

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO

CAMILA MOTHÉ SILVA
MARIANA BERTOLDE MARTINS

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS EM TEMPERATURA AMBIENTE**

VITÓRIA
2021

CAMILA MOTHÉ SILVA
MARIANA BERTOLDE MARTINS

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS EM TEMPERATURA AMBIENTE**

Projeto de Graduação apresentado em cumprimento às exigências curriculares do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Profª. Drª. Adenílcia Fernanda Grobério Calenzani
Co-orientador: Engº. Lucas Fadini Favarato

VITÓRIA
2021

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS EM TEMPERATURA AMBIENTE**

CAMILA MOTHÉ SILVA
MARIANA BERTOLDE MARTINS

Projeto de Graduação apresentado em cumprimento às exigências curriculares do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 08 de outubro de 2021.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof^ª. Dr^ª. Adenilcia Fernanda Groberio Calenzani
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Eng^º. Lucas Fadini Favarato
Universidade Federal do Espírito Santo
ArcelorMittal Tubarão
Co-orientador

Prof^ª. Dr^ª. Juliana da Cruz Vianna Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora interna

Eng^ª. Bianca Barros
ArcelorMittal Perflor
Examinadora externa

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos deu forças em todo o caminho até aqui.

À nossa família, pelo incentivo, amor e apoio incondicional.

À nossa professora e orientadora, Fernanda, que nos fez despertar interesse em estruturas mistas e pela excelente orientação. Obrigada por todo o suporte, apoio e atenção.

Ao nosso orientador, Lucas, por toda a disponibilidade e prontidão para tirar nossas dúvidas. Obrigada pelo apoio e incentivo desde sempre.

Aos nossos amigos, colegas de faculdade e companheiros de trabalho que fizeram parte da nossa formação.

À Universidade Federal do Espírito Santo, por toda a jornada de estudo, conhecimento e experiências.

RESUMO

As lajes mistas de aço e concreto são formadas por chapas perfiladas que trabalham, na fase de construção, como forma estrutural para suportar as ações permanentes e sobrecargas impostas ao sistema e, depois da cura, funcionam como parte ou totalidade da armadura de tração da laje, garantindo o comportamento misto entre aço e concreto. Com isso, é possível eliminar em partes ou totalmente a necessidade de escoramentos, diminuindo consideravelmente a necessidade de mão de obra. Nesse contexto, as lajes mistas possuem um enorme potencial na construção civil e seu dimensionamento é comumente realizado através de catálogos e manuais disponibilizados pelos fabricantes das fôrmas. Contudo, como existem poucos *softwares* ofertados para análise e dimensionamento que otimizem o trabalho do projetista, este estudo tem como objetivo desenvolver um programa computacional através de planilhas no Microsoft Office Excel, implementada em Microsoft Office Visual Basic for Application 2016 (VBA). Com base na norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008) e na literatura americana e portuguesa, a ferramenta engloba os estados limites-últimos de momento fletor, esforço cortante vertical e longitudinal e estado-limite de serviço de flecha, antes e depois da cura, utilizando as fôrmas de aço galvanizado Polydeck 59S fabricados pela PERFILOR no Brasil. Os resultados do programa são condizentes com os dados obtidos pela literatura e pelas normas vigentes.

Palavras-chave: Lajes mistas, Dimensionamento, *Software*, Aço, Concreto, Fôrmas Metálicas.

ABSTRACT

Steel-concrete composite slabs are formed by profiled sheets that work, in the construction phase, as a structural formwork to support the permanent actions and overloads imposed on the system and after the concrete hardening work partial or totally as the slab's tensile reinforcement, ensuring the composite behavior between steel and concrete. With this, it is possible to eliminate partial or totally the need for shoring, reducing drastically the need for labor. In this context, composite slabs have great potential in civil construction and their design is commonly performed through catalogs and manuals made available by the formwork manufacturers. However, since there are not much software offered for analysis and design that optimize the designer's work, this study aims to develop a computer program through spreadsheets in Microsoft Office Excel, implemented in Microsoft Office Visual Basic for Application 2016 (VBA). Based on the Brazilian standard NBR 8800 (ABNT, 2008) and on the American and Portuguese literature, the tool encompasses the ultimate limit states of bending moment, vertical and longitudinal shear force, and shear service limit state, before and after the concrete hardening, using Polydeck 59S galvanized steel formwork manufactured by PERFILOR in Brazil. The results of the program are consistent with the data obtained in the literature and current regulations.

Keywords: Composite slabs; Design; Software; Steel; Concrete; Profiled Sheet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de Laje Mista Polydeck 59S.	16
Figura 2: Tipos de Interligação de Lajes Mistas	17
Figura 3: Laje Mista com fôrma colaborante Polydeck 59S	18
Figura 4: Trajetórias de equilíbrio de uma placa comprimida	24
Figura 5 - Discretização da seção transversal para análise da seção submetida a momento fletor positivo	25
Figura 6 - Deformada correspondente à flambagem local - Momento fletor positivo	25
Figura 7 - Deformada correspondente à flambagem local - Momento fletor negativo.	26
Figura 8 - Deformada correspondente à flambagem distorcional - Momento fletor positivo.	26
Figura 9 - Resultado da análise para espessura de 0,80 mm - Momento fletor positivo.	27
Figura 10 - Resultado da análise para espessura de 0,95 mm - Momento fletor positivo.	27
Figura 11 - Resultado da análise para espessura de 1,25 mm - Momento fletor positivo.	28
Figura 12 - Resultado da análise para espessura de 0,80 mm - Momento fletor negativo.....	28
Figura 13 - Resultado da análise para espessura de 0,95 mm - Momento fletor negativo.....	29
Figura 14 - Resultado da análise para espessura de 1,25 mm - Momento fletor negativo.....	29
Figura 15 - Seção transversal trapezoidal com indicação das dimensões	31
Figure 16 - Comprimento mínimo de apoio	38
Figura 17: Mossas das fôrmas metálicas	38
Figura 18: Modos de colapso da seção mista.	40
Figura 19: Diagrama de tensões para momento positivo - Linha neutra plástica acima da fôrma de aço.	41
Figura 20: Diagrama de tensões para momento positivo - Linha neutra plástica na fôrma de aço.	42
Figura 21: Diagrama de tensões com formação de binário.	43

Figura 22: Distribuição de tensões com linha neutra plástica interceptando a chapa perfilada.....	45
Figura 23: Lajes mistas de aço e concreto.....	47
Figura 24: Relação entre o modo de colapso e o vão da laje.....	48
Figura 25: Diagrama com tensões que geram o braço de alavanca.	48
Figura 26: Determinação do comprimento do vão de cisalhamento.....	51
Figura 27 - Representação do vão equivalente para lajes contínuas.	51
Figura 28 : Área resistente do concreto.	53
Figura 29: Homogeneização da seção transversal mista.	55
Figura 30: Interface inicial do programa Scale Deck.	62
Figura 31: Janela de dados de entrada das ações.....	63
Figura 32: Janela de dados de entrada das propriedades.	64
Figura 33: Janela de dados de saída.	65
Figura 34: Seção da laje com fôrma Polydeck59S.....	66
Figura 35: Características mecânicas do perfil Polydeck 59S.....	66
Figura 36: Propriedades dos materiais.....	71
Figura 37: Valores de m e k para o Polydeck 59S.....	73
Figura 38: Seção da laje em 1000mm.....	75
Figura 39: Demonstração da largura transformada da laje.	76
Figura 40: Situação com momento fletor negativo ocorrendo na laje.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações do momento solicitante de cálculo	57
Tabela 2 - Equações do cortante solicitante de cálculo	57
Tabela 3 - Equações do deslocamento máximo.....	57
<i>Tabela 4- Valores obtidos pela validação da laje biapoiada.....</i>	<i>86</i>
Tabela 5 - Valores obtidos pelo programa da laje biapoiada	86
Tabela 6 - Comparação dos resultados da laje biapoiada	87
Tabela 7 - Valores obtidos pela validação da laje contínua	87
Tabela 8 - Valores obtidos pelo programa da laje contínua	88
Tabela 9 - Comparação dos resultados da laje contínua	88

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	Altura do bloco de compressão da laje;
a'	Distância entre enrijecedores transversais de alma;
b	Largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;
b_F	Largura da parte plana de um elemento;
b_n	Largura entre duas nervuras consecutivas;
b_o	É a largura média das nervuras;
d_F	Distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;
e	Distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;
e_p	Distância da linha neutra plástica da seção efetiva da fôrma à sua face inferior;
f_{cd}	Valor da resistência de cálculo do concreto;
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração direta característica inferior do concreto
f_{sd}	Tensão de escoamento de projeto do aço da armadura;
f_{uF}	Resistência a ruptura do aço da fôrma da laje;
f_y	Resistência ao escoamento do aço virgem;
f_{yF}	Resistência ao escoamento do aço da fôrma;
f_{yFd}	Resistência de cálculo do aço da fôrma da laje;
h	Altura da parte plana da alma da fôrma de aço;
h_F	Altura da fôrma de aço;
h_t	Altura total da laje, incluindo a fôrma e o concreto;
k	Constante empírica;
k_v	Coeficiente de flambagem da alma por cisalhamento;
$l_{b,nec}$	Comprimento de ancoragem necessário, dado na ABNT NBR 6118 para o concreto de densidade normal;
m	Constante empírica;
$q_{s,const}$	Cargas em serviço atuando na fase de construção;

$q_{u,const}$	Cargas últimas atuando na fase de construção.
q_{var}	Carga distribuída devido a ações variáveis;
t	Espessura da chapa de aço da fôrma;
t_c	É a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;
y	Distância entre as resultantes da força de compressão do concreto e da força de tração na chapa de aço;
z	Braço de alavanca do momento fletor;
z_c	Distância do centro de gravidade da área comprimida de concreto ao topo da laje;
z_s	Distância da armadura negativa ao topo da laje;

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A_{F,ef}$	Área da seção efetiva da fôrma;
A_s	Área da armadura longitudinal de tração;
A_v	Área resistente do concreto;
E	Módulo de Resistência Elástico;
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto, tomada conforme ABNT NBR 6118:2014;
E_s	Módulo de elasticidade do aço, tomado como 200 GPa;
I_{ef}	Momento de inércia efetivo da seção;
I_g	Momento de inércia da seção bruta;
$I_{s,min}$	Momento de inércia mínimo de um enrijecedor simples ou duplo, em relação ao eixo contido no plano médio da alma.
$I_{x,forma}$	Momento de inércia da seção da fôrma;
$I_{x,tr}$	Momento de inércia da seção homogeneizada;
L_F	Vão teórico da laje na direção das nervuras;
L_s	Vão de cisalhamento;
M_{dist}	Momento fletor de flambagem distorcional elástica;
M_e	Momento fletor de flambagem lateral com torção elástica;
M_l	Momento fletor de flambagem local elástica;

M_n	Momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os ELS;
M_{pa}	Momento de plastificação de cálculo da fôrma;
$M_{pl.Rd,neg}$	Momento fletor resistente plástico negativo;
M_{pr}	Momento de plastificação de cálculo da fôrma reduzido pelo efeito da força axial N_{cF} ;
M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo;
M_{Rdist}	Momento fletor resistente nominal associado à flambagem distorcional;
M_{Re}	Momento fletor resistente nominal associado à flambagem global;
M_{Rk}	Valor característico do momento fletor resistente, considerado como o menor entre os valores característicos do momento fletor resistente associado às flambagens global (M_{Re}), local (M_{Rl}) e distorcional (M_{Rdist});
M_{Rl}	Momento fletor resistente nominal associado à flambagem local;
M_{Rser}	Momento fletor resistente, calculado conforme equações do MRD, porém substituindo Wf_y por M_n ;
M_{Sd}	Momento solicitante de cálculo;
N_c	Força de compressão do concreto situado na nervura da fôrma;
N_{cF}	Força de compressão do concreto;
N_{dist}	Força axial de compressão relacionado à flambagem distorcional;
N_e	Força axial de compressão relacionado à flambagem global;
N_l	Força axial de compressão relacionado à flambagem local;
N_{pa}	Força de resistência do aço;
N_s	Força de tração na armadura A_s ;
P_F	Peso próprio da fôrma;
PP_c	Peso próprio do concreto;
P_R	Peso do revestimento;
P_S	Sobrecarga de utilização;
$V_{l.Rd}$	Força cortante longitudinal resistente de cálculo;
$V_{máx}$	Limite da força cortante, expresso em newton (N), relativo a 1000 mm de largura;
V_{Sd}	Esforço cortante solicitante de cálculo;

$V_{v,c,Rd}$	Força cortante vertical resistente de cálculo do concreto;
$V_{v,F,Rd}$	Força cortante vertical resistente de cálculo da fôrma de aço;
W	Módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;
Z_{pl}	Módulo de flexão plástico.

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α	Relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento, quando a LNP se encontra na fôrma;
α_E	Razão modular;
γ_{s1}	Coeficiente de ponderação da resistência;
δ_{LIM}	Deslocamento limite.
δ_{max}	Valor máximo do deslocamento vertical;
λ_0	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global;
λ_{dist}	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional;
λ_l	Índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local;
λ_w	Razão entre altura e espessura da parte plana da fôrma de aço;
ρ	Razão entre A_s e A_v ;
σ	Valor de tensão na placa comprimida;
σ_{cr}	Tensão crítica de flambagem;
σ_{dist}	Fator de carga distorcional, encontrado por meio do programa CUFSM;
σ_e	Fator de carga global, encontrado por meio do programa CUFSM;
σ_l	Fator de carga local, encontrado por meio do programa CUFSM;
τ_{Rd}	Tensão de cisalhamento resistente de cálculo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	16
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 OBJETIVO	19
1.4 METODOLOGIA	19
1.5 ESCOPO DO TRABALHO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS LAJES MISTAS ANTES DA CURA DO CONCRETO	21
2.2.1 Considerações iniciais de dimensionamento	21
2.2.1.1 Método da Resistência Direta	22
2.2.1.2 Análise de estabilidade elástica	23
2.2.1.3 Modos de flambagem sob flexão simples	25
2.2.2 Dimensionamento	30
2.2.2.1 Requisitos de segurança para fôrmas de aço	30
2.2.2.1.1 Material	30
2.2.2.1.2 Dimensões	30
2.2.2.3 Ações a serem consideradas	31
2.2.3 Estado Limite Último	31
2.2.4 Estado Limite de Serviço	36
2.3 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS LAJES MISTAS APÓS A CURA DO CONCRETO	37
2.3.1 Disposições Construtivas	37
2.3.2 Estados Limites Últimos	38
2.3.2.1 Momento fletor positivo resistente de cálculo	40

2.3.2.1.1 Linha Neutra Plástica acima da fôrma de aço	40
2.3.2.1.2 Linha Neutra Plástica na fôrma de aço	42
2.3.2.2 Momento fletor negativo resistente de cálculo.....	44
2.3.2.3 Cisalhamento Longitudinal.....	46
2.3.2.4 Cisalhamento Vertical	51
2.3.3 Estado Limite de Serviço	54
2.3.3.1 Fissuração do concreto	54
2.3.3.2 Deslocamento Vertical	54
2.3.4 Abertura em Lajes Mistas	56
2.4. ESFORÇOS SOLICITANTES	56
3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	59
3.1 INTRODUÇÃO	59
3.2 A IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA	59
3.3 SOBRE O PROGRAMA <i>SCALE DECK</i>	59
3.4 APLICABILIDADE DO PROGRAMA.....	60
3.5 FLUXOGRAMAS DE CÁLCULO.....	61
3.6 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA	62
3.7 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA	65
3.7.1 Exemplos de validação desenvolvidos	65
3.8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	85
3.9 COMPARAÇÃO DO <i>SCALE DECK</i> COM O CATÁLOGO DA PERFILOR	89
4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
4.1 CONCLUSÕES.....	91
4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS.....	95

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As lajes mistas, comumente conhecidas como lajes com fôrma de aço incorporada, são constituídas por fôrmas de aço (*steel decks*), capazes de suportar o concreto antes da cura, funcionando também como plataforma de trabalho durante a etapa de execução do piso e armadura de tração da laje após o endurecimento do concreto, conforme EN 1994-1-1 (CEN, 2004).

Esse tipo de solução foi introduzido na América por volta de 1950, principalmente após o desenvolvimento dos conectores de cisalhamento que tornou possível conectar as lajes às vigas (JOHNSON, 2006). Até hoje, elas são amplamente utilizadas por conta da segurança na execução, sustentabilidade e economia (PERFILOR, 2000). O sistema de laje mista é tal como se observa na Figura 1.



Figura 1: Sistema de Laje Mista Polydeck 59S.

Fonte: ArcelorMittal Perfilor (2021)

Este sistema é normalmente utilizado em construções comerciais, industriais, de lazer, de saúde e residenciais, devido à velocidade da construção e economia estrutural geral que pode ser alcançada. Embora mais frequentemente usadas em edifícios com estrutura de aço, as lajes mistas podem ser apoiadas em alvenaria ou componentes de concreto (RACKHAM, 2009).

A união entre os materiais é garantida por dispositivos capazes de transferir o cisalhamento na interface entre eles, tais como as mossas ou reentrâncias dos perfis de

aço (Figura 2). Desse modo, as fôrmas moldam e sustentam a camada de concreto em sua parte superior, proporcionando leveza ao sistema e agilidade na execução quando comparados às lajes tradicionais de concreto armado.

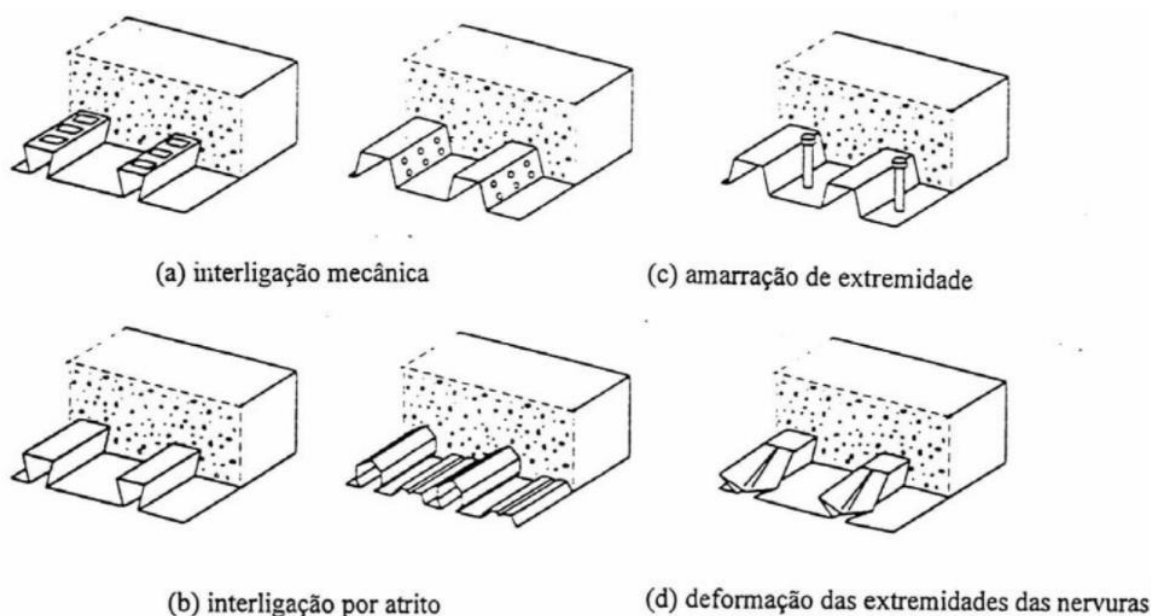


Figura 2: Tipos de Interligação de Lajes Mistas

Fonte: EUROCODE (CEN, 2004)

As vantagens deste sistema são inúmeras, entre as quais se destacam a redução no desperdício de material, pois a própria fôrma serve como armadura de tração da laje, facilidade de instalação e maior rapidez construtiva, facilidade para passagem de dutos e de fixação dos forros. Na maioria dos casos, essas lajes dispensam escoramentos, além de proporcionarem uma maior segurança do trabalho, visto que o *steel deck* funciona como plataforma de serviço e proteção dos operários que trabalham nos andares inferiores.

No âmbito mundial, existem vários tipos de fôrmas, com variações de tamanho, espessura, altura e geometria, podendo ser fôrmas trapezoidais ou reentrantes. No Brasil, existem poucas empresas que fabricam a fôrma-telha, sendo elas a ArcelorMittal Perfilor (Figura 3) e a Metform, que produzem fôrmas trapezoidais com espessuras entre 0,80 mm e 1,25 mm. Além disso, as lajes mistas são comumente dimensionadas como biapoiadas, mas é possível atingir ainda mais economia e eficiência em projeto quanto dimensionadas como contínuas ao longo dos apoios intermediários, o que permite uma melhor distribuição de momentos fletores. (CALENZANI, 2019)



Figura 3: Laje Mista com fôrma colaborante Polydeck 59S
Fonte: ArcelorMittal Perfilor (2021).

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar das diversas vantagens oferecidas pelo sistema de lajes com fôrma de aço incorporada, no Brasil, o sistema ainda é pouco difundido em relação aos métodos tradicionais de construção de lajes em concreto armado. Essa situação pode ser justificada, em parte, pela escassez de ferramentas computacionais que facilitem o cálculo e dimensionamento de lajes mistas.

O dimensionamento de lajes mistas requer um considerável número de verificações de cálculo uma vez que, como em qualquer sistema misto, as lajes mistas devem ser verificadas nas fases de construção e de serviço, respectivamente antes e depois da cura do concreto.

Tradicionalmente o dimensionamento das lajes mistas é feito com auxílio de tabelas de vãos e cargas e, apesar dessas ferramentas serem excelentes, todo o fluxo de cálculo é feito de maneira manual.

Neste contexto, em virtude da ausência de ferramentas computacionais no mercado brasileiro para automatizar os projetos de lajes mistas, este trabalho apresenta o *Scale Deck*, um programa de dimensionamento inédito realizado a partir de uma parceria com a UFES e a ArcelorMittal que utiliza a fôrma da Perfilor, Polydeck 59S, tendo por base a aplicação de cargas distribuídas em lajes biapoiadas e contínuas e a verificação em temperatura ambiente.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para automatizar o dimensionamento de lajes mistas biapoiadas e contínuas, utilizando a fôrma Polydeck 59S. Vale ressaltar que o projeto envolve apenas lajes mistas em temperatura ambiente.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar e quantificar as solicitações de cálculo comumente impostas às lajes mistas durante a fase de construção e na fase de serviço;
- Pesquisar os procedimentos normativos para determinação das resistências de cálculo de lajes mistas, biapoiadas e contínuas, nas fases de construção e serviço;
- Propor fluxogramas de cálculo para a verificação dos limites últimos e de serviço aplicáveis na verificação do dimensionamento de lajes mistas antes e depois da cura;
- Avaliar a metodologia de cálculo adotada no catálogo da Perfilor (2016);
- Avaliar a adequação da ferramenta de cálculo desenvolvida neste trabalho em relação à confiabilidade e precisão.

1.4 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, serão cumpridas as etapas descritas a seguir.

- Estudar o dimensionamento de lajes mistas com base em literaturas nacionais, portuguesa e americana;
- Desenvolver fluxogramas de cálculo;

- Implementar fluxogramas de cálculo no Visual Basic for Application;
- Resolver exemplos de dimensionamento para validar o programa;
- Validar o programa comparando os resultados obtidos no programa com os de exemplos resolvidos.

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

O **Capítulo 1** introduz e apresenta em termos gerais o tema desta dissertação. São abordados fatores relevantes sobre as lajes mistas e características sobre as fôrmas-telha. Além disso, são apresentados a justificativa, os objetivos e a metodologia de pesquisa deste trabalho.

O **Capítulo 2** se trata da revisão bibliográfica, na qual são abordados todos os aspectos que envolvem as lajes mistas e seu dimensionamento. Baseando-se nas literaturas portuguesa, americana e brasileira, o capítulo dá enfoque aos estados limites aplicáveis para o dimensionamento de lajes mistas antes e após a cura do concreto.

O **Capítulo 3** reserva-se às disposições gerais e específicas da ferramenta de cálculo, introduzindo o programa e sua implementação. Em seguida, apresenta-se o programa *Scale Deck*, sua aplicabilidade, os dados de entrada e saída e os fluxogramas de cálculo desenvolvidos para facilitar a implementação. Por fim, o capítulo apresenta os cálculos de validação da ferramenta.

O **Capítulo 4** reserva-se à conclusão, onde são delineados os principais resultados do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo reserva-se a apresentar os procedimentos de dimensionamento das lajes mistas tanto antes quanto após a cura do concreto. Na primeira parte, que trata da verificação da segurança da forma isolada na etapa de construção, são apresentados o Método da Resistência Direta, a análise de estabilidade elástica para obtenção das cargas críticas de flambagem, os requisitos de segurança, as relações geométricas, as

larguras efetivas e, por último, os estados limites aplicáveis. Na segunda parte, são abordadas as verificações de segurança após a cura do concreto incluindo os estados limites últimos e de serviço, disposições construtivas e abertura em lajes mistas.

2.2 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS LAJES MISTAS ANTES DA CURA DO CONCRETO

Segundo BAIÃO FILHO (2003), o comportamento das lajes mistas na fase de construção é influenciado por diversas variáveis, entre as quais destacam-se a altura da capa de concreto, a presença de enrijecedores, a espessura e a altura da fôrma.

Em relação à capa de concreto, é fácil visualizar sua influência direta na fase de construção, uma vez que, quanto maior for sua altura, maior o carregamento a ser considerado na forma isolada. Portanto, quanto maior a espessura, menores serão os vãos máximos não escorados.

Além disso, devido ao alto nível de esbeltez das fôrmas de aço, o emprego de enrijecedores aumenta a rigidez e a resistência da chapa perfilada. Cabe acrescentar que, quando dispostos nos flanges inferiores, eles aumentam a resistência a momentos negativos no caso de vãos contínuos (BAIÃO FILHO, 2003).

