



**INSTITUTO
FEDERAL**
Minas Gerais

Campus Avançado
Piumhi

MEC-SETEC

INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS – *CAMPUS AVANÇADO PIUMHI-MG.*

Bacharelado em Engenharia Civil

ROTINA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE VIGOTAS TRELIÇADAS

Caio Justino Silva

Piumhi - MG

2019

Caio Justino Silva

ROTINA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE VIGOTAS TRELIÇADAS

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M.e Júnior Henrique Canaval

Piumhi - MG

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

S586r Silva, Caio Justino.

Rotina computacional para cálculo de vigotas treliçadas / Caio Justino Silva. – 2019.
43 f.

Orientador: Júnior Henrique Canaval.

Monografia (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Avançado Piumhi, 2019.

1. Vigas. 2. Lajes de concreto. 3. Cálculo estrutural. I. Título.

CDD 624.1

Ficha elaborada pela bibliotecária Andreia Cristina Damasceno - CRB6/1974

Caio Justino Silva

ROTINA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DE VIGOTAS TRELIÇADAS

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 14 de Agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. M.e Humberto Coelho Melo - IFMG



Profª. M.ª Stella Maria Gomes Tomé - IFMG



Prof. M.e Thiago Pastre Pereira - IFMG



Prof. M.e Tobias Ribeiro Ferreira - IFMG



Prof. M.e Júnior Henrique Canaval - IFMG (Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade, saúde e alegria durante todo este ciclo de aprendizado e crescimento que me foi concedido nesses últimos cinco anos.

Aos meus pais Aguinaldo e Anabete, que juntos foram meus alicerces nos tempos difíceis e a todo obstáculo que surgia durante essa longa caminhada, sempre me apoiando, incentivando e orientando sobre como ser uma pessoa melhor em diversas situações dessa vida.

Ao apoio dos meus irmãos Caique e Cauane, que foram como minhas escoras durante as épocas em que as tensões temporárias nos finais de semestre me causavam e me alegravam com altas doses de humor durante esse processo de cura pós semestres.

Aos meus professores que fomentaram todo meu conhecimento que adquiri e alimentei ao longo do curso, em especial ao Prof. M.e Júnior Henrique Canaval, pela paciência, compreensão, orientação e ensinamentos.

A persistência é o caminho do êxito

Charles Chaplin

RESUMO

As lajes nervuradas unidirecionais, conhecidas popularmente por lajes pré-fabricadas, lajes pré-moldadas ou lajes treliçadas, são compostas por vigotas treliçadas, elementos de enchimento, capa de concreto e armadura de distribuição. Esse sistema construtivo possui inúmeras vantagens, destacando a facilidade de montagem, execução, peso próprio reduzido e economia, e tem seu emprego nas construções de pequeno e médio porte como alternativa à laje maciça de concreto armado, possibilitando ainda, vencer grandes vãos. Seu dimensionamento consiste na escolha correta da vigota treliçada a ser utilizada, podendo ser calculada como uma viga de seção T, e posteriormente devem ser acrescentadas as armaduras de distribuição e contra fissuração. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional (*software*) para auxiliar os profissionais e estudantes nos cálculos estruturais que envolvem o dimensionamento e as verificações deste tipo de elemento de acordo com as instruções normativas previstas na ABNT NBR 6118:2014.

Palavras-chave: *Software*. Seção T. Lajes nervuradas unidirecionais. Cálculo estrutural. Rotina de cálculo.

ABSTRACT

The one-way waffle slab, popularly known as prefabricated slabs, precast slabs or lattice slabs, are composed of joist with lattice reinforcement, filler elements, concrete layer and distribution reinforcement. This constructive system has numerous advantages, highlighting the ease of assembly, execution, reduced own weight and economy, its use has been increased in small and medium buildings as an alternative to reinforced concrete slab, making it possible to overcome large spans. Its sizing consists of the correct choice of the lattice reinforcement to be used, which can be calculated as a T-section beam, and afterwards the distribution and counter-cracking reinforcement ought to be added. Therefore, this work aimed to develop a software that helps professionals and students in structural calculations demanding the sizing and verification of this sort of element according to the normative instructions provided in ABNT NBR 6118:2014.

Keywords: Software. T-section. One-way waffle slab. Structural calculation. Routine calculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje pré moldada.	11
Figura 2 - Seção da laje.	15
Figura 3 - Laje nervurada.	15
Figura 4 - Seção de vigotas pré-moldadas.....	16
Figura 5 - Seção transversal de uma viga T.....	19
Figura 6 - Seção de viga alternando em T ou retangular de acordo com a LN.	19
Figura 7 - Distância entre eixos.....	20
Figura 8 - Simplificação da seção.	21
Figura 9 – Tela inicial do programa L-Calc.....	30
Figura 10 - Tela de configurações.....	31
Figura 11 - Tela de entrada de dados.	32
Figura 12 – Tela de dimensionamento	34
Figura 13 - Tela de resultados.....	35
Figura 14 - Tela de configuração, exemplo.	36
Figura 15 - Tela de entrada de dados, exemplo.....	37
Figura 16 - Tela de dimensionamento, exemplo.	38
Figura 17 - Tela de dimensionamento, ajuste do exemplo.....	39
Figura 18 - Tela de resultados, exemplo.	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
2.3 Justificativa	13
3 LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS	14
3.1 Composição	15
3.2 Dimensionamento de lajes nervuradas unidirecionais	17
3.2.1 Dimensionamento a flexão	20
3.2.2 Verificação ELS	24
4 PROGRAMAÇÃO (FPL)	29
4.1 O programa <i>L-CALC</i>	29
4.2 Primeiros passos (tela inicial)	30
4.3 Configurações	31
4.4 Entrada de dados	32
4.5 Dimensionamento	33
4.6 Resultados	34
5 EXEMPLO PRÁTICO	36
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	42
Anexo A – Tabela KMD	43

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades que caracteriza o desenvolvimento da humanidade e está em um processo constante de evolução desde o momento em que as tribos deixaram de ser nômades, e deu-se o surgimento das civilizações urbanas, com o início das construções de abrigos e edificações permanentes para seu uso e vivência.

Com as constantes descobertas de novos materiais e estudos aplicados voltados para o surgimento de novas técnicas e metodologias construtivas e conceptivas, essa atividade hoje está fortemente alinhada ao uso de *softwares* que buscam otimizar e melhorar todo o processo de planejamento, elaboração de projetos e execução, pertinentes ao profissional da Engenharia Civil.

As estruturas de concreto armado são elementos formados pela combinação entre aço e concreto, no qual, esses dois materiais trabalham em conjunto e solidarizados, para compor as principais propriedades e características dos elementos para os quais foram projetados.

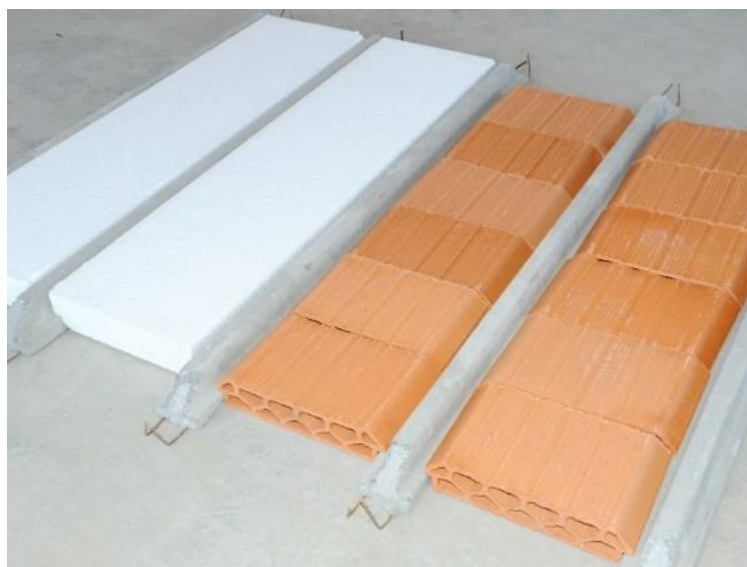
A estrutura de uma edificação executada em concreto armado, pode ser entendida basicamente por quatro elementos, sendo eles: lajes, vigas, pilares e fundações. As análises destes elementos podem ser feitas considerando pilares e vigas como elementos reticulados, as lajes como uma superfície plana (tipo placa) e as fundações podem assumir diversas formas para fins da análise estrutural.

As lajes são elementos espaciais planos, que cumprem o papel de apoio da cobertura, recebendo as solicitações da cobertura propriamente dita (estrutura do telhado, telhas, reservatórios e outros), ou mesmo a função de piso, recebendo o carregamento de móveis, equipamentos, pessoas, paredes, e outros objetos. Vale ressaltar que em alguns casos a laje é a própria cobertura da edificação, uma vez feita a correta impermeabilização neste elemento.

