

Claudius de Sousa Barbosa

RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DE BLOCOS VAZADOS DE  
CONCRETO, PRISMAS E PAREDES E SUAS CORRELAÇÕES COM AS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Tese apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos, como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Doutor em Engenharia  
de Estruturas.

Orientador: Prof. Titular João Bento de Hanai

São Carlos  
2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL  
DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU  
ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE  
CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da  
Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B238r                      Barbosa, Claudius de Sousa  
                                 Resistência e deformabilidade de blocos vazados de  
                                 concreto, prismas e paredes e suas correlações com as  
                                 propriedades mecânicas dos materiais constituintes/  
                                 Claudius de Sousa Barbosa ; orientador João Bento de  
                                 Hanai. -- São Carlos, 2008.

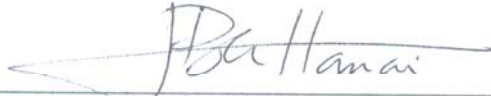
                                 Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de  
                                 Concentração em Engenharia de Estruturas) -- Escola de  
                                 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
                                 2008.

                                 1. Alvenaria estrutural. 2. Blocos vazados de  
                                 concreto. 3. Prismas. 4. Paredes. 5. Propriedades  
                                 mecânicas dos materiais. 6. Modelos numéricos. 7.  
                                 Análise teórica e experimental. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **CLÁUDIUS DE SOUZA BARBOSA**

Tese defendida e julgada em 21/07/2008 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **JOÃO BENTO DE HANAI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

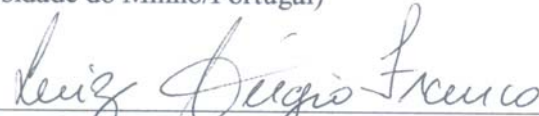
*O EXAMINADOR PARTICIPOU POR VIDEO-CONFERÊNCIA* APROVADO

Prof. Dr. **HUMBERTO RAMOS ROMAN**  
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)



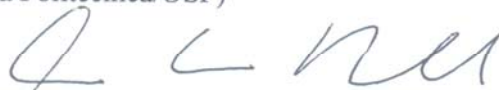
Prof. Catedrático **PAULO JOSÉ BRANDÃO BARBOSA LOURENÇO**  
(Universidade do Minho/Portugal)

APROVADO



Prof. Dr. **LUIZ SERGIO FRANCO**  
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO



Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Associado **MARCIO ANTONIO RAMALHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*“Sê humilde se queres adquirir sabedoria; sê mais humilde ainda, quando a tiveres adquirido.”*

*Aos meus pais, Eunice e Cláudio, pela humilde sabedoria transmitida ao longo de minha vida. Sem elas, as minhas conquistas não seriam as mesmas.*

## AGRADECIMENTOS

Meu eterno agradecimento a Deus por sempre estar ao meu lado, pela saúde, bênçãos constantes e, principalmente, por oferecer caminhos alternativos nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Professor João Bento de Hanai, a quem muito admiro profissionalmente. Obrigado pela cuidadosa orientação deste trabalho, pelas oportunidades oferecidas, pelos ensinamentos e pela confiança em mim depositada. Nesses seis anos de convivência foram muitos os aprendizados os quais levarei ao longo da minha carreira. Obrigado também pela amizade e apoio constantes.

Ao Professor Paulo Lourenço, pela dedicada co-orientação e contribuições que enriqueceram esta Tese. Agradeço a hospitalidade com que fui recebido na Universidade do Minho e as oportunidades então oferecidas.

Aos meus pais, exemplos em minha vida, pela educação e ensinamentos. Minhas conquistas são e serão fruto do seu amor incondicional, da dedicação ímpar que tiveram em minha formação e, sem dúvida, das lições com vocês aprendidas.

A minha querida irmã Tatiana, pelo constante incentivo e por sempre acreditar nas minhas aspirações.