Por fim, outro aspecto importante a ser considerado é a altura das fôrmas, que impacta na capacidade de vencer grandes vãos. Fôrmas altas possuem maior rigidez e maior resistência a momento fletor, porém a resistência à força cortante é reduzida por conta do estado-limite último de flambagem da alma por cisalhamento, tornando necessário aumentar a espessura de fôrma, o que afeta o consumo de material (BAIÃO FILHO, 2003).

2.2.1 Considerações iniciais de dimensionamento

Os requisitos específicos como espessura mínima, tipo de aço e dimensões das fôrmas para lajes mistas são baseados na NBR 16421 (ABNT, 2015). O dimensionamento, por outro lado, segue as orientações da NBR 14762 (ABNT, 2010) conforme recomendação da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Diferente do comportamento na fase mista, na fase de construção a fôrma de aço trabalha de forma isolada e deve suportar os pesos próprios dos elementos construtivos – fôrma, concreto e armaduras, bem como resistir a uma sobrecarga de construção mínima de 1 kN/m^2 , de modo a atender os estados-limites últimos e de serviço (ABNT, 2008).

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), a avaliação de ambos os estados-limites requer a análise elástica da fôrma, uma vez que perfis de aço formados a frio, em decorrência da elevada esbeltez, não têm capacidade de sofrer plastificação. Com isso, deve-se se atentar às verificações de segurança descritas na NBR 14762 (ABNT, 2010), considerando as propriedades geométricas efetivas da seção transversal.

Como as fôrmas são submetidas a carregamentos gravitacionais, perpendiculares aos seus eixos, precisam ser verificadas a momento fletor e força cortante, sobretudo. Para tanto, o método da largura efetiva (MLE), o método da seção efetiva (MSE) e o método da resistência direta (MRD) podem ser utilizados para o dimensionamento. Este estudo optou pelo emprego do MRD por sua praticidade e facilidade de implementação, o qual encontra-se detalhado em 2.2.1.1.

2.2.1.1 Método da Resistência Direta

De acordo com Loureiro (2021), o Método da Resistência Direta (MRD) foi criado em 1998 através dos estudos de doutorado de Benjamin W. Schafer. O objetivo do estudo era gerar procedimentos de cálculos mais eficientes para geometrias com enrijecedores intermediários e de borda, de modo a facilitar o dimensionamento de elementos de aço compostos por perfis formados a frio, considerados complexos na área de engenharia estrutural (apud SCHAFFER,2019).

Adicionalmente, segundo Loureiro (2021), o MRD está descrito no Anexo C da NBR 14762 (ABNT,2010) como uma alternativa para a determinação de esforços resistentes de barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples. Nessa norma, a avaliação do momento fletor resistente pelo método da Resistência Direta é feita partindo-se da análise geral de estabilidade elástica da barra, cujo procedimento se baseia na obtenção de valores críticos (mínimos) das forças axiais de compressão e os momentos fletores de flambagem elástica local, distorcional e global para barras sob compressão centrada, N_l , N_{dist} , N_e ou flexão simples, M_l , M_{dist} , M_e , respectivamente.

Esse tipo de análise é muito importante na modelagem, já que fornece um dos principais parâmetros para encontrar as resistências de projeto (apud SCHAFER; LI; MOEN, 2010).

Neste trabalho, será considerado o MRD para o dimensionamento de barras submetidas à flexão simples, condição das chapas perfiladas para lajes mistas, e o programa CUFSM será utilizado para a obtenção dos valores críticos de M_e , M_l e M_{dist} .

2.2.1.2 Análise de estabilidade elástica

A análise de estabilidade elástica é uma etapa fundamental para o dimensionamento das estruturas de aço compostas por perfis formados a frio, a partir da qual são obtidas as cargas críticas de flambagem necessárias à aplicação do MRD (LOUREIRO, 2021).

De acordo com Reis e Camotim (2001), conforme citado por Loureiro (2021), a estabilidade relaciona-se diretamente com a capacidade de uma estrutura de suportar ações externas de forma que não ocorra mudança significativa na configuração de equilíbrio, caracterizada pelos valores de deslocamento de seus nós. A estrutura pode se comportar com configurações de equilíbrio estável e instável, na qual a transição entre ambos ao longo de uma trajetória de equilíbrio é denominada instabilidade.

Para exemplificar, a Figura 4 mostra as trajetórias de equilíbrio de uma placa comprimida uniforme e simplesmente apoiada em todo o contorno, onde q é o valor do deslocamento transversal medido a meia altura. Para tensão aplicada maior que o valor crítico, $\sigma > \sigma_{cr}$, pode existir trajetória instável ou de pós-flambagem estável. O colapso da placa ocorre quando a tensão aplicada atinge o valor crítico.

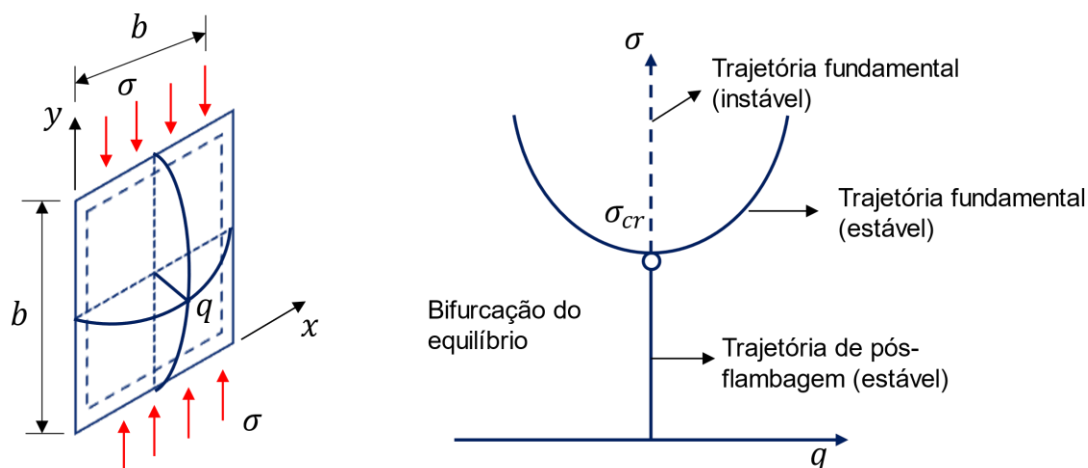


Figura 4: Trajetórias de equilíbrio de uma placa comprimida

Fonte: Adaptado de Reis e Camotim (2001).

Segundo Loureiro (2021), o objetivo da análise linear de estabilidade ou estabilidade elástica consiste em determinar a menor carga de bifurcação, denominada carga crítica, e a forma do correspondente modo crítico de flambagem (apud REIS e CAMOTIM, 2001).

A análise elástica é obtida por meio de métodos analíticos ou numéricos. Sendo o primeiro desenvolvido para cálculos manuais, este é considerado extenso e completo. Porém, com o avanço das pesquisas na área, os métodos numéricos atrelados a ferramentas computacionais proporcionaram maior eficiência na análise das estruturas de aço formadas a frio.

Atualmente, existem diversos programas no mercado para obtenção da análise elástica e muitos desses, estão disponíveis gratuitamente. Um destes é o CUFSM, que tem se destacado na comunidade acadêmica e profissional, devido a simplicidade da metodologia da solução. Além disso, o CUFSM permite ao usuário o acesso e modificação livre de seu código.

O método numérico implementado pelo CUFSM é o Método das Faixas Finitas (MFF) e é uma variante do Método dos Elementos Finitos (MEF). O MFF é caracterizado por uma seção transversal de parede fina discretizada em faixas longitudinais. Além disso, o método fornece a “curva de assinatura”, em que essa apresenta em um gráfico o fator

de carga em função do comprimento de meia-onda. Vale lembrar que, o fator de carga é a relação entre a carga crítica e a carga inicial aplicada (LOUREIRO,2021). A geometria da fôrma Polydeck 59S utilizada para a análise de flambagem realizada através do MFF está ilustrada na Figura 5.

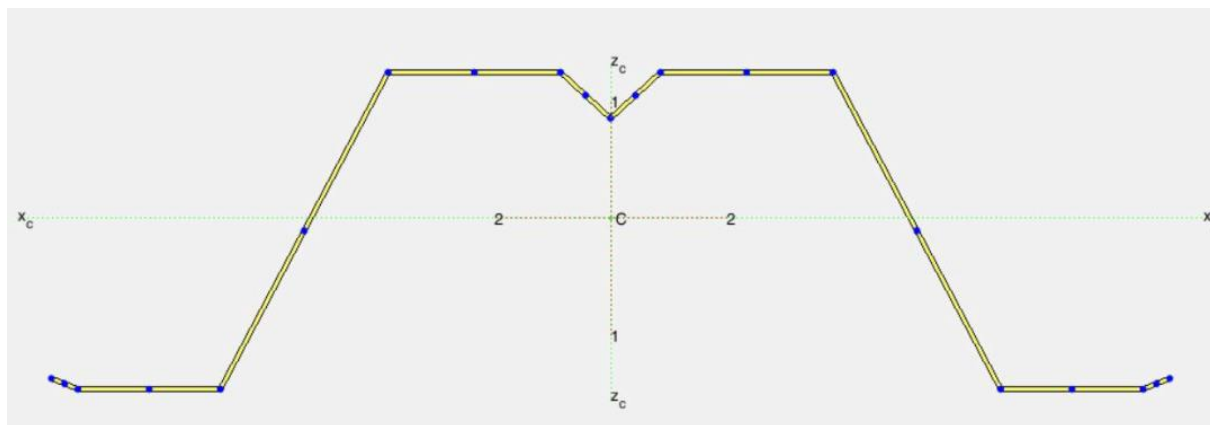


Figura 5 - Discretização da seção transversal para análise da seção submetida a momento fletor positivo

Fonte: (FAVARATO, 2021)

2.2.1.3 Modos de flambagem sob flexão simples

Por meio da análise de estabilidade elástica feita através de ferramentas computacionais, é possível obter os valores críticos de bifurcação local, distorcional e global e suas respectivas deformações (LOUREIRO,2021).

A flambagem local apresenta rotação nas linhas de dobras ou cantos do perfil, gerando flexão nas chapas apoiadas da peça. De maneira geral, o comprimento de meia-onda é relativamente menor em relação aos modos de flambagem distorcional e global. Para exemplificar esse modo de flambagem, as Figura 6 e 7 ilustram a deformação ocasionada pelo momento fletor positivo e negativo, respectivamente.

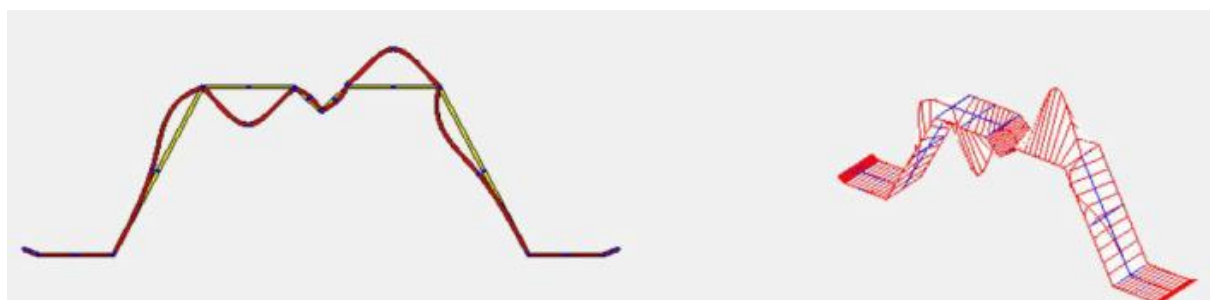


Figura 6 - Deformada correspondente à flambagem local - Momento fletor positivo

Fonte: (FAVARATO,2021)



Figura 7 - Deformada correspondente à flambagem local - Momento fletor negativo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

O modo de flambagem distorcional é caracterizado pelo deslocamento dos cantos de dobras da seção transversal do perfil, direcionando-o de modo local. Este modo apresenta translação nos nós do elemento e o comprimento de meia-onda entre os modos local e global (LOUREIRO,2021). A Figura 8 representa a deformada ocasionada pelo momento fletor positivo.

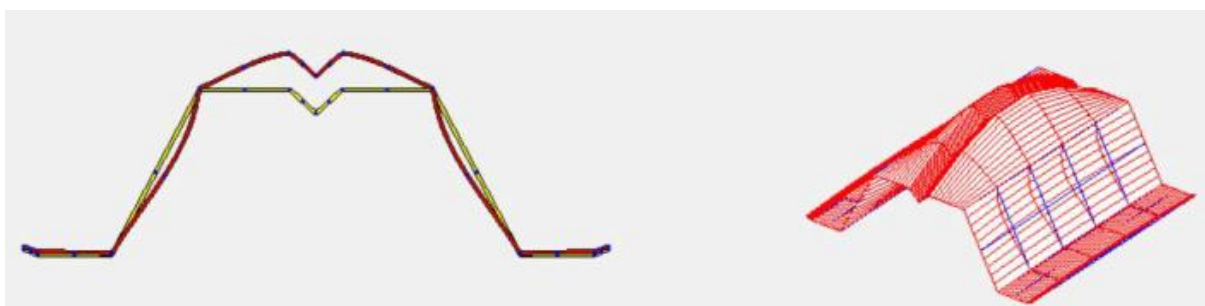


Figura 8 - Deformada correspondente à flambagem distorcional - Momento fletor positivo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

A curva de assinatura apresenta mínimos que indicam a carga crítica mais baixa na qual ocorre um determinado modo de flambagem. Nas Figuras 9 a 14 são mostradas as curvas resultantes da análise ao momento fletor positivo e negativo para as diferentes espessuras de fôrmas Polydeck 59S.

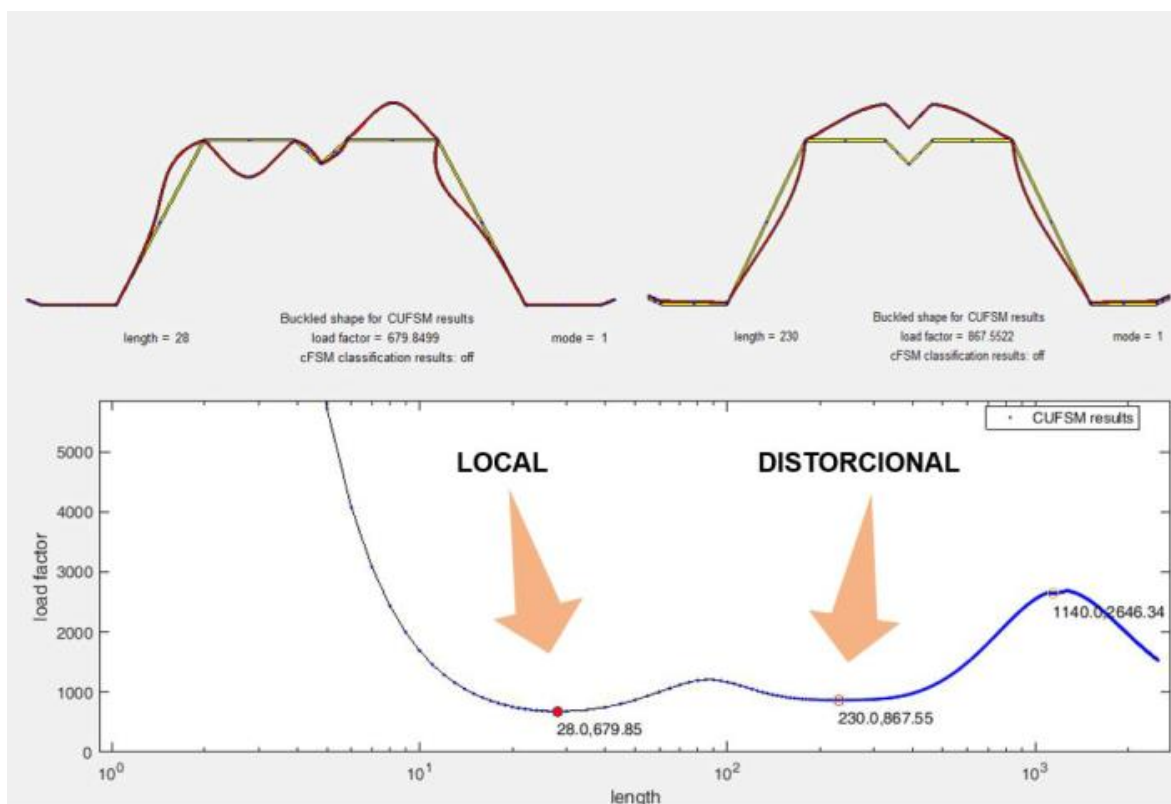


Figura 9 - Resultado da análise para espessura de 0,80 mm - Momento fletor positivo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

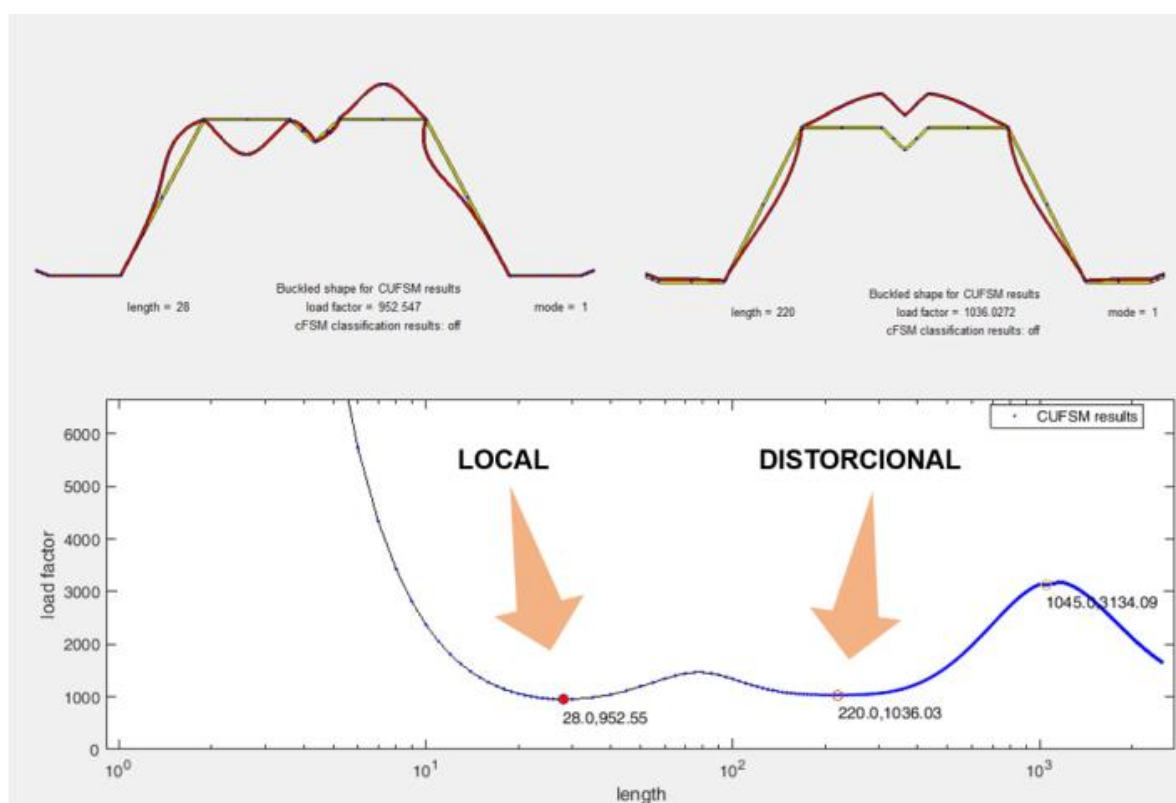


Figura 10 - Resultado da análise para espessura de 0,95 mm - Momento fletor positivo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

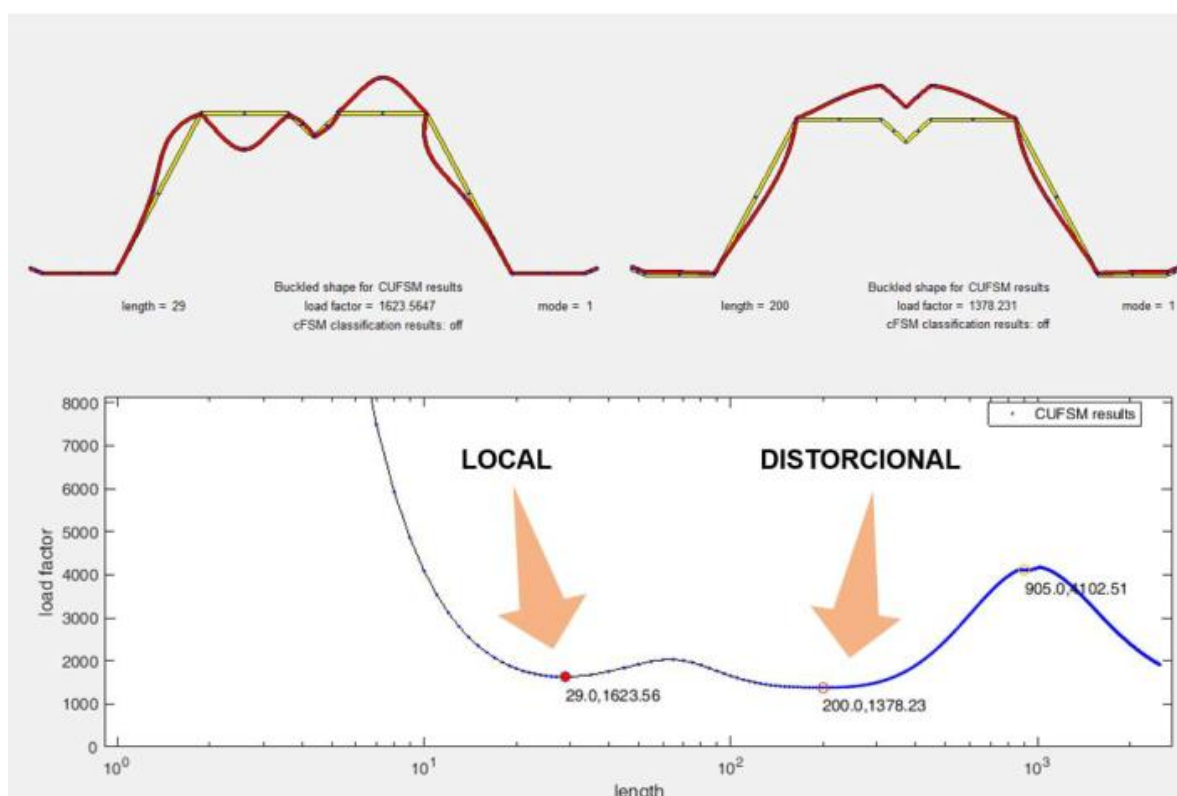


Figura 11 - Resultado da análise para espessura de 1,25 mm - Momento fletor positivo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

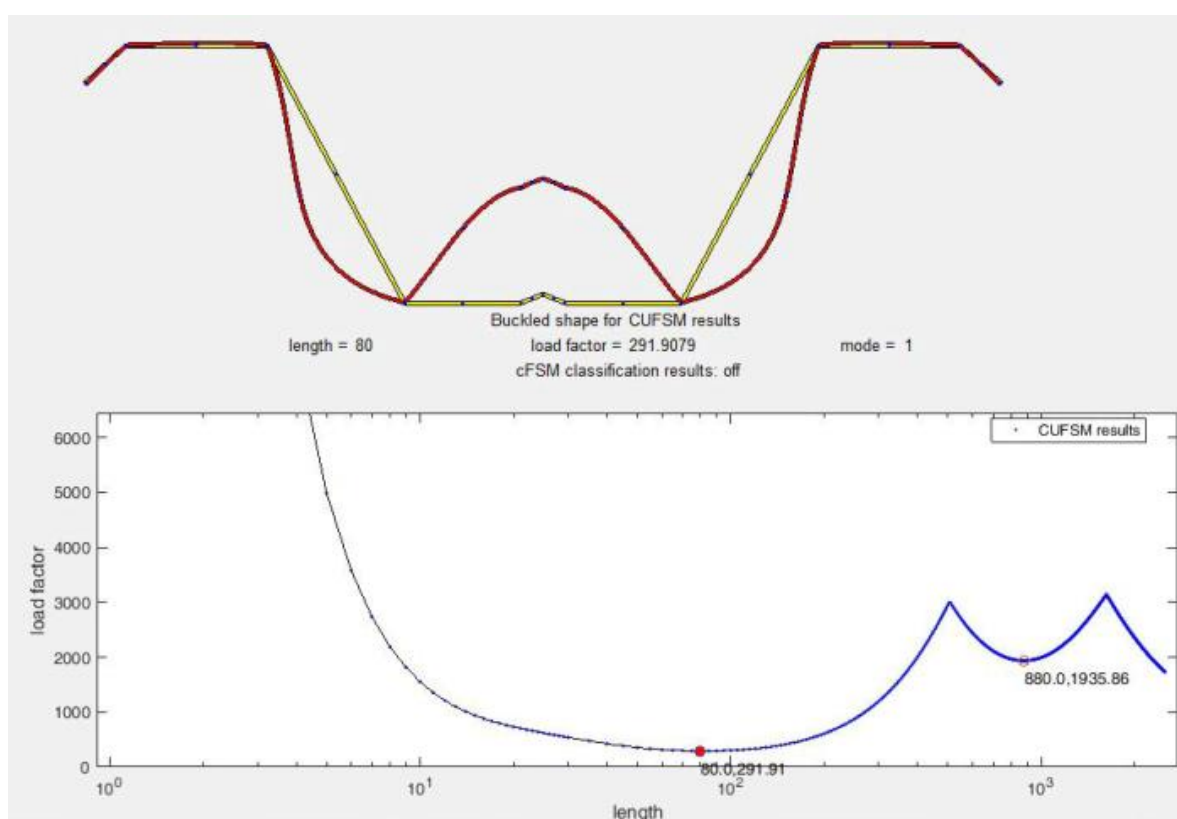


Figura 12 - Resultado da análise para espessura de 0,80 mm - Momento fletor negativo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

