

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

MARCELO BORTOLETTO

**ESTUDO DE GEOMETRIAS ALTERNATIVAS DE BLOCOS VAZADOS
UTILIZANDO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO BORTOLETTO

**ESTUDO DE GEOMETRIAS ALTERNATIVAS DE BLOCOS VAZADOS
UTILIZANDO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Estruturas.

Prof^a. Dr^a. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque.
Orientadora

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B739e Bortoletto, Marcelo.
Estudo de geometrias alternativas de blocos vazados utilizando concreto autoadensável / Marcelo Bortoletto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 20/02/2020
139 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2020

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque
Inclui bibliografia

1. Blocos vazados de concreto. 2. Prismas. 3. Concreto autoadensável. 4. Resistência à compressão. 5. Transferência de calor.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

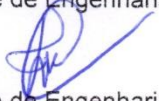
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DE GEOMETRIAS ALTERNATIVAS DE BLOCOS VAZADOS
UTILIZANDO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

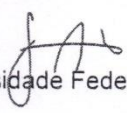
AUTOR: MARCELO BORTOLETTO

ORIENTADORA: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP 

Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES 
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GUILHERME ARIS PARSEKIAN 
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Ilha Solteira, 20 de fevereiro de 2020

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus queridos pais, Gilvandete e Vladimir, pelo total apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer ao Senhor que tornou este trabalho exequível, pois sem ele nada seria possível.

Aos meus pais Gilvandete e Vladimir pelo total incentivo e apoio incondicional no decorrer desta caminhada, pela educação, conhecimento e carinho transmitidos a mim.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira–UNESP, pelo direito da realização do mestrado.

À minha querida orientadora Professora Dra. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, por aceitar ser minha orientadora e contribuições durante toda a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, através da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo recurso na compra de materiais para a realização da pesquisa.

Aos docentes da Faculdade de Engenharia (FEIS) - Ilha Solteira pelos conhecimentos transmitidos durante todo o percurso.

Ao Sr. Humberto Soller da GRACE BRASIL LTDA, pelas doações do aditivo superplastificante, fundamental para o andamento deste trabalho. À empresa VOTORANTIM CIMENTOS pelo fornecimento do ligante.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil, Ozias Porto, Natália Antoniali, Gilson Correa e Flávio Porato, por toda dedicação, empenho e ensinamentos.

Aos meus amigos do programa de Pós-graduação da FEIS, pelo incentivo e contribuição diretamente com a evolução e sucesso do trabalho.

Ao Rodrigo Garozi da Silva amigo desde o ensino médio, um total de dez anos de pura amizade e companheirismo. Amigo de mestrado e de república, sempre ajudando a trilhar o caminho certo, companheiro na realização de todos os ensaios de laboratório e sempre contribuindo para o meu crescimento profissional.

Ao amigo Felipe de Almeida Spósito, desde a infância, companheiro de graduação, mestrado e de república, sempre incentivando, dando conselhos, apoiando e contribuindo para o sucesso de minha pesquisa.

Ao amigo MSc. Leonardo Lachi Manetti pela ajuda na análise de elementos finitos da transferência de calor dos blocos.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Civil da FEIS.

Aos meus queridos amigos da cidade de Adamantina, minha “terrinha” natal, pelos conselhos, pela amizade e por proporcionar momentos de alegria.

Aos professores do Centro Universitário de Adamantina – UniFAI, em especial, ao professor Wendel Cleber Soares e ao professor Bruno do Vale Silva, pela transmissão de seus conhecimentos durante toda a graduação e sempre me incentivando na pesquisa científica e na carreira acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

A investigação de novos tipos de blocos vazados de concreto foi realizada a fim de avaliar a influência de diferentes formatos geométricos e espessuras das paredes dos blocos, utilizando o concreto autoadensável para a fabricação das unidades. Seis diferentes tipos de blocos, com três formatos geométricos alternativos, sendo com vazados circulares, hexagonais e retangulares, de diferentes áreas líquidas foram fabricados e submetidos a diversos ensaios. O programa experimental teve como finalidade avaliar as propriedades dos blocos e prismas. Foram realizados ensaios mecânicos dos blocos e dos prismas e também foi feita a análise da resistência térmica dos blocos, mediante análise por métodos dos elementos finitos (FEA). As propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável também foram avaliadas. Os resultados mostraram que os formatos dos vazados dos blocos influenciaram na resistência mecânica, no qual o bloco com vazado circular (GC-1) apresentou a maior resistência à compressão axial. Foi possível estabelecer uma dosagem adequada do concreto autoadensável para a fabricação dos blocos. Os prismas PGC-1, PGH-1 e PGH-2 obtiveram resistência à compressão axial superiores aos outros prismas, comprovado por análise estatística. Os prismas com formato geométrico hexagonal mostraram ser benéficos economicamente e mecanicamente, apresentando economia no consumo de cimento em relação ao prisma com formato circular (PGC-1). A relação linear do aumento da área de vazios em função da temperatura interna foi averiguada, no qual ocasionou uma redução da transferência de calor nas superfícies externas e internas dos blocos conforme o aumento da área de vazios. Em geral, este estudo demonstrou que os formatos geométricos analisados, influenciaram as propriedades investigadas, bem como a possibilidade de execução de blocos vazados de concreto com estas geometrias.

Palavras-chave: Blocos vazados de concreto. Prismas. Concreto autoadensável. Resistência à compressão. Transferência de calor.

ABSTRACT

The investigation of new types of hollow concrete blocks was carried out in order to evaluate the influence of different geometric shapes and thickness of hollow blocks, using the self-compacting concrete to manufacture the units. Six different types of blocks with three alternative geometric shapes, being circular, hexagonal and rectangular, from different net areas were manufactured and submitted to several tests. The experimental program was goal to evaluate the properties of the blocks and prisms. Mechanical tests of the blocks and prisms were performed and the thermal resistance analysis of the blocks was also performed, through analysis by finite element methods (FEA). The fresh and hardened properties of self-compacting concrete were also evaluated. The results showed that the cell shapes in the blocks influenced the mechanical strength, in which the circular cell block (GC-1) showed the highest axial compressive strength. It was possible to establish an adequate dosage of self-compacting concrete for the manufacture of the blocks. The PGC-1, PGH-1 and PGH-2 prisms had higher axial compressive strength than the other prisms, proven by statistical analysis. The hexagonal geometric prisms showed to be economically and technically beneficial, showing savings in cement consumption compared to the circular shaped prism (PGC-1). The linear relation of the increase of voids area as a function of inner temperature was verified, in which caused a reduction of heat transfer on the external and inner surfaces of the blocks according increase voids area. In general, this study demonstrated that the cell geometric influenced the investigated properties, as well as the possibility of manufacturing hollow concrete blocks with these geometries.

Keywords: Hollow concrete blocks. Prisms. Self-compacting concrete. Compressive strength. Heat Transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura do bloco de concreto aumentada em 15 vezes	21
Figura 2 - Bloco vazado de concreto com superfície irregular	23
Figura 3 - Fabricação dos blocos vazados de concreto com alta tecnologia	24
Figura 4 - Fabricação dos blocos vazados de concreto com baixa tecnologia.....	24
Figura 5- Micrografia de partículas de cimento flocladas em uma pasta de cimento Portland (a) - sem aditivo (b) - com aditivo superplastificante	30
Figura 6 - Modelo de Bingham	32
Figura 7 - Geometrias e as dimensões dos blocos estudados	37
Figura 8 - Geometria do bloco de concreto	38
Figura 9 - Geometria do bloco vazado de concreto.....	39
Figura 10 - Geometrias de blocos vazados de concreto utilizadas	40
Figura 11 - Geometria dos blocos vazados de concreto utilizados por Casali et.al (2012)	40
Figura 12 - Geometrias dos blocos de concreto utilizadas na pesquisa.....	41
Figura 13 - Resistências dos blocos, argamassas e prismas.....	42
Figura 14 - Esquema para o ensaio de determinação da resistência do prisma (fp).44	
Figura 15 - Tensões nas unidades e na junta de argamassa submetido ao carregamento de compressão axial	46
Figura 16 - Esquema dos modos de rupturas	48
Figura 17 - Ensaio realizados	50
Figura 18 - Curva Granulométrica - Agregado miúdo.....	52
Figura 19 - Caracterização do agregado graúdo.....	54
Figura 20 - Máquina Universal EMIC - INSTRON utilizada para realizar os ensaios mecânicos desta pesquisa	56
Figura 21 - Sistema de aquisição de dados utilizado na pesquisa	56

Figura 22 - Prisma instrumentado com LVDTs e extensômetros (Strain-Gages).....	57
Figura 23 - Organograma para encontrar o teor ideal de argamassa	60
Figura 24 - Mistura de concreto com $\alpha = 63\%$	60
Figura 25 - Geometrias dos blocos de concreto a ser utilizadas na pesquisa.....	64
Figura 26 - Disposição das fôrmas utilizadas na fabricação dos blocos	65
Figura 27 - Processo de fabricação do concreto para moldagem dos blocos	66
Figura 28 - Processo de fabricação dos blocos - a) Lançamento do concreto, b) Blocos após concretagem antes do acabamento final do topo	66
Figura 29 - Blocos vazados de concreto depois de moldados	67
Figura 30 - Processo de mistura da argamassa mista utilizada para o assentamento dos blocos empregados na fabricação dos prismas.....	69
Figura 31 - Assentamento do prisma com argamassa mista - a) Vista esquemática, b) Prisma fabricado	70
Figura 32 - Processo de fabricação dos prismas - a) Aplicação da argamassa mista, b) Vista superior da argamassa aplicada e distribuição dos calços de PVC, c) Assentamento do bloco superior, d) Prisma com os espaçadores, e) Prisma fabricado.....	71
Figura 33 - Regularização das superfícies do bloco.....	73
Figura 34 - Ensaio de absorção de água nos blocos	74
Figura 35 - Ensaio de consistência da argamassa.....	75
Figura 36 - Ensaio de argamassa conforme a NBR 13279 - a) Flexão, b) Compressão	76
Figura 37 - Marcações e posicionamentos dos LVDTs e extensômetros (Strain- Gages)	77
Figura 38 - Marcações para o posicionamento dos extensômetros e LVDTs	78
Figura 39 – Colagem dos extensômetros - a) Limpeza e regularização da superfície, b) Extensômetro posicionado, c) Extensômetro posicionado com o cabo de saída PS2, d) Armazenamento dos prismas com os extensômetros	79
Figura 40 - Cálculo do módulo de elasticidade.....	80

Figura 41 - Sistema de coordenadas cartesianas tridimensional	81
Figura 42 - Ensaio de espalhamento para o concreto autoadensável.....	85
Figura 43 - Gráfico Tensão - Deformação do CAA.....	86
Figura 44 - Resistência à compressão calculada com a área líquida, em função da área líquida dos blocos vazados de concreto aos 7 e 28 dias	89
Figura 45 - Resistência à compressão dos blocos em função da relação área líquida / área bruta para 28 dias	89
Figura 46 - Ruptura dos blocos: Fissuras verticais e inclinadas e desprendimento do concreto na camada superficial do bloco	90
Figura 47 - Desprendimento do concreto do bloco GH-2	90
Figura 48 - Relação resistência média à compressão versus massa média dos blocos.....	91
Figura 49 - Comparação de resultados de resistência à compressão axial de prismas referida à área bruta com os resultados encontrados na literatura	96
Figura 50 - Comparação de resultados de resistência à compressão axial de prismas referida à área líquida com os resultados encontrados na literatura	96
Figura 51 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 - LVDT Colocar os valores médios se possível	98
Figura 52 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 – Extensômetro....	98
Figura 53 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 - LVDT	99
Figura 54 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 – Extensômetro....	99
Figura 55 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 - LVDT	100
Figura 56 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 – Extensômetro..	100
Figura 57 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 - LVDT	101
Figura 58 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 – Extensômetro..	101
Figura 59 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 - LVDT	102
Figura 60 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 – Extensômetro..	102
Figura 61 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 - LVDT	103

Figura 62 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 – Extensômetro..	103
Figura 63 - Ruptura dos prismas- a) PGC-1, b) PGC-2, c) PGH-1, d) PGH-2, e) PGR-1, f) PGR-2	105
Figura 64 - Relação entre a resistência à compressão média do prisma referida à área bruta e o consumo de cimento utilizado para uma construção de uma parede de 50 m ²	106
Figura 65 - Distribuição de temperatura dos blocos maciço e vazados de concreto	107
Figura 66 - Temperatura interna média em função da percentagem da área de vazios das unidades	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração dos blocos.	34
Tabela 2 - Matriz de Ensaio.....	50
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI.....	51
Tabela 4 - Propriedades químicas do cimento CPV-ARI.....	52
Tabela 5 - Caracterização dos agregados miúdos	53
Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo	54
Tabela 7 - Mistura para 1m ³ de concreto	62
Tabela 8 - Características físicas dos blocos vazados de concreto	64
Tabela 9 - Características da argamassa de assentamento	68
Tabela 10 - Propriedades térmicas do material	83
Tabela 11 - Propriedades do estado endurecido do concreto autoadensável.....	86
Tabela 12 - Resistência à compressão média dos blocos vazados de concreto aos 7 dias.....	87
Tabela 13 - Resistência à compressão média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias.....	87
Tabela 14 - Absorção de água para os diferentes tipos de blocos.....	93
Tabela 15 - Resultados dos ensaios da argamassa de assentamento	93
Tabela 16 - Resistência à compressão média dos prismas	94
Tabela 17 - Módulo de elasticidade e deformações médias dos prismas	97
Tabela 18 – Temperatura das superfícies dos blocos vazados de concreto após a simulação	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
C ₃ S	Silicato Tricálcico
CAA	Concreto autoadensável
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta resistência Inicial
CV	Coeficiente de Variação
EFNARC	European Federation of National Associations Representing for Concrete
EPS	Poliestireno expandido
FEA	Finite element analysis
LVDT	Linear variable differential transformer
NBR	Norma brasileira regulamentadora
SPC	Sobre a massa do cimento

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ΔL	Deslocamento
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
a/c	Água/ cimento
cm	Centímetros
CV	Coeficiente de variação
E_p	Módulo de elasticidade dos prismas
ε	Deformação específica
F_a	Resistência média à compressão da argamassa
F_{bm}	Resistência média à compressão dos blocos
F_{pm}	Resistência média à compressão dos prismas
G	grama
GPa	Gigapascal
H	Altura do bloco
h_{ci} interna	Coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície interna
h_{co} externa	Coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície externa
h_{eq} blocos	Coeficiente de transferência de calor equivalente para os furos dos blocos
kg	Quilograma
L	Comprimento do bloco;
L_0	Comprimento Inicial
mm	Milímetro
mm^2	Milímetro quadrado
MPa	Megapascal
$q''_{conv.}$	Fluxo de calor por convecção;
$q''_{rad.}$	Fluxo de calor por radiação
$q''_{solar.}$	Fluxo de calor devido à radiação solar;
Sd	Desvio Padrão
$T(x, y, z)$	Temperatura do bloco em todo o domínio;
T_{ai}	Temperatura interna do ar= 25°C;

T_{ao}	Temperatura externa do ar= 46,6°C;
T_n	Temperatura nas coordenadas normal ao vazio (furo);
T_{si}	Temperatura interna ambiente= 25 °C;
T_{so}	Temperatura externa ambiente= 46,6°C;
T_{va}	Temperatura interna no vazio do bloco (furo).
W	Largura do bloco;
α	Teor de argamassa
ε	Coeficiente de emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
μ_p	Viscosidade plástica
τ	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	ALVENARIA ESTRUTURAL.....	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	26
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	27
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	27
2.1.1	Componentes do concreto autoadensável	28
2.1.1.1	<i>Cimento Portland</i>	28
2.1.1.2	<i>Agregados</i>	29
2.1.1.3	<i>Aditivo</i>	29
2.1.1.4	<i>Água</i>	30
2.1.2	Características do concreto autoadensável no estado fresco	31
2.2	BLOCO ESTRUTURAL	32
2.2.1	Blocos de concreto	33
2.2.2	Geometria dos blocos vazados de concreto.....	35
2.3	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO	41
2.4	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA	43
2.5	FORMAS DE RUPTURA DOS PRISMAS	47
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1	MATERIAIS	51
3.1.1	Cimento	51
3.1.2	Agregado miúdo	52
3.1.3	Agregado graúdo.....	53

