

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil

GUILHERME RIQUENA DE OLIVEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL DE LAJES  
NERVURADAS E MACIÇAS EM CONCRETO ARMADO NA SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO**

São Carlos, SP

2020

GUILHERME RIQUENA DE OLIVEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE O PROJETO ESTRUTURAL DE LAJES  
NERVURADAS E MACIÇAS EM CONCRETO ARMADO NA SITUAÇÃO DE  
INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de São Carlos, como parte  
dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

Orientador: Fernando Menezes de  
Almeida Filho

São Carlos, SP

2020

Dedico este trabalho a meus amados mãe e pai, por todo o seu amor, carinho e apoio concedidos a mim em cada dia da minha existência. Tenho muito orgulho e sou muito grato por me chamarem de seu filho. Esta conquista é tanto minha quanto de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha namorada Gabrielly, por todos os sorrisos e aprendizados que compartilhamos, por me apoiar e me inspirar na busca pelo melhor.

À minha irmã Beatriz, a quem tanto admiro, por todo carinho, brincadeiras e risadas compartilhadas ao passar dos anos.

Ao Professor Doutor Fernando Menezes de Almeida Filho por seu apoio, atenção e ensinamentos compartilhados.

Aos amigos Paulo e Hellen, cuja amizade e carinho tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao amigo Eric Felipe, pela amizade e companheirismo compartilhados em tantos diagramas de esforços.

## RESUMO

Quando comparadas às lajes maciças de concreto armado, as lajes nervuradas são projetadas de forma a aproveitar de maneira mais eficiente das qualidades existentes nos materiais que as constituem, através do conjunto capa e nervuras, otimiza-se o uso do concreto à compressão e o uso do aço para resistir aos esforços de tração existentes nas lajes. Devido a essa melhor utilização dos materiais empregados na construção das lajes nervuradas, essas lajes são consideradas mais econômicas que as maciças, isso para maiores vãos (a partir de 6 ou 7 metros). Porém a obrigatoriedade de verificação das estruturas em concreto armado para a situação de incêndio tende a diminuir essa vantagem econômica possuída pelas lajes nervuradas, isso porque ao verificar uma laje à situação de incêndio, verifica-se também a capacidade de isolamento térmico deste elemento, de forma a serem exigidas espessuras mínimas de lajes de concreto. Assim, neste trabalho estudou-se o projeto de lajes maciças e nervuradas em concreto armado na situação de incêndio utilizando-se majoritariamente de duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto armado e a ABNT NBR 15200:2012 - Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. O dimensionamento das estruturas para diferentes imposições de projeto foi realizado com auxílio do software CAD/TQS, cuja licença estudantil foi concedida, e através de processo iterativo foram obtidas as dimensões das lajes de forma que as flechas obtidas ficassem o mais próximo possível das flechas máximas de cada vão. Dimensionadas e detalhadas as lajes, foram obtidos os quantitativos de aço e concreto empregados no projeto de cada laje, assim, através das tabelas e gráficos gerados no software Excel, realizou-se um estudo comparativo entre as lajes maciças e nervuradas para diferentes imposições de projeto (vãos, classes de agressividade ambiental e altura da edificação). Realizado o estudo comparativo entre os diferentes métodos construtivos, discutiu-se o emprego das lajes maciças e nervuradas no projeto estrutural.

**Palavras chave:** Projeto. Concreto. Armado. Situação. Incêndio. Laje. Maciça. Nervurada. EPS. Comparação. Tabular.

## **ABSTRACT**

When compared to solid reinforced concrete slabs, the ribbed slabs are designed in order to make the most efficient use of the qualities existing in the materials that constitute them, through the cover and ribs set, the use of concrete is optimized for compression and the use of steel to withstand the tensile stresses existing in the slabs. Due to this better use of the materials used in the construction of the ribbed slabs, these slabs are considered more economical than the solid ones, this for larger spans (from 6 or 7 meters). However, the mandatory verification of reinforced concrete structures for the fire situation tends to diminish this economic advantage possessed by the ribbed slabs, because when checking a slab to the fire situation, the thermal insulation capacity of this element is also verified. so that minimum thicknesses of concrete slabs are required. Thus, in this work we studied the design of solid and ribbed slabs in reinforced concrete in the fire situation using mostly two standards of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), ABNT NBR 6118: 2014 - Design of reinforced concrete structures and ABNT NBR 15200: 2012 - Design of reinforced concrete structures in a fire situation with the tabular method. The dimensioning of the structures for different design impositions was carried out with the aid of the CAD / TQS software, and through the iterative process, the dimensions of the slabs were obtained so that the arrows obtained were as close as possible to the maximum arrows of each span. When the slabs were dimensioned and detailed, the quantities of steel and concrete used in the design of each slab were obtained. Thus, through the tables and graphs generated in the Excel software, a comparative study was carried out between the solid and ribbed slabs for different contour situations. (spans, classes of environmental aggressiveness and height of the building). A comparative study between the different construction methods was carried out, the use of solid and ribbed slabs in the structural design was discussed.

Keywords: Project. Concrete. Reinforced. Situation. Fire. Slab. Massive. Ribbed. EPS. Comparision. Tabular.

# ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

## FIGURAS

Figura 1- Laje nervurada com superfície plana .....	13
Figura 2 - Laje nervura com nervuras aparentes .....	14
Figura 3 - Fluxograma descritivo da metodologia aplicada .....	29
Figura 4 - Disposição de pilares para diferentes vãos .....	23
Figura 5 - Detalhamento de seção transversal de laje maciça .....	27
Figura 6 - Detalhamento de seção transversal de laje nervurada .....	28

## QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental.....	15
Quadro 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto .....	16
Quadro 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	17
Quadro 4 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF).....	19
Quadro 5 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas .....	20
Quadro 6 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas.....	20
Quadro 7 - Distância entre pilares para diferentes vãos .....	23
Quadro 8 - Valores mínimos das cargas verticais para as edificações .....	25
Quadro 9 - Valores obtidos para o caso CAA-II com TRRF de 30 minutos.....	28
Quadro 10 – Dimensionamento das lajes para CAA-I .....	45
Quadro 11 - Dimensionamento das lajes para CAA-II .....	46
Quadro 12 - Dimensionamento das lajes para CAA-III .....	47
Quadro 13 - Dimensionamento das lajes para CAA-IV .....	48

## GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I .....	30
Gráfico 2 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II.....	31
Gráfico 3 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III .....	31
Gráfico 4 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV .....	31
Gráfico 5 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-I.....	32

Gráfico 6 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-II.....	33
Gráfico 7 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-III .....	33
Gráfico 8 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-IV .....	33
Gráfico 9 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I .....	34
Gráfico 10 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II.....	35
Gráfico 11 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III.....	35
Gráfico 12 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV .....	35
Gráfico 13 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I.....	36
Gráfico 14 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II ...	37
Gráfico 15 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III..	37
Gráfico 16 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV..	37
Gráfico 17 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I.....	38
Gráfico 18 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II.....	38
Gráfico 19 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III .....	39
Gráfico 20 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV .....	39
Gráfico 21 - Relação do consumo de concreto das lajes nervuradas entre os TRRF's de 120 e 30 minutos para diferentes CAA's .....	40
Gráfico 22 – Indicação dos vãos onde o consumo de concreto das lajes nervuradas passa a ser inferior ao consumo das lajes maciças para diferentes CAA's e tempos de incêndio.....	41



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	JUSTIFICATIVA .....	10
1.2	OBJETIVOS .....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	12
2.1	LAJES.....	12
2.1.1	Lajes maciças.....	12
2.1.2	Lajes nervuradas (EPS) .....	13
2.2	IMPOSIÇÕES DE PROJETO .....	15
2.2.1	Agressividade do ambiente.....	15
2.2.2	Qualidade do concreto de cobrimento .....	15
2.2.3	Cobrimento mínimo das armaduras.....	16
2.2.4	Limite de deslocamento vertical.....	17
2.2.5	Valores mínimos de armadura na seção .....	17
2.3	ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM INCÊNDIO.....	17
2.3.1	Resistência ao fogo.....	18
2.3.2	Método tabular.....	19
3	METODOLOGIA.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1	EXEMPLO DETALHADO .....	22
4.1.1	Geometria dos elementos.....	22
4.1.2	Entrada de dados no software .....	24
4.1.3	Processamento das estruturas .....	26
4.1.4	Valores obtidos para o exemplo .....	27
4.2	DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.2.1	Variação do peso próprio das lajes .....	30
4.2.2	Variação das armaduras dimensionadas das lajes .....	32

4.2.3	Alturas dimensionadas das lajes .....	34
4.2.4	Relação do consumo de concreto entre lajes maciças e nervuradas.....	36
4.2.5	Relação do consumo de aço entre lajes maciças e nervuradas .....	38
4.2.6	Influência do TRRF para diferentes CAA's em lajes nervuradas .....	39
4.2.7	Vãos onde o consumo de concreto das lajes nervuradas passa a ser inferior ao das lajes maciças .....	41
5	CONCLUSÃO.....	42
5.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS .....	43
	REFERÊNCIAS .....	44
	APÊNDICE .....	45

# 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, insumos 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.

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.

Ao discutir a escolha do método construtivo de lajes utilizadas em edificações, a laje maciça geralmente se faz presente, por ser uma estrutura simples de ser executada e seu uso ser muito difundido. Por outro lado, a utilização de lajes mais elaboradas como as lajes nervuradas, ganharam seu lugar no mercado da construção civil ao utilizar de forma mais eficiente das propriedades dos materiais empregados, pois ao utilizar de nervuras na parte inferior reduz o consumo de concreto empregando moldes plásticos ou blocos de material inerte na parte tracionada das lajes, reduzindo assim o peso próprio e a quantidade de aço de armadura necessária por conta do aumento do momento de inercia das lajes

Mas além de considerar o desempenho das estruturas, deve-se também considerar a segurança ao fazer uso dessas edificações, por exemplo a segurança em casos de incêndio. A verificação à situação de incêndio tem por objetivo primário minimizar os riscos à vida, como consequência, conduz-se à redução da perda patrimonial.

A verificação à situação de incêndio se faz possível ao considerar dimensões mínimas, de forma a garantir a segurança dos ocupantes durante o tempo necessário para que haja a evacuação total da edificação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Visando a escolha adequada do tipo de estrutura a ser utilizada nas construções, faz-se necessário o estudo comparativo entre diferentes técnicas construtivas vigentes no mercado, no caso de lajes de concreto armado, as lajes maciças e as nervuradas são opções muito utilizadas no mercado da construção civil brasileiro, as lajes maciças pela sua simplicidade e popularidade e as lajes nervuradas pelo seu melhor desempenho no emprego dos materiais aço e concreto.

Na construção civil, é de conhecimento geral que, para grandes vãos (a partir de 6 ou 7 metros), as lajes nervuradas de concreto armado são mais econômicas que as lajes maciças de concreto armado. Bom, mas e quando é imposta a verificação de incêndio, será que as lajes nervuradas

permanecem sendo mais vantajosas que as maciças quando projetadas para grandes vãos? Este trabalho busca responder a esta pergunta avaliando a utilização das lajes em edificações com diferentes imposições de projeto.

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem por objetivo geral comparar os diferentes quantitativos dos materiais aço e concreto no dimensionamento entre lajes maciças e lajes nervuradas - com utilização de poliestireno expandido (EPS) – em situação de incêndio. A seguir, indicam-se os objetivos específicos.

- Apresentar os critérios utilizados para o dimensionamento das lajes maciças e nervuradas em situação de incêndio;
- Obtenção do quantitativo de materiais aço e concreto dimensionados com auxílio dos softwares CAD/TQS e Excel;
- Comparação dos métodos construtivos para diferentes imposições de projeto (vãos, classe de agressividade ambiental e altura da edificação).
- Discutir a viabilidade dos diferentes tipos de laje quando do consumo de materiais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 LAJES

As lajes de concreto são elementos estruturais planos que recebem a maior parte das ações aplicadas em uma construção e são responsáveis por transmitir as ações impostas para as vigas. Diversos são os métodos construtivos a disposição, ou seja, existem diversas formas de se abordar a solução estrutural para diferentes solicitações arquitetônicas (geometria, uso e ocupação etc.), pode-se optar entre lajes moldadas in loco ou pré moldadas, lajes maciças, nervuradas, protendidas, lisas entre outras, cada uma com diferentes qualidades, sejam elas econômicas, construtivas ou de projeto.

Para este estudo, quanto às vinculações das lajes, foram adotadas apenas lajes simplesmente apoiadas.

#### 2.1.1 Lajes maciças

Lajes maciças são placas planas de concreto armado que possuem uma determinada espessura. Segundo Araújo (2003 apud PERGHER, 2010), “As lajes convencionais são placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou por alvenarias, sendo este tipo de laje predominante nos edifícios residenciais onde os vãos são relativamente pequenos.”

Entre algumas das qualidades das lajes maciças tem-se a simplicidade construtiva (fácil montagem e concretagem dos elementos, facilidade na passagem de tubulações) e o poder de distribuição mais uniforme das ações para as vigas de contorno. Com relação as desvantagens, tem-se o alto custo com jogo de formas e escoramentos e o aumento significativo do peso próprio conforme maior o vão a ser vencido.

Segundo Carvalho e Figueiredo, “A relação entre a altura (espessura) e o menor vão da laje de pavimentos de edifícios costuma variar de 1/40 a 1/60. Considera-se que a laje cuja relação se encaixa dentro desses limites tem uma altura considerada pequena para efeito de cálculo.” (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p.319)

No que diz respeito às dimensões mínimas das lajes maciças, segundo a ABNT NBR 6118 em seu item 13.2.4.1 (ABNT NBR 6118:2014, p.74) deve-se respeitar alguns limites mínimos para a espessura:

- a) 7 cm para cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;

- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de  $l/42$  para lajes de piso biapoiadas e  $l/50$  para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

No dimensionamento das lajes em balanço, os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados devem ser multiplicados por um coeficiente adicional  $\gamma_n$ , de acordo com o indicado na Tabela 13.2.

### 2.1.2 Lajes nervuradas (EPS)

Segundo o item 14.7.7 da ABNT NBR 6118, “Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” (ABNT NBR 6118:2014, p.97).

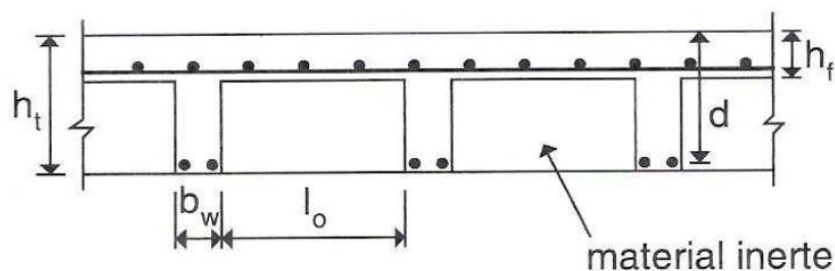
Para Carvalho e Pinheiro (2009, p32):

[...] a laje nervurada é um sistema estrutural onde se procura afastar o concreto da seção transversal da linha neutra, aumentando a altura da laje, o que proporciona um maior braço de alavanca, formando um conjunto de nervuras, em uma ou em duas direções, com espaçamentos uniformes entre si. Para fins de análise, o sistema pode ser comparado a uma grelha de barras uniformes.

Ao realizar a montagem das lajes nervuradas de concreto armado tem-se a opção de utilizar algum material inerte (EPS, tijolos cerâmicos etc.) de peso específico reduzido para preencher os vãos entre as nervuras ou então utilizar de fôrmas industrializadas que, após sua retirada, deixam à mostra as nervuras das lajes (ARAÚJO, 2014).