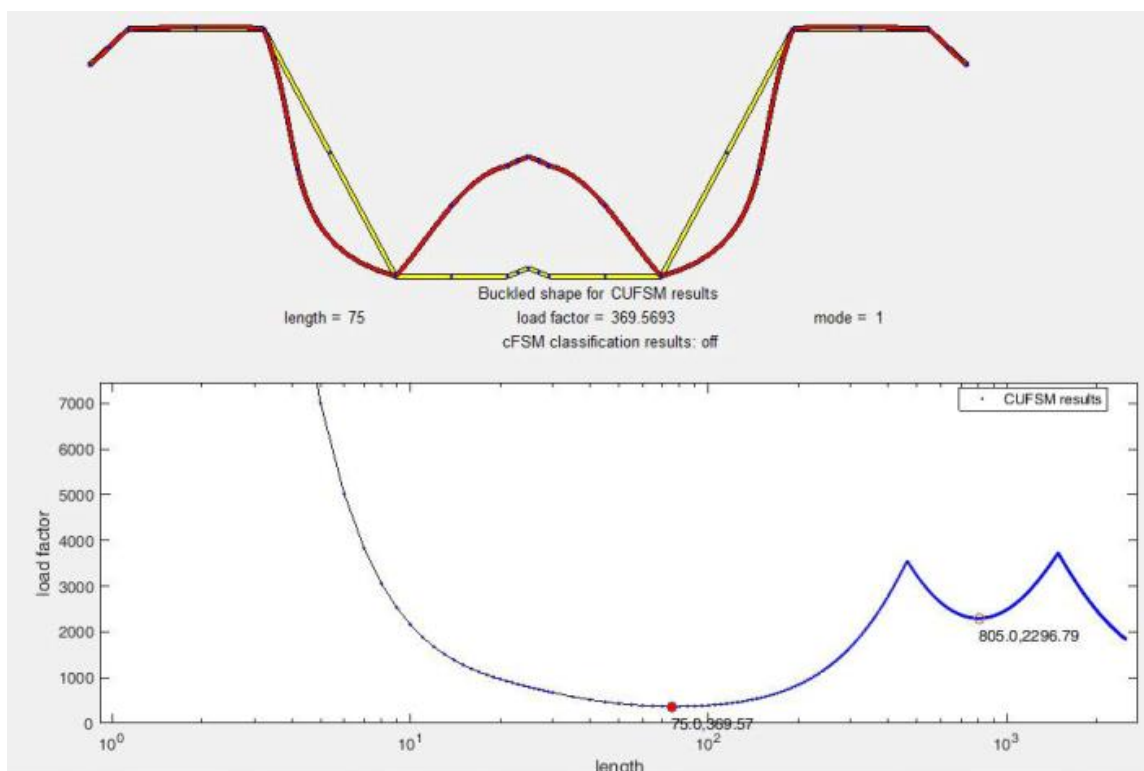


Figura 13 - Resultado da análise para espessura de 0,95 mm - Momento fletor negativo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

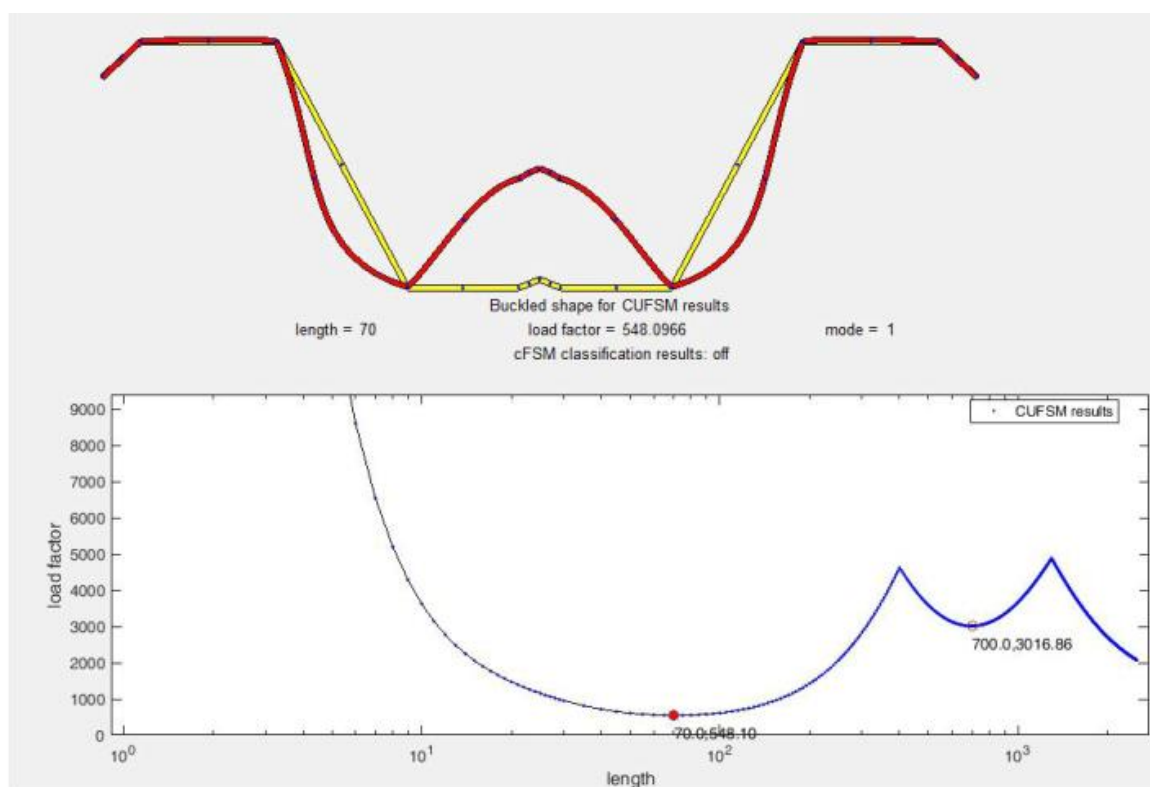


Figura 14 - Resultado da análise para espessura de 1,25 mm - Momento fletor negativo.

Fonte: (FAVARATO,2021).

2.2.2 Dimensionamento

2.2.2.1 Requisitos de segurança para fôrmas de aço

2.2.2.1.1 Material

A fôrma de aço para laje mista é fabricada pelo processo de conformação a frio em linha contínua por meio de cilindros rotativos a partir de chapa ou bobina de aço. É recomendada pela NBR 16421 (ABNT, 2015) a utilização de aços com espessura mínima de 0,80 mm e com qualificação estrutural, cuja razão entre a resistência a ruptura (f_u) e a resistência ao escoamento (f_y) não deve seja inferior a 1,08 conforme a NBR 14762 (ABNT, 2010). Adicionalmente a resistência ao escoamento nominal mínima deve respeitar o limite inferior de 280 MPa, correspondente ao grau ZAR-280 da NBR 7008-3 (ABNT, 2012).

Além disso, a chapa deve apresentar um revestimento metálico cuja função é proteger o metal base da corrosão frente aos agentes agressivos presentes no meio. Ele pode ser:

- a) zincado por imersão a quente;
- b) zincado por imersão a quente e revestido por um processo de pintura.

A NBR 7008-3 (ABNT, 2012) prescreve para o revestimento, com ou sem pintura, uma massa de zinco de, no mínimo, 275 g/m² nas duas faces. A chapa ou bobina utilizada para a fabricação da fôrma deve possuir tratamento químico superficial a fim de aumentar a resistência à corrosão. A pintura é indicada para ambientes mais agressivos e, conforme a NBR 16421 (ABNT, 2015), suas características devem ser estabelecidas por acordo entre fabricante e comprador.

2.2.2.1.2 Dimensões

No que diz respeito a seção transversal, conforme a NBR 16421 (ABNT, 2015), a fôrma de aço pode assumir geometria trapezoidal, ondulada, reentrante ou retangular, e deve apresentar as indicações das dimensões, de acordo com a **Error! Reference source not found.** Além disso, a fôrma deve possuir altura (h_F) entre 50 mm e 150 mm.

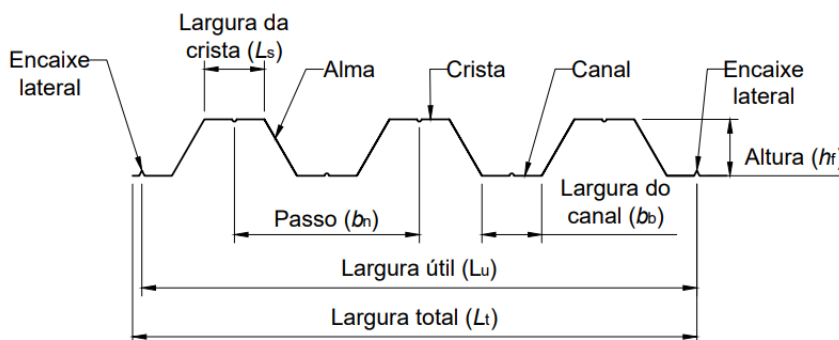


Figura 15 - Seção transversal trapezoidal com indicação das dimensões

Fonte: (LOUREIRO, 2021)

2.2.2.3 Ações a serem consideradas

A NBR 8800 (ABNT, 2008) recomenda que as seguintes ações sejam levadas em consideração na verificação da fôrma de aço durante a fase de construção:

- a) Pesos próprios do concreto fresco, da fôrma de aço e das armaduras;
- b) Sobrecarga de construção tomada como o mais nocivo entre (i) carga uniformemente distribuída com valor característico mínimo de 1 kN/m^2 e (ii) carga linear de $2,2 \text{ kN/m}$ perpendicular à direção das nervuras da fôrma, na posição mais desfavorável, somente para verificação ao momento fletor.

Além disso, se o deslocamento no centro do vão da fôrma, calculado com o seu peso próprio somado ao do concreto fresco, ultrapassar o valor de $L_F/250$, onde L_F é o vão teórico da laje na direção das nervuras, o efeito de empoçamento deve ser levado em conta, considerando-se um acréscimo na espessura nominal do concreto de 70% do valor do deslocamento. Por fim, a determinação dos esforços solicitantes deve levar em conta a sequência de concretagem.

2.2.3 Estado Limite Último

A avaliação de momento fletor resistente pelo MRD é abordada no Anexo C da NBR 14762 (ABNT, 2010). As expressões empregadas pela norma brasileira são apresentadas a seguir.

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} é dado pela equação (2.3):

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma} \quad (2.1)$$

onde:

γ : coeficiente de ponderação da resistência, tomado como 1,10;

M_{Rk} : Valor característico do momento fletor resistente, considerado como o menor entre os valores característicos do momento fletor resistente associado às flambagens global (M_{Re}), local (M_{Rl}) e distorcional (M_{Rdist}).

O momento fletor resistente de cálculo associado à flambagem global, M_{Re} , pode ser encontrado a partir das equações 2.5, 2.6 e 2.7, a depender do valor do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global, λ_0 , calculado pela equação 2.4.

$$\lambda_0 = \left(\frac{W f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (2.2)$$

$$M_{Re} = W f_y ; \text{ se } \lambda_0 \leq 0,6 \quad (2.3)$$

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2)W f_y ; \text{ se } 0,6 < \lambda_0 < 1,336 \quad (2.4)$$

$$M_{Re} = \frac{W f_y}{\lambda_0^2} ; \text{ se } \lambda_0 \geq 1,336 \quad (2.5)$$

em que:

W : módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

f_y : resistência ao escoamento do aço virgem;

M_e : momento fletor de flambagem lateral com torção elástica.

Para flambagem lateral com torção elástica, o momento fletor associado é M_e e pode ser encontrado por:

$$M_e = W \sigma_e \quad (2.6)$$

em que:

σ_e : fator de carga global, encontrado por meio do programa CUFSM.

Neste trabalho, como não há a possibilidade de ocorrência de flambagem global em fôrmas de lajes, não será considerado esse estado-limite como escopo da ferramenta de cálculo. Apenas os estados-limites tratados a seguir, flambagem local e distorcional serão considerados no desenvolvimento do programa.

O momento fletor resistente de cálculo associado à flambagem local, M_{Rl} , pode ser encontrado a partir das equações 2.10 e 2.11, a depender do valor do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local, λ_l , calculado pela equação 2.9.

$$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l} \right)^{0,5} \quad (2.7)$$

$$M_{Rl} = M_{Re} ; \text{se } \lambda_l \leq 0,776 \quad (2.8)$$

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}} \right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} ; \text{se } \lambda_l > 0,776 \quad (2.9)$$

em que:

M_l : momento fletor de flambagem local elástica.

Para flambagem local, o momento fletor associado é M_l e pode ser encontrado por:

$$M_l = W \sigma_1 \quad (2.10)$$

em que:

σ_1 : fator de carga local, encontrado por meio do programa CUFSM.

Por último, o momento fletor resistente de cálculo associado à flambagem distorcional, M_{Rdist} , pode ser encontrado a partir das equações 2.14 e 2.15, a depender do valor do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional, λ_{dist} , calculado pela equação 2.13.

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W f_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} \quad (2.11)$$

$$M_{Rdist} = W f_y ; se \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad (2.12)$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{W f_y}{\lambda_{dist}} ; se \lambda_{dist} > 0,673 \quad (2.13)$$

em que:

M_{dist} : momento fletor de flambagem distorcional elástica.

Para flambagem distorcional, o momento fletor associado é M_{dist} e pode ser encontrado pela equação 2.16.

$$M_{dist} = W\sigma_{dist} \quad (2.14)$$

em que:

σ_{dist} : fator de carga distorcional, encontrado por meio do programa CUFSM.

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} não é prevista pelo MRD na NBR 14762 (ABNT, 2010). Entretanto, a norma prevê o dimensionamento do esforço cortante considerando os estados-limites de escoamento da alma ou flambagem por cisalhamento por meio das equações 2.17 a 2.19:

$$\text{Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \left(\frac{Ek_V}{f_y} \right)^{0,5}, V_{Rd} = \frac{0,6f_y h t}{\gamma} \quad (2.15)$$

$$\text{Para } 1,08 \left(\frac{Ek_V}{f_y} \right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,4 \left(\frac{Ek_V}{f_y} \right)^{0,5}, V_{Rd} = \frac{0,65t^2 (K_V f_y E)^{0,5}}{\gamma} \quad (2.16)$$

$$\text{Para } \frac{h}{t} > 1,4 \left(\frac{Ek_V}{f_y} \right)^{0,5}, V_{Rd} = \frac{0,905EK_V t^3}{\gamma h} \quad (2.17)$$

Considerando alma sem enrijecedores transversais, ou para $\frac{a'}{h} > 3$:

$$K_V = 5,0$$

Considerando alma com enrijecedores transversais (2.20), atendendo a $\frac{a'}{h} \leq 3$, $\frac{a'}{h} \leq$

$$\left[\frac{260}{\left(\frac{h}{t} \right)} \right]^2 \text{ e } I_{s,min} = 5ht^3 \left(\frac{h}{a'} - \frac{0,7a'}{h} \right) \geq \left(\frac{h}{50} \right)^4 :$$

$$K_V = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a'}{h} \right)^2} \quad (2.18)$$

Neste estudo, serão consideradas fôrmas sempre sem enrijecedores transversais, portanto, seguindo a NBR 14762, $K_V = 5,0$.

onde:

E : módulo de elasticidade;

t : espessura da alma;

h : largura da alma (altura da parte plana da alma, ou seja, desconsidera-se os raios do canto da seção transversal);

γ : Coeficiente de ponderação da resistência, tomado como 1,10;

K_v : coeficiente de flambagem local por cisalhamento;

a' : distância entre enrijecedores transversais de alma;

$I_{s,min}$: momento de inércia mínimo de um enrijecedor simples ou duplo, em relação ao eixo contido no plano médio da alma.

2.2.4 Estado Limite de Serviço

O deslocamento máximo da fôrma de aço sob a ação dos pesos próprios considerados, exceto a sobrecarga de construção, não deve exceder o menor valor entre $L_F/180$ ou 20 mm. Assim como nos estados-limites anteriores, as propriedades geométricas da seção transversal devem ser determinadas conforme a NBR 14762 (ABNT, 2010).

Para o deslocamento de barras calculado através do MRD, deve ser considerado um momento de inércia efetivo da seção I_{ef} dado pela equação 2.21.

$$I_{ef} = I_g \left(\frac{M_{Rser}}{M_n} \right) \leq I_g \quad (2.21)$$

onde:

M_n : momento fletor solicitante calculado considerando as combinações de ações para os ELS,

M_{Rserv} : momento fletor resistente, calculado conforme equações 2.9 a 2.11 e 2.13 a 2.15., porém substituindo Wf_y por M_n ;

I_g : momento de inércia da seção bruta.

2.3 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS LAJES MISTAS APÓS A CURA DO CONCRETO

2.3.1 Disposições Construtivas

O objetivo das disposições construtivas é melhorar as condições de resistência e de utilização da estrutura sem que seja necessário um número excessivo de manutenções. O comportamento estrutural das lajes mistas depende de vários parâmetros e é bastante complexo, por isso, as regras são expressas sob a fôrma de limites dimensionais conservadores. Segundo a NBR 8800:2008, as seguintes disposições devem ser respeitadas.

- a) a espessura do concreto sobre a fôrma deve ser no mínimo de 50 mm;
- b) a dimensão máxima característica do agregado graúdo não deve exceder os seguintes valores:
 - $0,40t_c$, onde t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;
 - $b_o/3$, onde b_o é a largura média das nervuras para fôrmas trapezoidais e a largura mínima das nervuras para fôrmas reentrantes;
 - 30 mm;
- c) a armadura adicional necessária para a resistência da laje ao momento positivo e negativo devem obedecer às prescrições da ABNT NBR 6118 para o concreto de densidade normal;
- d) o comprimento mínimo de apoio deve ser o necessário para evitar que se atinjam os estados-limites correspondentes, tais como enrugamento da alma da fôrma de aço ou esmagamento do apoio; entretanto não é permitido ser inferior a 75 mm para apoio em aço ou concreto e 100 mm para apoio em outros materiais (Figura 16). Nas extremidades da fôrma esses valores podem ser reduzidos para 50 mm e 70 mm, respectivamente.

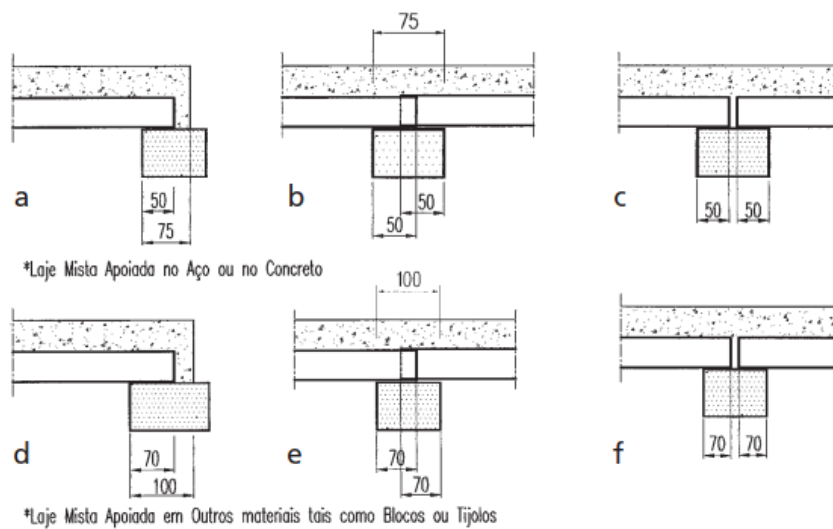


Figure 16 - Comprimento mínimo de apoio

Fonte: Perfilor (2000).

2.3.2 Estados Limites Últimos

Na fase mista, a fôrma de aço incorpora-se ao concreto para resistir aos esforços solicitantes decorrentes das ações aplicadas à laje. Cabe ressaltar que o comportamento misto é estabelecido por conta da ligação entre ambos os elementos, que pode ocorrer por meio mecânico ou por atrito (Figura 17). Em decorrência da baixa confiabilidade e ductilidade da aderência entre aço e concreto, este tipo de ligação não pode ser considerado em projeto.

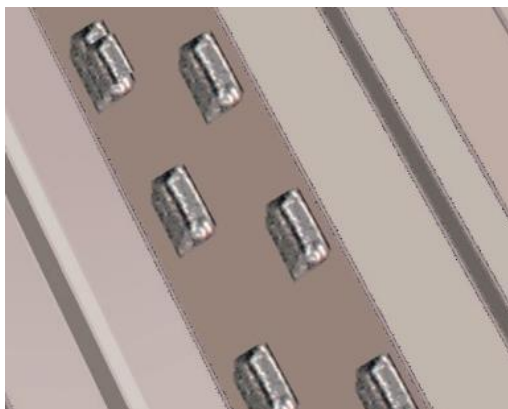


Figura 17: Mossas das fôrmas metálicas

Fonte: ArcelorMittal Perfilor (2020).

Segundo Calado (2015), em relação ao grau de interação entre o concreto e a fôrma de aço, as lajes mistas podem ter três tipos de comportamento:

- Interação total entre o concreto e a fôrma de aço: Não existe deslizamento entre o aço e o concreto nesta situação. O modo de colapso pode ser tanto dúctil, quanto frágil, podendo acontecer lentamente ou subitamente.
- Interação nula entre o concreto e a fôrma de aço: Nesta situação, não existe ligação entre o concreto e a fôrma de aço. Sendo assim, o deslizamento apresenta seu valor máximo quando a mínima força é aplicada. O modo de colapso é progressivo.
- Interação parcial entre o concreto e a fôrma de aço: O deslizamento entre o aço e o concreto neste caso situa-se entre as duas situações anteriores. O modo de colapso pode ser tanto dúctil quanto frágil.

Em relação às seções críticas, existem três seções (CALADO,2015) conforme Figura 18, de acordo com seus respectivos modos de colapso.

Colapso na seção I: ocorre devido ao momento fletor, típico de lajes mistas de vãos médios a grandes e para graus de interação elevados entre o aço e o concreto.

Colapso na seção II: deve-se ao cisalhamento longitudinal entre o aço e o concreto, que ocorre no vão de cisalhamento L_s . Além de acontecer em casos de interação parcial entre o aço e o concreto, é usualmente a forma de colapso mais crítica nas lajes mistas, típica de vãos médios.

Colapso na seção III: ocorre devido ao esforço cortante vertical excessivo nas lajes mistas. É típico de lajes com pequenos vãos sujeitas a cargas elevadas.

Desde modo, a resistência de cálculo das lajes tipo Steel Deck deve ser verificada nos seguintes estados limites últimos:

- I.Momento Fletor
- II.Cisalhamento Longitudinal
- III.Cisalhamento Vertical
- IV.Punção

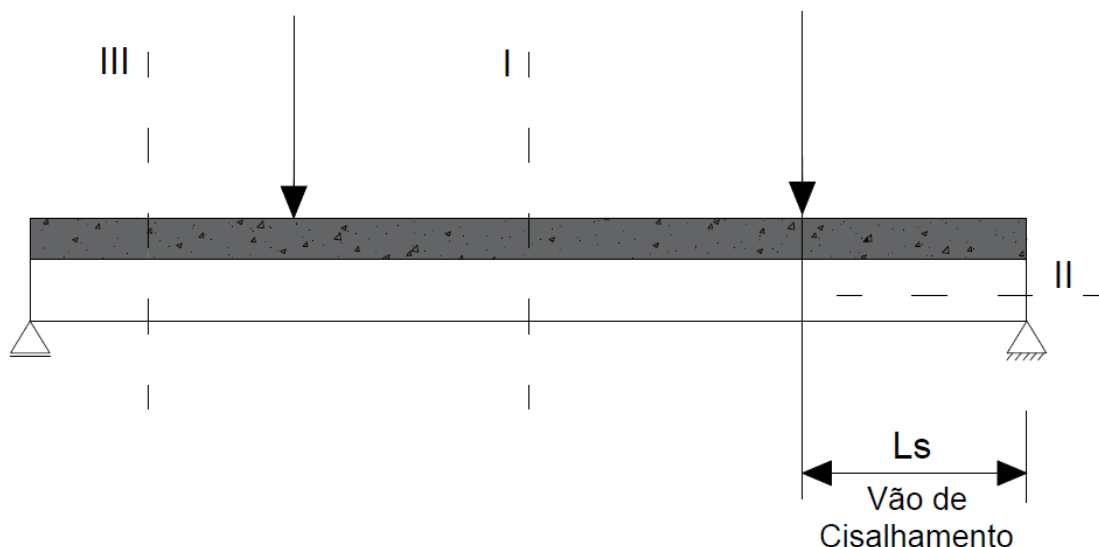


Figura 18: Modos de colapso da seção mista.
Fonte: CALADO (2015).

2.3.2.1 Momento fletor positivo resistente de cálculo

A largura “b” da laje considerada nos cálculos é sempre adotada como 1000 mm para dimensionamento. A espessura do concreto acima do topo da chapa de aço não deve ser inferior a 50 mm, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008). Normalmente, essa espessura é de 60 mm ou mais para garantir isolamento térmico e acústico, bem como resistência a cargas concentradas. (JOHNSON,2004).

Este estudo aborda o dimensionamento de lajes mistas contínuas, abrangendo, portanto, a situação de momento fletor positivo e momento fletor negativo. Para o dimensionamento das lajes mistas a momento fletor positivo, caso em que se assume interação total, existem duas situações para a posição da Linha Neutra Plástica.

2.3.2.1.1 Linha Neutra Plástica acima da fôrma de aço

Neste caso, a força de compressão na zona de concreto da laje (por cima da fôrma) é superior à força de tração da chapa perfilada mais a das armaduras alojadas no interior das nervuras. Sendo assim, a LNP situa-se acima da chapa, de modo a proporcionar o equilíbrio na seção transversal, conforme Figura 19.

