

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO RETANGULAR SUBMETIDAS À FLEXÃO NORMAL SIMPLES

OPTIMIZATION OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH RECTANGULAR SECTION REFERRED TO NORMAL SIMPLE BENDING

JUNIOR, Felix Horacio Muñoz Muñoz

Engenheiro Civil. Universidade Federal de Minas Gerais
felixjrmunoz@yahoo.com.br

OLIVEIRA, Danielle Meireles de

Doutora em Engenharia de Estruturas. Professora Adjunta Deptº Eng. Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais
danielle@demc.ufmg.br

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a otimização do custo de vigas de concreto armado, biapoiadas, de seção retangular, submetidas a um carregamento uniformemente distribuído. O estudo foi realizado a partir da elaboração de planilhas eletrônicas no software Microsoft Office Excel, capazes de fazer o dimensionamento e o cálculo dos custos de confecção das vigas, respeitando as prescrições impostas pela NBR 6118:2007. Com o auxílio do recurso Solver foram feitos os dimensionamentos de forma otimizada. As variáveis de projeto consideradas foram as dimensões da seção transversal, a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), a quantidade de barras e os diâmetros que compõem as armaduras transversais e longitudinais. As restrições impostas estão relacionadas às dimensões mínimas da base da seção transversal, à taxa de armadura e à flecha total calculada para a viga.

Diversas situações de cálculo foram analisadas. Os resultados obtidos apresentaram uma tendência para a redução na dimensão da base da viga e a adoção da altura próxima a 10% do comprimento do vão. Verificou-se, também, que as fôrmas são o insumo majoritário na composição do custo das vigas de concreto armado. O dimensionamento otimizado apresentou considerável economia em relação a outras soluções possíveis.

Palavras-chave: Otimização, Vigas, Concreto armado

ABSTRACT

This paper presents a study on the cost optimization of reinforced concrete beams, doubly supported, with rectangular section subjected to a uniformly distributed load. The study was conducted from the preparation of spreadsheets in Microsoft Office Excel software, for sizing and calculation of the beams costs, respecting the prescriptions of the NBR 6118:2007. With the help of Solver tool the optimal sizings were made. The design variables considered were the dimensions of the cross section, the characteristic strength of the concrete to compression (f_{ck}), the amount of bars and diameters that make up the transverse and longitudinal reinforcements. The restrictions are related to the minimum dimensions of the base of the cross section, the reinforcement ratio and total deflection calculated for the beam. Several calculation situations were analyzed. The results showed a trend towards reduction in the beam width and the adoption of height around 10% of the span length. It was also obtained that the formworks are the major ingredient in the composition of the cost of reinforced concrete beams. The optimized design showed considerable savings over other possible solutions.

Keywords: Optimization, Beams, Reinforced concrete

INTRODUÇÃO

A primeira etapa da elaboração de um projeto estrutural é a definição da estrutura a partir de um projeto básico. Neste momento, determina-se o material utilizado, a localização dos elementos estruturais (pilares, vigas, escadas, dentre outros) e as dimensões preliminares desses elementos. Os vãos das vigas e lajes, a quantidade de pilares e o carregamento da estrutura são fatores que influenciam no pré dimensionamento dos elementos estruturais. Em todo caso é usual que essa escolha seja feita baseada na experiência do engenheiro e em projetos anteriores similares. Essas dimensões são necessárias para que se inicie o processo de cálculo e podem ser alteradas durante a elaboração do projeto (ARAÚJO, 2009).

Como são muitas as soluções possíveis para um mesmo projeto é natural a busca pela solução que possua um custo otimizado. O termo “solução otimizada” é comumente usado em escritórios de engenharia para designar uma solução que seja mais econômica do que uma previamente realizada. No entanto, o conceito matemático de otimização é a tarefa de determinar os valores máximo e/ou mínimo para uma determinada grandeza relacionada a outras variáveis (SWOKOWSKI, 1994). Portanto, a otimização de custos busca a solução mais econômica dentre todas as possíveis. Embora existam diversas ferramentas computacionais de análise e dimensionamento de estruturas, não é comum a incorporação de módulos que automatizem o processo de busca por soluções otimizadas (BORDIGNON, 2012).

