



ANÁLISE EXPERIMENTAL ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Palavras-Chave: [bloco de concreto], [alvenaria estrutural], [resistência ao fogo]

Autores/as:

Any Elizi Batista dos Santos [E. E. PROF. AMÉRICO BELLUOMINI]

Beatriz Lapa de Camargo [E. E. CULTO À CIÊNCIA]

Julia Marcondes Fico [E. E. PROCÓPIO FERREIRA]

Stephany Domingues Lima [E. E. FELIPE CANTÚSIO]

Eng^o Rafael Postigo Mazzali (mestrando)*

Prof^a Dr^a Carla Neves Costa (orientadora)*

*[Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

A alvenaria estrutural é um tipo de estrutura de edificações onde a alvenaria apresenta a dupla função: vedação e estabilidade estrutural. O material é composto de blocos estruturais fixados entre si por argamassa (normalmente de cimento Portland). Ambos os materiais são diferentes, apresentando propriedades mecânicas e térmicas ligeiramente diferentes à temperatura ambiente. A capacidade resistente do conjunto bloco de concreto e argamassa depende: das resistências do bloco, da argamassa e da adesão bloco-argamassa. Os modos de falha da alvenaria estrutural são três: rupturas do bloco ou da argamassa, ou ainda, por descolamento entre os blocos e a argamassa. Nos projetos para a situação normal de uso, os materiais são selecionados cuidadosamente para apresentarem resistências mecânicas com valores próximos. Em altas temperaturas, a heterogeneidade dos materiais é destacada. Acima dos 100 °C, os materiais estruturais perdem resistência mecânica podendo levar desabamento de edifícios (COSTA *et al.*, 2002).

Neste trabalho é apresentada uma pesquisa aplicada, que busca solucionar um problema de resistência ao fogo de edificações: medir a resistência mecânica de argamassa de assentamento de blocos de concreto de alvenaria estrutural em altas temperaturas para “mapear” os níveis de resistência à adesão aos blocos para temperaturas $\theta \geq 100$ °C. São apresentados os procedimentos e os resultados de uma etapa prévia à análise experimental, para guiar a preparação de corpos de prova de alvenaria estrutural que serão aquecidos em um forno para medir a resistência a fogo. Foi selecionado o bloco vazado de dois furos da “família 29” (**Figura 1**), considerado o bloco-padrão de uma parede de alvenaria, usando em todo o vão sem interferências. Os blocos de um ou três furos são usados nas amarrações tipos “T” e cruz dos encontros de paredes que são locais de menor incidência do fluxo de calor em uma situação de incêndio (**Figura 2**). Após o aquecimento, os corpos de prova serão carregados até a ruptura, para medir carga de ruptura; os resultados apurados permitirão “mapear” a redução da resistência de adesão da argamassa em função da temperatura, para uso no projeto de alvenaria estrutural em situação de um incêndio.

A pesquisa está em desenvolvimento no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

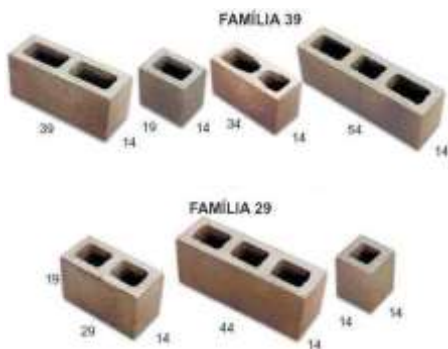


Figura 1 – Tipos padronizados ou “Famílias” de blocos de concreto. Fonte: Désir (s. d.).