O caminho das solicitações em uma edificação basicamente é feito considerando que as lajes recebem as solicitações superficiais, transmitindo-as juntamente com o seu peso próprio para as vigas, que por sua vez, encaminham para os pilares, e estes para as fundações, que transmitem para o solo todo o carregamento.

Dentre as várias opções de lajes que existem na construção civil, a pré-moldada ou pré-fabricada, apresentada na Figura 1, é uma das alternativas mais populares e sua utilização em obras de pequeno e médio porte apresentam diversas vantagens sobre as perspectivas financeira e construtiva.

Figura 1 - Laje pré moldada.



Fonte: www.concretosbasso.com.br, 2019.

De acordo com Bastos (2015), a laje treliça surgiu na Europa com o propósito de ser uma alternativa mais econômica que as lajes maciças de concreto, e hoje são utilizadas em vários países do mundo.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), afirmam que nos projetos de edificações como casas, sobrados e pequenos edifícios, têm sido cada vez mais empregados os sistemas de lajes nervuradas com o uso de vigotas pré-moldadas, formadas por trilhos e treliças, ao invés do sistema de lajes maciças de concreto armado.

Neste trabalho, é explorada a criação de uma rotina de cálculo¹ para lajes nervuradas unidirecionais pré-moldadas com o uso de trilhos² ou vigotas treliçadas³, realizada em um *Software* livre de multiplataforma e *open source*⁴, o *Lazarus*.

O *Lazarus* é um *Software* livre para o desenvolvimento rápido de aplicações (RAD) com base no moderno compilador Free Pascal (SANTOS, 2011).

¹ Programação de código capaz de executar determinados comandos

² Conhecida simplesmente por lajes trilho.

³ Conhecida simplesmente por lajes treliça.

⁴ Código aberto, livre acesso.

De acordo com Kimura (2007) há quatro tipos de *softwares* que podem ser classificados da seguinte forma:

- **Software de análise:** serve para calcular esforços e deslocamentos de uma estrutura. Não executa dimensionamento de armaduras e nem gera plantas finais.
- **Software de desenho:** serve para gerar desenhos genéricos, não direcionados exclusivamente para a Engenharia Civil.
- **Software de dimensionamento / verificação de elemento isolado:** serve para dimensionar um elemento (viga, pilar ou laje) de forma isolada da estrutura. Ideal para fazer rápidas verificações.
- **Sistema integrado:** abrange todas as etapas do projeto. Calcula a estrutura, dimensiona e detalha as armaduras, gera e imprime os desenhos finais.

O presente projeto de pesquisa se enquadra como um *software* de dimensionamento / verificação de elemento isolado, especificamente de vigotas para lajes nervuradas unidirecionais biapoiadas com carregamento uniforme.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta computacional dinâmica, capaz de executar uma rotina de cálculo de dimensionamento e verificações em lajes nervuradas unidirecionais de concreto armado para fins acadêmicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Revisar e extrair da bibliografia necessária, todas as informações que permeiam o cálculo de dimensionamento de lajes nervuradas unidirecionais e suas verificações;
- Estruturar e desenvolver uma rotina de cálculo com informações básicas para o dimensionamento e verificação de lajes nervuradas unidirecionais;
- Elaborar uma interface de fácil interação com o usuário, desde que este possua um conhecimento teórico que o capacite a usar a ferramenta;
- Realizar testes para a validação do produto final.

2.3 Justificativa

Sabe-se que o emprego de *softwares* para o dimensionamento estrutural de projetos tornou-se comum, e que a praticidade e otimização do tempo empregado nessa atividade tem sido determinante para a criação de ferramentas computacionais cada vez mais práticas e dinâmicas.

O projeto de pesquisa busca desenvolver uma ferramenta computacional prática e acessível que possa dimensionar as vigotas para o emprego da laje nervurada/treliçada como solução para obras de pequeno e médio porte.

3 LAJES NERVURADAS UNIDIRECIONAIS

A laje nervurada é uma boa alternativa à laje maciça, e seu dimensionamento pode ser simplificado de forma que sua análise seja semelhante ao da laje maciça, conhecido como cálculo simplificado, ou como elementos isolados que trabalham de forma quase independente.

Fusco (1995) define as lajes nervuradas como aquelas que tem sua zona de tração constituídas por nervuras, entre as quais podem ser inseridos materiais não estruturais, de modo a tornar plana a superfície inferior da peça.

Para Pinheiro e Razente (2003), as lajes com nervuras pré-moldadas são compostas por vigotas pré-moldadas, que dispensam o uso de tabuleiro de forma tradicional e que são capazes de suportar seu próprio peso e dos elementos de enchimento apenas com o emprego de cimbramentos intermediários.

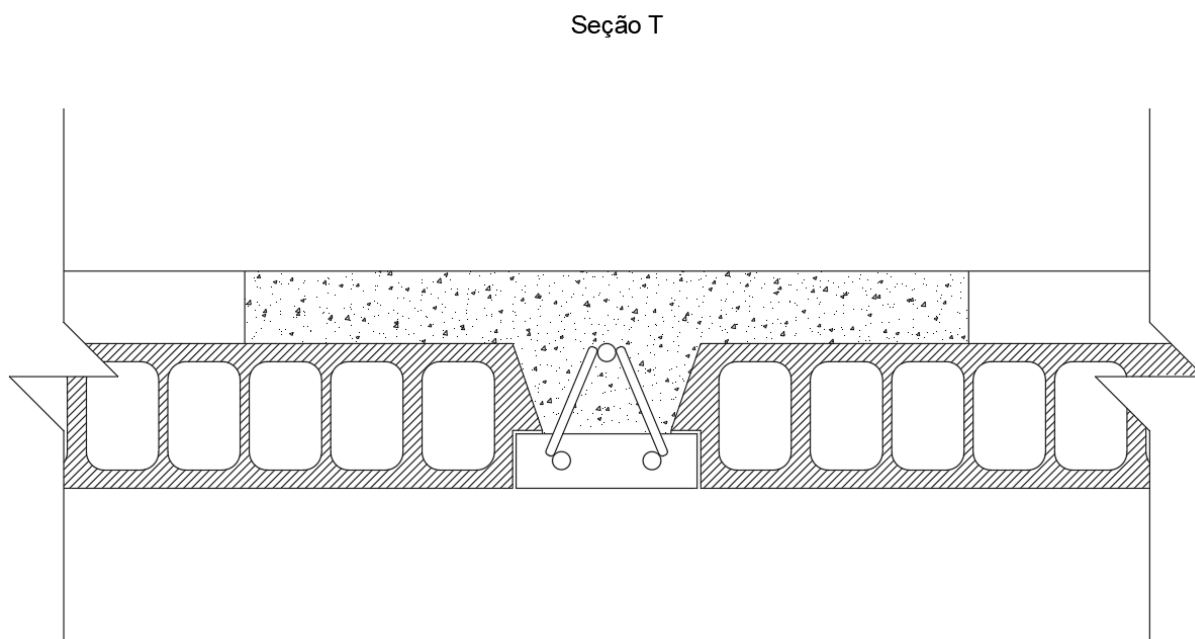
Segundo Bastos (2015), a laje nervurada pode ser entendida como um elemento estrutural constituído por vigas, em uma direção ou em duas direções, solidarizadas pela capa de concreto, sendo seu comportamento estático intermediário entre o de grelha e o de laje maciça.

O modelo para o cálculo da laje pode ser o de um conjunto de 'vigas' paralelas que trabalham praticamente independentes, podendo ser adotada uma seção transversal em forma de 'T'. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014)

Para a rotina de cálculo desenvolvida, a laje será analisada como uma série de vigas com seção em forma de T, combinadas com elementos de preenchimento como lajotas cerâmicas ou EPS⁵, justapostas uma ao lado da outra apoiadas geralmente no menor vão do ambiente para a qual está prevista, e por fim recebem uma capa de concreto para finalizar a conformação e confecção das mesmas, como mostradas nas figuras 2 e 3, respectivamente.

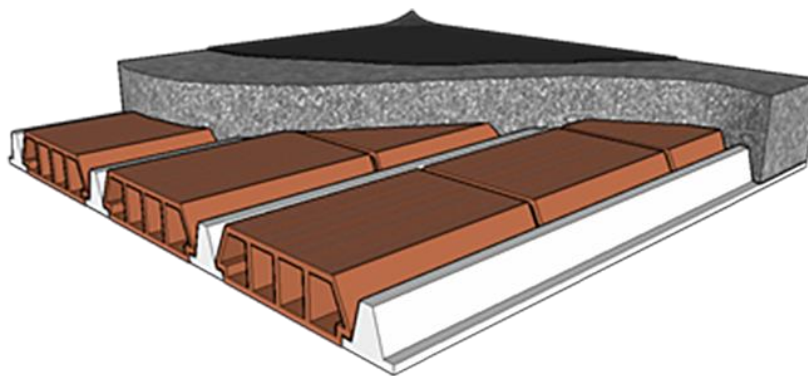
⁵ Poliestireno expandido

Figura 2 - Seção da laje.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 3 - Laje nervurada.



