

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Giovani Andrezza Gelain

**ESCADAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO
COMPARATIVO DO CONSUMO DE AÇO E CONCRETO EM
FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO**

Porto Alegre
julho 2016

GIOVANI ANDREAZZA GELAIN

**ESCADAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO
COMPARATIVO DO CONSUMO DE AÇO E CONCRETO EM
FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Roberto Domingo Rios

Porto Alegre

julho 2016

GIOVANI ANDREAZZA GELAIN

**ESCADAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO
COMPARATIVO DO CONSUMO DE AÇO E CONCRETO EM
FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE APOIO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da atividade de ensino Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2016

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Luciani Somensi Lorenzi
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila Bessa
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Gilberto e Fatima e à
minha irmã Nicole que, com muito apoio e carinho, foram
fundamentais para a conclusão desta etapa da minha
formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Roberto Rios, orientador deste trabalho, por todos os ensinamentos transmitidos durante a confecção do trabalho de conclusão, assim como nas disciplinas em que fui seu aluno durante o curso.

Agradeço aos meus pais, Gilberto e Fatima, pelo apoio e incentivo constante para que eu realize meus sonhos.

Agradeço a equipe da Carpeggiani Engenharia pelo companheirismo e aprendizado técnico e pessoal durante o estágio.

Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas de curso, por terem estado ao meu lado ao longo desta caminhada.

Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você
faz com aquilo que você sabe.

Aldous Huxley

RESUMO

Com a finalidade de conectar os pavimentos de uma edificação, a implantação de uma escada pode ser realizada de inúmeras formas, variando sobretudo suas condições de apoio. Assim, o trabalho em questão tem como objetivo a análise comparativa de consumos de aço e concreto provenientes do dimensionamento de escadas de concreto armado com condições geométricas de vão horizontal e altura fixadas, variando apenas seus apoios e sua largura. Desta forma, pode-se observar as particularidades no dimensionamento que as escolhas de condições de apoio proporcionam e suas implicações no quantitativo de consumo de material. Todos os dimensionamentos foram feitos de acordo com as exigências das instruções normativas brasileiras referente ao estado limite último e estado limite de serviço de deformações excessivas. A espessura da escada, uma das variáveis mais importantes do dimensionamento, foi definida da mesma forma para todos os tipos de escadas, garantindo a minimização do consumo de concreto e proporcionando coerência na comparação. A partir de 6 larguras propostas, verificou-se o tipo de escada mais econômica para cada largura em relação ao consumo de aço e concreto separadamente. Além das instruções normativas referente a estruturas de concreto, foram utilizadas considerações provenientes da literatura especializada, visto que as informações das normas brasileiras não abrangem todo o processo de dimensionamento de uma escada de concreto armado.

Palavras-chave: Escadas de Concreto Armado. NBR 6118. Dimensionamento de Escadas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento do trabalho	23
Figura 2 – Nomenclatura dos componentes do degrau	25
Figura 3 – Largura da escada	27
Figura 4 – Espessuras da escada	28
Figura 5 – Nomenclatura de componentes da escada	29
Figura 6 – Escada armada longitudinalmente	31
Figura 7 – Escada armada transversalmente	31
Figura 8 – Escada armada em duas direções	32
Figura 9 – Escada com degraus isolados	38
Figura 10 – Cargas acidentais no parapeito	39
Figura 11 – Vão e espessura de cálculo de escada armada longitudinalmente	44
Figura 12 – Largura de cálculo de escada armada longitudinalmente	44
Figura 13 – Modelo de cálculo para escada armada longitudinalmente com apenas um lance	45
Figura 14 – Modelo de cálculo para escada armada longitudinalmente com patamar	46
Figura 15 – Modelo de cálculo para escada armada transversalmente com vigas laterais	47
Figura 16 – Escada com degraus isolados apoiada em vigas laterais	48
Figura 17 – Modelo de cálculo de escada armada transversalmente apoiada em vigas laterais	49
Figura 18 – Modelo de cálculo de escada engastada em viga lateral com degraus isolados	50
Figura 19 – Valor do coeficiente k para cargas distribuídas	68
Figura 20 – Valor do coeficiente k para cargas concentradas	69
Figura 21 – Dimensões da escada proposta e dos degraus	74
Figura 22 – Fluxograma do processo de definição da espessura	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Peso específico dos materiais de construção	35
Quadro 2 – Coeficiente de ponderação das cargas permanentes consideradas separadamente	40
Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental	55
Quadro 4 – Correspondência entre a classe ambiental e o cobrimento	55
Quadro 5 – Taxas mínimas de armadura de flexão	58
Quadro 6 – Limites para deslocamentos	61
Quadro 7 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 1,10	79
Quadro 8 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 1,65 m	80
Quadro 9 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 2,20 m	82
Quadro 10 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 2,75 m	84
Quadro 11 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 3,30 m	85
Quadro 12 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 4,76 m	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente γ_n para lajes em balanço	51
Tabela 2 – Coeficiente α para laje simplesmente apoiada nas quatro bordas.....	52
Tabela 3 – Valores do coeficiente β	70
Tabela 4 – Valores do coeficiente ξ	72

LISTA DE SIGLAS

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

e – altura do degrau

a – largura do degrau

n – número de degraus

H – desnível a ser vencido

b – largura da escada

h – espessura da laje situada abaixo dos degraus

h_1 – espessura da laje medida na direção vertical

h_m – espessura média na direção vertical

h_p – espessura do patamar

α – ângulo de inclinação da escada

q_p – carregamento de peso próprio da parte inclinada da escada

γ_c – peso específico do concreto

q_{pat} – carregamento de peso próprio do patamar

q_r – carga de revestimento

γ_r – peso específico do material de revestimento

h_r – espessura do revestimento

q_{par} – carga do parapeito

γ_a – peso específico da alvenaria

P – altura do parapeito

t – espessura da parede

F_d – valor de cálculo de uma combinação de cargas

γ_g – coeficiente de ponderação das cargas permanentes

$F_{G,k}$ – valor característico das ações permanentes

γ_q – coeficiente de ponderação das cargas variáveis

$F_{Q1,k}$ – valor característico da carga variável considerada principal para a combinação

Ψ_0 – fator de redução das cargas variáveis secundárias

$F_{Q,k}$ – valor característico das demais cargas variáveis

$F_{d, serv}$ – valor de cálculo da combinação quase permanente de serviço

Ψ_1 – fator de redução de cargas variáveis para combinações de serviço

Ψ_2 – fator de redução das cargas variáveis para combinações de serviço

M_d – momento fletor de cálculo

q – carregamento atuante na escada

l – distância entre os eixos dos apoios

M_x – momento fletor de cálculo na direção do menor vão da escada

α – coeficiente adimensional

l_x – distância entre os eixos dos apoios na direção do menor vão da escada

M_y – momento fletor de cálculo na direção do maior vão da escada

l_y – distância entre os eixos dos apoios na direção do maior vão da escada

x – posição da linha neutra da seção

d – altura útil da seção

λ – relação entre a profundidade do diagrama retangular de compressão simplificado e a profundidade efetiva x da linha neutra

α_c – parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão

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

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

c – cobrimento da armadura

Φ – diâmetro da armadura tracionada

A_s – área de aço da seção

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

f_{yk} – resistência característica ao escoamento do aço

γ_s – coeficiente de ponderação da resistência do aço

$A_{s,min}$ – área de aço mínima da seção

ρ_{min} – taxa de armadura mínima

$A_{s,dist}$ – área de aço de distribuição

V – volume de concreto da escada

h_{deg} – espessura do degrau isolado

M_r – momento de fissuração

α – fator que correlaciona de forma aproximada a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta

f_{ct} – resistência à tração direta do concreto

I_c – momento de inércia da seção bruta de concreto

y_t – distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada

$f_{ct,m}$ – resistência média à tração do concreto

x_{II} – posição da linha neutra no estágio II

α_e – relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto

E_s – módulo de elasticidade do aço

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto

α_i – coeficiente de ponderação

E_{ci} – módulo de elasticidade inicial do concreto

α_E – coeficiente de ponderação devido ao tipo de agregado

I_{II} – momento de inércia no estágio II

$(EI)_{eq,t0}$ – rigidez equivalente no tempo zero

M_a – momento atuante máximo da escada, calculado por uma combinação rara de cargas

$f_{(t=0)dist}$ – flecha imediata de um carregamento distribuído

k – coeficiente que leva em conta o tipo de vinculação

$f_{(t=0)conc}$ – flecha imediata de um carregamento concentrado

P – carga concentrada proveniente de uma combinação quase permanente

β – coeficiente que depende da vinculação e da razão entre os lados da laje

$f_{(t=\infty)}$ – flecha diferida ao longo do tempo

$f_{(t=0)}$ – flecha imediata

α_f – fator adimensional para cálculo da flecha diferida

$\Delta\xi$ – coeficiente em função do tempo de aplicação do carregamento

ρ' – taxa de armadura comprimida

$\xi(t)$ – valor do coeficiente no tempo em que se deseja estimar o valor da flecha diferida

$\xi(t_0)$ – valor do coeficiente no tempo em que foi aplicada a carga de longa duração

f – flecha total

$\gamma_{aço}$ – peso específico do aço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	21
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	21
2.2.1 Objetivo principal	21
2.2.2 Objetivos secundários	21
2.3 PRESSUPOSTO	22
2.4 PREMISA	22
2.5 LIMITAÇÕES	22
2.6 DELINEAMENTO	22
3 ESCADAS DE CONCRETO ARMADO	25
3.1 DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS	25
3.1.1 Dimensões dos degraus	25
3.1.2 Dimensões em planta de uma escada	26
3.1.2.1 Cálculo do número de degraus	26
3.1.2.2 Largura da escada	27
3.1.3 Espessura de uma escada	28
3.1.4 Demais elementos	29
3.2 CLASSIFICAÇÕES	30
3.2.1 Quanto à forma	30
3.2.2 Quanto à direção da armadura principal	30
3.2.2.1 Escada armada longitudinalmente	30
3.2.2.2 Escada armada transversalmente	31
3.2.2.3 Escada armada nas duas direções	31
4 CARREGAMENTOS	33
4.1 CARREGAMENTOS PERMANENTES	33
4.1.1 Peso próprio	33
4.1.1.1 Peso da escada na parte inclinada	33
4.1.1.2 Peso do patamar	34
4.1.2 Revestimento	34
4.1.3 Parapeitos	36
4.2 CARREGAMENTOS ACIDENTAIS	37
4.2.1 Carga acidental na escada	37

4.2.2.1 Carga acidental distribuída	37
4.2.2.2 Carga acidental para escadas com degraus isolados	37
4.2.2 Carga acidental no parapeito	38
4.3 COMBINAÇÕES DE CARGA	39
4.3.1 Combinação última normal	39
4.3.2 Combinações de serviço	41
4.3.2.1 Combinação quase permanente de serviço	42
4.3.2.2 Combinação rara de serviço	42
5 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO	44
5.1 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE CÁLCULO	44
5.1.1 Escada armada longitudinalmente	44
5.1.2 Escada armada transversalmente	46
5.1.2.1 Escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente	46
5.1.2.2 Escada apoiada em vigas laterais com degraus isolados	47
5.1.2.3 Escada engastada em viga lateral com degraus isolados	49
5.1.3 Escada armada nas duas direções	51
5.2 CÁLCULO DA ARMADURA	52
5.2.1 Cálculo da posição da linha neutra	52
5.2.2 Limitação da posição da linha neutra	56
5.2.3 Cálculo da armadura principal	56
5.2.4 Cálculo da armadura de distribuição	58
5.3 CÁLCULO DO VOLUME DE CONCRETO	59
6. VERIFICAÇÃO QUANTO AO ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS	61
6.1 DESLOCAMENTO MÁXIMO PERMITIDO	61
6.2 CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA	62
6.2.1 Verificação do estádio	62
6.2.2 Cálculo do momento de inércia no estádio II	64
6.2.3 Cálculo da rigidez equivalente	66
6.3 CÁLCULO DA FLECHA IMEDIATA	67
6.3.1 Escadas armadas em uma direção	67
6.3.2 Escadas armadas em duas direções	69
6.4 CÁLCULO DA FLECHA DIFERIDA NO TEMPO	71
7. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	73
7.1 CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS	73

7.1.1 Larguras propostas no dimensionamento	74
7.1.2 Definição da espessura	75
7.2 PARÂMETROS DOS MATERIAIS	77
7.3 DEMAIS PARÂMETROS	77
7.4 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO	78
7.4.1 Escada com largura de 1,10 metros	78
7.4.2 Escada com largura de 1,65 metros	78
7.4.3 Escada com largura de 2,20 metros	81
7.4.4 Escada com largura de 2,75 metros	83
7.4.5 Escada com largura de 3,30 metros	84
7.4.6 Escada com largura de 4,76 metros	86
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
8.1 RESULTADOS	88
8.2 METODOLOGIA UTILIZADA	90
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A	92

1 INTRODUÇÃO

Como consequência do aumento da competitividade na construção civil, cresce a filosofia de que os projetos estruturais devem aliar eficiência, segurança e economia no dimensionamento de um elemento estrutural. Desta forma, é necessário que arquitetos, engenheiros e demais profissionais envolvidos no projeto de uma edificação, façam escolhas considerando a viabilidade técnica e financeira da estrutura em questão. Inseridas nesse contexto de elaboração de projetos, estão as escadas de concreto armado. Cunha e Souza (1998, p. 299) salientam que “As escadas têm como função unir, através de degraus sucessivos, os diferentes pavimentos de uma construção.”.

Independentemente da existência de outros meios para transpor desníveis verticais, a utilização de uma escada se faz necessária para qualquer edificação cujos pavimentos não possuam saída para o espaço livre exterior, conforme estabelece a Norma NBR 9077 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), Norma vigente responsável por padronizar os elementos que compõem as saídas de emergência. Além de ser a solução obrigatoriamente implementada para conectar pavimentos, nota-se a importância do correto dimensionamento de uma escada, sendo essa uma condição primordial para aprovação da grande maioria dos projetos nos órgãos responsáveis.

O projeto estrutural de uma escada de concreto armado deve ser feito de acordo com as normas vigentes, limitando os deslocamentos e garantindo que o elemento estrutural tenha uma vida útil compatível com o resto da estrutura. Dessa forma, é essencial que o engenheiro saiba avaliar de forma precisa os carregamentos atuantes e as opções de apoio que a escada possui. Além de atender aos critérios técnicos, o projeto de uma escada de concreto armado deve dimensionar de forma econômica a quantidade de material utilizado na sua execução, com o objetivo de reduzir os custos e facilitar o trabalho dos operários envolvidos na armação e concretagem.

O presente trabalho consiste inicialmente em definir condições geométricas de vão horizontal e altura de piso a piso que uma escada deve vencer. O objetivo é comparar consumos de aço e concreto resultantes do dimensionamento de várias escadas, que diferem entre si na largura e nos tipos de apoios, mas que obedecem às condições impostas inicialmente.

Sabe-se que o consumo de aço é diretamente proporcional à espessura da laje da escada. Desta forma, a espessura da escada será calculada de modo a satisfazer as verificações do estado limite último e estado limite de serviço de deformações excessivas, descritos na Norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), Norma vigente responsável por fixar as condições básicas de projeto de estruturas de concreto armado. Assim, evita-se que a espessura da escada seja superestimada e interfira significativamente no consumo de aço, possibilitando uma comparação coerente entre as escadas. Para confecção dos cálculos de dimensionamento e para comparação dos resultados será elaborada uma planilha de cálculo do *software* Excel, desenvolvido pela empresa Microsoft Corporation.

Tal comparação poderá servir como base para futuros dimensionamentos de escadas que possuam condições de contorno semelhantes às condições apresentadas neste trabalho. Dessa forma, os projetistas poderão ter uma estimativa inicial sobre o tipo de escada que apresenta melhores resultados em relação ao consumo de aço e concreto, auxiliando na escolha caso a minimização de custos seja a premissa de projeto determinante.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: para o dimensionamento de escadas de concreto armado limitado por imposições geométricas, quais posições de apoio resultam em menores consumos de aço e concreto?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a determinação da alternativa de apoio que resulta em menores consumos de aço e concreto para uma escada de concreto armado com condições geométricas pré-estabelecidas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) descrição dos métodos de dimensionamento de escadas;
- b) elaboração de planilha eletrônica para dimensionamento e comparação dos resultados.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os métodos de cálculo encontrados na bibliografia são adequados, visto que não há instruções normativas brasileiras específicas para cálculo estrutural de escadas de concreto armado.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que a minimização do custo de implantação de uma escada de concreto armado depende, entre outros fatores, da escolha correta da posição de apoios desta escada.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a consideração apenas do esforço de flexão nas escadas;
- b) verificações do estado limite último e estado limite de serviço de deformações excessivas;
- c) escadas apoiadas somente em vigas;
- d) dimensionamento e comparação apenas das escadas que possuam forma retangular;
- e) vigas de apoio não serão dimensionadas.

