



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA COMPUTACIONAL PARA O
DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE ESCADAS HELICOIDAIS EM
CONCRETO ARMADO**

ORIENTADO: CIRANO ALVES BELARDONY
ORIENTADOR: ALMIR BARROS DA SILVA SANTOS NETO

Santa Maria, RS, Brasil
2022

Cirano Alves Belardony

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA COMPUTACIONAL PARA O
DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE ESCADAS HELICOIDAIS EM
CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso a ser apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, Área de Construção Civil e Estruturas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS, Brasil
2022

Senhor, dai-me força para mudar o que pode ser mudado...

Resignação para aceitar o que não pode ser mudado...

E sabedoria para distinguir uma coisa da outra.

São Francisco de Assis

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a quem sempre esteve comigo desde o princípio da minha singela existência, a minha família, especialmente ao meu pai Cirano Cardoso Belardony e minha mãe Janaína Alves Belardony, gratidão por sempre estarem presente em todas minhas dúvidas, dificuldades e indecisões, vocês foram e são a melhor família que eu poderia ter.

Durante minha graduação tive colegas incríveis que sempre dividiram as felicidades, angústias e medos durante esses cinco anos, dentre eles, gostaria de agradecer especialmente a Betina Pituco, ao Gabriel Scapin e a Rafaela Cechin que foram meus colegas de grupo em praticamente todas as disciplinas e que sempre dividiram aquele “bizu” comigo.

Um pouco antes de entrar no ensino superior, conheci pessoas no colégio militar que também foram fortes amigos durante minha graduação, obrigado João Pedro Pereira Copetti, Leonardo Camargo Rossatto e Carlos Gewehr. O apoio de vocês foi essencial, gratidão por usarem a experiência de vocês para ajudar em minhas decisões.

Além de acompanhar minha vida pessoal, agradeço a minha companheira Izabele Beltrami Simon que me ajudou em muitos momentos complicados em que os trabalhos e provas se acumulavam e que eu não tinha nem tempo para respirar.

Agora, no final deste ciclo, fui orientado nesse Trabalho de Conclusão de Curso pelo brilhante Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto, que abrilhantou minha formação profissional com as cadeiras de Concreto Armado, Protendido e Estruturas de Concreto Armado.

E por fim, agradeço a toda estrutura do Ministério da Educação que me proporcionou uma educação pública, gratuita e de qualidade.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO DE ESCADAS HELICOIDAIS EM CONCRETO ARMADO

AUTOR: Cirano Alves Belardony

ORIENTADOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

Este trabalho teve como intuito a elaboração de uma planilha computacional – escrita no software *Microsoft Office Excel* – para auxiliar no dimensionamento, detalhamento e desenho de uma escada helicoidal em concreto armado. Para isto, ao decorrer do trabalho, são descritas as motivações para realização de tal rotina. Inicialmente, foram introduzidas noções gerais dos elementos arquitetônicos que compõem uma escada circular como degraus, desnível, guarda-corpos, parapeitos, angulação, entre outros. Posteriormente, são abordados tópicos referentes ao levantamento dos esforços (flexão oblíqua e esforço cortante) em que a estrutura será submetida e, em sequência, os temas referentes à determinação das áreas de aço das armaduras usadas na viga principal da escada. Como última abordagem teórica são apresentadas as recomendações de detalhamento da escada helicoidal. Após expor o referencial teórico, é apresentada a planilha computacional para auxiliar no dimensionamento, detalhamento e desenho de uma escada helicoidal em concreto armado. Para tanto, inicialmente, são apresentadas as pastas de trabalho, suas correspondentes funções e configurações. Na última pasta, é apresentado um código, onde o usuário tem a possibilidade de extrair um script utilizável em programas CAD (neste trabalho, utilizou-se o *Autodesk AutoCAD*). Logo após, tem-se a apresentação dos comentários referentes a possível portabilidade da planilha para uma linguagem mais sofisticada e, por fim, têm-se as considerações finais que apresentam as limitações e possíveis melhorias futuras para a planilha.

Palavras-chave: escadas helicoidais, automatização, planilha computacional, *Microsoft Office Excel*, *Autodesk AutoCAD*, *script*, Lagendonck, flexão oblíqua.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL WORKSHEET TO AUTOMATE THE DESIGN AND DETAILING OF HELICAL STAIRS IN REINFORCED CONCRETE

AUTHOR: Cirano Alves Belardony

ADVISOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

This work aimed to prepare a computational spreadsheet – written in *Microsoft Office Excel* software – to assist in the dimensioning, detailing and design of a helical stair in reinforced concrete. For this, during the work, it is explained the motivations to this case. Initially, general notions of the architectural elements that makes a circular staircase were introduced, such as steps, unevenness, railings, parapets, angle, among others. Subsequently, the study of the forces (oblique bending and shearing) to which the structure will be submitted are calculated, and, in sequence, the themes referring to the determination of the reinforcement used in the main beam of the staircase. As a last theoretical approach, here are qualified as a recommendation for detailing the helical ladder. After exposing the theoretical framework, the computational spreadsheet is presented to assist in the dimensioning, detailing and design of a helical ladder in reinforced concrete. For this purpose, bulletins are accepted as masses of work, their functions and configurations. In the last folder, a code is presented, here the user has a possibility to extract a usable script in CAD programs (in this work, *Autodesk AutoCAD* was used). After, there is the presentation of comments regarding the possible portability of the spreadsheet to a more sophisticated language and, finally, the final definitions are presented as limitations and possible future improvements for the spreadsheet.

Keywords: helical stairs, automation, worksheet, *Microsoft Office Excel*, *Autodesk AutoCAD*, *script*, Lagendonck, oblique bending.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Escada. Fonte: Araújo (2010).....	14
Figura 2 – Representação de cada elemento que compõe uma escada helicoidal. Fonte: Autor.	17
Figura 3 - Arranjos estruturais calculáveis pelos coeficientes do Telêmaco Van Langendonck Fonte: (Rocha, 1978).....	21
Figura 4 - Direções M_x e M_y Fonte: Autor. Onde:.....	21
Figura 5 - Fluxograma do algoritmo do trabalho. Fonte: Autor.....	30
Figura 6 – Tipologia das escadas adotadas na planilha computacional. Fonte: Autor.....	31
Figura 7 - Exemplo de capa gerada pela planilha do trabalho. Fonte: Autor.....	32
Figura 8 – Legenda. Fonte: Autor	33
Figura 9 - Informações iniciais referentes a elementos da arquitetura da escada. Fonte: Autor	33
Figura 10 - Variáveis calculadas automaticamente pelo programa. Fonte: Autor	33
Figura 11 - Offset da linha de rastro e gola. Fonte: Autor.....	34
Figura 12 - Variáveis calculadas pelo programa. Fonte: Autor.....	34
Figura 13 - Altura da peça estrutural que servirá de função como degrau. Fonte: Autor	34
Figura 14 - Corte esquemático para indicação da altura da viga-degrau, requisitada pelo programa. Fonte: Autor	35
Figura 15 - Variáveis calculadas pelo programa. Fonte: Autor.....	35
Figura 16 – Variáveis fundamentais para levantamento das ações para cálculo da viga de sustentação e da viga-degrau. Fonte: Autor.	36
Figura 17 - Resultado das combinações de ações na viga de sustentação e da viga-degrau. Fonte: Autor.....	36
Figura 18 - Área do programa destinada a cálculo dos esforços pelo método de Lagendonk. Fonte: Autor.....	37
Figura 19 - Gráficos de M_x e M_y , obtidos pela planilha eletrônica. Fonte: Autor.	38
Figura 20 - Gráficos de M_l e T , obtidos pela planilha eletrônica. Fonte: Autor.	39
Figura 21 – Variáveis referentes ao cobrimento, f_{ck} e f_{yk} utilizados no elemento estrutural. Fonte: Autor.....	40
Figura 22 - Verificação da biela de concreto comprimida. Fonte: Autor.....	40
Figura 23 - Escolha da limitação do h_e , e verificação final das bielas de concreto comprimidas. Fonte: Autor.....	41
Figura 24 - Dimensionamento da viga de apoio à flexão. Fonte: Autor.	42

Figura 25 - Comparação da área de aço calculada com as respectivas taxas de armadura mínima. Fonte: Autor.....	43
Figura 26 – Dimensionamento à torção. Parte 1. Fonte: Autor.....	43
Figura 27 – Dimensionamento à torção. Parte 2. Fonte: Autor.....	44
Figura 28 - Escolha das barras longitudinais e transversais. Fonte: Autor.....	45
Figura 29 – Código para detalhamento da seção transversal da escada, parte 1. Fonte: Autor.	46
Figura 30 - Código para detalhamento da seção transversal da escada, parte 2. Fonte: Autor.	47
Figura 31 - Bloco de notas para criação do arquivo SCRIPT. Fonte: Autor.....	48
Figura 32 - Opção "Salvar Como". Fonte: Autor.	48
Figura 33 - Comando SCRIPT, no <i>Autodesk Autocad</i> . Fonte: Autor.....	49
Figura 34 - Seção da Viga Desenhada. Fonte: Autor.	49
Figura 35 - Código para detalhamento da vista superior da escada, parte 1. Fonte: Autor.....	50
Figura 36 - Código para detalhamento da vista superior da escada, parte 2. Fonte: Autor.....	51
Figura 37 - Representação da Escada Calculada em Planta Baixa.....	51
Figura 38 – Dimensões da escada em planta baixa. Fonte: Noal, 2014	53
Figura 39 - Dimensões da escada em corte longitudinal no eixo da viga. Fonte: Noal,2014. .	54
Figura 40 - Altura da viga de sustentação e dos degraus em corte longitudinal da escada comparativa. Fonte: Noal, 2014	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Carga variável em função do uso da edificação. Fonte: ABNT NBR 6120:2019..	20
Tabela 2 – Coeficientes para escadas com $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ de volta. Fonte: Rocha (1978).....	22
Tabela 3 – Coeficientes para escadas com $\frac{3}{4}$ de volta. Fonte: Rocha (1978).	22
Tabela 4 – Coeficientes para escadas com 1 volta completa. Fonte: Rocha (1978).....	23
Tabela 5 – Tabela comparativo entre as áreas de aço e esforços encontrados. Fonte: Autor...	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras minúsculas

b – largura da base da viga (m)

d – altura útil da seção transversal (cm)

f_{cd} – resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

f_{yd} – resistência de cálculo ao escoamento do aço (MPa)

f_{yk} – resistência característica ao escoamento do aço (MPa)

g_d – comprimento dos degraus na linha de rasto (m ou cm)

$g_{d.ext}$ – comprimento do degrau na borda externa (cm)

$g_{d.int}$ – comprimento do degrau na borda interna (cm)

$g_{d.v}$ – comprimento do degrau no eixo da viga de sustentação (cm)

h_d – altura dos degraus (m)

h'_d – altura da peça pré-moldada do degrau (m)

h_e – espessura da parede da seção vazada equivalente à seção cheia (cm)

h_p – altura do parapeito (m)

h_v – altura da viga (m)

n' – número de degraus

p_a – peso próprio dos apoios dos degraus (kN/m)

p_d – peso próprio dos degraus (kN/m²)

p_p – peso próprio do parapeito (kN/m)

p_{rev} – peso próprio do revestimento (kN/m)

p_v – peso próprio da viga de sustentação (kN/m)

q_d – carga acidental distribuída (kN/m)

q_p – carga acidental dos parapeitos (kN/m)

t – espessura da parede do parapeito (m)

u_x – momento fletor de cálculo reduzido na direção x (adimensional)

u_y – momento fletor de cálculo reduzido na direção y (adimensional)

w – quantia mecânica total

v – esforço normal de cálculo reduzido (adimensional);

Letras maiúsculas

A_c – área da seção cheia de concreto (m²)

A_e – área limitada pela linha média da parede da seção vazada equivalente (cm²)

$A_{sl,M}$ – área total de aço da armadura longitudinal de flexão (cm²)

$A_{sl,M,min}$ – área mínima de aço de armadura longitudinal de flexão (cm²)

$A_{sl,T}$ – área total de aço da armadura longitudinal de torção (cm²)

$A_{sl,T,min}$ – área mínima de aço da armadura longitudinal de torção (cm²)

$A_{sl,tot}$ – área total de aço da armadura longitudinal (cm²)

$A_{sw,T}$ – área total de aço da armadura transversal de torção (cm²/m)

$A_{sw,V}$ – área total de aço da armadura transversal de cisalhamento (cm²/m)

$A_{sw,min}$ – área mínima de aço da armadura transversal (cm²/m)

$A_{sw,tot}$ – área total de aço da armadura transversal

C_1 – distância entre o centro da armadura longitudinal de flexão do canto e a face lateral da peça (cm)

E_{ci} – módulo de deformação longitudinal tangente inicial (MPa)

E_{cs} – módulo de deformação longitudinal secante (MPa)

F_d – valor de cálculo das ações para a combinação última (kN/m)

$F_{G,k}$ – valor característico das ações permanentes (kN/m)

$F_{Q1,k}$ – valor característico da ação variável considerada principal para a combinação (kN/m)

$F_{Q,k}$ – valor característico das demais ações variáveis (kN/m)

G_c – módulo de elasticidade transversal (MPa)

H – altura da escada (m)

I_x – momento de inércia em torno do eixo x (m⁴)

I_y – momento de inércia em torno do eixo y (m⁴)

J – momento polar de inércia (m⁴)