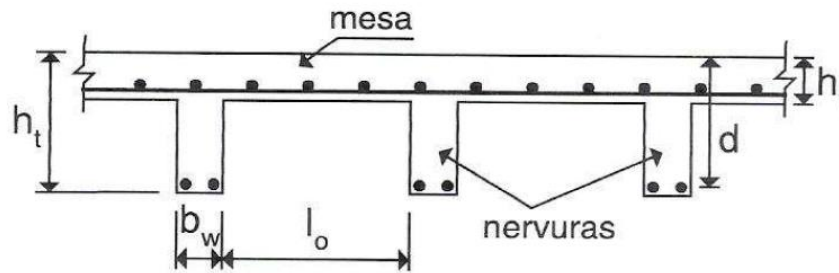
Nas figuras 1 e 2 logo abaixo, estão indicados dois cortes transversais em lajes nervuradas, uma contendo material inerte na zona de tração e na outra as nervuras ficam aparentes após a retirada das fôrmas, respectivamente.

Figura 1- Laje nervurada com superfície plana



Fonte: ARAÚJO (2014)

Figura 2 - Laje nervura com nervuras aparentes



Fonte: ARAÚJO (2014)

Neste trabalho, foram estudadas lajes nervuradas com EPS (blocos de isopor) como material inerte na zona de tração.

Do ponto de vista de projeto, a utilização de material inerte entre as nervuras nos concede algumas vantagens quando comparada a utilização de fôrmas industrializadas (ou cubetas), como maior liberdade para dimensionamento da geometria das nervuras de forma a obter-se flechas de projeto próximas das flechas limites indicadas pelo item 13.3 na ABNT NBR 6118, dessa forma foi possível reduzir a quantidade de concreto utilizado nesses elementos estruturais e por consequência diminuir o peso próprio da estrutura como um todo.

Quanto aos valores mínimos para as dimensões de capa e nervuras das lajes nervuradas tem-se o item 13.2.4.2 (ABNT NBR 6118:2014, p. 74) que nos diz o seguinte:

A espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a  $1/15$  da distância entre as faces das nervuras ( $l_o$ ) e não menor que 4 cm.

O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm. Para tubulações com diâmetro  $\varnothing$  maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de  $4 \text{ cm} + \varnothing$ , ou  $4 \text{ cm} + 2 \varnothing$  no caso de haver cruzamento destas tubulações.

A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm.

Nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armadura de compressão.

Para o projeto das lajes nervuradas, devem ser obedecidas as seguintes condições:

- a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
- b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

## 2.2 IMPOSIÇÕES DE PROJETO

O projeto de estruturas em concreto armado deve atender aos requisitos mínimos de qualidade e segurança previstos na ABNT NBR 6118 – Projetos de estruturas de concreto – Procedimento, e em outras normas e instruções complementares e específicas.

A seguir estão apenas alguns dos critérios utilizados para o dimensionamento das lajes projetadas neste trabalho. Decidiu-se por detalhar apenas as características que variam de acordo com imposições da ocupação e localização da edificação (condições impostas ao projeto), critérios como agressividade ambiental, qualidade do concreto de cobrimento, ações consideradas e limites de deformação vertical.

### 2.2.1 Agressividade do ambiente

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto. A classificação da agressividade ambiental à qual a estrutura estará exposta deve estar de acordo com a Tabela 6.1 da NBR 6118:2014, uma simplificação desta tabela encontra-se no quadro 1, logo abaixo.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Classificação geral para o tipo de ambiente pra efeito	Risco de deteiorização da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118: 2014, p. 17

### 2.2.2 Qualidade do concreto de cobrimento

A durabilidade das estruturas pode ser relacionada diretamente à qualidade e características do concreto de cobrimento da armadura.

Segundo Carvalho e Figueiredo,



Em relação à durabilidade, a ABNT NBR 6118:2014, no item 6.1, exige que as estruturas de concreto sejam projetadas e construídas de modo que, sob as influências ambientais previstas e quando utilizadas conforme estabelecido em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e comportamento adequado em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto. (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p.65).

O quadro 2, logo abaixo é uma simplificação da tabela 7.1 da NBR 6118:2014, ele traz a relação entre as classes de concreto (tratadas em ABNT NBR 8953 e ABNT NBR 12655) e as classes de agressividade ambiental comentadas anteriormente no item 2.1.1.

Quadro 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	Concreto armado	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
Classe de concreto		$\geq 20$	$\geq 25$	$\geq 30$	$\geq 40$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118: 2014, p.18

### 2.2.3 Cobrimento mínimo das armaduras

Para CARVALHO e Figueiredo,

Cobrimento mínimo é a menor distância livre entre uma face da peça e a camada de barras mais próxima dessa face (inclusive estribos), e deve ser observado ao longo de todo o elemento considerado; tem por finalidade proteger barras tanto da corrosão como da ação do fogo.” (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p. 179).

E, segundo a NBR 6118, para garantir o cobrimento mínimo ( $c_{\min}$ ), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal ( $c_{\text{nom}}$ ), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução ( $\Delta c$ ), sendo que nas obras correntes, o valor de  $\Delta c$  deve ser maior ou igual a 10 mm (ABNT NBR 6118:2014).

No quadro 3 tem-se uma simplificação da tabela 7.2 da NBR 6118:2014, onde estão relacionados os cobrimentos mínimos para diferentes classes de agressividade.

Nos quadros 5 e 6 são apresentadas as relações de cobrimentos mínimos de armadura de lajes para diferentes condições de incêndio segundo a ABNT NBR:15200:2012.

Quadro 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal em mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118: 2014, p.18

#### 2.2.4 Limite de deslocamento vertical

Quando da análise estrutural com auxílio do programa TQS, utilizou-se da tabela 13.3 da ABNT NBR 6118:2014 – Limites para deslocamentos – para obtenção das flechas máximas das lajes em estudo, visando a aceitabilidade visual empregou-se a razão  $\ell/250$ , sendo  $\ell$  o vão entre os eixos das vigas de apoio.

#### 2.2.5 Valores mínimos de armadura na seção

No item 19.3.3.2 da ABNT NBR 6118:2014 a norma comenta que para melhorar o desempenho e a ductilidade à flexão, assim como controlar a fissuração, são necessários valores mínimos de armadura passiva. Esses valores mínimos estão representados nas tabelas 17.3 e 19.1 da ABNT NBR 6118:2014.

### 2.3 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Os objetivos fundamentais da segurança contra incêndio são minimizar o risco à vida. Como consequência, conduz-se à redução da perda patrimonial.

Para Pignatta (SILVA, V.P., 2016, p.23),

A inclusão de medidas de proteção e combate ao incêndio e, principalmente, de meios que permitam o rápido abandono dos ambientes em chamas deve ser conscientemente analisada pelo projetista, em conjunto com o proprietário, levando em conta as condições específicas da obra, tais como: porte da edificação, número de usuários e tipo de utilização, além das exigências do poder público, das recomendações das normas técnicas para o projeto e da especificação de equipamentos.

Para a criação de um sistema de segurança eficaz contra incêndios pode-se adotar, segundo a ABNT NBR 14432:2000, um conjunto de meios ativos (extintores, rede de hidrantes, sistemas automáticos etc.) e passivos (verificação de segurança das estruturas em incêndio, rotas de

saída, compartimentação horizontal e vertical etc.) de forma a mitigar a existência ou os efeitos de um possível incêndio.

Neste trabalho em específico, abordar-se-á o meio de proteção passivo, compartimentação vertical por meio de lajes de concreto armado, ou seja, o elemento laje deve ser projetado de forma a impedir a propagação vertical de gases ou calor para outros compartimentos da edificação.

Conforme a legislação do Estado de São Paulo (Decreto n.º 56.819 de 2011), a compartimentação vertical é exigida para edifícios residenciais, de escritórios ou hotéis e demais ocupações listadas no quadro 4, para alturas superiores a 12 metros, exceto para hospitais em que a altura mínima é de 6 metros.

### 2.3.1 Resistência ao fogo

Resistência ao fogo é a propriedade de um elemento construtivo de resistir à ação do fogo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento – ver itens 3.13 e 3.18 da ABNT NBR 14432:2001 -, onde aplicável. Geralmente é medida pelo tempo que o elemento suporta a ação de uma elevação padronizada de temperatura (representada aqui na equação 1, segundo a ABNT NBR 14432:2001) até ele atingir um limite preestabelecido (SILVA, V. P., 2016).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8 t + 1) \quad (1)$$

onde:

t é o tempo, em minutos;

$\theta_0$  é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C;

$\theta_g$  é a temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

A fim de se determinar o esforço resistente de um elemento estrutural é necessário conhecer as resistências dos materiais na temperatura atingida durante o incêndio. Costuma-se, por simplicidade empregar um modelo fictício, o modelo do incêndio-padrão (obtido através da equação 1).

Os tempos de resistência ao fogo, ou neste trabalho também tratados como tempos de incêndio (TRRF) dos elementos construtivos de uma edificação são fornecidos pelas Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros de cada estado ou, na ausência delas, pela ABNT NBR 14432:2001

que comenta que o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento quando sujeito ao incêndio-padrão, e a resistência ao fogo é a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

Os TRRF's dos elementos estruturais são determinados a partir do tipo de ocupação e da altura de incêndio do edifício, podendo ser entendido (na grande maioria dos casos) como a altura do piso mais alto habitável.

No quadro 5 apresenta-se um resumo dos TRRF's segundo a IT 8 (2011).

Quadro 4 - Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF)

Ocupação/uso	Altura da edificação							
	$h \leq 6$ m	$6 \text{ m} < h \leq 12$ m	$12 \text{ m} < h \leq 23$ m	$23 \text{ m} < h \leq 30$ m	$30 \text{ m} < h \leq 80$ m	$80 \text{ m} < h \leq 120$ m	$120 \text{ m} < h \leq 150$ m	$150 \text{ m} < h \leq 180$ m
Residência	30	30	60	90	120	120	150	180
Hotel	30	60	60	90	120	150	180	180
Supermercado	60	60	60	90	120	150	150	180
Escritório	30	60	60	90	120	120	150	180
Shopping	60	60	60	90	120	150	150	180
Escola	30	30	60	90	120	120	150	180
Hospita	30	60	60	90	120	150	180	180
Igreja	60	60	60	90	120	150		

Fonte: PIGNATTA, 2016, p.33

### 2.3.2 Método tabular

Quando se estuda o dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio, diferentes métodos de análise e dimensionamento se fazem presentes, podendo ser citados os métodos avançados e simplificados baseados na ABNT NBR 8681:2003, método da isoterma de 500 °C, método das faixas e o método tabular, sendo este último o método adotado na realização deste trabalho.

No método tabular, basta que as dimensões mínimas dos elementos estruturais dimensionados sejam superiores àquelas das tabelas 4 a 12 da ABNT NBR 15200:2012, lembrando é claro, que o dimensionamento previsto deve também respeitar a ABNT NBR 6118:2014.

Segundo a ABNT NBR 15200:2012 essas 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 (c1).

Os ensaios mostram que em situação de incêndio, as peças de concreto rompem usualmente por flexão ou flexocompressão e não por cisalhamento. Por isso, considera-se apenas a armadura longitudinal nesse critério.

Como comentado anteriormente, adotou-se o método tabular como ferramenta para o dimensionamento dos elementos estruturais em situação de incêndio, este método apresenta tabelas com valores mínimos para as dimensões dos elementos expostos ao fogo.

Segundo a norma, as tabelas 6 a 10 presentes na ABNT NBR 15200:2012 fornecem as espessuras mínimas para lajes e capas de lajes nervuradas com aquecimento na face inferior e o valor de  $c_1$  das armaduras inferiores, em função dos TRRF. Onde os valores de  $h$  indicados são os mínimos para garantir a função corta fogo.

Neste trabalho considerou-se o uso de lajes maciças simplesmente apoiadas e de lajes nervuradas também simplesmente apoiadas, os quadros 5 e 6 tratam das lajes maciças e nervuradas simplesmente apoiadas, respectivamente.

Quadro 5 - Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas

TRRF min	h mm	$c_1$ mm		
		Armada em duas direções		Armada numa direção $\ell_y / \ell_x > 2$
		$\ell_y / \ell_x \leq 1,5$	$1,5 \leq \ell_y / \ell_x \leq 2$	
30	60	10	10	10
60	80	10	15	20
90	100	15	20	30
120	120	20	25	40
180	150	30	40	55

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15200: 2012, p.17

Quadro 6 - Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas

TRRF mín	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
180	220/75	290/70	410/60	150/30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15200:2012, p.19

### 3 METODOLOGIA

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

Devido a 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, foram estudadas um total de 256 lajes.

Para a comparação dos dados obtidos, foram gerados tabelas e gráficos com 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 de lajes em concreto armado na situação de incêndio:

- Método construtivo – alternou-se o método construtivo entre lajes nervuradas com utilização de EPS como material inerte e lajes maciças, ambas em concreto armado;
- Vãos – foram dimensionadas lajes com vãos variando de 3 a 10 metros de vão livre;
- 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 da NBR 6118:2014 no item 2.1.1, que indica a utilização de diferentes classes mínimas de concreto de acordo com a agressividade ambiental do local da construção;
- 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. Nesta etapa configurou-se o software de forma a dimensionar as estruturas para as diferentes situações de agressividade ambiental e diferentes alturas de projeto.

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 do momento de inercia 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. E o levantamento da volumetria de concreto utilizado foi realizado com 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.

### **3.1 EXEMPLO DETALHADO**

Como já mencionado, neste trabalho estudou-se a utilização de lajes nervuradas e maciças em concreto armado para diferentes imposições de projeto, variou-se o vão livre, a classe de agressividade, o  $f_{ck}$  utilizado para cada classe de agressividade ambiental (CAA), além de expormos as estruturas a diferentes tempos de incêndio (TRRF).

Nesta seção utilizou-se como exemplo de dimensionamento - com auxílio do software CAD/TQS - o caso das lajes expostas a agressividade moderada de zona urbana (CAA-II) com tempo requerido de resistência ao fogo previsto para edificações de pequeno porte (até 12 metros) para uso residencial, assim adotou-se TRRF de 30 minutos.

#### **3.1.1 Geometria dos elementos**

Por este trabalho realizar um estudo comparativo para um grande número de casos, buscou-se padronizar 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.

##### **3.1.1.1 Planta baixa**

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 metros 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 as lajes estão simplesmente apoiadas em todas as vigas de contorno.

### 3.1.1.2 Vigas e pilares

Visando a padronização dos modelos foram utilizadas apenas vigas com dimensões  $h = 50$  cm e  $b_w = 19$  cm. A disposição dos pilares na estrutura foi feita de maneira a reduzir as deformações verticais das vigas.

Quanto aos pilares, utilizou-se apenas pilares retangulares de dimensões 19 cm x 40 cm, a disposição destes estão indicadas no quadro 7.