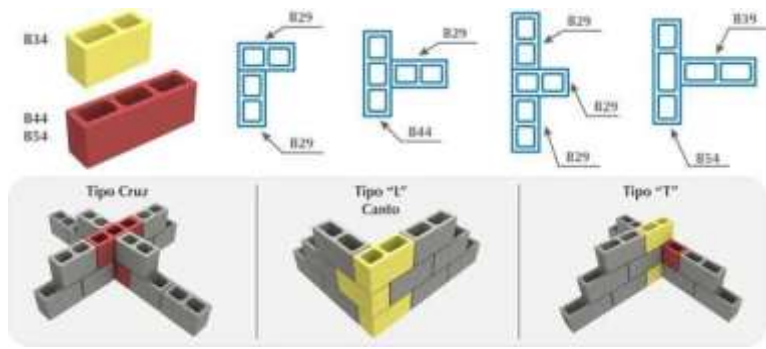


Figura 2 – Bloco vazado de concreto simples. Fonte: GoiarTE (2016).

OBJETIVOS:

- Investigar o fenômeno de transferência de calor por condução em um elemento de parede de alvenaria estrutural, usando-se as hipóteses de um caso clássico da Física Térmica.
- Verificar a precisão dos resultados de cálculos “manuais” e de análise numérica computacional usada quando se adota a formulação geral que descreve o problema.
- Identificar lacunas de informações a serem investigadas em ensaio experimental.

JUSTIFICATIVA:

Cálculos simplificados com base nas leis da Física, são indicados em normas técnicas para avaliação do conforto térmico de edificações (ABNT NBR 15220-2:2005). Nas pesquisas experimentais, as análises teóricas simulação computacional são usadas para o planejamento dos ensaios afim de evitar perdas de informações e danos a equipamentos. Uma análise preliminar auxilia as etapas de instrumentação dos corpos de prova e de execução dos ensaios.

METODOLOGIA:

Análise teórica numérica comparativa entre os cálculos simplificados “manuais” e cálculos avançados com auxílio computacional para análise numérica. As hipóteses de cálculo adotadas são as mesmas hipóteses do caso particular da transferência de calor unidimensional por condução (INCROPERA *et al.*, 2014; ÇENGEL & GHAJAR, 2012): fluxo de calor uniformemente distribuído sobre a superfície de uma unidade de alvenaria; fluxo de calor unidirecional, incidindo perpendicular à superfície da unidade de alvenaria; condução de calor descrita pela equação de Fourier; sistema conservativo¹; regime térmico estacionário; propriedades térmicas constantes.

Pela lei de Fourier, o fluxo de calor por condução é uma energia térmica perpendicular à área da superfície aquecida e atravessa a parede de espessura $\Delta\ell$ (eq. 1). Para as hipóteses adotadas, a equação permite uma analogia entre o fluxo de calor e a corrente elétrica, onde a resistência térmica é similar ao de resistência elétrica. A aplicação do conceito de resistência térmica (eq. 2) é explorada nos estudos introdutórios de Física no Ensino Médio (MATIAS & FRATTEZI, 2010; SILVA & BARRETO FILHO, 2015; FERRARO *et al.*, 2019), e tem aplicação na Engenharia Civil para avaliar o desempenho térmico de elementos de edificações onde a variação térmica decorre do aquecimento solar e das variações climáticas (ABNT NBR 15220-2:2005).

$$q_x'' = - \frac{\lambda \cdot \text{Área} \cdot \Delta\theta}{\Delta\ell} \quad (1)$$

onde: q_x'' = fluxo de calor por condução na direção “x” [W];

λ = condutividade térmica do material [W/(m*K)];

Área = área da superfície perpendicular à ação do fluxo de calor por condução [m²];

$\Delta\theta = (\theta_{\text{hot}} - \theta_0)$ [°C; K];

$\Delta\ell$ = espessura da parede ou das camadas da parede [m].

$$R_t = \frac{\Delta\ell}{\lambda \cdot \text{Área}} \quad (2)$$

onde: R_t = resistência térmica da parede ou da camada da parede [K/W].

¹ Onde não há variação de energia térmica na condução de calor dentro da alvenaria.

