



UTILIZAÇÃO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS DE APOIO EDUCACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4537

João Victor Rosa Cruz - joao.cruz@ctec.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

Severino Pereira Cavalcanti Marques - smarques@ctec.ufal.br
Universidade Federal de Alagoas

Resumo: *O estudo da mecânica dos materiais relacionada ao concreto armado confere ao estudante de engenharia um conhecimento indispensável para sua formação profissional. No âmbito do ensino-aprendizagem, faz-se necessário a busca por ferramentas que permitam a otimização dos cálculos de projeto e promovam o pensamento crítico do aluno acerca dos resultados obtidos. Neste cenário, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma planilha eletrônica de auxílio ao dimensionamento de vigas de concreto armado. Trata-se de uma ferramenta obtida através do Google Planilhas, sendo uma plataforma online, colaborativa e gratuita. Acerca das implementações por trás do ambiente desenvolvido, a planilha possui rotinas para o dimensionamento à flexão, à força cortante e para o cálculo de ancoragens e detalhamento das armaduras longitudinais. A validação da ferramenta é realizada por meio da análise de uma aplicação numérica retirada de uma literatura renomada na área da engenharia das estruturas. Através da comparação dos resultados obtidos pela planilha com os valores da literatura, verifica-se que a planilha apresenta um funcionamento adequado.*

Palavras-chave: *Projeto de vigas, concreto armado, planilha eletrônica*

UTILIZAÇÃO DE PLANILHAS ELETRÔNICAS DE APOIO EDUCACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, o advento tecnológico e sua constante evolução representa um cenário cada vez mais benéfico à engenharia civil. No âmbito da formação dos engenheiros, a tecnologia atua também como ferramenta de ensino, uma vez que permite a realização de operações com considerável rapidez e acurácia, em relação ao processo manual. Aliada às metodologias de ensino não convencionais, a tecnologia consolida-se em virtude das necessidades voláteis por um ensino mais dinâmico e ativo, que se mostre estimulante e motivador para os estudantes (BELISÁRIO *et al.*, 2020).

Outrossim, o estudante de engenharia civil é submetido durante a graduação ao aprendizado das disciplinas profissionalizantes, responsáveis por fornecer conhecimentos específicos e práticos necessários para a área de atuação do engenheiro. Dentre estas, as disciplinas de Estruturas de Concreto apresentam os conceitos básicos e os fenômenos relacionados com a mecânica do concreto armado, necessários para o entendimento do comportamento de elementos estruturais e para a capacitação do estudante acerca do projeto de estruturas constituídas por este material. Ainda que na maior parte dos casos não haja uma complexidade considerável nas formulações de projeto, o dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado é caracterizado pelo extenso processo de aplicação dos equacionamentos e pela consequente realização de diferentes operações matemáticas.

As planilhas eletrônicas configuram-se como aplicativos de software utilizados para criar, manipular e analisar dados organizados em formato tabular. Assim, permitem ao usuário a realização de cálculos através da inserção de dados e criação de fórmulas. Nesse sentido, a adoção desta ferramenta surge como uma metodologia de ensino-aprendizagem de grande utilidade, uma vez que permite a realização e verificação dos resultados processados durante o projeto de estruturas de concreto armado, bem como permite que o estudante possa despendar mais tempo na reflexão dos resultados obtidos e na consolidação do aprendizado referente ao assunto.

Sendo assim, a integração computacional nos cursos de engenharia tem se configurado como um amplo objeto de estudo nos últimos cinquenta anos (LICKLIDER, 1966 *apud* LOPES *et al.*, 2005). No campo das disciplinas profissionalizantes de engenharia das estruturas, é possível citar algumas iniciativas de automatização do dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado através de planilhas eletrônicas. Muñiz Junior e Oliveira (2014) propõem um estudo sobre a otimização de vigas de concreto armado, biapoiadas e de seção retangular, através da utilização de planilhas desenvolvidas no software *Microsoft Office Excel* (1985). Além disso, Souza Júnior (2018) apresenta o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para resolver numericamente problemas de flexão composta oblíqua, bem como análise de segunda ordem no dimensionamento de pilares de concreto armado. No âmbito profissional da engenharia, são amplamente utilizados *softwares* comerciais como *TQS* (1988), *Eberick* (1996), entre outros. Contudo, estes aplicativos não possuem tanta acessibilidade quanto as planilhas eletrônicas. Outrossim, em grande parte dos casos, o conhecimento por parte dos usuários do