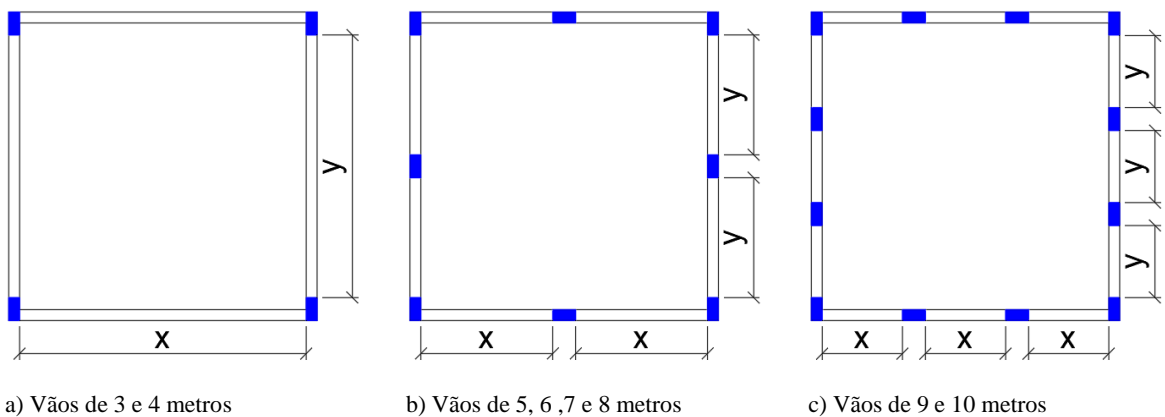
Quadro 7 - Distância entre pilares para diferentes vãos

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

(\*) Os diferentes modelos a), b) e c) estão representados na figura 1

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3 - Disposição de pilares para diferentes vãos



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale observar que, neste trabalho não foi estudado o dimensionamento dos pilares e vigas na situação de incêndio.



### **3.1.1.3 Lajes maciças e nervuradas (pré-dimensionamento)**

No pré-dimensionamento das lajes nervuradas foi utilizada a relação vista em Carvalho e Figueiredo (2014) 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. E a distância entre eixos das nervuras foi mantida abaixo dos 65 cm para, segundo a ABNT NBR 6118:2014, ser dispensada a verificação da flexão da mesa, sendo possível utilização apenas de armadura de distribuição para a capa das lajes nervuradas.

### **3.1.2 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 foram comentadas algumas das escolhas adotadas para as diferentes imposições de projeto para elementos de laje dimensionados com edifício de uso residencial situado em ambiente com CAA-II e TRRF de 30 minutos.

#### **3.1.2.1 Dados do edifício**

Nesta etapa é criado o edifício no CAD/TQS utilizando como referência a ABNT NBR 6118:2014.

##### **3.1.2.1.1 Modelo estrutural do edifício**

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

##### **3.1.2.1.2 Materiais**

Na escolha do concreto utilizado, utilizou-se o quadro 2, ou seja, para as diferentes classes de agressividade ambiental adotou-se o mínimo indicado pela norma, assim, para o caso em questão (CAA-II) o dimensionamento a seguir faz uso da classe de concreto C25 ( $f_{ck}$  de 25MPa).

O aço utilizado de forma geral é o CA50 com tensão de escoamento de 500 MPa.

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

### 3.1.2.1.3 Cobrimento

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 ABNT NBR 6118:2014 e ANBT NBR 15200:2012 de forma a considerar caso a caso qual cobrimento adotar (para as lajes).

Como no exemplo em questão foi adotado CAA-II com cobrimento mínimo de 25 mm para lajes (ver quadro 3) e TRRF de 30 minutos com  $c_1$  de 10 mm para lajes maciças, 10 mm para capa de lajes nervuradas e 15 mm para nervuras de lajes nervuradas (ver quadros 5 e 6, respectivamente), adotou-se o cobrimento de 25 mm para as armaduras positivas das lajes.

Vale observar que, neste trabalho, não se considerou cobrimento mínimo para armadura de distribuição.

### 3.1.2.1.4 Cargas e ações

Para adotar os ponderadores e fatores de redução para os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS) utilizou-se das tabelas 11.1 e 11.2 da NBR 6118 (ABNT NBR 6118:2014, p.65) considerando combinação de ação normal em local com baixa concentração de pessoas, assim adotou-se como ponderador de ações ( $\gamma_f$ ) o valor de 1,4 e para os fatores de redução  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  e  $\psi_2$  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 2500 kg/m<sup>3</sup>, e como sobrecarga permanente  $g_2$  (revestimentos superior e inferior da laje) o valor de 1,0kN/m<sup>2</sup> ou 100 kg/m<sup>2</sup>.

Com relação as ações variáveis (q), considerou-se o valor indicado pela ABNT NBR 6120 para lajes de uso residencial, ou seja, 1,5kN/m<sup>2</sup> ou 150 kg/m<sup>2</sup>. Este e outros valores podem ser vistos logo abaixo no quadro 7 (CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p.94).

Quadro 8 - Valores mínimos das cargas verticais para as edificações

Local	Carga (kN/m <sup>2</sup> )
Residências - dormitório, copa, cozinha e banheiro	1,5
Forros não destinados a depósitos	0,5
Dispensa, área de serviço, lavanderia	2,0
Compartimentos destinados a reuniões ou ao acesso público	3,0
Compartimentos destinados a bailes, ginásticas ou esportes	5,0
Escadas, corredores e terraços com acesso ao público	3,0
Escadas, corredores e terraços sem acesso ao público	2,0
Lojas	2,0

Fonte: CARVALHO; FIGUEIREDO, 2014, p.94

### 3.1.2.2 Critérios de projeto

Segundo o manual do TQS (TQS Informática Ltda.,2014, p.201)

Antes de fazermos o processamento e detalhamento das armaduras, é necessário decidirmos como estes devem ser feitos. O CAD/TQS possui diversos critérios de cálculo e dimensionamento que permitem ao engenheiro escolher o espaçamento de barras da grelha, o cálculo de flexão composta normal nas lajes, o modelo de cálculo de cortante nas vigas, etc. Enfim, cada detalhe do modo de cálculo pode ser alterado pelo engenheiro estrutural.

Para facilitar a replicação dos resultados aqui obtidos optou-se por utilizar os valores *default* da versão 22.0 do software CAD/TQS, isso foi possível pois o programa já adota valores indicados pela ABNT NBR 6118:2014 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 ABNT NBR 15200:2012.

### 3.1.2.3 Geometria das lajes

A geometria das lajes foi definida tendo como referência o limite de deslocamento vertical para lajes com diferentes vãos. As dimensões mínimas seguiram as indicações dos itens 13.2.4.1 e 13.3 da ABNT NBR 6118:2014 e os quadros 5 e 6 referentes à situação de incêndio.

O quadro 9 apresenta a relação de dimensões verificadas para lajes maciças e nervuradas para os diferentes vãos, TRRF de 30 minutos e CAA-II.

As dimensões obtidas para os diferentes vãos de lajes deste exemplo foram apresentadas no quadro 9.

## 3.1.3 Processamento das estruturas

Depois de inseridos todos os dados da estrutura (elementos, dimensões, ações, critérios etc.) foi possível verificar a estrutura com auxílio do software CAD/TQS.

### 3.1.3.1 Processamento global

Através desse processamento, o programa realizou a verificação, o dimensionamento e o detalhamento previsto para os diferentes elementos da estrutura, ou seja, entre outros resultados foram obtidas aqui a área de aço da armadura positiva prevista para as lajes estudadas.

### 3.1.3.2 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 Ltda.,2014, p.355)

É nesta 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 tenham o máximo de deformação sem que se ultrapassasse os limites, fazendo com que os elementos utilizassem o máximo possível de seu momento de inércia.

A respeito da análise não-linear o item 14.5.5 da ABNT NBR 6118 (ABNT NBR 6118:2014, p. 86) nos traz:

Na análise não linear, considera-se o comportamento não linear geométrico e dos materiais.

Toda a geometria da estrutura, bem como todas as suas armaduras, precisa ser conhecida para que a análise não linear possa ser efetuada, pois a resposta da estrutura depende de como ela foi armada.

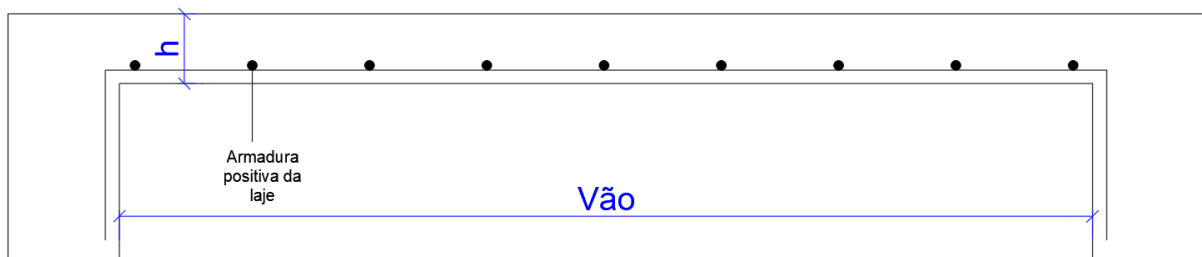
Condições de equilíbrio, de compatibilidade e de ductilidade devem ser necessariamente satisfeitas.

Análises não lineares podem ser adotadas tanto para verificações de estados-limites últimos como para verificações de estados-limites de serviço.

### 3.1.4 Valores obtidos para o exemplo

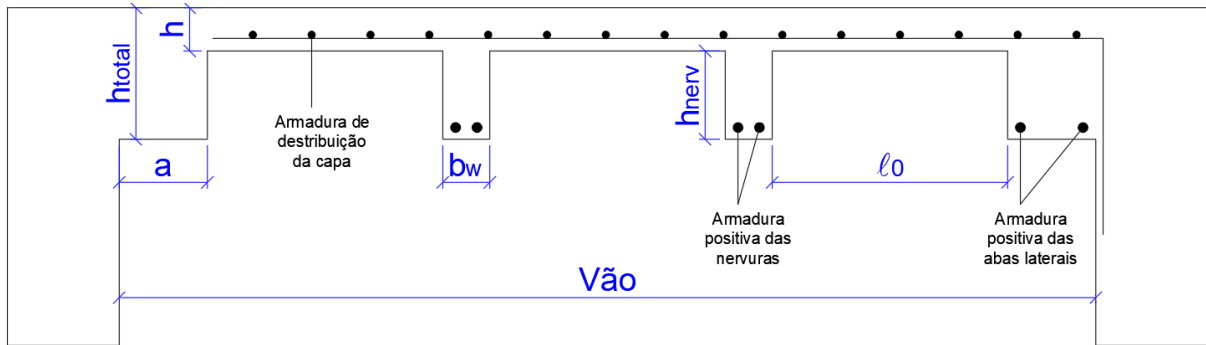
Com o dimensionamento e detalhamento das estruturas já finalizado, foi possível a criação do quadro 9, a seguir. Neste quadro estão indicados em detalhe a geometria das lajes nervuradas e maciças, assim como os valores obtidos de flechas, volume de concreto, área de armadura total utilizada para a seção da laje (ver figuras 2 e 3) e o peso próprio das lajes por  $m^2$ .

Figura 4 - Detalhamento de seção transversal de laje maciça



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 - Detalhamento de seção transversal de laje nervurada



Fonte: Elaborado pelo autor

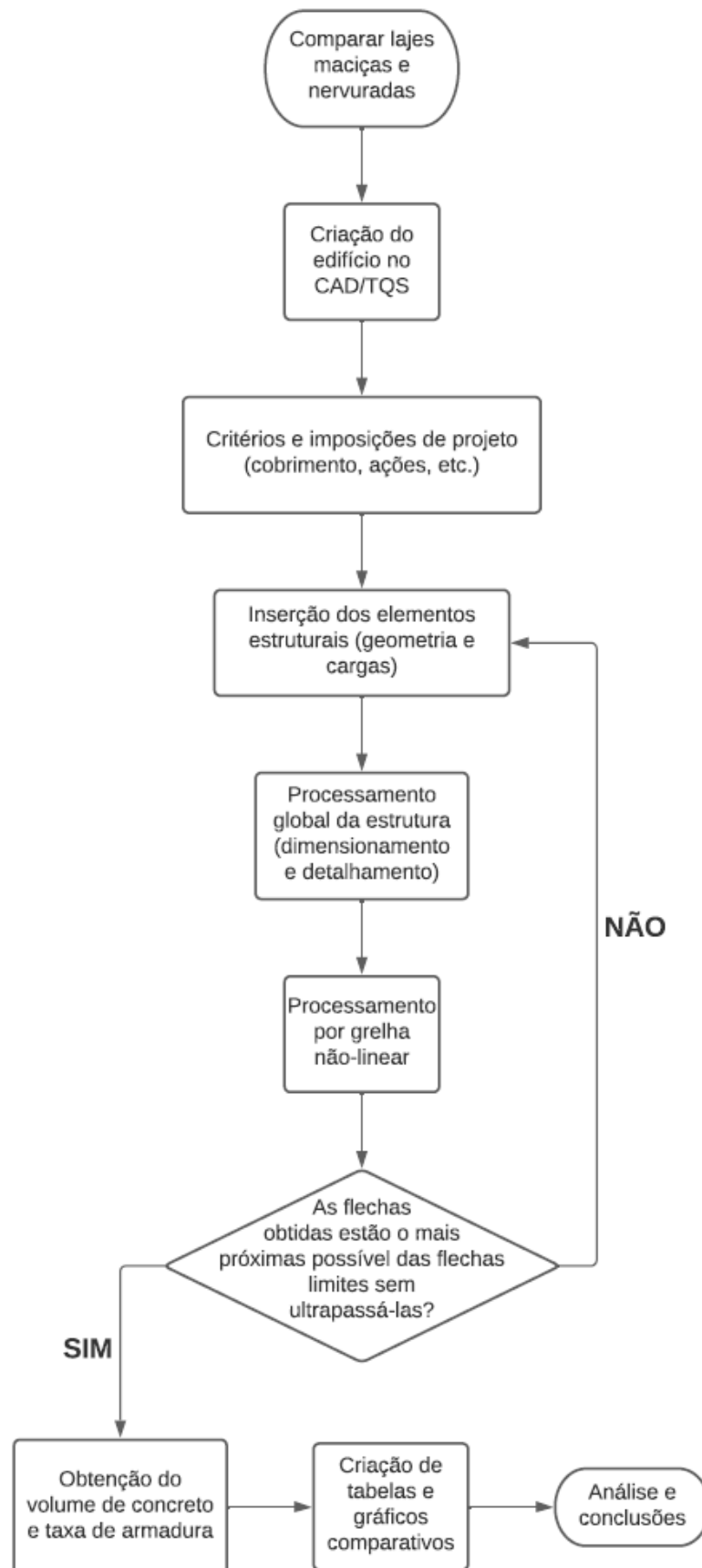
Quadro 9 - Valores obtidos para o caso CAA-II com TRRF de 30 minutos

Tipo de laje	Vão (cm)	Dimensões das lajes maciças e nervuradas						$f_{m\acute{a}x}$ (cm)	$f$ (cm)	$V_{conc}$ (m <sup>3</sup> )	$A_{s,total}$ (cm <sup>2</sup> )	$\beta_1$ (kg/m <sup>2</sup> )
		$h_{min}$ (cm)	$h$ (cm)	$l_0$ (cm)	$b_w$ (cm)	$h_{nerv}$ (cm)	$a$ (cm)					
Maciça	300	6,0	8	-	-	-	-	1,276	0,47	0,72	6,300	200,00
	400	6,0	8	-	-	-	-	1,676	1,46	1,28	13,500	200,00
	500	6,0	10	-	-	-	-	2,076	1,87	2,50	27,200	250,00
	600	6,0	12	-	-	-	-	2,476	2,47	4,32	38,400	300,00
	700	6,0	15	-	-	-	-	2,876	2,77	7,35	37,600	375,00
	800	6,0	18	-	-	-	-	3,276	3,18	11,52	51,200	450,00
	900	6,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	6,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	80,000	600,00
Nervurada	300	6,0	6	45	12	10	13,50	1,276	0,21	0,93	4,890	259,38
	400	6,0	6	53	12	10	12,00	1,676	0,72	1,56	8,150	244,16
	500	6,0	6	49	12	10	12,00	2,076	1,42	2,46	14,400	246,34
	600	6,0	7	52	12	13	18,00	2,476	2,09	4,35	21,355	302,27
	700	6,0	7	50	12	16	15,00	2,876	2,79	6,43	26,300	328,06
	800	6,0	7	53	12	20	16,00	3,276	3,23	9,19	34,770	358,99
	900	6,0	8	51	12	24	15,00	3,676	3,43	13,68	49,795	422,37
	1000	6,0	8	49	12	28	18,00	4,076	3,83	18,79	57,440	469,74

Fonte: Elaborado pelo autor

No apêndice foi disponibilizada a relação completa de quadros contendo os valores obtidos para todas as 256 lajes estudadas.