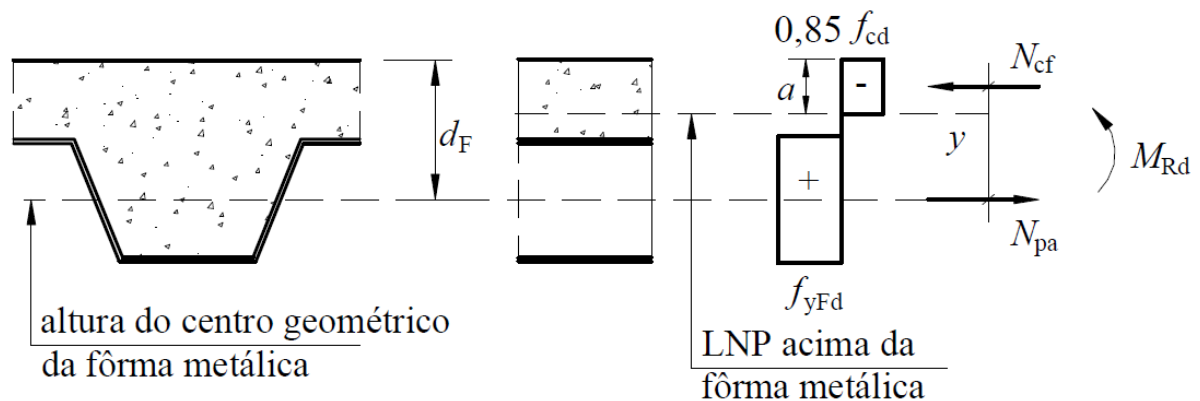


Figura 19: Diagrama de tensões para momento positivo - Linha neutra plástica acima da fôrma de aço.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Nesta situação, a força de compressão no concreto é igual à força de resistência do aço, dada pela equação 2.22.

$$N_{pa} = A_{fF,ef} f_{yFd} \quad (2.22)$$

sendo que:

$A_{fF,ef}$: área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm), determinada desprezando-se a contribuição das mossas na seção transversal, a menos que se demonstre por meio de ensaios que uma área maior possa ser utilizada.

f_{yFd} : valor da resistência de cálculo da fôrma

Assumindo o equilíbrio de forças na seção, a posição da linha neutra plástica é dada pela equação 2.23.

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 f_{cd} b} \leq t_c \quad (2.23)$$

Este caso é válido quando $a < t_c$, em que:

t_c : altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

a : altura do bloco de compressão da laje;

f_{cd} : valor da resistência à compressão de cálculo do concreto;

b : tido como 1000mm.

O valor do momento resistente de cálculo é dado, então, pela equação 2.24.

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5a) \quad (2.24)$$

Em que:

d_F : distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma.

2.3.2.1.2 Linha Neutra Plástica na fôrma de aço

Neste caso, a força de compressão no concreto acima das nervuras é inferior à força de tração da chapa perfilada mais a das armaduras. Sendo assim, a LNP intercepta a chapa, de modo a haver um equilíbrio na seção transversal, conforme Figura 20.

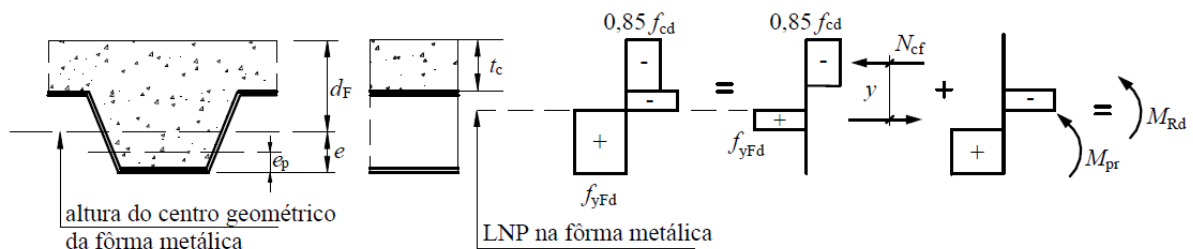


Figura 20: Diagrama de tensões para momento positivo - Linha neutra plástica na fôrma de aço.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

A força de compressão do concreto, então, é menor que a força de tração na fôrma e é dada pela equação 2.25.

$$N_{cf} = 0,85bt_c f_{cd} \quad (2.25)$$

A força de tração do aço, então, é decomposta em duas parcelas: a primeira com valor igual a N_{cf} e outra de valor igual a N_{ac} . O binário formado pelas forças N_{ac} fornece um momento resistente de cálculo M_{pr} , conforme Figura 21.

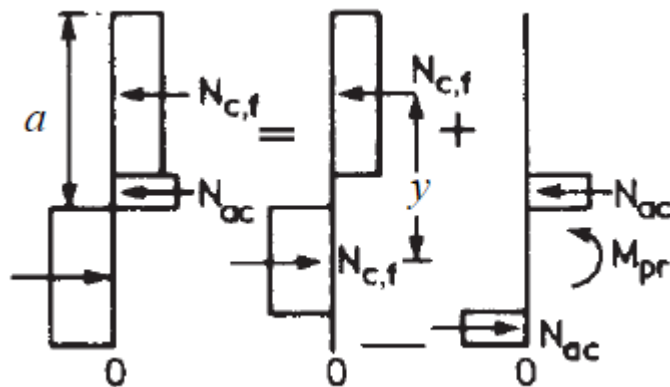


Figura 21: Diagrama de tensões com formação de binário.

Fonte: JOHNSON (2004)

em que:

M_{pr} : momento de plastificação de cálculo da fôrma M_{pa} reduzido pelo efeito da força axial N_{cf} . Assim, M_{pr} é calculado pela equação 2.26.

$$M_{pr} = 1,25M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (2.26)$$

O momento de plastificação de cálculo da fôrma M_{pa} é dado pela equação 2.27.

$$M_{pa} = Z_{pl} f_y F_d \quad (2.27)$$

Na equação 2.27, Z_{pl} representa o módulo de flexão plástico da área efetiva da chapa em relação ao eixo de flexão.

Note que y representa a distância entre as resultantes da força de compressão do concreto e da força de tração na chapa de aço e pode ser obtido a partir da equação 2.28.

$$y = h_t - 0,5t_c - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \quad (2.28)$$

onde:

t_c : altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

h_t : altura total da laje, incluindo a fôrma e o concreto;

e : distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;

e_p : distância da linha neutra plástica da seção efetiva da fôrma à sua face inferior.

Por fim, o momento resistente de cálculo, então, é dado pela equação 2.29.

$$M_{Rd} = N_{cf}y + M_{pr} \quad (2.29)$$

2.3.2.2 Momento fletor negativo resistente de cálculo

Por outro lado, nas regiões de momentos negativos sobre apoios internos, a resistência pode ser determinada, de maneira conservadora, desprezando-se a contribuição da forma de aço comprimida conforme o EN 1994-1-1 (CEN, 2004). Para as situações mais usuais de projeto, a linha neutra plástica da seção situa-se na fôrma de aço, cuja distribuição de tensões está ilustrada na Figura 22.

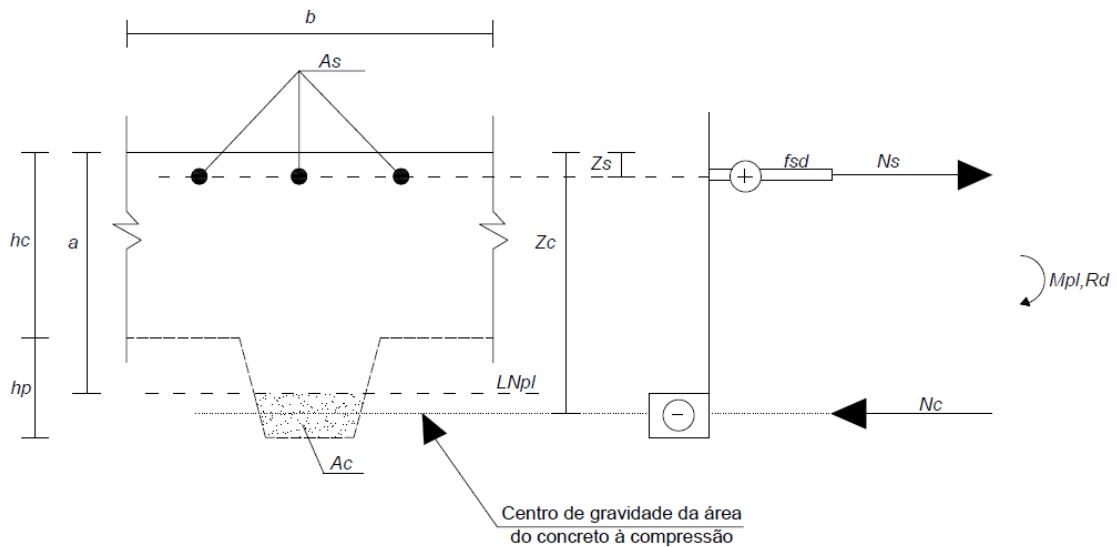


Figura 22: Distribuição de tensões com linha neutra plástica interceptando a chapa perfilada.

Fonte: CALADO (2015).

Para uma área de aço previamente informada, as forças resultantes de compressão no concreto e tração no aço podem ser calculadas, respectivamente, pelas equações 2.30 e 2.31.

$$N_c = 0,85 \times f_{cd} \times A_c \quad (2.30)$$

$$N_s = A_s \times f_{sd} \quad (2.31)$$

em que:

A_c : área resistente do concreto;

N_c : força de compressão do concreto situado na nervura da fôrma;

N_s : força de tração na armadura A_s .

Portanto, a posição da linha neutra plástica, a , é determinada até que seja verificada a equação 2.32.

$$-N_c + N_s = 0 \quad (2.32)$$

É possível obter o momento fletor resistente plástico, $M_{pl,Rd}$, a partir da equação 2.33:

$$M_{pl,Rd} = N_c \times z_c - N_s \times z_s \quad (2.33)$$

Pode-se considerar que a nervura tem uma largura média, b_0 . Sendo assim, a posição da linha neutra plástica é obtida através da equação 2.34.

$$a = h_t - \frac{A_s \times f_{sd}}{0,85 \times f_{cd} \times b_0} \quad (2.34)$$

Considerando z como o braço de alavanca do momento fletor, então seu valor é dado pela equação 2.35.

$$z = z_c - z_s \quad (2.35)$$

em que:

z_s : distância da armadura negativa ao topo da laje;

z_c : distância do centro de gravidade da área comprimida de concreto ao topo da laje.

Por fim, o momento fletor resistente plástico, $M_{pl,Rd}$, pode ser obtido, então, a partir da equação 2.36.

$$M_{pl,Rd,neg} = A_s \times f_{sd} \times z \quad (2.36)$$

em que:

A_s : área da armadura para largura unitária da laje;

f_{sd} : tensão de escoamento do aço da armadura.

2.3.2.3 Cisalhamento Longitudinal

Calado e Santos (2013) pontuam que a verificação da segurança em relação à força cortante longitudinal resistente de cálculo é baseada em resultados de ensaios experimentais de lajes mistas com chapas perfiladas conforme o EN1994-1-1 (CEN, 2004), CSSBI S2 ou o ANSI/ASCE 3. Tal fato se deve à complexidade em desenvolver

um modelo analítico preciso que contemple de maneira adequada todos os parâmetros que interferem na resistência ao cisalhamento na interface entre aço e concreto, sobretudo por conta dos diferentes padrões de mossas e o mecanismo segundo o qual as tensões são transferidas nesta região. Com isso, o cálculo é feito através do método semi-empírico $m-k$ ou do método da interação parcial. Enquanto este último é utilizado apenas em casos de lajes mistas com comportamento dúctil em relação ao cisalhamento longitudinal, o método $m-k$ se aplica tanto a lajes com comportamento dúctil como frágil, o que o torna vantajoso do ponto de vista prático

A fôrma de aço transmite o cisalhamento longitudinal por uma interação parcial entre o aço e o concreto por meio de:

- a) ligação mecânica por mossas nas fôrmas de aço trapezoidais, Figura (a);
- b) ligação por meio do atrito devido ao confinamento do concreto nas fôrmas de aço com cantos reentrantes, Figura (b).

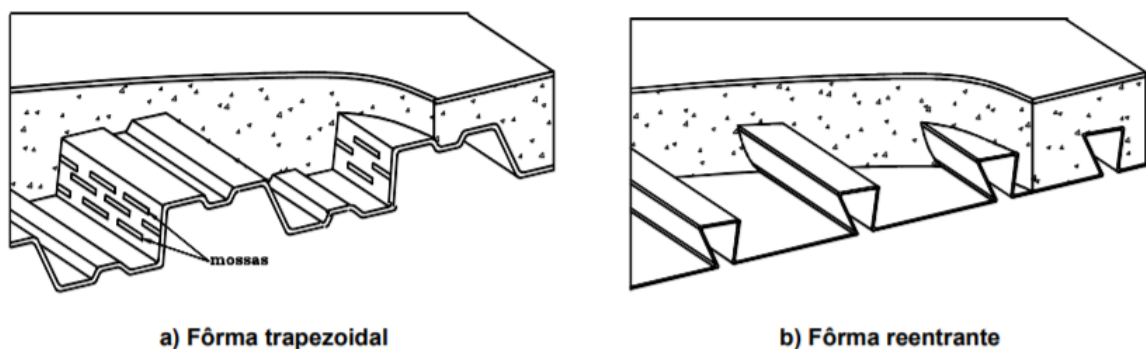


Figura 23: Lajes mistas de aço e concreto.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008)

Esse método foi desenvolvido a partir de ensaios experimentais em lajes mistas simplesmente apoiadas por duas cargas concentradas, dispostas simetricamente aos apoios de uma distância L_s . O objetivo desse método é determinar a força de cisalhamento que provoca o deslizamento entre aço e concreto. Desse modo, a verificação da segurança relativa a este modo de falha é feita através do cálculo do esforço de cisalhamento solicitante máximo V_{sd} , que não deve ultrapassar o valor de cálculo da força resistente ao cisalhamento longitudinal, $V_{l.Rd}$.

O método foi proposto com base no programa experimental de Porter e Ekberg (1976) na Universidade de Iowa (EUA). Ele apresenta uma reta de regressão que correlaciona a carga de ruptura da laje com o vão de cisalhamento da laje ensaiada. A Figura 24 mostra a reta relativa ao cisalhamento longitudinal de coeficientes angular e linear iguais às constantes m e k , respectivamente.

Vale ressaltar que a ferramenta apresentada neste estudo não substitui a necessidade de ensaios para a determinação das constantes m e k e os valores provenientes dos ensaios realizados com a Polydeck 59S são $m = 200,4 \text{ N/mm}^2$ e $k = 0,005 \text{ N/mm}^2$ para o caso de ações estáticas e $m = 151,8 \text{ M/mm}^2$ e $k = 0,005 \text{ N/mm}^2$ para o caso de ações dinâmicas fracas.

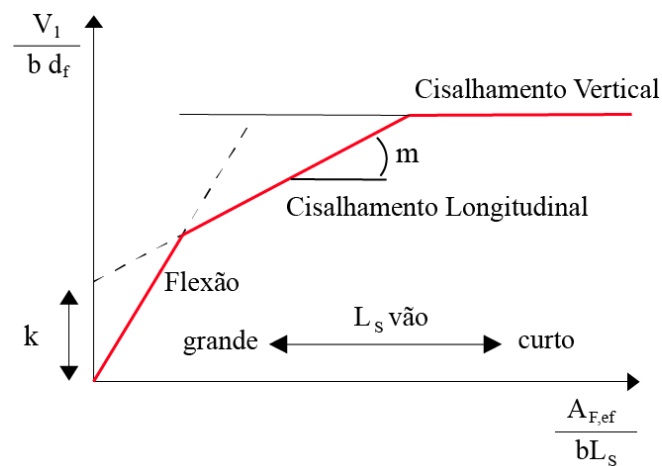


Figura 24: Relação entre o modo de colapso e o vão da laje.

Fonte: CALADO (2015).

Para calcular o valor de $V_{l,Rd}$, considere o equilíbrio de forças na Figura 25.

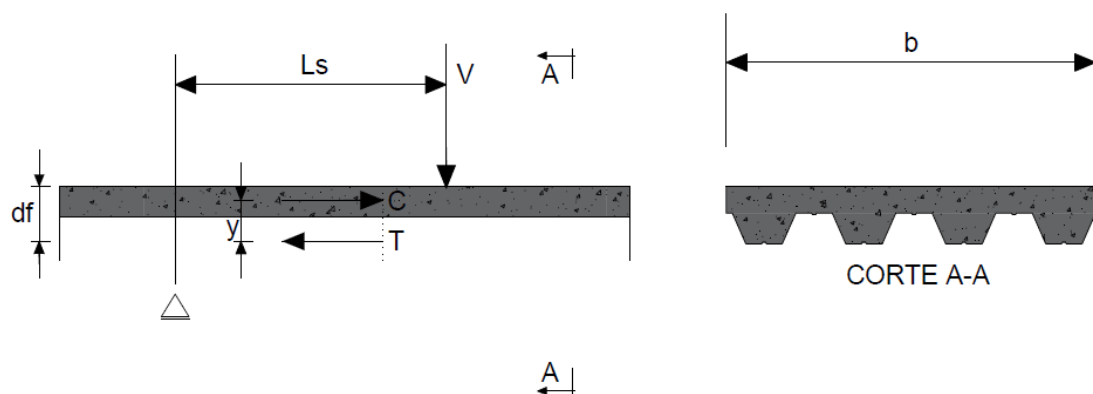


Figura 25: Diagrama com tensões que geram o braço de alavanca.

Fonte: CALADO (2015).

O braço de alavanca y será substituído por d_F de maneira aproximada, que representa a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma. Isso ocorre uma vez que, na maioria dos casos, a profundidade a da linha neutra é muito pequena quando comparada a d_F , de modo que $y = d_F - \frac{a}{2} \cong d_F$. considerando o momento resistente dado pela equação 2.37 e 2.38.

$$M_{Rd} = T \times y \quad (2.37)$$

$$M_{Rd} = T \times d_f \quad (2.38)$$

A área correspondente ao cisalhamento é dada por $b \times L_s$ e a força T dada pela somatória das forças de atrito nos apoios somada com a força resistente ao cisalhamento longitudinal, conforme equação 2.39 e 2.40.

$$M_{Rd} = T \times y \quad (2.39)$$

$$M_{Rd} = (k_1 + k_2 b L_s) \times d_F \quad (2.40)$$

Em que k_1 representa o atrito dos apoios e k_2 é uma constante de proporcionalidade. Sendo $M_{Rd} = V \times L_s$, temos nas equações 2.41 a 2.43:

$$V \times L_s = k_1 d_F + k_2 b d_F L_s = k_1 d_F \frac{b A_{F,ef}}{b A_{F,ef}} + k_2 b d_F L_s \quad (2.41)$$

$$= b d_F \left(\frac{A_{F,ef} k_1}{b L_s A_{F,ef}} \right) + k_2 \quad (2.42)$$

$$V_{l,Rd} = b d_F \frac{\left[\left(m \frac{A_{F,ef}}{b L_s} \right) + k \right]}{\gamma_{s1}} \quad (2.43)$$

sendo:

m e k constantes empíricas em N/mm²;

$V_{l,Rd}$: força cortante longitudinal resistente de cálculo, relativa a 1000 mm de largura de laje, em N;

b : largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;

L_s : vão de cisalhamento, em mm;

γ_{s1} : coeficiente de ponderação da resistência, igual ao determinado pela NBR 8800 (ABNT, 2008) ou especificação utilizada nos ensaios;

$A_{F,ef}$: área da seção efetiva da fôrma (correspondente a 1000 mm).

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008), o vão de cisalhamento L_s varia de acordo com o tipo de carregamento e das condições de apoio. Considerando a laje simplesmente apoiada de vão teórico da laje na direção das nervuras L_F , L_s deve ser tomado como:

- a) $L_F/4$ para cargas uniformemente distribuídas;
- b) a distância entre a carga aplicada e o apoio mais próximo para duas cargas concentradas iguais e simétricas.

O valor de $L_F/4$ foi encontrado considerando a laje mista simplesmente apoiada e sujeita a uma carga uniformemente distribuída w . Igualando a área sob o diagrama de esforço cortante do sistema de carga uniformemente distribuída e a área correspondente a um sistema de duas forças concentradas iguais e simétricas V , o valor de L_s pode ser expresso em função de L_F , conforme Figura .

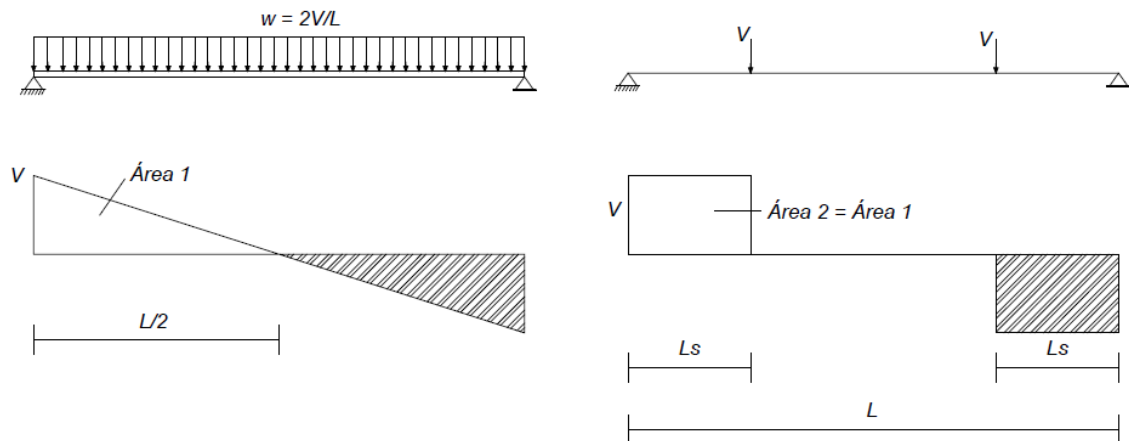


Figura 26: Determinação do comprimento do vão de cisalhamento.

Fonte: CALADO (2015).

- No caso de lajes contínuas, é permitido o uso de um vão simplesmente apoiado equivalente para determinação da resistência conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), que deve ser tomado igual a $0,8L$ para vãos internos e $0,9L$ para vãos de extremidade, conforme Figura 27.

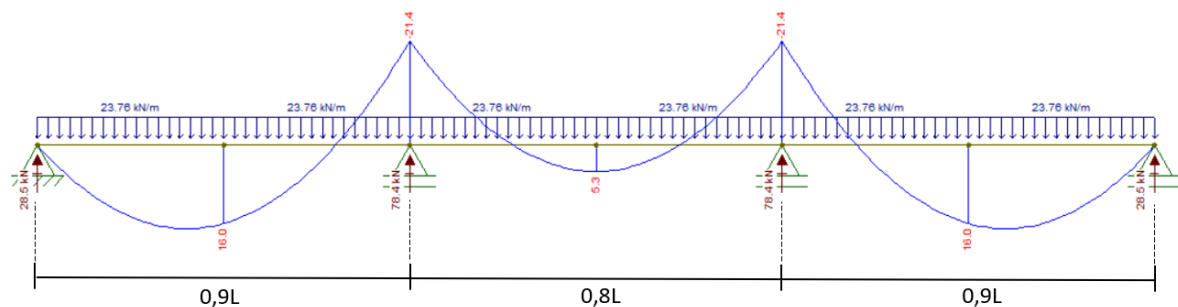


Figura 27 - Representação do vão equivalente para lajes contínuas.

Fonte: Autoras (2021).

2.3.2.4 Cisalhamento Vertical

O colapso devido a esse esforço se dá em lajes mistas de maior altura e vãos pequenos com cargas de alta intensidade. Calado e Santos (2015) destacam que para que a armadura longitudinal contribua com a resistência ao esforço vertical, essa precisa ter um comprimento maior que $l_{bd} + d_p$, sendo l_{bd} o comprimento de ancoragem de cálculo

e d_p é a altura útil da seção, ou seja, a distância do centro de gravidade da área efetiva da chapa perfilada à face superior da laje.

Em conformidade com a NBR 8800 (ABNT, 2008), a força cortante vertical resistente de cálculo, $V_{v,Rd}$, é dada pela equação 2.44.

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} \leq V_{m\acute{a}x} \quad (2.44)$$

onde:

$V_{v,F,Rd}$: força cortante vertical resistente de cálculo da fôrma de aço incorporada, expressa em newton (N), relativa a 1000 mm de largura, determinada conforme a ABNT NBR 14762, calculada conforme equação 2.17 a 2.20;

$V_{v,c,Rd}$: força cortante vertical resistente de cálculo do concreto, expressa em newton (N), relativa a 1000 mm de largura;

$V_{m\acute{a}x}$: limite da força cortante, expresso em newton (N), relativo a 1000 mm de largura.

O cálculo da força cortante vertical resistente de cálculo do concreto é dado conforme equação 2.45 a 2.49.

$$V_{v,c,Rd} = \frac{1000 \tau_{Rd} k_v (1,2 + 40\rho) A_v}{b_n} \quad (2.45)$$

sendo

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} \leq 0,02 \quad (\text{se } A_s = 0; \rho = 0)$$

$$k_v = \begin{cases} \left(1,6 - \frac{d}{1000}\right) \geq 1,0 & \text{Caso haja armadura longitudinal de tração que se estenda a não menos que } l_{b,nec} + d \\ 1,0 & \text{Nos demais casos} \end{cases}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 \times f_{ctd} \quad (2.46)$$

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2.47)$$

$$\eta = 0,3 + 0,7 \left(\frac{\rho_c}{2400} \right) \quad (2.48)$$

$$f_{ct} = 0,21 \times f_{ck}^{2/3} \quad (2.49)$$

O valor de A_v pode ser obtido através da equação 2.50.

$$A_v = \frac{(B + b)(h_t)}{2} \quad (2.50)$$

onde:

A_v : área resistente do concreto, expressa em milímetros quadrados (mm²);

A_s : área da armadura longitudinal de tração, referente à área A_v , expressa em milímetros quadrados (mm²);

b_n : largura entre duas nervuras consecutivas, expressa em milímetros (mm);

$l_{b,nec}$: comprimento de ancoragem necessário, dado na ABNT NBR 6118 para o concreto de densidade normal;

$f_{ctk,inf}$: resistência à tração direta característica inferior do concreto;

f_{ctd} : resistência de projeto do concreto;

τ_{Rd} : tensão de cisalhamento resistente de cálculo.