Devido aos prazos cada vez mais curtos para a elaboração de projetos estruturais, torna-se inviável o refinamento sucessivo da solução adotada na busca do custo otimizado. Na prática, é analisada a estrutura pré-dimensionada pelo engenheiro projetista, e caso esta atenda aos requisitos estabelecidos por norma, será a solução adotada.

Presente na grande maioria das edificações, as vigas de concreto armado são elementos estruturais de grande importância na construção civil e seu estudo é justificado na medida em que uma pequena redução no custo de cada peça pode representar uma grande economia no produto final.

É nesse contexto que o presente trabalho tem como objetivo o estudo de dimensionamento de custo otimizado de vigas de concreto armado, de seções retangulares, biapoiadas, submetidas à flexão simples.

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

A NBR 6118:2007 estabelece as diretrizes para o dimensionamento de vigas de concreto armado que consiste, resumidamente, na determinação das armaduras longitudinal e transversal e verificação da deformação da viga. O princípio geral para o dimensionamento é caracterizado por meio da seguinte expressão:

$$Sd \leq Rd$$

sendo:

Sd o valor das solicitações de cálculo.

Rd o valor das resistências de cálculo.

O dimensionamento das armaduras longitudinais tem como objetivo a determinação das áreas de aço necessárias para combater o esforço de flexão. Há duas situações a considerar: vigas com armadura simples (apenas no banzo tracionado) e vigas com armadura dupla (nos banzos tracionado e comprimido), necessária quando o esforço solicitante é elevado. Em todos os casos as áreas de aço são obtidas por meio de equações de equilíbrio estático na seção transversal. Há ainda uma armadura longitudinal lateral denominada armadura de pele, que deve ser utilizada em vigas com altura superior a 60 cm.

O dimensionamento das armaduras transversais consiste na determinação da área de aço necessária para combater o esforço cortante nas vigas de concreto armado. Essa área de aço é composta pelos estribos, e o seu cálculo é baseado na teoria da treliça de Morsch, em que o banzo e as diagonais comprimidas são formados pelo concreto, o banzo tracionado pela armadura longitudinal e as diagonais tracionadas pelos estribos.

A deformação da viga é baseada na equação da linha elástica, da teoria da resistência dos materiais. A flecha total é composta de duas parcelas: flecha imediata, decorrente da ação instantânea do carregamento e flecha diferida, associada aos fenômenos de fluência do concreto.

ELEMENTOS E CUSTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

As edificações são atividades eminentemente econômicas, portanto o aspecto custo reveste-se de especial importância, independente da localização, tipo de projeto ou recursos disponíveis (MATTOS, 2006).

Estima-se que o custo da estrutura, sem considerar as fundações, gira em torno de 20% a 25% do custo total de uma obra pronta para utilização (GIONGO, 2007). Esse elevado percentual ressalta a importância do engenheiro projetista para um dimensionamento apropriado de cada um dos elementos estruturais.

O custo das vigas de concreto armado envolve os materiais que a compõem como o concreto simples, as armaduras longitudinais e transversais, as fôrmas, os escoramentos e também a mão de obra envolvida no processo. Portanto, as dimensões finais do elemento, bem como o cálculo e a escolha da armadura, influenciam diretamente no custo final.

No Brasil, existem diversas instituições que pesquisam e divulgam valores atualizados para insumos e serviços relacionados à construção civil. Neste trabalho foram considerados os dados apresentados pelo SINAP - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, coletados em Agosto de 2013, na cidade de Belo Horizonte - Minas Gerais. Esse sistema é gerido por uma parceria entre a Caixa Econômica Federal e o IBGE.

METODOLOGIA

Para analisar o custo ótimo de vigas de concreto armado, de seção retangular, biapoiadas, submetidas

a um carregamento uniformemente distribuído, foram elaboradas planilhas eletrônicas com o auxílio do software Microsoft Office Excel. Nessas planilhas constam os dimensionamentos das armaduras longitudinais de tração e compressão, o dimensionamento da armadura transversal e verificação das bielas de concreto comprimidas, o cálculo das deformações, o cálculo das taxas de armadura, os índices de custos de insumos e serviços relativos à produção e também o detalhamento das seções transversais. Todos os dimensionamentos e verificações seguiram as prescrições da NBR 6118:2007.