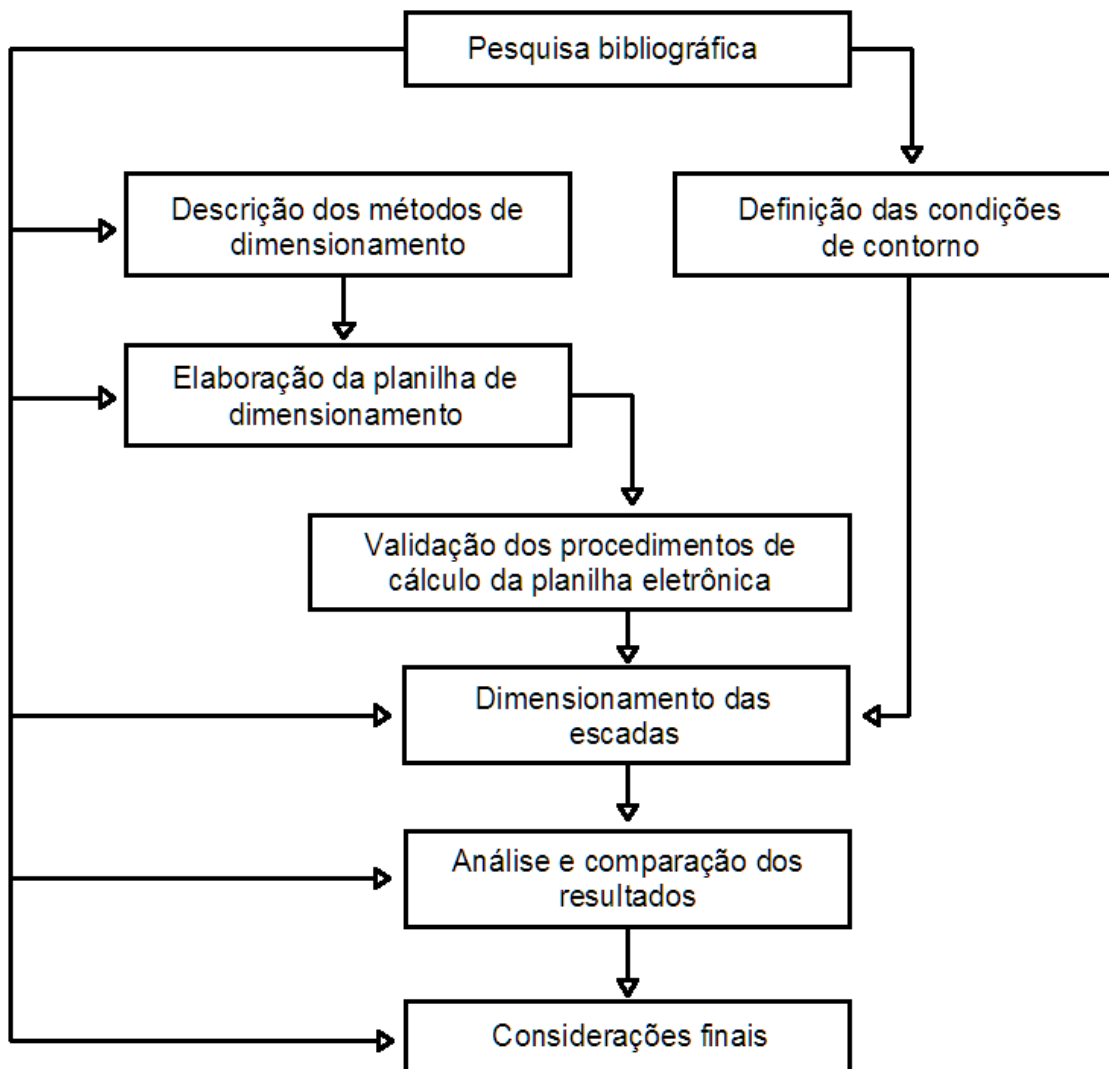
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição dos métodos de dimensionamento;
- c) definição das condições de contorno;
- d) elaboração da planilha eletrônica de dimensionamento;
- e) validação do procedimento de cálculo da planilha eletrônica;
- f) dimensionamento das escadas;
- g) análise e comparação dos resultados;

h) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama do delineamento do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, será realizada a **pesquisa bibliográfica**, com o intuito de aprofundar os conhecimentos sobre o tema escolhido. Com ela, será possível compreender as definições, aspectos normativos e metodologias de cálculo utilizadas no dimensionamento de escadas de concreto armado. A partir disso, será feito a **descrição dos métodos de dimensionamento**, quando serão apresentadas as etapas do dimensionamento para todas as direções possíveis da armadura principal.

A **definição das condições de contorno** será realizada paralelamente à descrição do método de dimensionamento. Nessa etapa, serão fixados os parâmetros em que consistirá a comparação de consumos.

Na sequência, será feita a **elaboração da planilha eletrônica de dimensionamento**, com auxílio do *software* Excel. Essa etapa consiste em programar as equações utilizadas no cálculo da área de aço e volume de concreto, a fim de automatizar o dimensionamento, bem como agilizar o processo de cálculo. Após isso, será feita a **validação do procedimento de cálculo da planilha eletrônica**, que consiste em comparar os resultados de dimensionamentos testes da planilha com resultados provenientes de outros meios de cálculo, a fim de garantir que a planilha foi programada corretamente.

Na etapa posterior, se dará o **dimensionamento das escadas** à flexão. Nessa etapa, serão realizadas as verificações do estado limite último e do estado limite de serviço de deformações excessivas, bem como o cálculo da área de aço e volume de concreto de cada escada. O dimensionamento será feito a partir das equações inseridas na planilha e será produto dos parâmetros fixados anteriormente.

Finalmente, será realizada a **análise e comparação dos resultados**, em que será possível visualizar numericamente e graficamente as diferenças de consumo de aço e concreto entre todas as escadas dimensionadas. Por fim, serão efetuadas as **considerações finais** do estudo, a partir dos resultados inferidos da comparação.

3. ESCADAS DE CONCRETO ARMADO

Neste capítulo serão apresentadas as terminologias utilizadas na literatura acompanhadas das equações que tratam da definição geométrica de uma escada. Serão exibidas também as classificações comumente utilizadas para as escadas de concreto armado.

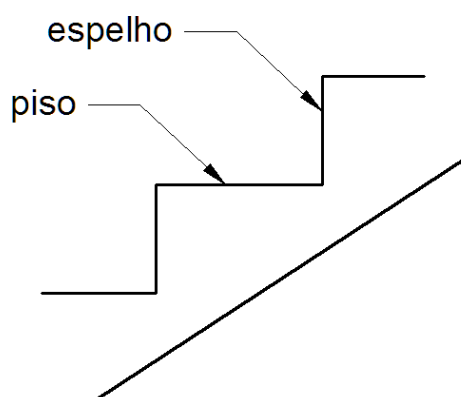
3.1 DEFINIÇÕES GEOMÉTRICAS

Definir corretamente a geometria de uma escada é fundamental para que a mesma seja funcional, segura e esteja dentro dos padrões técnicos.

3.1.1 Dimensões dos degraus

A NBR 9077 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, grifo do autor) define o degrau de uma escada como o conjunto dos elementos horizontais e verticais, denominados **piso** e **espelho**, respectivamente. O piso é a largura do degrau, enquanto o espelho é a altura, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2 – Nomenclatura dos componentes do degrau



(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001)

A altura do degrau pode ser arbitrada, porém deve estar entre 16cm e 18cm se a escada for parte integrante de uma saída de emergência, conforme determina a NBR 9077 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

A Norma estabelece ainda que a largura do degrau deve ser dimensionada pela fórmula de Blondel:

$$63 \text{ cm} \leq (2e + a) \leq 64 \text{ cm} \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

e = altura do degrau, em cm;

a = largura do degrau, em cm.

3.1.2 Dimensões em planta de uma escada

Pode-se admitir que as dimensões em planta de uma escada estão definidas quando se conhece o número de degraus e a largura da escada. O comprimento horizontal total da escada pode ser facilmente determinado pois é função da quantidade e largura dos degraus.

3.1.2.1 Cálculo do número de degraus

Para encontrar o número de degraus, utiliza-se a equação 2 (GUERRIN; LAVAUUR, 2002):

$$n = \frac{H}{e} \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

n = número de degraus;

H = desnível a ser vencido, em cm;

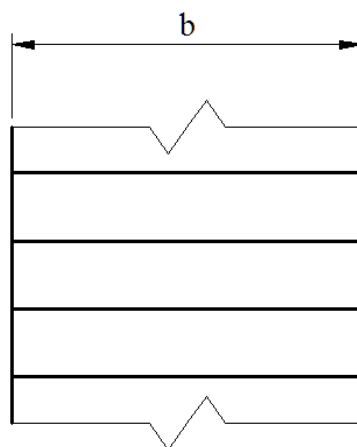
e = altura do degrau, em cm.

O autor ainda afirma que se o cálculo resultar em um número de degraus não inteiro, deve-se arredondar para o valor inteiro imediatamente superior ou inferior, dependendo da situação, e recalcular a altura do degrau, a partir da mesma equação.

3.1.2.2 Largura da escada

A largura b da escada é a distância entre as bordas laterais da escada, conforme a figura 3.

Figura 3 – Largura da escada



(fonte: elaborado pelo autor)

A NBR 9077 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001) admite 1,10m a largura mínima para escadas que constituem saídas de emergências. A Norma define também o conceito de unidade de passagem, sendo o espaço mínimo necessário para passagem de uma fila de pessoas. Uma unidade de passagem equivale a 0,55 m e a largura de uma escada pode ser definida a partir de múltiplos desse valor, dependendo da quantidade de pessoas que utilizarão a escada.

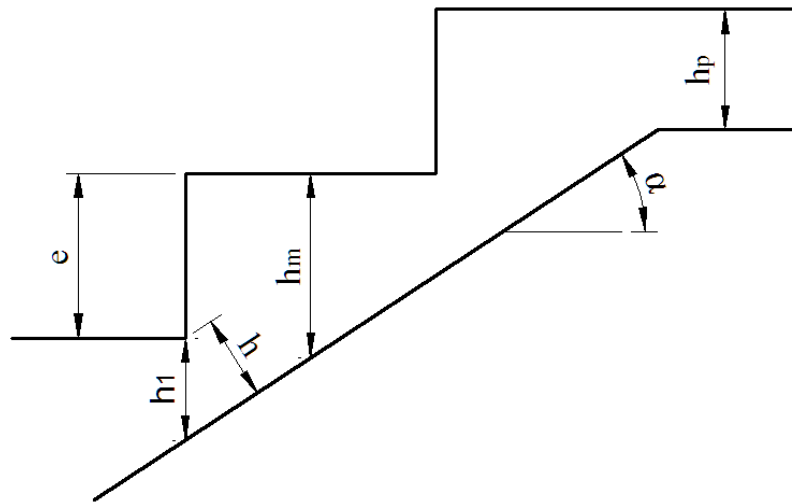
Já Cunha e Souza (1998, p. 302) admitem que:

[...] adota-se como largura mínima de uma escada em edificações residenciais o valor 1,20m, o que permite a passagem simultânea de duas pessoas. Para passagem de três pessoas, a largura passa a cerca de 1,90m, e nas escadas privativas pode-se diminuir a largura para até cerca de 0,80m (se externa) ou 0,60m (se interna). A largura de uma escada deveria ser também função do número de pessoas que utilizam o pavimento do prédio, de modo a permitir que, em caso de incêndio, todos os usuários deixassem o andar em um intervalo de tempo.

3.1.3 Espessura de uma escada

Araújo (2014b), define a terminologia das possíveis espessuras de uma escada, a partir da figura 4.

Figura 4 – Espessuras da escada



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

Onde:

h = espessura da laje situada abaixo dos degraus;

h_1 = espessura da laje medida na direção vertical;

h_m = espessura média na direção vertical medida na metade do degrau;

h_p = espessura do patamar;

α = ângulo de inclinação da escada;

e = altura do degrau.

Por trigonometria, obtém-se a seguinte relação (ARAÚJO, 2014b):

$$h_1 = \frac{h}{\cos \alpha} \quad (\text{equação 3})$$

Por fim o autor obtém a espessura média na direção vertical a partir da equação 4:

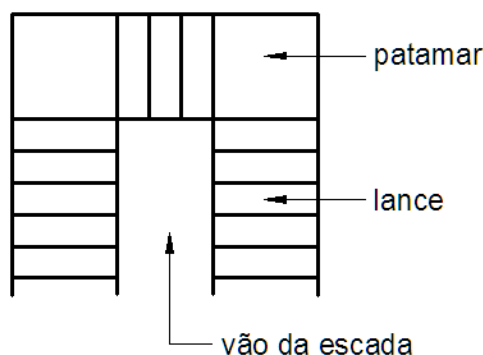
$$h_m = h_1 + \frac{e}{2} \quad (\text{equação 4})$$

A espessura de uma escada de concreto armado costuma ser definida apenas no dimensionamento estrutural do elemento, pois seu valor está diretamente associado à deformação e ao cálculo da taxa de armadura necessária.

3.1.4 Demais elementos

Guerrin e Lavour (2002, grifo do autor) definem outros elementos importantes das escadas. **Lance** é o nome atribuído a uma sequência ininterrupta de degraus e **patamar** é a parte sem degraus compreendido entre dois lances. O espaço deixado entre dois lances é chamado **vão da escada**. Esses conceitos podem ser melhor visualizados na figura 5.

Figura 5 – Nomenclatura de componentes da escada



(fonte: adaptado de GUERRIN; LAVOUR, 2002)

A parede que limita a escada é denominada **caixa da escada** e a altura livre vertical acima de um degrau é chamada de **desvão** (GUERRIN; LAVOUR, 2002, grifo do autor).

3.2 CLASSIFICAÇÕES

Atualmente, pode-se observar uma grande variabilidade de tipos de escadas de concreto armado, sendo possível classificá-las de acordo com inúmeras características. Duas classificações importantes de escadas dizem respeito à forma e à direção da armadura principal.

3.2.1 Quanto à forma

Segundo Araújo (2014b, p. 65), “As escadas dos edifícios são projetadas nas mais variadas formas e dimensões, dependendo do espaço disponível, do tráfego de pessoas e de aspectos arquitetônicos.”. Cabe ressaltar as principais formas de escadas:

- a) retangular,
 - com patamar;
 - sem patamar;
- b) circular ou helicoidal;
- c) com laje adjacente ou com degraus isolados.

O dimensionamento e a comparação proposta por este trabalho englobará apenas as escadas retangulares.

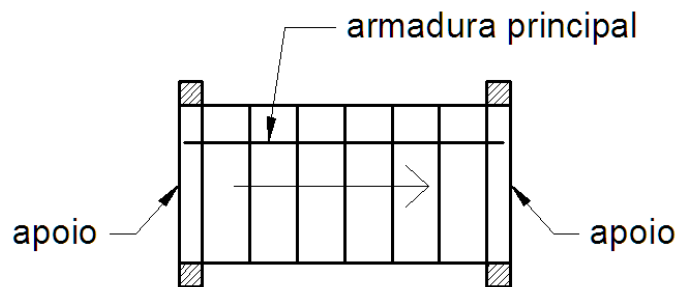
3.2.2 Quanto à direção da armadura principal

De acordo com Araújo (2014b), a posição dos apoios define a direção da armadura principal da escada, que pode ser armada longitudinalmente, transversalmente ou nas duas direções.

3.2.2.1 Escada armada longitudinalmente

Em uma escada armada longitudinalmente, a armadura principal está disposta na mesma direção do sentido de subida da escada. Nesse tipo de escada os apoios costumam estar localizados no início e no fim de um lance da escada, conforme ilustra a figura 6.

Figura 6 – Escada armada longitudinalmente

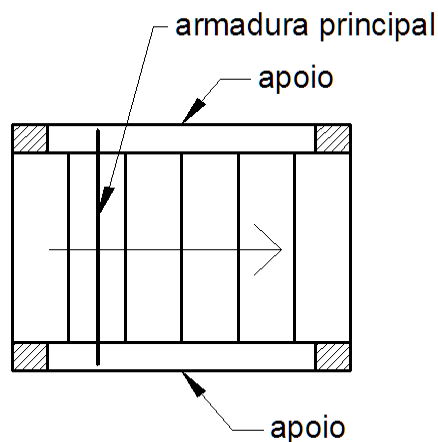


(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

3.2.2.2 Escada armada transversalmente

As escadas armadas transversalmente são sustentadas nas suas bordas por vigas inclinadas ou paredes. A armadura principal está disposta na direção transversal ao sentido de subida da escada, conforme mostra a figura 7.