A seção da laje e os respectivos valores informados acima estão dispostos na Figura 28.

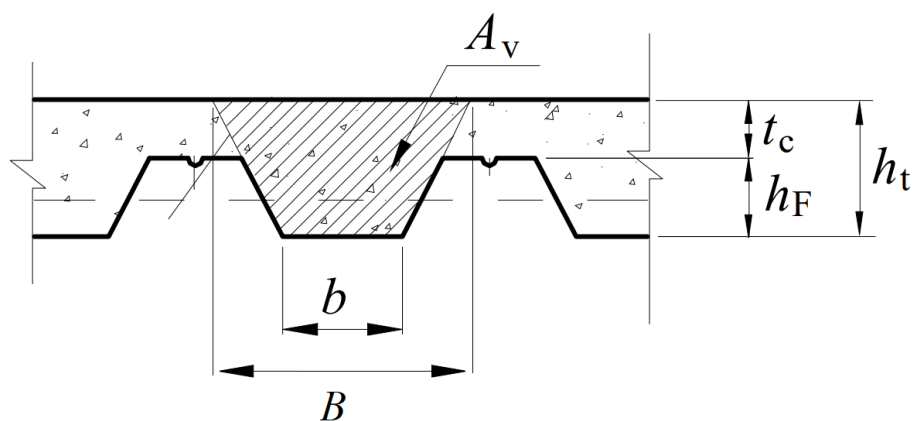


Figura 28 : Área resistente do concreto.

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

E por fim, o limite da força cortante é relativo a 1000 mm de largura e expresso em newton (N), é calculado conforme a equação 2.51.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{1000 \times 0,285(f_{ck})^{\frac{1}{2}}A_v}{b_n} \quad (2.51)$$

2.3.3 Estado Limite de Serviço

2.3.3.1 Fissuração do concreto

É necessário que a fissuração do concreto seja limitada para que não prejudique o funcionamento da laje e garantir sua durabilidade. Para as lajes consideradas simplesmente apoiadas, deve-se colocar uma armadura para evitar efeitos de retração e temperatura com área de no mínimo 0,1% da área de concreto acima da face superior da chapa perfilada e é imprescindível que essa armadura fique a 20 mm abaixo do topo da laje, garantindo a segurança.

2.3.3.2 Deslocamento Vertical

O cálculo da flecha para as cargas aplicadas à laje na fase mista deve ser feito através de uma análise global elástica, desprezando os efeitos da fluência da retração. Além disso, despreza-se também a rigidez de torção dos apoios na determinação das deformações.

A flecha não poderá ser superior a $L_F/350$, considerando apenas o efeito das ações variáveis em que L_F é o vão teórico da laje na direção das nervuras, conforme 2.52.

$$\delta < \frac{L_F}{350} \quad (2.52)$$

O primeiro passo para se obter o valor da flecha solicitante na laje é efetivar a homogeneização da seção transversal (Figura 29), já que as lajes mistas são compostas

pelo aço e concreto, é necessário transformar a mesa colaborante de concreto em aço através da razão modular, conforme equação 2.53 e 2.54.

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (2.53)$$

sendo:

α_E : razão modular;

E_s : módulo de elasticidade do aço, tomado como 200 GPa;

E_{cs} : módulo de elasticidade secante do concreto, tomada conforme NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$b_{tr} = \frac{1000}{\alpha_E} \quad (2.54)$$



Figura 29: Homogeneização da seção transversal mista.

Fonte: (FAVARATO, 2021).

Para o cálculo da linha neutra elástica da seção homogeneizada, deve-se desprezar o concreto tracionado, conforme equação 2.55 a 2.57.

$$\sum Q_{LNE} = 0 \quad (2.55)$$

$$b_{tr}x \left(\frac{x}{2} \right) - A_{F,ef}(d_F - x) = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{b_{tr}x^2}{2} = A_{F,ef}(d_F - x) \quad \text{Sendo } x \leq t_c \quad (2.57)$$

De posse da posição da linha neutra elástica (LNE), calcula-se o momento de inércia da seção homogeneizada ($I_{x,tr}$), expresso em mm^4/m .

Para os casos em que a LNE está na laje de concreto, é adotado a equação 2.58.

$$I_{x,tr} = I_{x,forma} + A_{F,ef}(d_F - x)^2 + \frac{b_{tr}x^3}{3} \quad (2.58)$$

E quando a LNE está abaixo da laje de concreto, utiliza-se conforme equação 2.59.

$$I_{x,tr} = I_{x,forma} + A_{F,ef}(d_F - x)^2 + \frac{b_{tr}t_c^3}{12} + b_{tr}t_c \left(x - \frac{t_c}{2}\right)^2 \quad (2.59)$$

2.3.4 Abertura em Lajes Mistas

Em casos que seja necessário a abertura em lajes mistas, é recomendável que o concreto não seja cortado, especialmente se for usado métodos que utilizem a percussão, pois geram danos nas conexões e na aderência entre a fôrma e o concreto.

Para a elaboração das aberturas, é comum executar uma cofragem em torno ou deixar negativos de poliestireno. Essas aberturas são usualmente feitas para a passagem de escadas, instalações e equipamentos.

Apesar de não ser comum executar reforços específicos em torno das aberturas pequenas com dimensão máxima inferior a 300 mm, acaba sendo necessário grande parte das vezes. Já para aberturas entre 300 mm e 700 mm é usual colocar uma armadura adicional em torno do furo para o reforço [Nethercot, 2003]. Por fim, para aberturas maiores a 700 mm deve ser utilizado perfis de aço em torno da abertura para suportar a estrutura.

2.4. ESFORÇOS SOLICITANTES

Para o cálculo dos esforços solicitantes de cálculo, tanto para a fase de construção quanto de serviço, se faz uso de expressões da literatura derivadas da análise estática linear em conjunto com resultados de vigas modeladas no aplicativo *Ftool*. As equações utilizadas na ferramenta *Scale Deck* estão apresentadas nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1 - Equações do momento solicitante de cálculo

Números de apoios da laje mista	Carregamento em todo o vão	Alternância de carregamento
2 apoios	$0,125qL^2$	$0,125qL^2$
3 apoios	$0,07qL^2$	$0,096qL^2$
4 apoios	$0,08qL^2$	$0,094qL^2$

Tabela 2 - Equações do cortante solicitante de cálculo

Números de apoios da laje mista	Carregamento em todo o vão	Alternância de carregamento
2 apoios	$0,5qL$	$0,5qL$
3 apoios	$0,625qL$	$0,563qL$
4 apoios	$0,6qL$	$0,617qL$

Tabela 3 - Equações do deslocamento máximo

Números de apoios da laje mista	Carregamento em todo o vão	Alternância de carregamento
2 apoios	$\frac{0,013qL^4}{E_s I}$	$\frac{0,013qL^4}{E_s I}$
3 apoios	$\frac{0,0054qL^4}{E_s I}$	$\frac{0,0092qL^4}{E_s I}$
4 apoios	$\frac{0,0069qL^4}{E_s I}$	$\frac{0,0089qL^4}{E_s I}$

É importante evidenciar que os valores das constantes para as equações do deslocamento de três e quatro apoios considerando a alternância de carregamento e para a equação do cortante com três apoios, também considerando a alternância de

carregamento, foram retirados do *Ftool* (2018), devido a divergência de resultados na análise elástica feita no *software* com as equações dadas pelo manual.

Vale ressaltar que, na fase de construção, utiliza-se o momento de inércia efetivo da seção I_{ef} , em que os cálculos para a determinação foram expostos anteriormente.

O máximo deslocamento vertical da laje nesta fase é calculado considerando as ações de peso próprio da fôrma e do concreto.

Além disso, para a ferramenta em questão, foi adotado $L/240$ como flecha limite na fase de montagem, seguindo a recomendação de Perfilor (2000).

O deslocamento máximo da laje mista em serviço não pode ser maior que $L/350$, e o máximo deslocamento vertical solicitante da laje mista em serviço é calculado para ações variáveis. Com isso, o momento de inércia ($I_{x,tr}$) corresponde ao seu valor efetivo, calculado após a homogeneização da seção transversal na fase de serviço, desprezando a contribuição do concreto tracionado.

3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

3.1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de automatizar o dimensionamento de lajes mistas, foi desenvolvido neste trabalho o programa computacional *Scale Deck*, uma ferramenta de cálculo de simples utilização e fácil entendimento dos resultados. Esse capítulo descreve as características do *software* desenvolvido.

3.2 A IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA

A implementação computacional de fluxogramas de cálculo de lajes mistas foi realizada em linguagem *Visual Basic*, no ambiente *Microsoft Office Visual Basic for Application 2016 (VBA)*. Esta ferramenta foi escolhida pela facilidade na elaboração da interface, na implementação dos códigos e na depuração dos erros. Além disso, objetivou-se entregar aos projetistas e à comunidade acadêmica um programa de fácil acesso e entendimento, que possa ser utilizado em qualquer computador, sem maiores requisitos de sistema.

3.3 SOBRE O PROGRAMA *SCALE DECK*

O programa *Scale Deck* engloba a verificação dos estados limites-últimos de momento fletor, esforço cortante vertical e longitudinal e do estado-limite de serviço de flecha, antes e depois da cura, utilizando a fôrmas de aço galvanizado Polydeck 59S, comercializadas no Brasil.

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, o programa avalia todos os estados-limites aplicáveis e retorna o resultado do dimensionamento da laje. Adicionalmente, o programa informa qual malha anti-fissuração deve ser utilizada para combater a fissuração por retração do concreto.

Os dados de entrada do programa são:

- Em relação às ações: cargas permanentes (peso próprio de estruturas metálicas, peso próprio de estruturas pré-moldadas, peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados, peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições *in loco*, peso próprio de elementos construtivos em geral e

equipamentos) e as ações variáveis (ação do vento e sobrecarga de uso e ocupação), dadas em kN/m^2 . Adicionalmente, o usuário deve informar a natureza das ações consideradas, classificadas em estáticas ou dinâmicas fracas;

- Em relação às propriedades do concreto: a resistência característica à compressão, dada em MPa, e o tipo de agregado graúdo utilizado;
- Em relação às propriedades da fôrma: espessura da fôrma, dada em mm;
- Em relação às propriedades da laje mista: a altura total da laje, dada em cm; o vão da laje, dado em mm; a quantidade de apoios e o modelo da tela de continuidade, caso a laje possua mais de dois apoios.

Por fim, os dados de saída são:

- Em relação à verificação estrutural: o programa indica se a laje dimensionada atende aos critérios de dimensionamento e se necessita de escoramento. Ainda, informa a solicitação e a resistência para cada estado-limite e apresenta o valor da razão entre a solicitação e resistência, denominada índice de aproveitamento;
- Em relação à fissuração do concreto: a malha anti-fissuração necessária para configuração apresentada;
- Em relação ao efeito do empoçamento do concreto: o programa indica se, para a configuração apresentada, o empoçamento do concreto foi considerado no dimensionamento, incluindo uma camada extra de concreto com espessura igual a 70% do deslocamento máximo, caso este exceda $L_F/250$.

A verificação feita pelo programa são resultados permitidos para que os elementos apresentem um dimensionamento seguro, porém, nada impede que maiores dimensões sejam adotadas pelo projetista.

3.4 APLICABILIDADE DO PROGRAMA

O programa abrange o dimensionamento, tanto na fase de construção como na fase de serviço, de lajes mistas com fôrmas de aço do tipo Polydeck 59S e as verificações são realizadas em consonância com as normas brasileiras aplicáveis. Portanto, o programa limita-se a dimensionar esse modelo específico de fôrma de acordo com a normatização nacional.

Neste contexto, a ferramenta não calcula a armadura de aderência, que é necessária em casos em que o esforço cortante é superior ao esforço cortante admissível e é utilizada em vãos extremos. Vale ressaltar também que, para os casos de lajes contínuas, a tela de continuidade é solicitada ao usuário e, portanto, não é calculada pela ferramenta. Apenas a tela de fissuração é dimensionada pelo *Scale Deck*.

Cabe acrescentar que a ferramenta não realiza a análise estrutural para cálculo dos esforços solicitantes da estrutura e deslocamentos, mas sim, faz uso de expressões da literatura derivadas da análise estática linear. Também utiliza resultados de vigas modeladas no aplicativo *Ftool*.

Além disso, o dimensionamento é realizado apenas em temperatura ambiente com cargas uniformemente distribuídas na superfície da laje. Desse modo, o estado-limite de resistência à punção para carregamento concentrado não foi contemplado e deve ser verificado separadamente.

3.5 FLUXOGRAMAS DE CÁLCULO

Para esclarecer os procedimentos de cálculo e mostrar a ordem e a sequência dos cálculos, foram desenvolvidos fluxogramas que ilustram os comandos básicos necessários como de tomada de decisão e seleção de dados. Estes fluxogramas foram criados para facilitar a implementação computacional e estão apresentados nesse trabalho com o intuito de facilitar o entendimento do leitor sobre o funcionamento do programa

O primeiro fluxograma trata-se de um fluxograma geral, que apresenta o funcionamento do programa com o objetivo de fornecer uma visão macro da ferramenta. Os fluxogramas desenvolvidos estão em anexo na ordem: fluxograma geral (ANEXO A), fluxograma do momento fletor resistente – Antes da cura (ANEXO B), fluxograma do cortante resistente – Antes da cura (ANEXO C), fluxograma do deslocamento máximo – Antes da cura (ANEXO D), fluxograma do momento fletor resistente – Depois da cura (ANEXO E), fluxograma do cisalhamento longitudinal (ANEXO F), fluxograma do cisalhamento vertical (ANEXO G) e fluxograma do deslocamento máximo – Depois da cura (ANEXO H).

3.6 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

O programa inicia-se com a interface principal, contendo uma breve explicação da ferramenta e com os nomes das partes envolvidas, conforme Figura 30.

O acesso às janelas do programa é feito através das abas de dados de entrada, localizadas na parte superior. Inicialmente, o usuário deverá inserir os dados de entrada (ações e propriedades), e então, poderá visualizar os resultados na aba de dados de saída. Para calcular a laje, deve-se clicar no botão “Calcular” na parte inferior da página e caso seja necessário, é possível limpar todos os dados inseridos clicando em “Limpar”.



Figura 30: Interface inicial do programa Scale Deck.

Fonte: Autoras (2021).

A primeira aba a ser preenchida do programa é a “Dados de Entrada – Ações”, mostrada na Figura 31. Nesta aba, o usuário deverá inserir as ações permanentes exercidas na laje separadamente das ações variáveis. Dentro de cada uma dessas, é possível inserir até quatro tipos de ações, sendo as mostradas a seguir para as ações permanentes.

- Peso Próprio de estruturas metálicas;
- Peso Próprio de estruturas pré-moldadas;
- Peso Próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados com adições in loco;

- Peso Próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco;
- Peso Próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos.

Para as ações variáveis, o usuário terá a opção de inserir “Ação do vento” e “Sobrecarga”.

Scale Deck - Dimensionamento de Lajes Mistas

Dados de Entrada - Ações | Dados de Entrada - Propriedades

Ações Permanentes

0,8	kN/m ²	Peso Próprio de elementos construtivos industrializados com adições in loco
	kN/m ²	
	kN/m ²	
	kN/m ²	

Ações Variáveis

20	kN/m ²	Sobrecargas
	kN/m ²	
	kN/m ²	
	kN/m ²	

Figura 31: Janela de dados de entrada das ações.

Fonte: Autoras (2021).

A próxima aba a preencher é a “Dados de Entrada – Propriedades” (Figura 32), em que o usuário insere as características da fôrma e do concreto, sendo essas listadas a seguir.

- a resistência característica à compressão (f_{ck}), dada em MPa;
- a espessura total da laje, dada em cm;
- o vão da laje, dado em mm;
- o tipo de ação atuando na laje, sendo ações estáticas ou dinâmicas fracas;
- o agregado graúdo utilizado no concreto;
- a quantidade de apoios da laje;
- malha de continuidade, caso a laje possua mais de dois apoios.

Scale Deck - Dimensionamento de Lajes Mistas

Dados de Entrada - Ações | Dados de Entrada - Propriedades

Propriedades

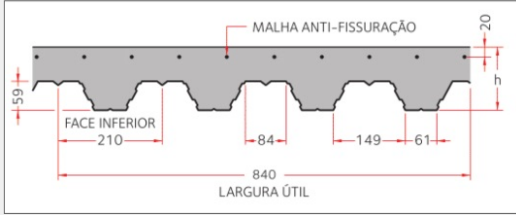
fck MPa Forma

Espeçura total da laje cm Espeçura

Vão mm Agregado

Quantidade de apoios

Tela de Continuidade



Calcular

Limpar

Figura 32: Janela de dados de entrada das propriedades.

Fonte: Autoras (2021).

Com todos os dados de entrada inseridos, o usuário deverá apertar “Calcular” e a verificação da laje será feita. Com isso, o usuário terá como resposta o *status* do dimensionamento, com as seguintes possibilidades:

- “ATENDE”, a laje dimensionada atende aos requisitos e não necessita escoramento;
- “NECESSÁRIO ESCORAMENTO”, a laje dimensionada atende aos requisitos, mas necessita escoramento para a fase de construção;
- “NECESSÁRIO REDIMENSIONAR”, a laje dimensionada não atende aos requisitos necessários e deverá ser redimensionada.

Além disso, o *Scale Deck* apresentará os esforços solicitantes e resistentes, e seus respectivos índices de aproveitamento. Em relação à armadura, a ferramenta disponibilizará o modelo da malha anti-fissuração a ser utilizada e em relação ao concreto na fase de construção, será mostrado se o efeito do empoçamento foi considerado ou não.

Por fim, o usuário poderá escolher entre iniciar um novo dimensionamento, clicando em “Dimensionar novamente”, ou poderá voltar nos dados já inseridos, caso queira alterar alguma informação, clicando no botão “Voltar” (Figura 33).

Scale Deck - Dimensionamento de Lajes Mistas

Resultados

Antes da Cura

	Valores Resistentes	Valores Solicitantes	Índices de Aproveitamento
Cortante	113,64 kN/m	6,68 kN/m	5,88 %
Momento Fletor Positivo	7,08 kN.m/m	3,34 kN.m/m	47,18 %
Momento Fletor Negativo	0 kN.m/m	0 kN.m/m	0 %
Flecha	8,33 mm	4,8 mm	57,64 %

Depois da Cura

	Valores Resistentes	Valores Solicitantes	Índices de Aproveitamento
Cortante Longitudinal	93,59 kN/m	36,92 kN/m	39,45 %
Cortante Vertical	171,23 kN/m	36,92 kN.m/m	21,56 %
Momento Fletor Positivo	66,51 kN/m	18,46 kN.m/m	27,75 %
Momento Fletor Negativo	0 kN/m	0 kN.m/m	0 %
Flecha	5,71 mm	0,72 mm	12,58 %

Malha Anti-Fissuração

Modelo Q - 159

Efeito do Empoamento

Efeito do empoamento não foi considerado

Dimensionamento

ATENDE

Dimensionar Novamente
Voltar

Figura 33: Janela de dados de saída.

Fonte: Autoras (2021).

3.7 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Por insuficiência de exemplos de dimensionamentos completos dentre as literaturas utilizadas, a validação da ferramenta consistiu em comparar os resultados de um exemplo específico de dimensionamento de laje mista biapoiada com os de Favarato (2021), adaptando alguns valores para que também fosse possível a comparação com o catálogo da Perfilor (2016). Foram desenvolvidos exemplos considerando, inicialmente, a laje biapoiada e a seguir contínua, com o objetivo de validar o máximo possível de opções dentro do programa.

3.7.1 Exemplos de validação desenvolvidos

Dimensionamento de um pavimento em que se deseja aplicar o Polydeck 59S, Figuras 34 e 35, com espessura de 1,25 mm ($f_{yF} = 280 \text{ MPa}$). Verificação de uma laje com espessura total $h = 20 \text{ cm}$, executada em concreto com $f_{ck} = 22 \text{ MPa}$ (agregado graúdo de granito do tipo B0), com os seguintes carregamentos:

- Peso próprio do concreto armado;
- Peso próprio da fôrma;
- Revestimento de piso total com 4cm de espessura ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$);
- Sobrecarga de utilização de 2000 kgf/m^2 ;

Inicialmente, será considerado a laje como biapoiada em todos os trechos com $L = 2,00 \text{ m}$.

Laje Biapoiada - Antes da Cura

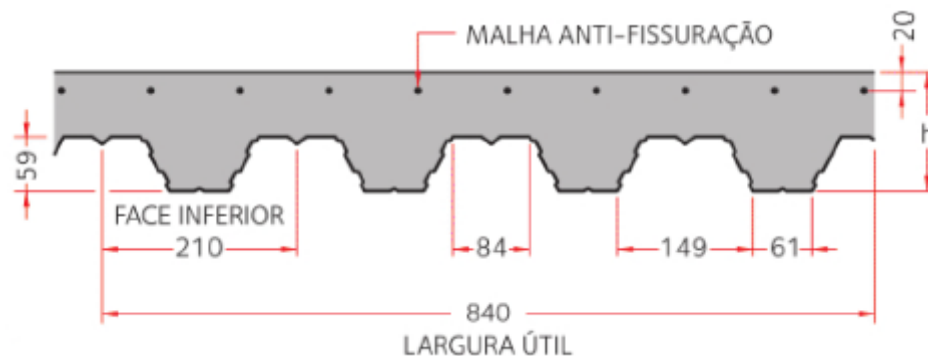


Figura 34: Seção da laje com fôrma Polydeck59S.

Fonte: Perfilar (2000).

Características Mecânicas do Perfil

Espessura da chapa (mm)	Momento de Inércia I (cm ⁴ /m)	Módulo Resistente W (cm ³ /m)		Peso (Kg/m ²)
0,80	55,15	i/vi 17,02	i/vs 20,73	9,14
0,95	74,56	i/vi 23,02	i/vs 28,03	10,86
1,25	90,10	i/vi 27,81	i/vs 33,87	14,29

Figura 35: Características mecânicas do perfil Polydeck 59S.

Fonte: Perfilar (2000).