Os dimensionamentos de custo otimizado foram realizados com o auxílio do recurso Solver. O Solver é uma ferramenta de análise hipotética, que determina o valor máximo e/ou mínimo de uma fórmula numa célula, denominada célula objetivo. Inicialmente determinam-se as células variáveis e os limites de restrição do problema, que podem estar direta ou indiretamente relacionadas à célula objetivo. O *Solver* ajusta os valores nas células variáveis, respeitando as restrições impostas, para fornecer o valor otimizado procurado.

Nas análises desenvolvidas, a função a ser minimizada foi o custo total das vigas. As variáveis de projeto consideradas foram as dimensões da base (b) e altura (h) da seção transversal, a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) e o diâmetro das armaduras longitudinais e transversais. As restrições impostas foram valores inteiros para as dimensões b e h da seção transversal, o valor de b maior ou igual a 12 cm, a flecha atuante na viga menor que vão/250, a tensão de compressão atuante nas bielas de concreto menor que a tensão resistente e a taxa de armadura longitudinal menor que 4% da área da seção transversal. A figura 1 ilustra um relatório de cálculo gerado pela planilha desenvolvida.

RESULTADOS OBTIDOS

Nas análises realizadas, verificou-se que, no dimensionamento otimizado de vigas, sob diversos valores de carregamentos e vãos, o valor da base da

seção transversal (b) apresentou, em todos os casos, as dimensões mínimas impostas nas restrições da modelagem. Segundo Araújo (2009), a escolha da largura das vigas é determinada pela arquitetura da edificação, procurando-se escondê-las dentro das alvenarias. Conclui-se, então, que para um dimensionamento otimizado de vigas de concreto armado, devem ser adotadas as dimensões mínimas possíveis para a base da viga, respeitando-se os limites preconizados pela NBR 6118:2007 e pela arquitetura do projeto.

FLEXÃO NORMAL SIMPLES EM VIGA DE CONCRETO ARMADO				
DADOS DE ENTRADA				
CA=	50	kN/cm ²	PREÇO AÇO(R\$/kg)=	5,82
SEÇÃO TRANSVERSAL			PREÇO CONCRETO(R\$/m ³)=	348,71
d'=	4	cm	VÃO=	4
cobrimento=	3	cm	SOBRECARGA=	12
			CARGA LONGA DUR. APLICADA AOS	28
			DIAS	
DADOS DE SAÍDA-SEÇÃO OTIMIZADA				
CONCRETO				
fck=	25	Mpa	SEÇÃO TRANSVERSAL	
			b=	15
			h=	40,00
ARMADURAS LONGITUDINAIS				
	CALCULADA	N BARRAS	DIÂMETRO (Ø)	As Real cm ²
As=	2,593	cm ²	4	10
A's=	0,000	cm ²	2	5
Asl=	0,000	cm ²	#N/D	#N/D
ÁREA DE AÇO DA ARMADURA TRANSVERSAL				
Asw, 2pernas=	0,77	cm ² /m	DIÂMETRO (Ø)	ESPAÇAMENTO (cm)
Asw, 2pernas=	0,77	cm ² /m	5	21
COMPRESSÃO DAS BIELAS=	PASSOU		Asw Real (cm ² /m)	0,93
CUSTOS DA VIGA				
TAXA DE ARMADURA=	0,58867		CUSTO AÇO LONGITUDINAL(R\$)=	64,55
			CUSTO AÇO TRANSVERSAL(R\$)=	16,37
			CUSTO DO CONCRETO(R\$)=	83,69
FLECHA TOTAL=	1,6	cm	CUSTO DAS FÓRMAS(R\$)=	165,54
FLECHA ADMISSÍVEL=	1,6	cm	CUSTO TOTAL(R\$)=	330,15

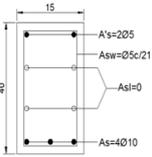


Figura 1 - Relatório gerado pela planilha de cálculo desenvolvida.