Figura 7 – Escada armada transversalmente

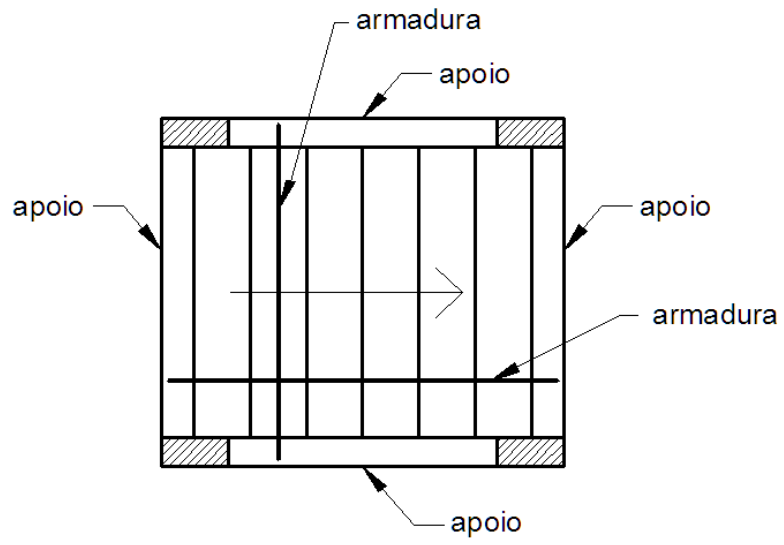


(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

3.2.2.3 Escada armada nas duas direções

Também chamada de escada armada em cruz, a escada armada nas duas direções possui apoios nos dois sentidos, conforme ilustra a figura 8.

Figura 8 – Escada armada em duas direções



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

4. CARREGAMENTOS

Conforme descrito na Norma NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), os carregamentos são classificados de acordo com sua variabilidade no tempo, sendo divididos em três categorias:

- a) permanentes;
- b) acidentais;
- c) excepcionais.

Este capítulo abordará os principais carregamentos permanentes e acidentais atuantes em escadas de concreto armado.

4.1 CARREGAMENTOS PERMANENTES

A Norma NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1) define que “Este tipo de carga é constituído pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes.”.

4.1.1 Peso próprio

Conforme descrito por Araújo (2014b), o carregamento de peso próprio deve ser considerado no cálculo como uma carga por área de projeção horizontal da escada. Todavia, o cálculo é diferente para a parte inclinada, com degraus e para o patamar.

4.1.1.1 Peso da escada na parte inclinada

Para cálculo do peso próprio na parte inclinada, deve-se utilizar a espessura média da escada, conforme a equação 5 (ARAÚJO, 2014b):

$$q_p = \gamma_c h_m \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

q_p = carregamento de peso próprio da parte inclinada da escada, em kN/m²;

γ_c = peso específico do concreto, 25 kN/m³;

h_m = espessura média da parte inclinada da escada, em m.

4.1.1.2 Peso do patamar

A carga por área do peso próprio do patamar é determinada pela equação 6:

$$q_{pat} = \gamma_c h_p \quad (\text{equação 6})$$

Sendo:

q_{pat} = carregamento de peso próprio do patamar, em KN/m²;

γ_c = peso específico do concreto, 25 kN/m³;

h_p = espessura do patamar, em m.

4.1.2 Revestimento

A carga de revestimento também é considerada para o cálculo como uma carga vertical por metro quadrado atuando na projeção horizontal da escada. De acordo com Araújo (2014b), deve-se conhecer o material utilizado como revestimento para, a partir do seu peso específico, determinar com precisão esse carregamento.

Na falta de determinação experimental do peso específico do material utilizado como revestimento, a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) recomenda que se utilize os valores do quadro 1.

Quadro 1 – Peso específico dos materiais de construção

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
1 Rochas	Arenito	26
	Basalto	30
	Gneiss	30
	Granito	28
	Mármore e calcáreo	28
2 Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22
	Cimento amianto	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Tijolos furados	13
	Tijolos maciços	18
	Tijolos sílico-calcáreos	20
3 Revestimentos e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
4 Madeiras	Pinho, cedro	5
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvirá, guatambu, grápia	8
	Angico, cabriuva, ipê róseo	10
5 Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
	Zinco	72
6 Materiais diversos	Alcatrão	12
	Asfalto	13
	Borracha	17
	Papel	15
	Plástico em folhas	21
	Vidro plano	26

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 2)

Conhecendo o material e sua espessura, pode-se calcular a carga de revestimento a partir da equação 7.

$$q_r = \gamma_r \times h_r \quad (\text{equação 7})$$

Sendo:

q_r = carga de revestimento, em kN/m²;

γ_r = peso específico do material de revestimento, em kN/m³

h_r = espessura do revestimento, em m.

Para os casos em que o material não é conhecido, Cunha e Souza (1998) recomendam que seja utilizado o valor de 1 kN/m².

4.1.3 Parapeitos

Rocha (1974, p. 54) define que o parapeito “[...] se apoia nas vigas laterais, salvo o caso de escadas sem vigas, onde o seu peso pode ser distribuído por metro quadrado de projeção horizontal.”.

Enquanto Araújo (2014b), afirma que o peso do parapeito deve ser considerado como carga por metro linear, a menos que ele esteja apoiado em vigas laterais inclinadas. Essa carga pode ser calculada pela equação 8.

$$q_{\text{par}} = \gamma_a \times P \times t \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

q_{par} = carga do parapeito, em kN/m;

γ_a = peso específico da alvenaria, em kN/m³

P = altura do parapeito, em m;

t = espessura da parede, em m.

A NBR 6120 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) recomenda os seguintes valores para o peso específico da alvenaria:

- a) alvenaria de tijolos furados: 13 kN/m³;

b) alvenaria de tijolos maciços: 18 kN/m³.

4.2 CARREGAMENTOS ACIDENTAIS

Segundo a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980), são carregamentos provenientes do uso da edificação, como por exemplo, o peso de pessoas, móveis e utensílios. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) complementa a definição ao afirmar que os valores utilizados de cargas acidentais possuem de 25% a 35% de chance de serem ultrapassados em um período de 50 anos.

4.2.1 Carga acidental na escada

O carregamento acidental ou sobrecarga de uma escada é definido pela NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980), Norma vigente responsável por padronizar os valores de carga acidental para cálculo de estruturas de edificações. Para escadas, a Norma recomenda a utilização de uma carga acidental distribuída para escadas comuns, onde os degraus e a laje da escada atuam de forma monolítica. Já para o caso de escadas com degraus isolados, a Norma especifica uma carga acidental concentrada.

4.2.1.1 Carga acidental distribuída

A NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) recomenda a adoção dos seguintes valores mínimos:

- a) com acesso ao público: 3 kN/m²;
- b) sem acesso ao público: 2,5 kN/m².

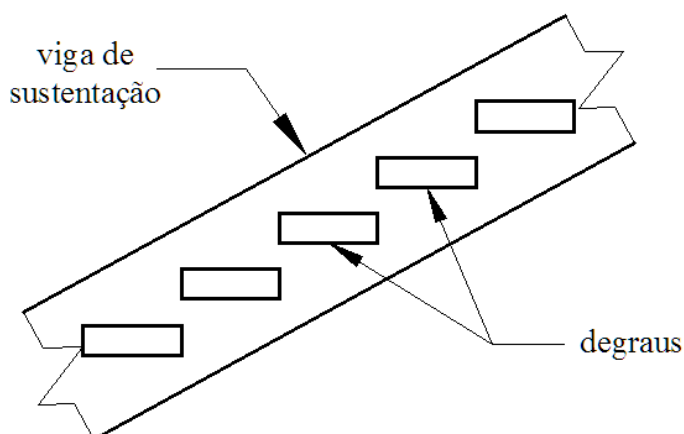
Entretanto, Rocha (1974) considera que o valor pode ser maior, dependendo da quantidade de pessoas que a escada deve comportar e recomenda os seguintes valores:

- a) escadas secundárias: 2 a 2,5 kN/m²;
- b) escadas de edifícios residenciais: 2,5 a 3 kN/m²;
- c) escadas de edifícios públicos: 4 a 5 kN/m².

4.2.1.2 Carga acidental para escadas com degraus isolados

A escada com degraus isolados é caracterizada por não possuir uma laje conectando os degraus, conforme mostra a figura 9.

Figura 9 – Escada com degraus isolados



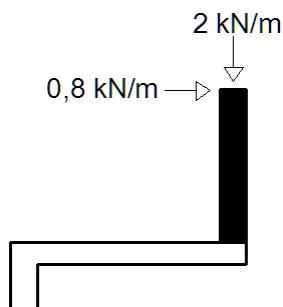
(fonte: adaptado de CUNHA; SOUZA, 1998)

Para esse tipo de escada, a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) recomenda que os degraus devem ser dimensionados com uma carga concentrada acidental de 2,5 kN na posição mais desfavorável. Caso a escada de degraus isolados seja suportada por apenas uma viga de sustentação em uma extremidade da escada, sabe-se que a posição mais desfavorável será na extremidade oposta. Para os demais casos, deve-se calcular a posição da carga concentrada que produz o maior momento fletor.

4.2.2 Carga acidental no parapeito

Além do peso próprio do parapeito, a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) recomenda a aplicação de uma carga vertical de 2 kN/m somada a uma carga horizontal de 0,8 kN/m, aplicada na altura do corrimão. A figura 10 ilustra esse carregamento.

Figura 10 – Cargas acidentais no parapeito



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

4.3 COMBINAÇÕES DE CARGAS

A Norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 66) afirma que um carregamento “[...] é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido.”. A Norma define também que a combinação de cargas tem a função de determinar as piores solicitações incidentes na estrutura, a fim de verificar a segurança em relação aos estados limites último e estados limites de serviço a partir de combinações últimas e combinações de serviços, respectivamente.

4.3.1 Combinação última normal

Para escadas de concreto armado, pode-se verificar a segurança no estado limite último a partir de uma combinação última normal. A NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 6), estabelece os critérios sobre ações permanentes e variáveis a serem considerados nessa combinação de cargas:

- a) ações permanentes devem figurar em todas as combinações de ações;
- b) ações variáveis nas combinações últimas normais: em cada combinação última, uma das ações variáveis é considerada como principal, admitindo-se que ela atue com seu valor característico F_k , as demais ações variáveis são consideradas como secundárias, admitindo-se que elas atuem com seus valores reduzidos de combinação $\Psi_0 F_k$.

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), as combinações últimas normais são dadas pela equação 9.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{Gi,k} + \gamma_q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{Qj,k} \right] \quad (\text{equação 9})$$

Sendo:

F_d = valor de cálculo da combinação última, em kN/m ou kN/m²;

γ_g = coeficiente de ponderação das cargas permanentes;

$F_{G,k}$ = valor característico das ações permanentes, em kN/m ou kN/m²;

γ_q = coeficiente de ponderação das cargas variáveis;

$F_{Q1,k}$ = valor característico da carga variável considerada principal para a combinação, em kN/m ou kN/m²;

Ψ_0 = fator de redução das cargas variáveis secundárias;

$F_{Q,k}$ = valor característico das demais cargas variáveis, em kN/m ou kN/m².

Em relação aos coeficientes de ponderação das cargas permanentes, a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 8) estabelece que eles “[...] majoram os valores representativos das ações permanentes que provocam efeitos desfavoráveis e minoram os valores representativos daquelas que provocam efeitos favoráveis para a segurança da estrutura.”. Particularizando para escadas de concreto armado, as ações permanentes são sempre desfavoráveis para a estrutura. O quadro 2 apresenta os valores de γ_g para as combinações últimas normais consideradas separadamente.

Quadro 2 – Coeficiente de ponderação das cargas permanentes consideradas separadamente

Tipo de ação	γ_g
Peso próprio de estruturas metálicas	1,25
Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,3
Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35
Elementos construtivos industrializados	1,35
Elementos construtivos industrializados com adições no local	1,4
Elementos construtivos em geral e equipamentos	1,5

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003)

Caso as cargas permanentes estejam agrupadas, a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) recomenda a adoção dos seguintes valores para coeficientes de ponderação:

- a) 1,35 para edificações onde as cargas acidentais superam 5 kN/m²;
- b) 1,4 para edificações onde as cargas acidentais sejam inferiores a 5 kN/m².

Em relação às cargas variáveis, a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 10) destaca que os coeficientes de ponderação “[...] majoram os valores representativos das ações variáveis que provocam efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura.”. A Norma ainda recomenda que as ações variáveis favoráveis à segurança da estrutura não devem ser consideradas na composição das combinações de cargas. Para os casos em que cargas variáveis em geral, desfavoráveis a segurança forem consideradas separadamente, a Norma recomenda que o coeficiente de ponderação γ_q seja igual a 1,5. Caso as cargas variáveis desfavoráveis à segurança estejam agrupadas, a Norma aconselha a adoção dos seguintes valores:

- a) 1,5 para edificações onde as cargas acidentais superam 5 kN/m²;
- b) 1,4 para edificações onde as cargas acidentais sejam inferiores a 5 kN/m².

Com relação ao fator de redução das cargas variáveis secundárias Ψ_0 , os seguintes valores podem ser adotados para escadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003):

- a) 0,5 para edificações residenciais e demais edificações onde não há elevada concentração de pessoas;
- b) 0,7 para edificações comerciais e de acesso público, onde há elevada concentração de pessoas.

4.3.2 Combinações de serviço

Conforme descrito na NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), pode-se verificar a segurança para os estados limites de serviço a partir de três tipos de combinações:

- a) quase permanentes de serviço;

- b) frequentes de serviço;
- c) raras de serviço.

4.3.2.1 Combinação quase permanente de serviço

O estado limite de serviço a ser verificado é o de deformações excessivas, assim, é usual a utilização das combinações quase permanentes de serviço. Segundo a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), esse tipo de combinação é caracterizado por atuar em grande parte do período de vida útil da estrutura. As combinações quase permanentes de serviço são dadas pela equação 10.

$$F_{d, \text{serv}} = \sum_{i=1}^m F_{G_i, k} + \sum_{j=1}^n \Psi_{2j} F_{Q_j, k} \quad (\text{equação 10})$$

Sendo:

$F_{d, \text{serv}}$ = valor de cálculo da combinação quase permanente de serviço, em kN/m ou kN/m²;

$F_{G, k}$ = valor característico das cargas permanentes, em kN/m ou kN/m²;

Ψ_2 = fator de redução das cargas variáveis para combinações de serviço;

$F_{Q, k}$ = valor característico das cargas variáveis, em kN/m ou kN/m².

Conforme demonstrado na equação 10, todas as cargas variáveis são consideradas da mesma forma nas combinações quase permanentes, não havendo necessidade de classificar as ações variáveis entre principal ou secundárias. De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), o fator de redução Ψ_2 pode assumir os seguintes valores:

- a) 0,3 para edificações residenciais e demais edificações onde não há elevada concentração de pessoas;
- b) 0,4 para edificações comerciais e de acesso público, onde há elevada concentração de pessoas.

4.3.2.2 Combinação rara de serviço

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 68), as combinações raras “[...] ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura,

e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de formação de fissuras.”. A NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) estabelece que as combinações raras são calculadas pela equação 11:

$$F_{d, \text{serv}} = \sum_{i=1}^m F_{G_i, k} + F_{Q1, k} \sum_{j=2}^n \Psi_{1j} F_{Q_j, k} \quad (\text{equação 11})$$

Sendo:

$F_{d, \text{serv}}$ = valor de cálculo da combinação rara de serviço, em kN/m ou kN/m²;

$F_{G, k}$ = valor característico das cargas permanentes, em kN/m ou kN/m²;

$F_{Q1, k}$ = valor característico da carga variável considerada principal para a combinação, em kN/m;

Ψ_1 = fator de redução de cargas variáveis para combinações de serviços;

$F_{Q, k}$ = valor característico das demais cargas variáveis, em kN/m ou kN/m².

Nas combinações raras, a ação variável principal é tomada com seu valor característico, enquanto as ações variáveis secundárias são reduzidas pelo coeficiente Ψ_1 , que pode assumir os seguintes valores:

- a) 0,4 para edificações residenciais e demais edificações onde não há elevada concentração de pessoas;
- b) 0,6 para edificações comerciais e de acesso público, onde há elevada concentração de pessoas.

5. DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO

Este capítulo apresentará as equações utilizadas no dimensionamento à flexão das escadas de concreto armado. Neste trabalho, o dimensionamento consistirá em determinar a área de aço necessária e o volume de concreto de cada escada calculada.