1) Carregamentos atuantes antes da cura do concreto:

- Peso próprio da fôrma:

$$PP_F = 14,29 \cdot \frac{9,8}{1000} \frac{kN}{m^2}$$

$$PP_F = 0,140 \frac{kN}{m^2}$$

- Peso próprio do concreto fresco:

$$A_c = \left[\frac{(12,6 + 6,1) \times 5,9}{2} + 21 \times 14,1 \right] \times \frac{100}{21}$$

$$A_c = 1672 \frac{cm^2}{m} = 0,167 \frac{m^2}{m} \therefore V_c = 0,167 \frac{m^3}{m^2}$$

$$PP_c = V_c \times \gamma_c = 0,167 \times 24 \therefore PP_c = 4,008 \frac{kN}{m^2}$$

- Sobrecarga de construção: $1 \frac{kN}{m^2}$

2) Combinações de ações

$$q_{u,const} = 1,15 \times 0,140 + 1,30 \times 4,008 + 1,30 \times 1 = 6,671 \frac{kN}{m^2}$$

$$q_{s,const} = 1,00 \times 0,140 + 1,00 \times 4,008 = 4,148 \frac{kN}{m^2}$$

3) Determinações das solicitações de cálculo:

- Momento fletor solicitante de cálculo:

$$M_{sd,const} = \frac{q_{u,const} \times L^2}{8} = \frac{6,671 \times 2,00^2}{8} = 3,335 \frac{kN \cdot m}{m}$$

- Força cortante solicitante de cálculo:

$$V_{sd,const} = \frac{q_{u,const} \times L}{2} = \frac{6,671 \times 2,00}{2} = 6,67 \frac{kN}{m}$$

4) Verificação do estado-limite último a Momento Fletor:

- Dados de entrada:

i. Tensão de escoamento do aço: $f_{yF} = 280 \text{ MPa} = 28 \text{ kN/cm}^2$

ii. Posição do CG em relação à fibra inferior $y_{cg} = 32,4 \text{ mm}$

iii. Momento de inércia: $I_y = 901000 \text{ mm}^4/m$

iv. Módulo de resistência elástico: $W = \frac{901000}{32,4} = 27808,64 \text{ mm}^3/\text{m}$

- Saídas do CUFSM:

$$\sigma_{cr,l} = 162,356 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{cr,dist} = 137,823 \frac{kN}{cm^2}$$

- Momento fletor resistente de cálculo

i. Flambagem local:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{W f_y}{W \sigma_{cr,l}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,l}}} = \sqrt{\frac{28}{162,356}} = 0,415$$

$$M_{Rl} = M_{Re} = W f_y = 27808,64 \times 28 = 778,64 \frac{kN \cdot cm}{m}$$

ii. Flambagem distorcional:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} = \sqrt{\frac{W f_y}{W \sigma_{dist}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{dist}}} = \sqrt{\frac{28}{137,823}} = 0,451$$

$$M_{Rdist} = M_{Re} = W f_y = 27808,64 \times 28 = 778,64 \frac{kN \cdot cm}{m}$$

iii. Momento fletor resistente de cálculo:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \min(M_{Rl}; M_{Rdist}) = \frac{778,64}{1,10}$$

$$M_{Rd} = 707,85 \frac{kN \cdot cm}{m} = 7,08 \frac{kN \cdot m}{m}$$

iv. Verificação:

$$i_M = \frac{M_{sd,const}}{M_{Rd}} = \frac{3,335}{7,08} = 0,471 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

5) Verificação do estado-limite último a esforço cortante

- Resistência da fôrma de aço ($V_{v,F,Rd}$)

$$t = 1,25 - 0,04 = 1,21 \text{ mm}$$

$$h = 64,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_w = \frac{64,5}{1,21} = 53,3$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,08 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{28}} = 64,5$$

$\lambda_w < \lambda_p \therefore$ Plastificação da alma por cisalhamento

$$V_{v,F,Rd1} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} = \frac{0,6 \times 28 \times 6,45 \times 0,121}{1,10} \therefore V_{v,R,Rd1} = 11,92 \text{ kN}$$

$$V_{v,F,Rd} = 2 V_{v,Rd1} \frac{1000}{b_n} = 2 \times 11,92 \times \frac{1000}{210} \therefore V_{v,R,Rd} = 113,52 \text{ kN/m}$$

$$i = \frac{V_{sd}}{V_{Rd}} = \frac{6,67}{113,52} = 0,058 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

6) Cálculo dos deslocamentos:

- Dados de entrada:

- Tensão de escoamento do aço: $f_{yF} = 280 \text{ MPa} = 28 \text{ kN/cm}^2$
- Posição do CG em relação à fibra inferior $y_{cg} = 32,4 \text{ mm}$
- Momento de inércia: $I_y = 901000 \text{ mm}^4/\text{m}$
- Módulo de resistência elástico: $W = \frac{901000}{32,4} = 27808,64 \text{ mm}^3/\text{m}$

- Saídas do CUFSM:

$$\sigma_{cr,l} = 162,356 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{cr,dist} = 137,823 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Momento fletor atuante em serviço na peça:

$$M_n = q_{s,const} \times \frac{L^2}{8} = 4,148 \times \frac{2,00^2}{8} = 2,074 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} = 207,4 \frac{\text{kN} \cdot \text{cm}}{\text{m}}$$

- Momento fletor resistente em serviço:

i. Flambagem local:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{M_n}{W \sigma_{cr,l}}} = \sqrt{\frac{207,40}{27,808 \times 162,356}} = 0,214$$

$$M_{Rl} = M_n = 207,4 \frac{\text{kN} \cdot \text{cm}}{\text{m}}$$

ii. Flambagem distorcional:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W f_y}{M_{dist}}} = \sqrt{\frac{M_n}{W \sigma_{dist}}} = \sqrt{\frac{207,40}{27,808 \times 137,823}} = 0,233$$

$$M_{Rdist} = M_n = 207,4 \frac{kN \cdot cm}{m}$$

iii. Momento fletor resistente de cálculo:

$$M_{Rser} = \min(M_{RL}; M_{Rdist}) = 207,4 \frac{kN \cdot cm}{m}$$

- Cálculo do momento de inércia efetivo:

$$I_{ef} = I_y \left(\frac{M_{Rser}}{M_n} \right) \leq I_y$$

$$I_{ef} = 90,1000 \times \left(\frac{207,4}{207,4} \right)$$

$$I_{ef} = 90,1000 \text{ cm}^4/m$$

- Cálculo da flecha:

$$\delta_{max} = \frac{5qL^4}{384E_s I_{ef}} = \frac{5 \times 0,0415 \times 200^4}{384 \times 20000 \times 90,1000} \therefore \boxed{\delta_{max} = 0,480 \text{ cm}}$$

$$\delta_{LIM} \leq \left\{ \frac{L}{180} = \frac{200}{240} = 0,833 \text{ cm} \therefore \delta_{LIM} = 0,833 \text{ cm} \right.$$

- Verificação:

$$i_d = \frac{\delta_{max}}{\delta_{LIM}} = \frac{0,480}{0,833} = 0,576 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

Laje Biapoiada - Depois da cura

1) Cálculo dos valores de projeto

- Peso próprio do concreto

$$PP_{cd} = 4,008 \times 1,4 = 5,612 \frac{kN}{m^2}$$

- Peso próprio da fôrma de aço

$$P_F = 14,29 \times 0,0098 \times 1,25 = 0,175 \frac{kN}{m^2}$$

- Revestimento de piso

$$P_R = e_R \times \gamma_R = 0,04 \times 20 \times 1,4 = 1,12 \frac{kN}{m^2}$$

- Sobrecarga de utilização

$$P_S = 20,00 \times 1,5 = 30,00 \frac{kN}{m^2}$$

2) Combinação última normal

$$q_d = 5,612 + 0,175 + 1,12 + 30,00 = 36,907 \frac{kN}{m^2}$$

3) Esforços solicitantes de cálculo máximos

- Momento fletor solicitante de cálculo

$$M_{sd} = \frac{q_d \times L^2}{8} = \frac{36,907 \times (2,00)^2}{8} \therefore M_{sd} = 18,454 \frac{kN \cdot m}{m}$$

- Esforço cortante solicitante de cálculo

$$V_{sd} = \frac{q_d \times L}{2} = \frac{36,907 \times 2,00}{2} \therefore V_{sd} = 36,907 \frac{kN}{m}$$

4) Propriedades dos materiais

Os cálculos dos estados limites foram feitos com base das propriedades da fôrma Polydeck 59s, Figura 36.

	Espessura da chapa (mm)			
	nominal	0,80	0,95	1,25
	sem revest.	0,76	0,91	1,21
Peso Bruto	(kg/m²)	9,14	10,86	14,29
Área de Seção Transversal do Aço (A _p)	(mm²/m)	1086	1300	1729
Centro de Gravidade (inferior/superior)	(mm)	32,4 / 26,6		
Momento de Inércia	(mm⁴/m)	551.500	745.600	901.000
Módulo Resistente Inferior	(mm³/m)	17.020	23.020	27.810
Módulo Resistente Superior	(mm³/m)	20,730	28,030	33,870

VALORES DE M E K PARA O POLYDECK 59S		
	m	k
	(N/mm ²)	(N/mm ²)
Ações Estáticas	200,4	0,005
Ações Dinâmicas Fracas	151,8	0,005

Figura 36: Propriedades dos materiais.

Fonte: Perfilor (2000).

5) Verificação dos estados-limites últimos a momento fletor

- Determinação da posição da LNP na laje mista

$$N_{cf} = 0,85 b t c f_{cd} = 0,85 \times 100 \times (20 - 5,9) \times \frac{2,2}{1,4} \therefore$$

$$N_{cf} = 1883,36 \frac{kN}{m}$$

$$N_{pa} = A_{F,ef} f_{yFd} = 17,29 \times \frac{28}{1,1} = 440,11 \frac{kN}{m}$$

$N_{cf} > N_{pa} \therefore$ a LNP está na capa de concreto

- Profundidade da LNP

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 b f_{cd}} = \frac{440,11}{0,85 \times 100 \times \frac{2,2}{1,4}} \therefore a = 3,29 \text{ cm}$$

- Cálculo do momento fletor resistente de cálculo

$$d_F = 20 - 3,24 = 16,76 \text{ cm}$$

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5a) = 440,11 \times (16,76 - 0,5 \times 3,29)$$

$$\therefore M_{Rd} = 6652,26 \text{ kN.cm/m} = 66,523 \text{ kN.m/m}$$

- Índice de aproveitamento

$$i = \frac{M_{sd}}{M_{Rd}} = \frac{18,454}{66,523} \therefore i = 27,74\%$$

6) Verificação do estado-limite último a esforço cortante longitudinal

- Determinação do vão de cisalhamento para a configuração de projeto

$$L_s = 0,25L = 0,25 \times 2,00 = 0,5 \text{ m} \therefore L_s = 500 \text{ mm}$$

- Dados para cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal (Figura 37).

$$A_{F,ef} = 1729 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\gamma_{sl} = 1,25$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$m = 200,4 \text{ N/mm}^2$$

$$d_F = 200 - 32,4 = 167,6 \text{ mm}$$

$$k = 0,005 \text{ N/mm}^2$$

VALORES DE M E K PARA O POLYDECK 59S		
	m	k
	(N/mm ²)	(N/mm ²)
Ações Estáticas	200,4	0,005
Ações Dinâmicas Fracas	151,8	0,005

Figura 37: Valores de m e k para o Polydeck 59S.

Fonte: Perfilor (2000).

- Resistência ao cisalhamento longitudinal

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{s1}} \left(m \frac{A_{F,ef}}{bL_s} + k \right) = \frac{1000 \times 167,6}{1,25} \left(200,4 \times \frac{1729}{1000 \times 500} + 0,005 \right)$$

$$= 93585,585 \text{ N/m}$$

$$V_{l,Rd} = 93,586 \text{ kN/m}$$

$$i = \frac{V_{l,Sd}}{V_{l,Rd}} = \frac{36,907}{93,586} \therefore i = 39,44\%$$

7) Verificação do estado-limite último a esforço cortante vertical

- Resistência da fôrma de aço ao cisalhamento vertical ($V_{v,F,Rd}$)

$$t = 1,25 - 0,04 = 1,21 \text{ mm}$$

$$h = 64,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_w = \frac{64,5}{1,21} = 53,3$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} = 1,08 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{28}} = 64,5$$

$$\lambda_w < \lambda_p \therefore \text{Plastificação da alma por cisalhamento}$$

$$V_{v,F,Rd1} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma} = \frac{0,6 \times 28 \times 6,45 \times 0,121}{1,10} \therefore V_{v,R,Rd1} = 11,920 \text{ kN}$$

$$V_{v,F,Rd} = 2 V_{v,R,Rd1} \frac{1000}{b_n} = 2 \times 11,92 \times \frac{1000}{210} \therefore V_{v,F,Rd} = 113,520 \text{ kN/m}$$

- Resistência do concreto ao cisalhamento vertical ($V_{v,c,Rd}$):

Neste caso, **não há armadura adicional** alojada nas nervuras. Logo, $A_s = 0$ e $k_v = 1,0$

$$p = 61 + 2 \times \left[\frac{126 - 61}{2 \times 59} \times 200 \right] = 281,34 \text{ mm}$$

$$A_v = \left(\frac{6,1 + 28,134}{2} \right) \times 20 = 342,34 \text{ cm}^2, \text{ conforme Figura 38.}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,21(f_{ck})^{2/3} = 0,21 \times \sqrt[3]{22^2} = 1,648 \text{ MPa}$$

$$\eta = 0,3 + 0,7 \left(\frac{\rho_c}{2400} \right) = 0,3 + 0,7 \left(\frac{2400}{2400} \right) = 1,0$$

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{1 \times 0,1648}{1,4} = 0,1177 \frac{kN}{cm^2} = 1,177 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = 0,25 \times 1,177 = 0,29425 \frac{N}{mm^2}$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} = \frac{0}{488} = 0$$

$$V_{v,c,Rd} = \tau_{Rd} k_v (1,2 + 40\rho) A_v \frac{1000}{b_n}$$

$$V_{v,c,Rd} = 0,29425 \times 1 \times (1,2 + 0) \times 34234 \times \frac{1000}{210}$$

$$V_{v,c,Rd} = 57562,02 \frac{N}{m} = 57,562 \frac{kN}{m}$$

- Resistência máxima ao cisalhamento vertical ($V_{Rd,máx}$):

$$b_n = 210 \text{ mm}$$

$$A_v = 34234 \text{ mm}^2 \text{ 7 (Figura 38.}$$

$$f_{ck} = 22 \text{ MPa} = 22 \frac{N}{mm^2}$$

$$V_{Rd,máx} = 0,285 \sqrt{f_{ck}} A_v \frac{1000}{b_n} = 0,285 \times \sqrt{22} \times 34234 \times \frac{1000}{210} = 217918,73 \frac{N}{m}$$

$$V_{Rd,máx} = 217,918 \frac{kN}{m}$$

- Resistência ao cisalhamento vertical ($V_{v,Rd}$)

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} = 113,520 + 57,562 = 171,082 < V_{Rd,máx} = 217,918$$

$$i = \frac{V_{v,Sd}}{V_{v,Rd}} = \frac{36,907}{171,082} \therefore i = 21,57\%$$

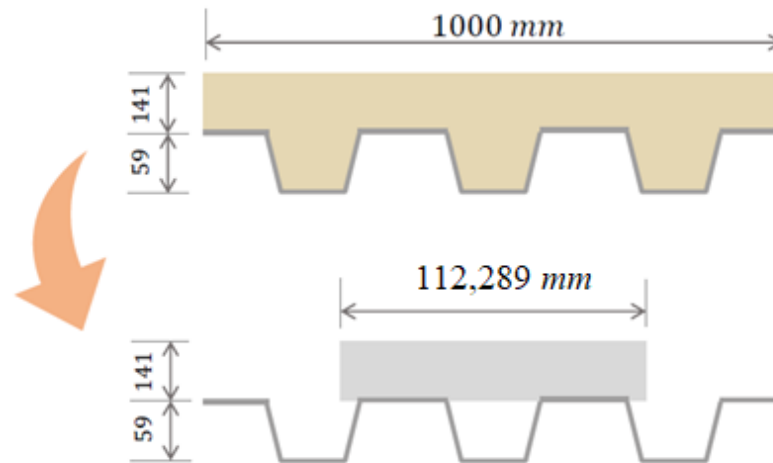


Figura 39: Demonstração da largura transformada da laje.

Fonte: FAVARATO (2021).

- Posição da Linha neutra elástica (LNE)

$$A_{F,ef} = 1729 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$d_F = 200 - 32,4 = 167,6 \text{ mm}$$

$$\sum Q_{LNE} = 0 \rightarrow \frac{b_{tr}x^2}{2} = A_{F,ef}(d_F - x)$$

$$\frac{112,289}{2}x^2 = 1729 \times (167,6 - x) \rightarrow 56,145x^2 + 1729x - 289780,4 = 0$$

$$x_1 = 58,076 \text{ mm}$$

$$x_2 = -88,871 \text{ mm}$$

$$\therefore x = 58,076 \text{ mm} < t_c$$

- Momento de inércia da seção homogeneizada

$$I_{x,tr} = I_{x,forma} + A_{F,ef}(d_F - x)^2 + \frac{b_{tr}x^3}{3}$$

$$I_{x,tr} = 901000 + 1729 \times (167,6 - 58,076)^2 + 112,289 \times \frac{(58,076)^3}{3}$$

$$I_{x,tr} = 28.972.953,88 \frac{\text{mm}^4}{\text{m}}$$

- Cálculo do deslocamento

$$\delta_{max} = \frac{5q_{var}L^4}{384E_sI_{x,tr}} = \frac{5 \times 20 \times 2000^4}{384 \times 200000 \times 28972953,88} = 0,719 \text{ mm}$$

$$\delta_{lim} = \frac{L}{350} = \frac{2000}{350} = 5,71 \text{ mm}$$

$$i = \frac{\delta_{max}}{\delta_{lim}} = \frac{0,719}{5,710} \therefore i = 12,59\%$$

9) Disposições Construtivas

- Espessura da capa de concreto sobre a fôrma

$$t_c = 200 - 59 = 141 \text{ mm} > 50 \text{ mm} \therefore Ok!$$

- Dimensão máxima do agregado graúdo

Para brita 0 (B0): $d_{B0} = 10 \text{ mm}$

$$b_o = \frac{61 + 126}{2} = 93,5 \text{ mm}$$

$$d_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 0,4t_c = 0,4 \times 141 = 56,4 \text{ mm} \\ \frac{b_o}{3} = \frac{93,5}{3} = 31,2 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \end{cases} \therefore d_{m\acute{a}x} = 30 \text{ mm}$$

$$d_{B0} = 10 \text{ mm} < d_{m\acute{a}x} = 30 \text{ mm} \therefore Ok!$$

- Área de aço da tela

$$A_{s,tela} = \frac{100t_c}{1000} = \frac{100 \times 14,1}{1000} = 1,41 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Utilizar **tela Q159** (2,50 kg/m²).

Validação – Laje Contínua

Para um exemplo de validação completo, foi considerado também a laje como contínua, contendo 4 apoios e mantendo os dados iniciais do exemplo, apenas alterando a espessura total da laje de $h = 20\text{cm}$ para $h = 15\text{cm}$.

Laje Contínua - Antes da Cura

1) Cálculo dos pesos próprios da laje

- Peso próprio do concreto

$$A_c = \left[\frac{(12,6 + 6,1) \times 5,9}{2} + 21 \times 9,1 \right] \times \frac{100}{21}$$

$$A_c = 1172,69 \frac{cm^2}{m} = 0,117 \frac{m^2}{m} \therefore V_c = 0,117 \frac{m^3}{m^2}$$

$$PP_c = V_c \times \gamma_c = 0,117 \times 24 \therefore PP_c = 2,808 \frac{kN}{m^2}$$

- Peso próprio da fôrma de aço

$$P_F = p_F \times g = 14,29 \times 0,0098 = 0,14 \frac{kN}{m^2}$$

2) Combinações de ações

$$q_{u,const} = 1,3 \times 2,808 + 1,15 \times 0,14 + 1,3 \times 1,0 = 5,11 \frac{kN}{m^2}$$

$$q_{s,const} = 1,0 \times 2,808 + 1,0 \times 0,14 = 2,948 \frac{kN}{m^2}$$

3) Esforços solicitantes de cálculo

Considerando a alternância de carregamento, será utilizado a equação que resulta em um esforço crítico.

- Momento fletor solicitante de cálculo positivo

$$M_{Sd(+)} = 0,094 q_d L^2 = 0,094 \times 5,11 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(+)} = 1,921 \frac{kN.m}{m}$$

- Momento fletor solicitante de cálculo negativo

$$M_{Sd(-)} = 0,117 q_d L^2 = 0,117 \times 5,11 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(-)} = 2,391 \frac{kN.m}{m}$$

- Cortante solicitante de cálculo

$$V_{Sd} = 0,617 q_d L = 0,617 \times 5,11 \times 2,00 \therefore V_{Sd} = 6,306 \frac{kN}{m}$$

- Flecha

$$\delta_{max} = \frac{0,0089 q L^4}{E_s I_{ef}} = \frac{0,0089 \times 0,0295 \times (200)^4}{20000 \times 90,1000} \therefore \delta_{max} = 0,233 \text{ cm}$$

3) Esforços resistentes de cálculo

- Momento fletor resistente positivo

$$M_{Rd(+)} = 7,079 \text{ kN.m/m}$$

i.Verificação

$$i_M = \frac{M_{Sd(+)}}{M_{Rd(+)}} = \frac{1,921}{7,079} = 0,271 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

- Cortante resistente de cálculo

$$V_{Rd} = 113,52 \text{ kN/m}$$

i.Verificação

$$i_M = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{6,306}{113,52} = 0,055 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

- Flecha limite

$$\delta_d = 0,833$$

$$i_F = \frac{\delta_{max}}{\delta_d} = \frac{0,233}{0,833} = 0,280 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

Além disso, como $\delta_{max} < \frac{L}{250}$, o efeito do empoçamento não foi considerado.

- Cálculo do momento negativo resistente de cálculo

ii.Saída do CUFSM:

$$\sigma_{cr,l(-)} = 54,810 \frac{kN}{m^2}$$

iii.Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{W f_y}{M_l}} = \sqrt{\frac{W f_y}{W \sigma_{cr,l}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,l}}} = \sqrt{\frac{28}{54,810}} = 0,715$$

$$M_{Rl} = M_{Re} = W f_y = 27808,64 \times 28 = 778,64 \frac{kN \cdot cm}{m}$$

$$M_{Rd(-)} = \frac{M_{Rl}}{\gamma_{a1}} = \frac{778,64}{1,10} = 707,85 \frac{kN \cdot cm}{m} = 7,08 \frac{kN \cdot m}{m}$$

ii.Verificação

$$i_M = \frac{M_{Sd(-)}}{M_{Rd(-)}} = \frac{2,391}{7,078} = 0,338 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

Laje Contínua - Depois da cura

1) Cálculo dos pesos próprios da laje

- Peso próprio do concreto

$$PP_c = V_c \times \gamma_c = 0,117 \times 24 \therefore PP_c = 2,808 \frac{kN}{m^2}$$

- Peso próprio da fôrma de aço

$$P_F = p_F \times g = 14,29 \times 0,0098 = 0,14 \frac{kN}{m^2}$$

2) Combinação última normal

$$q_d = 1,4 \times 2,808 + 1,25 \times 0,14 + 1,5 \times 20 + 1,4 \times 0,8 = 35,226 \frac{kN}{m^2}$$

3) Esforços solicitantes de cálculo máximos

- Momento fletor solicitante de cálculo positivo – Ações Permanentes

$$M_{Sd(+)} = 0,08q_dL^2 = 0,08 \times 35,226 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(+)} = 1,672 \frac{kN.m}{m}$$

Considerando a alternância de carregamento, será utilizado a equação que resulta em um esforço crítico.

- Momento fletor solicitante de cálculo positivo – Ações Variáveis

$$M_{Sd(+)} = 0,094q_dL^2 = 0,094 \times 35,226 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(+)} = 11,280 \frac{kN.m}{m}$$

Somando as duas parcelas do momento, temos:

$$M_{Sd(+)} = 1,672 + 11,280 = 12,952 \frac{kN.m}{m}$$

- Momento fletor solicitante de cálculo negativo – Ações Permanentes

$$M_{Sd(-)} = 0,1q_dL^2 = 0,1 \times 35,226 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(-)} = 2,090 \frac{kN.m}{m}$$

- Momento fletor solicitante de cálculo negativo – Ações Variáveis

$$M_{Sd(-)} = 0,117q_dL^2 = 0,117 \times 35,226 \times (2,00)^2 \therefore M_{Sd(-)} = 14,040 \frac{kN.m}{m}$$

Somando as duas parcelas do momento, temos:

$$M_{Sd(-)} = 2,090 + 14,040 = 16,130 \frac{kN.m}{m}$$

- Cortante solicitante de cálculo – Ações Permanentes

$$V_{sd} = 0,6q_dL = 0,6 \times 5,226 \times 2,00 \therefore V_{sd} = 6,271 \frac{kN}{m}$$

- Cortante solicitante de cálculo – Ações Variáveis

$$V_{sd} = 0,617q_dL = 0,617 \times 30,0 \times 2,00 \therefore V_{sd} = 37,02 \frac{kN}{m}$$

Somando as duas parcelas do momento, temos:

$$V_{sd} = 6,271 + 37,02 = 43,291 \frac{kN}{m}$$

- Flecha

$$\delta_{max} = \frac{0,0089qL^4}{E_s I_{tr}} = \frac{0,0089 \times 20 \times (2000)^4}{200000 \times 13404456,783} \therefore \delta_{max} = 1,062 \text{ mm}$$

3) Esforços resistentes de cálculo

- Momento fletor resistente positivo
- Determinação da posição da LNP na laje mista

$$N_{cf} = 0,85 b t c f_{cd} = 0,85 \times 100 \times (15 - 5,9) \times \frac{2,2}{1,4} \therefore$$

$$N_{cf} = 1215,50 \frac{kN}{m}$$

$$N_{pa} = A_{F,ef} f_{yFd} = 17,29 \times \frac{28}{1,1} = 440,11 \frac{kN}{m}$$

$$N_{cf} > N_{pa} \therefore \text{a LNP está na capa de concreto}$$

- Profundidade da LNP

$$a = \frac{N_{pa}}{0,85 b f_{cd}} = \frac{440,11}{0,85 \times 100 \times \frac{2,2}{1,4}} \therefore a = 3,29 \text{ cm}$$

- Cálculo do momento fletor resistente de cálculo

$$d_F = 15 - 3,24 = 11,76 \text{ cm}$$

$$M_{Rd} = N_{pa}(d_F - 0,5a) = 440,11 \times (11,76 - 0,5 \times 3,29)$$

$$\therefore M_{Rd} = 4451,71 kN.cm/m = 44,520 kN.m/m$$

$$M_{Rd(+)} = 44,520 kN.m/m$$

iii. Verificação

$$i_M = \frac{M_{Sd(+)}}{M_{Rd(+)}} = \frac{12,952}{44,520} = 0,291 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

- Cortante vertical
- Resistência da fôrma de aço ao cisalhamento vertical ($V_{v,F,Rd}$)

$$V_{v,F,Rd} = 113,520 \text{ kN/m}$$

Neste caso, **não há armadura adicional** alojada nas nervuras. Logo, $A_s = 0$ e $k_v = 1,0$

$$p = 61 + 2 \times \left[\frac{126 - 61}{2 \times 59} \times 150 \right] = 226,254 \text{ mm}$$

$$A_v = \left(\frac{6,1 + 22,63}{2} \right) \times 20 = 215,475 \text{ cm}^2$$

$$f_{ctk,inf} = 0,21(f_{ck})^{2/3} = 0,21 \times \sqrt[3]{22^2} = 1,648 \text{ MPa}$$

$$\eta = 0,3 + 0,7 \left(\frac{\rho_c}{2400} \right) = 0,3 + 0,7 \left(\frac{2400}{2400} \right) = 1,0$$

$$f_{ctd} = \frac{\eta f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{1 \times 0,1648}{1,4} = 0,1177 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 1,177 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = 0,25 \times 1,177 = 0,29425 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} = \frac{0}{488} = 0$$

$$V_{v,c,Rd} = \tau_{Rd} k_v (1,2 + 40\rho) A_v \frac{1000}{b_n}$$

$$V_{v,c,Rd} = 0,29425 \times 1 \times (1,2 + 0) \times 21548 \times \frac{1000}{210}$$

$$V_{v,c,Rd} = 36230,58 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 36,231 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Resistência máxima ao cisalhamento vertical ($V_{Rd,máx}$):

$$b_n = 210 \text{ mm}$$

$$A_v = 21548 \text{ mm}^2$$

$$f_{ck} = 22 \text{ MPa} = 22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$V_{Rd,máx} = 0,285 \sqrt{f_{ck}} A_v \frac{1000}{b_n} = 0,285 \times \sqrt{22} \times 21548 \times \frac{1000}{210} = 137165,178 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$V_{Rd,máx} = 137,165 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Resistência ao cisalhamento vertical ($V_{v,Rd}$)

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} = 113,520 + 36,231 = 149,751 > V_{Rd,m\acute{a}x} = 137,165$$

$$V_{v,Rd} = V_{Rd,m\acute{a}x} = 137,165 \frac{kN}{m}$$

iv. Verificação

$$i_V = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{43,291}{137,165} = 0,316 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

- Flecha limite

$$\delta_d = 5,714$$

$$i_F = \frac{\delta_{max}}{\delta_d} = \frac{1,062}{5,714} = 0,186 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

- Momento fletor resistente negativo

Sendo A_s a área de armadura da tela de fissuração e a tela de continuidade, temos:

$$A_s = 92 + 196 = 288 \text{ mm}^2/m$$

$$h - a = \frac{A_s \times f_{sd}}{0,85 \times f_{cd} \times b_0} = \frac{2,88 \times \frac{60}{1,15}}{0,85 \times \frac{2,2}{1,4} \times 44,52} = 2,527 \text{ cm/m}$$

$$A_c = b_0 \times (h - a) = 44,52 \times 2,527 = 112,502 \text{ cm}^2$$

$$N_c = 0,85 \times f_{cd} \times A_c = 0,85 \times \frac{2,2}{1,4} \times 112,502 = 150,271$$

Considerando $N_s = N_c$:

$$N_c = N_s = A_s \times f_s = 150,271$$

Considerando z como o braço de alavanca do momento fletor (Figura 40) e sabendo que seu valor é:

$$z = z_c - z_s$$

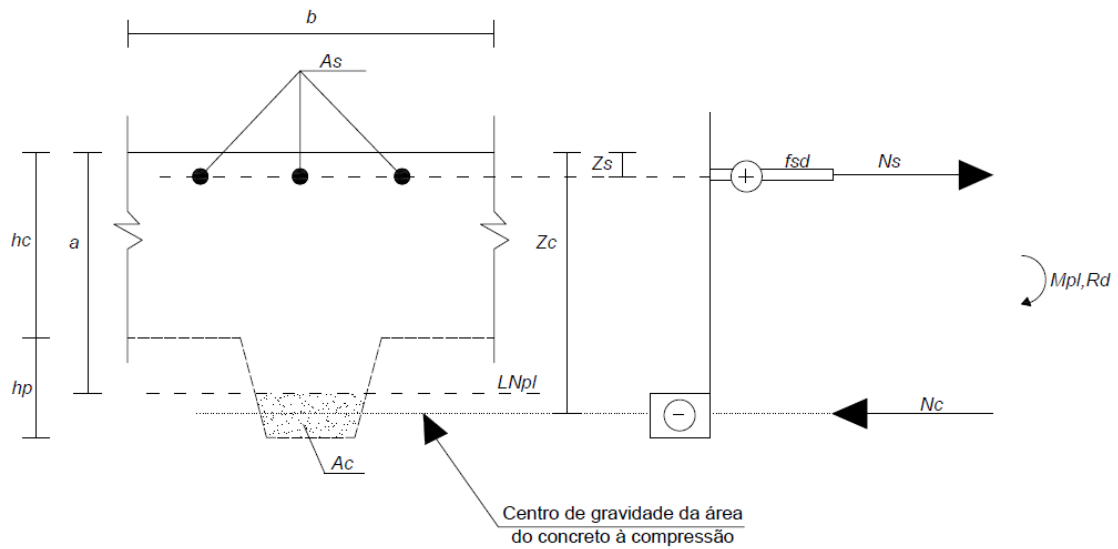


Figura 40: Situação com momento fletor negativo ocorrendo na laje.