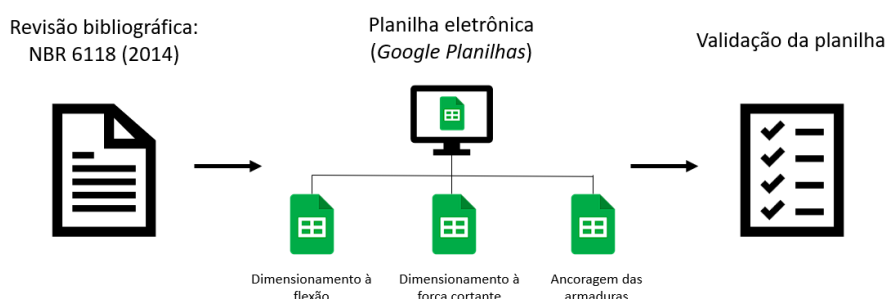
funcionamento destes *softwares* é condicionado a realização de cursos *online*. Assim, no âmbito do ensino-aprendizagem, estes e outros fatores representam empecilhos que impossibilitam o aprofundamento e difusão destas ferramentas em sala de aula.

Face ao exposto, o presente trabalho possui como objetivo apresentar um conjunto de rotinas computacionais para dimensionamento de vigas de concreto armado no Estado Limite Último (ELU). Estas automatizações foram desenvolvidas através do aplicativo *Google Planilhas* (2006). Portanto, o produto deste trabalho configura-se como um ambiente virtual e *on-line*, colaborativo, gratuito e de fácil acesso para os estudantes de engenharia. Trata-se de uma ferramenta que foi desenvolvida por um aluno enquanto monitor da disciplina Estruturas de Concreto 1, sob orientação do docente responsável. Além disso, o trabalho apresenta a validação das planilhas eletrônicas desenvolvidas por meio de problemas *benchmark* retirados da literatura.

2 METODOLOGIA

Com o objetivo de consolidar o produto proposto, a metodologia deste trabalho é dividida em três atividades: a) revisão bibliográfica das prescrições normativas para o dimensionamento de vigas de concreto armado propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014); b) implementação das formulações de projeto e desenvolvimento da planilha; c) validação da planilha. Observa-se na Figura 1 uma ilustração da metodologia proposta no presente trabalho.

Figura 1 – Atividades desenvolvidas na metodologia do trabalho



Fonte: Autores, 2023

2.1 Projeto de vigas de concreto armado

No Brasil, o projeto de vigas de concreto armado é regido pela NBR 6118, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Este documento apresenta critérios de desempenho e segurança para as estruturas de concreto, estabelecendo as condições para a sua concepção, dimensionamento, execução e controle de qualidade. Nesse sentido, o projeto usual das vigas é baseado na teoria da flexão, onde projetam-se armaduras longitudinais, para resistir às solicitações provenientes do momento fletor e armaduras transversais, que devem resistir ao esforço cortante. O desenvolvimento da planilha eletrônica proposta neste trabalho é exclusivamente baseado nas prescrições normativas apresentadas pela NBR 6118 e o detalhamento de cada uma das rotinas implementadas é descrito nos tópicos subsequentes.

2.2 Dimensionamento à flexão

Segundo a NBR 6118, as vigas são elementos estruturais lineares em que a flexão é preponderante. O dimensionamento à flexão é o processo de determinação das dimensões adequadas das vigas para suportar as cargas aplicadas a elas sem que ocorram falhas estruturais. Sendo assim, calcula-se a quantidade necessária de armaduras longitudinais para resistir às tensões de tração que surgem na viga devido à flexão e às cargas aplicadas, suprimindo as limitações de resistência mecânica do concreto.

A norma apresenta diferentes domínios de análise das vigas de concreto armado. Na questão relativa à segurança, os domínios 2 e 3 conferem seções subarmadas, pois o colapso da estrutura é precedido por fissuras visíveis que representam um aviso prévio devido ao escoamento da armadura. Já o domínio 4 está relacionado com seções superarmadas, onde a ruptura da estrutura ocorre inesperadamente, sem aviso prévio. Sendo assim, as vigas de concreto armado devem ser projetadas à flexão simples nos domínios 2 e 3. Na planilha eletrônica desenvolvida, estes domínios são calculados a partir da inserção dos dados relativos ao concreto e aço utilizados no projeto, como é mostrado na Figura 2.