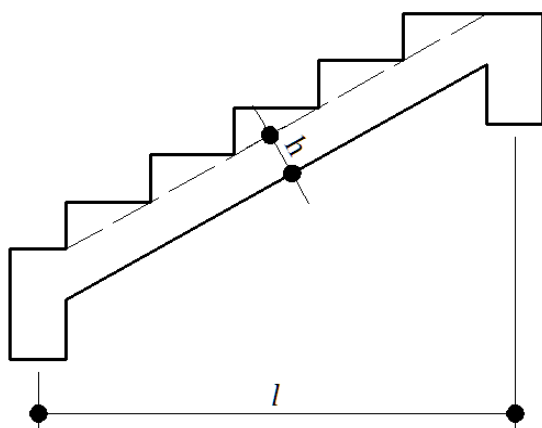
5.1 CÁLCULO DO MOMENTO FLETOR DE CÁLCULO

Após fazer as combinações últimas normais, descritas no capítulo anterior, parte-se para o cálculo do momento fletor de cálculo. A seguir serão apresentadas as equações do momento fletor para cada tipo de escada.

5.1.1 Escada armada longitudinalmente

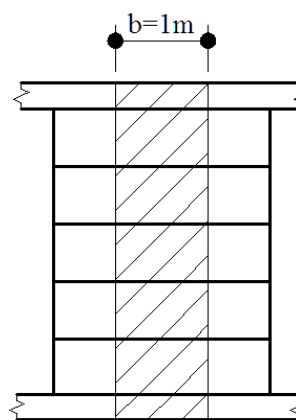
De acordo com Cunha e Souza (1998), deve-se utilizar este esquema estrutural quando não existirem apoios ao longo da escada. Araújo (2014b, grifo do autor) afirma que esse tipo de escada pode ser calculado como uma viga de largura b , altura h e vão l , conforme ilustram as figuras 11 e 12.

Figura 11 – Vão e espessura de cálculo de escada armada longitudinalmente



(fonte: elaborado pelo autor)

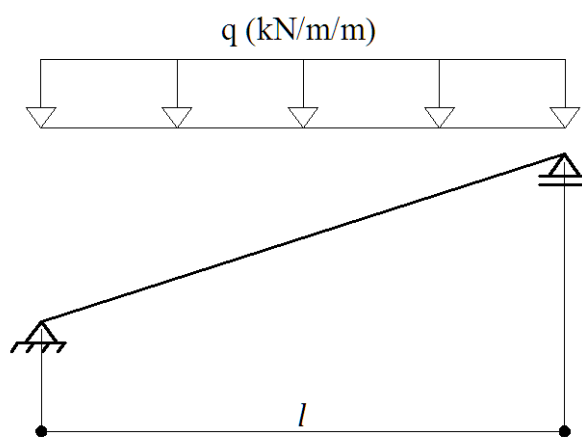
Figura 12 – Largura de cálculo de escada armada longitudinalmente



(fonte: elaborado pelo autor)

Araújo (2014b, p. 77, grifo do autor), alerta que “Esse tipo de escada pode exigir valores elevados para a espessura h da laje, pois não se pode mais contar com a colaboração dos degraus na resistência.”. Conforme visualizado na figura 13, deve-se considerar para o cálculo que a viga possui largura $b=1m$. Dessa forma, os carregamentos deixam de ser relacionados a uma área e passam a ser uma carga linear para cada metro de largura da escada. O resultado do dimensionamento também segue esse princípio, ou seja, é uma taxa de armadura que deve ser distribuída ao longo de cada metro de largura da escada. Para escadas armadas longitudinalmente com apenas um lance, o cálculo segue o modelo da figura 13.

Figura 13 – Modelo de cálculo para escada armada longitudinalmente com apenas um lance



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

É importante ressaltar que o carregamento e o vão da escada são tomados em suas respectivas projeções horizontais. O momento fletor máximo para escadas armadas longitudinalmente com apenas um lance é calculado pela equação 12:

$$M_d = \frac{ql^2}{8} \quad (\text{equação 12})$$

Sendo:

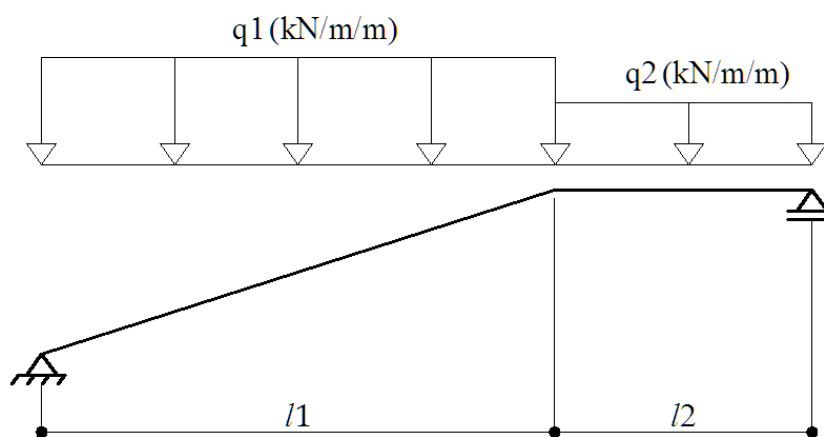
M_d = momento fletor de cálculo, em kNm/m;

q = carregamento atuante na escada, proveniente de uma combinação última normal, em kN/m/m;

l = distância entre os eixos dos apoios, em m.

Para os casos em que a escada possui um patamar entre os apoios, a equação 11 não é válida, pois o carregamento no patamar difere do carregamento na parte inclinada da escada, devido à ausência dos degraus. Assim, devem ser considerados dois carregamentos, conforme ilustra a figura 14.

Figura 14 – Modelo de cálculo para escada armada longitudinalmente com patamar



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

5.1.2 Escada armada transversalmente

Neste tipo de escada, os apoios estão dispostos nas bordas e apoiam a escada ao longo do seu comprimento. Dessa forma, o dimensionamento de escadas armadas transversalmente costuma resultar em pequenas taxas de armadura, visto que o vão costuma ser pequeno se comparado com o vão das escadas armadas longitudinalmente. Assim como acontece nas escadas armadas longitudinalmente, o dimensionamento é feito para uma largura de 1 metro, exceto para a escada com degraus isolados. O momento fletor é determinado pelas condições de apoio. As escadas armadas transversalmente podem ser apoiadas nas duas bordas ou engastadas em apenas uma extremidade.

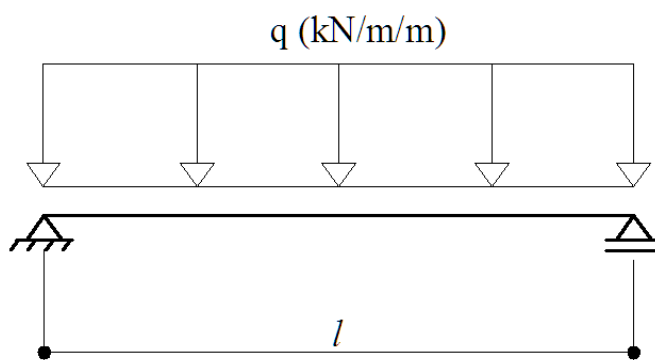
5.1.2.1 Escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente

De acordo com Araújo (2014b), as cargas provenientes dos parapeitos devem ser desconsideradas no dimensionamento deste tipo de escada, por incidirem diretamente nas duas vigas de apoio situadas nas bordas da escada. O autor ainda considera que os degraus colaboram

na resistência, fazendo com que a espessura utilizada para cálculo seja a espessura média h_m , definida na equação 4.

Entretanto, Melges et al. (1997) recomendam que se utilize a espessura h_1 , para dimensionamento, visto que não se dispõe da espessura h_m em todos os pontos da escada. O modelo de cálculo de uma escada armada transversalmente com vigas laterais é apresentado na figura 15.

Figura 15 – Modelo de cálculo de uma escada armada transversalmente com vigas laterais



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

O momento fletor é dado pela equação 13:

$$M_d = \frac{ql^2}{8} \quad (\text{equação 13})$$

Sendo:

M_d = momento fletor de cálculo, em kNm/m;

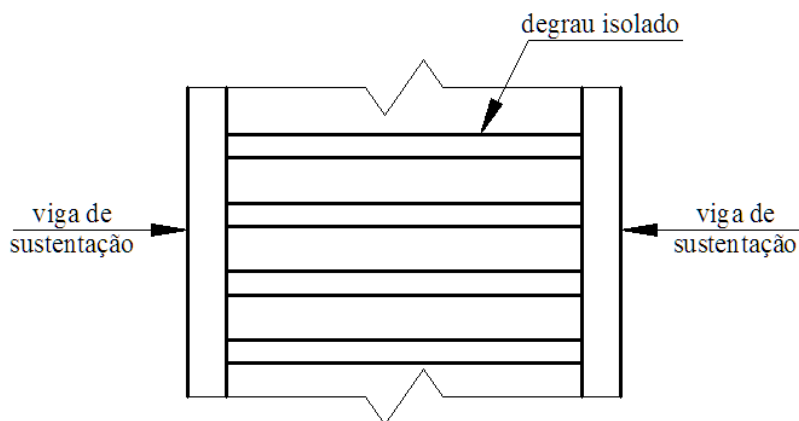
q = carregamento atuante na escada, em kN/m/m;

l = distância entre os eixos dos apoios, em m.

5.1.2.2 Escada apoiada em vigas laterais com degraus isolados

Neste tipo de escada, cada degrau é uma laje simplesmente apoiada em duas vigas de sustentação, conforme ilustra a figura 16.

Figura 16 – Escada com degraus isolados apoiada em vigas laterais

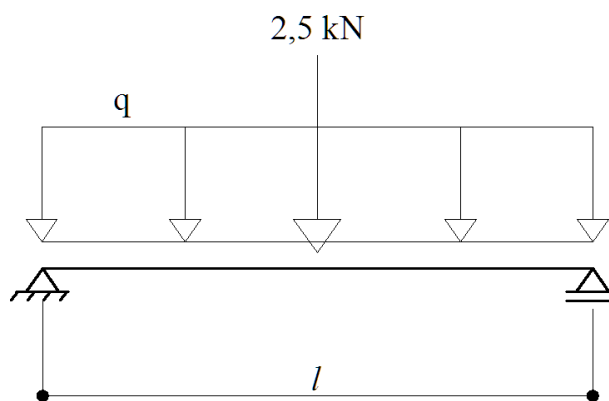


(fonte: elaborado pelo autor)

O carregamento deste tipo de escada difere da anterior em relação à carga accidental. Para escadas com degraus isolados, a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980) determina que deve ser considerado uma carga accidental de 2,5 kN na posição mais desfavorável, ou seja, na posição que amplifica o momento fletor solicitante. Para uma escada com esta configuração de apoios, sabe-se que a posição mais desfavorável é no meio do vão. A figura 17 ilustra o modelo de cálculo de uma escada de degraus isolados apoiada em vigas laterais.

A partir do carregamento apresentado na figura 17, calcula-se o momento fletor máximo pela equação 14.

Figura 17 – Modelo de cálculo de escada armada transversalmente apoiada em vigas laterais



(fonte: elaborado pelo autor)

$$M_d = \left(\frac{qal^2}{8} + \frac{2,5l}{4} \right) \quad \text{(equação 14)}$$

Sendo:

M_d = momento fletor de cálculo, em kNm;

q = combinação de carga que agrupa o peso próprio e o peso do revestimento, em kN/m;

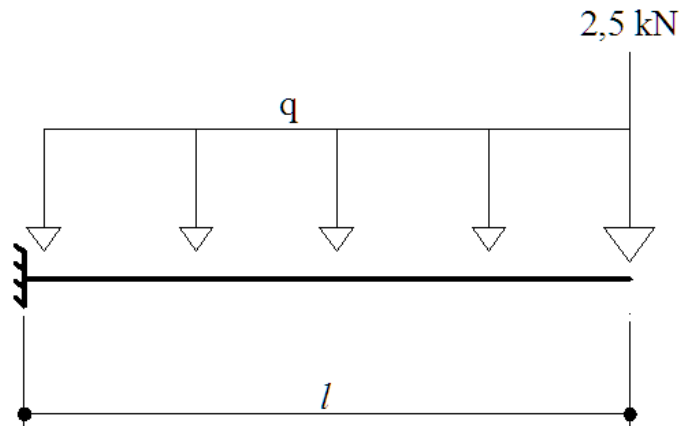
a = largura do degrau, em m;

l = distância entre os eixos das vigas de sustentação, em m.

5.1.2.3 Escada engastada em viga lateral com degraus isolados

Assim como na escada anterior, cada degrau desta escada é solicitado de forma independente dos demais. Dessa forma, o cálculo do momento deve ser feito em função da largura do degrau, e não mais em função de uma largura de 1 metro. O modelo de cálculo de cada degrau é apresentado na figura 18.

Figura 18 – Modelo de cálculo de escada engastada em viga lateral com degraus isolados



(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014b)

Segundo Araújo (2014b), a carga concentrada de 2,5 kN deve ser a única carga acidental considerada para dimensionar a escada. O autor ainda define o cálculo do momento característico na seção do engaste pela equação 15:

$$M_d = -\left(\frac{qal^2}{2} + 2,5l\right) \quad (\text{equação 15})$$

Sendo:

M_d = momento fletor de cálculo no engaste, em kNm;

q = carregamento permanente na escada, em kN/m;

a = largura do degrau, em m;

l = distância entre o eixo da viga e a extremidade livre da escada, em m.

Entretanto, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) estabelece que o momento solicitante de cálculo de lajes em balanço ainda deve ser multiplicado pelo coeficiente γ_n , majorando o momento que será utilizado no dimensionamento. A tabela 1 apresenta os valores de γ_n em função da espessura do degrau isolado.

Tabela 1 – Valores do coeficiente γ_n para lajes em balanço

h (cm)	≥19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
γ_n	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

5.1.3 Escada armada nas duas direções

Segundo Cunha e Souza (1998), uma escada é armada em duas direções quando a mesma possui sustentação em pelo menos três bordas. Os autores ainda afirmam que a escada pode ser calculada como uma laje retangular simplesmente apoiada nos quatro lados, ou engastada nos dois apoios longitudinais e apoiada nos dois apoios transversais, desde que exista continuidade entre a laje da escada e as lajes dos pavimentos de saída e chegada.

De acordo com Rocha (1974), deve-se adotar a espessura média h_m para calcular a armadura na direção transversal e a espessura da laje situada abaixo dos degraus h para calcular a armadura na direção longitudinal. Assim como ocorre em outros tipos de escadas, o momento é calculado para uma faixa de 1 metro de largura, tomado na direção desejada.

Os momentos fletores de uma escada armada em duas direções simplesmente apoiada nos quatro lados podem ser calculados pelas equações 16 e 17 (ARAÚJO, 2014a):

$$M_x = 0,001\alpha_x q l_x^2 \quad (\text{equação 16})$$

$$M_y = 0,001\alpha_y q l_x^2 \quad (\text{equação 17})$$

Sendo:

M_x = momento fletor na direção do menor vão da escada, em kNm/m;

α_x = coeficiente adimensional para a direção do menor vão;

α_y = coeficiente adimensional para a direção do maior vão;

q = carregamento uniforme da escada, em kN/m/m;

l_x = distância entre os eixos dos apoios na direção do menor vão da escada, em m;

M_y = momento fletor na direção do maior vão da escada, em kNm/m.

Os coeficientes α são retirados da tabela 2, seu valor depende da direção em que se deseja calcular o momento e também da relação entre o menor e o maior vão da escada (l_x/l_y).

Tabela 2 – Coeficiente α para laje retangular simplesmente apoiada nas quatro bordas

l_x/l_y	x	y
0,50	100,0	36,7
0,55	93,4	38,8
0,60	86,9	40,7
0,65	80,5	42,3
0,70	74,3	43,5
0,75	68,3	44,2
0,80	62,7	44,6
0,85	57,6	44,9
0,90	52,8	45,0
0,95	48,3	44,7
1,00	44,2	44,2

(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2014a)

5.2 CÁLCULO DA ARMADURA

Após a obtenção do momento fletor, parte-se para o dimensionamento da armadura necessária para resistir ao esforço de flexão que a escada está submetida.

5.2.1 Cálculo da posição da linha neutra

Define-se linha neutra como a posição na seção transversal do elemento estrutural em que as tensões são nulas. A posição x da linha neutra é calculada pela equação 18 (CAMPOS FILHO, 2014).

$$x = \frac{d}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2M_d}{\alpha_c f_{cd} b d^2}} \right) \quad (\text{equação 18})$$

Sendo:

x = posição da linha neutra, em cm;

d = altura útil, em cm;

λ = relação entre a profundidade do diagrama retangular de compressão simplificado e a profundidade efetiva x da linha neutra;

M_d = momento fletor de cálculo, em kNm;

α_c = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm²;

b = largura da seção, em cm.