3.1.4	Água	54
3.1.5	Aditivo	55
3.1.6	Cal hidratada	55
3.2	EQUIPAMENTOS.....	55
3.2.1	Máquina universal de ensaio	55
3.2.2	Sistema de aquisição de dados.....	56
3.2.3	Outros equipamentos	58
3.3	MÉTODOS	58
3.3.1	Fase 1: Definição do traço do CAA para a produção dos blocos	58
3.3.2	Fase 2: Geometrias dos blocos vazados de concreto	62
3.3.3	Fase 3: Processo de fabricação dos blocos	65
3.3.4	Fase 4: Processo de fabricação dos prismas	67
3.3.4.1	<i>Argamassa de assentamento</i>	<i>67</i>
3.3.4.2	<i>Procedimentos para a fabricação dos prismas</i>	<i>69</i>
3.3.5	Ensaio.....	72
3.3.5.1	<i>Procedimentos de ensaios para o CAA</i>	<i>72</i>
3.3.5.2	<i>Procedimentos de ensaios para os blocos vazados de concreto</i>	<i>73</i>
3.3.5.3	<i>Procedimentos de ensaios da argamassa de assentamento</i>	<i>74</i>
3.3.5.4	<i>Procedimentos de ensaios de prisma.....</i>	<i>76</i>
3.3.6	Análise de elementos finitos da transferência de calor dos blocos vazados de concreto.....	80
3.3.6.1	<i>Modelo matemático</i>	<i>81</i>
3.3.6.2	<i>Propriedades térmicas dos blocos vazados de concreto e o modelo de elementos finitos.....</i>	<i>83</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	85

4.2	BLOCO VAZADO DE CONCRETO	87
4.2.1	Resistência à compressão axial	87
4.2.2	Absorção de água	93
4.3	ARGAMASSA.....	93
4.4	PRISMA.....	94
4.5	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO	106
5	CONCLUSÕES	111
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
	REFERÊNCIAS	114
	APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados	121
	APÊNDICE B - Testes Estatísticos.....	125
	B.1 Análise de Variância (ANOVA: Analysis of variance)	125
	B.2. Testes estatísticos dos resultados de resistência à compressão axial dos blocos	126
	B.3 Análise estatística dos resultados de resistência à compressão dos prismas	129
	APÊNDICE C – Curva tensão - deformação dos prismas	131

1 INTRODUÇÃO

1.1 ALVENARIA ESTRUTURAL

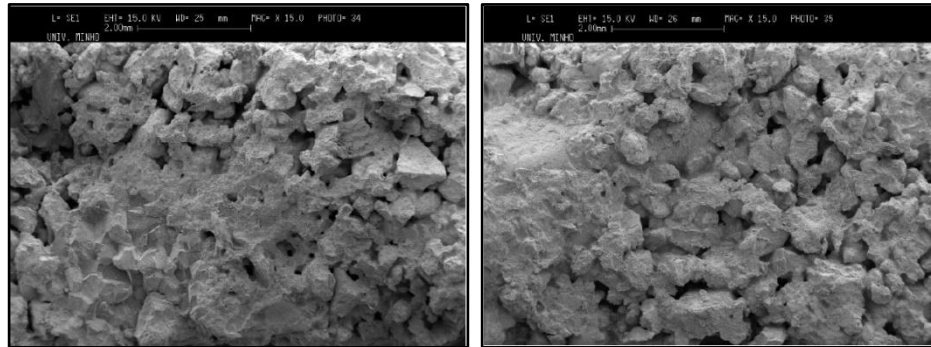
A alvenaria é um sistema construtivo, utilizada desde o início da atividade humana para execução de estruturas para os mais variados fins de aplicação. Até hoje este sistema passa por diversas transformações e melhorias através da introdução de novos materiais, melhorando assim as condições de segurança e agilidade no processo de execução (MOHAMAD *et al.*, 2010). Neste sistema construtivo, as próprias paredes, constituídas pelos seus respectivos componentes, são estruturais, ou seja, as próprias paredes são responsáveis por resistirem aos esforços atuantes na estrutura. Do ponto de vista estrutural, este sistema é caracterizado principalmente pela transmissão de ações por meio de tensões de compressão (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

A realização de uma construção com alvenaria estrutural requer estudos bem detalhados, escolhendo a melhor concepção para o projeto, as modulações das unidades, posicionamento das instalações hidráulicas e elétricas, acabamentos, esquadrias e, posteriormente, o projeto executivo. Alguns benefícios deste sistema são a otimização das tarefas na obra, o controle em cada etapa da construção e a eliminação de interferências, reduzindo o desperdício de materiais. Em decorrência destes fatores, o sistema construtivo em alvenaria estrutural proporciona uma versatilidade do planejamento em cada etapa construtiva (MOHAMAD *et al.*, 2010). Um componente pode desempenhar várias funções, tais como: função estrutural, isolamento térmico e acústico, proteção contra incêndios, intempéries e subdivisão do espaço (HENDRY, 2001).

Nos dias de hoje, para a fabricação dos blocos de concreto, é utilizado um concreto de mistura seca, proporcionando uma desforma imediata, diferindo do concreto plástico. Segundo Tango (1994), no concreto plástico, a pasta (cimento mais água) ocupa praticamente todos os espaços vazios deixados pelos agregados, enquanto que, o concreto usado na fabricação nos blocos apresenta um volume considerável de ar incorporado na mistura. Mohamad *et al.* (2011) averiguaram a microestrutura de blocos de concreto vibro-compactados a seco, e verificaram, através de um microscópio eletrônico de varredura, a presença de vazios internos com baixa quantidade de finos envolvendo as partículas dos agregados, ocasionando a

perda de contato entre o aglomerante e agregado. A Figura 1 mostra a microestrutura do bloco de concreto vibro-compactado a seco.

Figura 1 - Microestrutura do bloco de concreto aumentada em 15 vezes



Fonte: Mohamad *et al.* (2011).

A produção dos blocos de concreto é realizada em fábricas automatizadas. Ao final do processo de fabricação, os blocos podem apresentar falhas em sua superfície e grandes quantidades de poros, em decorrência do processo de vibro-prensagem. Desta forma, a qualidade dos blocos de concreto pode ser limitada.

Em consideração as geometrias dos blocos, a escolha de uma forma geométrica para os furos, a quantidade e posição dos mesmos, pode ocasionar concentrações de tensões não desejadas nos blocos, durante a aplicação de uma determinada carga, levando à uma redução da capacidade portante da alvenaria (RIZZATTI *et al.*, 2011). Assim, é fundamental a escolha de uma geometria que não gere concentrações de tensões, com o objetivo de garantir uma unidade mais resistente.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem por finalidade analisar a influência da geometria do vazado e espessura da parede de blocos vazados de concreto, estudando como possibilidade a aplicação do concreto autoadensável para a fabricação dos blocos. O objetivo também é estudar o comportamento físico, mecânico e térmico dos blocos, variando o formato geométrico e espessura das paredes dos blocos.

Os objetivos específicos da pesquisa são apresentados a seguir:

- a) desenvolvimento de uma dosagem adequada do concreto autoadensável para a fabricação das unidades;
- b) verificar a melhor geometria proposta para os blocos vazados de concreto de alvenaria estrutural, em relação à resistência à compressão axial;
- c) obter dados de deformações dos prismas correspondentes as tensões de compressão;
- d) analisar a influência dos diferentes formatos geométricos no desempenho térmico dos blocos, mediante uma análise de elementos finitos (FEA).

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, para a produção dos blocos de concreto, são utilizados os seguintes maquinários: esteira, misturadores e vibro-prensa.

As vibro-prensas são máquinas responsáveis por dar forma aos blocos por meio dos moldes e pentes. O mecanismo de vibração das máquinas influencia diretamente nas propriedades dos componentes. Os principais fatores que influenciam no processo de vibração são: direção, velocidade, aceleração e o tempo de adensamento (SALVADOR FILHO, 2007). As principais máquinas vibro-prensas utilizadas na fabricação das unidades são as vibro-prensas pneumática automática e semiautomática e a vibro-prensa hidráulica.

O processo produtivo inicia-se com a seleção dos materiais necessários para a mistura do concreto. Estes materiais são levados por esteiras até o misturador. Posteriormente, o concreto de consistência seca é conduzido até as vibro-prensas. O concreto é levado ao molde, no qual ele é vibrado e prensado por extratores na direção vertical. Na sequência, o molde é suspenso enquanto os pentes permanecem imóveis, mantendo os blocos sobre o palete. Em seguida, o palete é removido com as unidades recém moldadas (SALVADOR FILHO, 2007). Seguidamente, os blocos são conduzidos para o processo de cura e armazenagem até a data de expedição.

Em fábricas de blocos modernas, o processo de hidratação e endurecimento das unidades ocorre mediante o processo de cura a vapor por um período aproximado de 18 horas (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

Os equipamentos utilizados na produção podem não demonstrar bom desempenho, quando são levados em consideração os aspectos de trabalhabilidade e uniformidade dos lotes. Em relação à trabalhabilidade dos blocos de concreto vibrocompactados a seco, algumas unidades apresentam irregularidades em sua superfície, dificultando o trabalho do profissional no processo de assentamento destas unidades.

A Figura 2 ilustra um bloco vazado de concreto, apresentando imperfeições em sua superfície.

Figura 2 - Bloco vazado de concreto com superfície irregular



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por consequência das irregularidades das superfícies dos blocos, muitos são os profissionais que, para solucionar este problema, preenchem com argamassa de assentamento, com certa demasia, as superfícies irregulares dos blocos, pretendendo solucionar o desaprumo das paredes. Considerando-se a uniformidade dos lotes de blocos de concreto, é perceptível a discrepância entre os mesmos, havendo divergências entre os blocos de um lote e de outro, tendo em vista que a fabricação destas unidades depende de diversos fatores, tais como: conjunto de equipamentos, operadores envolvidos no processo e materiais empregados no processo de fabricação.

Algumas indústrias apresentam tecnologias sofisticadas para produzir unidades de qualidade, utilizando máquinas altamente modernas. A Figura 3 mostra o processo de fabricação dos blocos em uma indústria considerada de alto porte, possuindo um controle automatizado no processo de fabricação e cura das unidades.

No entanto, ainda existem em larga escala, empresas que fabricam blocos com qualidade reduzida, não dispondo de máquinas de alta tecnologia. A Figura 4 mostra o processo de fabricação dos blocos de concreto em uma indústria considerada de pequeno porte. Nesta indústria, as máquinas podem apresentar dificuldades em compactar igualmente no centro e nas bordas, a coleta dos materiais é executada com carrinhos de mão, o traço é realizado em volume, sem qualquer verificação de umidade dos agregados. Além disto, não há controle no processo de cura. Considerando-se estas dificuldades nas indústrias consideradas de pequeno porte, pode-se levar à uma grande dispersão nos resultados.

Figura 3 - Fabricação dos blocos vazados de concreto com alta tecnologia



Fonte: Barbosa (2005).

Figura 4 - Fabricação dos blocos vazados de concreto com baixa tecnologia



Fonte: Barbosa (2005).

Considerando os aspectos da fabricação dos blocos de concreto convencionais relacionados à trabalhabilidade, à não uniformidade dos lotes e à dosagem dos materiais, o emprego do concreto autoadensável visa sanar estes aspectos negativos,

permitindo uma dosagem adequada, um melhor acabamento na superfície e uniformidade dos lotes.

Todavia, no rápido processo de produção dos blocos, os moldes são retirados logo após o concreto alcançar rigidez e resistência suficientes após a compactação, para possibilitar a desforma e o transporte sem que a unidade apresente deformações ou fissuras (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). O concreto autoadensável é um concreto de consistência fluida, não possibilitando uma desforma imediata dos moldes. Entretanto, uma solução para esta problemática é utilizar aditivos aceleradores ou utilizar a cura térmica no processo de cura das unidades.

Os aditivos aceleradores têm como principal função acelerar a resistência inicial e o tempo de pega do concreto. Os aceleradores podem ser utilizados na produção de elementos pré-moldados, quando é necessária uma rápida remoção das fôrmas (NEVILLE, 2016). Em relação à cura térmica, esta é bastante utilizada em empresas que trabalham com elementos pré-moldados, com o objetivo de acelerar o processo de produção, em um menor tempo de construção (HO; CHUA; TAM, 2003).

Este estudo relacionado à utilização do concreto autoadensável na produção de blocos, ainda está em fase inicial. Por enquanto, esta é uma solução para uma produção em pequena escala, todavia, no futuro esta solução pode alcançar uma produção em larga escala, mediante elaboração de um projeto específico para esta finalidade.

A demanda por materiais de construção que apresentam um bom desempenho térmico tem aumentado recentemente, com o objetivo de alcançar um ambiente mais confortável. Para isso, é importante a utilização de blocos que proporcionam uma menor temperatura no ambiente.

A procura por uma geometria adequada para blocos vazados de concreto estrutural é um fator fundamental para garantir um bom desempenho mecânico e térmico do componente. Com a evolução da tecnologia na fabricação dos blocos, busca-se cada vez mais utilizar geometrias que levam-se à economia de material, à redução do peso e à garantia de uma maior eficiência para os blocos, deixando-os mais leves e mais duráveis.

1.4 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos: Introdução, Revisão da literatura, Materiais e métodos, Resultado e discussão, Conclusão e a Proposta para os trabalhos futuros.

O capítulo 1 apresenta uma introdução a respeito da alvenaria estrutural, as características deste sistema construtivo e o seu processo de fabricação, assim como estão inseridos, neste capítulo, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

O capítulo 2 traz uma revisão da literatura sobre os conceitos e as características do concreto autoadensável. Também são abordadas questões relacionadas aos blocos de alvenaria estrutural, tais como: os materiais empregados, as suas propriedades físicas e mecânicas, além de aspectos referentes aos formatos geométricos dos furos e dos elementos (prismas).

O capítulo 3 detalha os materiais, os equipamentos utilizados na pesquisa e os métodos empregados nas produções dos blocos vazados de concreto, das argamassas e dos prismas, assim como a elaboração da análise de elementos finitos das propriedades térmicas dos blocos.

No capítulo 4 são mostrados e discutidos os resultados obtidos a respeito do concreto autoadensável, do bloco vazado de concreto, da argamassa, dos prismas e das propriedades térmicas dos blocos.

O capítulo 5 indica as principais conclusões obtidas a partir da análise dos resultados dos ensaios executados e da análise por elementos finitos.

O capítulo 6 apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao tema aqui abordado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Uma solução para a obtenção de estruturas duráveis de concreto é o emprego do concreto autoadensável (CAA). O CAA surgiu no ano de 1988 com a finalidade de produzir estruturas de concreto mais duráveis, durante um período em que faltava trabalhadores qualificados na indústria da construção japonesa, reduzindo assim a qualidade das construções (OKAMURA; OUCHI, 2003).

O CAA pode ser compreendido como um concreto fluido podendo ser compactado nas fôrmas, através da ação de seu próprio peso, sem necessidade de compactação vibratória (OKAMURA; OUCHI, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Este tipo de concreto possibilita tempos mais curtos de concretagem, um melhor acabamento na superfície e melhores características do concreto no estado endurecido (GRUNEWALD, 2004).

O uso do CAA ficou mais frequente nos últimos anos, não apenas pelo fato da redução do ruído durante o momento da concretagem, devido à ausência de vibrações, mas também pelo motivo de reduzir o tempo da construção (SAINZ-AJA, *et al.*, 2019). Este concreto é muito utilizado em concretagem de elementos com alta densidade de armadura, em elementos pré-moldados e também em peças de concreto aparente.

Segundo o EFNARC (2002), as propriedades fundamentais que devem ser atribuídas ao CAA são a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe de forma intacta ou habilidade passante, e resistência à segregação. A fluidez é a propriedade que possibilita a capacidade do concreto de fluir ao longo das fôrmas e de preencher todos os espaços, não permitindo a presença de vazios em todo o seu volume. A habilidade passante ou a coesão é a capacidade do CAA de escoar sobre a fôrma, passando entre armaduras sem apresentar nenhum tipo de obstrução do fluxo ou segregação. A resistência à segregação é a propriedade que caracteriza o CAA de se manter coeso enquanto escoar. A segregação pode ser reduzida pela introdução de uma quantidade suficiente de materiais finos, ou de aditivos modificadores de viscosidade.

2.1.1 Componentes do concreto autoadensável

Os materiais constituintes do CAA são basicamente os mesmos utilizados na fabricação do concreto convencional; no entanto o CAA, apresenta uma maior quantidade de materiais finos, adição de aditivos plastificantes, superplastificantes e modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A seguir, serão explanadas algumas das características e propriedades dos materiais mais comumente utilizados na produção do CAA.

2.1.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um ligante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer com a adição de algumas frações de gesso. O clínquer é uma mistura heterogênea de diversos compostos produzidos através de reações em temperaturas elevadas, sendo eles o óxido de cálcio e sílica, alumina e o óxido de ferro. O gesso é adicionado, no final do processo de fabricação do cimento Portland, com o intuito de regular o tempo de pega por ocasião da reação de hidratação (FARIA, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008). O processo de endurecimento ocorre através de reações químicas quando o cimento em sua forma anidra entra em contato com a água, formando os produtos hidratados. Estes produtos com o tempo originam uma massa firme e resistente, isto é, a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016).

Tutikian e Dal Molin (2008) ressaltaram que não há um tipo de cimento ideal para a produção do CAA. Desta forma, os autores aconselham a utilizar o cimento com menor variabilidade referente à resistência à compressão. Para a produção do CAA são necessárias maiores proporções de materiais finos, com o propósito de manter uma boa viscosidade do concreto. Devido à elevada proporção de cimento Portland, as retrações por secagem e térmica do CAA tendem a ser altas. Uma alternativa interessante é a adição de minerais, por exemplo, as pozolanas, na composição do CAA, a fim de diminuir a retração por secagem do mesmo.