Fonte: www.projeteee.mma.gov.br/componente/laje-pre-moldada-lajota-12-cm/, (2019).

3.1 Composição

As lajes nervuradas são conhecidas popularmente por lajes pré-fabricadas ou pré-moldadas porque parte de sua estrutura é produzida fora do canteiro de obra e o restante finalizado na obra (BASTOS, 2015).

Basicamente, as lajes unidirecionais, são compostas em três partes: a vigota de concreto armado que no final do processo de montagem e confecção da laje exerce o papel da nervura, o material inerte que é o elemento de enchimento com

função de preencher o vazio entre as nervuras, regularizar e manter a superfície inferior da peça plana, e por último o capeamento de concreto que solidariza as vigotas, finalizando o processo (FUSCO, 1995).

As vigotas são produzidas por concreto armado, devendo o concreto possuir resistência mínima de 20 MPa, conforme disposto na ABNT NBR 14859:2002, e o aço deve atender o disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Aço para utilização em lajes pré-fabricadas

Produto	Norma	Diâmetro nominal mínimo (mm)	Diâmetro nominal máximo (mm)
Barras / fios de aço CA-50 / CA-60	NBR 7480	6,3 (CA-50) 4,2 (CA-60)	20,0 (CA-50) 10,0 (CA-60)
Tela de aço Eletrossoldada	NBR 7481	3,4	-
Fios de aço para protensão	NBR 7482	3,0	-
Cordoalhas de aço para protensão	NBR 7483	3 x 3,0	-
Armadura treliçada eletrossoldada	NBR 14862	Diagonal (sinusóide): 3,4 Banzo superior: 6,0 Banzo inferior: 4,2	Diagonal (sinusóide): 7,0 Banzo superior: 12,5 Banzo inferior: 12,5

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 14859:2002.

Existem quatro tipos de vigotas que são empregadas na confecção de lajes nervuradas unidirecionais, sendo elas: vigotas simples de concreto armado comum, vigotas de concreto armado protendido, vigotas treliçadas com armadura passiva e vigotas treliçadas com armadura ativa (protendidas), conforme representado na Figura 4.

Figura 4 - Seção de vigotas pré-moldadas.



Fonte: Adaptado de www.tecnicolaje.blogspot.com (2019).

A principal característica das lajes nervuradas de acordo com Pinheiro e Razente (2003), é a diminuição da quantidade de concreto na região tracionada (nervuras), onde é substituído por elementos de enchimento que não são considerados no cálculo estrutural da laje.

3.2 Dimensionamento de lajes nervuradas unidirecionais

Para o dimensionamento de uma laje nervurada, pelo método de cálculo que faz a aproximação desta com a de uma viga T, inicialmente é preciso conhecer as dimensões do ambiente a ser coberto, a finalidade de uso da mesma, se será uma laje de piso ou de cobertura, as cargas que atuarão sobre esta e a classe de agressividade ambiental que será submetida. Devem ainda, serem definidas a resistência característica à compressão do concreto, o tipo de agregado graúdo, a resistência do aço empregado na vigota treliçada e, caso necessite, na armadura complementar.

Para a rotina de cálculo desenvolvida, as solicitações e cargas preponderantes que atuam na laje na condição isostática biapoiada, podem ser escritas da seguinte forma:

- Peso Próprio (p_p): Peso da própria estrutura, isto inclui as vigotas, elemento de enchimento e capeamento.
- Carga Permanente (g): Peso relacionado aos componentes que podem ser incorporados na estrutura de maneira fixa, como forros, revestimentos, paredes, objetos fixos.
- Carga Acidental (q): cargas variáveis que agem na estrutura de forma intermitente de acordo com o seu uso ou condições de exposição na natureza ou ambiente, como a ação de pessoas e objetos ou ação do vento.
- Carga variável extra (q_{ex}): Para delimitar cargas acidentais referentes a ações de elementos relativamente mais importantes ou que requer uma atenção maior, como caixas d'água, equipamentos muito pesados.

O momento fletor característico (M_k) decorrente do carregamento uniformemente distribuído, considerando elemento biapoiado, na seção mais crítica (meio do vão) é obtido pela Equação 1:

$$M_k = \frac{p \cdot l^2}{8} \quad (1)$$

Em que,

p = a soma das cargas em kN/m, é calculado por;

$$p = (p_p + g + q + q_{ex}) \cdot b_f \quad (2)$$

b_f = medida referente a largura da mesa (Figura 05);

l = vão efetivo, obtido pela soma do menor vão e da metade das larguras dos apoios;

O momento fletor de cálculo é obtido aplicando os coeficientes de majoração de cargas prevista pela ABNT NBR 6118:2014, como o dimensionamento é realizado para a combinação de ações para o estado limite último (ELU), a norma estabelece o coeficiente de 1,4 tanto para as cargas permanentes quanto para as acidentais, portanto:

$$M_d = 1,4 \cdot M_k \quad (3)$$

E para os esforços cortantes característicos (V_k) e de cálculo (V_d) nas seções mais críticas (nas extremidades), são obtidos respectivamente por:

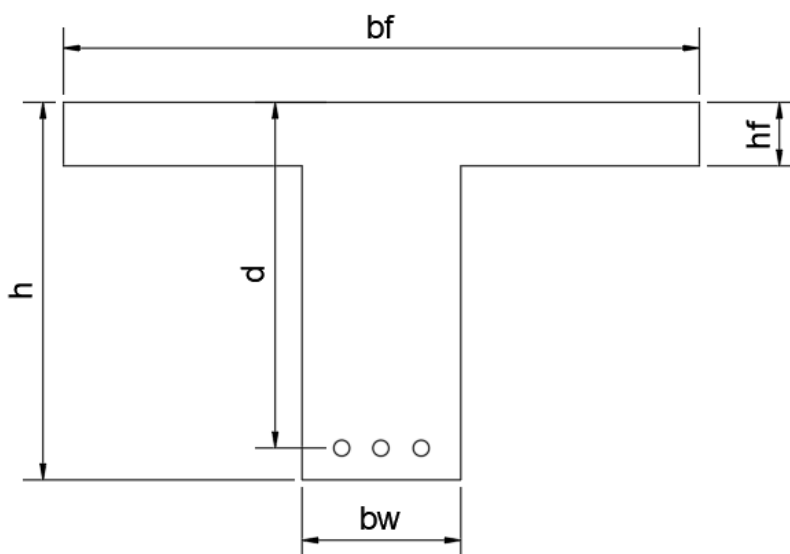
$$V_k = \frac{q \cdot l}{2} \quad (4)$$

$$V_d = 1,4 \cdot V_k \quad (5)$$

Carvalho e Figueiredo Filho (2014), orienta que é importante fazer as seguintes considerações para a modelagem matemática e cálculo desse tipo de estrutura:

- i. A parte vertical da viga é chamada de alma (nervura) e a parte horizontal de mesa, composta de duas abas (partes salientes), e a notação utilizada para a seção é conforme mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Seção transversal de uma viga T.



Fonte: Adaptado de CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO (2014).

- ii. Uma viga de concreto armado, formada por uma nervura e duas abas, será considerada como seção T quando a mesa e parte da alma estiverem comprimidas, que no caso dos momentos positivos é quando a linha neutra (x) passa pela alma. Caso contrário, a região do concreto comprimida é retangular, com a largura igual ao da mesa (b_f), não havendo, portanto, colaboração da alma e de parte da mesa, que estarão sendo tracionadas. Na Figura 6 está apresentada a descrição realizada.

Figura 6 - Seção de viga alternando em T ou retangular de acordo com a LN.



Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

- iii. Nas situações em que a linha neutra passa pela alma da seção, é possível realizar o cálculo em duas etapas, calculando inicialmente o momento resistido

pelas abas (M_1) e o momento resistido pela alma subtraindo o momento de cálculo (M_d) por M_1 .

Com as condições determinadas, o cálculo para o dimensionamento à flexão da laje nervurada pode ser iniciado.

3.2.1 Dimensionamento a flexão

Após estabelecidos o carregamento e as principais solicitações decorrentes do mesmo, é necessário:

- Definir a largura da mesa (b_f), sendo utilizada a distância entre eixos das vigotas conforme representado na Figura 7, uma vez que em atendimento às condições previstas na ABNT NBR 6118:2014 para determinação das larguras colaborantes, este é o valor que atende a situação para elementos cujo espaçamento entre vigas é relativamente pequeno.
- Definir a altura da laje de acordo com uma estimativa inicial recomendada, conforme a Equação 6.

$$h = \frac{l}{30} \quad (6)$$

Em que,

l = vão teórico, correspondente ao mesmo sentido de disposição das vigotas.