Figura 6 - Fluxograma descritivo da metodologia aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir foram dispostos diversos gráficos construídos a partir dos dados obtidos (e expostos no apêndice) no dimensionamento e detalhamento das lajes para diferentes imposições de projeto.

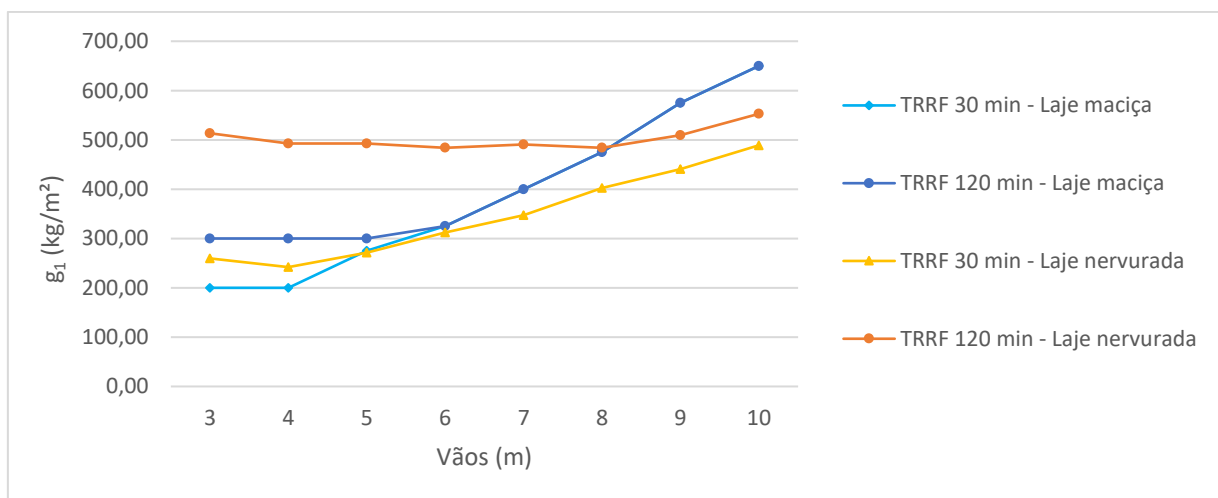
Estes gráficos auxiliam a visualização dos efeitos da verificação das estruturas à situação de incêndio quando do quantitativo de materiais entre as lajes nervuradas e maciças.

### 4.1.1 Variação do peso próprio das lajes

A relação de peso próprio das lajes para diferentes vãos é um indicativo muito interessante quando do projeto estrutural, 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 influenciam no dimensionamento dos pilares, que por fim acabam por influenciar no dimensionamento das fundações.

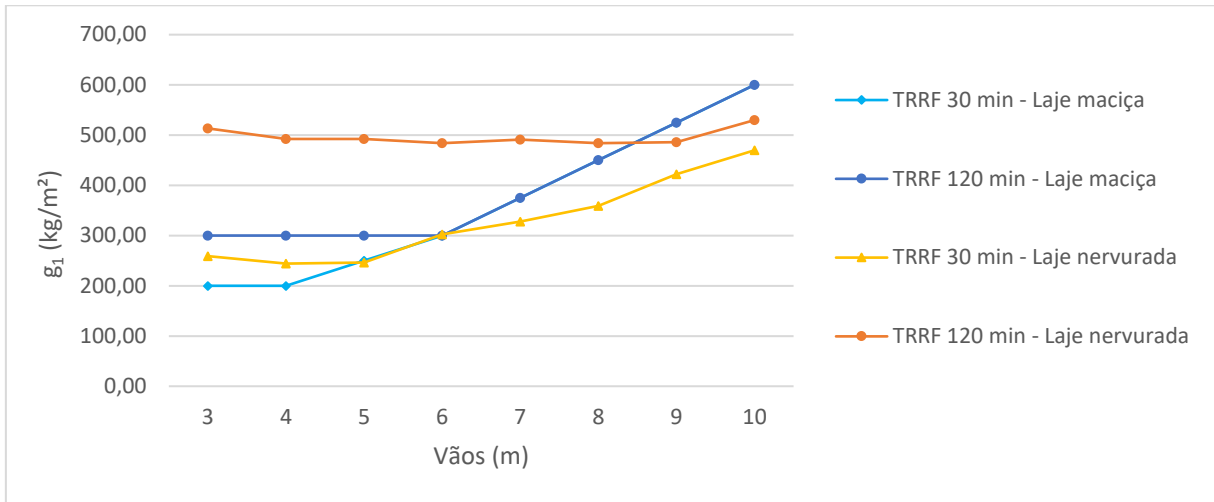
Os gráficos 1, 2, 3 e 4 foram construídos de forma a demonstrar as variações mínimas e máximas de peso próprio das lajes para diferentes CAA's. Para melhorar a visualização das variações, foram adotadas apenas as curvas referentes aos TRRF's de 30 e 120 minutos para lajes maciças e nervuradas, pois assim pode se contemplar os valores mínimos e máximos obtidos para cada vão.

Gráfico 1 – Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I



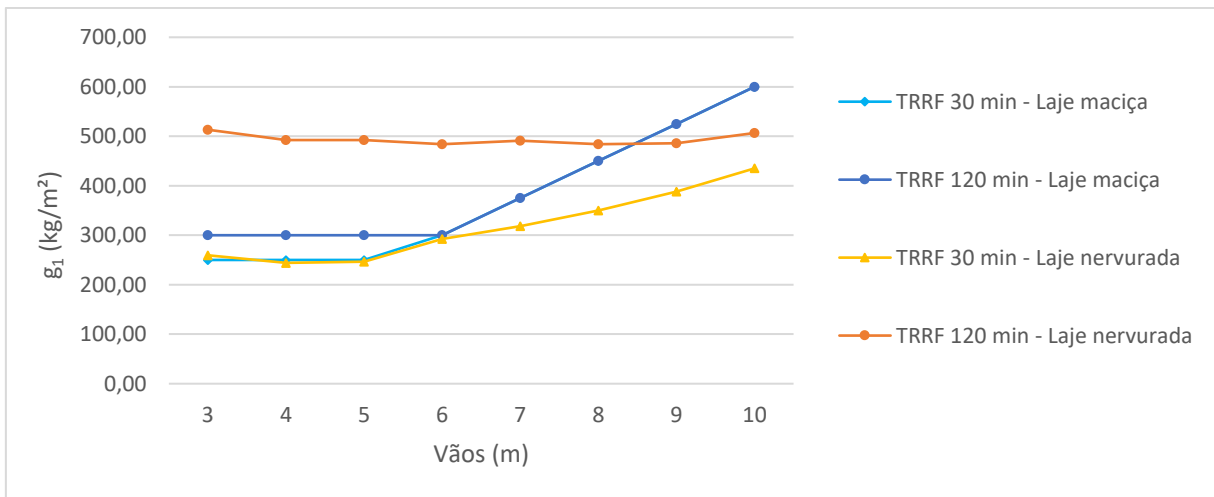
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II



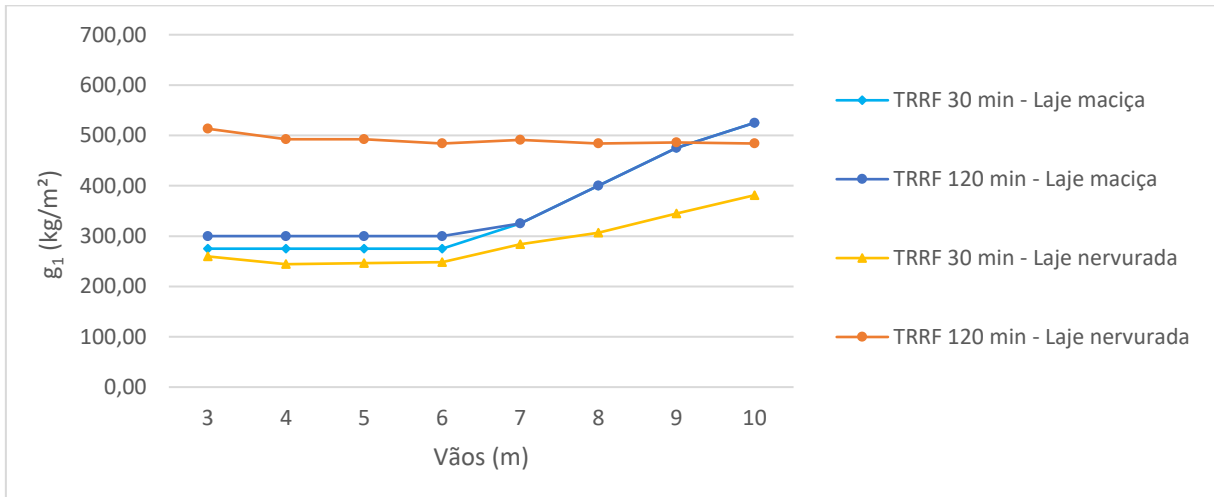
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 - Variação do peso próprio das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV



Fonte: Elaborado pelo autor



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

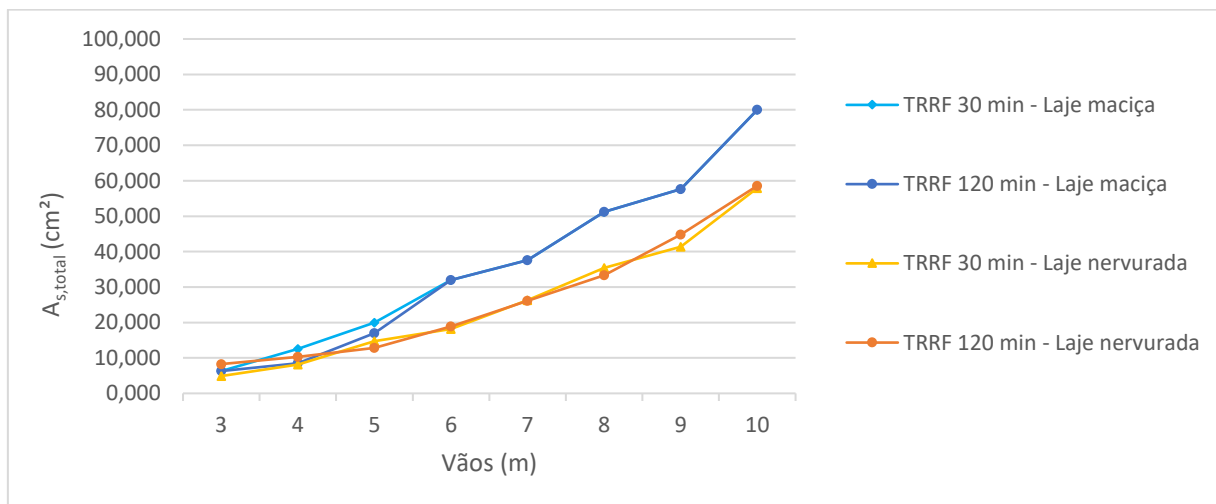
Para as lajes nervuradas é possível visualizar a diferença significativa no emprego de concreto para diferentes tempos de incêndio (TRRF), para lajes nervuradas o aumento de  $f_{ck}$  utilizado não impacta tanto quanto no caso de lajes maciças, pode-se entender que quanto maior o TRRF menor será a relevância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

#### 4.1.2 Variação das armaduras dimensionadas das lajes

Nos gráficos 5, 6, 7 e 8 estão indicadas as áreas de aço dimensionadas e detalhadas para as diferentes seções de lajes maciças e nervuradas.

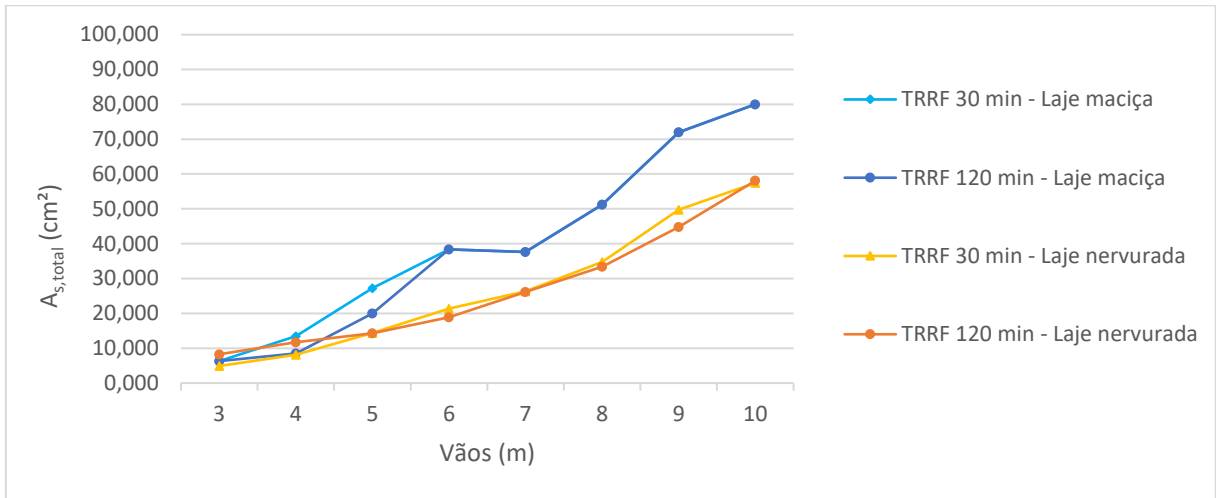
Para uma melhor comparação do consumo de aço para os diferentes casos, considerou-se como indicativo a área de armadura dimensionada por seção. No caso das lajes maciças, para o levantamento do quantitativo de aço foi considerado apenas o dimensionamento e detalhamento da armadura positiva (ver figura 2), quanto às lajes nervuradas, foi considerada a armadura positiva presente em cada nervura e nas abas laterais assim com a armadura de distribuição da capa (ver figura 3).