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o parâmetro λ é fixado em 0,8 para concretos com resistência característica à compressão menor do que 50 MPa. Para concretos com resistência característica à compressão maior do que 50 MPa, o parâmetro λ é calculado pela equação 19:

$$\lambda = 0,8 - \frac{(f_{ck} - 50)}{400} \quad (\text{equação 19})$$

O parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão α_c tem seu valor fixado em 0,85 para concretos com resistência à compressão inferiores à 50 MPa. Para concretos com f_{ck} situados entre 50 e 90 MPa, o parâmetro α_c é definido pela equação 20.

$$\alpha_c = 0,85 - \left[1 - \frac{(f_{ck} - 50)}{200} \right] \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

λ = relação entre a profundidade do diagrama retangular de compressão simplificado e a profundidade efetiva x da linha neutra;

α_c = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 136) define a altura útil d como sendo “[...] igual à distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração.”. De acordo com Bastos (2015), pode-se calcular a altura útil pela equação 21. O autor ainda afirma que pode-se tomar $\Phi=10$ mm como estimativa inicial.

$$d = h - c - \frac{\Phi}{2} \quad (\text{equação 21})$$

Sendo:

d = altura útil da seção, em cm;

h = altura total da seção, em cm;

c = cobrimento da armadura, em cm;

Φ = diâmetro da armadura tracionada, em cm.

O cobrimento c deve ser definido de acordo com a agressividade do ambiente em que a estrutura será implantada. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) divide os níveis de agressividade em classes, conforme apresentado no quadro 3.

Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p.17)

A partir da classe de agressividade ambiental, encontra-se o cobrimento recomendado pela Norma utilizando o quadro 4. Para escadas, podem ser utilizados os mesmos valores indicados para as lajes.

Quadro 4 – Correspondência entre a classe ambiental e o cobrimento

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

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

Por fim, a resistência de cálculo à compressão do concreto f_{cd} é calculada pela equação 22 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{equação 22})$$

Sendo:

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

γ_c = coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Para verificações no estado limite último, a NBR 6118 define o coeficiente γ_c igual a 1,4 para combinações normais de cargas.

5.2.2 Limitação da posição da linha neutra

Conforme prescrito na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a razão entre a posição da linha neutra x e a altura útil d deve ser limitada a fim de garantir que os elementos estruturais possuam um comportamento dúctil. Para vigas e lajes, a razão x/d deve ser menor do que os seguintes valores, que serão utilizados também para escadas:

- a) 0,45 para concretos com resistência característica à compressão menor do que 50 MPa;
- b) 0,35 para concretos com resistência característica à compressão situada entre 50 e 90 MPa.

Estabelecer este limite também é conveniente pois garante que a escada não estará no domínio 4 de deformação. Desta forma, evita-se a possibilidade de ocorrência de ruptura frágil e a necessidade do uso de armadura dupla.

5.2.3 Cálculo da armadura principal

A partir da posição da linha neutra, calcula-se a área de aço (armadura simples) necessária para resistir ao esforço de flexão na direção de apoio do elemento estrutural. De acordo com Campos Filho (2014), a equação 23 pode ser utilizada para os casos de flexão simples.

$$A_s = \frac{\alpha_c \lambda f_{cd} b x}{f_{yd}} \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

A_s = área de aço da seção, em cm²;

α_c = parâmetro de redução de resistência do concreto na compressão;

λ = relação entre a profundidade do diagrama retangular de compressão simplificado e a profundidade efetiva x da linha neutra;

f_{cd} = resistência de cálculo à compressão do concreto, em kN/cm²;

b = largura da escada, em cm;

x = posição da linha neutra, em cm;

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço, em kN/cm²;

A resistência de cálculo ao escoamento do aço f_{yd} é uma minoração da resistência característica ao escoamento do aço, conforme mostra a equação 24. De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o coeficiente γ_s deve ser igual a 1,15 para combinações normais do estado limite último.

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (\text{equação 24})$$

Onde:

f_{yk} = resistência característica ao escoamento do aço;

γ_s = coeficiente de ponderação da resistência do aço.

A NBR 6118 estabelece ainda taxas mínimas de armaduras ρ_{\min} em função do f_{ck} do elemento com seção retangular, conforme ilustrado no quadro 5.

Quadro 5 – Taxas mínimas de armadura de flexão

fck	Valores de ρ_{\min}^1 ($A_{s,\min}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256
¹⁾ Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado.															

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

Particularizando para as escadas, pode-se calcular a área de aço mínima da seção pela equação 25. Deve-se adotar a área de aço mínima sempre que ela for superior à área de aço calculada pela equação 23.

$$A_{s,\min} = \rho_{\min}bh \quad (\text{equação 25})$$

Sendo:

$A_{s,\min}$ = área de aço mínima da seção, em cm^2 ;

ρ_{\min} = taxa de armadura mínima de acordo com o f_{ck} ;

b = largura da escada, em cm;

h = espessura da escada, em cm.

5.2.4 Cálculo da armadura de distribuição

A estabilidade estrutural de escadas e lajes armadas em uma direção é dada pela armadura principal, que é disposta na direção dos apoios. Porém, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) recomenda a utilização de uma armadura de distribuição na direção transversal à direção da armadura principal, a fim de melhorar a ductilidade e controlar a fissuração. A área de aço utilizada como armadura de distribuição deve ser a que resultar no maior valor entre as equações 26, 27 e 28:

$$A_{s,dist} = \frac{A_s}{5} \quad (\text{equação 26})$$

$$A_{s,dist} = \frac{A_{s,min}}{2} \quad (\text{equação 27})$$

$$A_{s,dist} = 0,9 \text{ cm}^2/m \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

$A_{s,dist}$ = área de aço de distribuição;

A_s = área de aço principal;

$A_{s,min}$ = área de aço mínima.

Como visto anteriormente, os momentos fletores das escadas são tomados considerando que a seção possui 1 metro de largura. Para o cálculo da área de aço, da armadura mínima e da armadura de distribuição, é usual adotar a mesma lógica. Desta forma, o resultado será uma área de aço para cada metro, o que simplifica o dimensionamento e o cálculo do espaçamento das barras de aço. As exceções são as escadas com degraus isolados, onde a largura da laje a ser dimensionada deve ser igual à largura do degrau.

5.3 CÁLCULO DO VOLUME DE CONCRETO

Para escadas com laje adjacente conectando os degraus, pode-se calcular o volume de concreto a partir da equação 29. Já para as escadas com degraus isolados, utiliza-se a equação 30.

$$V = bh_m \quad (\text{equação 29})$$

$$V = abh_{deg}n \quad (\text{equação 30})$$

Sendo:

V = volume de concreto da escada;

b = largura da escada;

l = comprimento da escada;

h_m = espessura média da escada;

a = largura do degrau;

h_{deg} = espessura do degrau isolado;

n = número de degraus.

6. VERIFICAÇÃO QUANTO AO ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS

Paralelamente ao dimensionamento da escada, deve-se fazer a verificação da deformação. Este capítulo apresentará as deformações máximas permitidas pelas instruções normativas, além de descrever as equações utilizadas para cálculo das deformações das escadas.

6.1 DESLOCAMENTO MÁXIMO PERMITIDO

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), deve-se impor valores máximos de deslocamentos com os seguintes objetivos:

- a) garantir a aceitabilidade sensorial;
- b) evitar o surgimento de efeitos específicos que impeçam a utilização da edificação;
- c) evitar que o comportamento dos elementos estruturais se afaste das hipóteses consideradas no seu dimensionamento;
- d) evitar os efeitos em elementos não estruturais, como paredes e forros.

Como este trabalho analisa as escadas de forma isolada do resto da estrutura, serão verificados as deformações apenas do ponto de vista da aceitabilidade sensorial. O quadro 6 apresenta o deslocamento limite permitido, calculados a partir do vão l da escada.

Quadro 6 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

6.2 CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA

Em relação à verificação dos deslocamentos, A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 125) afirma que “[...] deve ser realizada através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.”. Para definição do valor do momento de inércia que será utilizado no cálculo da flecha, deve-se primeiramente verificar se a seção está fissurada.

6.2.1 Verificação do estágio

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) pondera que é necessário verificar a integridade do elemento pelo cálculo do momento de fissuração, para determinar o estágio de cálculo da seção considerada. O momento de fissuração é calculado pela equação 31.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (\text{equação 31})$$

Onde:

M_r = momento de fissuração;

α = fator que correlaciona de forma aproximada a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

f_{ct} = resistência à tração direta do concreto;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada.

O fator α é definido de acordo com a geometria da seção:

- a) 1,2 para seções T ou duplo T;
- b) 1,3 para seções I ou T invertido;
- c) 1,5 para seções retangulares.

A resistência à tração direta f_{ct} assume seu valor médio $f_{ct,m}$ nas verificações de deslocamentos, conforme descrito na NBR 6118. Para concretos de classes até C50, calcula-se $f_{ct,m}$ pela equação 32. Para concretos de classes C55 até C90, utiliza-se a equação 33.

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (\text{equação 32})$$

$$f_{ct,m} = 2,12\ln(1 + 0,11f_{ck}) \quad (\text{equação 33})$$

Onde:

$f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto, em MPa;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Para seções retangulares, o momento de inércia da seção bruta de concreto I_c e a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada y_t são calculados pelas equações 34 e 35, respectivamente.

$$I_c = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{equação 34})$$

$$y_t = \frac{h}{2} \quad (\text{equação 35})$$

Sendo:

b = largura da seção transversal;

h = altura da seção transversal.

Com o momento de fissuração calculado, deve-se calcular o momento atuante por meio de uma combinação rara e compará-los. Bastos (2015, p. 22) conclui que:

Se o momento fletor solicitante de uma seção na laje é maior que o momento fletor de fissuração, a seção está no estágio II, ou seja, está fissurada. Neste caso, deve-se considerar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e a posição da linha neutra deve ser calculada no estágio II.

Por outro lado, no caso do momento fletor solicitante na laje ser menor que o momento de fissuração, a seção está no estágio I, ou seja, não está fissurada. As deformações podem ser determinadas no estágio I, com o momento de inércia da seção bruta de concreto [...].

6.2.2 Cálculo do momento de inércia no estágio II

Para cálculo do momento de inércia no estágio II, deve-se homogeneizar a seção, ou seja, transformar a área de aço em uma área de concreto equivalente. Conforme descrito por Bastos (2015), pode-se calcular a posição da linha neutra no estágio II pela equação 36, considerando que não existe armadura dupla.

$$x_{II}^2 + \frac{2A_s\alpha_e x_{II}}{b} - \frac{2A_s d \alpha_e}{b} = 0 \quad (\text{equação 36})$$

Onde:

x_{II} = posição da linha neutra no estágio II, em cm;

A_s = área de aço tracionada proveniente do dimensionamento, em cm²;

α_e = relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;

b = largura da seção, em cm;

d = altura útil da seção, em cm.

Por ser uma equação de segundo grau, a equação 35 proporciona dois resultados. A raiz positiva da equação é a posição da linha neutra no estágio II, já a raiz negativa deve ser descartada.

O parâmetro α_e é calculado pela equação 37 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (\text{equação 37})$$

Onde:

E_s = módulo de elasticidade do aço;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto.

O módulo de elasticidade secante é calculado a partir da equação 38.

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (\text{equação 38})$$

Sendo α_i definido pela equação 39.

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1,0 \quad (\text{equação 39})$$

Onde:

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto, em MPa;

α_i = coeficiente de ponderação;

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto, em MPa;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o valor do módulo de elasticidade inicial do concreto E_{ci} é determinado em ensaios. Quando não forem realizados ensaios, pode-se calculá-lo pela equação 40 para concretos de classe até C50 ou pela equação 41 para concretos de classes C55 até C90.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{equação 40})$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (\text{equação 41})$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto, em MPa;

α_E = coeficiente de ponderação devido ao tipo de agregado;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Os valores de α_E variam de acordo com o agregado:

a) 1,2 para basalto e diabásio;

b) 1,0 para granito e gnaisse;

c) 0,9 para calcário;

d) 0,7 para arenito.

Com a posição da linha neutra no estágio II definida, calcula-se o momento de inércia no estágio II a partir da equação 42, considerando que não existe armadura dupla (BASTOS, 2015).

$$I_{II} = \frac{bx_{II}^3}{3} + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 \quad (\text{equação 42})$$

Sendo:

I_{II} = momento de inércia no estágio II, em cm^4 ;

b = largura da seção, em cm;

x_{II} = posição da linha neutra, em cm;

α_e = relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;

A_s = área de aço tracionada, em cm^2 ;

d = altura útil da seção, em cm.

6.2.3 Cálculo da rigidez equivalente

Após fazer a verificação do estágio e se necessário, o cálculo do momento de inércia no estágio II, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) recomenda que se faça o cálculo da rigidez equivalente pela equação 43.

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (\text{equação 43})$$

Sendo:

$(EI)_{eq,t0}$ = rigidez equivalente no tempo zero;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto;

M_r = momento de fissuração da escada, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

M_a = momento atuante máximo da escada, calculado por uma combinação rara de cargas;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada no estágio II.

É importante salientar que se o elemento estrutural não estiver fissurado, ou seja, estiver no estágio I, a rigidez equivalente $(EI)_{eq,t0}$ tomara seu valor máximo $E_{cs}I_c$. Isto pode ser facilmente verificado quando o termo I_{II} é zerado na equação 41.

6.3 CÁLCULO DA FLECHA IMEDIATA

Com a avaliação da rigidez equivalente já realizada, pode-se finalmente calcular a flecha imediata.

6.3.1 Escadas armadas em uma direção

Assim como foi feito no dimensionamento, considera-se que a escada armada em uma direção equivale a uma viga com 1 metro de largura. De forma geral, a flecha imediata proveniente de cargas distribuídas pode ser calculada pela equação 44 (HIBBELER, 2010).

$$f_{(t=0)dist} = k \cdot \frac{ql^4}{(EI)_{eq,t0}} \quad (\text{equação 44})$$

Sendo:

$f_{(t=0)\text{dist}}$ = flecha imediata de um carregamento distribuído, em cm;

k = coeficiente que leva em conta o tipo de vinculação e carregamento;

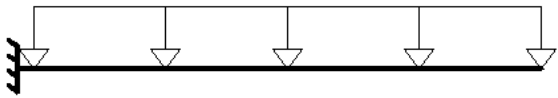
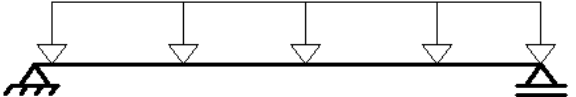
q = carregamento distribuído proveniente de uma combinação quase permanente, em kN/cm;

l = distância entre os eixos dos apoios da escada, em cm;

EI = rigidez equivalente, em kNcm².

O coeficiente k provém do cálculo da linha elástica. Para as escadas calculadas neste trabalho, o coeficiente k pode assumir os valores apresentados na figura 19.

Figura 19 – Valor do coeficiente k para cargas distribuídas

VINCULAÇÃO	k
	1/8
	5/384

(fonte: adaptado de HIBBELER, 2010)

Para cargas concentradas, utiliza-se a equação 45 como forma geral para cálculo de deslocamentos (HIBBELER, 2010).

$$f_{(t=0)\text{conc}} = k \cdot \frac{Pl^3}{(EI)_{\text{eq,t0}}} \quad (\text{equação 45})$$

Sendo:

$f_{(t=0)\text{conc}}$ = flecha imediata de um carregamento concentrado, em cm;

k = coeficiente que leva em conta o tipo de vinculação e a posição da carga;

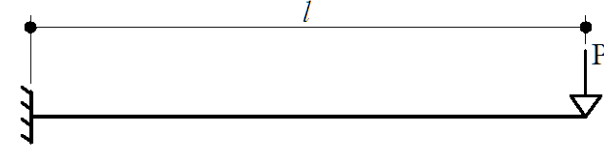
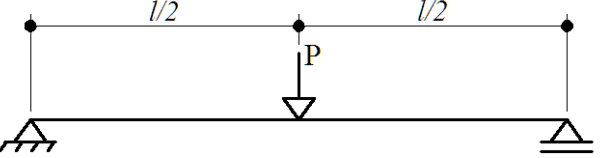
P = carga concentrada proveniente de uma combinação quase permanente, em kN;

l = distância entre os eixos dos apoios da escada, em cm;

EI = rigidez equivalente, em kNcm^2 .

O coeficiente k assume os valores ilustrados na figura 20 para cálculo da flecha devido a uma carga concentrada.

Figura 20 – Valor do coeficiente k para cargas concentradas

VINCULAÇÃO	k
	1/3
	1/48

(fonte: adaptado de HIBBELER, 2010)

De acordo com Hibbeler (2010), pode-se de forma simplificada, calcular a flecha máxima de uma viga a partir do método da superposição quando a mesma possuir vários carregamentos de naturezas distintas. Assim, deve-se somar as flechas das cargas concentradas e distribuídas para encontrar a flecha imediata de uma escada armada em uma direção.