À Larissa, por seu amor e carinho. Agradeço a sua paciência e compreensão que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho.

A todos aqueles que sempre estiveram presentes em minha vida, contribuindo para mais este êxito. Dentre tantos, alguns agradecimentos especiais tornam-se indispensáveis.

Aos meus grandes amigos Eduardo Toledo e Marcus André, que mesmo distante sempre me apoiaram, incentivaram e foram cúmplices da minha luta para a conclusão deste trabalho.

Ao Walter, grande amigo que São Carlos me propiciou, pela amizade constante durante esses seis anos, e à minha amiga Suzana, os quais tornaram a minha passagem por São Carlos mais prazerosa. A Gustavinho que, mesmo sem saber, tornou a conclusão deste trabalho menos sacrificante.

À Raïssa e Rodrigo, pela amizade ímpar e apoio irrestrito, indispensáveis nessa longa caminhada.

Ao amigo de todas as horas, Gustavo Tristão, por seu companheirismo, entusiasmo e apoio incondicional.

Às novas amizades que fiz durante a passagem por São Carlos: Adriana Gomes, Alexandre Sudano, Alex Sander, André Doria, Andrés Idiart, Daniel Maciel, Elian, Eimair, Gustavo Codá, Gustavo Siqueira, Jefferson Klauss, Josafá, Karenina, Lorença Tristão, Luciano Montedor, Luiz Eduardo Teixeira, Manoel Dênis, Mônica Vianna, Oscar Begambre, Ricardo Carrazedo, Rodrigo Paccola, Rômulo Faria, Sandra Almeida, Saulo Almeida, Silvana e Wesley Góis.

Aos amigos Jerônimo Pereira e Petrus Nóbrega, exemplos de pesquisadores, dos quais muito me orgulho em ter a amizade.

Ao Luciano Montedor, grande amigo, com quem muito aprendi durante esses anos.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Estruturas pelo apoio durante as análises experimentais: Amauri, Fabiano, Dr. Luiz Vareda, Mário, Mauri, Romeu e Valdir.

Ao Dito, funcionário do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia, pela receptividade e paciência durante parte das minhas análises experimentais.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas pelo apoio durante a minha passagem, em especial: Nadir, Dr. Rodrigo Paccola, Rosi e Toninho. Aos seus professores, não só pelos ensinamentos acadêmicos, mas principalmente pelo grato convívio nesse período: Profa. Ana Lúcia, Prof. Libânio Pinheiro, Prof. Márcio Corrêa, Prof. Mounir El Debs, Prof. Roberto Gonçalves, Prof. Samuel Giongo, Prof. Toshiaki Takeya e Prof. Wilson Venturini.