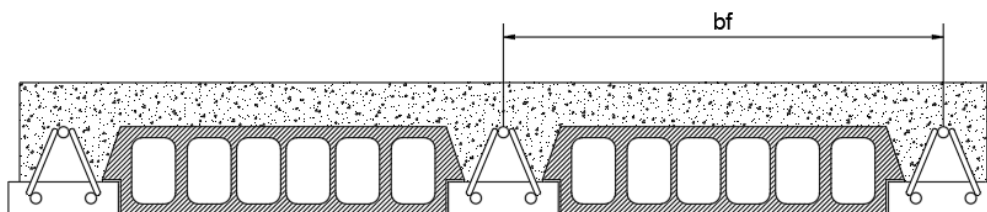
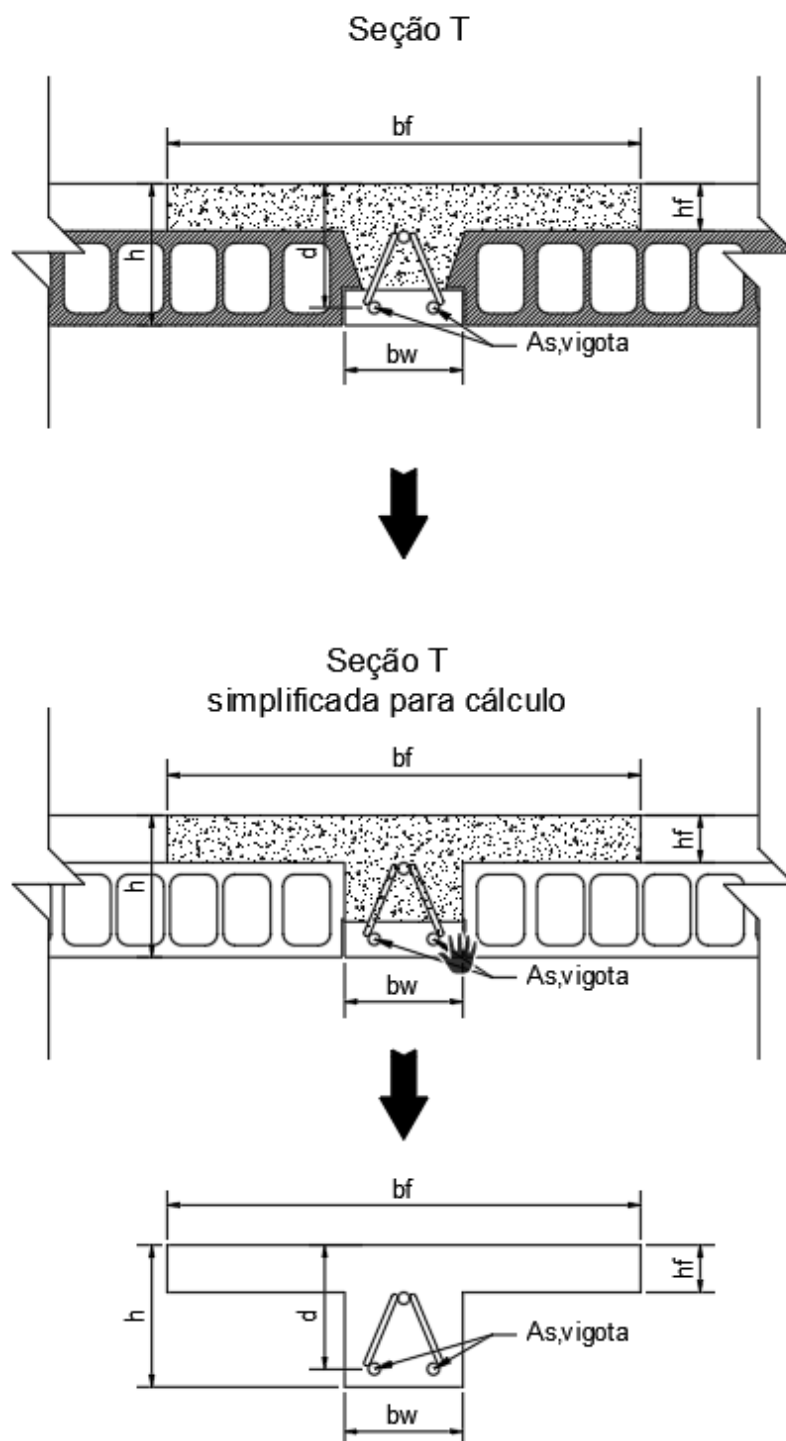


Figura 7 - Distância entre eixos.

Fonte: Autor, 2019.

Para simplificação dos procedimentos de cálculo e das análises, a seção transversal da laje nervurada foi simplificada, aproximando-a à uma viga T, conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Simplificação da seção.



Em seguida é necessário determinar a posição da linha neutra na seção da viga T, se está localizada na alma ou na mesa. Na verificação é admitida a hipótese inicial de que a mesma passe pela mesa.

A altura útil (d) é determinada pela Equação 7:

$$d = h - c - \frac{\phi_L}{2} \quad (7)$$

Em que,

h = a altura ou espessura da laje (cm),

c = cobrimento da armadura de acordo com a classe de agressividade ambiental (cm),

ϕ_L = diâmetro da armadura longitudinal (cm).

Com o valor de d, a linha neutra (x) pode ser determinada para concretos até a classe C50 aplicando-se a Equação 8. A determinação da linha neutra também pode ser realizada por meio de formulações adimensionais, que é uma adaptação das equações teóricas para variáveis adimensionais que agilizam o processo de cálculo.

$$x = \frac{0,68d \pm \sqrt{(0,68d)^2 - 4 \cdot 0,272 \cdot \left(\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}}\right)}}{0,544} \quad (8)$$

Em que,

d = altura útil (cm),

$b_w = b_f$ = largura da mesa para a primeira hipótese (cm),

M_d = Momento de cálculo (kN.cm),

f_{cd} = Resistencia de cálculo do concreto (kN/cm²).

Os cálculos pelas formulações adimensionais podem ser feitos pelas equações 9 a 11, que utilizam os coeficientes KMD e K_x . Após obtido o valor de K_x basta multiplicá-lo pela altura útil da viga (d) para obter a profundidade da linha neutra (x).

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (9)$$

$$k_x = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot KMD}{\alpha_c}}}{\lambda} \quad (10)$$

$$x = d \cdot k_x \quad (11)$$

Em que,

$$\lambda = 0,8$$

$$\alpha_c = 0,85, \text{ valores para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa.}$$

Caso a primeira hipótese seja validada, ou seja, a linha neutra esteja posicionada a uma distância menor que h_f , então a seção efetiva a qual a viga está trabalhando ao momento fletor causado pelo carregamento é retangular, e o cálculo para a armadura que resistirá a parte tracionada da viga pode ser determinada com:

$$A_s = \frac{M_d}{(d - 0,4x) \cdot f_{yd}} \quad (12)$$

Assim como para a determinação da linha neutra, a área de aço também pode ser obtida pela aplicação das formulações adimensionais, utilizando o parâmetro K_z , que pode ser obtido pela Equação 13 ou extraído da Tabela KMD apresentada no Anexo A.

$$K_z = 1 - \frac{\lambda}{2} \cdot K_x \quad (13)$$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot F_{yd}} \quad (14)$$

Após realizado o cálculo da área de aço necessária para a armadura da nervura, que é a parte tracionada da laje, prossegue-se com as verificações relacionados aos Estado Limite de Serviço (ELS) da estrutura para analisar as

deformações que o elemento estará sujeito após concluído sua execução e funcionamento pleno.

3.2.2 Verificação ELS

A verificação do ELS para as deformações excessivas em lajes pode ser realizada como se fosse para uma viga, uma vez que foi admitido o dimensionamento das nervuras como uma viga de seção T.

De acordo com ABNT NBR 6118:2014, o estado limite de deformações excessivas se caracteriza quando as mesmas atingem os limites estabelecidos para a utilização normal, que são estabelecidos em tabelas no seu item 13.3, adaptada na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais.	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso.	Devido a cargas acidentais	$l/350$
	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas.	Total	$l/250^a$
Efeitos estruturais em serviço	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche.	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios.	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com a recomendação do fabricante do equipamento
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos.	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos.	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios.	Provocado pela ação do vento para combinação frequente	$H/1700$ e $H_i/850^e$ entre Pavimentos ^f

(ψ₁ = 0,30)Movimentos térmicos
verticais.Provocados por
diferença de
temperatural/400⁹ e
15 mm

Fonte: Adaptado, ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 2 - Continuação

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	H _i /500
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	l/350
	Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	l/175	
Efeitos em elementos estruturais	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	H _i /400
	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014.

Para determinar as flechas⁶, às quais as lajes estarão sujeitas devido às combinações de ações para o estado de limite de serviço, é necessário calcular as características geométricas da seção transversal nos estádios⁷ I e II de deformação.

Primeiramente são calculadas as características geométricas no estádio I, sem considerar a presença da armadura, conforme previsto na ABNT NBR 6118:2014, fazendo apenas para a seção bruta. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

a) Centro de gravidade:

$$Y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g} \quad (15)$$

⁶ Deformação, deslocamento, deflexão causada pela solicitação.