L – comprimento da viga de sustentação em planta baixa (m)

L_{EXT} – comprimento da borda externa em planta baixa (m)

L_{INT} – comprimento da borda interna em planta baixa (m)

L_{LR} – comprimento da linha de rasto em planta baixa (m)

M_x – momento fletor na direção x (kNm)

M_{xd} – momento fletor de cálculo na direção x (kN.m)

M_l – momento fletor lateral (kNm)
 M_y – momento na direção y (kNm)
 M_{yd} – momento fletor de cálculo na direção y (kN.m)
 N – esforço normal (kN)
 N_d – esforço normal de cálculo (kN)
 R – raio da viga helicoidal, no eixo de simetria, em projeção no plano horizontal (m)
 R_{EXT} – raio da escada na borda externa (m)
 R_{INT} – raio da escada na borda interna (m)
 R_{LR} – raio da escada na linha de rasto (m)
 S_d – solicitações majoradas para cálculo (kNm)
 T – momento torçor (kNm)
 T_d – esforço solicitante de cálculo à torção (kN.cm)
 U – capacidade mecânica total da armadura longitudinal (kN)
 V – esforço cortante máximo (kN)
 V_d – esforço solicitante máximo de cisalhamento (kN)

Letras gregas

α – inclinação da escada (rad)
 α_v – coeficiente adimensional para cálculo da resistência a torção
 β – semi-ângulo de abertura (rad)
 γ_a – peso específico da alvenaria (kN/m³)
 γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto, sendo 1,4 para condições normais
 γ_d – coeficiente de ponderação das ações permanentes
 γ_q – coeficiente de ponderação das ações variáveis
 γ_s – coeficiente de ponderação da resistência do aço, sendo 1,15 para condições normais
 θ – ângulo que define uma seção qualquer da viga de sustentação (rad)
 μ_c – perímetro da seção cheia de concreto (cm)
 μ_e – perímetro da linha média da parede da seção vazada equivalente (cm)
 ν – coeficiente de Poisson (aproximadamente 0,2)
 ρ – relação entre altura e base da viga, para entrada nas Tabelas de Langendonck
 ρ_{min} – taxa para o cálculo da armadura mínima longitudinal de flexão (%)
 ρ_s – taxa de armadura (%)

$\rho_{w,min}$ – taxa para o cálculo da armadura mínima longitudinal de torção e transversal (%)

τ_c – fator de redução, sendo zero desprezando-se a resistência à tração do concreto

τ_d – tensão de cálculo tangencial de cisalhamento (MPa)

τ_{td} – tensão tangencial de torção (kN/cm² ou MPa)

τ_{tu} – tensão tangencial limite de torção (MPa)

τ_{wd} – tensão tangencial de cisalhamento (kN/cm² ou MPa)

τ_{wu} – tensão tangencial limite de cisalhamento (MPa)

\emptyset – diâmetro da barra de aço (mm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	ELEMENTOS ARQUITETÔNICOS DE UMA ESCADA HELICOIDAL	15
2.2	DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES EM UMA ESCADA HELICOIDAL	15
2.2.1	Peso próprio.....	15
2.2.2	Revestimentos.....	15
2.2.3	Guarda-corpo e parapeitos.....	15
2.2.4	Cargas variáveis.....	15
2.3	DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS EM UMA ESCADA HELICOIDAL.....	15
2.4	DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE UMA ESCADA HELICOIDAL.....	23
2.4.1	Generalidades.....	23
2.4.2	Geometria da seção resistente.....	23
2.4.3	Torção de compatibilidade.....	24
2.4.4	Torção de equilíbrio.....	24
2.4.5	Armadura mínima.....	27
2.4.6	Verificações referentes à interação de torção, cisalhamento e flexão.....	28
2.4.7	Torção e força cortante.....	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	PASTAS DE TRABALHO DA PLANILHA.....	31
3.1.1	Pastas de trabalho: capa.....	31
3.1.2	Pastas de trabalho: Dados de entrada da arquitetura e ações.....	32
3.1.3	Pastas de trabalho: cálculo dos esforços.....	36
3.1.4	Pastas de trabalho: cálculo estrutural.....	39
3.1.5	Pastas de trabalho: detalhamento 1.....	45
3.1.6	Pastas de trabalho: detalhamento 2.....	49
4	RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA	52
5	CONCLUSÕES	56
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objetos de estudo da Engenharia Civil são as estruturas executadas em concreto armado. O concreto armado é usado para dar forma a uma série de subestruturas que compõe uma edificação, tais como blocos de fundação, pilares, vigas, lajes, cortinas, e, de interesse especial para esse trabalho, as escadas. (Quevedo, 2011)

Muitas vezes, o terreno em que uma edificação se encontra tem dimensões reduzidas, e com o avanço das técnicas construtivas, evidenciou-se a possibilidade de ocupar verticalmente os espaços habitáveis. Para transitar entre esses ambientes, geralmente utiliza-se escadas, dentre os diversos tipos.

Estas peças estruturais, podem ter diversos formatos e tipologias (plissada, apoiada em viga, apoiada no patamar, em leque, circular etc.), e são aplicadas dependendo da necessidade e modelagem da determinada edificação, conforme pode ser visto na Figura 1.

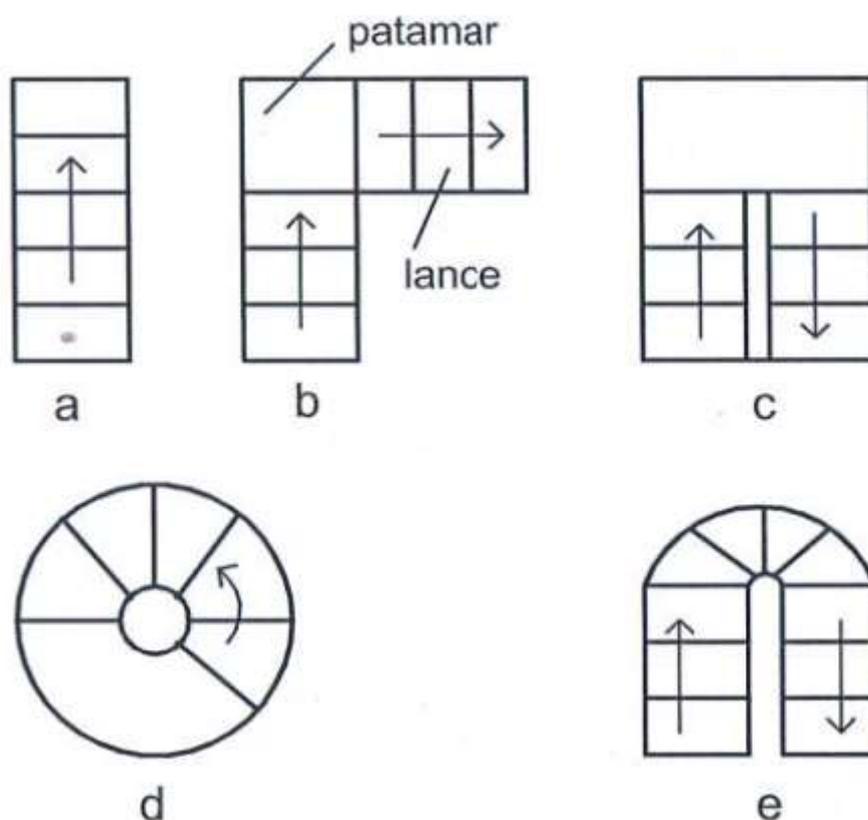


Figura 1 – Tipos de Escada. Fonte: Araújo (2010).

Normalmente, o desenvolvimento do elemento é realizado em lances retos, com, ou sem, patamares auxiliares e apoiados em vigas e paredes. Estas são recomendadas quando há uma certa abundância na disponibilidade de espaço físico.

Como vantagem, destaca-se que o uso de uma seção girante, ao invés de lances retos com patamares horizontais permite, além de obter uma disposição de construção mais delicada, ganhar um pouco de espaço no desenvolvimento da escada. (GUERRIN, 2002)

Nesse estudo, será desenvolvido (com o auxílio de *softwares* comerciais) uma planilha para cálculo e detalhamento da escada circular, presente em diversas edificações tendo seu formato muito valorizado pelos arquitetos e engenheiros.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional que possibilite a verificação, dimensionamento e detalhamento de escadas circulares em concreto armado apoiadas em viga central.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, são elencados os seguintes objetivos específicos:

- (i) Realizar a organização da planilha no intuito que fique bem claro quais são as etapas a serem percorridas, juntamente com uma legenda intuitiva ao usuário;
- (ii) Automatizar o cálculo dos esforços seguindo o método das Tabelas do Telêmaco Van Langendonck. (Rocha, 1978), conforme os dados da escada inseridos pelo usuário;
- (iii) Automatizar o dimensionamento das áreas de armadura da escada segundo a NBR ABNT 6118:2014;
- (iv) Implementar rotinas em script, para automatização do detalhamento da escada no *Autodesk AutoCAD*;
- (v) Comparar os resultados do dimensionamento (levantamento dos esforços, áreas de aço longitudinais e transversais) da planilha computacional com os resolvidos analiticamente, de forma manual, na literatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

A motivação deste trabalho originou-se durante a execução dos trabalhos avaliativos da disciplina de Estruturas de Concreto, onde encontrou-se dificuldade em dimensionar uma escada de forma automatizada. Dimensionar uma escada convencional após ter realizado essa tarefa repetitivamente na disciplina de Concreto Armado “B”, então originou-se a ideia de trabalhar em algo relacionado ao tema no trabalho de conclusão de curso.

Na pesquisa por bibliografia e pesquisadores acerca do assunto, deparou-se com uma escassez de trabalhos que visam automatizar o processo de dimensionamento e detalhamento de escada helicoidal.

Programas computacionais CAD e CAE, são extremamente comuns atualmente na rotina de um projetista, pois eles poupam tempo, aumentam a acurácia e diminuem a chance de erro. Considerando a formação abrangente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, houve a possibilidade de vislumbrar uma solução para essa necessidade existente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Anteriormente à execução do processo de automatização do dimensionamento e detalhamento da escada, evidenciou-se a necessidade de revisar as variáveis e componentes de uma escada. Considerando a extensão do assunto, para facilitar a leitura, neste trabalho, só serão introduzidos conceitos e terminologias pertinentes ao caso da escada helicoidal.

2.1 ELEMENTOS ARQUITETÔNICOS DE UMA ESCADA HELICOIDAL

Uma escada é composta por certa quantidade de degraus que podem apoiar-se sobre uma viga curva em forma helicoidal (chamada de viga de sustentação da escada helicoidal), como é o caso da estrutura analisada neste trabalho. As dimensões que definem um degrau são seu comprimento e altura, conforme se observa no corte longitudinal da Figura 2. (GUERRIN, 2002)

A localização que se encontra este elemento em questão é denominada caixa de escada, sendo esta, o fator que limita o volume da escada. O espaço interno, que se torna um vazio é chamado de vão da escada, sendo este um elemento opcional. A gola é a margem interna, que limita a escada do lado do vão. (GUERRIN, 2002)

A trajetória curva descrita por uma pessoa subindo a escada a uma distância de 0,5 metros da gola denomina-se linha de rastro. A altura livre existente acima da aresta de um degrau é o desvão. Por fim, um lance, reto ou curvo, é definida como uma sequência ininterrupta de degraus. (GUERRIN, 2002)

A Figura 2 representa a localização de cada elemento arquitetônico supracitado.

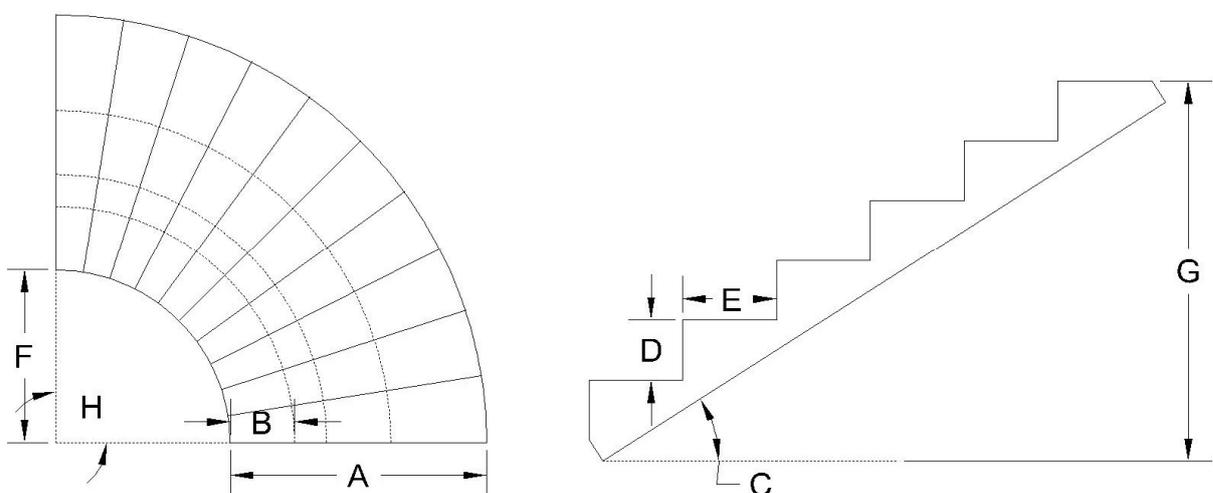


Figura 2 – Representação de cada elemento que compõe uma escada helicoidal. Fonte: Autor.