2.1.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado na produção do CAA pode ser o mesmo utilizado no concreto convencional, por exemplo, a areia natural. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a escolha do agregado miúdo está relacionada à demanda de água, elemento fundamental na fluidez e coesão na mistura. Os agregados que possuem partículas arredondadas e lisas são os mais adequados, em virtude de aumentarem a fluidez da mistura para um mesmo teor de água.

Em relação ao agregado graúdo utilizado no CAA, é recomendado limitar o seu volume, o qual leva à obstrução da fluidez, em virtude da colisão entre as suas partículas (ARABI *et al.*, 2019; OKAMURA; OUCHI, 2003). Gomes e Barros (2009) recomendam utilizar em torno de 28 a 35% do volume de concreto. O agregado graúdo deve ter uma dimensão máxima que possibilite a passagem do concreto sem obstrução, para isso é essencial que a quantidade e diâmetro do mesmo sejam reduzidos. EFNARC (2002) recomenda que a dimensão máxima característica do agregado graúdo fique entre 16 e 20 mm.

Na fabricação dos blocos vazados de concreto, comumente é utilizado como agregado miúdo a areia natural/artificial e/ou pó de pedra e como agregado graúdo é utilizado a brita 0, possuindo um diâmetro máximo de 9,5 mm.

2.1.1.3 Aditivo

O aditivo pode ser estabelecido como um produto químico adicionado ao concreto em quantidades máximas de 5% em relação à massa do cimento, durante a fase de preparação da mistura, que tem por finalidade obter alterações específicas ou alterações nas propriedades normais do concreto (NEVILLE, 2016).

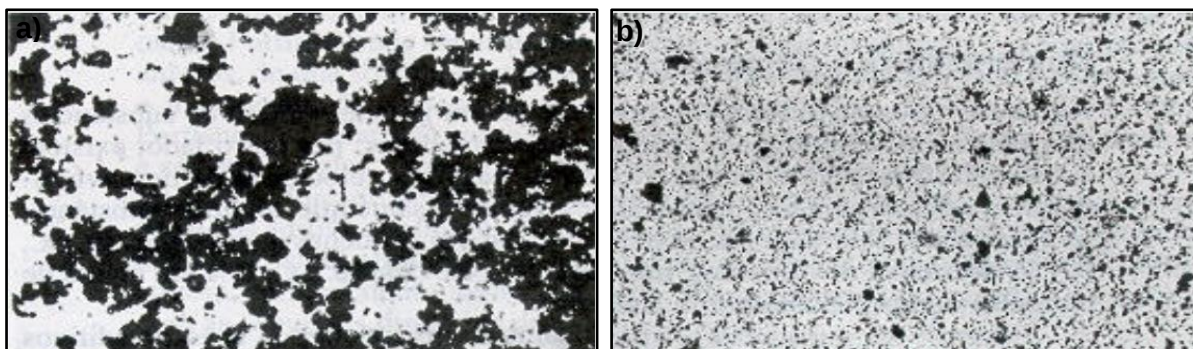
No CAA, os principais aditivos utilizados são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. Os aditivos superplastificantes são responsáveis por alcançar a elevada fluidez na mistura. Os aditivos modificadores de viscosidade promovem um aumento na coesão, evitando a segregação e exsudação do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, sintetizados por um alto grau de complexidade no processo de polimerização, no qual acarreta a produção de longas moléculas, de elevada massa molecular. Os

superplastificantes são aditivos redutores de água capazes de reduzir a água de amassamento na mistura na ordem de três a quatro vezes, em comparação com uma determinada mistura de concreto utilizando-se aditivos redutores de água normais, influenciando na resistência final do concreto (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A principal atuação das longas moléculas é envolver as partículas de cimento, atribuindo a estas cargas altamente negativas, fazendo com que elas se repelem ou atuem por repulsão estérica (NEVILLE, 2016). Desta maneira, possibilita-se uma dispersão e defloculação das partículas do cimento. Como resultado da dispersão do cimento têm-se uma aceleração na taxa de hidratação, no tempo de pega e no endurecimento do concreto. A Figura 5 apresenta uma micrografia de uma pasta de cimento Portland, com e sem aditivo superplastificante.

Figura 5- Micrografia de partículas de cimento floculadas em uma pasta de cimento Portland (a) - sem aditivo (b) - com aditivo superplastificante



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Os aditivos superplastificantes recomendados para a utilização no CAA são os aditivos à base de policarboxilatos. Estes são aditivos de alta eficiência e permitem a redução de água em até 40 % mantendo-se a mesma trabalhabilidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.1.1.4 Água

A água utilizada para a produção do CAA é a mesma utilizada para a produção do concreto convencional. A água deve ser isenta de qualquer impureza que possa

prejudicar as propriedades de resistência do concreto. Deste modo, a qualidade da água é um fator essencial na produção no concreto.

2.1.2 Características do concreto autoadensável no estado fresco

No estado fresco, o CAA começa a fluir após a tensão de cisalhamento (τ) exceder a tensão de escoamento (τ_0) (GOMES; BARROS, 2009).

O CAA pode ser compreendido através do modelo de Bingham (ROUSSEL *et al.*, 2005; HUANG *et al.*, 2018). Neste modelo, o fluido é determinado através de dois parâmetros, sendo eles: a viscosidade plástica (μ_p) e a tensão de cisalhamento (τ). A viscosidade plástica representa a resistência do concreto em fluir devido a um esforço externo, ocorrendo através do atrito interno. A tensão de cisalhamento representa a medida de força necessária para a movimentação do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A Figura 6 mostra a relação da tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento mediante o modelo de Bingham, que é descrito conforme a Equação 1.

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (1)$$

Onde:

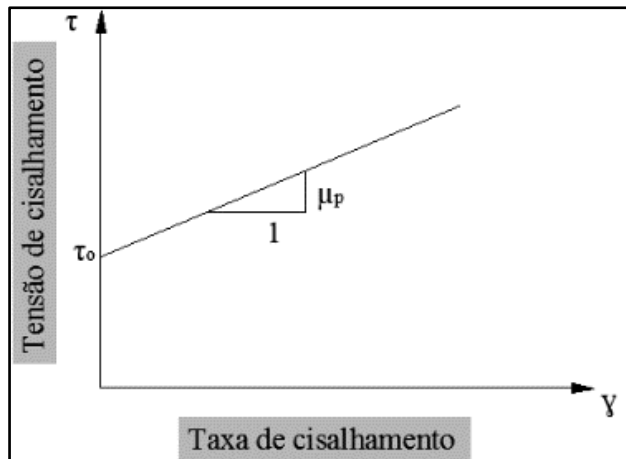
τ = tensão de cisalhamento;

τ_0 = tensão de escoamento;

μ_p = viscosidade plástica;

γ = taxa de cisalhamento.

Figura 6 - Modelo de Bingham



Fonte: Gomes e Barros (2009).

2.2 BLOCO ESTRUTURAL

Ramalho e Corrêa (2003) ressaltam dois conceitos importantes da alvenaria estrutural: componente e elemento. Componente é uma parte que compõe os elementos da estrutura. Os principais componentes da alvenaria estrutural são: o bloco ou unidade, argamassa, graute e armadura. Os elementos, são partes da estrutura formadas pela junção de, pelo menos, dois componentes. Exemplo: paredes, pilares e vergas.

Como parte dos componentes da alvenaria estrutural, os blocos são constituintes fundamentais na alvenaria, uma vez que, juntamente com a argamassa, é um fator significativo na capacidade de resistência e durabilidade da estrutura. Em relação à forma, os blocos podem ser maciços ou vazados. São considerados vazados aqueles que possuem um índice de vazios superior a 25% da área total (RAMALHO; CORRÊA, 2003). A NBR 6136 (ABNT, 2016) define o bloco vazado como componente para execução de alvenaria, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual a ou inferior a 75% da área bruta.

Hendry (1998) afirma que há diversos fatores que influenciam a resistência à compressão das unidades, prismas e paredes de alvenaria. Dentre estes fatores, estão as características geométricas da unidade, a resistência da unidade, a resistência e a deformabilidade da argamassa, a espessura da argamassa de assentamento, a sucção das unidades e a retenção de água da argamassa.

Os materiais utilizados na fabricação dos blocos de alvenaria estrutural são: concreto, cerâmica, sílico-calcáreo, pedra e vidro, sendo que os mais comumente usados são os de cerâmica e de concreto (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

2.2.1 Blocos de concreto

De acordo com Soliz (1995), o bloco de concreto surgiu no século XIX, na Europa. Nesta época, o mesmo era fabricado como um componente maciço e possuía um peso elevado, dificultando o seu manuseio e assentamento. Em meados de 1890, nos Estados Unidos surgiram os blocos vazados de concreto, sendo estes mais leves e que possibilitavam uma maior produtividade em relação aos blocos maciços.

Os blocos de concreto começaram a ser utilizados no Brasil com maior frequência a partir do ano de 1970 (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). Os materiais utilizados para a fabricação dos blocos são: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo ser adicionados aditivos, materiais pozolânicos e pigmentos (PARSEKIAN *et al.*, 2019).

A norma americana ASTM C90 (ASTM, 2016) define bloco de concreto como uma unidade de alvenaria obtida a partir da mistura de cimento Portland, água e agregados minerais, podendo ter adição ou não de outros materiais. Já a norma brasileira NBR 6136 (ABNT, 2016) define o bloco de concreto como sendo um componente de alvenaria, com função estrutural ou apenas de vedação, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta. A área bruta é a área perpendicular ao eixo dos furos, sem desconto das áreas dos vazios, e área líquida, a área média da seção perpendicular aos eixos dos furos, descontadas as áreas médias dos vazios.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) recomenda que os blocos devem apresentar um aspecto homogêneo e compacto, ter arestas vivas livres de trincas ou fragmentações que possam prejudicar o seu assentamento, ou afetar a resistência e a durabilidade da construção. Ainda, a norma estabelece algumas condições a serem respeitadas pelos blocos de classe A e B, relatando que a menor dimensão do furo deve ser maior ou igual a 70 mm para os blocos de 140 mm, e 110 mm para os blocos de 190 mm de largura. No que concerne ao raio da mísula de acomodação, a norma indica um valor mínimo de 40 mm para as classes A e B, e de 20 mm para a classe C.

2.2.1.1 Propriedades Físicas e Mecânicas

Em relação as propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto, a NBR 6136 (ABNT, 2016) aborda alguns requisitos para as dimensões mínimas de blocos vazados de concreto, os materiais utilizados para a produção das unidades, a resistência característica à compressão, absorção e a retração, sendo eles com função estrutural ou apenas para vedação, como relata a Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração dos blocos.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial ^a (Mpa)	Absorção (%)				Retração ^d (%)
			Agregado Normal ^b		Agregado Leve ^c		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	fbk ≥ 8,0	≤ 9,0	≤ 8,0			
	B	4,0≤ fbk < 8,0	≤ 10,0	≤ 9,0			
Com ou sem função estrutural	C	fbk ≥ 3,0	≤ 11,0	≤ 10,0	≤ 16,0	≤ 13,0	≤ 0,065

^a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

^b Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).

^c Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).

^d Ensaio facultativo.

Fonte: Adaptado da NBR 6136 (ABNT, 2016).

As principais propriedades físicas dos blocos de concreto são a absorção de água e a retração. No que diz respeito à absorção de água, esta é uma propriedade fundamental para se obter uma boa ligação entre o bloco e a argamassa. A capacidade de absorção de água é usada como um indicador da quantidade de vazios e da permeabilidade dos blocos, e, por conseguinte, de sua durabilidade.

Quando a absorção inicial é elevada, o bloco pode absorver a água da argamassa de assentamento, prejudicando a aderência entre os materiais (CALÇADA, 1998). Blocos de concreto possuindo elevada resistência à compressão

axial, porém com alta absorção de água, significa que os blocos possuem alta quantidade de cimento em sua matriz, acarretando um aumento de fissuras e de retração (PARSEKIAN *et al.*, 2019). Por esta razão, a norma NBR 6136 (ABNT, 2016) determina que o valor de absorção dos blocos de concreto deve ser menor ou igual a 8% para blocos com função estrutural.

Em consideração a retração, como qualquer produto cimentício, alvenarias de blocos de concreto retraem-se com o tempo, podendo ocasionar fissuras na alvenaria (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). A retração por secagem é provocada pela redução do volume de água do bloco, quando a água presente no interior do mesmo acaba evaporando, acarretando forças capilares equivalentes a uma compressão isotrópica da massa (SÁNCHEZ, 2013). Com o objetivo de limitar o aparecimento de fissuras, em decorrência da retração por secagem, a NBR 6136 (ABNT, 2016) determina que esta deve ser inferior a 0,065%.

2.2.2 Geometria dos blocos vazados de concreto

A escolha de uma geometria adequada para a fabricação dos blocos tem uma função preponderante em diversos aspectos, tais como: resistência mecânica, distribuição de tensões, conforto térmico e acústico.

Boult (1979) apud Rizzatti (2003) constatou que a espessura do septo não influenciou de forma significativa na resistência do prisma, e que os furos paralelos apresentaram maiores resistências que os afunilados, concluindo que a geometria dos furos é um fator preponderante na resistência da alvenaria.

Shrive (1983) analisou o mecanismo de ruptura e as distribuições de tensões nas unidades e na alvenaria. O autor concluiu que o estudo de uma geometria adequada para as unidades é fundamental para se obter um melhor desempenho para as unidades e alvenaria quando submetidos aos esforços de compressão.

Ganesan *et al.* (1988) relataram que a relação da resistência da parede e do bloco alteram-se de acordo com a geometria do bloco e do tipo de assentamento da argamassa. Conforme o formato geométrico empregado, podem surgir concentrações de tensões nos blocos, o que não é desejado. Os autores concluíram que, para quase uma mesma quantidade de material utilizado no bloco, uma pequena modificação na tipologia do bloco pode melhorar sua eficiência e aumentar a capacidade resistente da alvenaria.

Rizzatti (2003) afirmou que, como os blocos são vazados, conforme o tipo do formato geométrico e a sua disposição, podem surgir grandes concentrações de tensões, reduzindo a resistência mecânica e levando a rupturas frágeis.

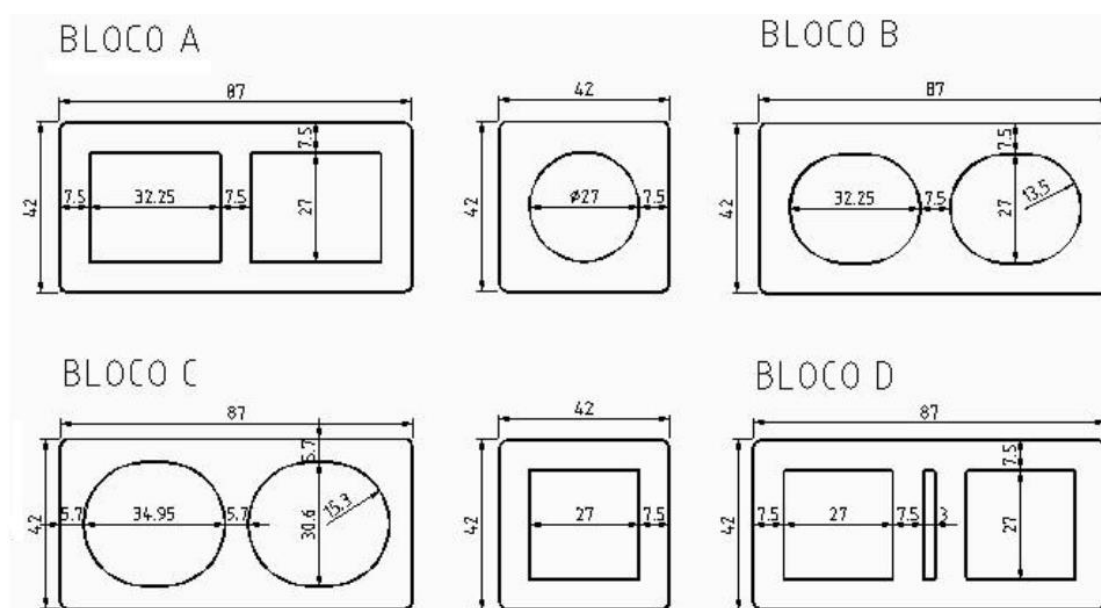
2.2.2.1 Aspectos mecânicos e físicos relacionados à geometria

Como citado anteriormente, a geometria do bloco pode influenciar no conforto térmico da alvenaria. Al-tamimi *et al.* (2017) investigaram o efeito da geometria em blocos vazados e sólidos de concreto, com a finalidade de elevar a resistência térmica da alvenaria. Os autores afirmaram que, conforme o aumento da taxa de vazados dos blocos, a transferência de calor externo para o interior da alvenaria é reduzida de forma significativa. Em relação aos formatos dos furos na área dos vazios, os autores analisaram formatos circulares e retangulares. Considerando-se a mesma taxa de vazio e a mesma quantidade de número de furos, a temperatura interna da alvenaria T_i (C°), utilizando-se blocos de concreto com formatos retangulares, é inferior aos blocos de concreto com formatos circulares.