Gráfico 5 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-I



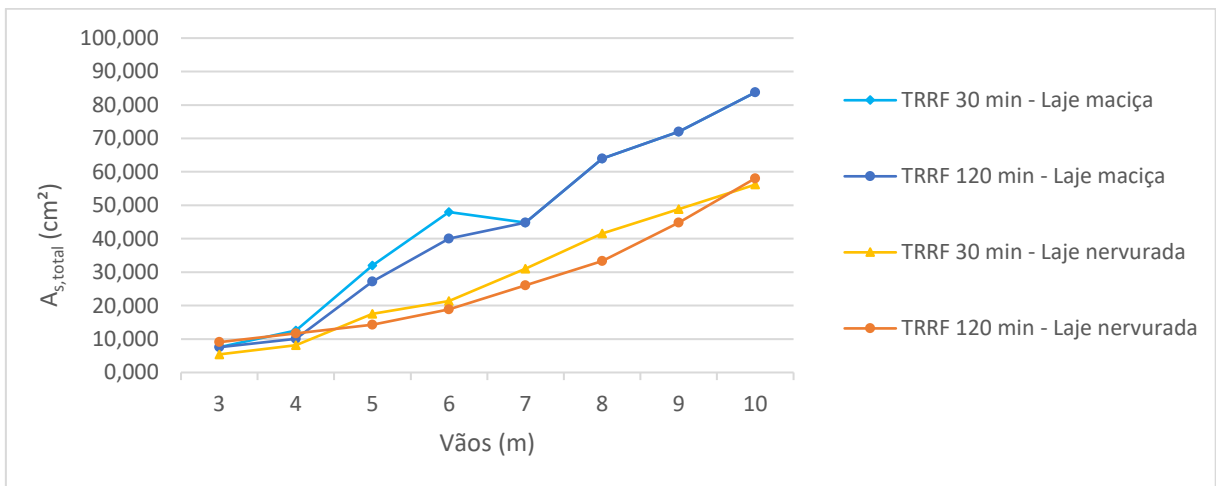
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-II



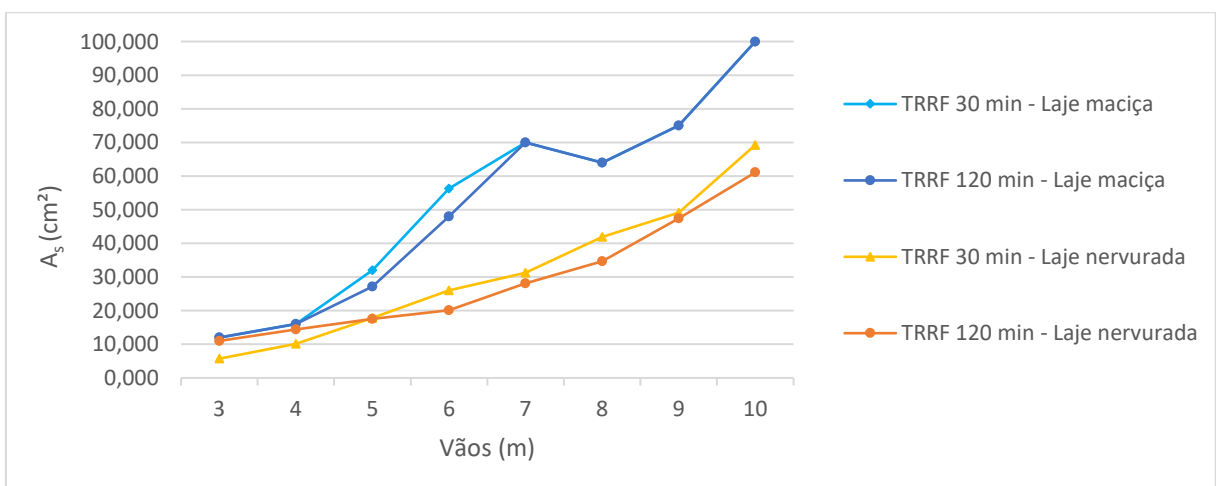
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-III



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 - Área de armadura da seção para diferentes TRRF's e CAA-IV



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos gráficos, quanto às lajes maciças, é possível observar que a variação do dimensionamento das armaduras está diretamente relacionada a variação da espessura adotada, ou seja, ao adotar maiores  $f_{ck}$ 's foi possível a redução das 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.

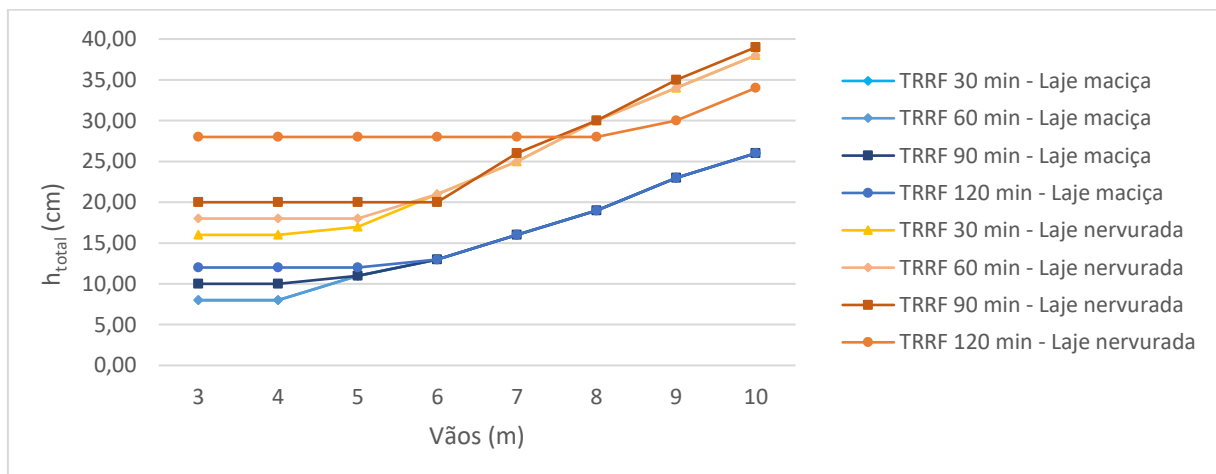
Com relação às lajes nervuradas, tem-se que o dimensionamento para o conjunto de armaduras positivas e de distribuição não sofrem grande influência para diferentes tempos de incêndio ou para diferentes classes de agressividade ambiental.

Comparativamente, as lajes nervuradas aqui dimensionadas consomem menos aço que as lajes maciças para vãos maiores de 5 metros em todos os casos, este 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 a criação de nervuras às quais proporcionam maior braço de alavanca para a armadura positiva reduzindo o consumo de aço, além de que para as capas foi dimensionado armadura mínima de distribuição por conta da pequena distância imposta entre as nervuras.

#### 4.1.3 Alturas dimensionadas das lajes

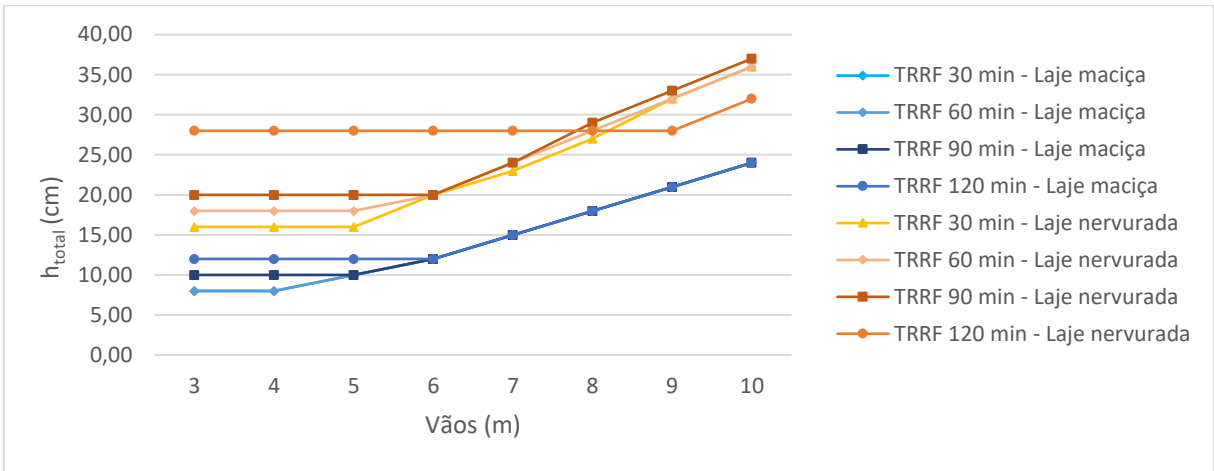
Com os gráficos 9, 10, 11 e 12 representou-se a variação das alturas adotadas para as diferentes lajes. Entende-se como altura das lajes maciças, a própria espessura das lajes e com relação às lajes nervuradas a altura considerada é a soma da altura das nervuras com a espessura da capa. Vale observar que neste trabalho não foi levada em consideração o desempenho de sistemas construtivos segundo a ABNT NBR 15575:2013.

Gráfico 9 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I



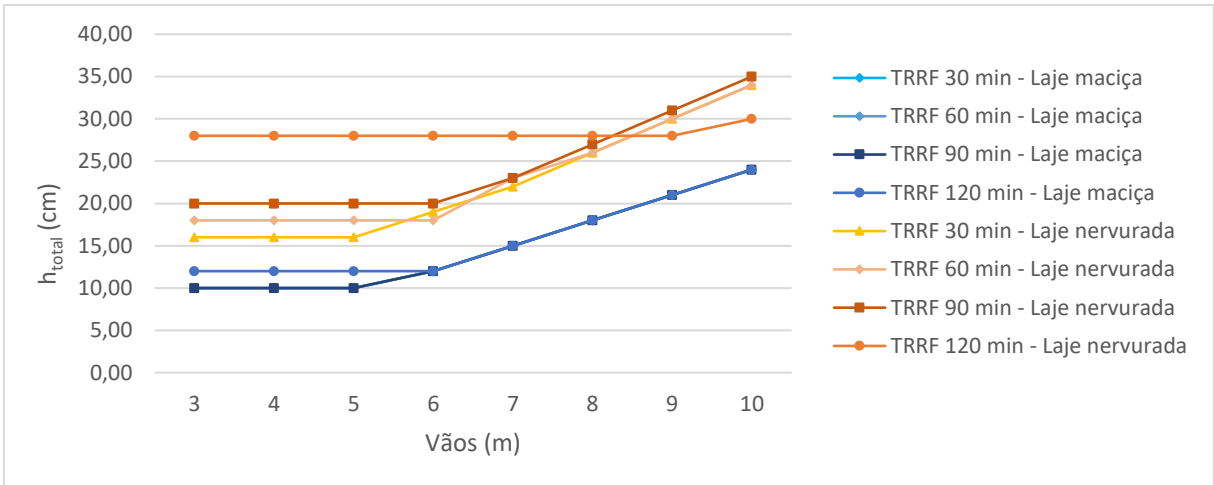
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 10 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II



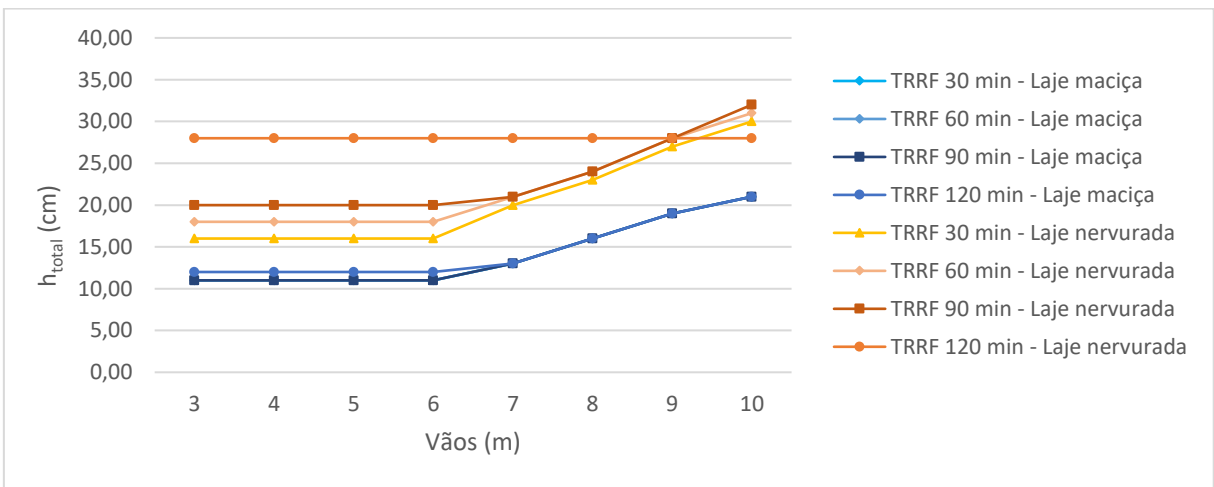
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 11 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 12 - Altura das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV



Fonte: Elaborado pelo autor

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, onde a 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.

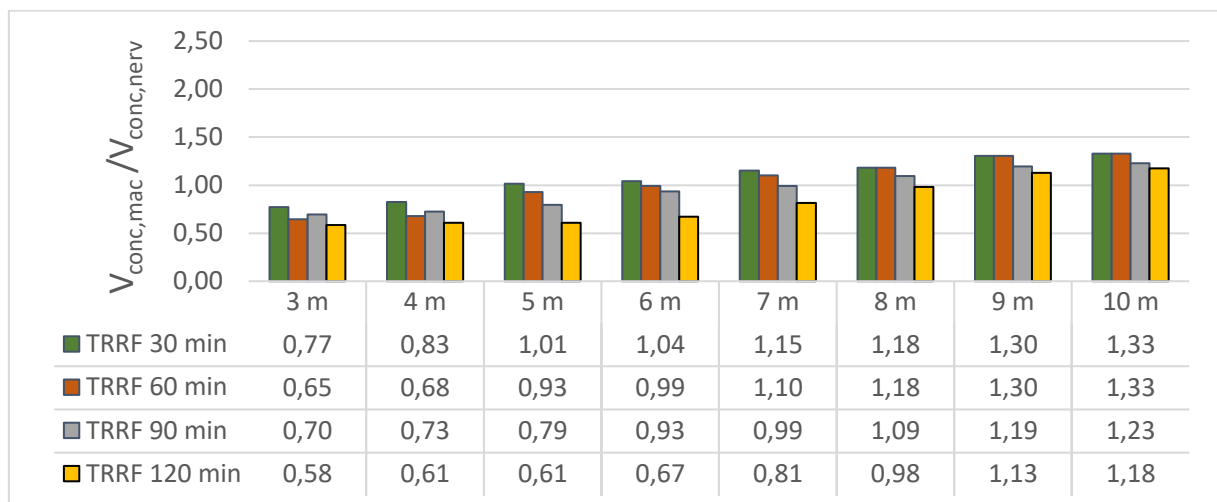
#### 4.1.4 Relação do consumo de concreto entre lajes maciças e nervuradas

A seguir, nos gráficos 13, 14, 15 e 16 são apresentadas as relações de consumo de concreto entre as lajes maciças e nervuradas para os diferentes casos.

Para a construção destes gráficos dividiu-se o volume de concreto utilizado nas lajes maciças pelo consumo de concreto utilizado nas lajes 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.

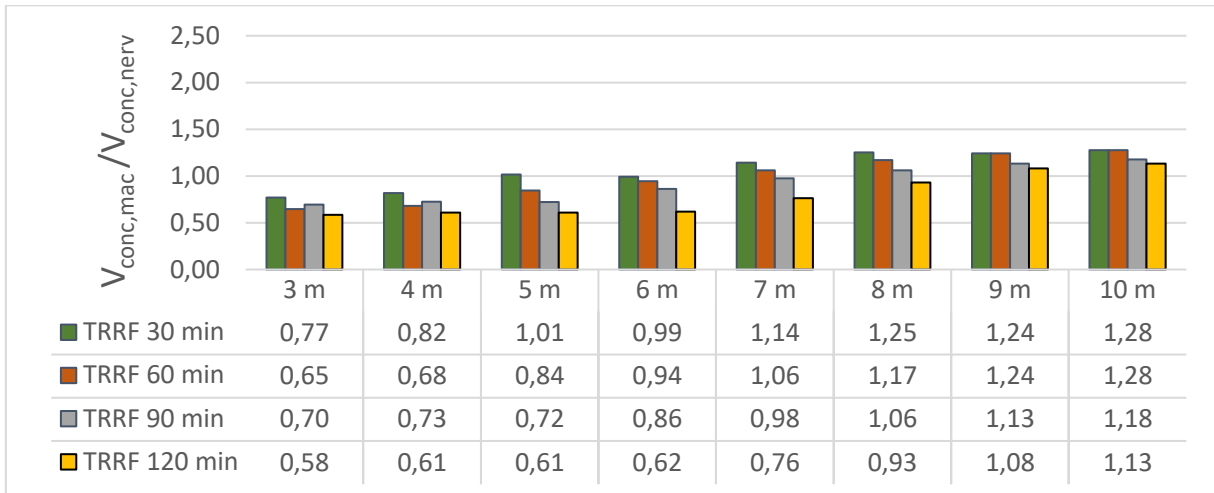
Vale observar que os valores aqui expostos podem ser lidos da seguinte maneira: valores maiores que 1, maior consumo de concreto pela laje maciça; valores inferiores a 1, a laje nervurada consome mais concreto.