MATERIAIS:

Os materiais usados são: concreto para bloco estrutural, argamassa de cimento Portland para o assentamento dos blocos e ar que preenche furos dos blocos considerados duas câmaras internas. O bloco estrutural vazado da “família 29” (**Figura 1**), com dois furos, altura = 0,19 m x largura = 0,14 m x comprimento = 0,29 m, espessura das paredes externas e interna = 25 mm (**Figura 3**). A argamassa de assentamento possui espessura = 10 mm assumindo-se o valor médio dentro da tolerância indicada na ABNT NBR 16868-2:2020. As propriedades térmicas dos materiais estão apresentadas na **Tabela 1**. Por simplicidade do modelo, o ar foi considerado um material sólido equivalente com condutividade constante para $\theta \geq 100$ °C.

Tabela 1 – Propriedades térmicas dos materiais da unidade estrutural de bloco.

Materiais	Condutividade térmica λ [W/(m*K)]	Fontes
concreto	1,6	EN 1994-1-2:2005
ar	0,5294*	ABNT NBR 15220-2:2005
argamassa	1,15	ABNT NBR 15220-2:2005

Notas: * Calculado com base no valor da resistência térmica de câmaras de do ar (furos de blocos vazados) sujeitos ao fluxo de calor horizontal perpendicular à face externa da parede (Tabela B.1 do Anexo B da ABNT NBR 15220-2:2005, p. 11).

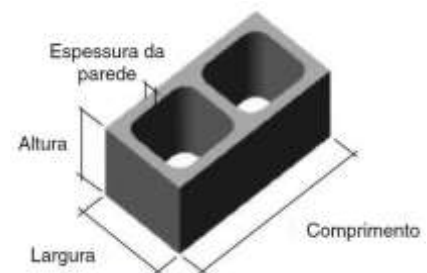


Figura 3 – Bloco vazado de concreto simples. Fonte: ABNT NBR 6136:2016

EQUIPAMENTOS:

- **Hardware:** Computador *laptop* com processador Core™ i5 7400, memória RAM 8 GBytes, HD 1 TBytes, placa de vídeo 4 GBytes, monitor LCD LED e resolução de 1366 x 768; *mouse* óptico.
- **Software:** sistema operacional *Microsoft® Windows®* v. 10, aplicativos básicos do *Microsoft® Office 365®* (*Word®, Excel®* e *Power Point®*), navegador de internet *Google Chrome Versão 92.0.4515.159* (Versão oficial) 64 bits); *LISA Finite Element Analysis v. 8.0.0* (versão demo)².

PROCEDIMENTOS:

A **Figura 4** apresenta as etapas dos procedimentos. Para a análise unidimensional teórica, foram considerados três modelos de cálculo da resistência térmica equivalente (**Figura 5; Tabela 2; Tabela 3; Tabela 4**), desprezando-se a existência de uma resistência térmica de contato entre as camadas de concreto e de argamassa. Para a análise a bidimensional (2D) do fluxo de calor, foi usado *software* LISA v. 8.0.0 para o cálculo numérico usando-se o método dos elementos finitos.



Figura 4 – Procedimentos de investigação teórica e numérica. Fonte: Autoral

Tabela 2 – Cálculos de resistência equivalente do modelo ①.

Espessura das camadas [m]	λ [W/(m*K)]	Cálculo da área superficial			resistências R_t [K/W]	
		base [m]	altura [m]	Área da superfície [m²]		
$\Delta\ell, \text{faixa bloco} =$	0,09	1,6	0,025	0,19	0,00475	11,84211
$\Delta\ell, \text{furo (ar)} =$	0,09	0,529	0,1075	0,19	0,020425	8,32313
$\Delta\ell, \text{parede bloco} =$	0,025	1,6	0,1075	0,19	0,020425	0,76499
$\Delta\ell, \text{faixa argamassa} =$	0,09	1,15	0,01	0,19	0,00475	41,18993

² Tutorial and reference guide. LISA Finite Element Analysis. Sonnenhof Holdings: Ontário, 2013. 125 p.