Rizzatti (2003) estudou quatro diferentes geometrias de blocos cerâmicos, sendo as duas primeiras com formatos geométricos circulares, com diferentes áreas líquidas, a terceira com formato retangular e a última com formato retangular com duplo septo central. A Figura 7 apresenta as geometrias e as dimensões dos blocos estudadas pelo autor.

Os blocos foram fabricados em escala reduzida 1:3 e possuíam as mesmas dimensões externas, modificando-se apenas a geometria dos furos. O autor afirma que a utilização de diferentes formatos geométricos não influenciou de forma significativa a resistência à compressão do componente e do prisma. Quanto às distribuições de tensões nas unidades, não foram verificadas possíveis concentrações de tensões significativas que poderiam influenciar no desempenho do bloco.

Figura 7 - Geometrias e as dimensões dos blocos estudados



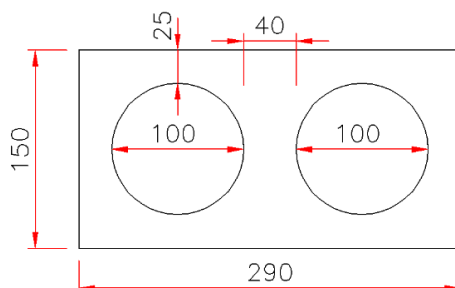
Fonte: Rizzatti (2003).

A resistência à compressão axial é um dos principais parâmetros de avaliação no projeto de estruturas de alvenaria, sendo a resistência à compressão dos blocos, um fator fundamental (JAAFAR *et al.*, 2006; ZAHARA; DHANASEKAR, 2016). Sendo assim, inúmeros autores estudaram e estudam a resistência à compressão de blocos de alvenaria. Mohamad *et al.* (2017) realizaram ensaios para avaliação da resistência à compressão de blocos vibro-prensados. Os autores alcançaram valores de resistências médias à compressão de 23,1 MPa considerando-se a área líquida, com coeficiente de variação (C.V) de 7,7%, e valores de absorção de água de 7,7%. Em consideração ao módulo de elasticidade, os autores obtiveram valores de 20,9 GPa e um C.V de 7,2%.

Pinto (2018) analisou uma alternativa de fabricação de blocos de alvenaria estrutural, utilizando como uso e aplicação o concreto fluido nos seguintes traços 1:3, 1:5 e 1:7. Para que a mistura apresentasse uma consistência fluida, a relação água/cimento foi modificada conforme o traço. As relações água/cimento utilizadas no trabalho foram de 0,45; 0,65 e 0,95, para os traços 1:3, 1:5 e 1:7, respectivamente. A quantidade de aditivo superplastificante na mistura foi corresponde à 0,5% em relação à massa do cimento. O cimento utilizado pelo autor foi o cimento Portland de alta resistência inicial. O autor estudou, em sua pesquisa, uma geometria de bloco de concreto com dois furos circulares de 100 mm em sua seção vazada. Esta geometria estudada não seguiu à risca a geometria de blocos produzidos industrialmente,

alterando a seção vazada do bloco. A Figura 8 ilustra a geometria do bloco estudado por Pinto (2018).

Figura 8 - Geometria do bloco de concreto



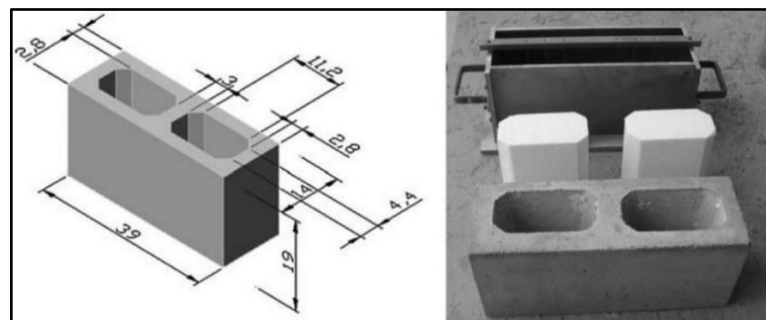
Fonte: Adaptado Pinto (2018).

Pinto (2018) obteve resultados de resistência média à compressão axial dos blocos de 23,78; 10,53 e 7,37 MPa, aos 7 dias, para as misturas 1:3, 1:5 e 1:7, respectivamente. Aos 28 dias, o autor alcançou valores de resistência média à compressão de 28,95; 14,82 e 11,44 MPa para os traços 1:3, 1:5 e 1:7, respectivamente. O aumento de resistência média à compressão para as misturas 1:3, 1:5 e 1:7, de 7 para 28 dias, foi de 21,7%, 40,8% e 55,3%, respectivamente. Em todas as misturas, os blocos apresentaram resistências à compressão superiores aos estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2016), podendo ser considerados blocos com função estrutural.

Izquierdo *et al.* (2017) realizaram um programa experimental, com a finalidade de averiguar o comportamento de blocos de concreto utilizando fibras naturais de sisal. Duas séries de blocos com a mesma geometria e dimensões foram analisadas, a primeira sem a utilização de fibras e a segunda com a adição de 1% de fibra em relação ao volume de concreto. Os autores alcançaram resultados de resistência média à compressão referida à área líquida de 18,25 e 13,43 MPa, para as misturas sem a utilização de fibras e com adição de 1% de fibra, respectivamente. Quanto ao módulo de elasticidade dos blocos, os autores alcançaram valores de 9,75 GPa para a mistura sem a fibra, e 3,73 GPa para mistura com 1% de fibra. Os autores concluíram que a adição de fibras de sisal à mistura de concreto não melhorou as propriedades mecânicas dos blocos, no entanto, a incorporação de fibras aumentou a ductilidade e a tenacidade da unidade.

Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) avaliaram a resistência à compressão de prismas de blocos vazados de concreto. Foram avaliadas quatro diferentes misturas de concreto para a fabricação dos blocos. Os autores realizaram duas misturas com o traço 1:6,4, utilizando-se uma relação a/c de 0,85 e de 0,92, uma mistura com o traço 1:6,0, usando-se uma relação a/c de 0,75, e uma mistura com o traço 1:4,7, utilizando-se uma relação a/c de 0,58. A Figura 9 mostra a geometria do bloco utilizada por Barbosa, Lourenço e Hanai (2009).

Figura 9 - Geometria do bloco vazado de concreto

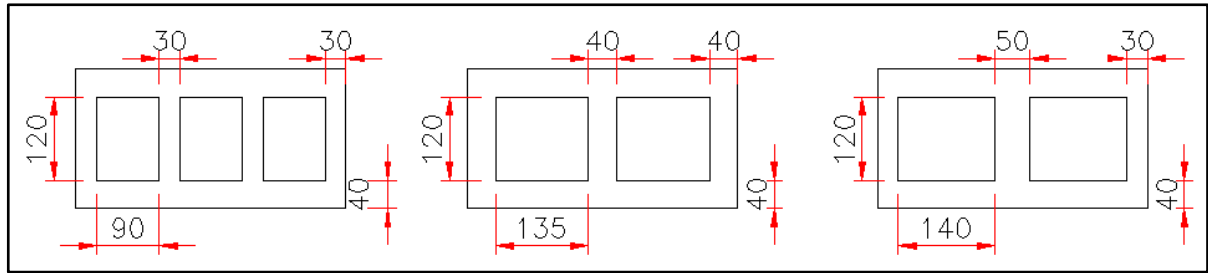


Fonte: Barbosa, Lourenço e Hanai (2009).

Os autores obtiveram resultados de resistência média à compressão de blocos de concreto, considerando-se a área bruta, para as misturas de 1:6,4 com a/c 0,85 e 0,92, de 13,7 e 11,2 MPa e C.V de 2,9 e 4,4%, respectivamente. Nas misturas 1:6 foram alcançados valores de 15,0 MPa e C.V de 2,3%, e na mistura 1:4,7 foram obtidos valores de 21,8 MPa e C.V de 2,4%.

Ganesan e Ramamurthy (1992) analisaram, através do método dos elementos finitos, o comportamento de prismas de alvenaria utilizando-se blocos vazados de concreto, com dimensões de 200 x 300 mm, submetidos à compressão axial, considerando-se diferentes geometrias, arranjos e propriedades das argamassas. Foram analisados três tipos de blocos de concreto: blocos de três furos e outros dois blocos de dois furos, conforme a Figura 10. A relação entre área bruta e líquida dos blocos permaneceu constante. No que diz respeito ao comportamento mecânico da alvenaria, os autores concluíram que a geometria do bloco influenciou a distribuição de tensões na alvenaria.

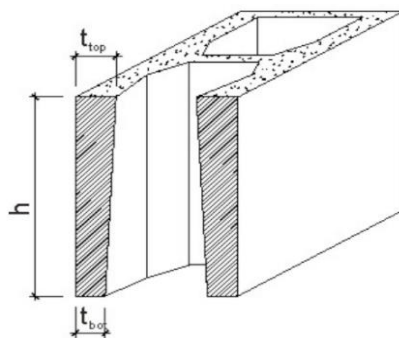
Figura 10 - Geometrias de blocos vazados de concreto utilizadas



Fonte: Adaptado Ganesan e Ramamurthy (1992).

Casali *et al.* (2012) analisaram a influência da geometria de blocos vazados de concreto e do tipo de argamassa na relação prisma / bloco e no comportamento de deformação e modo de ruptura dos prismas. Duas geometrias de blocos de concreto foram avaliadas, uma com espessura da parede de 25 mm e a outra com espessura da parede de 32 mm. Os blocos possuíam uma área bruta de 546 cm² e a área líquida de 306,5 e 358,1 cm², e relação área líquida / área bruta das unidades de 0,56 e 0,66, respectivamente. A resistência à compressão dos blocos referida à área líquida foi de 37,2 e 33,8 MPa e um C.V de 16,9% e 2,39%, respectivamente. Os autores concluíram que a geometria dos blocos influenciou no comportamento mecânico das unidades. Ainda, os autores afirmaram que utilizando blocos com espessura da parede de 32 mm, aumentou em cerca de 15% o peso dos blocos em relação aos blocos com espessura da parede de 25 mm, sobrecarregando as fundações dos edifícios e a produtividade também diminuiu. A Figura 11 mostra a geometria dos blocos utilizada pelos autores.

Figura 11 - Geometria dos blocos vazados de concreto utilizados por Casali *et al.* (2012)

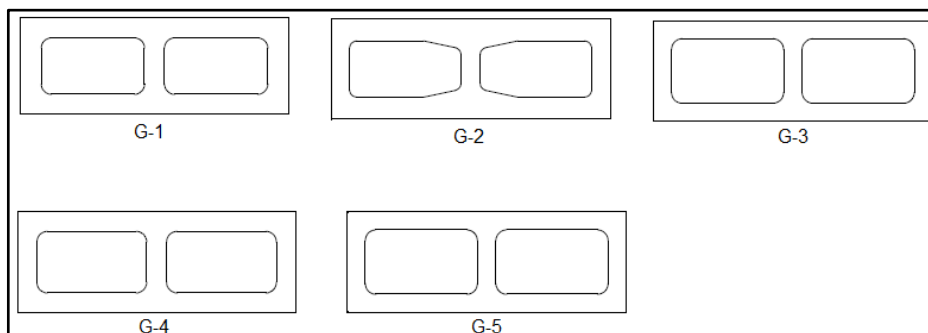


Espessura da parede (topo) - t_{top} (mm)	Espessura da parede (inferior) - t_{bot} (mm)
25	32
32	38

Fonte: Adaptado Casali *et al.* (2012).

Steil (2003) investigou a influência da geometria do bloco de concreto e diferentes tipos de argamassas de assentamento, no desempenho à compressão de prismas, com finalidade de avaliar o comportamento das características geométricas da unidade e argamassas. O autor avaliou cinco geometrias distintas de blocos de concreto, não alterando a dimensão externa do bloco. A Figura 12 mostra as geometrias dos blocos estudadas. Considerando-se a resistência à compressão dos blocos de concreto, a geometria G-4 apresentou os melhores resultados, considerando-se a área bruta e a área líquida, alcançando-se as resistências de 10,14 e 19,6 MPa, respectivamente, e um C.V de 9,4%. Em relação ao ensaio de absorção, a geometria G-4 apresentou o menor valor de absorção, na ordem de 5,51%.

Figura 12 - Geometrias dos blocos de concreto utilizadas na pesquisa



Fonte: Adaptado STEIL (2003).

2.3 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassa de assentamento é uma mistura homogênea de ligante(s) inorgânico(s), agregado(s) miúdo(s) e água, podendo conter aditivos com propriedades de aderência e endurecimento. Esta argamassa pode ser dosada na própria obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

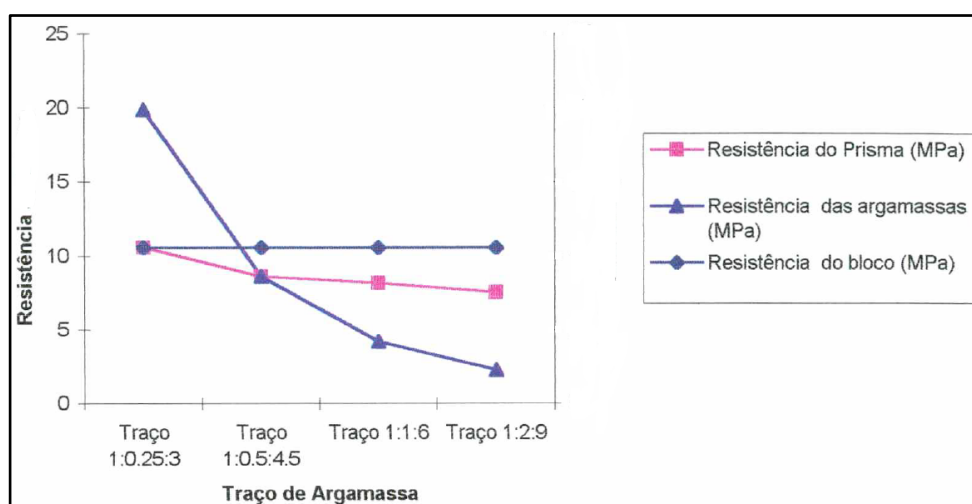
As funções atribuídas às argamassas de assentamento consistem em promover a união das unidades de alvenaria, transferir de maneira uniforme as tensões atuantes da estrutura para a seção do bloco, absorver pequenas deformações naturais da alvenaria e impedir a penetração da água das chuvas e ventos (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

A resistência à compressão da argamassa é uma propriedade importante, pois de certa forma influencia a resistência à compressão da alvenaria e também é utilizado

como medida do controle de qualidade na produção da argamassa (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

A resistência da alvenaria é afetada pelo tipo de argamassa utilizada. Mohamad (1998) relatou que, para um bloco de um mesmo nível de resistência, conforme o acréscimo da resistência à compressão da argamassa, há o aumento da resistência dos prismas. Porém, este aumento de resistência do prisma, não é proporcional ao acréscimo de resistência da argamassa, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Resistências dos blocos, argamassas e prismas



Fonte: Adaptado Mohamad (1998).

Mohamad *et al.* (2017) estudaram a resistência e comportamento de prismas de alvenaria de blocos de concreto, utilizando-se argamassas de diferentes resistências. No programa experimental, os autores empregaram três tipos de argamassa, com os seguintes traços (Cimento: Cal: Areia): 1: 0,25: 3; 1: 0,5: 4,5 e 1: 1: 6, alcançando-se resultados de resistência à compressão de 20,3; 7,4 e 4,5 MPa, respectivamente. Como conclusão, os autores afirmaram que, nos prismas construídos com argamassa de maior resistência, ocorrem fissuras localizadas na ligação entre bloco e argamassa. Já nos prismas construídos com argamassa de menor resistência, as fissuras ocorrem através do esmagamento da argamassa, concluindo que a interação bloco e argamassa determina o mecanismo de ruptura da alvenaria.

Fonseca *et al.* (2019) avaliou o comportamento de prismas de alvenaria de blocos de concreto, utilizando blocos de elevada resistência, variando de 41 a 75 MPa referida à área líquida. Os autores empregaram três diferentes misturas de argamassa

de assentamento, com os seguintes traços em volume 1:1,0:5,0; 1:0,5:4,0 e 1:0,5:3,5, obtendo-se resultados de resistência à compressão aos 28 dias de 15,4; 22,2 e 32,0 MPa, respectivamente.

Zahara e Dhanasekar (2016) analisaram a influência das propriedades das unidades e argamassas na resistência à compressão da alvenaria. Os autores concluíram que a resistência da unidade afeta de maneira significativa a resistência da alvenaria. Em relação às propriedades da argamassa, o aumento da resistência à compressão da argamassa acarreta apenas um leve aumento na resistência da alvenaria, observado também por Haach, Vasconcelos e Lourenço (2013). Entretanto, utilizando uma menor espessura da junta de argamassa, há um efeito relevante no aumento da resistência da alvenaria. Uma maneira eficiente de aumentar a resistência da alvenaria é utilizar unidades com resistência elevada usando uma menor espessura da junta de argamassa.