Onde:

A - Largura da escada;

B - Offset da linha de rastro;

C - Inclinação da escada;

D - Altura do degrau;

E - Comprimento do degrau (na LR);

F - Vão da escada;

G - Altura da escada;

H - Ângulo da escada.

As dimensões dos pisos e espelhos devem ser constantes em toda a escada ou degraus isolados. Para o dimensionamento, devem ser atendidas as seguintes condições (ABNT NBR 9050:2020):

$$0,63m \leq p + 2e \leq 0,65m \quad (1)$$

$$0,28m \leq p \leq 0,32m \quad (2)$$

$$0,16m \leq e \leq 0,18m \quad (3)$$

Sendo:

p a dimensão do piso de cada lance;

e a altura de cada desnível de cada lance.

Além da exigência supracitada, a ABNT NBR 9050:2020 requer alguns outros parâmetros para as escadas com lances curvos, mas considerando que estes elementos devem ser considerados ainda na concepção arquitetônica da escada helicoidal, etapa que não é abrangido pelo escopo de projeto, acabam não se tornarem interessantes para o desenvolvimento da linha de pesquisa do trabalho.

2.2. DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES EM UMA ESCADA HELICOIDAL

Atualmente, a ABNT NBR 8681:2003 determina que para a maioria dos casos, as ações se dividem em dois grandes grupos: as ações variáveis e permanentes. O primeiro se resume em ações que mudam de intensidade ao longo do tempo: por exemplo, o tráfego de pessoas, já

o outro se resume em cargas que são altamente previsíveis e que se alteram minimamente ao longo do tempo.

A ABNT NBR 6120:2019 relaciona as cargas previstas na norma ABNT NBR 8681:2003 normativa anterior para cada uso da edificação.

2.2.1 Peso próprio

Assim como a maioria das estruturas usuais de concreto, uma das ações mais significantes nesse tipo de estrutura é seu peso próprio.

Para realizar este cálculo, soma-se o peso do degrau pré-moldado e da viga de sustentação da escada. O peso específico do concreto utilizado é de 25 kN/m^3 .

2.2.2 Revestimentos

Este item depende diretamente do projeto arquitetônico, pois há uma infinidade de revestimentos possíveis em uma escada. (pintura, forro, placa de gesso, placa cimentícia etc.)

2.2.3 Guarda-corpo e parapeitos

Para dar mais segurança aos usuários, na beirada dos degraus das escadas é comum existir uma barreira que previne quedas acidentais. O parapeito ou guarda-corpo pode ser constituído de diversos materiais diferentes como madeira, alvenaria, concreto, metal etc., esse carregando também dependerá do projeto arquitetônico.

2.2.4 Cargas variáveis

O carregamento variável na escada é definido pela Tabela 10 da ABNT NBR 6120:2019 variando de $2,5$ a 5 kN/m^2 a depender do uso da escada e da edificação (ver Tabela 1).

Local	Carga uniformemente distribuída kN/m ²	Carga concentrada kN
Escadas e passarelas ^t	Hospitais	3
	Residenciais, hotéis (dentro de unidades autônomas)	2,5
	Residenciais, hotéis (uso comum)	3
	Edifícios comerciais, clubes, escritórios, bibliotecas	3
	Centros de exposição	5
	Centros de convenções e locais de reunião de pessoas, teatros, igrejas	5
	Escolas	3
	Cinemas, centros comerciais, <i>shopping centers</i>	4
	Servindo arquibancadas	5
	Com acesso público	3
	Sem acesso público	2,5

Tabela 1 – Carga variável em função do uso da edificação. Fonte: ABNT NBR 6120:2019

É importante observar a nota t da Tabela 10 da ABNT NBR 6120:2019, onde é enunciado a verificação necessária da aplicação de um carregamento de 2,5 kN na posição mais desfavorável do degrau (ao aplicar este caso, desconsidera-se o carregamento distribuído da carga variável).

2.3 DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS EM UMA ESCADA HELICOIDAL

Quando se trata de escadas helicoidais, considerando que o funcionamento das peças neste formato não obedece às leis para as peças prismáticas, o problema se torna mais complexo, e portanto, não devem ser aplicadas as equações comuns da Resistência dos Materiais. (Rocha, 1978)

A planilha computacional utilizada possui uma série de limitações nas ferramentas matemáticas utilizáveis (basicamente, pode-se utilizar somente operações elementares da matemática). Considerando este fator, será utilizado o método das Tabelas apresentadas pelo Telêmaco Van Langendonck.

Com esse método escolhido é possível discretizar os esforços para as escadas helicoidais com viga lateral e com viga central, conforme a Figura 3.

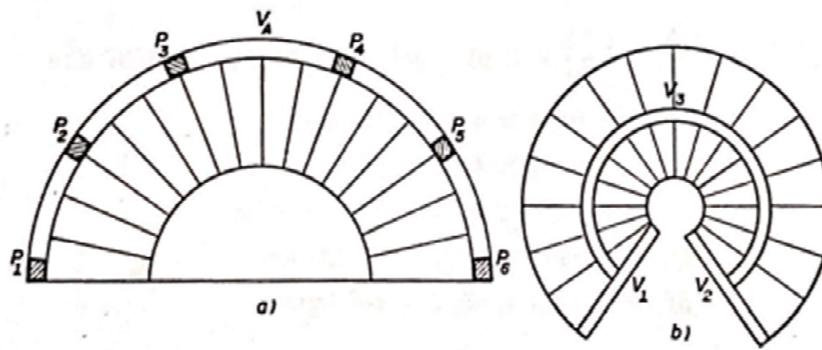


Figura 3 - Arranjos estruturais calculáveis pelos coeficientes do Telémaco Van Langendonck

Fonte: (Rocha, 1978)

Para a determinação destes esforços, são discretizados pontos ao longo da escada onde M_x e M_y podem ser obtidos através das seguintes equações.

$$M_x = C1.Fd.R^2 \quad (4)$$

$$M_y = C2.Fd.R^2 \quad (5)$$

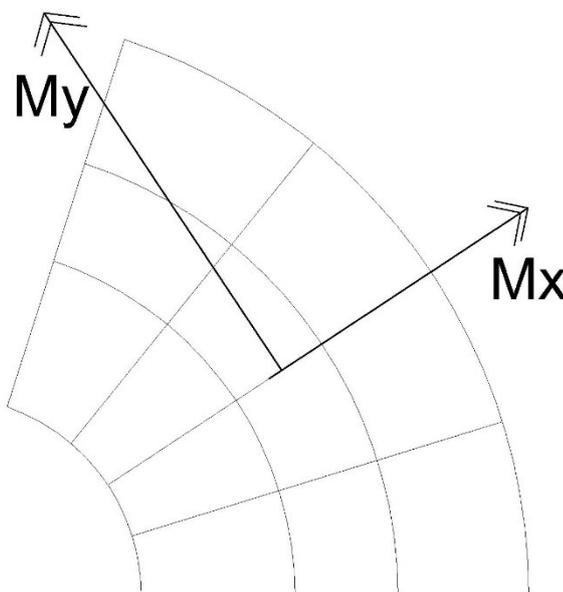


Figura 4 - Direções M_x e M_y Fonte: Autor.

Onde:

M_x é o momento fletor na direção x (direção longitudinal da escada) (kNm)

M_y é o momento na direção y (kNm)

$C1$ e $C2$ são coeficientes Tabelados adimensionais;

Fd é o valor de cálculo das ações para a combinação última (kN/m);

R é o raio da viga helicoidal, no eixo de simetria, em projeção no plano horizontal (m).

Os coeficientes de cada ponto com os esforços calculados, podem ser obtidos através das Tabelas 2 a 4:

d/b	Coef.	Pontos			d/b	Coef.	Pontos				
		0	1	2			0	1	2	3	4
1,0	C1	0,091	0,008	-0,228	1,0	C1	0,273	0,176	-0,100	-0,513	-1,000
	C2	0,000	0,025	-0,013		C2	0,000	0,094	0,115	-0,002	-0,298
1,5	C1	0,088	0,005	-0,231	1,5	C1	0,273	0,176	-0,100	-0,513	-1,000
	C2	0,000	0,022	-0,016		C2	0,000	0,094	0,115	-0,002	-0,298
2,0	C1	0,084	0,002	-0,233	2,0	C1	0,273	0,176	-0,100	-0,513	-1,000
	C2	0,000	0,022	-0,018		C2	0,000	0,094	0,115	-0,002	-0,298
2,5	C1	0,081	-0,001	0,238	2,5	C1	0,273	0,176	-0,100	-0,513	-1,000
	C2	0,000	0,021	-0,021		C2	0,000	0,094	0,115	-0,002	-0,298
3,0	C1	0,078	-0,004	0,238	3,0	C1	0,273	0,176	-0,100	-0,513	-1,000
	C2	0,000	0,020	-0,023		C2	0,000	0,094	0,115	-0,002	-0,298

Tabela 2 – Coeficientes para escadas com $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ de volta. Fonte: Rocha (1978).

d/b	Coef.	Pontos						
		0	1	2	3	4	5	6
1,0	C1	0,038	0,271	-0,027	-0,474	-1,000	-1,526	-1,973
	C2	0,000	0,133	0,187	0,093	-0,195	-0,692	-1,383
1,5	C1	0,460	0,349	0,032	-0,441	-1,000	-1,559	-2,032
	C2	0,000	0,166	0,247	0,170	-0,111	-0,615	-1,324
2,0	C1	0,518	0,403	0,073	-0,419	-1,000	-1,581	-2,073
	C2	0,000	0,188	0,288	0,225	-0,053	-0,561	-1,283
2,5	C1	0,557	0,438	0,100	-0,404	-1,000	-1,596	-2,101
	C2	0,000	0,203	0,315	0,260	-0,014	-0,525	-1,255
3,0	C1	0,582	0,462	0,119	-0,394	-1,000	-1,606	-2,119
	C2	0,000	0,213	0,334	0,284	0,238	-0,501	-1,237

Tabela 3 – Coeficientes para escadas com $\frac{3}{4}$ de volta. Fonte: Rocha (1978).

d/b	Coef.	Pontos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
1,0	C1	-2,165	-2,076	-1,823	-1,446	-1,000	-0,554	-0,176	0,076	0,164
	C2	0,000	-0,838	-1,609	-2,254	-2,735	-3,039	-3,180	-3,195	-3,142
1,5	C1	-2,384	-2,279	-1,969	-1,530	-1,000	-0,470	-0,021	0,279	0,384
	C2	0,000	-0,922	-1,707	-2,457	-2,955	-3,242	-3,350	3,279	-3,142
2,0	C1	-2,584	-2,430	-2,095	-1,592	-1,000	-0,408	0,095	0,430	0,548
	C2	0,000	-0,985	1,770	-2,609	-3,119	-3,394	-3,450	-3,341	-3,142
2,5	C1	-2,663	-2,536	-2,176	-1,633	-1,000	-0,364	-0,176	0,536	0,663
	C2	0,000	-1,029	-1,961	-2,714	-3,233	-3,500	-3,532	-3,385	-3,142
3,0	C1	-2,742	-2,609	-2,231	-1,666	-1,000	-0,333	0,231	0,609	0,742
	C2	0,000	-1,059	-2,017	-2,787	-3,312	-3,572	-3,587	-3,416	-3,142

Tabela 4 – Coeficientes para escadas com 1 volta completa. Fonte: Rocha (1978).

A partir destes esforços conhecidos, é possível determinar os momentos torçores e fletores correlacionando-os com o M_y :

$$T = M_y \cos(\alpha) \quad (6)$$

$$M_t = M_y \sen(\alpha) \quad (7)$$

Onde:

T é o momento torçor (kNm)

M_t é o momento fletor (kNm)

α é a inclinação da escada (rad)

2.4 DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE UMA ESCADA HELICOIDAL

2.4.1 Generalidades

Considerando que a viga de apoio da escada helicoidal é submetida aos esforços anteriormente enunciados (fletor, torçor e cortante), é necessário definir o modelo resistente para o dimensionamento de sua armadura

O modelo é enunciado na NBR ABNT 6118:2014, uma treliça espacial, definida a partir de um elemento estrutural de seção vazada equivalente ao elemento estrutural a ser dimensionado.

As diagonais de compressão dessa treliça, formada por elementos de concreto, têm inclinação que pode ser arbitrada pelo projeto no intervalo de $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$.

2.4.2 Geometria da seção resistente

De acordo com o item 17.5.1.4.1 da NBR ABNT 6118:2014, no caso de seções poligonais convexas cheias, a seção vazada equivalente se define a partir da seção cheia com espessura da parede equivalente h_e dada por:

$$h_e \leq \frac{A_c}{\mu_c} \quad (8)$$

$$h_e \geq 2 \cdot c_1 \quad (9)$$

Onde:

h_e é a espessura da parede da seção vazada equivalente à seção cheia (cm)

A_c é a área da seção cheia de concreto (m²)

μ_c é o perímetro da seção cheia de concreto (cm)

c_1 é a distância entre o centro da armadura longitudinal de flexão do canto e a face lateral da peça (cm)

A norma ainda estabelece que:

Caso:

$$\frac{A_c}{\mu_c} < 2c_1 \quad (10)$$

Então, adota-se:

$$h_e = \frac{A_c}{\mu_c} \leq b_w - 2c_1 \quad (11)$$

2.4.3 Torção de compatibilidade

No caso de torção de compatibilidade, conforme o item 15.5.1.2 da NBR 6118:2014, caso o elemento estrutural em questão tenha a capacidade de adaptação plástica e que todos os esforços calculados são independentes dela, é possível desprezá-la. Para tal, deve-se obedecer a desigualdade:

$$V_{sd} \leq 0,7V_{Rd2} \quad (12)$$

Onde:

V_{sd} é a força cortante atuante no elemento;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto de acordo com os modelos indicados nos itens 17.4.2.2 e 17.4.2.3 da NBR 6118:2014.