⁷ Situações em que a seção transversal tem comportamento distintos, dependendo da intensidade das solicitações.

Em que,

Y_{cg} = Centro de gravidade (cm),

A_g = Área da seção bruta de concreto (cm²),

h_f = Espessura ou altura da mesa (cm)

b) Momento de Inércia da seção bruta:

$$I_{Ig} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(Y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(Y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad (16)$$

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), para o estágio II puro é preciso conhecer o valor do módulo de deformação longitudinal do concreto para encontrar o valor de α_e (relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto), o valor da posição da linha neutra e o momento de inércia, admitindo-se inicialmente a linha neutra na mesa.

a) Módulo de elasticidade do concreto (para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa):

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (17)$$

Em que,

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot (f_{ck} / 80) \leq 1,0$$

b) Relação entre os módulos de deformação do aço e do concreto:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (18)$$

Em que,

E_s = Módulo de elasticidade do aço, 210000 MPa.

c) Posição da linha neutra (x) para o estádio II puro:

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (19)$$

Em que,

$$a_1 = b_w / 2 = b_f / 2 \text{ (primeira hipótese),}$$

$$a_2 = \alpha_e \times A_s,$$

$$a_3 = -d \times \alpha_e \times A_s.$$

d) Momento de inércia no estádio II puro, considerando que não há armadura negativa ou resistindo a compressão, e desprezando inclusive a de distribuição.

- Se $X_{II} \leq h_f$:

$$I_{x,II_0} = \frac{b_f \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (20)$$

- Se $X_{II} > h_f$:

$$I_{x,II_0} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \cdot \left(x_{II} + \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (21)$$

Com as características geométricas definidas, o cálculo das flechas para as diversas combinações de ações que a laje estará sujeita, foi feito de acordo com a Equação 22:

$$a = \frac{5 \cdot p_n \cdot l^4}{384 \cdot E_{cs} \cdot I_m} \quad (22)$$

Em que,

l = comprimento do vão efetivo (cm),

E_{cs} = Modulo de deformação do concreto (kN/ cm²),

P_n = cargas que atuam por nervura, calculadas para as combinações de estado limite de serviço permanente, quase permanente e rara:

$$p_1 = (p_p + g) \cdot b_f \div 100 \left[\frac{kN}{cm} \right] \quad (23)$$

$$p_2 = (p_p + g + 0,3 (q + q_{ex})) \cdot b_f \div 100 \left[\frac{kN}{cm} \right] \quad (24)$$

$$p_1 = (p_p + g + q + q_{ex}) \cdot b_f \div 100 \left[\frac{kN}{cm} \right] \quad (25)$$

I_m = Inércia média de Branson (cm^4), obtida por:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^3 \cdot I_{Ig} + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^3 \right] \cdot I_{x,II_0} \quad (26)$$

Em que,

M_{at} = Momento atuante devido à combinação das ações (mesma equação 1, porem com os valores do carregamento sendo as combinações para o ELS)

M_r = Momento de fissuração, obtido pela equação 27:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_{Ig}}{y_t} \quad (27)$$

Sendo,

y_t = A distância do centro de gravidade até a fibra mais tracionada (cm)

$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$ (kN/cm^2)

α = fator que correlaciona aproximadamente a resistência a tração na flexão com a resistência à tração direta, sendo utilizado 1,2 para seção T conforme a ABNT NBR 6118:2014.

4 PROGRAMAÇÃO (FPL)

Neste capítulo é descrita a ferramenta computacional que foi desenvolvida ao longo deste trabalho, mostrando sua operabilidade, funções, os resultados gerados pelo mesmo e uma breve descrição sobre a linguagem Pascal.

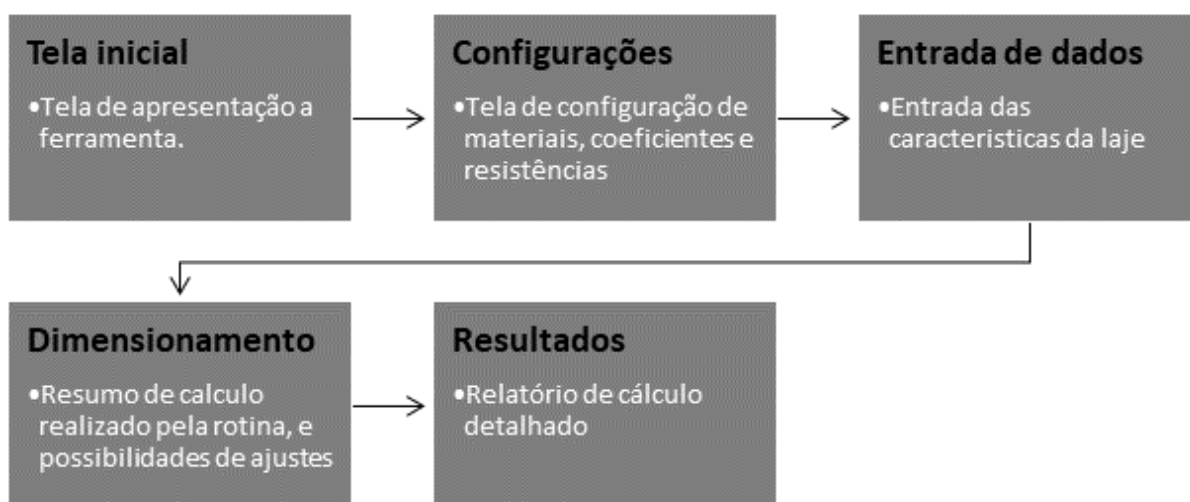
Free Pascal Lazarus, é uma linguagem que ainda hoje é muito utilizada no meio acadêmico para os iniciantes em programação, e o *Lazarus* nasceu como uma alternativa de código aberto ao Delphi, disponibilizando um ambiente de desenvolvimento integrado muito compatível ao mesmo, e usa o compilador Free Pascal (FPC) que tem a capacidade de ser executado nas plataformas *Windows*, *Mac* ou *Linux*.

4.1 O programa L-CALC

O nome dado ao programa surgiu da ideia de que o programa foi criado para calcular as vigotas que compõe lajes nervuradas unidirecionais, então *L-CALC* significa calculadora de laje, por enquanto como laje nervurada unidirecional.

De maneira simplificada a rotina computacional de cálculo pode ser estruturada conforme apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Rotina computacional do L-CALC.



Fonte: Autor, 2019.

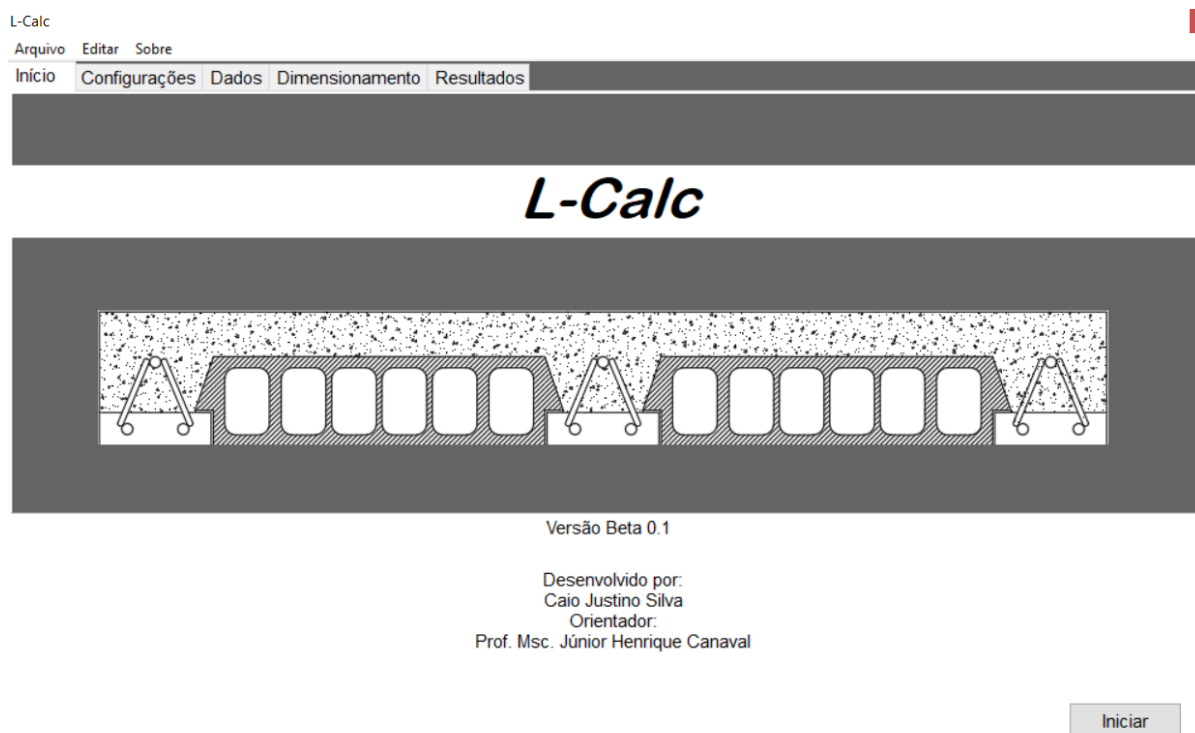
4.2 Primeiros passos (tela inicial)

Na tela inicial do programa, apresentada na Figura 10, é apresentado ao usuário o nome do programa, a versão, autoria, o menu, as abas das páginas de navegação e a opção de início que redireciona para a próxima página, a qual possibilita o lançamento dos dados de entrada relacionados às configurações.