6.3.2 Escada armada em duas direções

O cálculo da flecha imediata de uma escada armada em duas direções pode ser feito com a mesma metodologia utilizada no cálculo de deformações das lajes armadas em duas direções. De acordo com Bastos (2015), a flecha imediata de um carregamento distribuído pode ser calculada pela equação 46.

$$f_{(t=0)dist} = \frac{\beta}{12} \cdot \frac{ql^4}{(EI)_{eq,t0}} \quad (\text{equação 46})$$

Sendo:

$f_{(t=0)dist}$ = flecha imediata de um carregamento distribuído, em cm;

β = coeficiente que depende da vinculação e da razão entre os lados da laje;

q = carregamento distribuído proveniente de uma combinação quase permanente, em kN/cm;

l = menor vão da laje, em cm;

EI = rigidez equivalente, em kNcm².

O coeficiente β para lajes simplesmente apoiada nos 4 lados é apresentado na tabela 3. Seu valor depende da razão entre o maior vão l_y e o menor vão l_x da laje.

Tabela 3 – Valores do coeficiente β

l_y/l_x	β
1,00	4,76
1,05	5,26
1,10	5,74
1,15	6,2
1,20	6,64
1,25	7,08
1,30	7,49
1,35	7,9
1,40	8,29
1,45	8,67
1,50	9,03
1,55	9,39
1,60	9,71
1,65	10,04
1,70	10,34
1,75	10,62
1,80	10,91
1,85	11,16
1,90	11,41
1,95	11,65
2,00	11,89

(fonte: adaptado de BASTOS (2015))

6.4 CÁLCULO DA FLECHA DIFERIDA NO TEMPO

Conforme descrito na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), cargas de longa duração e fluência do concreto causam uma flecha adicional nos elementos estruturais. A flecha adicional diferida no tempo é calculada pela equação 47.

$$f_{(t=\infty)} = f_{(t=0)} \cdot \alpha_f \quad (\text{equação 47})$$

Onde:

$f_{(t=\infty)}$ = flecha diferida ao longo do tempo, em cm;

$f_{(t=0)}$ = flecha imediata, em cm;

α_f = fator adimensional.

O fator α_f é calculado com a equação 48.

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} \quad (\text{equação 48})$$

Sendo:

$\Delta\xi$ = coeficiente em função do tempo;

ρ' = taxa de armadura comprimida.

Como as escadas foram dimensionadas com armaduras simples, ρ' é igual a zero. O coeficiente $\Delta\xi$ é calculado pela equação 49 e tem seus valores em função do tempo retirados da tabela 4.

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (\text{equação 49})$$

Sendo:

$\xi(t)$ = valor do coeficiente no tempo em que se deseja estimar o valor da flecha diferida;

$\xi(t_0)$ = valor do coeficiente no tempo em que foi aplicada a carga de longa duração.

Tabela 4 – Valores do coeficiente ξ

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

(fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 127)

Com as flechas imediatas e diferidas no tempo calculadas, encontra-se o valor da flecha total por meio da equação 50.

$$f = f_{(t=0)} + f_{(t=\infty)} \quad (\text{equação 50})$$

Onde:

f = flecha total, em cm;

$f_{(t=0)}$ = flecha imediata, em cm;

$f_{(t=\infty)}$ = flecha diferida no tempo, em cm;

7. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Este capítulo tem por objetivo descrever o roteiro que foi utilizado na planilha Excel para dimensionar as escadas. Serão apresentadas as considerações geométricas e os parâmetros utilizados nos cálculos, bem como os resultados de cada dimensionamento.

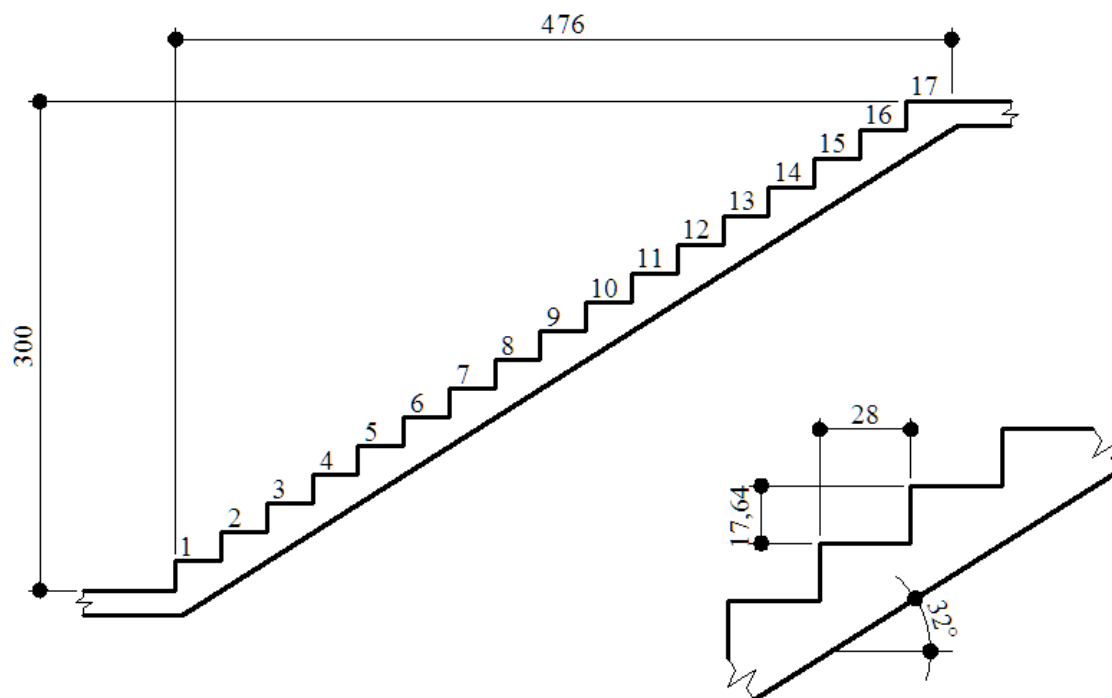
Visando a comparação do consumo de aço e do volume de concreto resultantes do dimensionamento, fez-se os cálculos dos seguintes tipos de escadas:

- a) escada armada longitudinalmente;
- b) escada armada transversalmente:
 - apoiada em vigas laterais com laje adjacente;
 - apoiada em vigas laterais com degraus isolados;
 - engastada em viga lateral com degraus isolados;
- c) armada em cruz.

7.1 CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS

Foram propostos 6 modelos geométricos de escadas, que nas dimensões em planta, diferem entre si apenas na largura. Os modelos possuem 17 degraus, distribuídos em um lance único com 4,76 metros de vão e a altura total da escada é 3,00 metros. Adotou-se esta altura pois 3 metros é um valor médio bastante utilizado como altura de piso a piso das edificações. A partir da lei de Blondel, apresentada na equação 1, calculou-se as dimensões dos degraus e vão total da escada. A figura 21 ilustra as características geométricas da escada e as dimensões dos degraus.

Figura 21 – Dimensões da escada proposta e dos degraus



(fonte: elaborado pelo autor)

7.1.1 Larguras propostas no dimensionamento

Para escolha das larguras das escadas, utilizou-se o conceito de unidade de passagem, descrito na seção 3.1.2.2 deste trabalho. Assim, fez-se o dimensionamento para 6 larguras:

- a) 1,10 m, correspondente à 2 unidades de passagem;
- b) 1,65 m, correspondente à 3 unidades de passagem;
- c) 2,20 m, correspondente à 4 unidades de passagem;
- d) 2,75 m, correspondente à 5 unidades de passagem;
- e) 3,30 m, correspondente à 6 unidades de passagem;
- f) 4,76 m, considerando que a escada possui as mesmas dimensões para largura e comprimento.

A escada armada em cruz só foi dimensionada e comparada com as demais para as larguras de 2,75 m, 3,30 m e 4,76 m. Adotou-se este critério pois uma laje só deve ser armada em duas direções quando a razão entre suas dimensões em planta estiverem de acordo com a equação 51 (BASTOS, 2015). Utiliza-se esta limitação pois os esforços na direção do maior vão costumam ser desprezíveis quando sua dimensão é muito maior do que a dimensão do menor vão.

$$\frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad (\text{equação 51})$$

Sendo:

l_y = maior lado da escada;

l_x = menor lado da escada.

7.1.2 Definição da espessura

Definir corretamente a espessura de uma escada é um dos passos mais importantes do dimensionamento, pois seu valor tem grande influência na determinação da área de aço e no cálculo da flecha. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) estabelece para as lajes os seguintes valores de espessuras mínimas:

- a) 8 cm para lajes de piso que não estão em balanço;
- b) 10 cm para lajes em balanço.

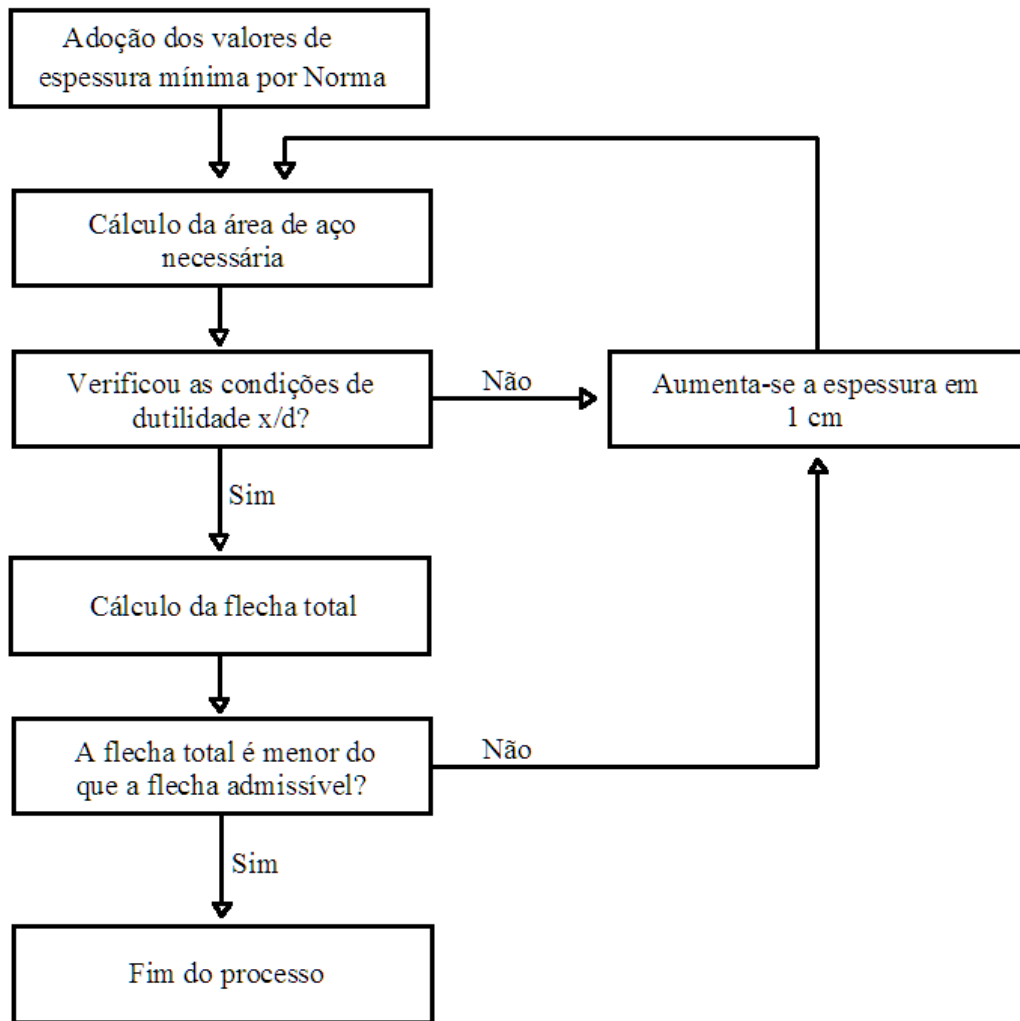
O valor mínimo de 8 cm foi adotado como espessura mínima para todos tipos de escadas consideradas neste trabalho, exceto para a escada engastada em viga lateral com degraus isolados, na qual foi utilizado 10 cm de espessura mínima. A definição da espessura segue as seguintes etapas:

- a) adoção dos valores mínimos para a espessura h da laje situada abaixo dos degraus ou para espessura do degrau isolado;
- b) cálculo da área de aço necessária;
- c) verificação da razão x/d com os limites definidos na seção 5.2.2;
- d) se aprovada, calcula-se a flecha total. Caso contrário, aumenta-se a espessura em 1 cm e retorna-se à etapa b;
- e) comparação da flecha total com a flecha admissível definida na seção 6.1;
- f) se aprovada, finaliza-se o processo. Caso contrário, aumenta-se a espessura em 1 cm e retorna-se à etapa b.

Este processo iterativo garante que as escadas sejam dimensionadas com a menor espessura possível que atende simultaneamente as verificações de estado limite último e estado limite de

serviço de deformações excessivas. Dessa forma, tem-se a certeza de que a escada foi dimensionada de forma a racionalizar o consumo de concreto. A figura 22 ilustra em forma de fluxograma o processo de determinação da espessura.

Figura 22 – Fluxograma do processo de definição da espessura



(fonte: elaborado pelo autor)

É importante salientar que os valores mínimos de espessura definidos pela Norma são os valores mínimos para a espessura dos degraus isolados e da laje adjacente h , apresentada na figura 4. O cálculo das espessuras h_l e h_m partem destes valores mínimos de h .

7.2 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Em relação aos materiais, a resistência característica à compressão do concreto f_{ck} foi considerada igual a 30 MPa. Já para o aço, utilizou-se 500 MPa para a resistência característica ao escoamento f_{yk} . Considerou-se granito como agregado graúdo do concreto. Dessa forma, o coeficiente de ponderação α_E , utilizado no cálculo do módulo de elasticidade inicial E_{ci} , é igual a 1.

Para cálculo do consumo de aço, utilizou-se o peso específico do aço $\gamma_{aço}$ igual a 78,5 kN/m³, conforme estabelecido pela NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980). No cálculo do momento de inércia no estágio II, adotou-se o valor de 210 GPa para o módulo de elasticidade do aço E_s , conforme recomendação da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

7.3 DEMAIS PARÂMETROS

Para cálculo do cobrimento, considerou-se que as escadas estão em um ambiente com classe de agressividade ambiental I, o que resulta em um cobrimento de 2 cm, conforme estabelecido pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Para cálculo das combinações de serviço, os fatores de redução de cargas acidentais Ψ_1 e Ψ_2 foram considerados igual a 0,6 e 0,4, respectivamente. No cálculo das combinações últimas normais, os coeficientes γ_g e γ_q foram tomados igual a 1,4 e o fator de redução Ψ_0 igual a 0,7. Como revestimento da escada, considerou-se um carregamento de 1 kN/m². Para as escadas com laje adjacente, que possuem sobrecarga distribuída, foi adotado um carregamento acidental de 3 kN/m².

No cálculo da flecha diferida das escadas, foi considerado que o carregamento de longa duração foi aplicado um mês depois da concretagem. Dessa forma, o coeficiente $\xi(t_0)$ assume o valor 0,68, conforme especificado na tabela 4. A verificação da flecha objetivou analisar a deformação da escada em um tempo maior do que 70 meses após sua implantação. Assim, o coeficiente $\xi(t)$ é igual a 2.

7.4 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

Para cada largura proposta, fez-se um quadro expondo os valores das principais variáveis utilizadas no dimensionamento e os resultados de consumo de aço e concreto para cada tipo de escada. A fim de facilitar a comparação e a interpretação dos valores, os principais resultados também foram plotados em gráficos que podem ser conferidos no Apêndice A.

7.4.1 Escada com largura de 1,10 metros

Para a escada com largura proposta de 1,10 m, as escadas armadas transversalmente conseguiram atender as verificações de estado limite último e estado limite de serviço com suas espessuras mínimas. Já para a escada armada longitudinalmente, necessitou-se que a laje adjacente tenha uma espessura h de 19 cm para que a flecha total resultasse em um valor menor do que a flecha admissível. Esta espessura se repetirá para as demais larguras, visto que o vão entre apoios desta escada independe da largura, fazendo com que a flecha e a taxa de armadura por metro se mantenha igual para todas as larguras propostas.

O cálculo da área aço resultou em armadura mínima apenas para a escada armada transversalmente apoiada em vigas laterais com laje adjacente. Esta escada e a escada armada transversalmente com degraus isolados apoiada em vigas laterais foram as únicas escadas em que o momento atuante M_a não foi superior ao momento de fissuração M_f . Desta forma, foi possível utilizar o momento de inércia da seção bruta I_c na verificação da flecha, que resultou em um valor praticamente nulo para estas 2 escadas. Os resultados podem ser visualizados no quadro 7.