2.4.4 Torção de equilíbrio

A armadura prevista pelo item 17.5.1.2 da NBR 6118:2014 é de estribos verticais periféricos normais ao eixo do elemento estrutural e barras longitudinais distribuídas ao longo do perímetro da seção resistente.

Admite-se, de acordo com o item 17.5.1.3 da NBR 6118:2014, satisfeita a resistência de um elemento estrutural à torção pura, em uma dada seção, quando se verificarem simultaneamente as seguintes condições:

$$T_{sd} \leq T_{Rd,2} \quad (13)$$

$$T_{sd} \leq T_{Rd,3} \quad (14)$$

$$T_{sd} \leq T_{Rd,4} \quad (15)$$

Onde:

$T_{Rd,2}$ representa o limite dado pela resistência das diagonais comprimidas de concreto;

$T_{Rd,3}$ representa o limite definido pela parcela resistida pelos estribos normais ao eixo do elemento estrutural;

$T_{Rd,4}$ representa o limite definido pela parcela resistida pelas barras longitudinais, paralelas ao eixo do elemento estrutural.

Conforme o item 17.5.1.5 da NBR 6118:2014, o máximo momento de torção que uma seção pode resistir, sem que ocorra o esmagamento das diagonais comprimidas é dado por:

$$T_{Rd2} = 0,5 \alpha_{v2} f_{cd} A_e h_e \text{sen} 2\theta \quad (16)$$

$$\alpha_{v2} = 1 - f_{ck}/250 \quad (17)$$

Onde:

α_{v2} é um coeficiente, relacionado diretamente ao f_{ck} , expresso em (MPa);

θ é o ângulo de inclinação das diagonais de concreto, arbitrado no intervalo $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$;

A_e é a área limitada pela linha média da parede da seção vazada, real ou equivalente, incluindo a parte vazada;

h_e é a espessura equivalente da parede da seção vazada, real ou equivalente, no ponto considerado.

De acordo com o item 17.5.1.6 da NBR 6118:2014, a resistência decorrente dos estribos normais ao eixo do elemento estrutural é dada pela expressão:

$$T_{Rd3} = \left(\frac{A_{s,90}}{s}\right) f_{ywd} 2A_e \cot\theta \quad (18)$$

Onde:

f_{ywd} é o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço da armadura passiva, limitada a 435 Mpa.

A área da armadura transversal deve ser calculada por:

$$\frac{A_{s,90}}{s} = \frac{T_{sd}}{2A_e f_{ywd}} \operatorname{tg}\theta \quad (19)$$

De acordo com o item 17.5.1.6 da NBR 6118:2014, a resistência decorrente das armaduras longitudinais deve ser obtida pela expressão:

$$T_{Rd4} = \left(\frac{A_{sl}}{\mu_e}\right) 2A_e f_{ywd} \operatorname{tg}\theta \quad (20)$$

Onde:

A_{sl} é a soma das seções das barras longitudinais;

μ_e é o perímetro da área A_e .

A área da armadura longitudinal deve ser calculada por:

$$\frac{A_{sl}}{\mu_e} = \frac{T_{sd}}{2A_e f_{ywd} \operatorname{tg}\theta} \quad (21)$$

2.4.5 Armadura mínima

Conforme o item 17.5.1.2 da NBR 6118:2014, ainda, é necessário calcular a armadura mínima:

$$0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}} \leq \begin{cases} p_{sl} = \frac{A_{sl}}{h_e \mu_e} \\ p_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s} \end{cases} \quad (22)$$

Com $f_{ywk} \leq 500 \text{ MPa}$.

Realizando as operações matemáticas básicas, isolando os termos relativos as áreas mínimas $A_{sl,min}$ e $A_{s,90min}$ e fixando o perímetro μ_e e o espaçamento s iguais a 100cm, as armaduras devem ser calculadas por:

$$A_{sl,min} = \frac{20f_{ct,m}}{f_{ywk}} h_e \quad (23)$$

$$A_{s,90min} = \frac{20f_{ct,m}}{f_{ywk}} b_w \quad (24)$$

Sendo:

$A_{sl,min}$ e área das armaduras longitudinais mínimas em cm^2/m

$A_{s,90min}$ a área dos estribos mínima em cm^2/m ;

b_w e h_e em cm ;

f_{ywk} e $f_{ct,m}$ em kN/cm^2 ;

$f_{ct,m} = 0,3\sqrt{f_{ck}32}$, sendo f_{ck} em Mpa .

2.4.6 Verificações referentes à interação de torção, cisalhamento e flexão

A NBR 6118:2014 estabelece no item 17.7.1 que nos elementos estruturais submetidos à torção e à flexão simples ou composta, as verificações podem ser efetuadas separadamente para a torção e para as solicitações normais, devendo-se atender ainda:

- Armadura longitudinal: “Na zona tracionada pela flexão, a armadura de torção deve ser acrescentada à armadura necessária para solicitações normais, considerando-se em cada seção os esforços que agem concomitantemente.”, item 17.7.1.2.

- Armadura longitudinal no banzo comprimido pela flexão: “No banzo comprimido pela flexão, a armadura longitudinal de torção pode ser reduzida em função dos esforços de compressão que atuam na espessura efetiva h_e no trecho de comprimento Δu correspondente à barra ou feixe de barras consideradas.”, item 17.7.1.3.

- Resistência do banzo comprimido: “Nas seções em que a torção atua simultaneamente com solicitações normais intensas, que reduzem excessivamente a profundidade da linha neutra, particularmente em vigas de seção celular, o valor de cálculo da tensão principal de compressão

não pode superar os valores estabelecidos na Seção 22. Essa tensão principal deve ser calculada como em um estado plano de tensões, a partir da tensão normal média que age no banzo comprimido de flexão e da tensão tangencial de torção calculada por”, item 17.7.1.4:

$$\tau_{Td} = \frac{T_d}{2A_e h_e} \quad (25)$$

2.4.7 Torção e força cortante

A NBR 6118:2014 estabelece no item 17.7.2 que na combinação de torção com força cortante, o projeto deve prever ângulos de inclinação das bielas de concreto θ coincidentes para os dois esforços. Quando for utilizado o modelo I (ver item 17.4.2.2) para a força cortante, que subentende $\theta = 45^\circ$, esse deve ser o valor considerado também para a torção.

A resistência à compressão diagonal do concreto, estabelecido no item 17.7.2.2 da NBR 6118:2014, deve ser satisfeita atendendo à expressão:

$$\frac{V_{Sd}}{V_{Rd2}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd2}} \leq 1 \quad (26)$$

Onde:

V_{Sd} é a força cortante de cálculo e;

T_{Sd} é o momento de torção de cálculo.

Conforme o item 17.7.2.3 da NBR 6118:2014 a armadura transversal pode ser calculada pela soma das armaduras calculadas separadamente para V_{Sd} e T_{Sd} .

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utiliza os *softwares* de planilha eletrônica e AutoCAD (versão estudantil) para o desenvolvimento de uma planilha eletrônica capaz de auxiliar no dimensionamento e detalhamento de escadas helicoidais de concreto armado. Inicialmente, deseja-se conceber uma rotina robusta, em que o usuário consiga verificar o atendimento dos diferentes requisitos impostos pelas normativas no dimensionamento de uma escada helicoidal. A Figura 5 apresenta os passos definidos numa linguagem coloquial para fácil entendimento da sequência pretendida pelo autor.

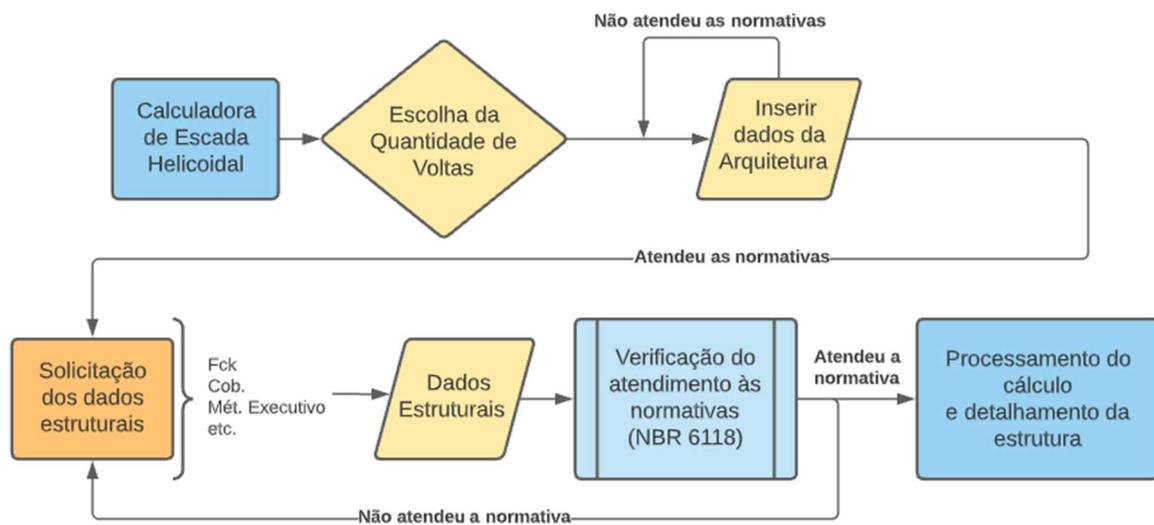


Figura 5 - Fluxograma do algoritmo do trabalho. Fonte: Autor

Considerando que usualmente, os arquitetos e engenheiros utilizam formatos padronizados para as escadas, inicialmente o ângulo de caminhamento será restrito a 4 casos: 90°, 180°, 270° e 360°. A Figura 6 exemplifica graficamente os modelos adotados.

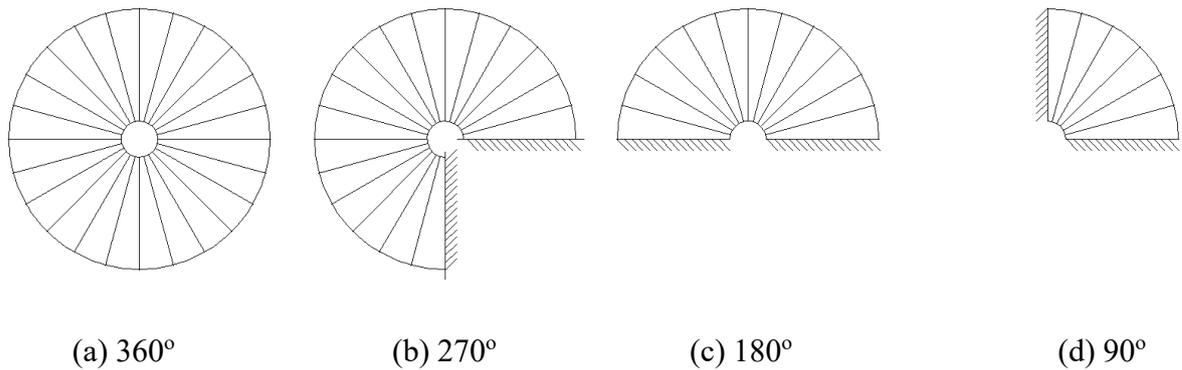


Figura 6 – Tipologia das escadas adotadas na planilha computacional. Fonte: Autor

Considerando que a aplicação de macros e programações mais avançadas restringiriam o público-alvo usuário da planilha, evitou-se a aplicação destes no desenvolvimento do programa.

As equações utilizadas, disponíveis ao usuário, estão enunciadas e seguidas segundo o Capítulo 2 deste trabalho.

3.1 PASTAS DE TRABALHO DA PLANILHA

Uma pasta de trabalho é um arquivo que contém uma ou mais planilhas para ajudá-lo a organizar seus dados. É possível criar pasta de trabalho a partir de uma pasta de trabalho em branco ou de um modelo. (Microsoft, [s.d.])

Para facilitar a visualização e a separação de cada conteúdo de entrada e processado da planilha, determinou-se certas áreas, divididas da seguinte forma:

3.1.1 Pastas de trabalho: capa

Conforme sugere o ABNT NBR 14724:2011, faz-se necessário num relatório técnico a capa identificando o autor, sítio acadêmico, assunto e data, para isso, realizou-se uma capa simples, mas certamente funcional para satisfazer estas exigências. A Figura 7 demonstra o resultado obtido.