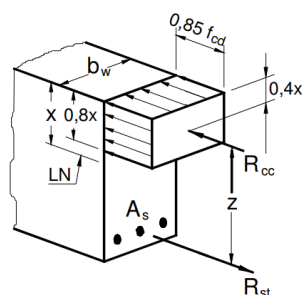
Figura 2 – Cálculo dos domínios de análise no dimensionamento à flexão



Fonte: Autores, 2023

Para o cálculo de seções retangulares com armadura simples, a NBR 6118 apresenta as formulações de cálculo das armaduras longitudinais a partir de equações de equilíbrio das forças normais e momentos fletores, baseando-se na distribuição de tensões segundo o diagrama retangular simplificado (ver Figura 3).

Figura 3 – Distribuição de tensões segundo o diagrama retangular simplificado



Fonte: Adaptado de Bastos, 2015

Sendo assim, uma vez que a força resultante das tensões de compressão no concreto deve estar em equilíbrio com a força resultante nas tensões de tração na armadura, bem como há o equilíbrio dos momentos fletores na seção, são desenvolvidos os equacionamentos de projeto à flexão de vigas de concreto armado. Estas formulações são descritas nas Equações (1) e (2).

$$\frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{1}{\alpha_c f_{cd} \lambda \xi (1 - \frac{\lambda \xi}{2})} \quad (1)$$

$$A_s = \frac{M_d}{\sigma_{sd} d (1 - \frac{\lambda \xi}{2})} \quad (2)$$

Nas equações acima, b_w representa a largura da seção, d representa a altura útil, M_d é o momento de projeto, α_c e λ são parâmetros relativos ao concreto adotado no projeto, f_{cd} é a resistência de projeto do concreto à compressão, ξ é o valor referente ao domínio da seção em análise, A_s é a área de armadura longitudinal necessária e σ_{sd} é a tensão de projeto do aço, geralmente adotada como sendo a tensão de escoamento.

Uma maneira alternativa de realizar o dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado é a utilização de tabelas com coeficientes K , determinados empiricamente. Sendo assim, para diferentes valores de ξ , obtêm-se os valores de K_c e K_s , utilizados para determinação da armadura necessária de aço. Na Figura 4, observa-se um exemplo de tabela utilizada para dimensionamento através deste método.

Figura 4 – Valores de K_c e K_s utilizados no dimensionamento à flexão

FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR - ARMADURA SIMPLES												
$\beta_x = \frac{x}{d}$	$K_c \text{ (cm}^2/\text{kN)}$									$K_s \text{ (cm}^2/\text{kN)}$		
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-25	CA-50	CA-60	Dom.
0,01	137,8	103,4	82,7	68,9	59,1	51,7	45,9	41,3	0,046	0,023	0,019	2
0,02	69,2	51,9	41,5	34,6	29,6	25,9	23,1	20,8	0,046	0,023	0,019	
0,03	46,3	34,7	27,8	23,2	19,8	17,4	15,4	13,9	0,047	0,023	0,019	
0,04	34,9	26,2	20,9	17,4	14,9	13,1	11,6	10,5	0,047	0,023	0,019	
0,05	28,0	21,0	16,8	14,0	12,0	10,5	9,3	8,4	0,047	0,023	0,020	
0,06	23,4	17,6	14,1	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	0,047	0,024	0,020	
0,07	20,2	15,1	12,1	10,1	8,6	7,6	6,7	6,1	0,047	0,024	0,020	
0,08	17,7	13,3	10,6	8,9	7,6	6,6	5,9	5,3	0,048	0,024	0,020	
0,09	15,8	11,9	9,5	7,9	6,8	5,9	5,3	4,7	0,048	0,024	0,020	
0,10	14,3	10,7	8,6	7,1	6,1	5,4	4,8	4,3	0,048	0,024	0,020	
0,12	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6	0,048	0,024	0,020	
0,13	11,1	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,3	0,049	0,024	0,020	
0,14	10,4	7,8	6,2	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	0,049	0,024	0,020	
0,15	9,7	7,3	5,8	4,9	4,2	3,7	3,2	2,9	0,049	0,024	0,020	
0,16	9,2	6,9	5,5	4,6	3,9	3,4	3,1	2,7	0,049	0,025	0,020	

Fonte: Adaptado de Bastos, 2015

No presente trabalho, as Equações (1) e (2) foram implementadas na planilha eletrônica desenvolvida, bem como os demais equacionamentos prescritos pela NBR 6118 para obtenção dos parâmetros a serem utilizados no projeto. Para além do dimensionamento à flexão de vigas com seção transversal retangular e de armadura simples, a ferramenta dispõe de implementações para o cálculo de armaduras mistas (utilizadas com o objetivo de reduzir o domínio da seção para o domínio subarmado ou para alcançar os limites de ductilidade das vigas) e também para o cálculo de seções

transversais com geometria de "T". Observa-se na Figura 5 a aba da planilha responsável pelo dimensionamento de armaduras mistas.