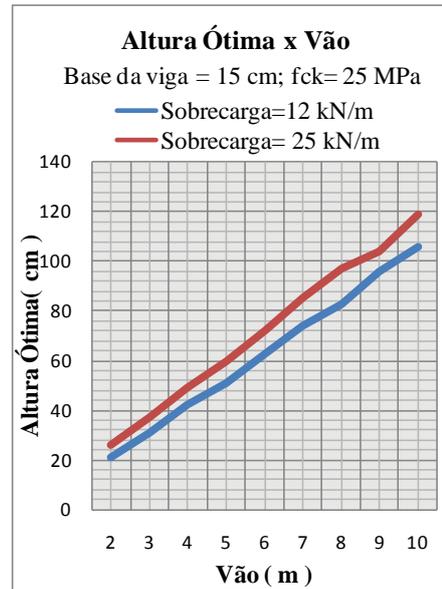
Altura ótima em função do comprimento do vão e do f_{ck} do concreto

O estudo da altura ótima em função do comprimento do vão e do f_{ck} do concreto teve como objetivo analisar o valor mais econômico para a altura de vigas e compará-lo com as dimensões sugeridas pela literatura especializada na fase de pré-dimensionamento.

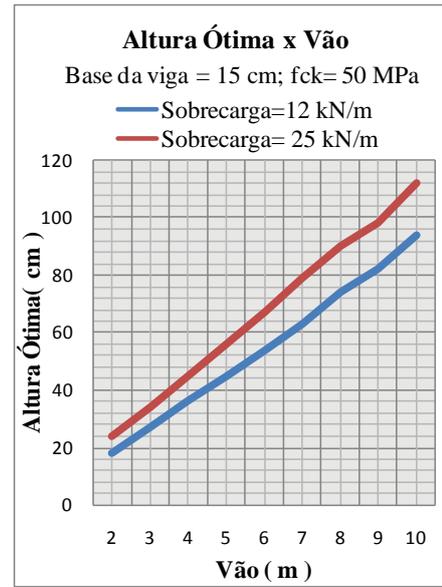
Para realizar esse estudo, foram elaboradas curvas com o valor da altura ótima de vigas para diferentes valores de resistência do concreto, com base igual a 15 cm e vãos variando de 2 a 10 m. Baseado nos resultados de projeto obtidos por Araújo (2009), foi estabelecido como carregamento mínimo e máximo atuante, uma sobrecarga igual a 12 kN/m e 25 kN/m, respectivamente. O peso próprio da viga foi considerado automaticamente na planilha elaborada e variou de acordo com as iterações do processo de otimização. Os resultados obtidos para vigas com f_{ck} igual a 25 MPa e

50 MPa estão apresentados na figura 2.

Observou-se que existe uma relação aproximadamente linear entre a altura ótima das vigas e o comprimento do vão, independente da resistência do concreto. Verifica-se que para um mesmo f_{ck} , a inclinação da reta é maior para o carregamento máximo, e comparando as curvas obtidas para os diversos valores de f_{ck} verifica-se que a inclinação diminui à medida que o f_{ck} aumenta.



25 MPa



50 MPa

A tabela 1 apresenta as faixas de valores encontrados para a relação percentual da altura ótima em relação ao comprimento do vão, para as sobrecargas máxima e mínima e para os diferentes valores de f_{ck} estudados.

<i>Relação altura ótima/ comprimento do vão</i>		
fck (MPa)	Sobrecarga Mínima	Sobrecarga Máxima
20	10,20% - 11,0%	12,10% - 13,50%
25	10,20% - 10,70%	11,60% - 13,00%
30	9,75% - 10,40%	11,30% - 12,50%
35	9,50% - 10,10%	11,20% - 12,50%
40	9,30% - 9,70%	11,10% - 12,00%
45	9,20% - 9,60%	11,00% - 12,00%
50	9,00% - 9,40%	10,90% - 12,00%

Tabela 1 - Faixa de valores percentuais da relação Altura Ótima/Comprimento do Vão

Segundo Margarido (2007) e Pinheiro (2007) a estimativa para a altura de vigas na fase de pré dimensionamento corresponde a 10% do comprimento do vão. Verifica-se que o valor sugerido pela literatura está próximo das faixas de valores encontrados, para a maior parte das classes de resistência do concreto. Para concretos com f_{ck} superiores a 25 MPa e um carregamento de valor intermediário entre o mínimo e o máximo considerados, é provável que a altura ótima esteja próxima a 10% do comprimento do vão. Já para concretos com f_{ck} inferiores a 25 MPa ou para carregamentos elevados encontrou-se proporções ligeiramente superiores. Os resultados obtidos ratificam os valores sugeridos pela literatura especializada.