Gráfico 13 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I



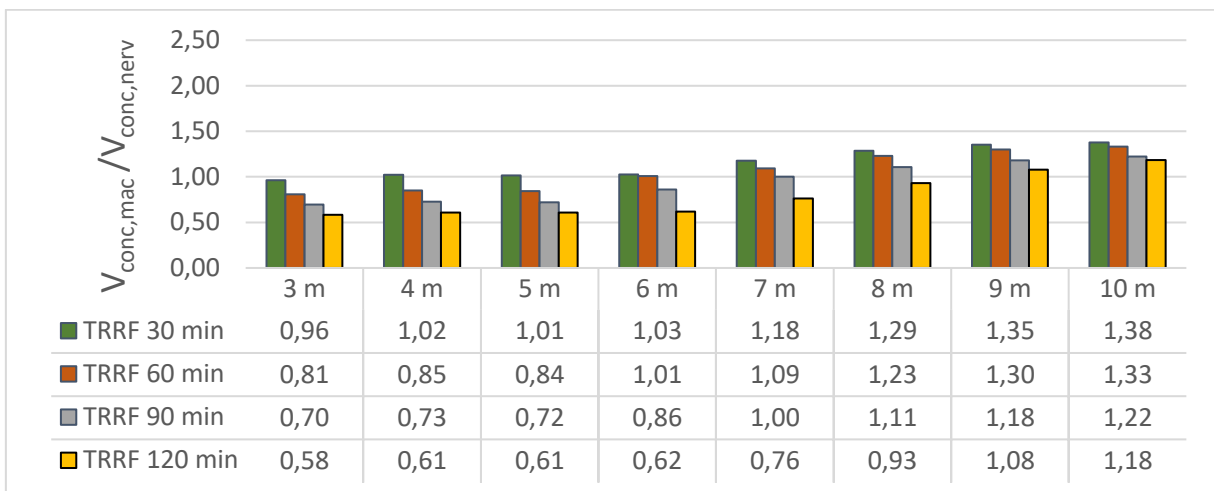
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 14 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II



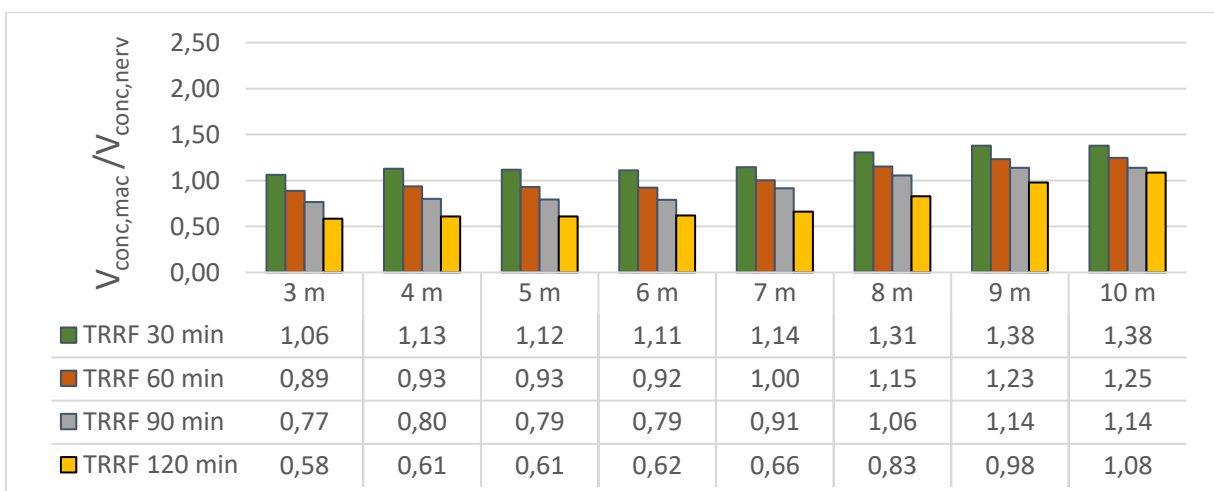
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 15 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 16 - Relação do consumo de concreto das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV



Fonte: Elaborado pelo autor

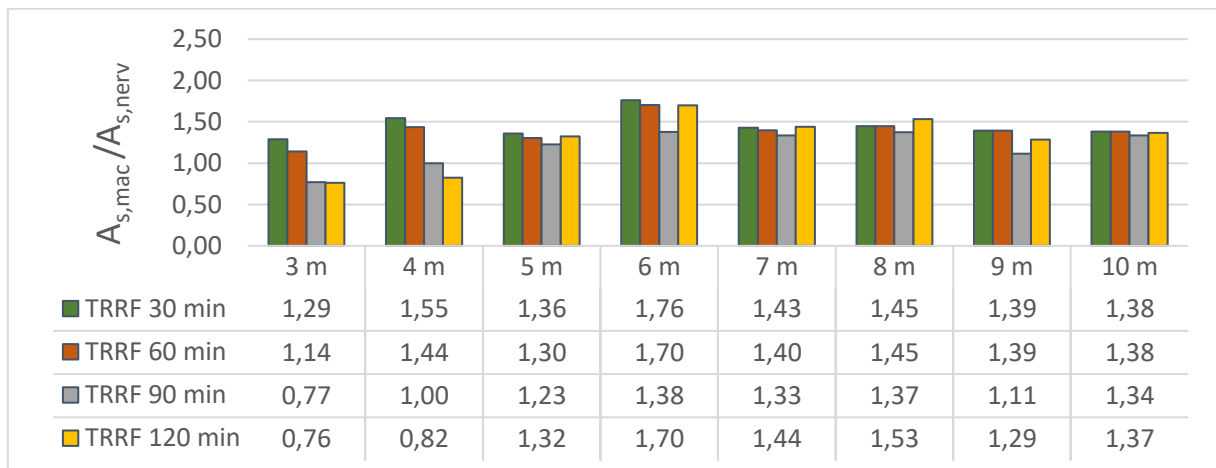
#### 4.1.5 Relação do consumo de aço entre lajes maciças e nervuradas

A seguir, nos gráficos 17, 18, 19 e 20 são apresentadas as relações de consumo de aço entre as lajes maciças e nervuradas para os diferentes casos.

Para a construção destes 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.

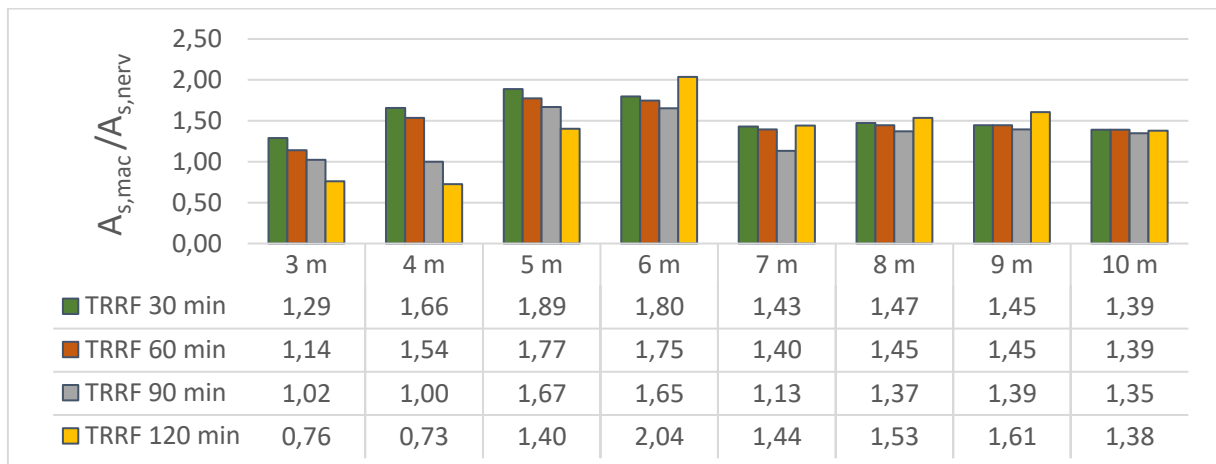
Vale observar que os valores aqui expostos podem ser lidos da seguinte maneira: valores maiores que 1, maior consumo de aço pela laje maciça; valores inferiores a 1, a laje nervurada consome mais aço em sua armadura.

Gráfico 17 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-I



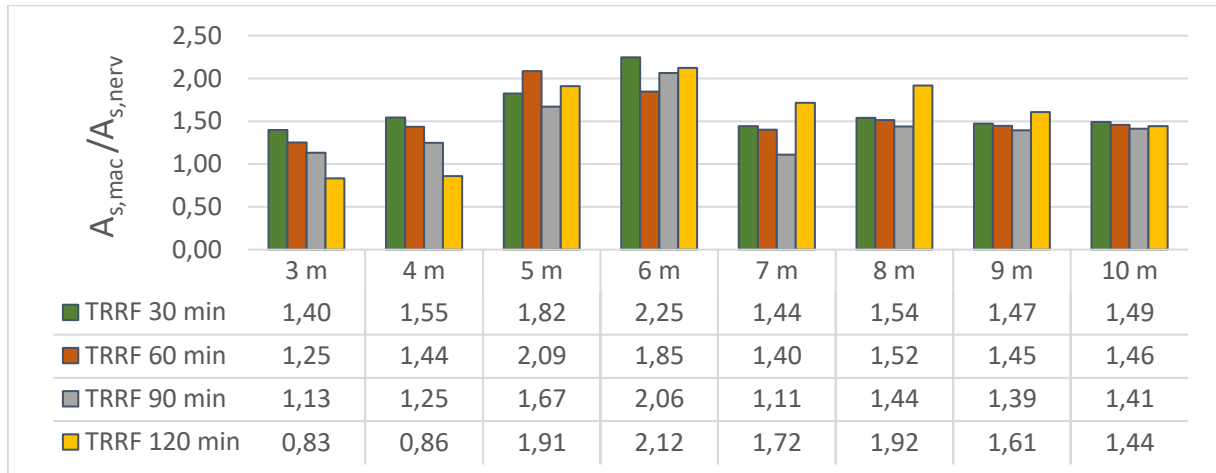
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 18 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-II



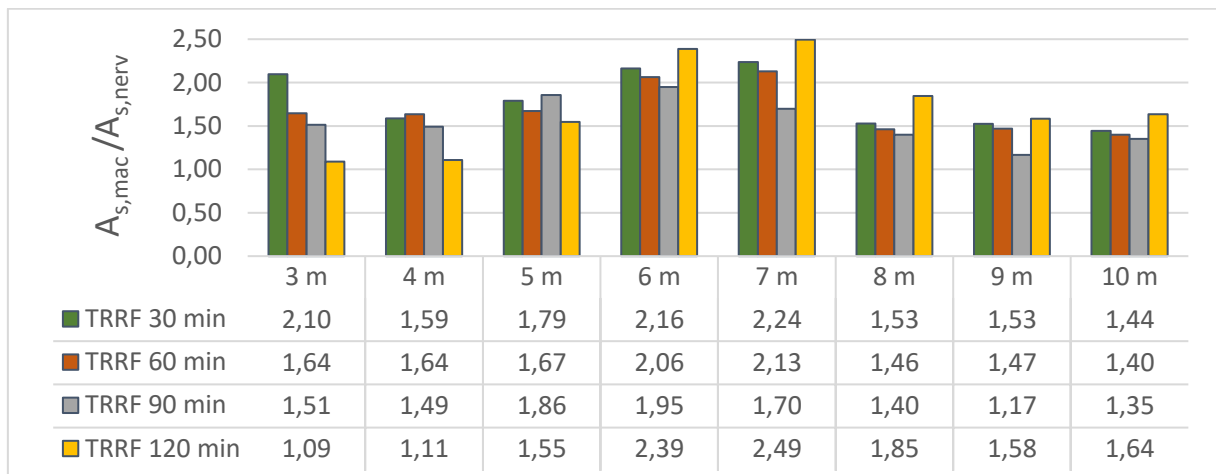
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 19 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-III



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 20 - Relação do consumo de aço das lajes para diferentes TRRF's e CAA-IV



Fonte: Elaborado pelo autor

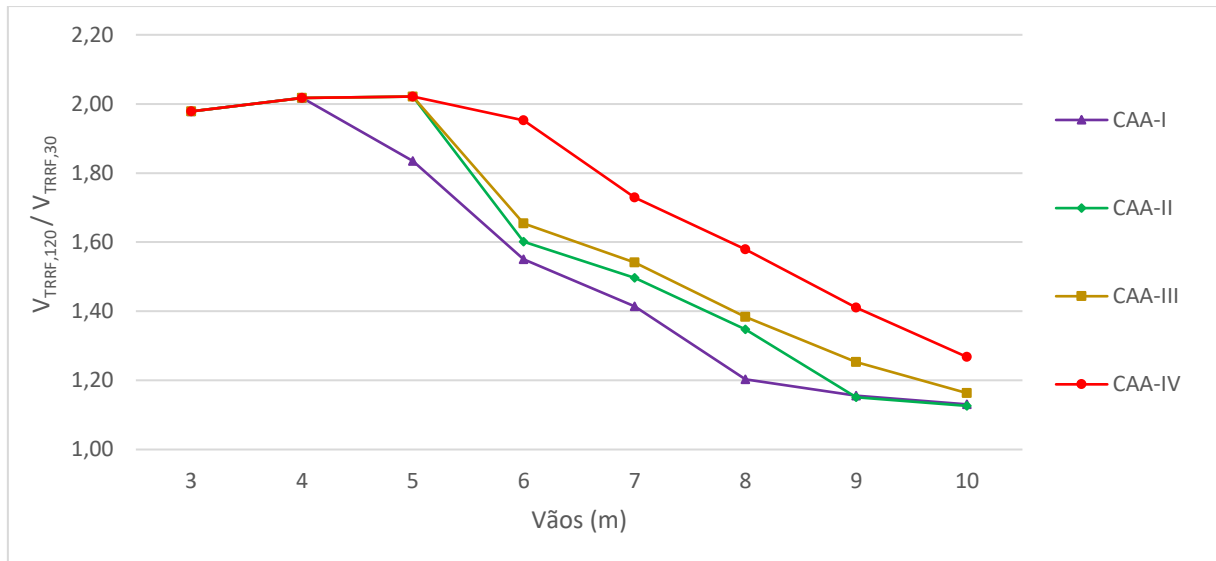
#### 4.1.6 Influência do TRRF para diferentes CAA's em lajes nervuradas

O gráfico 21, na sequência, foi construído com o interesse de se visualizar a influência da verificação de incêndio no consumo de materiais das lajes nervuradas em diferentes situações de agressividade ambiental.

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 CAA's.



Gráfico 21 - Relação do consumo de concreto das lajes nervuradas entre os TRRF's de 120 e 30 minutos para diferentes CAA's



Fonte: Elaborado pelo autor

Como comentado anteriormente, adotou-se o mínimo  $f_{ck}$  recomendado para as diferentes classes de agressividade ambiental, dessa forma foi possível a redução do consumo de material conforme o  $f_{ck}$  adotado foi aumentando, isso pois 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 ( $c_1$ ) das armaduras para garantir o isolamento térmico do elemento estrutural.