Figura 5 – Função da planilha para dimensionamento de armaduras mistas

DEFINIÇÃO DE ARMADURAS MISTAS

d'' = Distância do centróide das barras de compressão até as fibras mais comprimidas
 d' = Distância do centróide das barras de tração até as fibras mais tracionadas

? Quando devo utilizar as armaduras mistas?

As armaduras mistas devem ser utilizadas quando se deseja reduzir o domínio de seção, impondo, por exemplo, a necessidade de um domínio subarmado que apresente fissuras antes da ruptura brusca ou ainda impor a condição de ductilidade. Nesse sentido, insira abaixo a condição para a qual você deseja calcular as armaduras.

Dados já calculados Condição de desejo = ξ34

Orc.	0,85	λ	0,8	f _{cd} (N/mm²)	1,786	ξ	0,62832
------	------	---	-----	-------------------------	-------	---	---------

Dados a inserir

Q (mm)	62	M _u (kN.cm)	88270	D _u (cm)	25	d' (cm)	5,75
--------	----	------------------------	-------	---------------------	----	---------	------

ÁREAS TABELADAS				
Bitola (mm)	Bitola (")	Área (cm²)	Quantidade	Área Total (cm²)
Ø 4,2	-	0,1385	0	0
Ø 5	3/16"	0,1963	0	0
Ø 6,3	1/4"	0,3117	0	0
Ø 8	5/16"	0,5027	0	0
Ø 10	3/8"	0,7854	0	0
Ø 12,5	1/2"	1,2272	0	0
Ø 16	5/8"	2,0106	0	0
Ø 20	3/4"	3,1416	0	0
Ø 25	1"	4,9087	0	0
Ø 32	1 1/4"	8,0425	0	0
ÁREA TOTAL				0

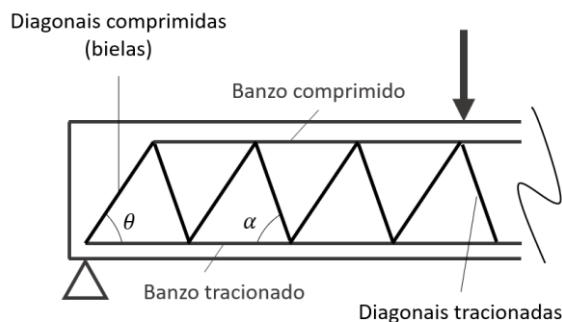
M_u, lim (kN.cm)	
54893,08115	
ΔM_u (kN.cm)	
33376,91885	
E_s (N/mm²)	
0,002983390937	
1 ÁREA DA ARMADURA DE TRAÇÃO	2 ÁREA DA ARMADURA DE TRAÇÃO
40,847	13,647
CM²	CM²

Fonte: Autores, 2023

2.3 Dimensionamento à força cortante

Os equacionamentos propostos pela NBR 6118 para dimensionamento à força cortante de vigas de concreto armado são baseados no modelo de treliça clássica proposto por Ritter-Mörsch, idealizado no início do século XX. A ruptura devido à força cortante ocorre a partir da combinação das solicitações de corte com o momento fletor. Sendo assim, no estágio II do concreto, os pontos materiais que compõem a estrutura são solicitados por tensões principais: as tensões de tração, perpendicularmente às fissuras, e as tensões de compressão, coincidentes aos eixos longitudinais das fissuras. Nesse sentido, é possível observar na Figura 6 a analogia de treliça proposta, onde o banzo superior e inferior da treliça é composto, respectivamente, pela parcela comprimida do concreto e pela armadura longitudinal de tração.

Figura 6 – Analogia de treliça proposta por Ritter-Mörsch



Fonte: Autores, 2023

Através de adaptações empíricas, a NBR 6118 admite dois modelos de cálculo para o dimensionamento à força cortante de vigas de concreto armado: analogia de treliça com diagonais comprimidas de angulação igual a 45° (treliça clássica) e com angulação entre 30° e 45° (treliça generalizada). Para atender as condições de segurança do elemento estrutural, é necessário que o esforço cortante solicitante (V_{sd}) de projeto seja simultaneamente menor que a resistência das diagonais comprimidas (V_{Rd2}) e tracionadas (V_{Rd3}).