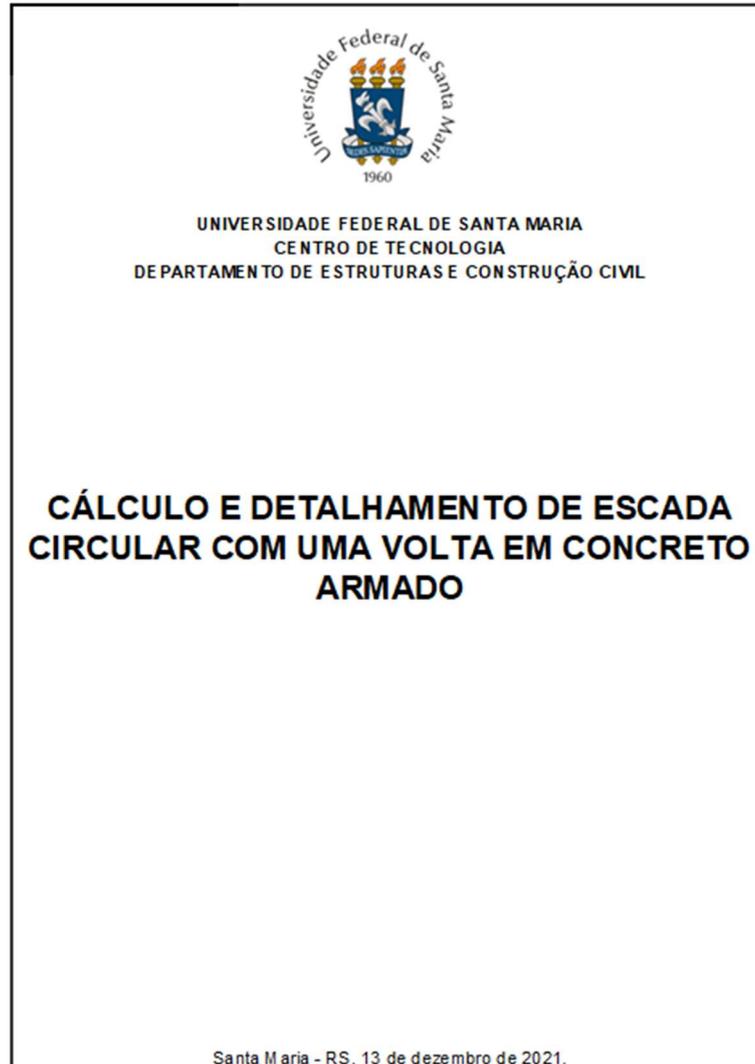


Figura 7 - Exemplo de capa gerada pela planilha do trabalho. Fonte: Autor

3.1.2 Pastas de trabalho: Dados de entrada da arquitetura e ações.

Nesta pasta, o usuário deve ler as informações do projeto arquitetônico da escada em análise e passar para a planilha. É de extrema importância que haja um cuidado minucioso para que toda a informação seja transferida e/ou adaptada de forma assertiva.

Além dos dados da arquitetura, deve ser informado os dados referentes a estrutura objetivo do elemento estrutural. Estas informações dependem muito do método construtivo local, assim como os materiais disponíveis na região.

Ao fim da pasta, é necessário se atentar ao valor da combinação de ações resultante, o projetista deverá analisar esse dado e conferir se ele está dentro dos valores esperados.

Nesta pasta de trabalho, é introduzida a simbologia dos cuidados que o usuário deve tomar, a cor amarela representa células que devem ser preenchidas pelo utilizador, em verde é

necessária uma atenção maior, pois pode ser que haja um desencontro de informações e em vermelho erros de cálculo por condições de contorno ou erro de entrada. Estas informações estão representadas na Figura 8.

DADOS DE ENTRADA - ARQUITETURA E CARREGAMENTOS	
Legenda:	
Dados inseridos pelo usuário	
Pré-dimensionamento, pode ser alterado conforme necessidade	
Atenção! Erro grave!	

Figura 8 – Legenda. Fonte: Autor

A Figura 9 demonstra as primeiras células que precisam ser preenchidas, conforme concepção arquitetônica.

ARQUITETURA		
Variável		unid.
Desenvolvimento da escada (ângulo) =		graus
Altura da escada (desnível a ser vencido) =		m
Largura do degrau =		m
Altura do degrau =		m
Comprimento do degrau (na LR) =		m

Figura 9 - Informações iniciais referentes a elementos da arquitetura da escada. Fonte: Autor

Os elementos “Largura do degrau” e “Altura do degrau” estão enunciados e especificados na Figura 2 deste trabalho. O desenvolvimento da escada, é enunciado pela Figura 4. O comprimento do degrau, na linha de rastro

A Figura 10 representa variáveis essenciais para o dimensionamento que são calculadas automaticamente pela planilha computacional.

Nº de degraus (n') =		degraus
Comprimento da linha de rastro (LLR) =		m
Raio da escada - na linha de rastro (RLR) =		m

Figura 10 - Variáveis calculadas automaticamente pelo programa. Fonte: Autor

A linha de rastro é definida pela trajetória descrita por uma pessoa subindo (ou descendo) a escada a uma distância definida pelo usuário. Esta variável pode ser inserido na célula descrita pela Figura 11.

Offset Linha de Rastro e Gola =		m
---------------------------------	--	---

Figura 11 - Offset da linha de rastro e gola. Fonte: Autor

Caso, o usuário queira alterar a distância entre a linha de rastro e gola, o programa aceita valores alternativos.

A Figura 12 demonstra mais algumas variáveis calculadas diretamente pela planilha computacional.

Raio da viga helicoidal =		m
Raio externo =		m
Raio interno =		m
Comprimento da viga helicoidal =		m
Inclinação da escada (alpha) =		º
Inclinação da escada =		m
Altura da viga pré-dimensionada =		m

Figura 12 - Variáveis calculadas pelo programa. Fonte: Autor

A Figura 13 demonstra a célula em que o usuário deverá a altura da viga-degrau. Na Figura 14, é demonstrado qual a altura que o programa se refere.

Altura da viga de degrau =		m
----------------------------	--	---

Figura 13 - Altura da peça estrutural que servirá de função como degrau. Fonte: Autor



Figura 14 - Corte esquemático para indicação da altura da viga-degrau, requisitada pelo programa. Fonte: Autor

Os pré-dimensionamentos, são calculados pela planilha conforme a Figura 15.

Largura da viga pré-dimensionada =		m
Largura máxima do degrau =		m
Largura mínima do degrau =		m
Largura do degrau na viga =		m
Área do degrau =		m ²

Figura 15 - Variáveis calculadas pelo programa. Fonte: Autor

Em relação aos carregamentos adotados, existem algumas variáveis que são calculadas pelo programa e outras que o usuário deverá inserir, levando em conta o método construtivo, concepção arquitetônica e uso para a escada. Esses dados são obtidos, analisados e processados pelas células representadas nas Figuras 16 e 17.

CARREGAMENTOS ADOTADOS		
Altura do degrau =		m
Peso por m ² horizontal =		kN/m ²
Peso do degrau distribuído na viga =		kN/m
Peso próprio da viga de sustentação =		KN/m
Haverá corrimão/peitoril ("sim" ou "não")?		
Peso do corrimão =		KN/m
Parcela correspondente degraus =		KN/m
Carga de revestimento =		KN/m ²
Peso de revestimento na viga =		KN/m
Peso parapeitos =		KN/m
Sobre-carga de utilização distribuída =		KN/m ²
Sobre-carga de utilização distribuída na viga =		KN/m
Sobre-carga adicional no parapeito =		kN/m
Sobre-carga adicional no parapeito distribuído na viga =		KN/m
Carregamento na posição mais desfavorável do degrau (nota t da tabela 10 NBR 6120:2019) =		KN

Figura 16 – Variáveis fundamentais para levantamento das ações para cálculo da viga de sustentação e da viga-degrau. Fonte: Autor.

Ações na degrau:		
Combinação com a sobre-carga distribuída:		
Momento máximo solicitante =		kNm
Cortante máximo solicitante =		kN
Combinação com a carga concentrada na posição mais desfavorável:		
Momento máximo solicitante =		kNm
Cortante máximo solicitante =		kN
Combinação utilizada para dimensionamento do degrau		
Momento máximo solicitante =		kNm
Cortante máximo solicitante =		kN
Ações na viga:		
Combinação de ações 1		kN/m
Combinação de ações 2		kN/m
Fd =		kN/m

Figura 17 - Resultado das combinações de ações na viga de sustentação e da viga-degrau.

Fonte: Autor.

3.1.3 Pastas de trabalho: cálculo dos esforços

O método de Langendonck, Rocha (1978), é apresentado nesta pasta, onde obtêm-se esforços ao longo dos pontos pré-determinados nas Tabelas 1, 2 e 3, no Capítulo da Revisão Bibliográfica deste trabalho.

Ao fim, encontra-se gráficos simples, para verificação dos esforços ao longo do comprimento da viga.

Nas Figuras 18, 19 e 20, são representados os resultados obtidos com uma escada hipotética, utilizada posteriormente como comparativo.

CÁLCULO DOS ESFORÇOS PELO MÉTODO DE LAGENDONK

$$\rho = 3$$

Equações	
$M_x = C_1 \cdot F_d \cdot R^2$ $M_y = C_2 \cdot F_d \cdot R^2$	$T = M_y \cos(\alpha)$ $M_I = M_y \sin(\alpha)$

ponto	C_1	C_2	M_x (kN.m)	M_y (kN.m)	T (kN.m)	M_I (kN.m)
8	0,74	-3,14	204,94	-867,84	-807,38	-318,24
7	0,61	-3,42	168,21	-943,52	-877,79	-345,99
6	0,23	-3,59	63,80	-990,75	-921,73	-363,31
5	-0,33	-3,57	-91,98	-986,61	-917,88	-361,79
4	-1,00	-3,31	-276,21	-914,79	-851,07	-335,46
3	-1,67	-2,79	-460,16	-769,79	-716,16	-282,28
2	-2,23	-2,02	-616,22	-557,11	-518,30	-204,29
1	-2,61	-1,06	-720,62	-292,50	-272,13	-107,26
0	-2,74	0,00	-757,36	0,00	0,00	0,00
1'	-2,61	1,06	-720,62	292,50	272,13	107,26
2'	-2,23	2,02	-616,22	557,11	518,30	204,29
3'	-1,67	2,79	-460,16	769,79	716,16	282,28
4'	-1,00	3,31	-276,21	914,79	851,07	335,46
5'	-0,33	3,57	-91,98	986,61	917,88	361,79
6'	0,23	3,59	63,80	990,75	921,73	363,31
7'	0,61	3,42	168,21	943,52	877,79	345,99
8'	0,74	3,14	204,94	867,84	807,38	318,24

Figura 18 - Área do programa destinada a cálculo dos esforços pelo método de Lagendonk.

Fonte: Autor.

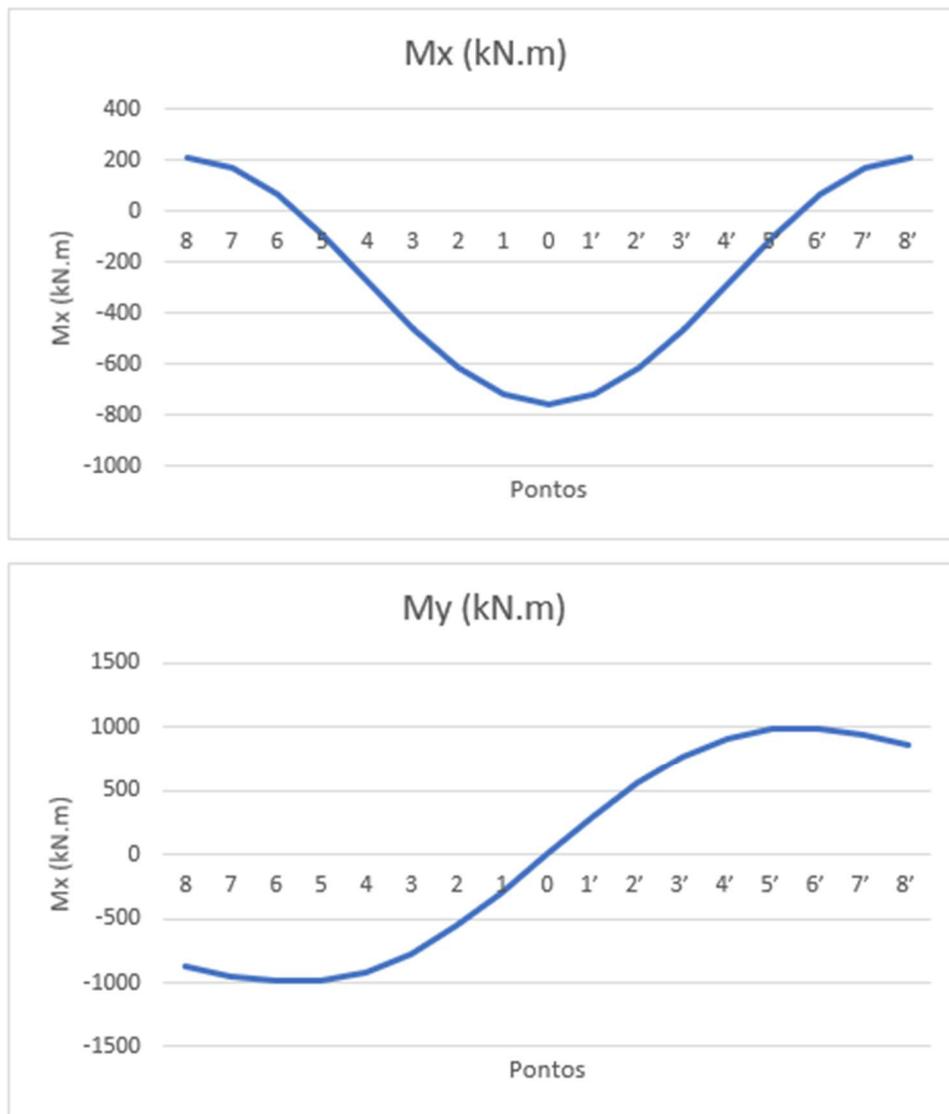


Figura 19 - Gráficos de M_x e M_y , obtidos pela planilha eletrônica. Fonte: Autor.