Aos amigos que conheci durante a minha estadia na bela e inesquecível cidade de Guimarães, pelas ajudas e a convivência que tornaram a saudade do Brasil menos intensa: Adilson Lessa, Ana Cecília, Ana Maria, Armando, Aurélio Sabino, Bona e Juliana, Caio, Caroline Vilar, Ché, Cornélia, Cris, Daniela, Eimair, Francisco Pereira, Gihad e Andréa, Gláuber Freitas, Guio Lize, Igor Andryl, Ismael Basílio, João Gouveia, Júlio Souza, Késio Palácio, Konrad Krakowiac, Luciana Mascaro, Luciano e Sofia, Marcinkus, Marco António, Mariusz Król, Rafael Volski, Regis de Bel, Rosângela Caldas, Vincenzo Bianco, Vladimir Haach e Vítor. A época vivida sempre estará em minha memória, na esperança de um reencontro breve.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pela bolsa de Doutorado e Auxílio-Pesquisa concedidos.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo suporte financeiro fornecido para a realização do estágio de Doutorado na Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Justificativas	17
1.2 Objetivos	17
1.3 Metodologia	20
1.3.1 <i>Análise experimental</i>	20
1.3.2 <i>Análise teórica</i>	21
1.4 Estrutura do texto	22
<b>2. ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA DOS ELEMENTOS DE ALVENARIA</b>	<b>23</b>
2.1 Ensaio do material que constitui a unidade de alvenaria	23
2.2 Influência das placas de ensaio	34
2.3 Acabamento das superfícies dos elementos	41
2.4 Modelos numéricos para alvenaria estrutural	48
<b>3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ARGAMASSA PARA A ALVENARIA ESTRUTURAL</b>	<b>61</b>
3.1 Comportamento sob compressão triaxial	63
3.2 Perda de água da argamassa para as unidades de alvenaria	78
<b>4. PRODUÇÃO E ENSAIO DOS ELEMENTOS DE CONCRETO E ARGAMASSA</b>	<b>91</b>
4.1 Materiais utilizados	91
4.1.1 <i>Cimento</i>	92
4.1.2 <i>Agregado miúdo</i>	92
4.1.3 <i>Agregado graúdo</i>	92
4.1.4 <i>Cal</i>	92
4.1.5 <i>Água</i>	92
4.2 Caracterização do concreto e argamassa	92
4.3 Produção dos elementos e preparação para ensaio	93
4.3.1 <i>Blocos de concreto</i>	95
4.3.2 <i>Prismas constituídos por três blocos</i>	97
4.3.3 <i>Miniparedes</i>	99
4.3.4 <i>Corpos-de-prova</i>	100

4.4	Ensaio mecânico	103
4.4.1	Blocos de concreto	104
4.4.1.1	Compressão uniaxial	104
4.4.1.2	Ensaio à tração indireta	106
4.4.2	Prismas constituídos por três blocos	108
4.4.3	Miniparedes	109
4.4.4	Corpos-de-prova	110
4.4.4.1	Corpos-de-prova cilíndricos	110
4.4.4.2	Vigas com entalhe	113
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>115</b>
5.1	Comportamento mecânico dos blocos vazados de concreto	116
5.1.1	Ensaio modificado com redução do efeito de confinamento	120
5.1.2	Módulo de elasticidade do concreto e deformações no bloco vazado	124
5.2	Comportamento mecânico dos prismas	131
5.2.1	Propriedades mecânicas dos prismas e seus materiais constituintes	131
5.2.2	Distribuição de deformações nos prismas	134
5.3	Comportamento mecânico das miniparedes	138
5.3.1	Propriedades mecânicas das miniparedes e de seus materiais constituintes	138
5.3.2	Análise das deformações nas miniparedes	139
5.4	Valores da energia de fratura	140
5.4.1	Energia de fratura do concreto	140
5.4.2	Energia de fratura da argamassa	145
<b>6.</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>149</b>
6.1	Estratégia numérica	150
6.1.1	O modelo de Drucker-Prager	150
6.1.2	O modelo de Fissuração Dispersa	152
6.1.3	Resolução do sistema de equações não-lineares	155
6.1.4	Elementos finitos utilizados	156
6.2	Corpos-de-prova de concreto	157
6.2.1	Distribuição das tensões no corpo-de-prova de concreto	159
6.2.2	Distribuição de deformações no corpo-de-prova de concreto	161
6.3	Blocos vazados de concreto	162
6.3.1	Análise de tensões e deformações	169
6.3.2	Distribuição das tensões no bloco vazado de concreto	169
6.3.3	Distribuição das deformações no bloco vazado de concreto	177