Fonte: CALADO (2015).

Em que:

z_s é a distância da armadura negativa ao topo da laje;

z_c é a distância do centro de gravidade da área comprimida de concreto ao topo da laje;

Cálculo do Centro de gravidade da área comprimida de concreto (até o inferior da laje):

$$CG = \frac{(h - a)}{2} = \frac{2,966}{2} = 1,483 \text{ cm}$$

Cálculo do z_c :

$$z_c = h - CG = 15,0 - 1,483 = 13,517 \text{ cm}$$

Considerando a distância da armadura negativa ao topo da laje como 20 mm, de acordo com a NBR:

$$z = 13,517 - 2 = 11,517$$

Sendo assim, o Momento Fletor negativo resistente plástico será:

$$M_{pl,Rd,neg} = A_s \times f_{sd} \times z = 150,271 \times 11,517 = 1730,671 \text{ kN.cm} = 17,307 \text{ kN.m}$$

$$i_M = \frac{M_{Sd(-)}}{M_{Rd(-)}} = \frac{16,130}{17,307} = 0,932 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

OBS: A armadura escolhida foi a Q196 para obter o máximo aproveitamento, pois utilizando a armadura Q159, o momento fletor resistente seria menor que o solicitante.

- Cortante Longitudinal

Como trata-se de laje contínua, pode-se tomar o vão de cisalhamento como 0,9 do vão de cisalhamento do caso biapoiado.

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{s1}} \left(m \frac{A_{F,ef}}{b0,9L_s} + k \right) = \frac{1000 \times 117,6}{1,25} \left(200,4 \times \frac{1729}{1000 \times 0,9 \times 500} + 0,005 \right) = 72,910,244 \frac{N}{m}$$

$$= 72,910 \frac{kN}{m}$$

i.Verificação

$$i_V = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} = \frac{43,291}{72,910} = 0,594 < 1 \therefore \text{Atende!}$$

2) Dimensionamento da tela de continuidade

A escolha do modelo da tela de continuidade é feita pelo usuário. Nesse exemplo foi considerado a utilização de uma tela modelo Q196 para máximo aproveitamento.

3.8 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do exemplo de validação, item 3.7, são apresentados nos quadros-resumo das tabelas 4 e 7, para o caso de laje biapoiada e contínua, respectivamente. Também são apresentados nas tabelas 5 e 8 os resultados obtidos pelo programa *Scale Deck*. A comparação dos valores obtidos pelo *Scale Deck* e pela validação está disposta na Tabela 6 para a laje biapoiada e na Tabela 9 para a laje contínua.

Tabela 8 - Valores obtidos pelo programa da laje contínua

Quadro Resumo da Programa (Laje Contínua)							
Antes da Cura				Depois da cura			
	Valor Resistente	Valor Solicitante	Índice de Aproveitamento (%)		Valor Resistente	Valor Solicitante	Índice de Aproveitamento (%)
Cortante (kN/m)	113,64	6,32	5,56	Cortante Longitudinal (kN/m)	72,91	43,25	59,33
				Cortante Vertical (kN/m)	137,14	43,25	31,54
Momento fletor positivo (kN.m/m)	7,08	1,93	27,20	Momento fletor positivo (kN.m/m)	44,51	12,94	29,08
Momento fletor negativo (kN.m/m)	7,08	2,4	33,85	Momento fletor negativo (kN.m/m)	17,64	16,12	91,40
Flecha (mm)	8,33	2,33	28,02	Flecha (mm)	5,71	1,06	18,59
ATENDE				ATENDE			
ATENDE							

Tabela 9 - Comparação dos resultados da laje contínua

Comparação de Resultados (Laje Contínua)			
Antes da Cura			
	Índice de Aprov. Calculado pela validação (i_v)	Índice de Aprov. Calculado pelo programa (i_p)	$\frac{i_v}{i_p}$
Cortante (kN/m)	5,56	5,56	1,00
Momento fletor positivo (kN.m/m)	27,12	27,20	1,00
Momento fletor negativo (kN.m/m)	33,76	33,85	1,00
Flecha (mm)	27,97	28,02	1,00
Depois da cura			
	Índice de Aprov. Calculado pela validação	Índice de Aprov. Calculado pelo programa	$\frac{i_v}{i_p}$
Cortante Longitudinal (kN/m)	59,37	59,33	1,00
Cortante Vertical (kN/m)	31,56	31,54	1,00
Momento fletor positivo (kN.m/m)	29,09	29,08	1,00
Momento fletor negativo (kN.m/m)	93,18	91,4	1,01
Flecha (mm)	18,56	18,59	1,00

Conforme os resultados apresentados, observa-se boa acurácia dos valores calculados pelo programa em relação ao exemplo de validação, visto que a razão entre os valores é sempre muito próxima de 1, o que evidencia a eficácia da ferramenta e a sua capacidade de dimensionar lajes mistas de maneira segura, dentro dos padrões normativos.

Cabe destacar que de forma geral, o estado limite de cortante longitudinal é o fator limitante em um dimensionamento atendendo todos os requisitos de segurança. No entanto, no exemplo de laje contínua, pelo fato da área de armadura inserida pelo usuário ser relativamente baixa, o fator limitante foi o estado limite de momento fletor negativo.

3.9 COMPARAÇÃO DO SCALE DECK COM O CATÁLOGO DA PERFILOR

Ao se dimensionar as mesmas lajes dos exemplos de validação pelo catálogo da Perfilor (2016), nota-se que também foi atendido os requisitos de segurança. O índice de aproveitamento máximo obtido no exemplo de laje biapoiada foi de aproximadamente 57,64%, o que mostra que houve uma folga considerável no dimensionamento. Pelo catálogo, essa laje resiste a uma carga imposta de $31,16 \text{ kN/m}^2$ e no exemplo de validação a carga imposta total aplicada foi apenas de 20 kN/m^2 .

Já para o caso de laje contínua índice de aproveitamento máximo obtido foi de aproximadamente 91% para o momento fletor negativo, considerando o uso da tela de fissuração. Pelo catálogo, essa laje resiste a uma carga imposta de $22,02 \text{ kN/m}^2$ e no exemplo de validação a carga imposta total aplicada foi apenas de 20 kN/m^2 .

Foram encontradas algumas divergências dos catálogos/manuais da Perfilor em relação às normas vigentes. No Manual Geral para dimensionamento (2000), por exemplo, na verificação do cortante vertical, utiliza-se a NBR 8800:2006 – Projeto de Revisão, ao invés da NBR 8800:2008. Essa divergência foi descoberta a partir dos cálculos feitos no programa com as normas vigentes, em que a resistência ao cortante vertical leva em consideração uma parcela da resistência da fôrma e outra do concreto, diferente do manual, que somente considera a parcela da resistência do concreto. Portanto, a resistência das lajes ao cortante vertical pode ser considerada maior do que o catálogo atualmente considera, apesar de ser um estado limite que só ocorre em lajes de maior

altura e de vãos pequenos com cargas de alta intensidade. Como exemplo, observou-se uma laje biapoiada com espessura 110 mm e chapa de 0,8 mm. Sua resistência ao esforço cortante vertical calculada pelo programa é de 76,90 kN/m enquanto pelo manual, a resistência encontrada é de 23,91 kN/m.

Outra divergência encontrada foi em relação ao estado-limite de fissuração do concreto, em que o manual recomenda a utilização da malha anti-fissuração com disposições construtivas semelhantes tanto para lajes biapoiadas como para lajes contínuas. Porém, a ABNT NBR 8800:2008 restringe as disposições para as lajes biapoiadas. Deste modo, faz-se necessário estudos para prever o modelo de montagem das malhas anti-fissuração de lajes contínuas.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Neste estudo foi desenvolvida uma ferramenta computacional, denominada *Scale Deck*, para o cálculo de lajes mistas tanto na fase de construção como na fase de serviço, de acordo com as normas brasileiras aplicáveis. As verificações de cálculo antes da cura do concreto foram feitas pelo método da resistência direta preconizado na NBR 14762:2010, utilizando valores de momentos críticos obtidos pelo método das faixas finitas, com o uso do *software* CUFSM (1998). Na fase de serviço, as verificações para estados limites relativos a momento fletor, esforço cortante e deslocamento excessivo foram feitas de acordo com a NBR 8800:2008.

Além disso, vale ressaltar que os valores solicitantes foram calculados por meio do Manual Geral de Dimensionamento, Perflor (2000), com as respectivas equações para cada caso. Entretanto, os valores das constantes para as equações do deslocamento de três e quatro apoios considerando a alternância de carregamento e para a equação do cortante com três apoios, também considerando a alternância de carregamento, foram retirados do *Ftool* (2018). O fato ocorreu devido a divergência de resultados na análise elástica feita no *software* com as equações dadas pelo manual.

Evidencia-se que a ferramenta computacional oferece uma vasta possibilidade de dados de entrada para o usuário, não se limitando aos valores já tabelados. Além disso, o programa diferencia as cargas permanentes das cargas variáveis de sobrecarga, ponderando com os respectivos coeficientes, gerando um dimensionamento preciso e econômico.

É importante ressaltar também que não existem softwares para cálculo e dimensionamento de lajes mistas no mercado brasileiro. Tal fato faz da ferramenta uma inovação para o mercado e contribui para o aperfeiçoamento das técnicas de dimensionamento atuais, possibilitando uma opção de projeto adicional aos catálogos comerciais utilizados atualmente.

O programa computacional Scale Deck foi validado com exemplos numéricos da literatura com o qual, pode-se atestar a praticidade, segurança, eficiência e especificidade nos cálculos de dimensionamento de lajes mistas. Por fim, vislumbra-se que esta ferramenta possa facilitar e contribuir para o trabalho dos projetistas estruturais.

4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda há muito o que se explorar sobre o assunto de lajes mistas, quando se trata de inovação e pesquisa. A seguir estão algumas sugestões para pesquisas e trabalhos futuros:

- Executar a análise estrutural do sistema de lajes mistas;
- Englobar no programa a situação de incêndio em lajes mistas;
- Englobar no programa as cargas pontuais nas lajes mistas, introduzindo a verificação do estado-limite de punção;
- Englobar o cálculo da armadura de aderência e a tela de continuidade;
- Avaliar a viabilidade econômica do dimensionamento em questão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7008-3: **Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente – Parte 3: Aços estruturais**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16421: **Telha-fôrma de aço colaborante para laje mista de aço e concreto – Requisitos e ensaios**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14672: **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Revisão da ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2006.

EN 1994-1-1: 2004. Design of composite steel and concrete structures: part 1.1: general rules and rules for buildings. EUROCODE 4, European Committee for Standardization, 2004.

JOHNSON, Roger Paul; **Composite Structures of Steel and Concrete**. Reino Unido, 2004.

Fôrma de aço colaborante para lajes mistas Polydeck 59S. **Manual geral para dimensionamento**. Perfilor. São Paulo, 2000.

MARTHA, L.F. **FTOOL - Um programa gráfico-interativo para ensino de comportamento de estruturas**. Versão educacional 4.00, Rio de Janeiro, janeiro de 2018.

EXCEL: Microsoft Office Excel. Microsoft, 2016.

FAVARATO, L. F. **Notas de aula de Projeto e dimensionamento de estruturas mistas de aço e concreto – Lajes mistas de aço e concreto.** Associação Brasileira da Construção Metálica – ABCEM. São Paulo, 2021.

SCHAFER, B. W.; PEKOZ, T. CUFSM: **Cornell University – Finite Strip Method.** 1998.

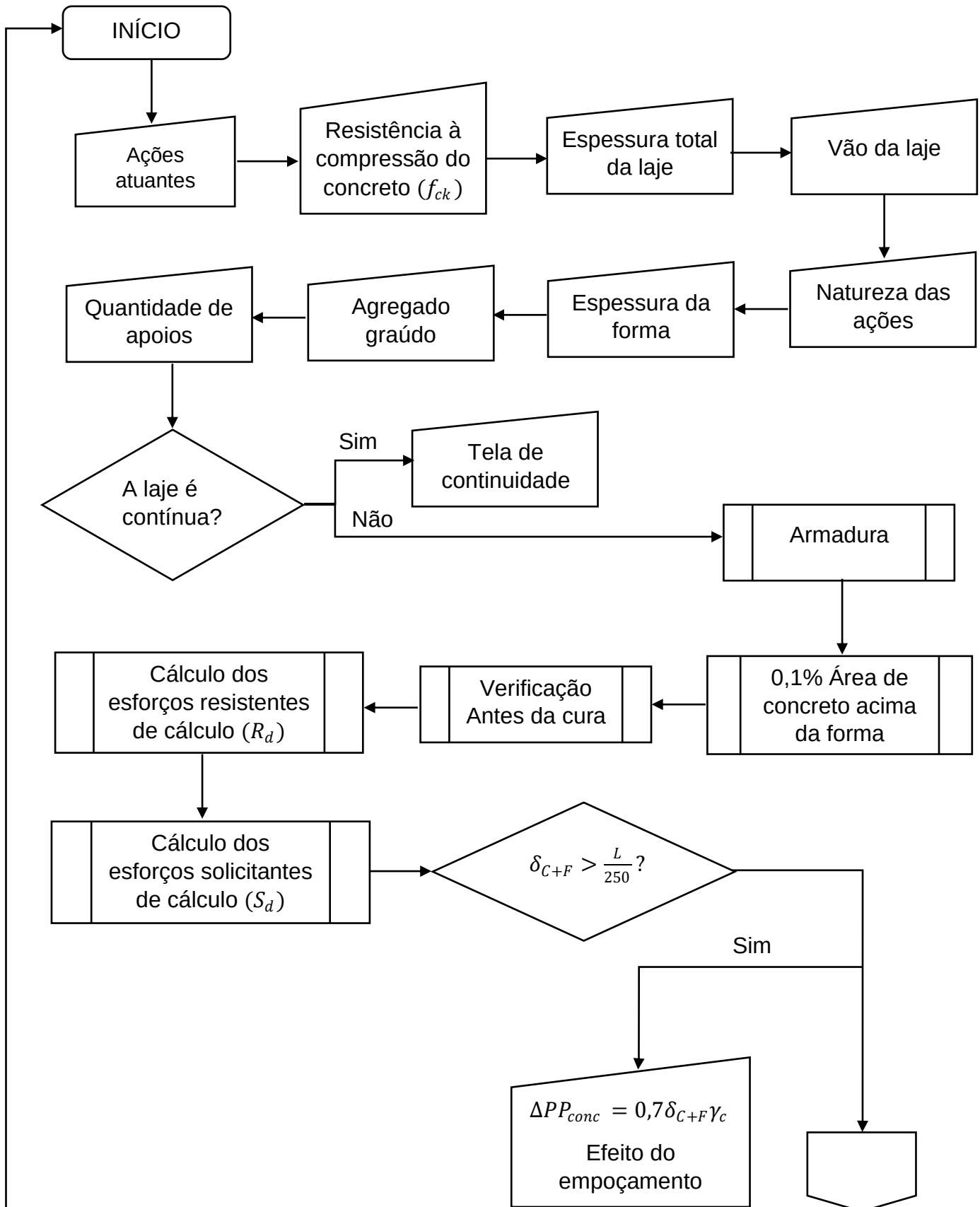
Catálogo Técnico POLYDECK 59S. 12ª edição. São Paulo, 2016.

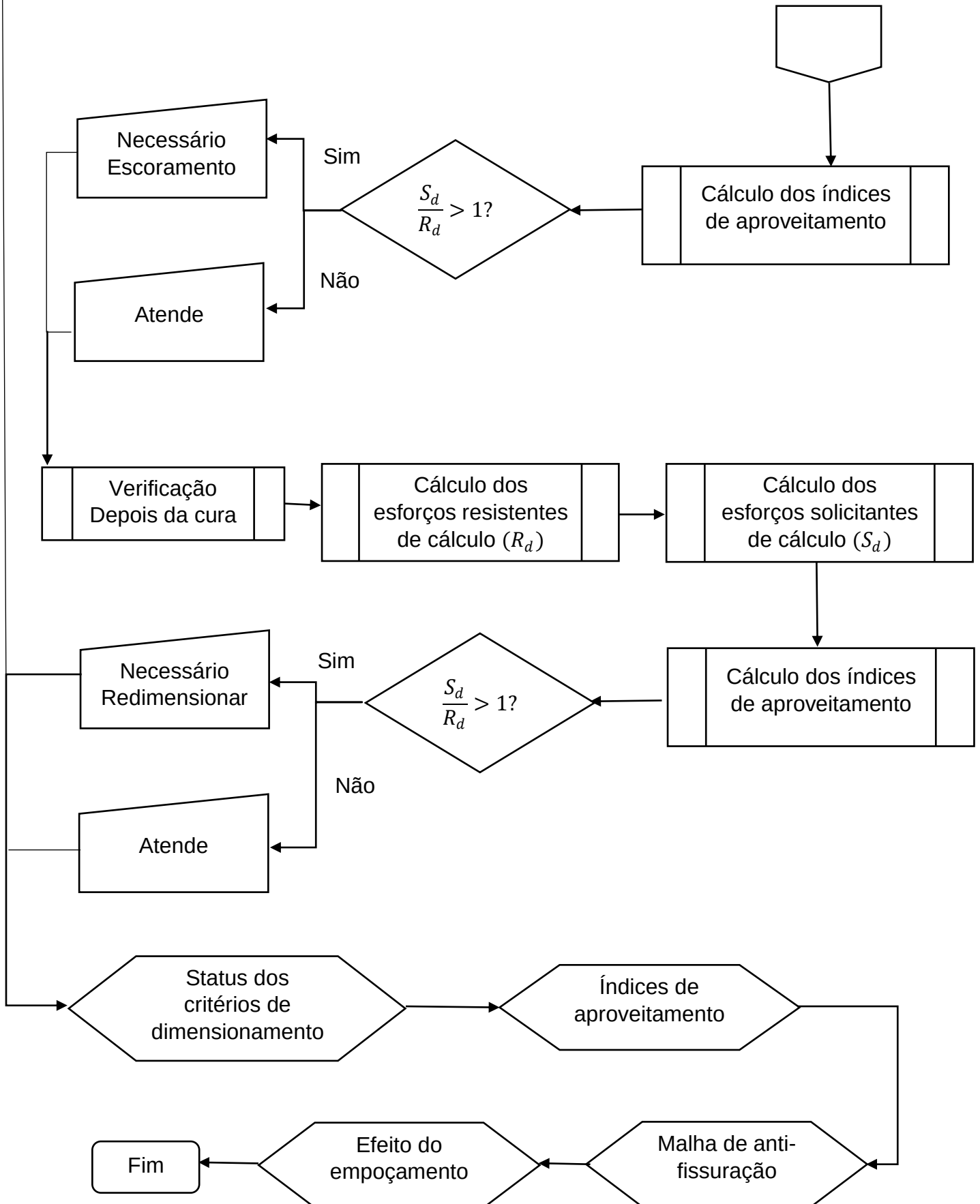
CALADO, Luís; **Estruturas Mistas de Aço e Betão.** Portugal, 2015.

LOUREIRO, Mayane C.; **Otimização da Geometria de Fôrmas de Aço na Fase de Construção de Lajes Mistas Considerando Impactos Ambiental e Econômico.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