$\Delta\ell, \text{espessura argamas} =$	0,025	1,15	0,01	0,19	0,0019	11,44165
				$R_{t,eq,paralelo1}^{(1)} =$	1,93086	$[\text{m}^2\text{K/W}]$
				$R_{t,eq,paralelo2}^{(2)} =$	0,701705	$[\text{m}^2\text{K/W}]$
				$R_{t,eq,série}^{(3)} =$	3,36496	$[\text{m}^2\text{K/W}]$

- Notas: (1) $\frac{1}{R_{t,eq,paralelo1}} = \frac{3}{R_{t,faixa\ bloco}} + \frac{2}{R_{t,furo}} + \frac{1}{R_{t,faixa\ argamassa}}$;
(2) $\frac{1}{R_{t,eq,paralelo}} = \frac{1}{R_{t,parede\ bloco}} + \frac{1}{R_{t,espessura\ argamassa}}$
(3) $R_{t,eq,série} = R_{t,eq,paralelo1} + 2 \cdot R_{t,eq,paralelo2}$

Tabela 3 – Cálculos de resistência equivalente do modelo alternativo (2).

Espessura das camadas [m]	λ [W/(m*K)]	Cálculo da área superficial			resistências R_t [K/W]	
		base [m]	altura [m]	Area da superfície [m²]		
$\Delta\ell, \text{faixa bloco} =$	0,09	1,6	0,025	0,19	0,00475	11,84211
$\Delta\ell, \text{furo (ar)} =$	0,09	0,529	0,1075	0,19	0,020425	8,32313
$\Delta\ell, \text{parede bloco} =$	0,025	1,6	0,1075	0,19	0,020425	0,76499
$\Delta\ell, \text{faixa argamassa} =$	0,14	1,15	0,01	0,19	0,0019	64,07323
					$R_{t,eq,paralelo1}^{(1)} =$	2,02582 $[\text{m}^2\text{K/W}]$
					$R_{t,eq,série}^{(2)} =$	3,55581 $[\text{m}^2\text{K/W}]$
					$R_{t,eq,paralelo2}^{(3)} =$	3,36885 $[\text{m}^2\text{K/W}]$

- Notas: (1) $\frac{1}{R_{t,eq,paralelo1}} = \frac{3}{R_{t,faixa\ bloco}} + \frac{2}{R_{t,furo}}$
(2) $R_{t,eq,série} = R_{t,eq,paralelo1} + 2 \cdot R_{t,parede\ bloco}$
(3) $\frac{1}{R_{t,eq,paralelo}} = \frac{1}{R_{t,eq,paralelo1}} + \frac{1}{R_{t,faixa\ argamassa}}$

Tabela 4 – Cálculos de resistência equivalente do modelo (3).

Espessura das camadas [m]	λ [W/(m*K)]	Cálculo da área superficial			R_t [K/W]	
		base [m]	altura [m]	Area da superfície [m²]		
$\Delta\ell, \text{faixa bloco} =$	0,14	1,6	0,025	0,19	0,00475	18,42105
$\Delta\ell, \text{furo (ar)} =$	0,09	0,529	0,1075	0,19	0,020425	8,32313
$\Delta\ell, \text{parede bloco} =$	0,025	0,529	0,1075	0,19	0,020425	2,31378
$\Delta\ell, \text{argamassa} =$	0,14	1,15	0,01	0,19	0,0019	64,07323
					$R_{t,eq,série}^{(1)} =$	12,9507 $[\text{m}^2\text{K/W}]$
					$R_{t,eq,paralelo}^{(2)} =$	3,00394 $[\text{m}^2\text{K/W}]$

- Notas: (1) $R_{t,eq,série} = 2 \cdot R_{t,parede} + R_{t,furo}$;
(2) $\frac{1}{R_{t,eq,paralelo}} = \frac{1}{R_{t,eq,série}} + \frac{1}{R_{t,faixa\ bloco}} + \frac{1}{R_{t,argamassa}}$