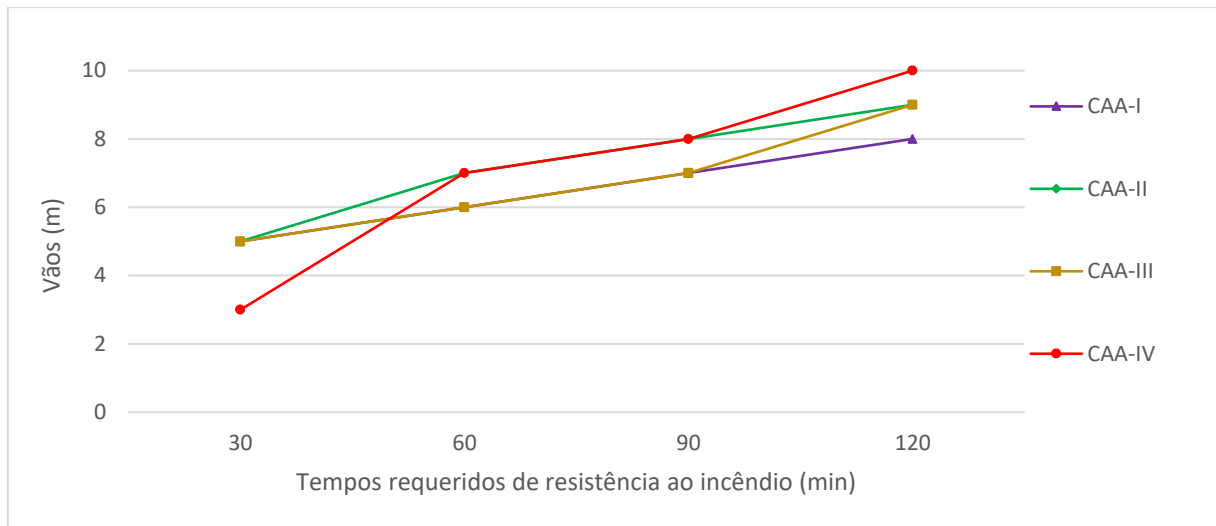
Ao analisar o gráfico 21 tem-se que a curva CAA-I tem razões de valores inferiores às das outras curvas, isso ocorre porque para a classe de agressividade ambiental I foi adotado  $f_{ck}$  de 20 MPa o que faz com que as dimensões obtidas pelo dimensionamento devido aos esforços de projeto, sejam mais próximas daquelas exigidas pela verificação da estrutura à situação de incêndio. Já com relação a classes de agressividade mais altas ocorre o inverso, isso 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 de concreto utilizados e maior peso próprio das estruturas.

#### 4.1.7 Vãos onde o consumo de concreto das lajes nervuradas passa a ser inferior ao das lajes maciças

No gráfico 22, estão indicados os vãos a partir dos quais as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto que as lajes maciças para as mesmas imposições de projeto.

Gráfico 22 – Indicação dos vãos onde o consumo de concreto das lajes nervuradas passa a ser inferior ao consumo das lajes maciças para diferentes CAA's e tempos de incêndio



Fonte: Elaborado pelo autor

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 onde 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 de 8 metros.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos quadros e gráficos construídos a partir do levantamento de materiais empregados no projeto das diferentes lajes maciças e nervuradas foi possível observar que sim, as lajes nervuradas demandam menor consumo de materiais que as lajes maciças conforme os vãos de projeto tendem a aumentar.

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 onde a 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 lajes para CAA-IV, no qual 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, com 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, onde as dimensões geométricas das lajes para os diferentes vãos não se altera (vide gráfico 12).

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 à quantidade dimensionada 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 lajes 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, pode-se ver isso nos casos com TRRF de 120 minutos onde o vãos onde as lajes nervuradas passam a consumir menos concreto que as lajes maciças são os iguais ou superiores a 8 metros.

As lajes nervuradas são sim 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.

## **5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Comparação sobre o projeto estrutural de lajes maciças e nervuradas em concreto armado na situação de incêndio utilizando sistema de cubetas plásticas nas lajes nervuradas;
- Comparação sobre o projeto estrutural de lajes maciças e nervuradas em concreto armado na situação de incêndio para lajes de geometria retangular armadas em apenas uma direção;
- Comparar os insumos envolvidos para o projeto de lajes maciças e nervuradas, custos envolvendo mão de obra, materiais como concreto, aço, formas e escoramento, e tempo de execução.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, G. B. M. L. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2012. 245 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. v.2. 4. ed. Rio Grande: Dunas. 2014. v. 4. 360 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012. 50 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019. 62 p.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Paulo: EdUFSCar. 2019. 415 p.
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 1. ed. São Paulo. Pini. 2009. v.2. 589 p.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Polícia Militar. Corpo de Bombeiros. Instrução Técnica n. 8: Resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo, 2019.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Polícia Militar. Corpo de Bombeiros. Instrução Técnica n. 9: Compartimentação horizontal e compartimentação vertical. São Paulo, 2019.
- SILVA, L. P. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. 85 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 240 p.
- SOUZA, C. G. S.; LOPES, R. C. **Estudo comparativo entre laje maciça convencional e lajes nervuradas**. 2016. 132 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- SOUZA, D. A.; SILVA, G. P. **Estrutura de concreto em situação de incêndio**. 2015. 135 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

# APÊNDICE

## Quadro 10 – Dimensionamento das lajes para CAA-I

	Tipo de laje	Vão (cm)	Dimensões das lajes maciças e nervuradas					f <sub>máx</sub> (cm)	f (cm)	V <sub>conc</sub> (m <sup>3</sup> )	A <sub>s,total</sub> (cm <sup>2</sup> )	g <sub>1</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
			h <sub>mín</sub> (cm)	h (cm)	ℓ <sub>0</sub> (cm)	b <sub>w</sub> (cm)	h <sub>nerv</sub> (cm)						a (cm)
TRRF 30 min	Maciça	300	6,0	8	-	-	-	-	1,276	0,53	0,72	6,300	200,00
		400	6,0	8	-	-	-	-	1,676	1,66	1,28	12,600	200,00
		500	6,0	11	-	-	-	-	2,076	1,71	2,75	20,000	275,00
		600	6,0	13	-	-	-	-	2,476	2,37	4,68	32,000	325,00
		700	6,0	16	-	-	-	-	2,876	2,73	7,84	37,600	400,00
		800	6,0	19	-	-	-	-	3,276	3,23	12,16	51,200	475,00
		900	6,0	23	-	-	-	-	3,676	3,43	18,63	57,600	575,00
	1000	6,0	26	-	-	-	-	4,076	3,91	26,00	80,000	650,00	
	Nervurada	300	6,0	6	45	12	10	13,50	1,276	0,24	0,93	4,890	259,38
		400	6,0	6	53	12	10	11,00	1,676	0,85	1,55	8,150	241,99
		500	6,0	7	49	12	10	12,00	2,076	1,51	2,71	14,715	271,34
		600	6,0	7	52	12	14	18,00	2,476	2,25	4,49	18,155	312,06
		700	6,0	7	50	12	18	15,00	2,876	2,61	6,81	26,300	347,19
		800	6,0	8	53	12	22	16,00	3,276	3,00	10,30	35,400	402,39
900		6,0	8	51	12	26	15,00	3,676	3,52	14,29	41,345	440,90	
1000	6,0	8	49	12	30	18,00	4,076	3,98	19,56	57,940	489,01		
TRRF 60 min	Maciça	300	8,0	8	-	-	-	-	1,276	0,53	0,72	6,300	200,00
		400	8,0	8	-	-	-	-	1,676	1,66	1,28	12,600	200,00
		500	8,0	11	-	-	-	-	2,076	1,71	2,75	20,000	275,00
		600	8,0	13	-	-	-	-	2,476	2,37	4,68	32,000	325,00
		700	8,0	16	-	-	-	-	2,876	2,73	7,84	37,600	400,00
		800	8,0	19	-	-	-	-	3,276	3,23	12,16	51,200	475,00
		900	8,0	23	-	-	-	-	3,676	3,43	18,63	57,600	575,00
	1000	8,0	26	-	-	-	-	4,076	3,91	26,00	80,000	650,00	
	Nervurada	300	8,0	8	45	12	10	13,50	1,276	0,19	1,11	5,520	309,38
		400	8,0	8	53	12	10	12,00	1,676	0,66	1,88	8,780	294,16
		500	8,0	8	49	12	10	12,00	2,076	1,30	2,96	15,345	296,34
		600	8,0	8	52	12	13	18,00	2,476	2,33	4,71	18,785	327,27
		700	8,0	8	50	12	17	15,00	2,876	2,75	7,11	26,930	362,63
		800	8,0	8	53	12	22	16,00	3,276	3,00	10,30	35,400	402,39
900		8,0	8	51	12	26	15,00	3,676	3,52	14,29	41,345	440,90	
1000	8,0	8	49	12	30	18,00	4,076	3,98	19,56	57,940	489,01		
TRRF 90 min	Maciça	300	10,0	10	-	-	-	-	1,276	0,32	0,90	4,725	250,00
		400	10,0	10	-	-	-	-	1,676	1,02	1,60	10,080	250,00
		500	10,0	11	-	-	-	-	2,076	1,71	2,75	20,000	275,00
		600	10,0	13	-	-	-	-	2,476	2,37	4,68	32,000	325,00
		700	10,0	16	-	-	-	-	2,876	2,73	7,84	37,600	400,00
		800	10,0	19	-	-	-	-	3,276	3,23	12,16	51,200	475,00
		900	10,0	23	-	-	-	-	3,676	3,43	18,63	57,600	575,00
	1000	10,0	26	-	-	-	-	4,076	3,91	26,00	80,000	650,00	
	Nervurada	300	10,0	10	45	12	10	13,50	1,276	0,16	1,29	6,150	359,38
		400	10,0	10	53	12	10	12,00	1,676	0,53	2,20	10,095	344,16
		500	10,0	10	49	12	10	12,00	2,076	0,97	3,46	16,290	346,34
		600	10,0	10	52	12	10	18,00	2,476	2,71	5,01	23,245	347,90
		700	10,0	10	50	12	16	15,00	2,876	2,58	7,90	28,190	403,06
		800	10,0	10	53	12	20	16,00	3,276	3,23	11,11	37,290	433,99
900		10,0	10	51	12	25	15,00	3,676	3,41	15,61	51,685	481,64	
1000	10,0	10	49	12	29	18,00	4,076	3,90	21,17	59,830	529,37		
TRRF 120 min	Maciça	300	12,0	12	-	-	-	-	1,276	0,22	1,08	6,300	300,00
		400	12,0	12	-	-	-	-	1,676	0,69	1,92	8,505	300,00
		500	12,0	12	-	-	-	-	2,076	1,42	3,00	17,000	300,00
		600	12,0	13	-	-	-	-	2,476	2,37	4,68	32,000	325,00
		700	12,0	16	-	-	-	-	2,876	2,73	7,84	37,600	400,00
		800	12,0	19	-	-	-	-	3,276	3,23	12,16	51,200	475,00
		900	12,0	23	-	-	-	-	3,676	3,43	18,63	57,600	575,00
	1000	12,0	26	-	-	-	-	4,076	3,91	26,00	80,000	650,00	
	Nervurada	300	12,0	12	41	16	16	15,50	1,276	0,06	1,85	8,265	513,22
		400	12,0	12	48	16	16	16,00	1,676	0,19	3,15	10,325	492,64
		500	12,0	12	45	16	16	14,00	2,076	0,34	4,93	12,845	492,64
		600	12,0	12	49	16	16	15,50	2,476	0,68	6,97	18,845	483,91
		700	12,0	12	46	16	16	17,00	2,876	1,26	9,62	26,105	490,99
		800	12,0	12	49	16	16	18,00	3,276	2,40	12,39	33,365	483,91
900		12,0	12	47	16	18	17,00	3,676	3,48	16,51	44,810	509,46	
1000	12,0	12	49	16	22	20,50	4,076	4,00	22,12	58,570	552,88		

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 11 - Dimensionamento das lajes para CAA-II

	Tipo de laje	Vão (cm)	Dimensões das lajes maciças e nervuradas					$f_{\text{máx}}$ (cm)	f (cm)	$V_{\text{conc}}$ (m³)	$A_{s,\text{total}}$ (cm²)	$g_1$ (kg/m²)	
			$h_{\text{mín}}$ (cm)	h (cm)	$\ell_0$ (cm)	$b_w$ (cm)	$h_{\text{nerv}}$ (cm)						a (cm)
TRRF 30 min	Maciça	300	6,0	8	-	-	-	-	1,276	0,47	0,72	6,300	200,00
		400	6,0	8	-	-	-	-	1,676	1,46	1,28	13,500	200,00
		500	6,0	10	-	-	-	-	2,076	1,87	2,50	27,200	250,00
		600	6,0	12	-	-	-	-	2,476	2,47	4,32	38,400	300,00
		700	6,0	15	-	-	-	-	2,876	2,77	7,35	37,600	375,00
		800	6,0	18	-	-	-	-	3,276	3,18	11,52	51,200	450,00
		900	6,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	6,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	80,000	600,00	
	Nervurada	300	6,0	6	45	12	10	13,50	1,276	0,21	0,93	4,890	259,38
		400	6,0	6	53	12	10	12,00	1,676	0,72	1,56	8,150	244,16
		500	6,0	6	49	12	10	12,00	2,076	1,42	2,46	14,400	246,34
		600	6,0	7	52	12	13	18,00	2,476	2,09	4,35	21,355	302,27
		700	6,0	7	50	12	16	15,00	2,876	2,79	6,43	26,300	328,06
		800	6,0	7	53	12	20	16,00	3,276	3,23	9,19	34,770	358,99
900		6,0	8	51	12	24	15,00	3,676	3,43	13,68	49,795	422,37	
1000	6,0	8	49	12	28	18,00	4,076	3,83	18,79	57,440	469,74		
TRRF 60 min	Maciça	300	8,0	8	-	-	-	-	1,276	0,47	0,72	6,300	200,00
		400	8,0	8	-	-	-	-	1,676	1,46	1,28	13,500	200,00
		500	8,0	10	-	-	-	-	2,076	1,87	2,50	27,200	250,00
		600	8,0	12	-	-	-	-	2,476	2,47	4,32	38,400	300,00
		700	8,0	15	-	-	-	-	2,876	2,77	7,35	37,600	375,00
		800	8,0	18	-	-	-	-	3,276	3,18	11,52	51,200	450,00
		900	8,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	8,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	80,000	600,00	
	Nervurada	300	8,0	8	45	12	10	13,50	1,276	0,17	1,11	5,520	309,38
		400	8,0	8	53	12	10	12,00	1,676	0,58	1,88	8,780	294,16
		500	8,0	8	49	12	10	12,00	2,076	1,08	2,96	15,345	296,34
		600	8,0	8	52	12	12	18,00	2,476	2,21	4,57	21,985	317,48
		700	8,0	8	50	12	16	15,00	2,876	2,53	6,92	26,930	353,06
		800	8,0	8	53	12	20	16,00	3,276	3,02	9,83	35,400	383,99
900		8,0	8	51	12	24	15,00	3,676	3,43	13,68	49,795	422,37	
1000	8,0	8	49	12	28	18,00	4,076	3,83	18,79	57,440	469,74		
TRRF 90 min	Maciça	300	10,0	10	-	-	-	-	1,276	0,28	0,90	6,300	250,00
		400	10,0	10	-	-	-	-	1,676	0,90	1,60	10,080	250,00
		500	10,0	10	-	-	-	-	2,076	1,87	2,50	27,200	250,00
		600	10,0	12	-	-	-	-	2,476	2,47	4,32	38,400	300,00
		700	10,0	15	-	-	-	-	2,876	2,77	7,35	37,600	375,00
		800	10,0	18	-	-	-	-	3,276	3,18	11,52	51,200	450,00
		900	10,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	10,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	80,000	600,00	
	Nervurada	300	10,0	10	45	12	10	13,50	1,276	0,14	1,29	6,150	359,38
		400	10,0	10	53	12	10	12,00	1,676	0,47	2,20	10,095	344,16
		500	10,0	10	49	12	10	12,00	2,076	0,83	3,46	16,290	346,34
		600	10,0	10	52	12	10	18,00	2,476	2,21	5,01	23,245	347,90
		700	10,0	10	50	12	14	15,00	2,876	2,70	7,53	33,190	383,93
		800	10,0	10	53	12	19	16,00	3,276	2,94	10,87	37,290	424,79
900		10,0	10	51	12	23	15,00	3,676	3,35	15,00	51,685	463,11	
1000	10,0	10	49	12	27	18,00	4,076	3,75	20,40	59,330	510,11		
TRRF 120 min	Maciça	300	12,0	12	-	-	-	-	1,276	0,19	1,08	6,300	300,00
		400	12,0	12	-	-	-	-	1,676	0,61	1,92	8,505	300,00
		500	12,0	12	-	-	-	-	2,076	1,25	3,00	20,000	300,00
		600	12,0	12	-	-	-	-	2,476	2,47	4,32	38,400	300,00
		700	12,0	15	-	-	-	-	2,876	2,77	7,35	37,600	375,00
		800	12,0	18	-	-	-	-	3,276	3,18	11,52	51,200	450,00
		900	12,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	12,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	80,000	600,00	
	Nervurada	300	12,0	12	41	16	16	15,50	1,276	0,06	1,85	8,265	513,22
		400	12,0	12	48	16	16	16,00	1,676	0,17	3,15	11,725	492,64
		500	12,0	12	45	16	16	14,00	2,076	0,30	4,93	14,245	492,64
		600	12,0	12	49	16	16	15,50	2,476	0,60	6,97	18,845	483,91
		700	12,0	12	46	16	16	17,00	2,876	1,09	9,62	26,105	490,99
		800	12,0	12	49	16	16	18,00	3,276	1,97	12,39	33,365	483,91
900		12,0	12	47	16	16	17,00	3,676	3,44	15,75	44,810	486,19	
1000	12,0	12	49	16	20	20,50	4,076	3,86	21,20	58,070	529,89		