O menu é composto pelas seguintes opções:

- Arquivo: nesta opção o usuário pode exportar o relatório após o dimensionamento da estrutura ou encerrar a atividade na opção 'Sair';
- Editar: opção que permite alterar a cor de fundo (tema) utilizado no programa, caso o usuário deseje trabalhar com outras cores;
- Sobre: neste item, o usuário tem a opção de ler a respeito da ferramenta, ou consultar a opção de ajuda que dá algumas dicas do bom funcionamento da rotina e de possíveis soluções que podem ser adotadas para resolver alguns problemas de dimensionamento ou verificação;

Figura 10 – Tela inicial do programa L-Calc



Fonte: Autor, 2019.

Nos próximos tópicos serão descritas as demais telas relacionadas a rotina de cálculo, com observações importantes quanto a sua operabilidade.

4.3 Configurações

Na janela de configurações, demonstrada na Figura 11, é feita toda a entrada dos dados referente aos coeficientes normativos necessários para execução dos cálculos na rotina. Com o intuito de agilizar a configuração, numa caixa de grupo localizada no canto inferior esquerdo, é oferecido ao usuário as opções de configuração rápida de acordo com os parâmetros previstos na ABNT NBR 6118:2014 para as combinações de estado limite último de carregamentos de caráter permanente ou variável.

Nas caixas de grupo localizadas a direita estão as opções de configuração para os coeficientes de segurança para ELU e para as resistências do aço e do concreto, prevendo também a classe de agressividade ambiental (CAA) para determinar o cobrimento da armadura utilizada na vigota, o tipo de agregado utilizado no concreto, e o tempo de retirada das escoras para verificar a deformação do elemento.

Figura 11 - Tela de configurações

Coeficientes de Solicitações

Combinações ELU

	Normais	Especiais	Excepcionais
Permanente	1,4	1,3	1,2
Variável	1,4	1,2	1,0

Ações

	Psy 0	Psy 1	Psy 2
Cargas acidentais de edifícios	0,5	0,4	0,3
Vento	0,6	0,3	0
Temperatura	0,6	0,5	0,3

Configuração rápida

Nenhuma configuração
 Condição desfavorável
 Condição favorável

Coeficientes de Resistência

Dimensionamento ELU

	Normais	Especiais	Excepcionais
Concreto	1,4	1,2	1,2
Aço	1,15	1,15	1,0

Resistência dos Materiais

Aço (fyk) 500 MPa
 Concreto (fck) 20 MPa
 Classe de agressividade ambiental
 Cobrimento da armadura cm
 Agregado graúdo do concreto Calcário
 Retirada do escoramento 14 dias

Próximo

Fonte: Autor, 2019.

Após configurar os coeficientes e a resistência dos materiais que serão empregados na laje, a opção 'Próximo' irá direcionar o usuário para a tela de dados.

4.4 Entrada de dados

A tela de entrada de dados, apresentada na Figura 12, é destinada para o lançamento das características da laje necessárias para rotina de cálculo, que separadas em grupos se apresentam da seguinte forma:

- Nome da laje: campo de identificação, que não influencia no cálculo;
- Dimensões da laje: campo contendo características geométricas básicas da laje, como seus vãos, altura adotada;
- Espessura dos apoios: espessura dos apoios onde as vigotas serão apoiadas, informação necessária para o cálculo do vão efetivo que é utilizado nos cálculos;
- Carregamento: entrada dos valores de solicitação, conforme explicitado na rotina em quatro variáveis, sendo elas peso próprio (p_p), carga permanente (g), carga acidental (q) e carga extra (q_{ex});
- Seção transversal: características da seção transversal tipo T, admitida como simplificada para os cálculos de dimensionamento da laje nervurada unidirecional.

Figura 12 - Tela de entrada de dados.

Fonte: Autor, 2019.

É importante observar a presença do botão 'Calcular' dentro da caixa de grupo que compõe a seção transversal. É essencial *clicar* neste botão para conseguir dar continuidade aos cálculos, pois ele atualiza o campo 'd' (altura útil). Sempre que houver modificações na altura da seção, no aço da treliça e inclusive quando se altera a classe de agressividade ambiental deve-se clicar em 'Calcular' pois todos estes fatores influenciam no valor 'd'.

Ao finalizar a inserção dos dados, ao selecionar opção 'Processar', o programa executa a rotina de dimensionamento e verificação da deformação na laje.

4.5 Dimensionamento

A tela de dimensionamento, demonstrada na Figura 13, apresenta um resumo dos resultados considerados primordiais para o cálculo, e que de certa forma influencia na tomada de decisões para ajustes no dimensionamento caso esta não atenda as conformidades previstas pela norma ABNT NBR 6118:2014.

Ainda nesta tela é possível realizar alguns ajustes pós cálculo através de alguns recursos que a princípio não alteram as características geométricas escolhidas previamente para a laje e nem as configurações iniciais. Estes recursos estão situados à esquerda, e para utilizá-los é necessário habilitar as opções correspondentes a estes, e em seguida inserir os valores. Após estes ajustes, é necessário selecionar a opção 'Recalcular' para atualizar a rotina de cálculo.

Partes das verificações podem ser visualizadas em campos de informações situados na região localizada à direita da tela.

Figura 13 – Tela de dimensionamento

The screenshot shows the 'Dimensionamento' (Dimensioning) screen of the L-Calculadora software. The interface is organized into several functional areas:

- Solicitações (Requests):** Fields for 'Momento Fletor Característico ...', 'Momento Fletor de Cálculo ...', 'Esforço Cortante Característico ...', and 'Esforço Cortante de Cálculo ...'.
- Ajustes (Adjustments):**
 - Aço complementar (Complementary Steel):** Includes a checkbox 'Adicionar', 'Bitola' (0 mm), and 'Quantidade' (0).
 - Contraflecha (Deflection):** Includes a checkbox 'Aplicar contraflecha' and a value of 0 cm.
- Resumo de Cálculo (Calculation Summary):** A list of calculated values with input fields: LN (cm), As, calc (cm²), As, vigota (cm²), As, restante (cm²), As, adicional (0 cm²), and As, total (cm²).
- Informações (Information):** Fields for 'Ycg' (cm), 'Inércia estádio I (g)' (cm⁴), and 'Inércia estádio II (xii)' (cm⁴).
- Verificações (Checks):** A scrollable area for displaying calculation results, currently empty.
- Navigation:** 'Recalcular' (Recalculate) button at the bottom left, and 'Anterior' (Previous) and 'Próximo' (Next) buttons at the bottom right.

Fonte: Autor, 2019.

Caso haja situações em que o dimensionamento não atenda aos critérios normativos, a opção 'Anterior', permite acesso as telas anteriores, podendo o usuário alterar o campo que achar necessário para corrigir determinadas situações de cálculo.

Por fim, após selecionar a opção 'Próximo' o usuário será direcionado a página de resultados.

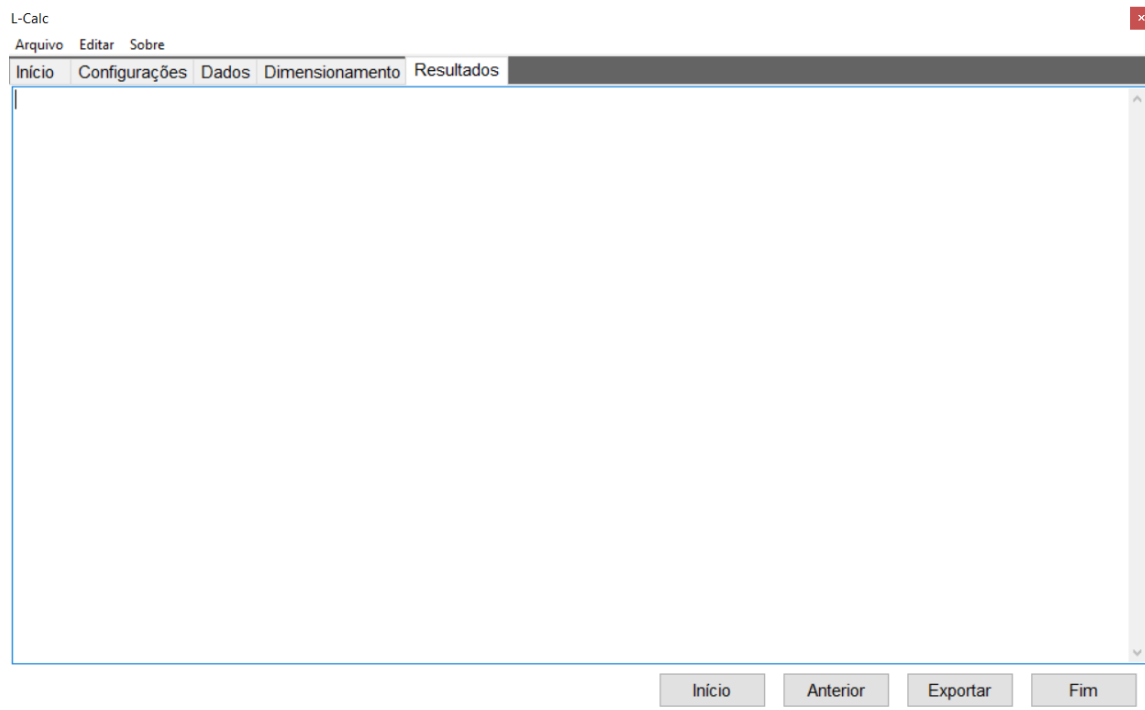
4.6 Resultados

Na tela 'Resultados', apresentada na Figura 14, são apresentados os valores obtidos pelos cálculos de maneira simplificada, na forma de um relatório que o programa gera ao término do dimensionamento.