Ainda sobre a resistência à compressão da argamassa, a argamassa obteve um efeito mais significativo nas deformações dos prismas de alvenaria, estudados por Haach, Vasconcelos e Lourenço (2013).

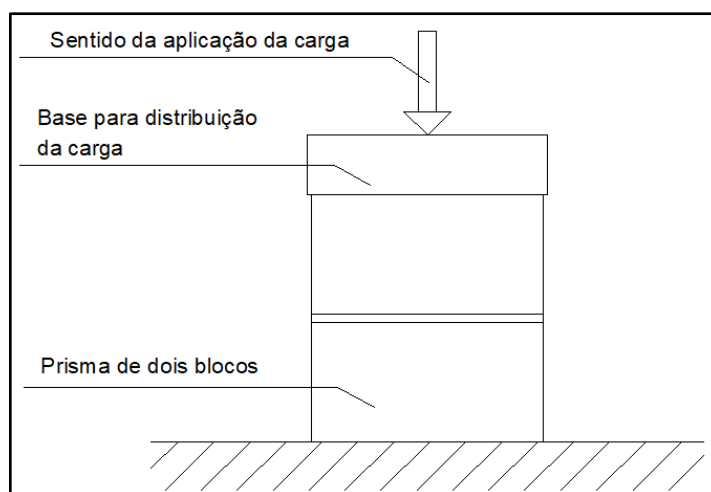
2.4 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ALVENARIA

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas, e das características de cada componente da alvenaria, são essenciais, uma vez que as características da alvenaria são determinadas em função dos componentes que as constituem. Para estabelecer estas propriedades da alvenaria, é conveniente a utilização de ensaios simples e custos pouco onerosos. Com o objetivo de avaliar a qualidade da alvenaria em função da resistência à compressão, é comumente realizado ensaios de compressão de prismas (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

Com a finalidade de verificar a resistência à compressão da alvenaria, são realizados diversos ensaios, tais como: ensaios de paredes em escala real, mini-paredes e prismas. E em alguns casos, também são realizados modelos teóricos de ruptura desenvolvidos por pesquisadores. A fim de representar uma construção real de alvenaria estrutural, os prismas apresentam uma excelente alternativa, relatando os efeitos das propriedades dos componentes da alvenaria e a qualidade do acabamento final (THAICKAVIL; THOMAS, 2018).

Os prismas são elementos obtidos através da superposição de uma certa quantidade de blocos, geralmente são utilizados dois ou três blocos, sendo estes unidos por uma argamassa de assentamento (RAMALHO; CORRÊA, 2003). Devido à limitação de máquinas de ensaios em laboratórios, no que diz respeito à capacidade máxima e as dimensões limite, o prisma tornou-se um dos principais corpos-de-prova usados para avaliar o desempenho das alvenarias, ao invés de construir pequenas paredes ou paredes em escala real (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). A Figura 14 mostra a estruturação do prisma para a execução do ensaio.

Figura 14 - Esquema para o ensaio de determinação da resistência do prisma (f_p)



Fonte: Adaptado ABNT NBR 15961-2 (ABNT, 2011).

Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) fabricaram prismas com quatro diferentes misturas de concreto e de argamassa. Os autores obtiveram valores de resistência à compressão axial variando de 10,0 a 16,9 MPa, utilizando-se misturas de argamassa de 1:1,3:5,3 e 1:0,3:3,0, respectivamente. O cálculo foi realizado em função da área bruta dos prismas.

Steil (2003) obteve resistência à compressão do prisma de 7,98 MPa referida à área bruta e 15,43 MPa referida à área líquida, utilizando uma argamassa mista com traço 1:0,5:3,75. Em relação ao módulo de elasticidade do prisma, os resultados variaram de 14,85 a 20,81 GPa, em relação à área líquida.

Casali *et al.* (2012) realizaram ensaios de prismas de três blocos, utilizando duas geometrias de blocos e quatros diferentes misturas de argamassa de assentamento, sendo duas argamassas pré-misturadas e duas argamassas mistas, com resistências de 10,09; 15,44; 6,85 e 9,38 MPa. Os prismas constituídos com as

unidades de resistência de 37,2 MPa, obtiveram resistência média à compressão variando de 15,20 a 28,04 MPa, considerando-se a área líquida, e os prismas constituídos com unidades de resistência de 33,8 MPa, a resistência média à compressão variou de 17,90 a 24,20 MPa. A eficiência da alvenaria variou de 0,41 a 0,75. Em relação ao módulo de elasticidade dos prismas. Os autores concluíram que a geometria dos blocos e o tipo de argamassa influenciaram a resistência à compressão dos prismas.

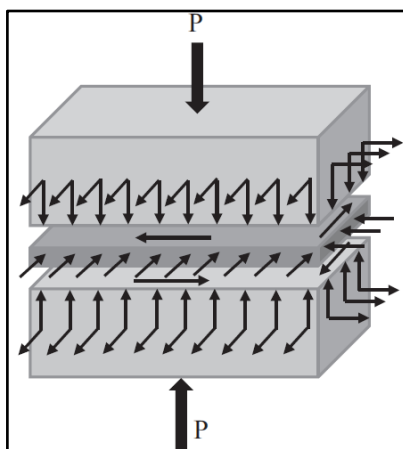
Izquierdo *et al.* (2017) apresentaram resistência à compressão axial do prisma de 5,19 MPa em relação à área bruta e módulo de elasticidade de 5,28 GPa, utilizando uma mistura de concreto de 1:3,6:2,4 e argamassa mista com traço 1:0,5:4,5.

Mohamad *et al.* (2017) alcançaram resistências à compressão axial de prismas em relação à área líquida de 14,9, 14,3 e 13,9 MPa e módulo de elasticidade de 19,90, 20,40 e 24,90 GPa, utilizando argamassa com os traços 1:0,25:3, 1:0,5:4,5 e 1:1:6, respectivamente.

Pinto (2018) avaliou a resistência à compressão de prismas, utilizando-se blocos de concreto fluido nos seguintes traços 1:3, 1:5 e 1:7, e três diferentes misturas de argamassa, sendo duas misturas de argamassa mista, com os devidos traços de 1:1:6 e 1:0,5:4,5, e uma mistura de argamassa polimérica. Na mistura 1:3 de concreto fluido, o autor alcançou valores de resistência à compressão dos prismas em relação à área líquida de 33,46, 25,18 e 26,31 MPa, para as misturas de argamassa polimérica e mistas com traço de 1:1:6 e 1:0,5:4,5, respectivamente. Na mistura de 1:5 o autor apresentou resultados de resistência de 22,36; 23,88 e 30,65 MPa, para as misturas de argamassa polimérica e mistas com traço de 1:1:6 e 1:0,5:4,5, respectivamente. Na mistura de 1:7 o autor obteve valores de resistência de 16,46, 15,69 e 15,08 MPa, nas misturas de argamassa polimérica e mistas com traço de 1:1:6 e 1:0,5:4,5, respectivamente.

No comportamento do prisma, quando submetido ao esforço de compressão axial, a argamassa tem a tendência de deformar mais que o bloco, devido à argamassa possuir um módulo de elasticidade diferente do bloco (RAMALHO; CORRÊA, 2003). A deformação lateral da argamassa é prejudicada em virtude da união entre o bloco e argamassa, criando tensões de tração nos blocos e compressão na argamassa, ocasionando o estado de tensão biaxial nos blocos e tensão triaxial na argamassa. A Figura 15 mostra o estado de tensão de compressão da argamassa e tensão de tração no bloco.

Figura 15 - Tensões nas unidades e na junta de argamassa submetido ao carregamento de compressão axial



Fonte: Zahara e Dhanasekar (2016).

Há um conceito fundamental que relaciona a influência da resistência dos blocos na resistência à compressão da alvenaria, chamada de eficiência, que é a relação entre a resistência da parede e a resistência do bloco. Usualmente os valores de eficiência parede/bloco variam de 0,4 a 0,6 para blocos de concreto. No caso dos prismas, a eficiência é a relação entre a resistência do prisma e do bloco. Os valores variam de 0,5 a 0,9 para os blocos de concreto. Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) obtiveram fatores de eficiência prisma/bloco variando de 0,74 a 0,89 com resistência à compressão dos blocos variando de 11,2 a 21,8 MPa. Mohamad *et al.* (2017) alcançou fatores de eficiência de 0,69 utilizando blocos de concreto com resistência à compressão de 23,1 MPa. Steil (2003) atingiu valores superiores no fator de eficiência, obtendo um fator de eficiência de 0,92 e 0,96 para blocos com resistência à compressão axial de 6,86 MPa. Outro valor de influência importante relaciona a resistência da parede e do prisma. O valor situa-se por volta de 0,7 para blocos de concreto e blocos cerâmicos.

Em consideração aos fatores que interferem na resistência à compressão de prismas de alvenaria, os principais fatores são: a resistência e a geometria dos blocos, a resistência e a espessura da argamassa, o tipo de assentamento e a relação altura/espessura (SARHAT; SHERWOOD, 2014; PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). De uma maneira geral, quanto maior a resistência do bloco, maior a resistência do prisma de alvenaria (MOHAMAD; LOURENÇO; ROMAN, 2007; BARBOSA; LOURENÇO; HANAI, 2009).

Em relação à resistência da argamassa, uma argamassa com baixa resistência à compressão proporciona prismas com baixa resistência, esta característica visível para unidades de maior resistência. Conforme o aumento de resistência da argamassa, aumenta a resistência do prisma, todavia, este aumento é menos significativo à medida que a resistência da argamassa torna-se maior (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014).

Considerando o tipo de assentamento da argamassa, esta prática varia muito em todo o mundo. Na América do Norte, por exemplo, é típico o assentamento parcial da argamassa (argamassa disposta somente nas paredes longitudinais do bloco), enquanto que, em outros lugares do mundo é utilizado o assentamento total (SARHAT; SHERWOOD, 2014). Considerando-se a área bruta ou a carga de ruptura, ao aplicar argamassa disposta somente nas paredes laterais ocasionará uma redução de cerca de 20% da resistência do prisma (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). Izquierdo, Corrêa e Soto (2012) obtiveram uma redução média de 36% da resistência do prisma, utilizando o assentamento parcial da argamassa em relação ao assentamento total.

Conforme o aumento da relação da altura do prisma e a sua espessura (h/t) a resistência do prisma diminui (SARHAT; SHERWOOD, 2014). Esta redução na resistência está associada à diminuição do efeito de confinamento dos pratos de aplicação da carga (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2014). A ASTM C1314 (ASTM, 2018) recomenda aplicar um fator de correção (h/t) nas resistências dos prismas de blocos vazados de concreto, com relação altura/espessura variando de 1,3 a 5.

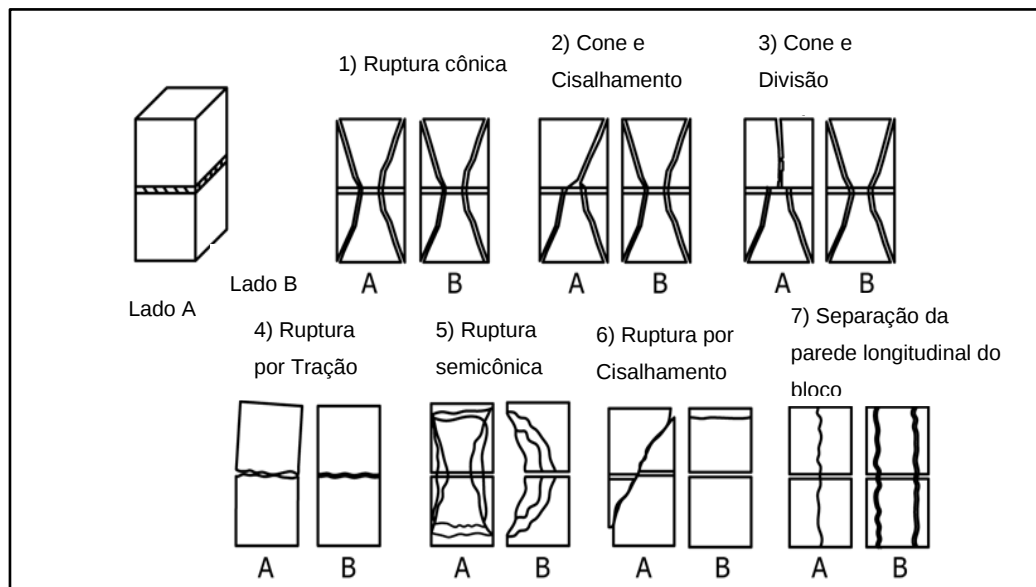
Conforme mencionado no item 2.3 deste capítulo, a redução da espessura da argamassa tem-se um efeito relevante no aumento da resistência da alvenaria, em decorrência da redução da incompatibilidade entre o bloco e a argamassa (MOHAMAD, 1998). Reddy, Lal e Rao (2009) observaram uma redução na resistência à compressão do prisma de 16%, com o aumento da espessura da argamassa de 6 para 30 mm.

2.5 FORMAS DE RUPTURA DOS PRISMAS

Na alvenaria estrutural, o conhecimento da origem, propagação de fissuras e a forma de ruptura do elemento, em especial do prisma, é de suma importância. A ASTM

C1314 (ASTM, 2018), apresenta formatos de rupturas de prismas ilustradas na Figura 16.

Figura 16 - Esquema dos modos de rupturas



Fonte: Adaptado ASTM C1314.

Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) concluíram que a ruptura dos prismas está relacionada a fissuras verticais, podendo ou não ocorrer o esmagamento da argamassa, dependendo das propriedades mecânicas dos materiais que compõem a alvenaria.

De acordo com Sánchez (2013) a ruptura de prismas de blocos de concreto ocorre de forma frágil, uma vez que o corpo-de-prova romperá por esmagamento da parte central, próximo à região da argamassa, surgindo fissuras verticais nos prismas, devido ao estado triaxial de tensões que proporciona o surgimento de tensões de tração no plano de menor inércia. Segundo o mesmo autor, as primeiras fissuras acontecem entre 50 e 60% da carga máxima de ruptura. Estas fissuras estão localizadas na parede longitudinal do prisma, região da parede que abrange a parte vazada da unidade e geralmente próxima ao septo transversal central.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foi concebido um programa experimental de forma a analisar a influência da geometria de blocos vazados, utilizando o CAA para a fabricação das unidades. Seis diferentes tipos de blocos, com diferentes formatos geométricos e espessuras de parede longitudinal foram fabricados, utilizando uma mistura de CAA para a produção dos blocos.

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados para a fabricação das fôrmas, dos blocos vazados de concreto, do concreto autoadensável e os equipamentos utilizados. Além disto, este capítulo aborda o método aplicado para a confecção das formas usadas na fabricação dos blocos; a produção dos blocos vazados de concreto; o concreto autoadensável e os métodos aplicados na fabricação dos prismas, bem como os ensaios executados no Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS).

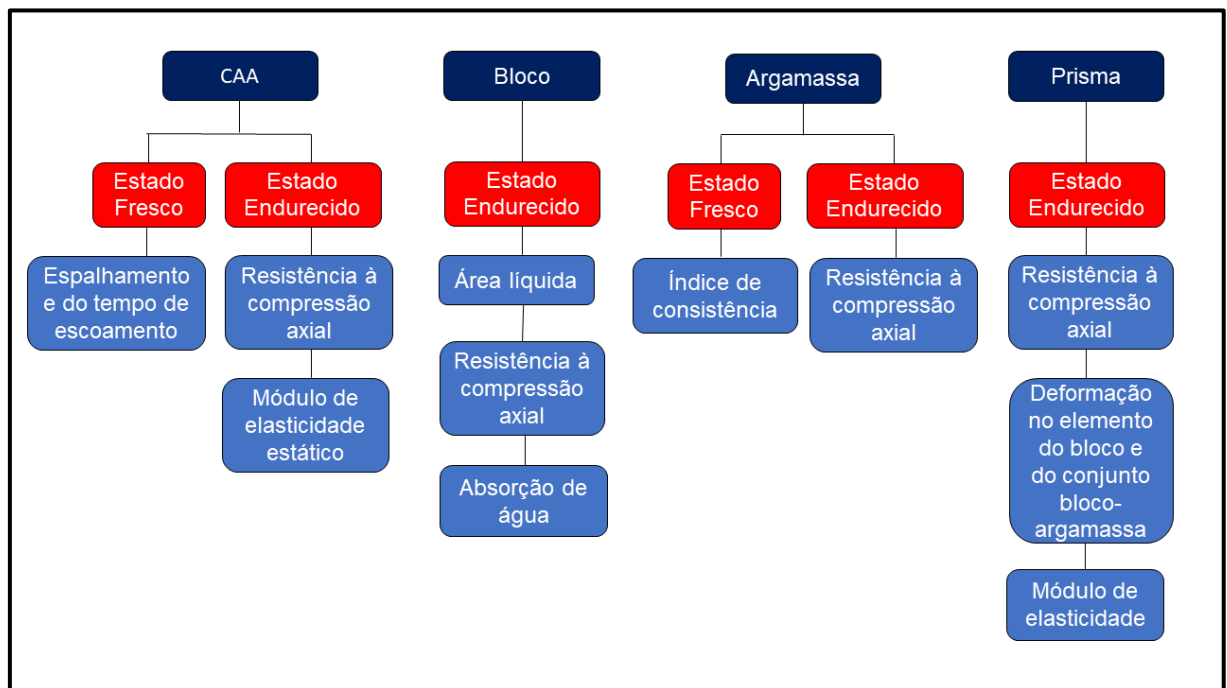
A matriz dos ensaios realizados está apresentada na Tabela 2 e na Figura 17. Foram ensaiados um total de seis corpos-de-prova de CAA para os ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático. Com relação aos blocos foram utilizados um total de trinta e seis blocos para o ensaio de resistência à compressão axial e dezoito blocos para o ensaio de absorção de água. Em relação ao ensaio da argamassa para a fabricação dos prismas, foram produzidos seis corpos-de-prova de argamassa para o ensaio de resistência à compressão, e foram construídos um total de trinta e seis prismas para avaliar a resistência à compressão axial e suas respectivas deformações.