Para o modelo de cálculo da treliça clássica, a norma apresenta os seguintes equacionamentos:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd \quad (3)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (4)$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9df_{yd}(sen\alpha + cos\alpha)} \quad (5)$$

Utilizando o modelo de cálculo da treliça generalizada, as equações apresentadas acima são adaptadas para:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} = 0,54\alpha_{v2}f_{cd}b_wd(cot\alpha + cot\theta)sen^2\theta \quad (6)$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9df_{yd}(cot\alpha + cot\theta)sen\alpha} \quad (7)$$

Nas Equações (3) a (7), α_{v2} é o coeficiente dado pela norma em função do f_{ck} do concreto, f_{cd} representa a resistência de projeto do concreto à compressão, V_c a parcela da força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça, V_{sw} a parcela da força cortante absorvida pela armadura transversal, A_{sw} a área de armadura transversal, s o espaçamento longitudinal entre as araduras transversais, f_{yd} a resistência de projeto do aço ao escoamento, α a inclinação da armadura transversal (comumente adotada como 90°) e θ o ângulo de inclinação das diagonais comprimidas.

As Equações (3) a (7) foram implementadas na planilha como rotina de cálculo para dimensionamento à força cortante de vigas de concreto armado, contemplando os modelos de cálculo de treliça clássica e generalizada. Para além destas formulações, a planilha desenvolvida permite a escolha do número de ramos da armadura longitudinal, permitindo uma redução no espaçamento longitudinal entre estribos. A Figura 7 apresenta uma captura de imagem da planilha com o cálculo automatizado do dimensionamento à força cortante utilizando o modelo de treliça clássica.

Figura 7 – Função da planilha para dimensionamento à força cortante pelo modelo de treliça clássica

4 5 DIMENSIONAMENTO PARA MODELO DE CÁLCULO 1 ($\theta = 45^\circ$)



OBS: d é a distância do centro geométrico das barras longitudinais até a borda comprimida

ORIENTAÇÕES NBR 6118/14

Segundo as orientações dessa norma, é necessário que as duas condições abaixo sejam atendidas simultaneamente:

$V_{sd} \leq V_{Rd2}$

$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$

V_{sd} = Força Cortante solicitante de cálculo na seção
 V_{Rd2} = Força Cortante resistente de cálculo relativa às bielas
 V_{Rd3} = Força Cortante resistente de cálculo relativo aos estribos
 V_c = Parcela da força cortante absorvida por outros mecanismos
 V_{sw} = Parcela da força cortante absorvida pelo estribo

DADOS DE PROJETO

✦ Dados já calculados

ϕ_{v2}	0,92	f_{cd} (N/cm ²)	1,429	f_{ctm} (N/cm ²)	0,221
$f_{ctk,inf}$ (N/cm ²)	0,1547				

✏️ Dados a inserir

V_{sd} (kN)	357,7	d (cm)	80	b_w (cm)	25
α (°)	90	f_{ywd} (N/cm ²)	43,5		

OBS: É necessário adotar um valor menor ou igual a 43,5 kN/cm² para f_{ywd} . Sugere-se adotar esse valor limite.

DIAGONAIS COMPRIMIDAS (BIELAS)

V_{Rd2}	709,71	kN
-----------	--------	----

DIAGNÓSTICO

✓ A ESTRUTURA RESISTE ✓

DIAGONAIS TRACIONADAS (ESTRIBOS)

V_c (kN)	132,625
(A_{sw}/s) mm	0,0221 CM ² /CM

ARMADURA CALCULADA

$\frac{A_{sw}}{s}$	0,072 CM ² /CM
--------------------	---------------------------

✓ UTILIZAR ÁREA CALCULADA ✓

Fonte: Autores, 2023

2.4 Ancoragem das armaduras longitudinais

A ancoragem das armaduras longitudinais de tração está relacionada com o número de barras longitudinais que adentram os apoios e com o cálculo do comprimento necessário para que haja uma ancoragem adequada e segura. Para realização destes cálculos, faz-se necessário o detalhamento das armaduras longitudinais através da decalagem do diagrama de força no banzo tracionado. A decalagem trata-se de uma técnica de readequação do gráfico de forças. Este procedimento deve ser feito a fim de compatibilizar o valor da força atuante na armadura tracionada com o valor da força determinada segundo o diagrama de momentos fletores (BASTOS, 2018). As Equações (8) e (9) representam os modelos de cálculo 1 e 2, respectivamente, para determinação da decalagem (a_l).

$$a_l = d \left[\frac{V_{sd, \max}}{2(V_{sd, \max} - V_c)} (1 + \cot \theta \alpha) - \cot \theta \alpha \right] \quad (8)$$

$$a_l = 0,5d(\cot \theta - \cot \alpha) \quad (9)$$

Além da implementação das Equações (8) e (9), a planilha conta com a integração de implementações em *Python* (2009) para o cálculo dos diagramas de momento fletor e decalagem do gráfico. A programação foi concebida através do *Google Colaboratory* (2017) e, assim como a planilha eletrônica, os diagramas são plotados *online* e de maneira colaborativa. Observa-se na Figura 8 um exemplo de decalagem realizada pela ferramenta desenvolvida neste trabalho.