6.4	Prismas de blocos vazados de concreto	184
6.4.1	<i>Discussão sobre as distintas abordagens</i>	188
6.4.2	<i>Comportamento dos prismas na abordagem tridimensional</i>	193
6.4.3	<i>Distribuição de tensões e deformações</i>	194
6.4.3.1	<i>Análise das tensões</i>	195
6.4.3.2	<i>Análise das deformações plásticas</i>	200
6.4.3.3	<i>Ilustração da distribuição de tensões e deformações na ruína</i>	202
6.4.4	<i>Refinamento da malha e modo de ruína</i>	204
6.5	Argamassa submetida ao comportamento triaxial	206
6.6	Miniparedes	208
<b>7.</b>	<b>Análise teórica com aplicação de modelos algébricos</b>	<b>215</b>
7.1	Sobre os blocos vazados de concreto	215
7.1.1	<i>Resistência do concreto que constitui o bloco vazado</i>	216
7.1.2	<i>Disposição de instrumentos de medição nos ensaios com blocos vazados</i>	217
7.1.3	<i>Deformabilidade do concreto que constitui o bloco vazado</i>	220
7.1.4	<i>Previsão da resistência e deformabilidade do concreto que constitui o bloco vazado</i>	222
7.1.5	<i>Propriedades mecânicas do concreto que constitui o bloco vazado</i>	225
7.2	Prismas constituídos por três blocos	225
7.2.1	<i>Resistência do prisma e de seus materiais constituintes</i>	225
7.2.2	<i>Avaliação da perda de água da argamassa durante a cura</i>	227
7.2.3	<i>Avaliação do efeito de confinamento da argamassa</i>	228
7.2.4	<i>Deformabilidade dos materiais que constituem os prismas</i>	230
7.2.5	<i>Propriedades mecânicas dos materiais que constituem o prisma</i>	232
7.3	Miniparedes	233
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>235</b>
8.1	Comportamento dos blocos vazados de concreto	236
8.2	Comportamento dos prismas	237
8.3	Comportamento das miniparedes	238
8.4	Proposta para pesquisas futuras	238
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>241</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR</b>	<b>257</b>

## RESUMO

Barbosa, C.S. (2008). *Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto, prismas e paredes e suas correlações com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo deste trabalho é identificar e correlacionar as propriedades mecânicas do concreto e da argamassa de assentamento com o comportamento estrutural de blocos vazados de concreto, prismas e paredes, por meio de modelagem física e numérica. Realizou-se detalhada investigação experimental, recorrendo à premissa metodológica de se utilizar um mesmo concreto, de consistência plástica, para a moldagem de blocos vazados e corpos-de-prova cilíndricos, para assegurar propriedades idênticas dos materiais em cada série de ensaios. Analisou-se o efeito de confinamento que se apresenta nos ensaios de blocos isolados, o qual induz uma distribuição não-uniforme de deformações e acarreta aumento da sua capacidade resistente em relação à resistência à compressão do concreto. Em ensaios nos quais se reduziu o efeito de confinamento, constatou-se que os blocos apresentam menor capacidade resistente e alteração do modo de ruína, decorrente da distribuição mais uniforme das deformações, similar àquela que se observa nos blocos centrais dos prismas e paredes. Analisou-se também a influência do efeito de confinamento e do processo de cura das juntas de argamassa e se associou parâmetros indicativos do seu comportamento à capacidade resistente e ao modo de ruína de prismas e paredes. As propriedades mecânicas dos materiais, obtidas experimentalmente, foram implementadas em um modelo numérico de elementos finitos, que se mostrou capaz de representar o comportamento dos diversos elementos de alvenaria submetidos à compressão, com boa predição da resistência, deformabilidade e modo de ruína. Com base nos resultados numéricos e experimentais, estabeleceu-se um modelo de interpretação da distribuição de tensões e deformações nos blocos vazados de concreto, o que resultou na recomendação de um procedimento para determinação de sua rigidez axial. Associou-se também o efeito da resistência e da deformabilidade da argamassa no comportamento estrutural dos prismas e paredes. Correlações e formulações algébricas foram estabelecidas para análise do comportamento e previsão quantitativa da resistência e da deformabilidade de blocos, prismas e paredes.

**Palavras-chave:** Alvenaria estrutural, blocos vazados de concreto, prismas, paredes, propriedades mecânicas dos materiais, modelos numéricos, análise teórica e experimental.

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