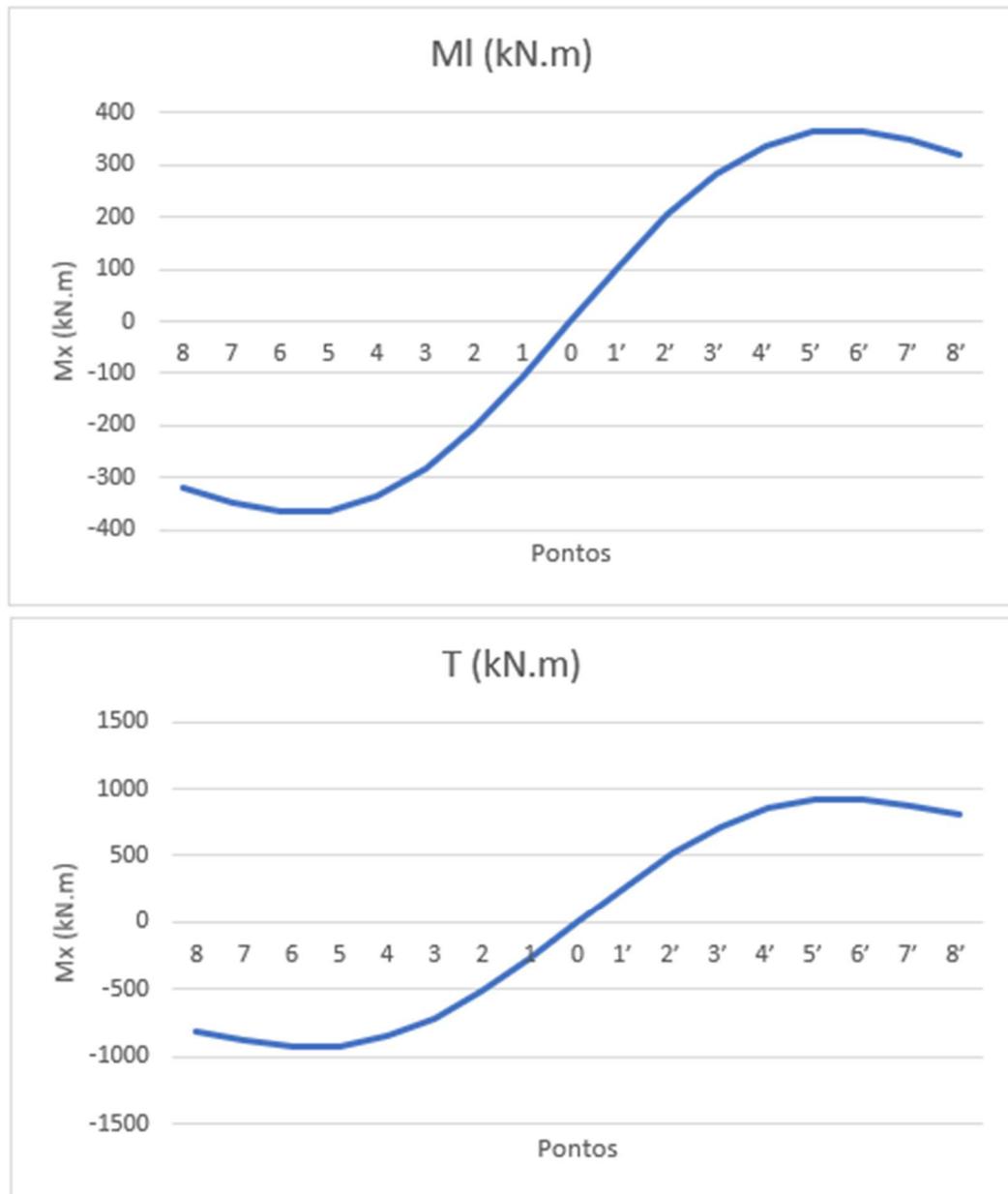


Figura 20 - Gráficos de Ml e T , obtidos pela planilha eletrônica. Fonte: Autor.

3.1.4 Pastas de trabalho: cálculo estrutural

Na pasta de trabalho “Cálculo Estrutural”, é necessário inserir dados referentes ao cobrimento, f_{ck} e f_{yk} característicos do concreto e do aço respectivamente, para haver o dimensionamento conforme o enunciado na NBR ABNT 6118:2014, conforme as fórmulas enunciadas no Capítulo Revisão Bibliográfica. A Figura 21 representa as células onde deve-se inserir dados referentes ao concreto e a cobrimento necessário (a depender da classe de agressividade ambiental em que a escada está submetida).

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Variável		unid.
fck =		MPa
fyk =		MPa
fcd =		Mpa
COB =		m

Figura 21 – Variáveis referentes ao cobrimento, f_{ck} e f_{yk} utilizados no elemento estrutural.

Fonte: Autor.

A Figura 22 demonstra o cálculo da verificação da Biela Comprimida, já enunciada no capítulo 2 Revisão da Literatura.

Verificação da Biela Comprimida

$$\frac{V_{sd}}{V_{Rd2}} + \frac{T_{sd}}{T_{Rd2}} \leq 1$$

Variável		unid.
Vsd =		kN
Tsd =		kNm
Av2 =		
Vrd2 =		kN

A =		cm ²
u =		cm

$$h_e \leq \frac{A}{u}$$

$$h_e \geq 2 \cdot c_1$$

Figura 22 - Verificação da biela de concreto comprimida. Fonte: Autor.

A NBR ABNT 6118:2014 define limites para h_e , mas a adoção fica a cargo do projetista. A planilha aceita e verifica se o valor inserido pelo usuário está dentro do intervalo permitido ou não, este cálculo e verificação é feito pelas células representadas na Figura 23.

Limites para h_e		
2c1	< h_e <	A/u
	< h_e <	

Adote h_e dentro do intervalo		
$h_e =$		OK
Variável		unid.
$A_e =$		cm ²
$T_{rd2} =$		kNcm

$$\frac{V_{Sd}}{V_{Rd2}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd2}} \leq 1$$

Verificação final		
	<	
OK		

Figura 23 - Escolha da limitação do h_e , e verificação final das bielas de concreto comprimidas. Fonte: Autor.

A Figura 24 representa as células responsáveis pelo dimensionamento à flexão da viga de apoio da escada em questão.

Dimensionamento à flexão		
Momento fletor no eixo longitudinal da viga		
Variável		unid.
Md =		kNm
kc =		
Ks =		
As =		cm ²
Momento fletor lateral da viga		
Variável		unid.
Md =		kNm
kc =		
Ks =		
As =		cm ²

Figura 24 - Dimensionamento da viga de apoio à flexão. Fonte: Autor.

A Figura 25 representa as células responsáveis pelo comparativo das armaduras calculadas com a taxa mínima de armadura, anunciada pela NBR ABNT 6118:2014.

Comparação com a armadura mínima		
Variável		unid.
Asmin =		cm ²
As.adot.sup =		cm ²
As.adot.inf =		cm ²

Dimensionamento a esforço cortante		
Como as bielas não são comprimidas, utiliza-se as armaduras mínimas		
Variável		unid.
(Asw/s)min =		cm ² /m

Figura 25 - Comparação da área de aço calculada com as respectivas taxas de armadura mínima. Fonte: Autor.

As Figuras 26 e 27 representa as células responsáveis pelo dimensionamento à torção da viga de apoio da escada em questão.

Dimensionamento a torção		
Variável		unid.
Tsd =		kNcm
(Asl/ue) =		cm ² /m
Área de armadura, por face da viga		

Determinação da armadura transversal		
Variável		unid.
(A90/s) =		cm ² /m
Área de estribo, por face da viga		

Determinação final das armaduras		
Face superior:		
Variável		unid.
Md =		kNm
kc =		
Ks =		
As =		cm ²
Aslsup =		cm ²
Asltot =		cm ²

Figura 26 – Dimensionamento à torção. Parte 1. Fonte: Autor.

Face inferior:		
Variável		unid.
As =		cm ²
Aslinf =		
Asltot =		cm ²
Faces laterais:		
Variável		unid.
As =		cm ²
As,pele		cm ²
Aslat=		cm ²
Asltot =		cm ²
Áreas de aço totais:		
Variável		unid.
Asltot =		cm ²
Aestrib =		cm ² /m

Figura 27 – Dimensionamento à torção. Parte 2. Fonte: Autor.

Ao fim do dimensionamento, o usuário precisa escolher o nº de barras e diâmetros que atendam a necessidade de todo o dimensionamento anteriormente realizado, demonstrado nas Figuras 21 a 27. As áreas de aço obtidas de acordo com a escolha do usuário são representada nas colunas “cm²” e “cm²/m”, ainda, o programa demonstra se as barras escolhidas atendem as áreas calculadas, estas escolhas são feitas nas células representadas pela Figura 28.

Escolha das Barras longitudinais				
	nº de barras	diâmetro	cm ²	
Face Superior				
Faces lateral				
Faces Inferior				

Escolha das Barras transversais				
	espaçamento	diâmetro	cm ² /m	
Asw,tot				

Figura 28 - Escolha das barras longitudinais e transversais. Fonte: Autor.

3.1.5 Pastas de trabalho: detalhamento 1

Para cumprir o objetivo inicial de auxiliar no desenho do corte da viga, utilizou-se diversas equações do *Microsoft Office Excel* para que as células C7 até C96 formem um código script em que consegue desenhar a seção da viga calculada. Essas células estão representadas nas Figuras 29 e 30, e estão pintadas em azul, para melhor visualização do usuário.

DETALHAMENTO DA ESCADA

Instruções:

- Abra o Autodesk AutoCAD (2005+) e desabilite a função ORTHO.
- Copie o código pintado em azul para um bloco de notas e salve como ".scr".
- No AutoCAD, digite o comando "script" e rode o arquivo que foi salvo

VIGA	COLOR
	GREEN
	PLINE
	-0,25,0
	0,25,0
	0,25,1,4
DEGRAU	COLOR
	RED
	PLINE
	-1,1,4
	1,1,4
	1,1,5
DESENHO ESTRIBOS	COLOR
	YELLOW
	PLINE
	-0,21,0,14
	0,21,0,14
	0,21,1,36
DESENHO ESTRIBOS	COLOR
	YELLOW
	PLINE
	-0,194,0,156
	0,194,0,156
	0,194,1,344
-0,194,1,344	
-0,194,0,156	

Figura 29 – Código para detalhamento da seção transversal da escada, parte 1. Fonte: Autor.

```

CIRCLE
-0,178,0,172
0,016
ACTSTOP

COLOR
YELLOW
ARRAY
LAST

R
1
6
0,0712
ACTSTOP

COLOR
YELLOW
CIRCLE
0,178,1,328
0,016
ACTSTOP

COLOR
YELLOW
ARRAY
LAST

R
6
1
-0,19
ACTSTOP

COLOR
YELLOW
CIRCLE
-0,178,1,328
0,016
ACTSTOP

COLOR
YELLOW
ARRAY
LAST

R
6
1
-0,19
ACTSTOP

```

Figura 30 - Código para detalhamento da seção transversal da escada, parte 2. Fonte: Autor.

O procedimento, apresentado pelas Figuras 31 a 34, para realizar o detalhamento no *Autodesk AutoCAD*, se resume em copiar as linhas de código obtidas no *Microsoft Excel*, copiá-las para um bloco de notas, salvar este bloco de notas na extensão “.scr” e ativá-lo pelo comando “script” no *Autodesk AutoCAD*.

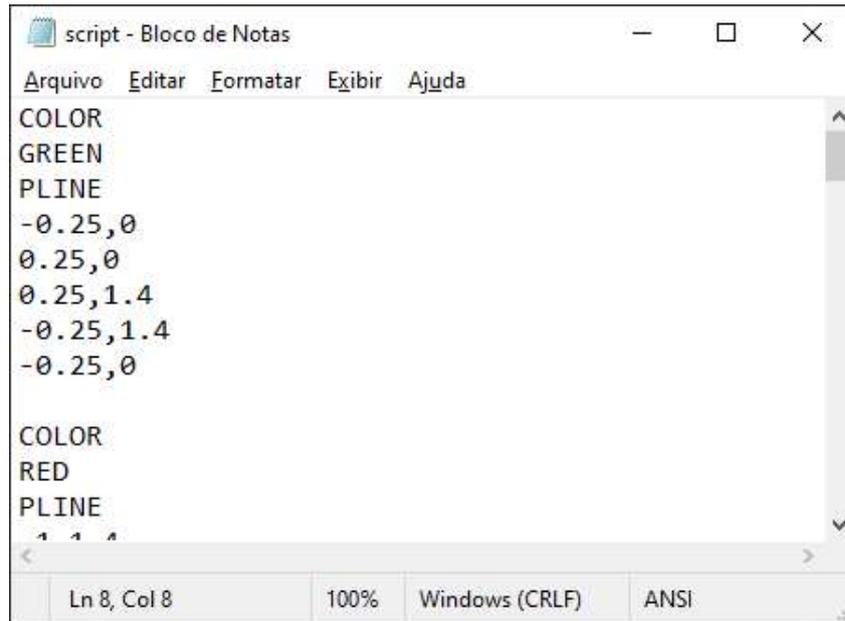


Figura 31 - Bloco de notas para criação do arquivo SCRIPT. Fonte: Autor.