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 12 - Dimensionamento das lajes para CAA-III

	Tipo de laje	Vão (cm)	Dimensões das lajes maciças e nervuradas					$f_{\text{máx}}$ (cm)	f (cm)	$V_{\text{conc}}$ (m³)	$A_{s,\text{total}}$ (cm²)	$g_1$ (kg/m²)	
			$h_{\text{mín}}$ (cm)	h (cm)	$\ell_0$ (cm)	$b_w$ (cm)	$h_{\text{nerv}}$ (cm)						a (cm)
TRRF 30 min	Maciça	300	6,0	10	-	-	-	-	1,276	0,25	0,90	7,560	250,00
		400	6,0	10	-	-	-	-	1,676	0,81	1,60	12,600	250,00
		500	6,0	10	-	-	-	-	2,076	1,68	2,50	32,000	250,00
		600	6,0	12	-	-	-	-	2,476	2,22	4,32	48,000	300,00
		700	6,0	15	-	-	-	-	2,876	2,49	7,35	44,800	375,00
		800	6,0	18	-	-	-	-	3,276	3,20	11,52	64,000	450,00
		900	6,0	21	-	-	-	-	3,676	3,62	17,01	72,000	525,00
	1000	6,0	24	-	-	-	-	4,076	3,98	24,00	83,750	600,00	
	Nervurada	300	6,0	6	45	12	10	13,50	1,276	0,19	0,93	5,410	259,38
		400	6,0	6	53	12	10	12,00	1,676	0,64	1,56	8,150	244,16
		500	6,0	6	49	12	10	12,00	2,076	1,21	2,46	17,550	246,34
		600	6,0	7	52	12	12	18,00	2,476	2,07	4,21	21,355	292,48
		700	6,0	7	50	12	15	15,00	2,876	2,68	6,24	31,040	318,49
		800	6,0	7	53	12	19	16,00	3,276	3,05	8,95	41,580	349,79
900		6,0	7	51	12	23	15,00	3,676	3,66	12,57	48,850	388,11	
1000	6,0	7	49	12	27	18,00	4,076	3,98	17,40	56,180	435,11		
TRRF 60 min	Maciça	300	8,0	10	-	-	-	-	1,276	0,25	0,90	7,560	250,00
		400	8,0	10	-	-	-	-	1,676	0,81	1,60	12,600	250,00
		500	8,0	10	-	-	-	-	2,076	1,68	2,50	32,000	250,00
		600	8,0	12	-	-	-	-	2,476	2,22	4,32	48,000	300,00
		700	8,0	15	-	-	-	-	2,876	2,49	7,35	44,800	375,00
		800	8,0	18	-	-	-	-	3,276	3,20	11,52	64,000	450,00
		900	8,0	21	-	-	-	-	3,676	3,62	17,01	72,000	525,00
	1000	8,0	24	-	-	-	-	4,076	3,98	24,00	83,750	600,00	
	Nervurada	300	8,0	8	45	12	10	13,50	1,276	0,15	1,11	6,040	309,38
		400	8,0	8	53	12	10	12,00	1,676	0,52	1,88	8,780	294,16
		500	8,0	8	49	12	10	12,00	2,076	0,94	2,96	15,345	296,34
		600	8,0	8	52	12	10	18,00	2,476	1,42	4,29	25,985	297,90
		700	8,0	8	50	12	15	15,00	2,876	2,45	6,73	31,930	343,49
		800	8,0	8	53	12	18	16,00	3,276	3,20	9,36	42,210	365,59
900		8,0	8	51	12	22	15,00	3,676	3,54	13,08	49,795	403,84	
1000	8,0	8	49	12	26	18,00	4,076	3,81	18,02	57,440	450,47		
TRRF 90 min	Maciça	300	10,0	10	-	-	-	-	1,276	0,20	0,90	7,560	250,00
		400	10,0	10	-	-	-	-	1,676	0,66	1,60	12,600	250,00
		500	10,0	10	-	-	-	-	2,076	1,35	2,50	27,200	250,00
		600	10,0	12	-	-	-	-	2,476	2,22	4,32	48,000	300,00
		700	10,0	15	-	-	-	-	2,876	2,49	7,35	36,800	375,00
		800	10,0	18	-	-	-	-	3,276	3,20	11,52	64,000	450,00
		900	10,0	21	-	-	-	-	3,676	3,62	17,01	72,000	525,00
	1000	10,0	24	-	-	-	-	4,076	3,98	24,00	83,750	600,00	
	Nervurada	300	10,0	10	45	12	10	13,50	1,276	0,13	1,29	6,670	359,38
		400	10,0	10	53	12	10	12,00	1,676	0,43	2,20	10,095	344,16
		500	10,0	10	49	12	10	12,00	2,076	0,74	3,46	16,290	346,34
		600	10,0	10	52	12	10	18,00	2,476	1,88	5,01	23,245	347,90
		700	10,0	10	50	12	13	15,00	2,876	2,63	7,34	33,190	374,36
		800	10,0	10	53	12	17	16,00	3,276	3,12	10,40	44,440	406,39
900		10,0	10	51	12	21	15,00	3,676	3,49	14,40	51,685	444,58	
1000	10,0	10	49	12	25	18,00	4,076	3,79	19,63	59,330	490,84		
TRRF 120 min	Maciça	300	12,0	12	-	-	-	-	1,276	0,17	1,08	7,560	300,00
		400	12,0	12	-	-	-	-	1,676	0,55	1,92	10,080	300,00
		500	12,0	12	-	-	-	-	2,076	1,13	3,00	27,200	300,00
		600	12,0	12	-	-	-	-	2,476	2,22	4,32	40,000	300,00
		700	12,0	15	-	-	-	-	2,876	2,49	7,35	44,800	375,00
		800	12,0	18	-	-	-	-	3,276	3,20	11,52	64,000	450,00
		900	12,0	21	-	-	-	-	3,676	3,63	17,01	72,000	525,00
	1000	12,0	24	-	-	-	-	4,076	4,06	24,00	83,750	600,00	
	Nervurada	300	12,0	12	41	16	16	15,50	1,276	0,05	1,85	9,065	513,22
		400	12,0	12	48	16	16	16,00	1,676	0,15	3,15	11,725	492,64
		500	12,0	12	45	16	16	14,00	2,076	0,27	4,93	14,245	492,64
		600	12,0	12	49	16	16	15,50	2,476	0,55	6,97	18,845	483,91
		700	12,0	12	46	16	16	17,00	2,876	0,98	9,62	26,105	490,99
		800	12,0	12	49	16	16	18,00	3,276	1,71	12,39	33,365	483,91
900		12,0	12	47	16	16	17,00	3,676	2,90	15,75	44,810	486,19	
1000	12,0	12	49	16	18	20,50	4,076	3,92	20,28	58,070	506,90		

Fonte: Elaborado pelo autor



Quadro 13 - Dimensionamento das lajes para CAA-IV

	Tipo de laje	Vão (cm)	Dimensões das lajes maciças e nervuradas					$f_{\text{máx}}$ (cm)	f (cm)	$V_{\text{conc}}$ (m³)	$A_{s,\text{total}}$ (cm²)	$g_1$ (kg/m²)	
			$h_{\text{mín}}$ (cm)	h (cm)	$\ell_0$ (cm)	$b_w$ (cm)	$h_{\text{nerv}}$ (cm)						a (cm)
TRRF 30 min	Maciça	300	6,0	11	-	-	-	-	1,276	0,17	0,99	12,000	275,00
		400	6,0	11	-	-	-	-	1,676	0,55	1,76	16,000	275,00
		500	6,0	11	-	-	-	-	2,076	1,14	2,75	32,000	275,00
		600	6,0	11	-	-	-	-	2,476	2,27	3,96	56,250	275,00
		700	6,0	13	-	-	-	-	2,876	2,85	6,37	70,000	325,00
		800	6,0	16	-	-	-	-	3,276	3,07	10,24	64,000	400,00
		900	6,0	19	-	-	-	-	3,676	3,37	15,39	75,000	475,00
	1000	6,0	21	-	-	-	-	4,076	4,01	21,00	100,000	525,00	
	Nervurada	300	6,0	6	45	12	10	13,50	1,276	0,16	0,93	5,725	259,38
		400	6,0	6	53	12	10	12,00	1,676	0,54	1,56	10,085	244,16
		500	6,0	6	49	12	10	12,00	2,076	0,98	2,46	17,865	246,34
		600	6,0	6	52	12	10	18,00	2,476	2,46	3,57	26,010	247,90
		700	6,0	6	50	12	14	15,00	2,876	2,60	5,57	31,300	283,93
		800	6,0	6	53	12	17	16,00	3,276	3,20	7,84	41,920	306,39
900		6,0	6	51	12	21	15,00	3,676	3,40	11,16	49,165	344,58	
1000	6,0	6	49	12	24	18,00	4,076	4,01	15,25	69,245	381,21		
TRRF 60 min	Maciça	300	8,0	11	-	-	-	-	1,276	0,17	0,99	12,000	275,00
		400	8,0	11	-	-	-	-	1,676	0,55	1,76	16,000	275,00
		500	8,0	11	-	-	-	-	2,076	1,14	2,75	32,000	275,00
		600	8,0	11	-	-	-	-	2,476	2,27	3,96	56,250	275,00
		700	8,0	13	-	-	-	-	2,876	2,85	6,37	70,000	325,00
		800	8,0	16	-	-	-	-	3,276	3,07	10,24	64,000	400,00
		900	8,0	19	-	-	-	-	3,676	3,37	15,39	75,000	475,00
	1000	8,0	21	-	-	-	-	4,076	4,01	21,00	100,000	525,00	
	Nervurada	300	8,0	8	45	12	10	13,50	1,276	0,13	1,11	7,295	309,38
		400	8,0	8	53	12	10	12,00	1,676	0,44	1,88	9,780	294,16
		500	8,0	8	49	12	10	12,00	2,076	0,78	2,96	19,125	296,34
		600	8,0	8	52	12	10	18,00	2,476	1,92	4,29	27,270	297,90
		700	8,0	8	50	12	13	15,00	2,876	2,47	6,36	32,875	324,36
		800	8,0	8	53	12	16	16,00	3,276	3,13	8,89	43,810	347,19
900		8,0	8	51	12	20	15,00	3,676	3,33	12,48	51,055	385,31	
1000	8,0	8	49	12	23	18,00	4,076	3,86	16,86	71,450	421,57		
TRRF 90 min	Maciça	300	10,0	11	-	-	-	-	1,276	0,17	0,99	12,000	275,00
		400	10,0	11	-	-	-	-	1,676	0,55	1,76	16,000	275,00
		500	10,0	11	-	-	-	-	2,076	1,14	2,75	32,000	275,00
		600	10,0	11	-	-	-	-	2,476	2,27	3,96	56,250	275,00
		700	10,0	13	-	-	-	-	2,876	2,85	6,37	70,000	325,00
		800	10,0	16	-	-	-	-	3,276	3,07	10,24	64,000	400,00
		900	10,0	19	-	-	-	-	3,676	3,37	15,39	75,000	475,00
	1000	10,0	21	-	-	-	-	4,076	4,01	21,00	100,000	525,00	
	Nervurada	300	10,0	10	45	12	10	13,50	1,276	0,11	1,29	7,925	359,38
		400	10,0	10	53	12	10	12,00	1,676	0,36	2,20	10,725	344,16
		500	10,0	10	49	12	10	12,00	2,076	0,63	3,46	17,235	346,34
		600	10,0	10	52	12	10	18,00	2,476	1,45	5,01	28,845	347,90
		700	10,0	10	50	12	11	15,00	2,876	2,59	6,96	41,265	355,23
		800	10,0	10	53	12	14	16,00	3,276	3,27	9,70	45,700	378,79
900		10,0	10	51	12	18	15,00	3,676	3,66	13,50	64,310	416,78	
1000	10,0	10	49	12	22	18,00	4,076	3,82	18,48	73,970	461,94		
TRRF 120 min	Maciça	300	12,0	12	-	-	-	-	1,276	0,14	1,08	12,000	300,00
		400	12,0	12	-	-	-	-	1,676	0,46	1,92	16,000	300,00
		500	12,0	12	-	-	-	-	2,076	0,95	3,00	27,200	300,00
		600	12,0	12	-	-	-	-	2,476	1,87	4,32	48,000	300,00
		700	12,0	13	-	-	-	-	2,876	2,85	6,37	70,000	325,00
		800	12,0	16	-	-	-	-	3,276	3,07	10,24	64,000	400,00
		900	12,0	19	-	-	-	-	3,676	3,37	15,39	75,000	475,00
	1000	12,0	21	-	-	-	-	4,076	4,01	21,00	100,000	525,00	
	Nervurada	300	12,0	12	41	16	16	15,50	1,276	0,04	1,85	11,010	513,22
		400	12,0	12	48	16	16	16,00	1,676	0,13	3,15	14,420	492,64
		500	12,0	12	45	16	16	14,00	2,076	0,23	4,93	17,595	492,64
		600	12,0	12	49	16	16	15,50	2,476	0,43	6,97	20,105	483,91
		700	12,0	12	46	16	16	17,00	2,876	0,83	9,62	28,080	490,99
		800	12,0	12	49	16	16	18,00	3,276	1,41	12,39	34,655	483,91
900		12,0	12	47	16	16	17,00	3,676	2,27	15,75	47,415	486,19	
1000	12,0	12	49	16	16	20,50	4,076	3,66	19,36	61,090	483,91		

Fonte: Elaborado pelo autor