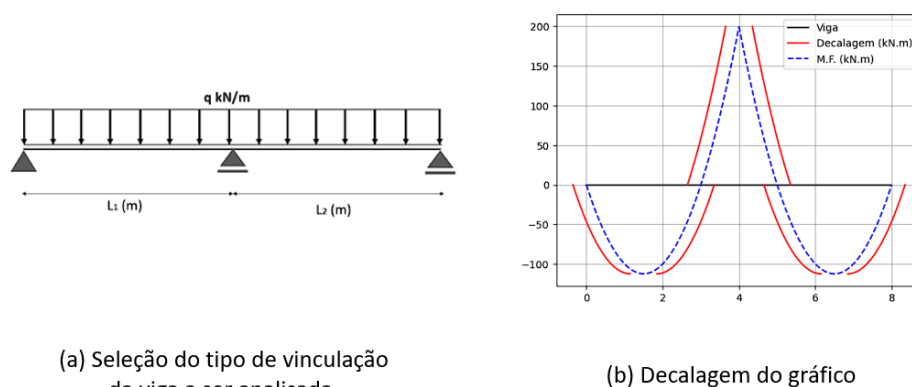
Realização:

ABENGE
Associação Brasileira de Educação em Engenharia

Organização:

CEFET/RJ

Figura 8 – Exemplo de plotagem da decalagem do gráfico de momento fletor da viga em análise



Fonte: Autores, 2023

Após a decalagem do gráfico, é possível quantificar o número de barras que irão adentrar os apoios da viga e calcular a ancoragem necessária das barras longitudinais. Nesse sentido, os equacionamentos são dados pelas Equações (10) a (12).

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \quad (10)$$

$$A_{s,anc} = \frac{a_l V_{sd}}{d f_{yd}} \quad (11)$$

$$l_{b,nec} = \alpha_{anc} l_b \frac{A_{s,anc}}{A_{s,ef}} \quad (12)$$

Nas Equações (10), (11) e (12), l_b é o comprimento básico de ancoragem, ϕ é o diâmetro da armadura longitudinal a ser ancorada, f_{bd} é o parâmetro de resistência de aderência, $A_{s,anc}$ é a área de aço a ancorar no apoio, α_{anc} é o parâmetro que considera o tipo de ancoragem e $A_{s,ef}$ é a área de aço efetiva.

As formulações para o cálculo da ancoragem foram implementadas na planilha. A partir da ferramenta desenvolvida, é possível estudar os diferentes tipos de ancoragem das armaduras longitudinais, sendo estes: ancoragem reta, ancoragem com gancho e ancoragem auxiliada por grampos (ver Figura 9). Com a inserção dos dados referentes ao tipo de ancoragem, a planilha possui indicadores de comportamento da estrutura, instruindo o usuário sobre a adequabilidade do tipo de ancoragem escolhido. Em caso de não atendimento das ancoragens reta e com gancho, a ancoragem com grampos representa uma alternativa eficaz para o projeto.

Figura 9 – Ancoragem das armaduras longitudinais

● ANCORAGEM RETA				● ANCORAGEM COM GANCHO				● ANCORAGEM COM GRAMPOS			
Número de barras que entram no apoio	6	Nº Barras, min	2	Número de barras que entram no apoio	6	Nº Barras, min	2	Cobrimento (cm)	0	Lb, efe (cm)	0
Lb, min (cm)	16,39141073	As, efe (cm²)	7,363107782	Lb, min (cm)	16,39141073	As, efe (cm²)	7,363107782	Largura pilar (cm)	0		
Lb, nec (cm)	29,07472965	>=	16,4	Lb, nec (cm)	20,35231075	>=	16,4	Número de barras que entram no apoio	0	Nº Barras, min	2
		>=	12,5			>=	12,5				
		>=	10,0			>=	10,0	As, corr (cm²)	-		
Cobrimento (cm)	3	Lb, efe (cm)	37	Cobrimento (cm)	3	Lb, efe (cm)	37	As, efe (cm²)	0	As, grampo (cm²)	-
Largura pilar (cm)	40			Largura pilar (cm)	40			Ø (mm) Grampo	0	As, gr calc (cm²)	0