As opções disponíveis são:

- Início: retorna a página inicial, sem apagar os dados que foram inseridos;
- Anterior: retorna uma tela atrás, no caso a página de dimensionamento;
- Exportar: exporta o relatório em arquivo de texto (.txt)
- Fim: finaliza a aplicação, fechando o programa.

Figura 14 - Tela de resultados.



Fonte: Autor, 2019.

5 EXEMPLO PRÁTICO

Neste capítulo será exposto o exemplo 3 do capítulo 4 do livro Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado, do professor Roberto Chust Carvalho resolvido pelo programa L-Calc, como sendo uma forma de validação dos resultados obtidos pelo *software* desenvolvido.

Ao iniciar o programa e selecionar a opção de início, para ser redirecionado a tela de configurações, e nos campos de resistência do concreto e do aço foram ajustados para 20 MPa e CA-60, e a classe de agressividade ambiental para I* que admite uma diminuição de 5 mm no cobrimento da armadura da vigota admitindo que a mesma teve um controle rigoroso em sua fabricação. O restante das configurações foi mantido conforme *default* do programa (ver Figura 15).

Figura 15 - Tela de configuração, exemplo.

The screenshot shows the configuration window of the L-Calc software. The window title is 'L-Calc' and it has a menu bar with 'Arquivo', 'Editar', and 'Sobre'. The main area is divided into several sections:

- Coeficientes de Solicitações:**
 - Combinações ELU:**

	Normais	Especiais	Excepcionais
Permanente	1,4	1,3	1,2
Variável	1,4	1,2	1,0
 - Ações:**

	Psy 0	Psy 1	Psy 2
Cargas acidentais de edifícios	0,5	0,4	0,3
Vento	0,6	0,3	0
Temperatura	0,6	0,5	0,3
- Coeficientes de Resistência:**
 - Dimensionamento ELU:**

	Normais	Especiais	Excepcionais
Concreto	1,4	1,2	1,2
Aço	1,15	1,15	1,0
- Resistência dos Materiais:**
 - Aço (fyk): 600 MPa
 - Concreto (fck): 20 MPa
 - Classe de agressividade ambiental: I*
 - Cobrimento da armadura: 1,5 cm
 - Agregado graúdo do concreto: Calcário
 - Retirada do escoramento: 14 dias
- Configuração rápida:**
 - Nenhuma configuração
 - Condição desfavorável
 - Condição favorável

A 'Próximo' button is located at the bottom right of the window.

Fonte: Autor.

Na tela seguinte foram inseridos os dados do problema, conforme disponibilizado pelo exercício, vão de 5 metros, β_{20} ($h = 20$ cm), distância entre os eixos de 50 cm ($b_f = 50$ cm), mesa com 6 cm de espessura ($h_f = 6$ cm), e a nervura com 10 cm ($b_w = 10$ cm), armadura longitudinal de $3,615$ cm² (duas de 12,5 mm e uma

adicional de 10 mm), cargas $p_p = 2,2 \text{ kN/m}^2$, $g = 0,9 \text{ kN/m}^2$, e $q = 4 \text{ kN/m}^2$, conforme mostrado na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 - Tela de entrada de dados, exemplo.

The screenshot shows the 'Dados' (Data) tab of the L-Calc software. The interface is organized into several sections:

- Nome da Laje:** L (EXERCICIO)
- Dimensões da Laje:**
 - Vão maior: 6 m
 - Vão menor: 4,80 m
 - Altura recomendada: 16,00 cm
 - Altura adotada: 20 cm
- Espessura dos apoios:**
 - Apoio esquerdo: 20 cm
 - Apoio direito: 20 cm
- Informações:**
 - Vão efetivo: 5,00 m
 - Carregamento Total: 7,10 kN/m²
- Carregamento:**
 - Peso Próprio: 2,2 kN/m²
 - Carga Permanente: 0,9 kN/m²
 - Carga Acidental: 4,00 kN/m²
 - Carga Extra: 0 kN/m²
- Seção transversal:**
 - bf: 50 cm
 - hf: 6 cm
 - h: 20 cm
 - bw: 10 cm
 - Aço da treliça: 12,5 mm
 - Quantidade: 3
 - d: 17,875 cm
 - Botão: Calcular
- Diagramas:**
 - Seção T:** Shows a cross-section of a slab with width b_f and effective depth d . It includes reinforcement bars and a label 'As, vigota'.
 - Seção simplificada de cálculo:** Shows a simplified cross-section for calculation with width b_f and effective depth d . It includes reinforcement bars and a label 'As, vigota'.
- Buttons:** Anterior, Processar

Fonte: Autor.

Nota-se, que a distância está configurada para ser calculada, e diferente do exercício que orienta adotar uma distância de 18 cm pelo fato do valor estar aproximando, isso certamente influenciará no resultado final, pois algumas equações dependem diretamente desse valor, porém espera-se que essa diferença seja pequena.

Quanto ao vão efetivo, foram inseridos dados de modo a obter o mesmo valor proposto pelo exercício. Os demais campos foram mantidos com os valores originais fornecidos pelo problema.

Ao selecionar a opção para processar, a tela de dimensionamento é exibida com alguns valores e informações (ver Figura 17).

Figura 17 - Tela de dimensionamento, exemplo.

The screenshot shows the 'L-Calculadora' software interface. The main window has a menu bar (Arquivo, Editar, Sobre) and a tabbed interface with 'Dimensionamento' selected. The interface is divided into several sections:

- Solicitações:** Momento Fletor característico: 11,09 kN.m; Momento Fletor de cálculo: 15,53 kN.m; Esforço Cortante característico: 8,88 kN; Esforço Cortante de cálculo: 12,42 kN.
- Ajustes:** 'Aço complementar' section with 'Adicionar' checkbox and fields for 'Bitola' and 'Quantidade'. 'Contraflecha' section with 'Aplicar contraflecha' checkbox and a value of 0 cm.
- Resumo de Cálculo:** A list of parameters with input fields: LN (1,87 cm), As, calc (1,74 cm²), As, vigota (3,68 cm²), As, restante (empty), As, adicional (0 cm²), As, total (3,68 cm²), Flecha (permanente) (0,71 cm), Flecha (quase permanente) (1,02 cm), Flecha (rara) (1,72 cm), Flecha (acidental) (1,01 cm), Flecha diferida no tempo (2,53 cm), and Contraflecha máx permitida (-1,43 cm).
- Informações:** A red-bordered box containing: 'Falso T', 'Seção Retangular!', 'A deflexão max visual é de 2,00 cm', 'A deflexão max vibrações é de 1,43 cm', 'As, total é maior que As, calc!', 'Area de aço atende!', 'Ycg (6,18 cm)', 'Inércia estádio I (g) (12732,12 cm⁴)', and 'Inércia estádio II (xii) (8733,50 cm⁴)'.
- Verificações:** A red-bordered box containing: 'A flecha diferida é maior que o deslocamento máximo de 2,00 cm, recomenda-se a aplicação de uma contraflecha ou uma outra solução,'.

At the bottom, there are 'Anterior' and 'Próximo' buttons, and a 'Recalcular' button highlighted with a red border.

Fonte: Autor, 2019.

No canto direito, os campos de informação fornecem algumas verificações para serem feitas e quais ajustes serão necessários. É possível notar que a flecha diferida no tempo devido ao efeito da fluência é maior que o limite máximo permitido estabelecido por norma e, portanto, conclui-se que será necessário aplicar uma contra flecha para regularizar essa situação e atender as instruções normativas.