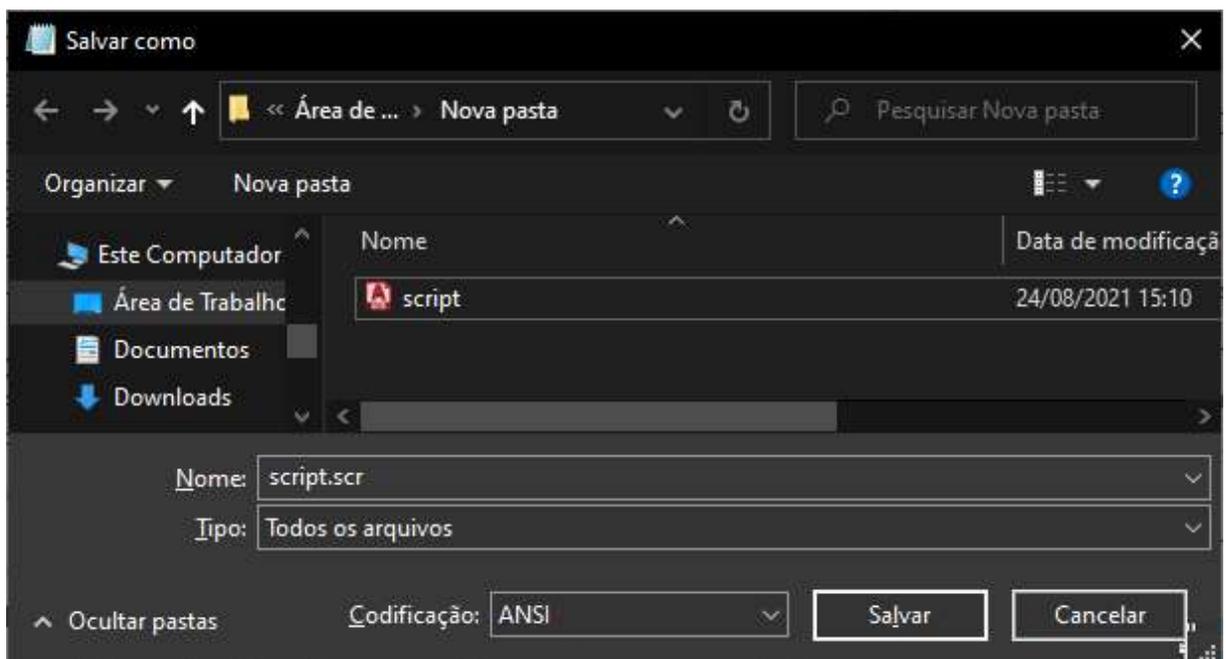


Figura 32 - Opção "Salvar Como". Fonte: Autor.

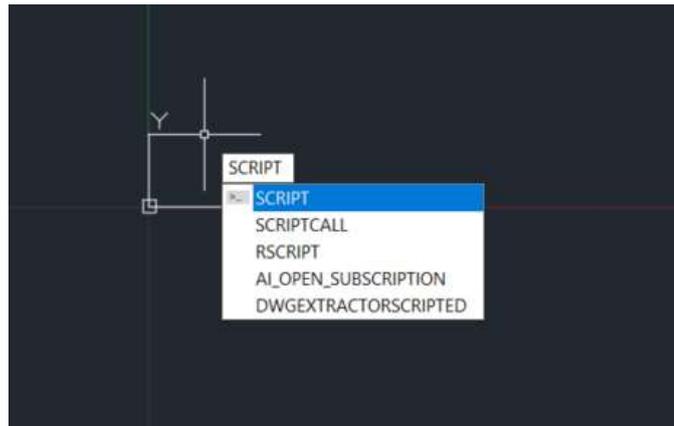


Figura 33 - Comando SCRIPT, no *Autodesk Autocad*. Fonte: Autor.

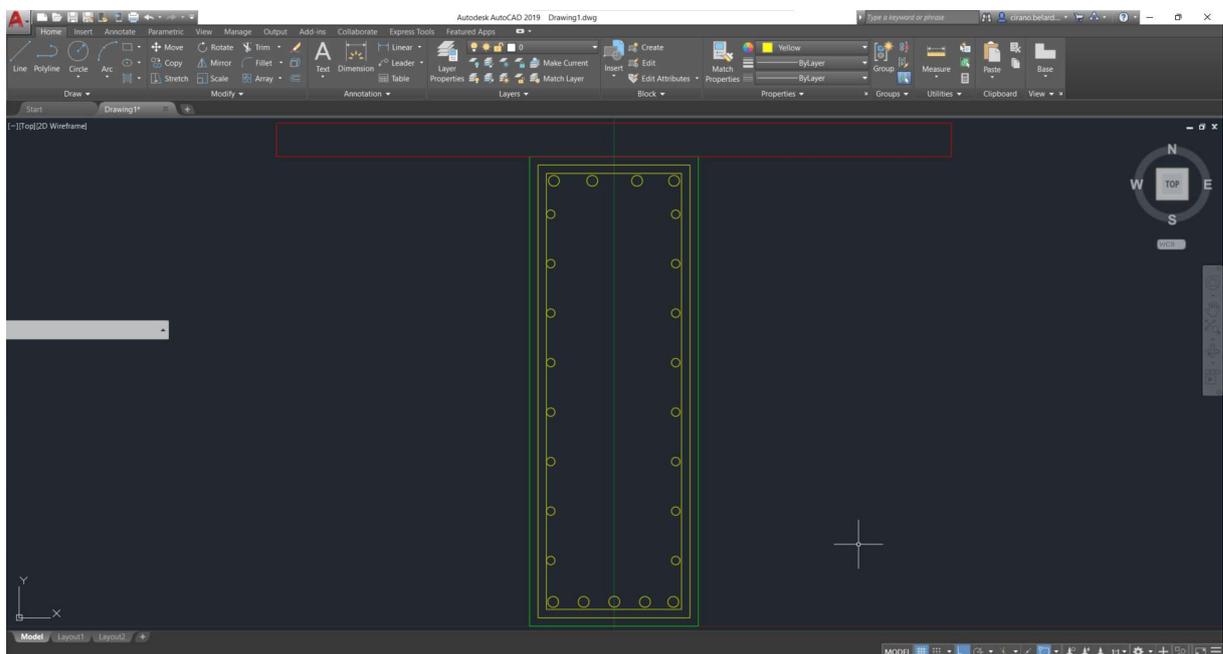


Figura 34 - Seção da Viga Desenhada. Fonte: Autor.

3.1.6 Pastas de trabalho: detalhamento 2

Para cumprir o objetivo inicial de auxiliar no desenho vista superior da escada, utilizou-se diversas equações do *Microsoft Office Excel* para que as células C7 até C53. Esta parte da Tabela, é representada pelas Figuras 35 e 37.

Utilizando passos análogos ao mostrados na pasta de trabalho Detalhamento 1, consegue-se desenhar a representação da escada em planta baixa.

DESENHO DA ESCADA

Instruções:

- Abra o Autodesk AutoCAD (2005+) e desabilite a função ORTHO.

```

DESENVOLVIMENTO ESCADA
COLOR
GREEN
CIRCLE
0,0
1,362112834
ACTSTOP

DESENVOLVIMENTO ESCADA
COLOR
GREEN
CIRCLE
0,0
3,362112834
ACTSTOP

DESENVOLVIMENTO VIGA
COLOR
RED
CIRCLE
0,0
2,612112834
ACTSTOP

DESENVOLVIMENTO VIGA
COLOR
RED
CIRCLE
0,0
2,112112834
ACTSTOP

OS DEGRAUS
COLOR
GREEN
LINE
1,36211283417518,0
3,36211283417518,0

ARRAY
LAST
  
```

Figura 35 - Código para detalhamento da vista superior da escada, parte 1. Fonte: Autor.

```

COLOR
GREEN
LINE
1,36211283417518,0
3,36211283417518,0

DESENHO DOS DEGRAUS

ARRAY
LAST

P
0,0
40

ACTSTOP

```

Figura 36 - Código para detalhamento da vista superior da escada, parte 2. Fonte: Autor.

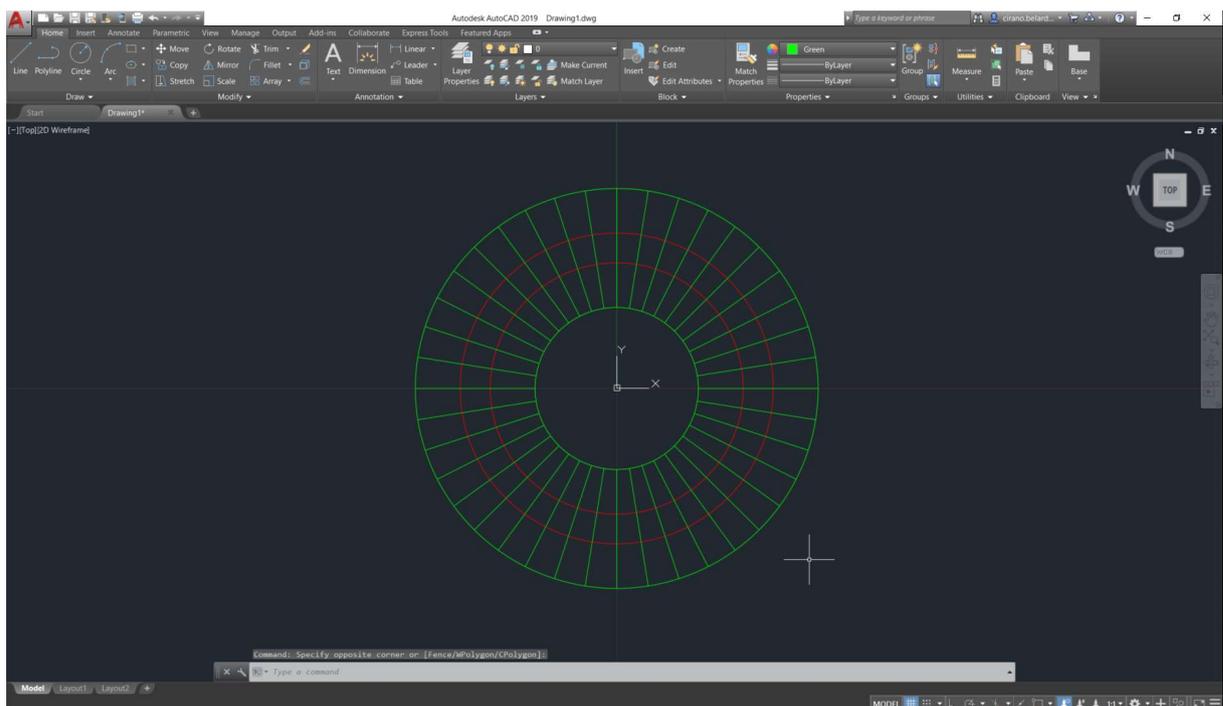


Figura 37 - Representação da Escada Calculada em Planta Baixa

4 RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA

Obedecendo a divisão supracitada, foi produzido as pastas de trabalho de forma intuitiva, com uma interface singela, mas buscando a funcionalidade e a facilidade para o usuário. Neste capítulo, será apresentado o comparativo dos resultados obtidos pelo programa desenvolvido com uma escada enunciada na bibliografia.

Para validar a planilha computacional é apresentado um estudo comparativo do dimensionamento de uma escada helicoidal, utilizando como modelo o exemplo resolvido em Noal (2014). A escada, teve as seguintes características definidas:

- (i) Desenvolvimento em planta baixa de 360° e 2π radianos;
- (ii) Desnível da escada de 6m;
- (iii) Largura da escada de 2m;
- (iv) Altura do degrau de 0,15m
- (v) Comprimento do degrau de 0,3m na linha de rastro

Graficamente, tem-se os elementos da escada representados pelas Figuras 38, 39 e 40.