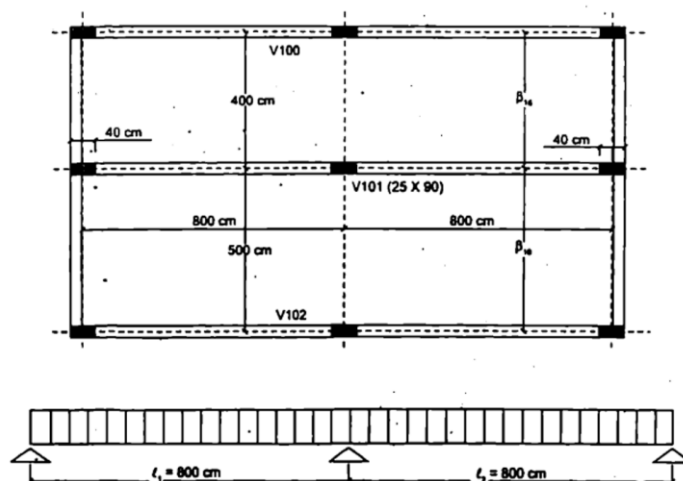
Fonte: Autores, 2023

3 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Visto que a aplicação da planilha eletrônica desenvolvida possui um caráter educacional, a validação das formulações implementadas no trabalho é indispensável. Para isto, foram coletados exemplos da literatura acerca do dimensionamento de vigas de concreto armado. Nesse sentido, as aplicações foram inseridas na planilha e os resultados foram comparados, obtendo-se resultados satisfatórios com as respostas de referência.

Esta seção apresenta uma aplicação retirada da 4ª edição do livro Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado Segundo a NBR 6118:2014 (CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO, 2014). Trata-se de uma adaptação dos exemplos 4.1, 5.4 e 6.4, encontrados nas páginas 201, 252 e 299, respectivamente. Nesse sentido, os exemplos propõem o dimensionamento da viga central (V101), ilustrada na Figura 10. Considera-se uma largura da seção da viga de 25 cm, concreto de classe C20, aço CA-50, altura da seção de 90 cm, altura útil de 80 cm, momento fletor negativo de 408,8 kN.m e momento fletor positivo de 230 kN.m. Além disso, o esforço cortante no apoio intermediário é de 255,5 kN, enquanto que nos apoios externos é 153,3 kN.

Figura 9 – Ilustração da viga V101 a ser verificada



Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho, 2014

Os dados fornecidos foram aplicados na planilha desenvolvida neste trabalho. Os resultados referentes ao dimensionamento à flexão são expostos na Tabela 1, onde há a comparação com os resultados obtidos na literatura. Observa-se que as respostas estão de acordo, seja para o cálculo da armadura negativo ($A_{s,neg}$), da armadura positiva ($A_{s,pos}$) ou da armadura de pele ($A_{s,pele}$).

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos no dimensionamento à flexão

Variável	Planilha desenvolvida	Carvalho e Figueiredo Filho (2014)
$A_{s,neg}$ (cm ²)	20,056	20,050
$A_{s,pos}$ (cm ²)	10,187	10,180
$A_{s,pele}$ (cm ²)	2,250	2,250
$A_{s,min}$ (cm ²)	3,380	3,380

Fonte: Autores, 2023

Acerca do dimensionamento à força cortante, a Tabela 2 expõe os resultados obtidos na planilha em comparação com os valores obtidos na literatura. Além disso, observa-se que os resultados da literatura são expressos em função da taxa de armadura ($\rho_{sw,\alpha}$). De modo a compatibilizar os resultados obtidos pela planilha desenvolvida, os valores da literatura são convertidos através da Equação (13).

$$\rho_{sw,\alpha} = \frac{A_{sw}}{s} \frac{1}{b_w \text{ sen} \alpha} \quad (13)$$

Tabela 2 – Comparação dos resultados obtidos no dimensionamento à força cortante

Variável	Planilha desenvolvida	Carvalho e Figueiredo Filho (2014)
V_{Rd2} (kN)	709,710	709,800
V_c (kN)	132,625	132,000
$\frac{A_{sw}}{s}$ (cm ² /cm)	0,072	0,072
s (cm)	8,700	8,900

Fonte: Autores, 2023

Para o cálculo das ancoragens, foram consideradas 16 barras longitudinais de diâmetro 12,5 mm para as armaduras negativas e 8 barras longitudinais deste mesmo diâmetro para as armaduras positivas. Após a decalagem, têm-se a necessidade de ancorar 6 destas barras nos apoios externos ($A_{s,ef} = 7,363$ cm²). Dessa forma, a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos em comparação com os valores da literatura de referência, onde é utilizada a ancoragem com gancho.