No campo onde há os valores das flechas calculadas devido as combinações ELS, acidental e diferida no tempo, também existe a contra flecha máxima permitida que pode ser aplicada na laje, conforme apresentado na Figura 18. Mesmo digitando um valor maior que o permitido, a rotina será calculada com o valor máximo permitido e vai emitir ao usuário uma mensagem para informá-lo a respeito disso.

Comparando o valor da flecha diferida obtido pelo *software* de 2,53 cm com o resultado do exemplo do livro que foi de 2,47 cm, verifica-se uma variação em torno de 2,37% (cerca de 6 mm). Esta pequena diferença foi influenciada pelos diferentes valores de 'd', devido ao arredondamento feito pelo autor no exemplo do livro.

Figura 18 - Tela de dimensionamento, ajuste do exemplo.

Solicitações

Momento Fletor característico: 11,09 kN.m
 Momento Fletor de cálculo: 15,53 kN.m
 Esforço Cortante característico: 8,88 kN
 Esforço Cortante de cálculo: 12,42 kN

Ajustes

Aço complementar

Adicionar Bitola mm
 Quantidade mm

Contraflecha

Aplicar contraflecha 1,43 cm

Recalcular

Resumo de Cálculo

LN 1,87 cm
 As, calc 1,74 cm²
 As, vigota 3,68 cm²
 As, restante cm²
 As, adicional 0 cm²
 As, total 3,68 cm²

Flecha (permanente) 0,71 cm
 Flecha (quase permanente) 1,02 cm
 Flecha (rara) 1,72 cm
 Flecha (acidental) 1,01 cm
 Flecha diferida no tempo 2,53 cm
 Contraflecha máx permitida -1,43 cm

Ycg 6,18 cm
Inércia estádio I (g) 12732,12 cm⁴
Inércia estádio II (xii) 8733,50 cm⁴

Verificações

Portanto, tais condições atendem as verificações de deformações excessivas em lajes.

Informações

Falso T
 Seção Retangular !
 A deflexão max visual é de 2,00 cm
 A deflexão max vibrações é de 1,43 cm
 As, total é maior que As, calc!
 Area de aço atende!

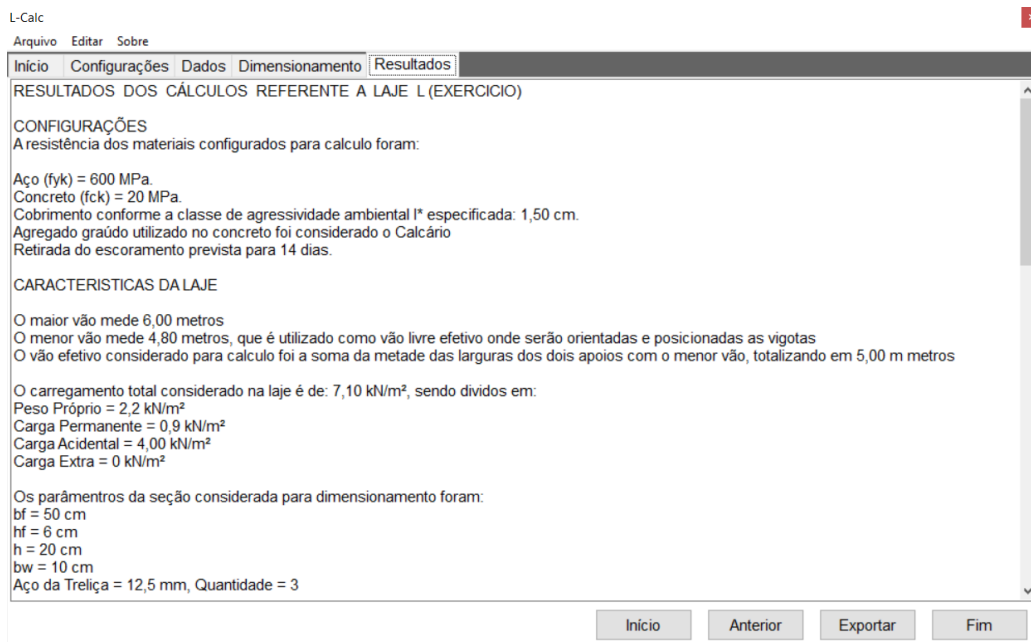
Anterior Próximo

Fonte: Autor, 2019.

Na resolução do exemplo do livro a contraflecha aplicada foi a máxima permitida de 1,42 cm, e o valor da flecha devido ao efeito da fluência foi de 1,05 cm. Já no programa o valor ajustado foi de 1,43 cm, com uma variação de 1 mm devido ao arredondamento do formato de número configurado pela programação da ferramenta, e a flecha final devido ao efeito da fluência foi de 1,10 cm. Nota-se que a variação de 5 mm prevaleceu devido a influência da altura útil 'd'.

Com os ajustes realizados no canto inferior esquerdo é possível perceber que as condições passam a ser atendidas, conforme é possível ver no campo 'Verificações' localizado no canto inferior direito da tela. O atendimento da verificação faz com que seja emitida uma mensagem, descrevendo que as condições foram atendidas. E por fim o relatório simplificado gerado pelo programa, demonstrado na Figura 19, será exibido assim que *clique* no botão 'Próximo'.

Figura 19 - Tela de resultados, exemplo.



Fonte: Autor, 2019.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho foi apresentado um método para o dimensionamento de lajes nervuradas unidirecionais, análogo ao dimensionamento de vigas de seção T, visto que o arranjo formado pelas vigotas, elementos de enchimento e o capeamento fazem com que a laje tenha uma seção com geometria similar à de uma viga de seção T, porém trabalhando com suas deformações em um nível intermediário ao da laje maciça e a de um elemento isolado.

Como o método se baseia em uma análise realizada sob a perspectiva de um elemento trabalhando independentemente, isso faz com que o superdimensionamento envolvido no cálculo tenha uma margem de segurança maior, já que ele desconsidera as armaduras de contribuição e o efeito placa devido ao capeamento inteiriço da laje.

O método possui várias equações que são utilizadas de maneira coordenada e dependente uma da outra para conseguir obter os resultados relevantes da rotina de cálculo e êxito da mesma.

Apesar de desafiante, o programa L-Calc, desenvolvido no *software* de ambiente de desenvolvimento integrado *Lazarus*, ainda é simples e indicado, portanto, somente para fins acadêmicos. Aplicando-se para análise de vigotas treliçadas isoladas, as quais compõe as lajes nervuradas unidirecionais.

Contudo, mesmo com o sucesso da conclusão do trabalho, no fim enxergou-se alguns pontos em que o mesmo pudesse ser melhorado em suas próximas versões, então sugere-se para trabalhos futuros que o dimensionamento seja:

- a) Adaptado para qualquer tipo de carregamento e vinculações;
- b) Implementado um banco de dados capaz de armazenar características de lajes pré-moldadas com os parâmetros de fábrica, materiais de enchimento, etc;
- c) Capacidade de calcular situações mais específicas, porém comuns em projetos de edificações como, por exemplo, paredes apoiadas sobre a laje.
- d) Implementação de novos módulos capazes de calcular vigas, lajes maciças, pilares e fundação.

Para os objetivos que este trabalho foi, a princípio pensado e engajado, a ferramenta atende seu propósito, atingindo o objetivo principal.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014) – **Projeto de estruturas de concreto** – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 (2000) – **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 1: Lajes unidirecionais, NBR 14859-1**, Rio de Janeiro, ABNT, 2002,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Laje pré-fabricada – Pré-laje – Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais, NBR 14860-1**, Rio de Janeiro, ABNT, 2002

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Lajes de concreto**: Notas de aula. UNESP, Bauru. 2015.

BOTELHO, M.H.C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4ª.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

FUSCO, Péricles. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini. 1995. 382p.

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**: cálculos de edifícios com o uso de sistemas computacionais.1ª.ed. São Paulo: Pini, 2007. 632p.

PINHEIRO, Libânio M.; RAZENTE, Júlio A. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: USP-EESC, 2003.

Anexo A – Tabela KMD

KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,0000
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,0000
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,0000
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,0000
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,0000
0,0550	0,0837	0,9665	0,9133	10,0000
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,0000
0,0650	0,0996	0,9602	1,1056	10,0000
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,0000
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,0000
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,0000
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,0000
0,0900	0,1402	0,9439	1,6308	10,0000
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,0000
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,0000
0,1050	0,1653	0,9339	1,9810	10,0000
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,0000
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,0000
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,0000
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,0000
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,0000
0,1350	0,2174	0,9130	2,7786	10,0000
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,0000
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,0000
0,1500	0,2445	0,9022	3,2363	10,0000
0,1550	0,2537	0,8985	3,3991	10,0000
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,1306
0,1850	0,3107	0,8757	3,5000	7,7662
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204
0,1950	0,3304	0,8678	3,5000	7,0919
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793
0,2050	0,3507	0,8597	3,5000	6,4814
0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,2150	0,3713	0,8515	3,5000	5,9255
0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,2350	0,4142	0,8343	3,5000	4,9496
0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,2509	0,4500	0,8200	3,5000	4,2786

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho, 2014.