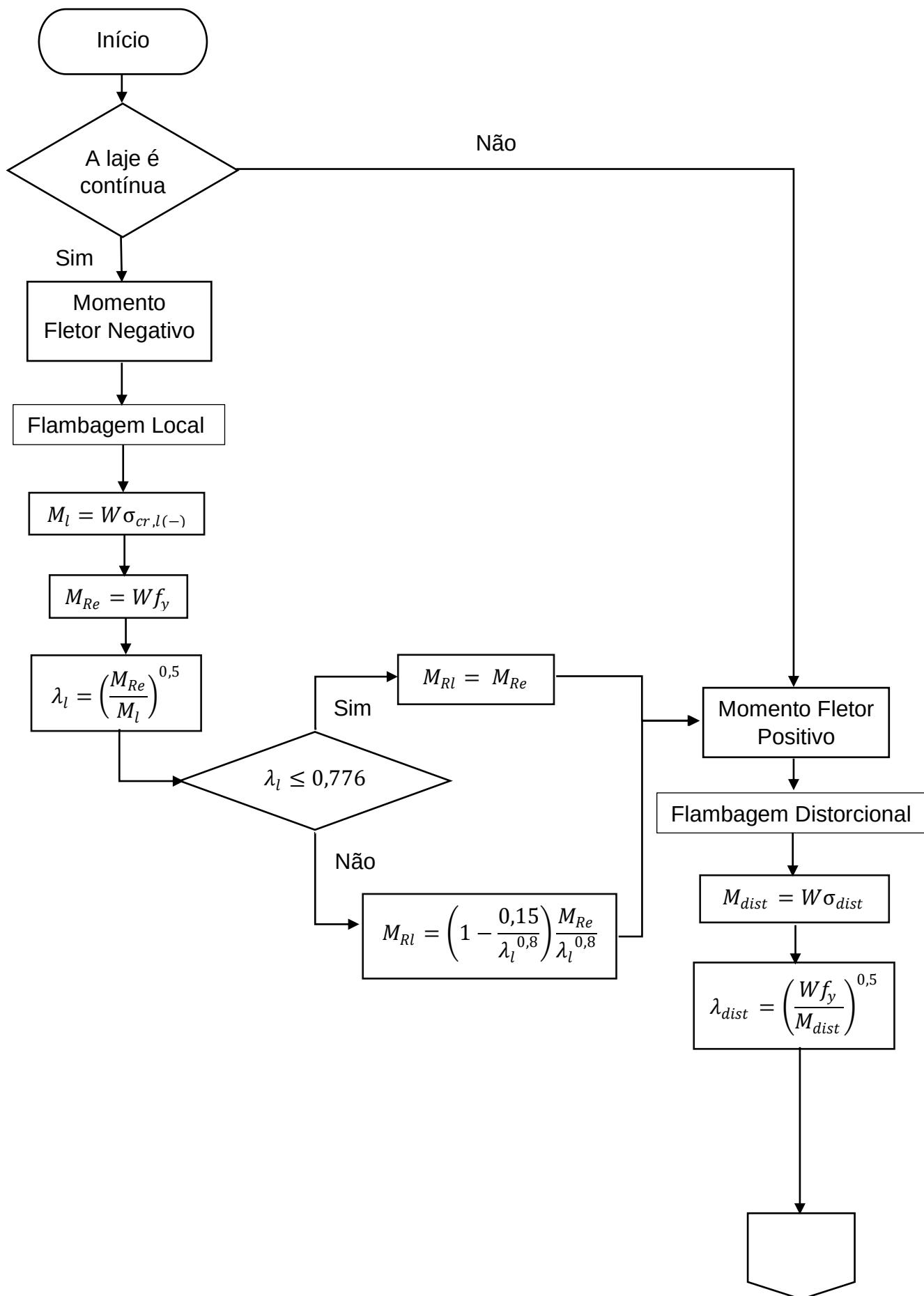
ANEXOS

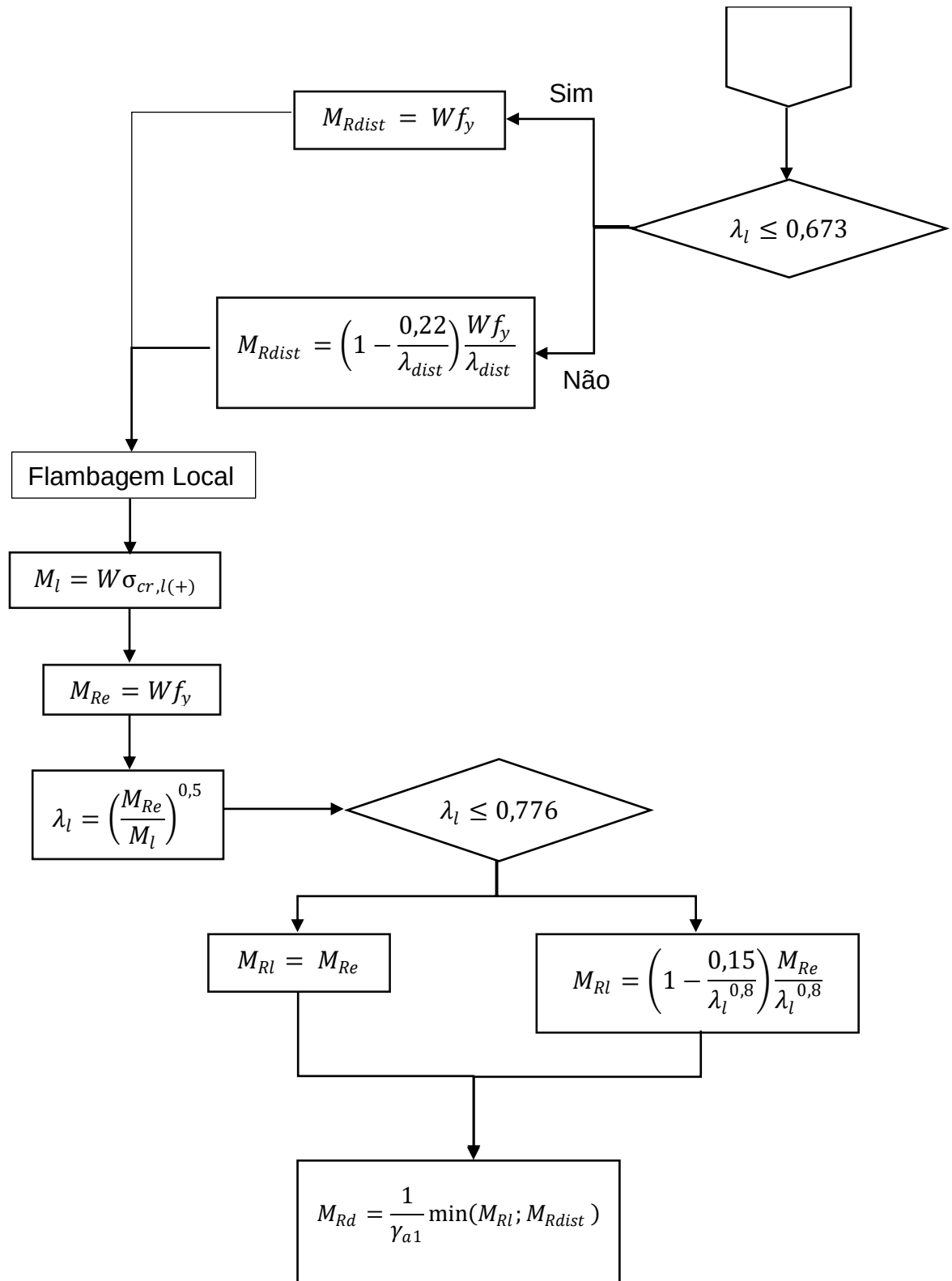
ANEXO A - FLUXOGRAMA GERAL DO PROGRAMA



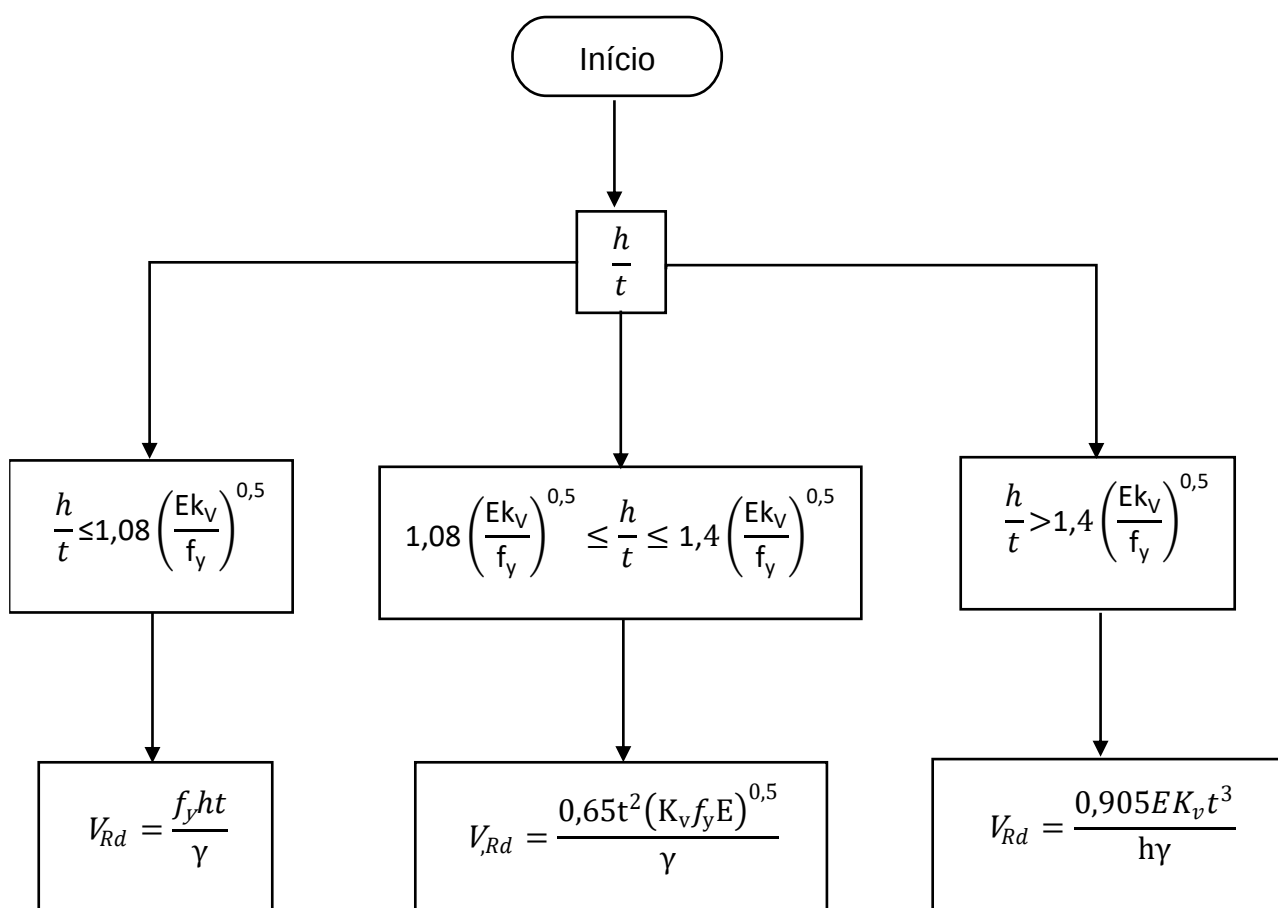


ANEXO B - FLUXOGRAMA MOMENTO FLETOR - ANTES DA CURA

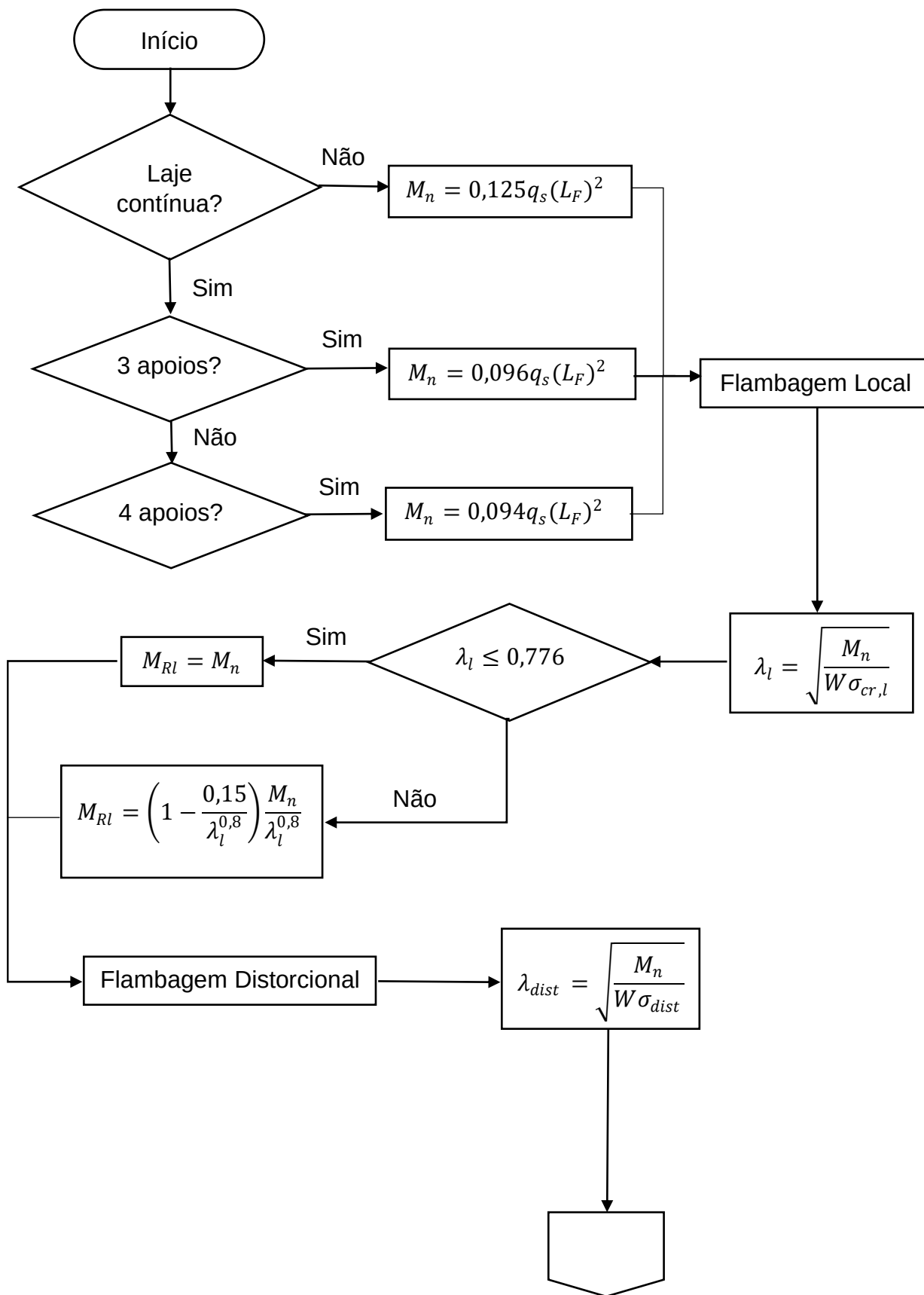


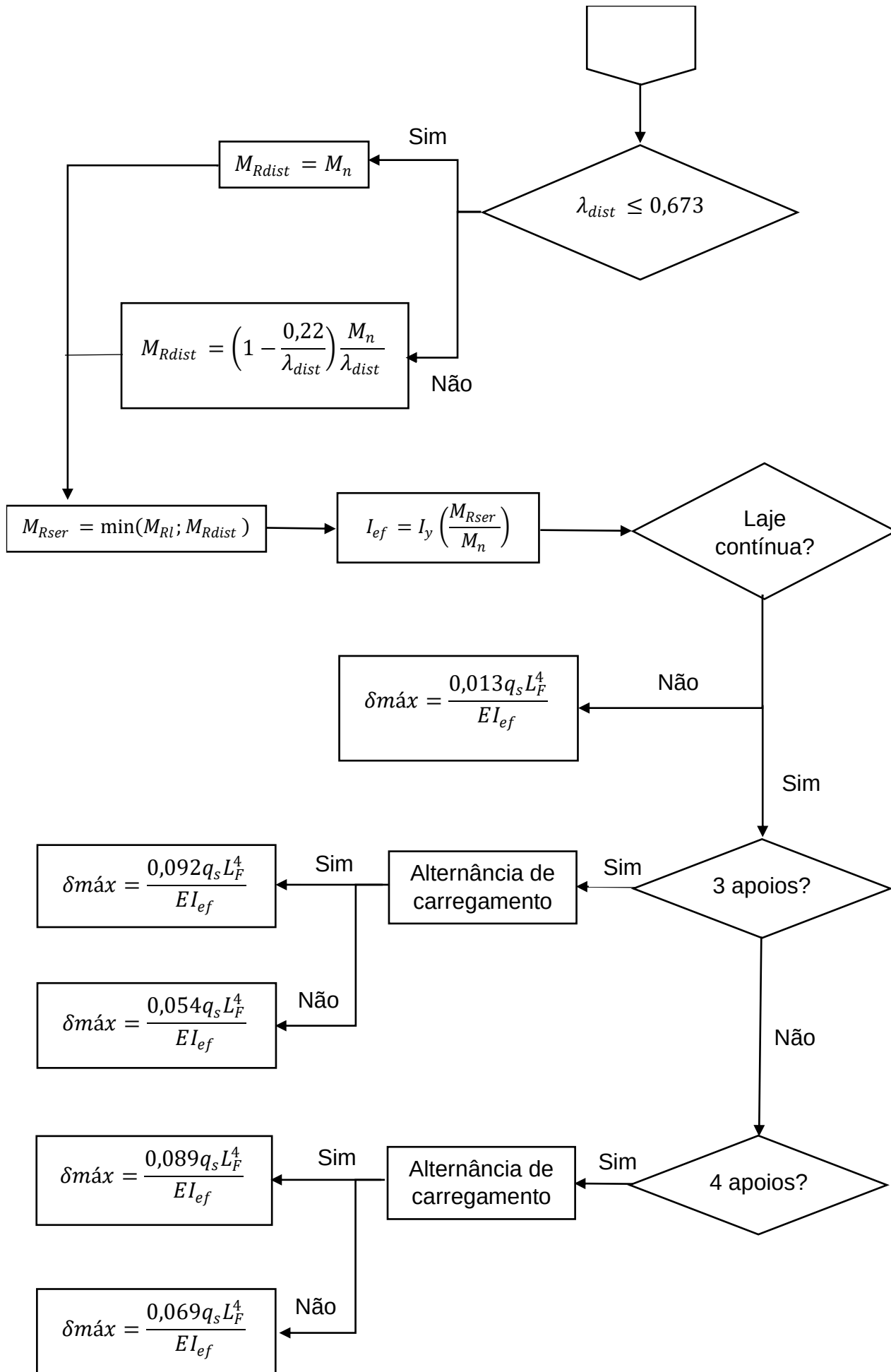


ANEXO C - FLUXOGRAMA CORTANTE RESISTENTE - ANTES DA CURA

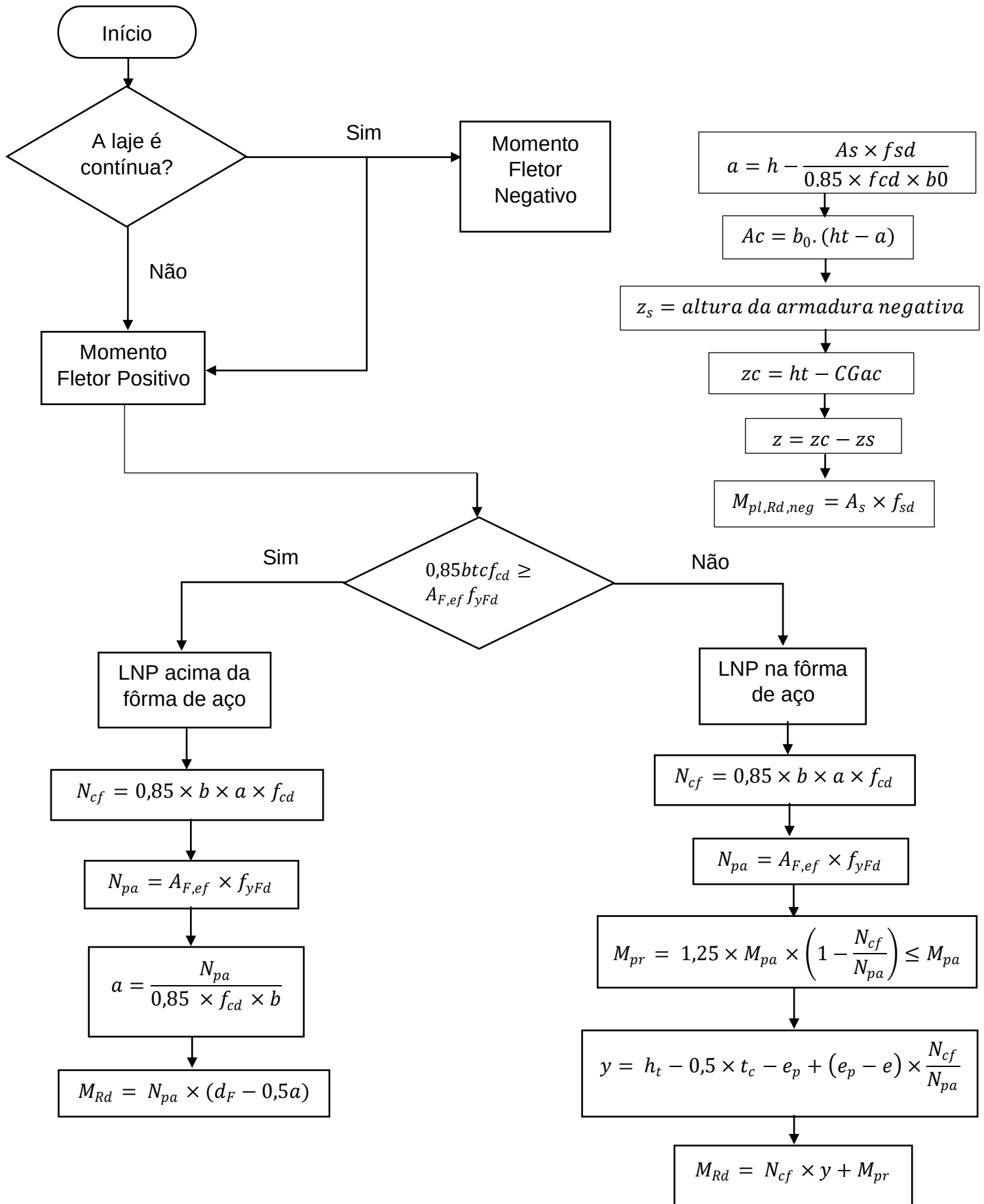


ANEXO D - FLUXOGRAMA DA FLECHA - ANTES DA CURA

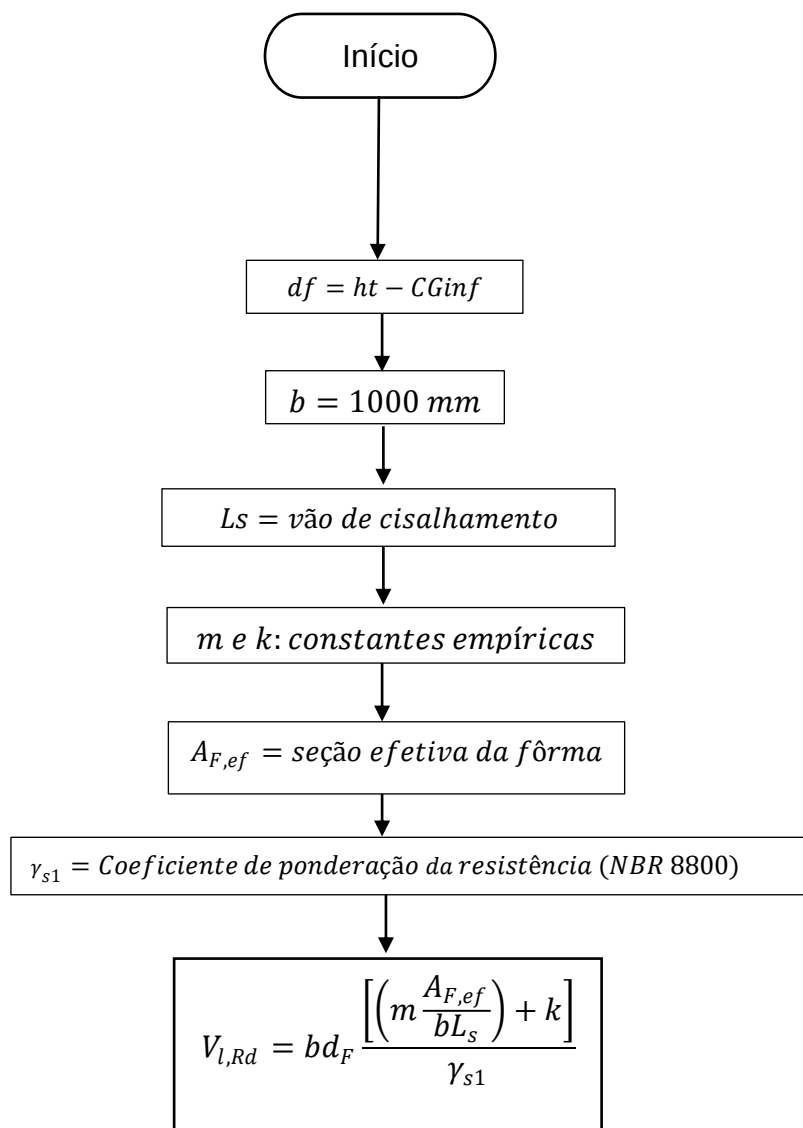




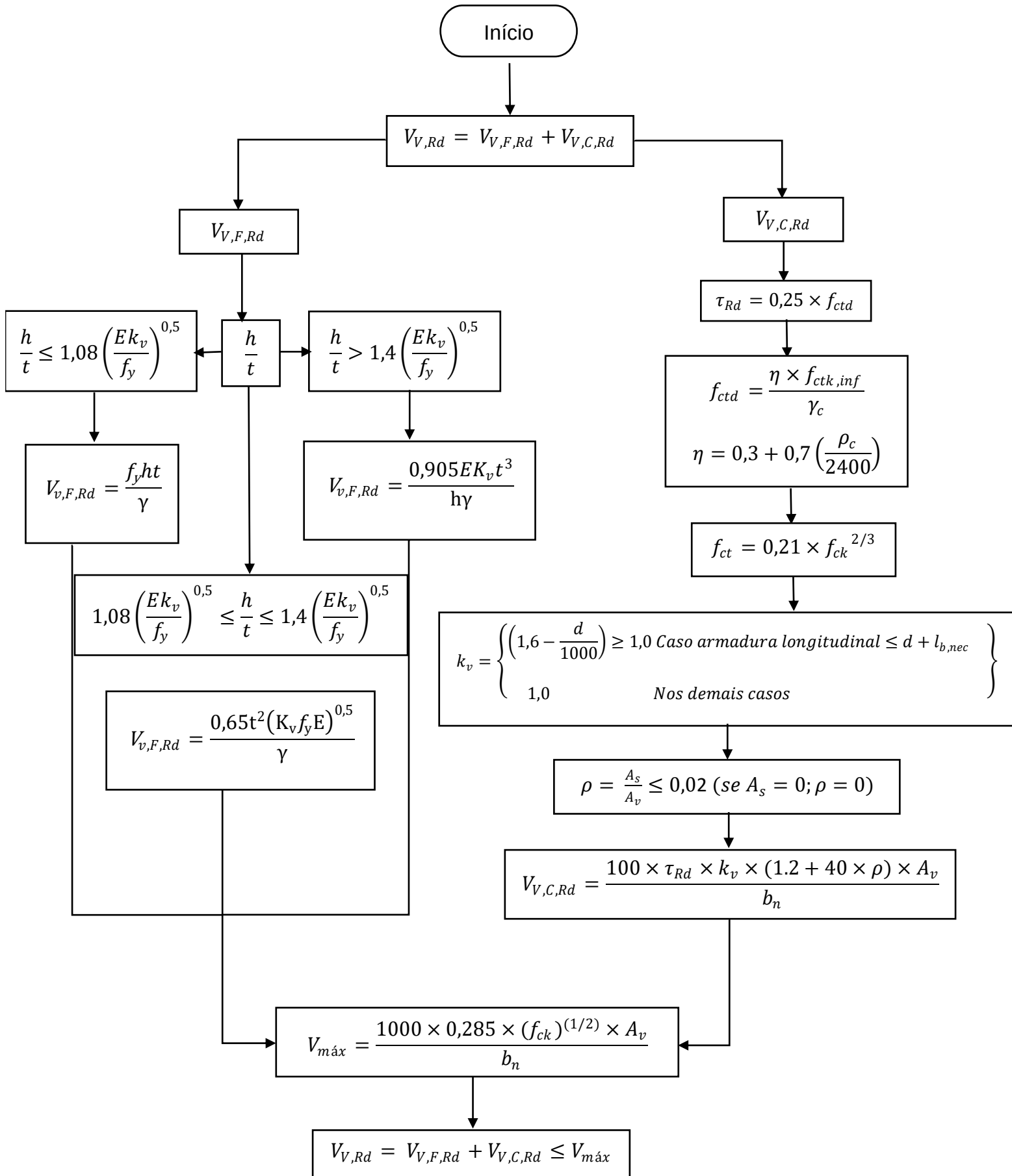
ANEXO E - FLUXOGRAMA MOMENTO FLETOR – DEPOIS DA CURA



ANEXO F - FLUXOGRAMA DO CISALHAMENTO LONGITUDINAL



ANEXO G – FLUXOGRAMA DO CISALHAMENTO VERTICAL



ANEXO H - FLUXOGRAMA DA FLECHA – DEPOIS DA CURA