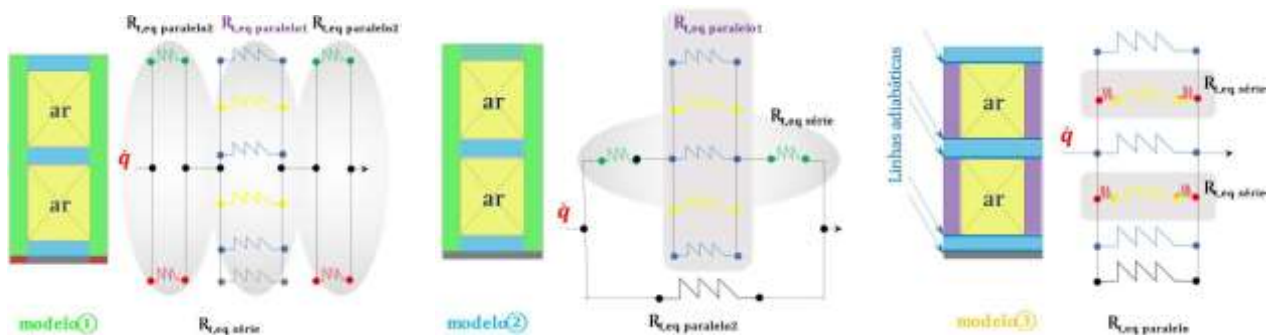


Figura 5 – Modelos de cálculo da resistência térmica equivalente. Fonte: Autoral.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A análise teórica apresentou resultados diferentes do fluxo de calor devido ao modelo de “circuito térmico” usado no cálculo da resistência térmica equivalente (Tabela 5). Há diferenças de resultados superiores a 5%, significando imprecisões que afetam a confiabilidade do modelo adotado nas soluções de Engenharia. A análise 2D numérica computacional mostrou que o gradiente térmico não é constante. Há vórtices localizados, indicando que o fluxo de calor não é unidirecional na seção composta “bloco-argamassa” (Figura 6). Nas regiões dos cantos dos furos há mudanças “caóticas” do sentido do fluxo de calor. O campo de temperaturas não é isotérmico. Na linha de adesão entre o bloco e a argamassa, o degradê significa mudanças da temperatura e do fluxo de calor. É necessário um estudo da influência da resistência térmica de contato entre materiais diferentes para a modelagem computacional. No software foi gerada uma malha de elementos finitos com base em um estudo expedito de refinamento; mas, são necessários estudos de outros tipos de malhas para a precisão de resultados. Para os materiais, adotou-se propriedades térmicas constantes, mas elas variam para temperaturas $\theta > 100$ °C. Uma análise experimental é necessária para checagem.

Tabela 5 – Fluxo de calor por condução para cada modelo de resistência térmica em função das variações térmicas $\Delta\theta$ (°C).

$\Delta\theta = \theta_{hot} - \theta_0$ $\theta_0 = 20\text{ °C}$		fluxo de calor condução Q [W]			fluxo de calor condução \dot{q} [W/m ²]*			Variação dos resultados entre modelos
		$R_{t,eq}$ [K/W]			$R_{t,eq}$ [m ² ·K/W]			
		modelo (1)	modelo (2)	modelo (3)	modelo (1)	modelo (2)	modelo (3)	
θ_{hot} (°C)	$\Delta\theta$ (°C; K)	3,365	3,369	3,004	0,192	0,192	0,171	m(2)/m(1)
20	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12%
200	180	53,49	53,43	59,92	938,46	937,38	1051,25	
400	380	112,93	112,80	126,50	1981,20	1978,92	2219,31	m(3)/m(1)
600	580	172,36	172,17	193,08	3023,94	3020,45	3387,36	12,02%
800	780	231,80	231,53	259,66	4066,68	4061,98	4555,42	

Notas: * Fluxo de calor por unidade de área calculado usando a área da face vertical do conjunto bloco + argamassa, Área = b × h = 0,30 × 0,19 = 0,057 m².