7.4.2 Escada com largura de 1,65 metros

Com o aumento da largura para 1,65 m, foi necessário aumentar a espessura da escada engastada em viga lateral para 12 cm, para que a verificação da flecha fosse atendida. Por estarem em balanço, os degraus isolados desta escada resultam em áreas de aço sempre superiores às demais, de modo que, são necessários 67,96 kg de aço para armar os 17 degraus. Para esta largura, o momento atuante M_a foi inferior ao momento de fissuração apenas para a escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente. Os resultados podem ser vistos no quadro 8.

Quadro 7 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 1,10m

	ESCADA COM LARGURA 1,10m				
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente			
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Engastada em viga lateral com degraus isolados	
l (cm)	476	110	110	110	Dimensionamento
b (cm)	100	100	28	28	
h (cm)	19	8	8	10	
d (cm)	16,50	6,96	5,50	7,50	
M_d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	1,81	1,14	4,68	
x (cm)	2,05	0,18	0,53	2,57	
x/d	0,12	0,03	0,10	0,34	
A_{s,min} (cm²/m ou cm²/degrau)	2,85	1,42	0,34	0,42	
A_s (cm²/m ou cm²/degrau)	6,87	1,42	0,50	2,41	
A_{s,dist} (cm²/m ou cm²/degrau)	1,43	0,90	0,25	0,48	
Consumo de aço total (kg)	34,11	9,53	8,22	37,20	
Volume total (m³)	1,64	0,96	0,42	0,52	
Taxa (kg/m³)	20,83	9,96	19,63	71,05	
I_c (cm⁴)	57158,33	7044,28	1194,67	2333,33	Verificação da flecha
M_r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	6,47	1,30	2,03	
M_a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	1,30	0,81	3,34	
I_{eq} (cm⁴)	32722,34	7044,28	1194,67	1001,41	
f_(t=0) (cm)	0,763	0,007	0,006	0,083	
f_(t=∞) (cm)	1,007	0,009	0,008	0,110	
f (cm)	1,769	0,016	0,014	0,193	
f_{adm} (cm)	1,90	0,44	0,44	0,44	

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 8 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 1,65m

ESCADA COM LARGURA 1,65m				
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente		
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Engastada em viga lateral com degraus isolados
l (cm)	476	165	165	165
b (cm)	100	100	28	28
h (cm)	19	8	8	12
d (cm)	16,50	6,96	5,50	9,50
M_d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	4,08	1,84	7,91
x (cm)	2,05	0,41	0,88	3,18
x/d	0,12	0,06	0,16	0,33
A_{s,min} (cm²/m ou cm²/degrau)	2,85	1,42	0,34	0,50
A_s (cm²/m ou cm²/degrau)	6,87	1,42	0,82	2,98
A_{s,dist} (cm²/m ou cm²/degrau)	1,43	0,90	0,25	0,60
Consumo de aço total (kg)	51,17	14,29	19,08	67,96
Volume total (m³)	2,46	1,44	0,63	0,94
Taxa (kg/m³)	20,83	9,96	30,36	72,10
I_c (cm⁴)	57158,33	7044,28	1194,67	4032,00
M_r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	6,47	1,30	2,92
M_a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	2,92	1,32	5,65
I_{eq} (cm⁴)	32722,34	7044,28	1148,26	1622,01
f_(t=0) (cm)	0,763	0,035	0,029	0,273
f_(t=∞) (cm)	1,007	0,046	0,039	0,360
f (cm)	1,769	0,080	0,068	0,633
f_{adm} (cm)	1,90	0,66	0,66	0,66

Dimensionamento

Verificação da flecha

(fonte: elaborado pelo autor)

7.4.3 Escada com largura de 2,20 metros

Para a largura de 2,20 m, as espessuras das 2 escadas armadas transversalmente apoiadas em vigas laterais ainda não precisaram ser aumentadas, permanecendo no valor mínimo de 8 cm. Já para a escada engastada em viga lateral com degraus isolados, a espessura precisou ser aumentada para 17 cm, valor pouco inferior à altura do degrau, o que praticamente já inviabiliza a implantação deste tipo de escada para este vão.

Com o aumento expressivo de 5 cm da espessura da escada engastada em viga lateral com relação à largura anterior, a taxa de armadura por m³ de concreto diminuiu para 40,23 kg/m³. Isto ocorreu pois o consumo de aço aumentou de forma menos expressiva do que o volume de concreto.

Ao permanecer com a espessura mínima, a escada apoiada em vigas laterais com degraus isolados praticamente dobrou seu consumo de aço em relação à largura anterior, passando de 19,08 kg para 36,68 kg. Entretanto, apresentou consumo de concreto bastante inferior às demais. Os resultados podem ser visualizados no quadro 9.

Quadro 9 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 2,20m

ESCADA COM LARGURA 2,20m				
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente		
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Engastada em viga lateral com degraus isolados
l (cm)	476	220	220	220
b (cm)	100	100	28	28
h (cm)	19	8	8	17
d (cm)	16,50	6,96	5,50	14,50
M_d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	7,26	2,64	12,68
x (cm)	2,05	0,75	1,30	2,54
x/d	0,12	0,11	0,24	0,17
A_{s,min} (cm²/m ou cm²/degrau)	2,85	1,42	0,34	0,71
A_s (cm²/m ou cm²/degrau)	6,87	2,51	1,22	2,38
A_{s,dist} (cm²/m ou cm²/degrau)	1,43	0,90	0,25	0,48
Consumo de aço total (kg)	68,22	28,02	36,68	71,62
Volume total (m³)	3,28	1,91	0,84	1,78
Taxa (kg/m³)	20,83	14,64	43,79	40,23
I_c (cm⁴)	57158,33	7044,28	1194,67	11463,67
M_r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	6,47	1,30	5,86
M_a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	5,18	1,88	9,06
I_{eq} (cm⁴)	32722,34	7044,28	514,16	5032,29
f_(t=0) (cm)	0,763	0,109	0,202	0,345
f_(t=∞) (cm)	1,007	0,144	0,266	0,455
f (cm)	1,769	0,253	0,468	0,800
fadm (cm)	1,90	0,88	0,88	0,88

Dimensionamento

Verificação da flecha

(fonte: elaborado pelo autor)

7.4.4 Escada com largura de 2,75 metros

A escada armada em cruz foi incluída na comparação da largura de 2,75 m, visto que a relação l_y/l_x resulta em 1,73, valor inferior ao limite estabelecido na equação 47. Como era esperado para esse tipo de escada, a taxa de armadura na direção transversal foi maior do que a taxa na direção longitudinal, já que o vão na direção transversal é menor e desta forma resulta em um momento de cálculo maior. A altura útil difere nas duas direções pois utilizou-se a espessura h na direção longitudinal e h_l na direção transversal. Além disso, esta escada apresentou um momento atuante inferior ao momento de fissuração, e dessa forma, a flecha imediata foi calculada com seu momento de inércia integral.

A espessura da escada engastada em viga lateral com degraus isolados precisou ser aumentada para 22 cm para que a verificação da flecha fosse atendida. Como este valor é superior ao valor da altura do degrau, esta escada não foi dimensionada para as larguras propostas superiores a 2,75 m, pois seriam necessários valores ainda maiores de espessura.

A escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente ainda pôde ser dimensionada com sua espessura mínima de 8 cm. Porém, para esta largura o momento atuante M_a foi superior ao momento de fissuração M_r . Desta forma, esta escada teve sua inércia reduzida, tal como aconteceu para todos os outros tipos de escada.

A fim de obedecer ao valor limite admissível de flecha, a espessura do degrau isolado da escada apoiada em vigas laterais precisou ser aumentada para 9 cm. Os resultados podem ser verificados no quadro 10.

Quadro 10 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 2,75m

ESCADA COM LARGURA 2,75m						
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente			Escada armada em cruz	
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Engastada em viga lateral com degraus isolados	Long.	Transv.
l (cm)	476	275	275	275	476	275
b (cm)	100	100	28	28	100	
h (cm)	19	8	9	22	8	
d (cm)	16,50	6,96	6,50	19,50	5,50	6,96
M _d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	11,34	3,61	19,26	3,64	8,07
x (cm)	2,05	1,20	1,50	2,55	0,47	0,84
x/d	0,12	0,17	0,23	0,13	0,09	0,12
A _{s,min} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	2,85	1,42	0,38	0,92	1,20	1,42
A _s (cm ² /m ou cm ² /degrau)	6,87	4,03	1,41	2,40	1,58	2,80
A _{s,dist} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	1,43	0,90	0,28	0,48	-	-
Consumo de aço total (kg)	85,28	50,64	52,71	89,77	44,98	
Volume total (m³)	4,09	2,39	1,18	2,88	2,39	
Taxa (kg/m³)	20,83	21,17	44,74	31,17	18,80	
I _c (cm ⁴)	57158,33	7044,28	1701,00	24845,33	7044,28	
M _r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	6,47	1,64	9,81	6,47	
M _a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	8,10	2,58	13,76	5,76	
I _{eq} (cm ⁴)	32722,34	4101,42	659,82	12249,27	7044,28	
f _(t=0) (cm)	0,763	0,458	0,407	0,417	0,179	
f _(t=∞) (cm)	1,007	0,604	0,537	0,550	0,237	
f (cm)	1,769	1,062	0,945	0,967	0,416	
fadm (cm)	1,90	1,10	1,10	1,10	1,10	

Dimensionamento

Verificação da flecha

(fonte: elaborado pelo autor)

7.4.5 Escada com largura de 3,30 metros

Para a largura de 3,30 m, a espessura da escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente foi aumentada para 10 cm, para que a deformação ficasse dentro do valor permitido. Pela mesma

razão, a espessura do degrau isolado da escada apoiada em vigas laterais precisou ser aumentada para 11 cm. Os resultados são apresentados no quadro 11.

Quadro 11 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 3,30m

	ESCADA COM LARGURA 3,30m				
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente		Escada armada em cruz	
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Long.	Transv.
l (cm)	476	330	330	476	330
b (cm)	100	100	28	100	
h (cm)	19	10	11	8	
d (cm)	16,50	9,32	8,50	5,50	6,96
M _d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	17,46	4,89	5,67	9,73
x (cm)	2,05	1,37	1,52	0,75	1,02
x/d	0,12	0,15	0,18	0,14	0,15
A _{s,min} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	2,85	1,77	0,46	1,20	1,42
A _s (cm ² /m ou cm ² /degrau)	6,87	4,58	1,42	2,51	3,42
A _{s,dist} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	1,43	0,92	0,28	-	-
Consumo de aço total (kg)	102,34	67,72	63,80	73,08	
Volume total (m³)	4,91	3,24	1,73	2,87	
Taxa (kg/m³)	20,83	20,89	36,92	25,46	
I _c (cm ⁴)	57158,33	13758,36	3105,67	7044,28	
M _r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	10,12	2,45	6,47	
M _a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	12,47	3,49	6,95	
I _{eq} (cm ⁴)	32722,34	8356,87	1431,11	5862,11	
f (cm)	1,769	1,176	1,025	0,848	
fadm (cm)	1,90	1,32	1,32	1,32	

Dimensionamento

Verificação da flecha

(fonte: elaborado pelo autor)

7.4.6 Escada com largura de 4,76 metros

Com a largura de 4,76 m, os vãos l e a flecha admissível de todos os tipos de escadas ficaram iguais. Para este vão, as espessuras das escadas apoiada em vigas laterais com laje adjacente e com degraus isolados precisaram ser aumentadas para 16 cm para atender à verificação da flecha.

Na escada armada em cruz também houve aumento de espessura para 9 cm a fim de atender à verificação da flecha. Apesar do aumento, esta escada ficou com uma espessura pequena em comparação com as demais escadas com laje adjacente, o que proporcionou um baixo consumo de concreto. Por outro lado, o valor pequeno da altura útil fez com que essa escada apresentasse os maiores valores de consumo de aço e de taxa de armadura por m^3 de concreto.

Para esta largura, a escada armada em cruz deixa de ter uma direção principal e passa a ser dimensionada com o mesmo momento de cálculo M_d nas duas direções. A diferença na taxa de aço por metro se deve à diferença de valor da altura útil, que é maior na direção transversal ao sentido de subida da escada resultando uma taxa de aço menor nesta direção. Os resultados para a largura de 4,76 m podem ser visualizados no quadro 12.

Quadro 12 – Resultados do dimensionamento e verificação da flecha da escada com largura 4,76m

	ESCADA COM LARGURA 4,76m				
	Escada armada longitudinalmente	Escada armada transversalmente		Escada armada em cruz	
		Apoiada em vigas laterais com laje adjacente	Apoiada em vigas laterais com degraus isolados	Long.	Transv.
l (cm)	476	476	476	476	476
b (cm)	100	100	28	100	
h (cm)	19	16	16	9	
d (cm)	16,50	16,41	13,50	6,50	8,14
M _d (kN·m ou kN·degrau)	46,86	43,35	9,72	12,43	12,43
x (cm)	2,05	1,90	1,87	1,44	1,11
x/d	0,12	0,12	0,14	0,22	0,14
A _{s,min} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	2,85	2,84	0,67	1,35	1,60
A _s (cm ² /m ou cm ² /degrau)	6,87	6,37	1,75	4,83	3,72
A _{s,dist} (cm ² /m ou cm ² /degrau)	1,43	1,42	0,35	-	-
Consumo de aço total (kg)	147,61	138,54	112,62	151,90	
Volume total (m³)	7,09	6,28	3,63	4,41	
Taxa (kg/m³)	20,83	22,05	31,07	34,46	
I _c (cm ⁴)	57158,33	56354,25	9557,33	10029,85	
M _r (kN·m ou kN·degrau)	26,14	25,89	5,19	8,19	
M _a (kN·m ou kN·degrau)	33,47	30,96	6,94	8,88	
I _{eq} (cm ⁴)	32722,34	37004,43	5022,40	8176,28	
f _(t=0) (cm)	0,763	0,615	0,711	0,656	
f _(t=∞) (cm)	1,007	0,811	0,938	0,865	
f (cm)	1,769	1,426	1,649	1,521	
f _{adm} (cm)	1,90	1,90	1,90	1,90	

Dimensionamento

Verificação da flecha

(fonte: elaborado pelo autor)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentará as conclusões obtidas a partir da comparação do dimensionamento das escadas para cada largura proposta. Serão feitas considerações sobre os resultados dos cálculos e sobre os métodos utilizados para realização do trabalho.

8.1 RESULTADOS

A escada armada longitudinalmente foi dimensionada como uma viga de 1 m de largura e comprimento de 4,76 m para todas as larguras de escadas propostas, visto que seu vão entre apoios independe da largura da escada. Dessa forma, a espessura, a flecha e a taxa de aço por metro foram as mesmas para todas as larguras, alterando apenas a quantidade total de aço e concreto a ser utilizada conforme a largura da escada foi aumentando. Nesta escada, o fator determinante para definição da espessura foi a verificação da flecha, visto que a distância entre apoios e seu peso próprio são consideravelmente grandes. Para todas as larguras propostas, a escada armada longitudinalmente foi a que apresentou maior consumo de concreto, devido a espessura de 19 cm da sua laje adjacente. Em relação ao consumo de aço, essa escada mostrou-se mais econômica do que a escada engastada em viga lateral com degraus isolados. Apesar desta escada ter apresentado valores altos de consumo de aço e concreto, é importante ressaltar que esta escada possui a vantagem de utilizar como apoio vigas já existentes do pavimento de saída e de chegada, sem necessidade de criação de vigas específicas para a escada tal como ocorre nos outros tipos de escada analisados neste trabalho.

A escada com laje adjacente apoiada em vigas laterais apresentou valores pequenos de taxa de armadura por m³ de concreto e consumo de concreto sempre inferior à escada armada longitudinalmente. Para as larguras de 1,65 m e 2,20 m, esta escada foi a que apresentou menor consumo de aço, sendo possível atender as verificações com a espessura mínima definida por Norma de 8 cm para todas larguras propostas menores do que 3,30 m. Para as larguras de 1,10 m e 1,65 m, o dimensionamento resultou na armadura mínima. Assim, pode-se concluir que esta escada é uma ótima opção para minimizar consumo de aço e concreto para larguras pequenas.