Tabela 2 - Matriz de Ensaio

Objetos da pesquisa	Ensaaios realizados	Dias	Espaço amostral
Concreto autoadensável	Espalhamento e tempo de escoamento	-	3
	Resistência à compressão axial	7 e 28	3
	Módulo de elasticidade estático	7 e 28	3
Argamassa	Índice de consistência	-	3
	Resistência à compressão axial	28	6
Bloco vazado de concreto	Área Líquida	-	3
	Resistência à compressão axial	7 e 28	3
	Absorção de água	28	3
Prismas	Resistência à compressão axial	28	6
	Deformação na face dos blocos	28	6
	Módulo de elasticidade	28	3

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 17 - Ensaaios realizados



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com a finalidade de avaliar não apenas as propriedades mecânicas do bloco, mas também outras propriedades do componente, uma análise de elementos finitos (*finite element analysis*, FEA) foi realizada, com o objetivo de determinar a resistência térmica das unidades.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na produção do concreto autoadensável foi o cimento Portland de alta resistência inicial – CPV-ARI. Este tipo de cimento foi escolhido devido ao ganho de resistência logo nos primeiros dias de idade. Este ganho de resistência é proporcionado pelo maior teor de C_3S (Silicato tricálcico) e pelo tempo maior de moagem do clínquer, resultando em uma maior finura deste cimento. As Tabelas 3 e 4 apresentam as propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento CPV-ARI, em ensaio realizado pelo fabricante, no mês de dezembro de 2018, conforme a norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CPV-ARI

Ensaio	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Água de consist. (%)	Tempo de pega		Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)		
	#200	#325			Início de pega (min)	Fim de pega (min)		1 dia	3 dias	7 dias
Limites da Norma	≤ 6	N/A	≥3000	N/A	≥60	≤600	≤ 5,0	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0
Média	0,00	0,15	5909,33	30,92	171,67	265,33	0,73	27,17	35,06	40,16
Desvio padrão	0,00	0,00	81,11	0,81	18,58	29,97	0,37	1,06	1,38	0,96

Fonte: Modificado (VOTORANTIM CIMENTOS, 2018).

Tabela 4 - Propriedades químicas do cimento CPV-ARI

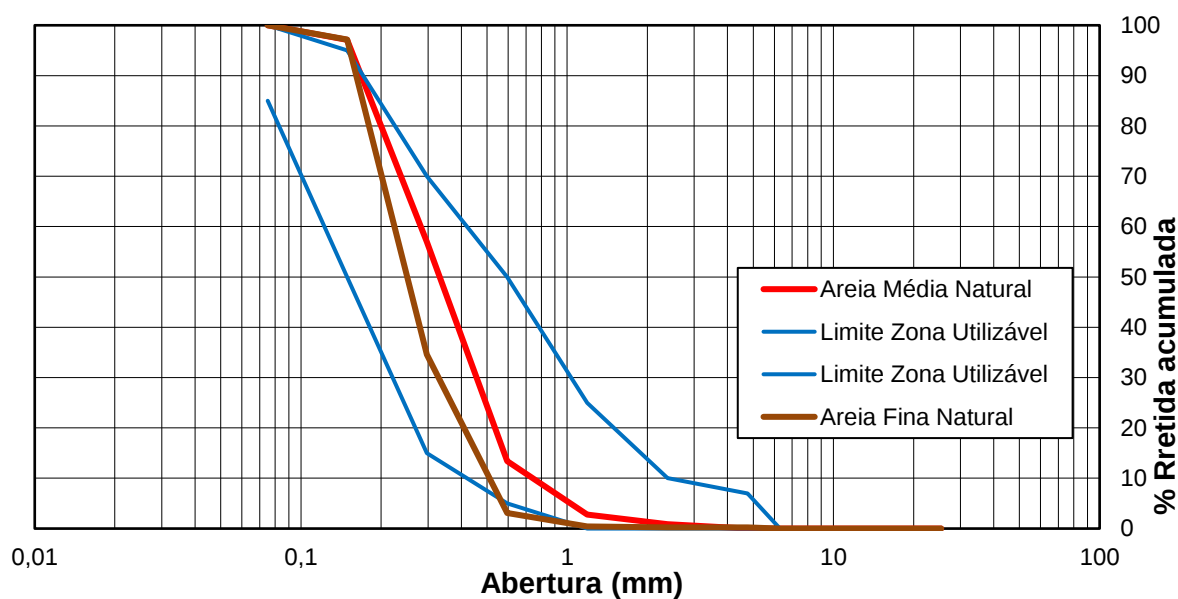
Ensaio	Teores (%)			
	PF	MgO	SO ₃	RI
Limites da Norma	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5	≤ 3,5
Média	6,10	4,01	3,27	2,38
Desvio padrão	0,28	0,57	0,11	0,59

Fonte: Modificado (VOTORANTIM CIMENTOS, 2018).

3.1.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos empregados na composição do concreto autoadensável foram a areia média e a areia fina natural, obtidas no Porto de Areia Irmãos Brambilla, localizado no município de Pereira Barreto-SP. A análise da composição granulométrica foi realizada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 18 exibe a curva granulométrica dos agregados miúdos e correlaciona com os limites superiores e inferiores para zonas utilizáveis, estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 18 - Curva Granulométrica - Agregado miúdo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os agregados miúdos foram submetidos aos ensaios de caracterização de acordo com as normas vigentes. Para determinação da massa específica e massa específica aparente, foi utilizada a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). A percentagem de material pulverulento e o teor de absorção de água foram obtidos conforme as normas NBR NM 46 (ABNT, 2003) e NBR NM 30 (ABNT, 2001), respectivamente. A Tabela 5 mostra a caracterização dos agregados miúdos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 5 - Caracterização dos agregados miúdos

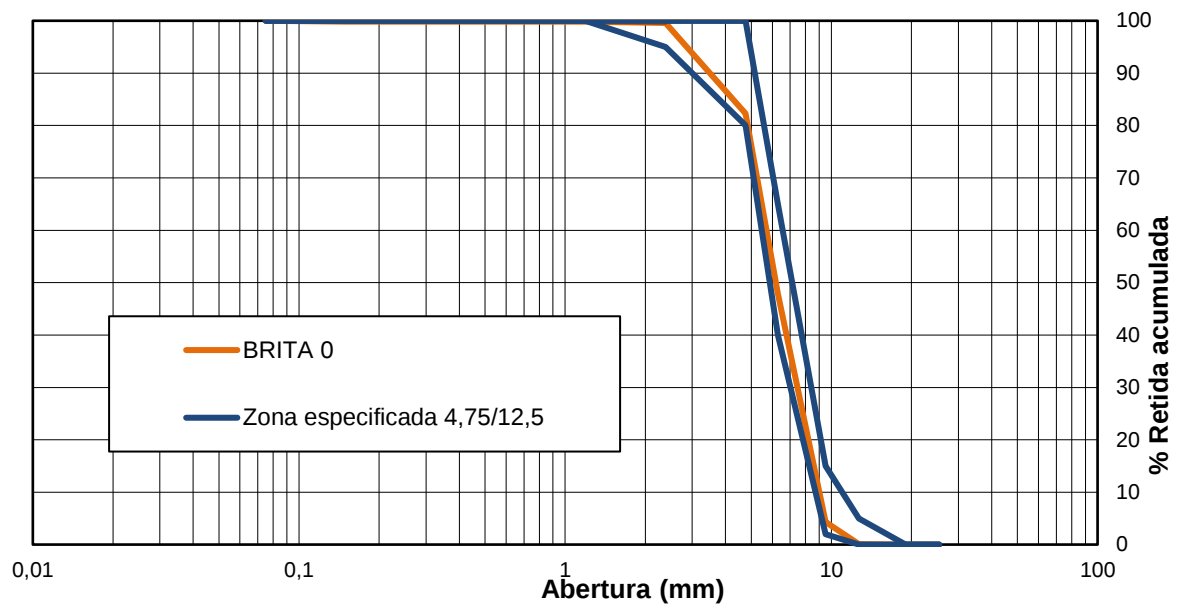
Agregado miúdo	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Material pulverulento (%)	Absorção (%)
Areia média	1,20	1,71	2,62	2,58	0,51	0,48
Areia fina	0,60	1,36	2,63	2,62	0,39	0,45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na produção do concreto autoadensável foi de origem basáltica, classificada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), como 4,75 /12,5, conhecida comercialmente como brita zero ou pedrisco, obtida no município de Itapura-SP. A análise da composição granulométrica foi realizada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a curva granulométrica do agregado graúdo é exibida na Figura 19.

Figura 19 - Caracterização do agregado graúdo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O agregado graúdo foi submetido aos ensaios de caracterização segundo as normas vigentes. A determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água foi realizada de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009). A Tabela 6 mostra a caracterização do agregado graúdo utilizado neste estudo. A percentagem de material pulverulento foi realizada conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003).

Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo

Agregado graúdo	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Material pulverulento (%)	Absorção (%)
Brita 0	9,5	5,9	2,91	2,84	0,65	0,43

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.1.4 Água

Á água utilizada nos experimentos foi proveniente do sistema de abastecimento público de água da cidade de Ilha Solteira.

3.1.5 Aditivo

Nesta pesquisa, foi utilizado o aditivo superplastificante TEC – FLOW 7000. Este refere-se a um aditivo à base de policarboxilato, permitindo uma melhoria na trabalhabilidade da mistura. O Quadro 1 apresenta as características técnicas do aditivo superplastificante fornecidas pelo fabricante do material.

Produto	Descrição do Produto	Aspecto / Cor	Dosagem recomendada (%SPC)	Massa Específica g/cm ³ (NBR 10908)
Tec - Flow 7000	Concreto em geral, fluido ou autoadensável. Proporciona excelente redução da demanda de água, boa manutenção de abatimento e ótimas resistências iniciais e finais.	Líquido alaranjado	0,30 a 1,20%	1,075 - 1,115

Fonte: GCP APPLIED TECHNOLOGIES (2018).

3.1.6 Cal hidratada

A cal utilizada para a fabricação da argamassa mista de assentamento dos blocos foi a Cal Hidratada CH III, objetivando a constituição dos prismas.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Máquina universal de ensaio

Com o objetivo de analisar as características mecânicas do concreto autoadensável, da argamassa mista, dos blocos e dos prismas, foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaios da EMIC - INSTRON, com capacidade de carga de 200 toneladas - força. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado nesta pesquisa.

Figura 20 - Máquina Universal EMIC - INSTRON utilizada para realizar os ensaios mecânicos desta pesquisa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2.2 Sistema de aquisição de dados

Nesta pesquisa, fez-se o uso de um sistema de aquisição de dados, composto por um computador desktop, software *Lynx AqDados 7.02*, módulo de leitura, LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) e extensômetros (Strain-Gages).

O sistema de aquisição de dados foi utilizado para a realização de leituras em função do tempo das deformações provenientes dos LVDTs e dos extensômetros (Strain-Gages). Estas deformações oriundas dos LVDTs e extensômetros estão associadas diretamente com a carga imposta no ensaio, com o objetivo da realização de análise da carga aplicada e deformação existente.

As Figuras 21 e 22 exibem o sistema de aquisição de dados utilizado e o prisma instrumentado com LVDTs e extensômetros, respectivamente.

Figura 21 - Sistema de aquisição de dados utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 22 - Prisma instrumentado com LVDTs e extensômetros (Strain-Gages)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A análise do desempenho estrutural é fundamental para preservar a questão da segurança e a funcionalidade de uma estrutura. Desta maneira, os extensômetros (Strain Gages) são comumente utilizados para monitorar o desempenho estrutural de uma determinada estrutura (ZHOU; WU, 2017).

Os extensômetros elétricos são instrumentos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica. Devido à sua precisão de medida, facilidade de manipulação e capacidade de verificar as deformações, é o instrumento de medida de deformação mais utilizado pelos profissionais da área (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

O extensômetro é instalado na estrutura no sentido onde se pretende medir a deformação. A deformação é convertida em uma quantidade elétrica e acrescida para leitura em um local remoto (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

O LVDT é um dispositivo cilíndrico, composto por três bobinas: uma primária e duas secundárias, colocadas de forma que permite o movimento retilíneo do núcleo deslocável. Este núcleo móvel é constituído por um material ferromagnético (ASSIS, 2007). No momento que o LVDT está em funcionamento, a tensão elétrica é modificada, devido ao deslocamento linear do núcleo deslocável. Quando o dispositivo é submetido à um esforço de compressão, este tem a tendência de provocar um encurtamento do comprimento inicial (L_0), correspondente ao deslocamento (Δ_L), decorrente deste esforço. Por conseguinte, permite-se o conhecimento da deformação ocasionada através da Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Neste estudo a célula de carga usada tinha a capacidade de carga de 200 tf (toneladas – força).

3.2.3 Outros equipamentos

Outros equipamentos como betoneira, parafusadeira, câmara úmida, balanças eletrônicas, compressor de ar, peneiras e estufa também foram utilizados para a realização desta pesquisa.

3.3 MÉTODOS

Neste programa experimental, os processos de produção do CAA, de fabricação dos blocos e dos prismas foi dividido em quatro fases distintas. Na primeira fase é mostrada a definição do traço e o método de dosagem do CAA utilizado na fabricação dos blocos. Na segunda fase são apresentadas as geometrias dos blocos vazados de concreto e o processo de fabricação das fôrmas, de modo a garantir as dimensões desejadas das unidades. Na terceira fase é retratado o processo de homogeneização do concreto e o processo de fabricação dos blocos. Na quarta e última fase é mostrado o processo de fabricação dos prismas, bem como o processo de fabricação da argamassa de assentamento.

3.3.1 Fase 1: Definição do traço do CAA para a produção dos blocos

A determinação do traço do concreto autoadensável utilizado nesta pesquisa baseou-se no método proposto por Tutikian (2004). Este método é elaborado com base no método de dosagem para concreto convencional IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992).

Primeiramente, determinou-se o teor ideal de argamassa seca, conforme o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Para a sua determinação, fez-se o uso das equações 3 e 4.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad (3)$$

$$m = a + p \quad (4)$$

Onde:

α = teor de argamassa seca, em kg/kg;

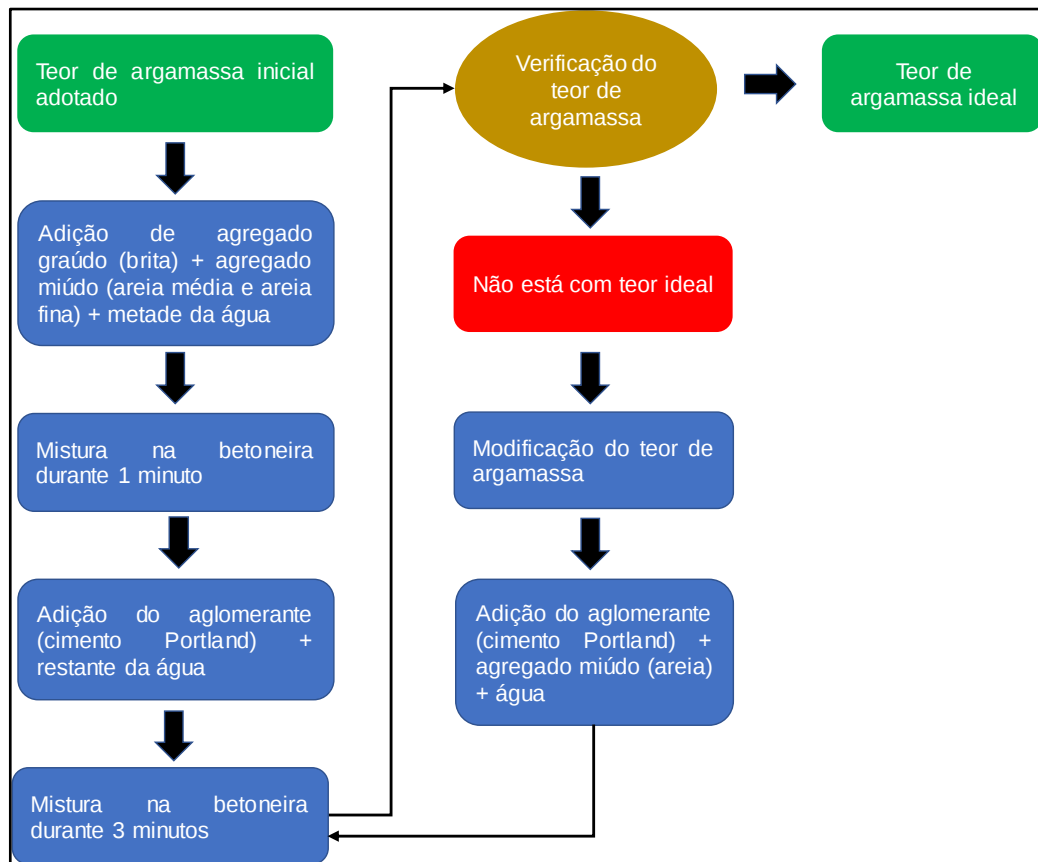
a = relação agregado miúdo seco/ ligante em massa, em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco/ ligante em massa, em kg/kg;

m = relação agregado secos/ ligante em massa, em kg/kg.