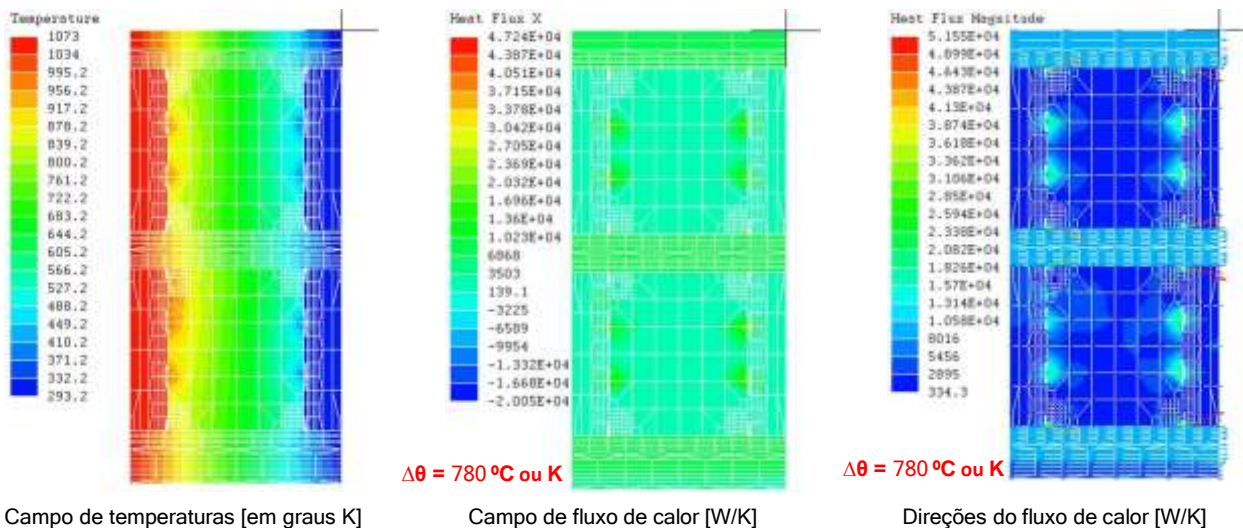


Figura 6 – Saída gráfica de resultados da modelagem numérica do software LISA v.8.0.0. **Fonte:** Autoral

CONCLUSÕES:

Uma análise de condução de calor em um bloco de concreto permitiu comparar os resultados de um modelo teórico unidirecional aos de um modelo numérico bidimensional. A variação do fluxo de calor é significativa quando o material é uma composição de elementos com propriedades térmicas muito diferentes. Para o regime estacionário com pequena variação térmica, a estimativa da resistência térmica equivalente não é trivial. Uma análise experimental é necessária para avaliar a resistência térmica de alvenarias de blocos vazados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2008. 34 p. [Versão corrigida que incorpora a Errata 1 de 09.06.2008]
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16868-2**: Alvenaria estrutural Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2020. 23 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10 p. [Versão corrigida que incorpora a Errata 1, de 01.12.2016]
- Blocos. **GoiarTE**, Aparecida de Goiânia, GO, 2016. Produtos, *online*. Disponível em: http://www.goiarTE.com.br/?page_id=75096. Acesso em: 30 ago. 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**: Uma Abordagem Prática. 4ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 928 p.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1994-1-2**: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, 2005. 109 p.
- COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais. In: NUTAU'2002 - Sustentabilidade arquitetura desenho urbano: Seminário internacional. **Anais...** São Paulo: NUTAU/FUPAM/FAUUSP, 2002. (1 CD-ROM)
- DÉSIR, J. M. Blocos e Tijolos de Concreto. **Alvenaria Estrutural**, Porto Alegre, *online*, [s. d.]. Disponível em: <https://bit.ly/2V8n2eQ>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- FERRARO, N. G.; SOARES, P. T.; FOGO, R. **Física Básica**. 4ª Ed. São Paulo: Saraiva Didáticos, 2019. p. 704.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª Ed. São Paulo: LTC, 2014. 694 p.
- MATIAS, R. FRATTEZI, A. **Física Geral Para o Ensino Médio**. São Paulo: Harbra, 2010. 832 p.
- SILVA, C. X.; BARRETO FILHO, B. 360° **Física**. Aula por Aula: partes 1, 2, 3. Vol. Único. 3ª Ed. São Paulo: FTD Educação.