Composição de custos das vigas

No estudo da composição de custos das vigas foram considerados os custos relativos às fôrmas, ao aço e ao concreto. O custo do escoramento foi considerado incorporado ao custo das fôrmas. O objetivo desse estudo foi verificar a influência dos insumos na composição do custo total, para diversas situações de cálculo. Para realizá-lo foram analisadas as composições de custos das vigas com dimensionamento otimizado, para resistências do concreto variando de 20 a 50 MPa, com vãos iguais a 5 metros, bases das seções transversais

iguais a 15 cm e para os carregamentos máximo e mínimo definidos no item 5.1. O resultado obtido para vigas com $f_{ck} = 30$ MPa é apresentado na figura 3.



Figura 3 - Gráfico da composição de custos para vigas com f_{ck} igual a 30 MPa.

Observou-se que para uma sobrecarga de 12 kN/m e um vão de 5 m o insumo preponderante no custo total das vigas de concreto armado foram as fôrmas, que apresentaram uma participação que variou de 45% a 54% do custo total da peça, seguidas do concreto e do aço com participações que variaram de 26% a 31% e de 20% a 24% do custo total, respectivamente. Verificou-se que, na medida em que se aumentou o f_{ck} do concreto utilizado, as participações do concreto e do aço na composição do custo total aumentaram e das fôrmas reduziu. Esse fato é justificado pela redução na altura das vigas, que diminuiu o consumo de fôrmas e aumentou os valores das áreas de aço necessárias e, também, pelo fato do valor do concreto ser aproximadamente proporcional a sua resistência.

Para uma sobrecarga de 25 kN/m e um vão de 5 m, constatou-se que houve um aumento no percentual do custo total para o aço, em relação a sobrecarga de 12 kN/m. Entretanto o insumo preponderante continuou sendo a fôrma, com participações variando de 44% a 49% do custo total.

Comparação entre o dimensionamento otimizado e outras soluções

Para analisar as possibilidades de economia na execução das vigas de concreto armado, foram comparados os custos de vigas com dimensionamento otimizado em relação aos custos de outras soluções

possíveis, para uma mesma situação de cálculo (vão e sobrecarga). A figura 4 apresenta o dimensionamento otimizado para vigas vencendo um vão de 8 m e uma sobrecarga de 25 kN/m e as figuras 5 e 6 soluções alternativas.

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO						
Situação de Cálculo			Dimensionamento			Detalhamento
Vão=	8	m	fck=	25	Mpa	
Sobrecarga=	25	kN/m	b=	12	cm	
			h=	97	cm	
Custos de Produção						
Custo do aço longitudinal(R\$)=			405,35			
Custo do aço transversal(R\$)=			63,78			
Custo do concreto(R\$)=			324,72			
Custo das fôrmas(R\$)=			716,84			
Custo Total(R\$)=			1510,69			

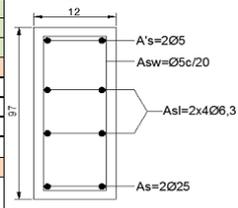


Figura 4 - Dimensionamento otimizado para um vão de 8 m e uma sobrecarga de 25 kN/m.

SOLUÇÃO ALTERNATIVA 1						
Situação de Cálculo			Dimensionamento			Detalhamento
Vão=	8	m	fck=	30	Mpa	
Sobrecarga=	25	kN/m	b=	15	cm	
			h=	95	cm	
Custos de Produção						
Custo do aço longitudinal(R\$)=			409,50			
Custo do aço transversal(R\$)=			58,55			
Custo do concreto(R\$)=			430,30			
Custo das fôrmas(R\$)=			715,50			
Custo Total(R\$)=			1613,85			
ECONOMIA DA SEÇÃO OTIMIZADA EM RELAÇÃO A ESSA SOLUÇÃO			6,40%			

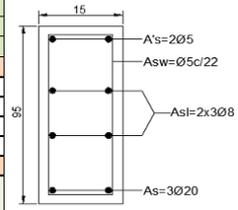


Figura 5 - Solução alternativa 1.

