajes de até 6 metros de vão, com exceção das pertencentes ao grupo de CAA-IV, no qual a verificação à situação de incêndio e o dimensionamento com relação aos esforços divergem para vãos inferiores a 7 metros. Para as lajes nervuradas, tem-se algo parecido para os tempos de incêndio de 30, 60 e 90 minutos, para vãos a partir de 6 metros para as classes de agressividade ambiental I e II, e para vãos a partir de 7 metros para as classes de agressividade ambiental III e IV.

Nos casos com TRRF de 120 minutos, as dimensões mínimas exigidas pela verificação de incêndio são mais rigorosas, o que se faz muito visível para o caso de lajes nervuradas com TRRF de 120 minutos e CAA-IV com f_{ck} de 40 MPa, considerando que as dimensões geométricas das lajes para os diferentes vãos não se alteram (vide Figura 14).

Quanto ao consumo de materiais empregados na construção das diferentes lajes maciças e nervuradas, tem-se que, para as lajes maciças, a quantidade de armadura é geralmente superior ao quantitativo dimensionado para as lajes nervuradas. Isso resulta de duas características das lajes maciças: menor braço de alavanca para as armaduras positivas por conta de menores espessuras de mesa e maior peso próprio por área de laje.

Quanto ao consumo de concreto, as lajes nervuradas tendem a ser mais econômicas que as maciças para vãos a partir de 5 metros para os casos com TRRF de 30 minutos (com exceção das lajes com CAA-IV), e, conforme o tempo de incêndio aumenta, aumenta também o vão para o qual as lajes nervuradas consomem menos concreto. É possível perceber isso nos casos com TRRF de 120 minutos, cujos vãos nos quais as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto que as lajes maciças são os iguais ou superiores a 8 metros.

As lajes nervuradas são, portanto, mais econômicas que as lajes maciças para maiores vãos, porém quanto mais alto o edifício for, maior é o peso próprio da laje obtido ao projetar lajes nervuradas à situação de incêndio, diminuindo, assim, sua vantagem frente às lajes maciças.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019. 62 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012. 50 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

BERTO, A. F. Incêndios em estruturas de concreto: estudos de caso significativos em São Paulo. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p. 132-146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.438> .

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Paulo: EdUFSCar, 2019. 415 p.

MASCARENHAS, F. J. R.; CHRISTOFORO, A. L.; CARVALHO, R. C. A utilização de um software livre para determinação dos esforços internos de cargas móveis em vigas de pontes de concreto. **Holos**, Natal, v. 3, n. 36, p. 1-18, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9466> .

PILLON, F. R.; PINHEIRO, R. V.; VERA, A. V. K.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Technical and economic analysis of structures of buildings in reinforced concrete with ribbed slab from 3 to 21 floors. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 6, p. 142-151, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180806.02> .

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 240 p.

TQS INFORMÁTICA. **Sistema CAD/TQS – Manual do Usuário**. São Paulo, 2014.

VASCONCELLOS, J. Lajes maciças de concreto armado. **Catálogo Digital de Detalhamento da Construção**, 3 abr. 2012a. Disponível em: <https://cddcarqfeevale.wordpress.com/2012/04/03/lajes-macicas-de-concreto-armado/> . Acesso em: 23 nov. 2020.

VASCONCELLOS, J. Lajes nervuradas. **Catálogo Digital de Detalhamento da Construção**, 11 jul. 2012b. Disponível em: <https://cddcarqfeevale.wordpress.com/2012/07/11/lajes-nervuradas/> . Acesso em: 23 nov. 2020.