Iniciou-se o procedimento em laboratório, separando-se e pesando-se os materiais (cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água). Da mesma maneira, repetiu-se o procedimento para as adições destes materiais, caso houvesse necessidade de se alterar o teor de argamassa, sem precisar descartar os materiais já utilizados. A quantidade de agregado graúdo se manteve constante em todo o processo de cálculo. Adotou-se inicialmente o valor de 57% para o teor de argamassa, aumentando-o em intervalos de 2%, até que a mistura alcançasse o teor ideal de argamassa. A Figura 23 mostra o organograma de modo a facilitar o entendimento do processo utilizado.

Figura 23 - Organograma para encontrar o teor ideal de argamassa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os teores de argamassa estudados foram de 57, 59, 61 e 63%. A mistura na qual se aferiu o melhor teor de argamassa foi de 63%, apresentando um bom comportamento quanto a segregação, exsudação e aspecto visual. A Figura 24 mostra a mistura de concreto com teor de argamassa de 63%.

Figura 24 - Mistura de concreto com $\alpha = 63\%$



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após encontrado o teor ideal de argamassa, procedeu-se para definição do traço a ser utilizado na produção dos blocos. Para a escolha do traço, baseou-se no estudo realizado por Pinto (2018), no qual o autor estudou três diferentes traços de concreto fluido (1:3, 1:5 e 1:7) para a fabricação dos blocos de concreto. Nesta presente pesquisa, o traço adotado foi o traço 1:5.

Posteriormente, para alcançar a trabalhabilidade ótima para a mistura, foi adicionado aditivo superplastificante à base de policarboxilato, com o objetivo de conseguir a trabalhabilidade necessária para a mistura, não levando em consideração ainda a separação do agregado graúdo da argamassa. A quantidade de aditivo superplastificante utilizado na mistura foi de 0,50% em relação à massa do cimento. Na sequência foi feita a correção da segregação do concreto, substituindo-se parcialmente o agregado miúdo por um material fino. Neste estudo o material fino utilizado foi um material não pozolânico, no caso a areia fina, em porcentagem de 10% para garantir um concreto fluido e também coeso.

Para o levantamento do consumo de cimento, foi utilizada a Equação 5 para a realização do cálculo, conforme recomendado por TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008).

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad (5)$$

Onde:

C = consumo de cimento por m³ de concreto adensado em kg/m³;

γ = massa específica do concreto, medida em kg/m³;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa em kg/kg;

a/c = relação água/cimento em massa em kg/kg;

A Tabela 7 apresenta as quantidades utilizadas de materiais, na produção dos blocos vazados de concreto da presente pesquisa, para um metro cúbico de concreto.

Tabela 7 - Mistura para 1m³ de concreto

Cimento (kg)	361,99
Brita (kg)	803,62
Areia fina (kg)	100,63
Areia média (kg)	905,70
Água (kg)	228,05
Relação Água/ cimento	0,63
Teor de argamassa (%)	63
Relação cimento/ agregado	1:5
Relação cimento/ areia fina/areia média/ brita	1:0,28:2,50:2,22
Relação Água/ materiais secos (%)	10,50
Aditivo Superplastificante (% da massa de cimento)	0,50

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.2 Fase 2: Geometrias dos blocos vazados de concreto

A escolha das geometrias dos blocos, confeccionados no presente trabalho, não seguiram de forma rigorosa os formatos geométricos encontrados industrialmente, devido à maior facilidade de confecção das geometrias utilizadas, dando ênfase a uma geometria alternativa para produção de blocos vazados de concreto. Neste estudo, o principal foco não foi analisar a modulação das unidades, sendo o formato geométrico e o processo de fabricação das unidades o foco principal.

Foram confeccionadas seis diferentes geometrias de blocos vazados de concreto, sendo três formatos geométricos distintos, cada tipo de bloco com áreas líquidas diferentes, ou seja, variando-se a espessura do bloco. Os formatos geométricos empregados foram circulares, hexagonais e retangulares. Foi utilizada uma única dimensão do bloco, possuindo as dimensões de 150 x 190 x 290 mm (Largura x Altura x Comprimento). A espessura das paredes transversais e longitudinais ao longo da altura do bloco, não foram alteradas. O cálculo da área líquida, foi realizado conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014), utilizando a Equação 6 para realização do cálculo.

$$A_{líq} = \frac{m_2 - m_3}{h \cdot \gamma} \quad (6)$$

Onde:

A_{liq} = área líquida, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

m_2 = massa do corpo-de-prova saturado, expressa em gramas (g);

m_3 = massa aparente do corpo-de-prova, expressa em gramas (g);

h = a altura média do corpo-de-prova, medida na direção perpendicular à seção de trabalho, expressa em milímetros (mm);

γ = massa específica da água utilizada no ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

A Tabela 8 e a Figura 25 apresentam detalhadamente as características físicas e as geometrias dos blocos confeccionadas nesta pesquisa. De modo a facilitar a identificação e organização dos blocos e prismas desta pesquisa, a nomenclatura GX-Y foi elaborada para a identificação das unidades. A letra G corresponde à abreviatura da palavra geometria; X representa a geometria do formato do furo (circular, hexagonal e retangular) e a letra Y corresponde ao número que identifica a menor (1) e a maior (2) percentagem de área de vazios. A nomenclatura utilizada para os blocos foi:

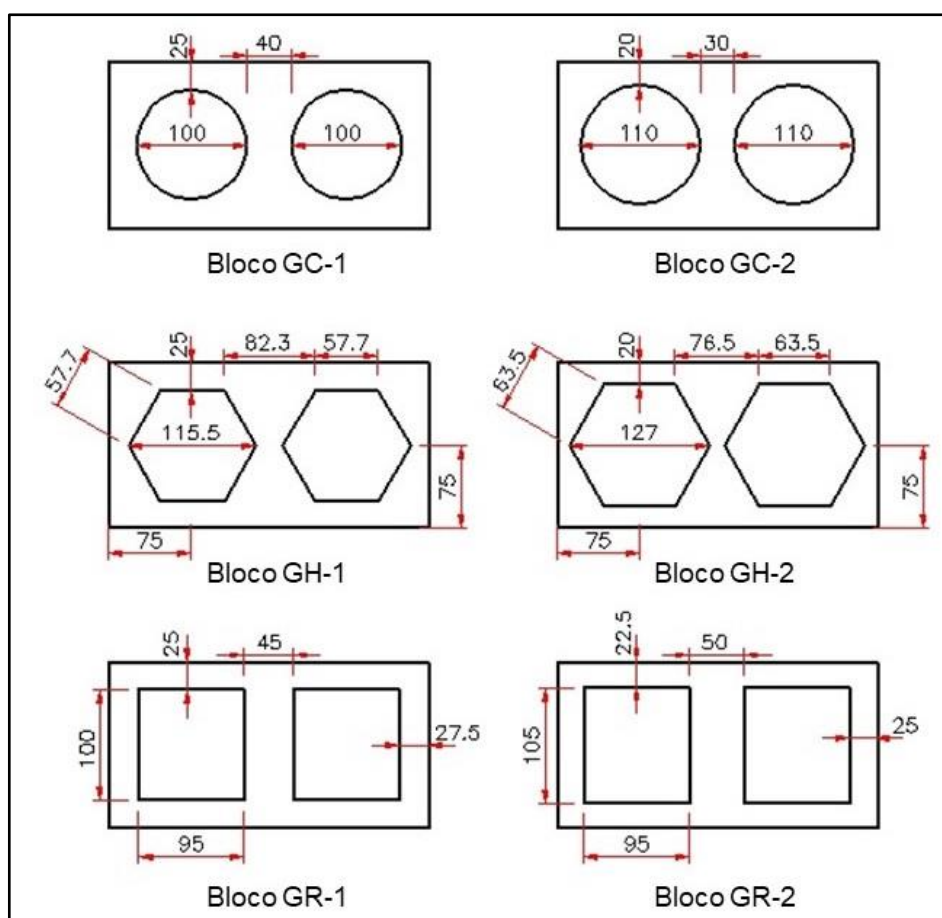
- a) GC-1: geometria do furo circular com 25 mm de espessura de parede longitudinal;
- b) GC-2: geometria do furo circular com 20 mm de espessura de parede longitudinal;
- c) GH-1: geometria do furo hexagonal com 25 mm de espessura de parede longitudinal;
- d) GH-2: geometria do furo hexagonal com 20 mm de espessura de parede longitudinal;
- e) GR-1: geometria do furo retangular com 25 mm de espessura de parede longitudinal;
- f) GR-2: geometria do furo retangular com 22,5 mm de espessura de parede longitudinal.

Tabela 8 - Características físicas dos blocos vazados de concreto

Característica	Bloco vazado de concreto					
	GC-1	GC-2	GH-1	GH-2	GR-1	GR-2
Área Líquida (mm ²)	27792	24493	26100	22500	24500	23550
Área Líquida / Área Bruta	0,64	0,56	0,60	0,52	0,56	0,54
Área de Vazios (%)	36,11	43,69	40,00	48,28	43,68	45,86

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 25 - Geometrias dos blocos de concreto a ser utilizadas na pesquisa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a produção dos blocos foram fabricadas fôrmas utilizando-se chapas de compensado naval, de modo a delimitar as dimensões externas. A Figura 26 mostra as fôrmas utilizadas para a fabricação dos blocos. Para possibilitar o vazio do bloco, foram inseridos dois prismas de EPS (poliestireno expandido) para cada tipo de geometria. A escolha pelo EPS foi baseada na pesquisa de Barbosa, Lourenço e Hanai (2009), onde os autores empregaram prismas de EPS na inserção dos vazios dos blocos de concreto.

Figura 26 - Disposição das fôrmas utilizadas na fabricação dos blocos



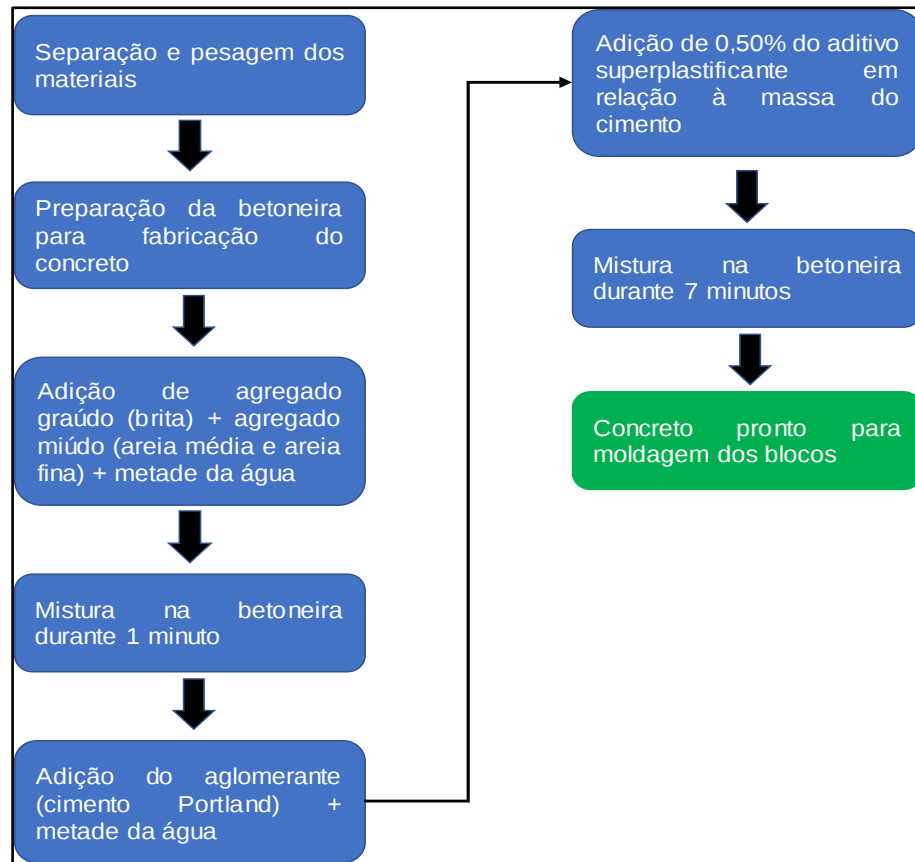
Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.3 Fase 3: Processo de fabricação dos blocos

A fabricação dos blocos difere do processo comercialmente empregado, no qual o concreto é vibro-prensado. Nesta pesquisa, procurou-se aplicar uma produção em laboratório, tendo como ênfase uma produção de alta qualidade, assegurando uma resistência à compressão desejável e um bom acabamento final.

Com o traço do concreto estabelecido, iniciou-se o processo de homogeneização do concreto para fabricação dos blocos, conforme realizado por TUTIKIAN (2004). Todas as etapas do processo de homogeneização do concreto estão detalhadas na Figura 27. Finalizada a homogeneização, o concreto foi transportado até as fôrmas, estas já preparadas com o posicionamento correto dos EPS, dando início a fase de concretagem. O concreto foi projetado na fôrma e aos poucos os blocos obtiveram a forma desejada. O concreto não necessitou de nenhum tipo de vibração, devido à sua consistência ser fluida. Os detalhes do processo de produção dos blocos estão ilustrados na Figura 28.

Figura 27 - Processo de fabricação do concreto para moldagem dos blocos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Processo de fabricação dos blocos - a) Lançamento do concreto, b) Blocos após concretagem antes do acabamento final do topo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Ainda no processo de concretagem, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de 10 x 20 cm, para o ensaio de resistência à compressão axial e medida do módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias de idade. No dia seguinte à concretagem, os blocos foram desmoldados e retirados os EPS, aferindo as dimensões dos mesmos e determinando-se as áreas líquidas efetivas e a qualidade do acabamento final. A

Figura 29 mostra o aspecto final dos blocos vazados de concreto após a desforma e retirada dos EPS.

Figura 29 - Blocos vazados de concreto depois de moldados



Bloco GC-1



Bloco GC-2



Bloco GH-1



Bloco GH-2



Bloco GR-1



Bloco GR-2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.4 Fase 4: Processo de fabricação dos prismas

3.3.4.1 Argamassa de assentamento

Para a fabricação dos prismas foi utilizado apenas um único tipo de argamassa de assentamento, visto que o objetivo da pesquisa não é averiguar a influência da argamassa na resistência à compressão dos prismas. A argamassa utilizada nesta presente pesquisa foi do tipo mista, composta de cimento Portland, cal hidratada, areia média natural e água. A escolha do traço da argamassa mista, a ser empregado na

confeção dos prismas, foi embasado em traços utilizados por Mohamad *et al.* (2017) e Barbosa, Lourenço e Hanai (2009).

Mohamad (1998) relata que deve haver uma compatibilidade entre a resistência da argamassa e a resistência do bloco. O autor preconiza que a resistência da argamassa deve variar entre 0,7 a 1 vez a resistência do bloco na área bruta. Já Parsekian, Hamid e Drysdale (2014) afirmam que, quando a resistência à compressão da argamassa está entre 70% e 150% da resistência à compressão do bloco na área bruta, não se espera grande influência da argamassa na resistência do prisma.

A NBR 15961- 1 (ABNT, 2011) estabelece que a resistência à compressão da argamassa deve estar limitada a 0,7 da resistência à compressão do bloco referida à área líquida.

O traço empregado nesta pesquisa na produção da argamassa mista utilizada no assentamento dos blocos está apresentado na Tabela 9.