SOLUÇÃO ALTERNATIVA 2						
Situação de Cálculo			Dimensionamento			Detalhamento
Vão=	8	m	fck=	45	Mpa	
Sobrecarga=	25	kN/m	b=	20	cm	
			h=	86	cm	
Custos de Produção						
Custo do aço longitudinal(R\$)=			445,17			
Custo do aço transversal(R\$)=			99,83			
Custo do concreto(R\$)=			609,14			
Custo das fôrmas(R\$)=			673,22			
Custo Total(R\$)=			1827,36			
ECONOMIA DA SEÇÃO OTIMIZADA EM RELAÇÃO A ESSA SOLUÇÃO			17,32%			

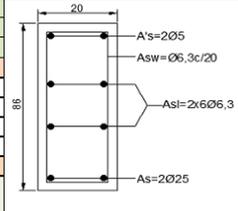


Figura 6 - Solução alternativa 2.

Constata-se que o custo total da viga otimizada apresentou uma economia de 6,40% e 17,32%, respectivamente, em relação às outras soluções analisadas, sendo que o insumo mais significativo para essa economia foi o concreto utilizado. Para a situação de cálculo analisada o concreto de alta resistência apresentou baixo custo benefício já que a sua utilização não representou uma redução nas medidas da seção transversal suficientes para compensar o seu valor mais elevado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do trabalho apresentado verifica-se que é possível incorporar ao cotidiano de trabalho do engenheiro projetista o dimensionamento de custo otimizado de vigas de concreto armado, biapoiadas, de seção retangular, submetidas a um carregamento uniformemente distribuído.

No dimensionamento otimizado, a base da seção transversal apresentou as dimensões mínimas impostas nas restrições, para todas as situações de cálculo. Dessa forma, devem ser adotadas as dimensões mínimas possíveis para a base da viga, respeitando-se os limites preconizados pela NBR 6118:2007 e pela arquitetura do projeto.

A altura ótima de vigas de concreto armado pode ser analisada em função do vão a ser vencido e do carregamento atuante. O valor da altura que conduz ao custo mínimo está próximo de 10% do comprimento do vão. Valores ligeiramente superiores são obtidos para vigas com concretos com fck menores que 25 MPa e também para carregamentos elevados.

A fôrma é o insumo preponderante na composição do custos de vigas otimizadas. Sua participação é de aproximadamente 50% do custo total. Esse resultado ressalta a importância da pesquisa de preços, da correta execução e do reaproveitamento desse insumo.

Não existe um valor definido para o f_{ck} do concreto, no dimensionamento otimizado de vigas. Em algumas situações o custo mais elevado dos concretos de alta resistência foi compensado pela redução no volume de concreto necessário e redução na quantidade de fôrmas, em outras situações não houve essa compensação.

O dimensionamento otimizado dos elementos apresenta significativa economia em relação a outras soluções possíveis para uma mesma situação de cálculo. Dessa forma, um projeto econômico deve analisar a padronização dos elementos estruturais em conjunto com as soluções otimizadas.

Este trabalho também abre possibilidades para o estudo da otimização de outros elementos estruturais como pilares, lajes, escadas, dentre outros.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO, J. M. Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado. 2ª Edição. Rio Grande: editora Dunas, 232p. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

BORDIGNON, R. Diretrizes para minimização do custo de pilares de concreto armado. Revista Técnica, Edição 178, p. 50-53, Janeiro 2012.

GIONGO, J. S. Concreto Armado: Projeto Estrutural de Edifícios. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007.

MARGARIDO, A. F. Fundamentos de Estruturas. 3ª Edição. São Paulo: editora Ziguarte, 336p. 2007.

MATTOS, A. D. Como preparar orçamentos de obras: dicas para orçamentista, estudo de caso, exemplos. 1ª Edição. São Paulo: editora Pini Ltda, 2006.

PINHEIRO, L. M. Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2007.

SINAPI - Índices da Construção Civil. Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programa_des_urbano/sinapi/index.asp> Acesso em: 15/10/2013.

SWOKOWSKI, E. W. Cálculo com geometria analítica. Vol. 1, 2ª Edição. São Paulo: editora Makron Books, 744p. 1994.