A escada armada transversalmente apoiada em vigas laterais com degraus isolados se mostrou a opção mais econômica para todas as larguras propostas no que diz respeito ao consumo de concreto. Em relação ao consumo de aço, esta escada também foi a mais econômica para as larguras de 1,10 m e 4,76 m. Entretanto, é importante ressaltar que para a largura de 4,76 m, foi necessário uma espessura de 16 cm para que a flecha total não fosse superior à flecha admissível. Esta espessura já é consideravelmente grande para um degrau isolado, visto que este valor está próximo da altura do degrau, de 17,64 cm. Desta forma, pode-se concluir que com o carregamento considerado neste trabalho, esta escada não deve ser utilizada para vãos maiores do que 5,14 m, último vão no qual o degrau é aprovado nas verificações com 17 cm de espessura.

A escada engastada em viga lateral com degraus isolados foi a que apresentou maior consumo de aço para todas as larguras em que foi dimensionada. Além da influência da carga acidental concentrada na extremidade do vão, os degraus desta escada estão em balanço, o que resulta em um momento fletor sempre elevado para cálculo da armadura. O fato dos degraus estarem em balanço resultou também em grandes espessuras para que a verificação da flecha fosse satisfeita. O vão de 2,24 m é o último vão no qual o degrau atende às verificações com 17 cm de espessura, para os carregamentos considerados neste trabalho.

Por dissipar a carga nas 2 direções, a escada armada em cruz apresentou os menores consumos de aço nas larguras de 2,75 m e 3,30 m. O resultado não se repetiu na largura de 4,76 m pois esta escada pôde ser dimensionada com apenas 9 cm de espessura, valor muito inferior às demais, o que resultou em um alto consumo de aço. Uma espessura de 12 cm já seria suficiente para que esta escada apresentasse o menor consumo de aço para a largura de 4,76 m, valor que continua bastante pequeno se comparado à espessura de 16 cm da escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente. Além disso, esta escada apresentou consumo de concreto inferior às outras escadas com laje adjacente, sendo superada nesse quesito apenas pela escada apoiada em vigas laterais com degraus isolados. Pode-se concluir que esse tipo de escada é a melhor opção para minimizar custos quando se dispõe de apoios em todos os lados e quando as dimensões de largura e vão são semelhantes.

8.2 METODOLOGIA UTILIZADA

Por ser dimensionada com sua espessura total, a escada apoiada em vigas laterais com degraus isolados apresentou pequenos consumos de aço. Entretanto, pode-se ressaltar o efeito que a carga acidental de 2,5 kN proporciona no dimensionamento. Esta carga concentrada produz o mesmo momento que uma carga distribuída de 16,23 kN/m² produziria para o vão de 1,10 m e largura do degrau de 0,28 m. Este valor de carga distribuída é 5,41 vezes superior ao valor de 3 kN/m², utilizado como carga acidental das escadas com lajes adjacentes. Entretanto, esta diferença diminui conforme o vão do degrau isolado aumenta, de modo que a carga concentrada de 2,5 kN se equivale à carga distribuída de 3 kN/m² quando o degrau possui vão de 5,95 m e largura de 0,28 m. Isto demonstra que o valor recomendado por Norma de 2,5 kN é insuficiente caso o degrau isolado tenha um vão superior a 5,95 m e está a favor da segurança para todos os vãos inferiores a 5,95m.

Durante a execução do trabalho, pôde-se observar também que a verificação da deformação máxima foi o critério mais importante na definição da espessura das escadas. O valor limite que assegura boas condições de ductilidade representado pela razão $x/d=0,45$ motivou o aumento da espessura em apenas 1 ocasião.

Para a largura proposta de 4,76 m, pode-se ressaltar a diferença de 3 cm na espessura necessária entre a escada armada longitudinalmente e a escada apoiada em vigas laterais com laje adjacente, visto que as duas possuem o mesmo vão e o mesmo carregamento. Isto ocorre pois utiliza-se uma espessura menor no dimensionamento e no cálculo da inércia da escada armada longitudinalmente, conforme recomendado pela bibliografia.

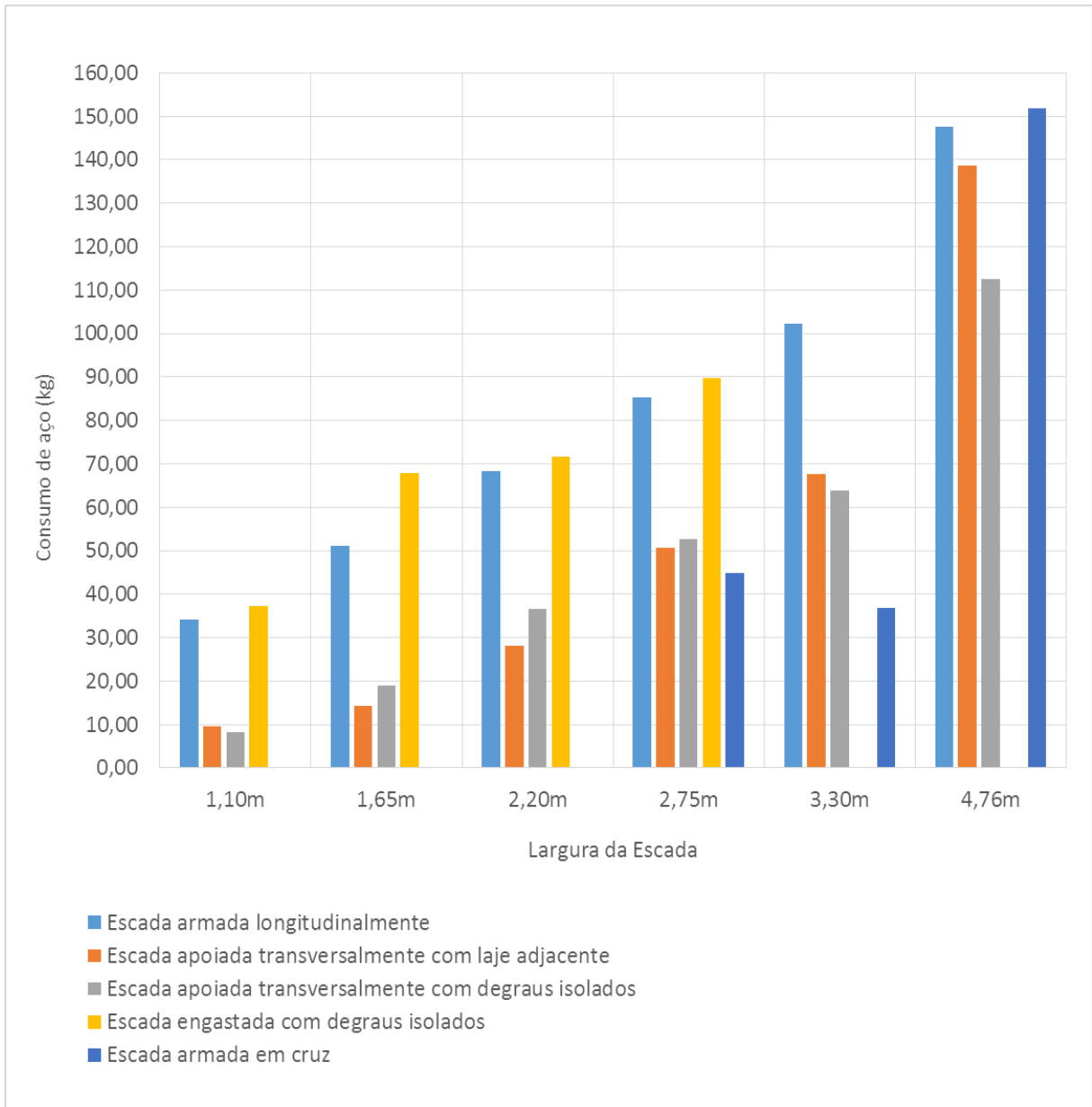
Em relação ao cálculo da flecha, salienta-se a importância da verificação do estágio da seção a partir do momento de fissuração. Em alguns casos, a inércia equivalente da seção fissurada chegou a ser aproximadamente 3 vezes menor do que a inércia da seção bruta de concreto.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. v. 2.
- _____. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014b. v. 4.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 9077**: saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BASTOS, P. S. **Lajes de concreto**. Bauru, 2015. Apostila da disciplina 2117 – UNESP. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>>. Acesso em: 14 maio. 2016
- CAMPOS FILHO, A. **Projeto de lajes maciças de concreto armado**. Porto Alegre, 2014. Apostila da disciplina ENG 01112 – UFRGS. Disponível em <<http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/eng01112/lajes.pdf>>. Acesso em: 12 maio. 2016.
- CUNHA, A. J. P. da; SOUZA, V. C. M. de. **Lajes em concreto armado e protendido**. 2. ed. Niterói: EDUFF, 1998.
- GUERRIN, A.; LAVAUUR, R. C. **Tratado de concreto armado**: estruturas de residências e indústrias. Brasil: Hemus, 2002. v. 3.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- MELGES, J. L. P.; PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. **Concreto armado**: escadas. São Carlos, 1997. Apostila da disciplina EC-802 – UNICAMP. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec802/Escada/19%20Escadas.pdf>>. Acesso em 23 maio. 2016.
- ROCHA, A. M. da. **Novo curso prático de concreto armado**. 14. ed. Rio de Janeiro: Científica, 1974. v. 3.

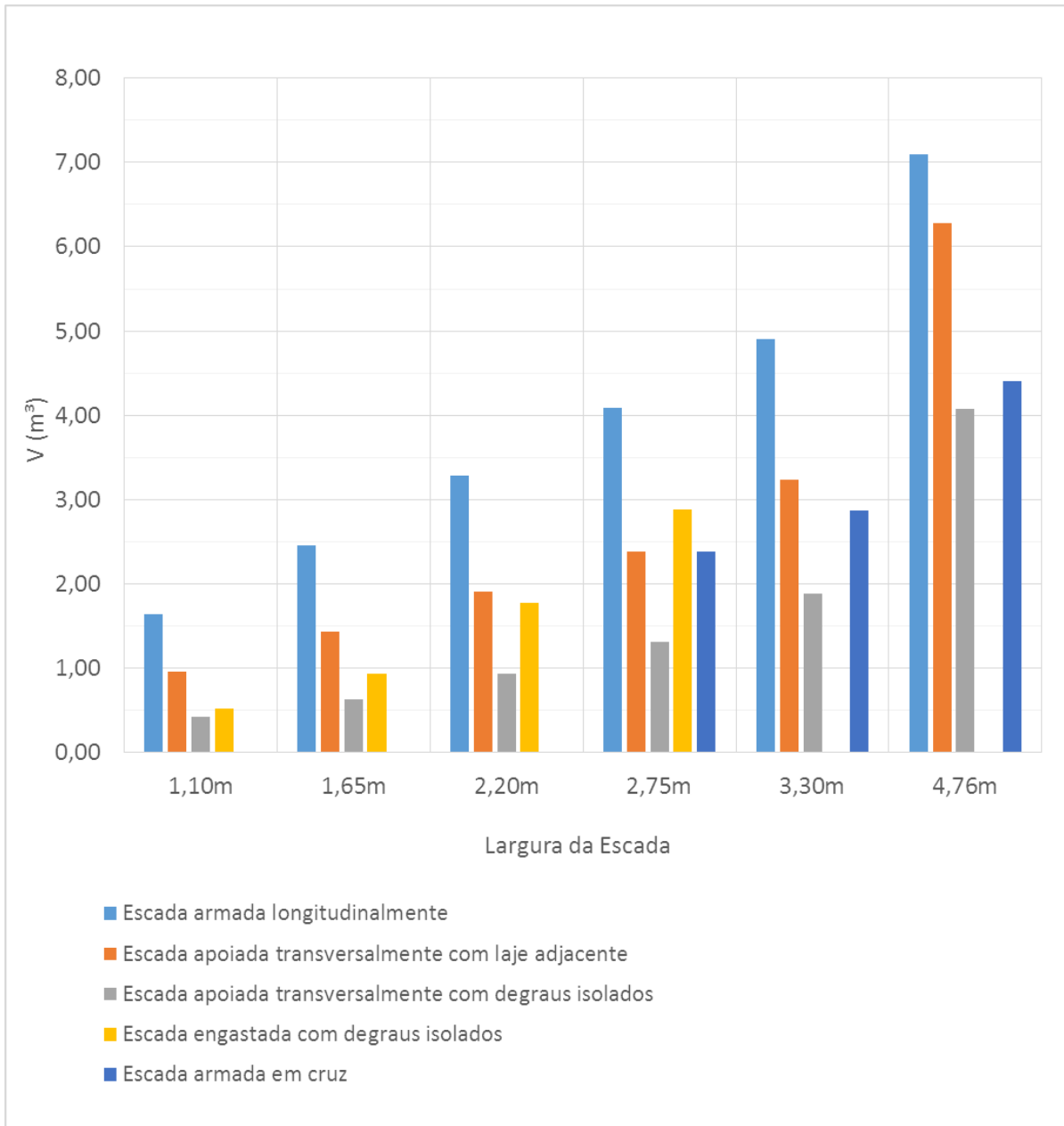
APÊNDICE A – Gráficos comparativos

Quadro A1 – Consumo de aço

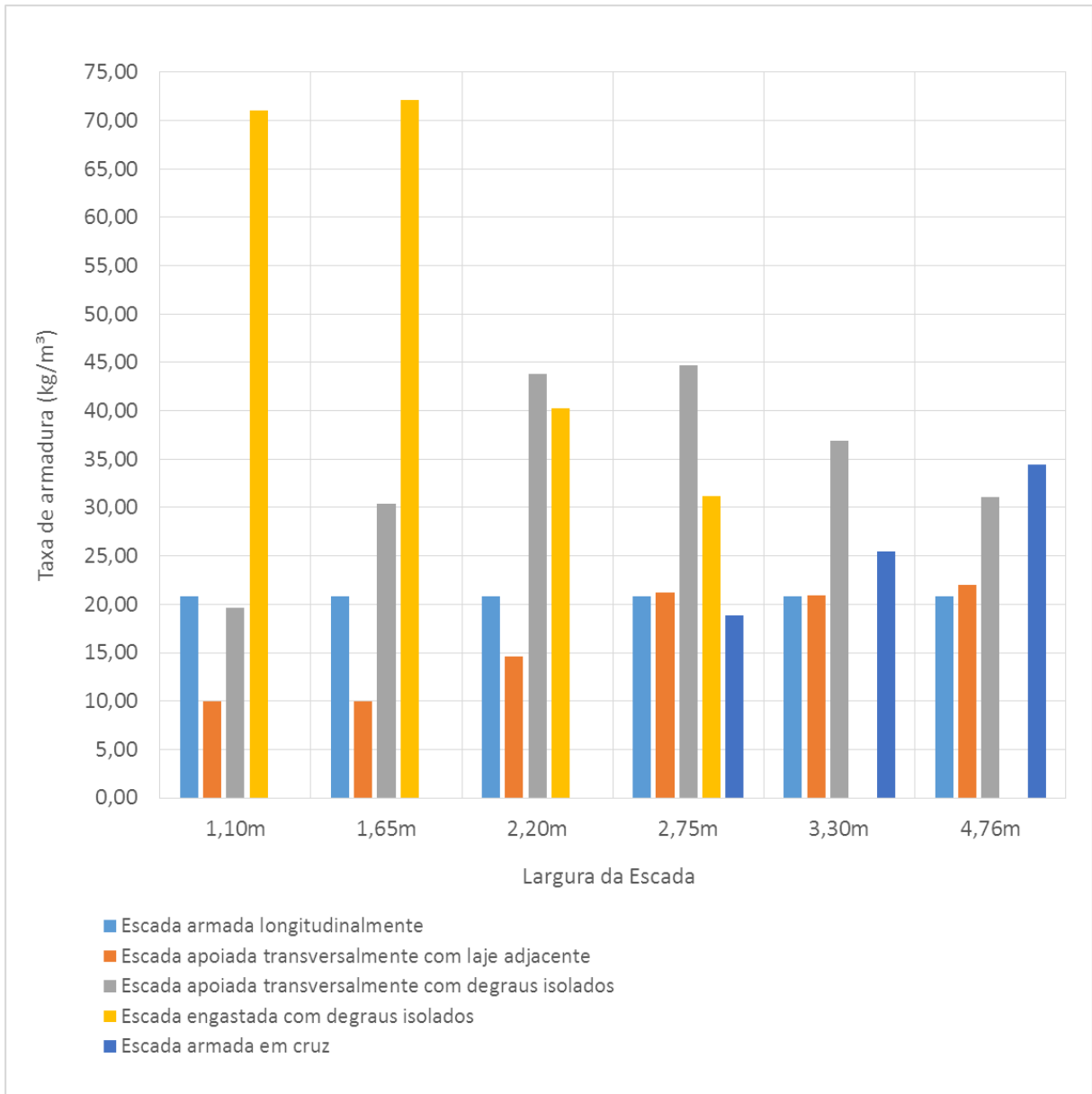


(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A2 – Consumo de concreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro A3 – Consumo de armadura por m³ de concreto

(fonte: elaborado pelo autor)