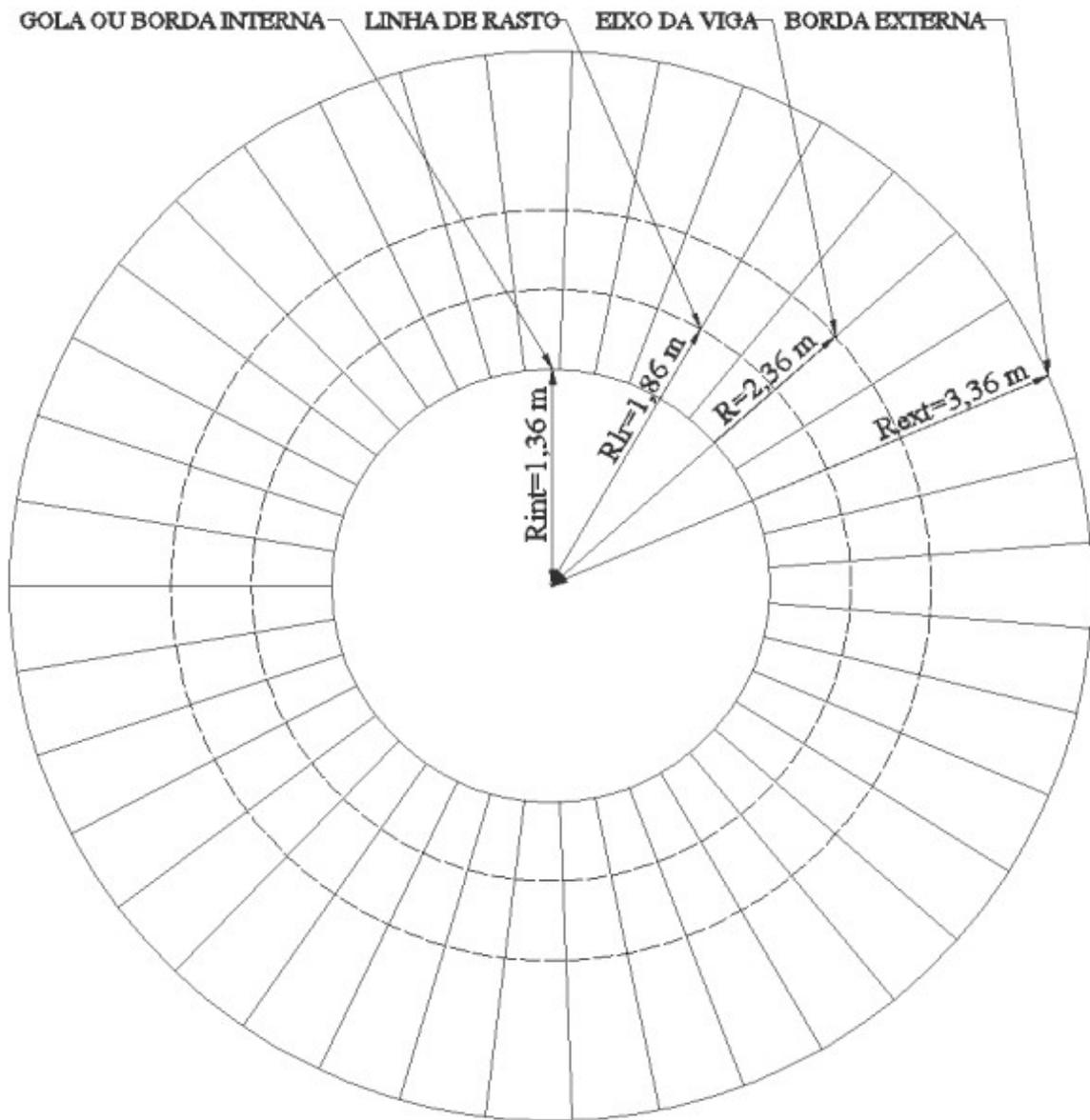


Figura 38 – Dimensões da escada em planta baixa. Fonte: Noal, 2014

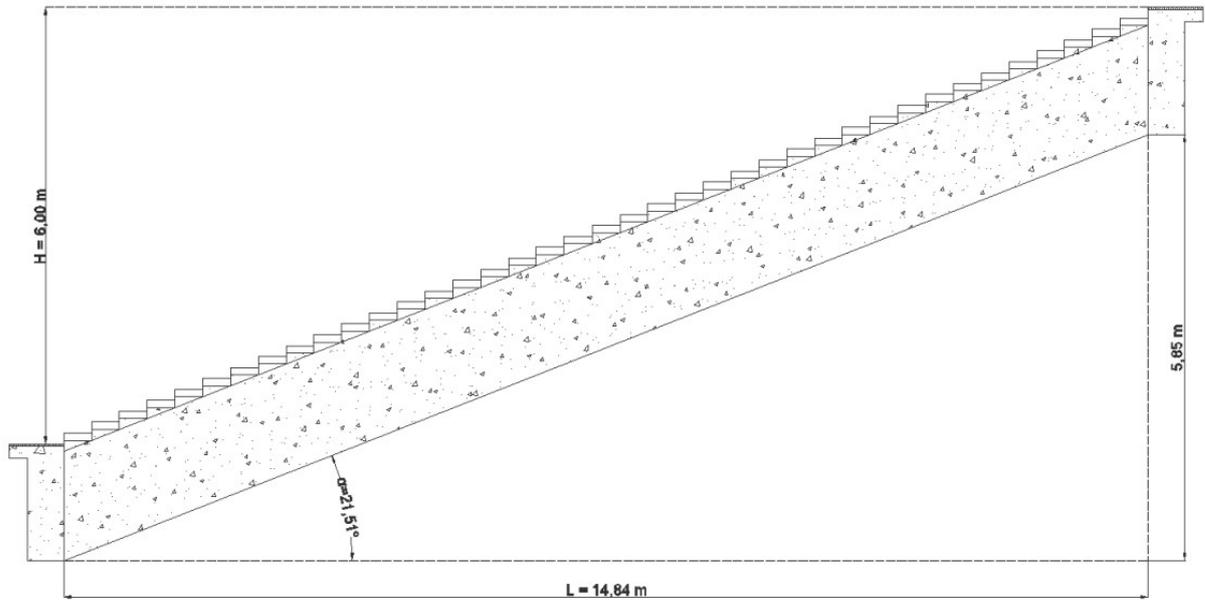


Figura 39 - Dimensões da escada em corte longitudinal no eixo da viga. Fonte: Noal,2014.

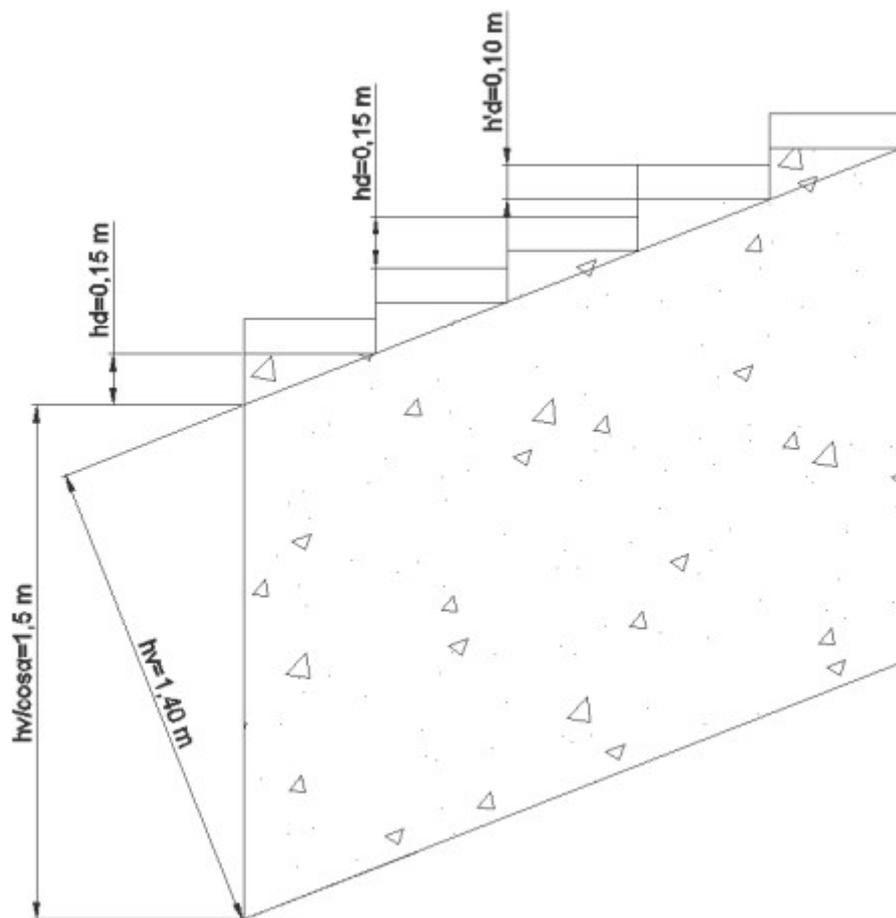


Figura 40 - Altura da viga de sustentação e dos degraus em corte longitudinal da escada comparativa. Fonte: Noal, 2014

Foi utilizado de parâmetro para validação do software o trabalho de Noal (2014). Os resultados dos esforços encontrados e as áreas de aço calculadas podem ser encontrados na Tabela 5.

COMPARATIVO				
		Noal (2014)	Planilha Computacional	Diferença (%)
Esforços Atuantes	M_x max (kN.m)	777,65	757,36	2,61
	T max (kN.m)	807,52	921,73	14,14
	M_l max (kN.m)	318,3	363,31	14,14
Áreas de aço	Longitudinal (cm ²)	115,65	120,09	3,83
	Transversal (cm ² /m.)	78,78	80,81	2,57

Tabela 5 – Tabela comparativo entre as áreas de aço e esforços encontrados. Fonte: Autor.

As pequenas diferenças encontradas entre as duas metodologias de cálculo (automatizada e manual) se dá possivelmente por dois principais fatores:

- (i) O cálculo manual, realizado em Noal (2014) truncou os cálculos na segunda casa decimal, acarretando diferenças sutis nas áreas de aço e esforços atuantes;
- (ii) A Tabela do Telêmaco Van Langendonck, foi adaptada no trabalho de Noal (2014) do Tiago Noal. Neste trabalho utilizou-se a versão fiel, apresentada em Rocha (1978);
- (iii) Para o dimensionamento das áreas de aço, Noal (2014) utilizou ábacos e equações de diversas fontes, neste trabalho, utilizou-se somente a NBR ABNT 6118:2014.

5 CONCLUSÕES

No trabalho, foram apresentados com sucesso os objetivos específicos elencados no Capítulo 1 Introdução, tais como a organização e execução da planilha com uma legenda para guiar o usuário, o levantamento dos esforços e dimensionamento da escada helicoidal conforme Rocha (1978) e a NBR ABNT 6118:2014, a automatização do detalhamento em rotina *script* para o *Autodesk AutoCAD* e por fim, uma Tabela comparativa entre a resolução de uma escada manualmente e a calculada pela planilha desenvolvida.

Em relação à organização e execução da planilha, atingiu-se o objetivo de demonstrar todo passo-a-passo de forma intuitiva ao usuário, fazendo com que cada variável seja calculada separadamente e esteja disponível ao usuário.

O levantamento dos esforços via tabelas de Lagendonk mostrou-se confiável e bem prático de ser aplicado, sendo extremamente recomendado sua aplicação em planilhas eletrônicas.

Constatou-se também que, apesar do programa apresentar rotinas que impeçam algumas entradas de dados erradas, faz-se necessário o conhecimento prévio acerca do assunto por parte do usuário. Neste aspecto, o processo descrito nesse trabalho e as referências apresentadas são de valiosa leitura para o uso do programa.

Deve-se evidenciar as limitações do trabalho: há uma grande diversidade de tipologias estruturais e tem-se diversas implementações que se recomenda para enriquecer o trabalho, tais quais:

- (i) O programa só aceita viga central, pode-se implementar, inclusive com o mesmo método utilizado no trabalho, viga lateral;
- (ii) É possível utilizar de outros métodos de cálculo para possibilitar o cálculo de outras angulações de volta (1/3 de volta, 5/8 de volta etc.);
- (iii) Existem escadas circulares que se apoiam diretamente em lajes, os métodos disponíveis para determinação dos esforços são mais complexos, em outras linguagens de programação se torna interessante o estudo dela;
- (iv) Caso a ênfase das futuras programações forem para usar *softwares* pagos, é possível utilizar macros para enriquecer o detalhamento;
- (v) Considerando que dependendo do desenvolvimento da escada (1/4, 2/4, 3/4 ou 1 volta completa) a Tabela de coeficientes para cálculo dos esforços muda, foram

criadas 4 planilhas, cada uma específica para cada desenvolvimento de escada que a metodologia aceita;

- (vi) O programa não consegue disponibilizar ao usuário todos os elementos do detalhamento, como simbologias, textos e espessura das *layers*, sendo do usuário a responsabilidade de configurar estas.

Como todo o programa, a grande vantagem identificada na planilha foi de poder alterar as variáveis de entrada livremente sem ter que passar um grande trabalhando fazendo todo o processo manual que todo dimensionamento requer. Além disto, temos também a precisão computacional e uma maior garantia de resultados fíéis ao comportamento da realidade.

É importante salientar, que o grande agente do dimensionamento é o responsável técnico que está usando a ferramenta, então, dependendo do caso analisado, pode ser que ocorra erros que devem ser identificados e sanados pelo usuário.

Durante a execução da planilha computacional, mostrou-se interessante escrever a rotina numa linguagem computacional com mais ferramentas matemáticas, para que sejam implementados métodos mais sofisticados, como o método dos elementos finitos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J. M. DE. **Concreto Armado José Milton - VOL 4.pdf**. 3. ed. Rio Grande: 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro - RJ, 2003.
- _____. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento Projeto de Estruturas de concreto, procedimento. Norma Brasileira**. Rio de Janeiro - RJ, 2014.
- _____. **NBR 9050: Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos**. Rio de Janeiro - RJ, 2020.
- _____. **NBR 6120: Ações para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro - RJ, 2019.
- GUERRIN, A. **Tratado de Concreto Armado: Estruturas de Residências e Indústrias** Brasil: Hemus, 2002.
- MICROSOFT. **Suporte do Microsoft Office**. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/pt-br/office>>.
- NOAL, T. **Escadas Helicoidais em Concreto Armado : 2014**. TCC, UFRGS.
- QUEVEDO, F. P. DA M. **Programa Computacional para Automatizar o Dimensionamento e Detalhamento de Escadas de Concreto Armado em Edifícios**. 2011. TCC, UFRGS.
- ROCHA, A. M. DA. **Novo Curso Prático de Concreto Armado**. 15. ed. Rio de Janeiro - RJ: 1978.
- THE DOCUMENT FOUNDATION. **Suporte da Comunidade**. Disponível em: <<https://pt-br.libreoffice.org/ajuda/suporte-da-comunidade/>>.