Tabela 3 – Comparação dos resultados obtidos no
cálculo das ancoragens

Variável	Planilha desenvolvida	Carvalho e Figueiredo Filho (2014)
a_l (cm)	63,569	63,500
l_b (cm)	54,638	54,500
$A_{s,anc}$ (cm ²)	3,918	3,920
$l_{b,nec}$ (cm)	20,352	20,000

Fonte: Autores, 2023

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para o dimensionamento de vigas de concreto armado no ELU. A ferramenta desenvolvida possui rotinas para o dimensionamento à flexão, à força cortante e também para o cálculo das ancoragens. Para ilustrar a acurácia dos dados obtidos pela planilha, foi apresentada uma aplicação do dimensionamento de vigas. Nesta verificação, observou-se que os resultados convergiram para os valores de referência, com pequenas diferenças em virtude de processos de aproximação observados na literatura. Dessa forma, através de um ambiente *online*, colaborativo e de fácil utilização, a ferramenta desenvolvida assume um papel de suporte ao ensino e aprendizagem no estudo das estruturas de concreto. A planilha desenvolvida pode ser obtida de forma gratuita através do contato via *e-mail* com os autores deste trabalho.

Para além da validação da planilha, o desenvolvimento da ferramenta representou uma forma eficaz de consolidar o conhecimento aprendido pelo aluno, uma vez que necessitou de interpretações e raciocínios críticos durante o processo de implementação do ambiente. No que diz respeito a contribuição da ferramenta em sala de aula, pretende-se coletar, após a disponibilização da planilha, um *feedback* dos alunos da disciplina do próximo semestre letivo. Dessa forma, será possível conferir e apresentar em trabalhos futuros um estudo mais aprofundado que reitere os impactos positivos atrelados à aplicação da tecnologia no âmbito educacional, referenciados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por todo apoio e espaço disponibilizado aos estudantes. Além disso, os autores agradecem ao Centro de Tecnologia (CTEC), em especial ao corpo docente da área de Engenharia das Estruturas, por todo o aprendizado compartilhado e incentivo em prol da ciência.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. S. dos S. **Flexão normal simples – vigas**. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2015.

BASTOS, P. S. dos S. **Ancoragem e emenda de armaduras**. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2018.

BELISÁRIO, A. B.; FARIA, D. G.; CHAVES, D. H. de S.; ALMEIDA, G. M. de; CARDOSO, M. Relato de experiência de inserção de tecnologias digitais no ensino de Engenharia. **Revista Docência do Ensino Superior**, Belo Horizonte, v. 10, p. 1-18, 2020.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. São Paulo: Editora da Universidade Federal de São Carlos. 2014.

JUNIOR, F. H. M. M.; OLIVEIRA, D. M. Otimização de vigas de concreto armado com seção retangular submetidas à flexão normal simples. **Revista Construindo**, Belho Horizonte, v.6, n. 1, 2014.

JÚNIOR, Itajá Dantas de Souza. **Planilha de cálculo para verificação de pilares de concreto armado**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40707>. Acesso em: 05 jun. 2023.

LICKLIDER, J. C. R. The Impact Of Computers on Education in Engineering Design. In: **Proceedings of the Conference on the Impact of Computers on Education in Engineering Design**. Washington, D.C., USA, 1966.

LOPES, Arlindo P.; CASTRO, Li Chong Lee B.; NEVES, Carlos Eduardo. Utilização de planilhas eletrônicas no ensino do método de cross. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2005, Campina Grande. **Anais**. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/14/artigos/DF-5-61576751287-1119039207634.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2023.

THE USE OF SPREADSHEETS FOR EDUCATIONAL SUPPORT IN THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract: *The study of mechanics of materials related to reinforced concrete provides to engineering students an indispensable knowledge for their professional formation. In the context of teaching-learning, it is necessary to search for tools that allow the optimization of design calculations and promote critical thinking of the student about the results obtained. In this context, the present work presents the development of a spreadsheet to help design reinforced concrete beams. It is a tool obtained through Google Spreadsheets, which is an online platform, collaborative and free. About the implementations behind the developed platform, the spreadsheet has routines for flexural design, shear force design, anchorage calculation and longitudinal reinforcement detailing. The tool is validated through the analysis of a numerical application taken from a renowned literature in the field of structural engineering. Through the comparison of the results obtained by the spreadsheet with the literature values, it is verified that the spreadsheet presents an adequate performance.*

Keywords: *Beam design, reinforced concrete, spreadsheet.*