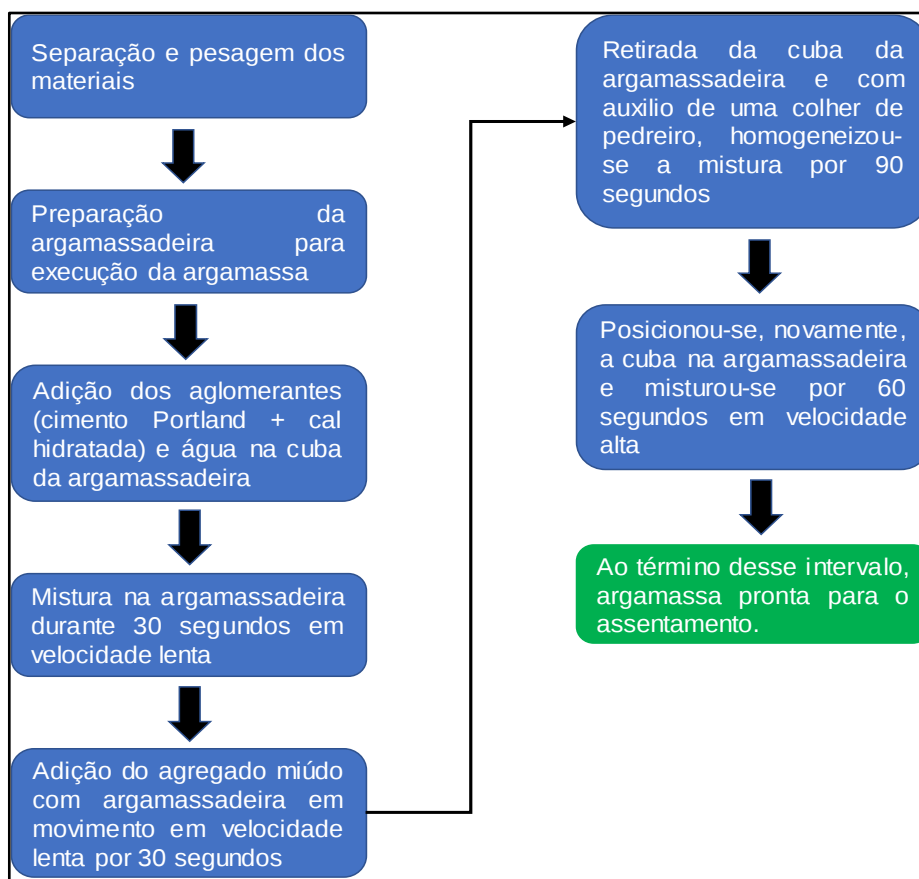
Tabela 9 - Características da argamassa de assentamento

Argamassa	Composição da mistura em massa				Ligante /agregado
	Cimento	Cal	Areia	Relação água / cimento	
Argamassa mista	1,00	0,50	4,50	1,02	1:3

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O processo de mistura da argamassa para confecção dos prismas foi realizado em uma argamassadeira. A Figura 30 ilustra os detalhes do processo de mistura da argamassa de assentamento utilizada na pesquisa.

Figura 30 - Processo de mistura da argamassa mista utilizada para o assentamento dos blocos empregados na fabricação dos prismas



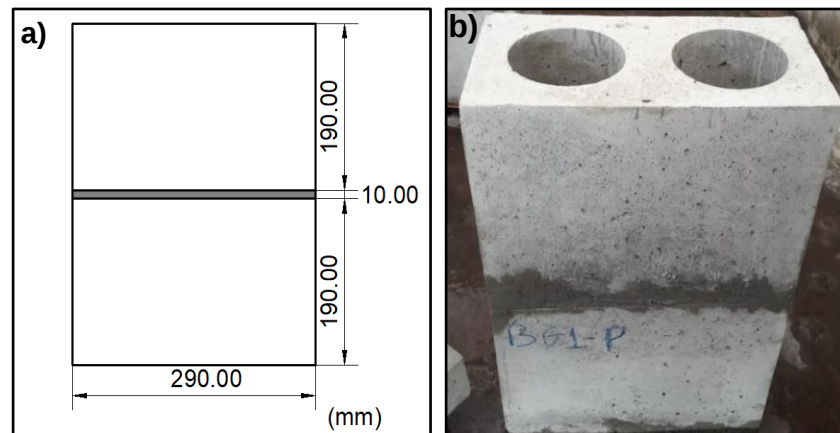
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após o término da mistura foram moldados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, para a realização do ensaio de flexão e posteriormente o ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias de idade. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas, iniciando-se o processo de cura da argamassa, armazenando-as em câmara úmida até a data do ensaio de resistência à compressão.

3.3.4.2 Procedimentos para a fabricação dos prismas

Com a finalidade de delinear o comportamento real da estrutura de alvenaria, fez-se necessário a confecção de prismas, uma vez que apenas os ensaios de blocos não representam o comportamento real da alvenaria. Foram fabricados prismas constituídos por dois blocos, interligados por uma junta de argamassa mista, sendo de 10 mm a espessura da argamassa. A Figura 31 ilustra o assentamento do prisma com argamassa mista.

Figura 31 - Assentamento do prisma com argamassa mista - a) Vista esquemática, b) Prisma fabricado



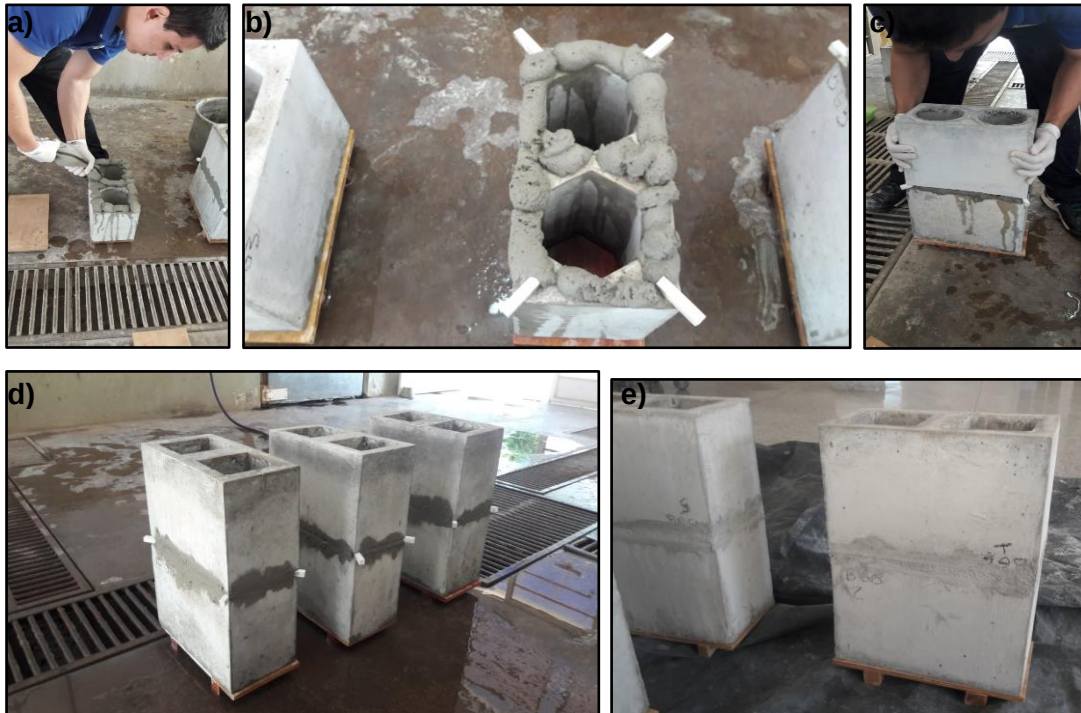
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A fabricação dos prismas foi realizada da seguinte forma:

- a) primeiramente os blocos foram dispostos sobre um calço de madeira conforme sua geometria específica, com objetivo de facilitar o transporte até a Máquina Universal de Ensaios;
- b) posteriormente, com a argamassa preparada para o prisma em estudo, realizou-se o assentamento total, ou seja, foi aplicada a argamassa em toda a parede (transversal, longitudinal e central) do bloco;
- c) em seguida foram posicionados, em cada vértice, pequenos calços de PVC, com a finalidade de garantir a espessura da junta de assentamento em 10 mm. Estes possuíam área de seção transversal 10 x 10 mm e comprimento aproximado de 40 mm, utilizados também na pesquisa de Andolfato, Camacho e Ramalho (2007);
- d) logo após, o bloco superior foi assentado, até o limite permitido pelo calço;
- e) na sequência esperou-se alguns minutos, o bastante para a argamassa atingir um certo nível de rigidez para suportar o peso do bloco superior e, retirou-se os calços de PVC, preenchendo com argamassa o espaço vazio deixado no prisma;
- f) em todo o processo, foi utilizado martelo de borracha e o auxílio de um nível bolha para garantir o nivelamento.

A Figura 32 exibe detalhes do processo de produção dos prismas.

Figura 32 - Processo de fabricação dos prismas - a) Aplicação da argamassa mista, b) Vista superior da argamassa aplicada e distribuição dos calços de PVC, c) Assentamento do bloco superior, d) Prisma com os espaçadores, e) Prisma fabricado



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para identificação dos prismas foi usada a mesma nomenclatura dos blocos, acrescentando-se a letra P no início. Ou seja, a nomenclatura dos prismas foi a seguinte:

- a) PGC-1: prisma com bloco de geometria do furo circular com 25 mm de espessura de parede longitudinal;
- b) PGC-2: prisma com bloco de geometria do furo circular com 20 mm de espessura de parede longitudinal;
- c) PGH-1: prisma com bloco de geometria do furo hexagonal com 25 mm de espessura de parede longitudinal;
- d) PGH-2: prisma com bloco de geometria do furo hexagonal com 20 mm de espessura de parede longitudinal;
- e) PGR-1: prisma com bloco de geometria do furo retangular com 25 mm de espessura de parede longitudinal;

- f) PGR-2: prisma com bloco de geometria do furo retangular com 22,5 mm de espessura de parede longitudinal.

3.3.5 Ensaios

3.3.5.1 Procedimentos de ensaios para o CAA

Para averiguar a trabalhabilidade do CAA, foram realizados ensaios no estado fresco. A averiguação do concreto no estado fresco é de suma importância para o CAA alcançar suas propriedades fundamentais como a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe de forma intacta, e a resistência à segregação. Na eventualidade do CAA não apresentar estas propriedades, o desempenho do mesmo pode ser comprometido e sua aplicação na produção dos blocos também.

Os ensaios realizados no estado fresco foram os ensaios de espalhamento e do tempo de escoamento, de acordo com a NBR 15823 - 2 (ABNT, 2017). Este ensaio consiste em averiguar se o concreto é capaz de se espalhar, devido ao seu peso próprio, até alcançar um diâmetro limite em um determinado período de tempo. O ensaio tem como principal objetivo verificar a capacidade de preenchimento e a fluidez do CAA. Esse ensaio possibilita visualizar se há presença ou não de segregação no concreto.

Além de ensaios no estado fresco, para averiguar a autoadensabilidade do CAA, foram realizados ensaios no estado endurecido aos 7 e 28 dias de idade. Para a determinação das propriedades mecânicas, foi executado o ensaio de resistência à compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), e medido o módulo de elasticidade, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017), aos 7 e 28 dias de idade.

Foram moldados um total de seis corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para a realização do ensaio de resistência à compressão axial e seis corpos de prova cilíndricos para a determinação do módulo de elasticidade estático. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados no mesmo dia de concretagem dos blocos, utilizando-se o concreto do mesmo lote.

3.3.5.2 Procedimentos de ensaios para os blocos vazados de concreto

Os blocos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água. O ensaio para determinação da resistência à compressão axial foi realizado conforme a NBR 12118 (ABNT, 2014), sendo seis unidades para cada tipo de bloco. O ensaio transcorreu aos 7 e 28 dias de idade, após a moldagem dos blocos. No dia seguinte à concretagem dos blocos, os mesmos foram desformados e submetidos ao processo de cura em câmara úmida por um período de 7 dias. Após o período de cura, os blocos foram dispostos em um ambiente coberto até a data do ensaio. Para determinação do cálculo da resistência utilizou-se a carga máxima de ruptura, observada durante o ensaio, dividida pela respectiva área do bloco. O cálculo foi realizado utilizando a área bruta e a área líquida das unidades.

Em relação ao capeamento empregado na regularização da superfície das unidades, foi utilizado um capeamento seco com madeira compensada (conhecido popularmente como madeirite), em ambas as superfícies superior e inferior das unidades, conforme Fortes (2012), mostrado na Figura 33. A utilização deste tipo de capeamento é fundamentada pela dificuldade da realização do capeamento com enxofre, além do ganho do tempo no preparo dos corpos de provas para o respectivo ensaio.

Figura 33 - Regularização das superfícies do bloco



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O ensaio para a determinação da absorção de água nos blocos foi realizado de acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2014). Para sua execução, os blocos foram levados

à estufa por um período de 24 horas, a uma temperatura de 105 °C. Em seguida, os blocos foram pesados em uma balança de precisão, anotando-se o valor da massa seca. Após o resfriamento dos blocos, os mesmos foram imersos em água durante 24 horas. Posteriormente, enxugou-se os blocos com um pano úmido e pesou-se os mesmos, anotando-se o valor da massa saturada. A Figura 34 mostra os detalhes do ensaio de absorção de água.

Figura 34 - Ensaio de absorção de água nos blocos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O ensaio foi realizado com três unidades para cada tipo de bloco. O cálculo foi executado a partir da determinação da massa saturada com superfície seca e a massa seca em estufa. Com os valores obtidos das massas, fez-se o cálculo da absorção conforme a Equação 7:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

A = absorção de água total, expressa em porcentagem (%);

m_1 = massa do corpo-de-prova seco em estufa, expressa em gramas (g);

m_2 = massa do corpo-de-prova saturado, expressa em gramas (g).

3.3.5.3 Procedimentos de ensaios da argamassa de assentamento

Após o término da mistura, foi realizado o ensaio de consistência da argamassa conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Para a realização do ensaio, o molde foi posicionado no centro da mesa e, com a ajuda de uma espátula a argamassa foi colocada dentro da fôrma em três camadas da mesma altura. Com o soquete foram aplicados 15,10 e 5 golpes, respectivamente. Terminada a operação, foi retirado o molde metálico e aplicado 30 golpes em sequência. Após o término dos golpes da mesa, foi medido o diâmetro de espalhamento da argamassa. A Figura 35 ilustra o ensaio de consistência da argamassa.

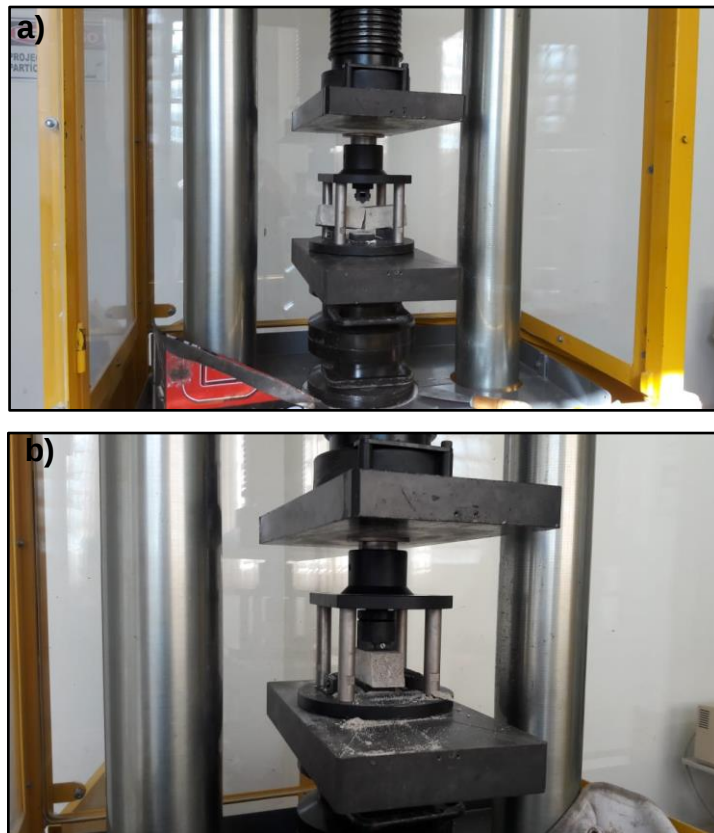
Figura 35 - Ensaio de consistência da argamassa



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A argamassa moldada nos corpos prismáticos 4 x 4 x 16 cm foi ensaiada à resistência à compressão segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), aos 28 dias. Para execução do ensaio foi usada a máquina universal EMIC - INSTRON, com capacidade de carga de 200 toneladas. Antes da realização do ensaio de resistência à compressão, os corpos-de-prova foram repartidos por flexão para obtenção de duas amostras equivalentes. A Figura 36 mostra a realização do ensaio à compressão da argamassa.

Figura 36 - Ensaio de argamassa conforme a NBR 13279 - a) Flexão, b) Compressão



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3.5.4 Procedimentos de ensaios de prisma

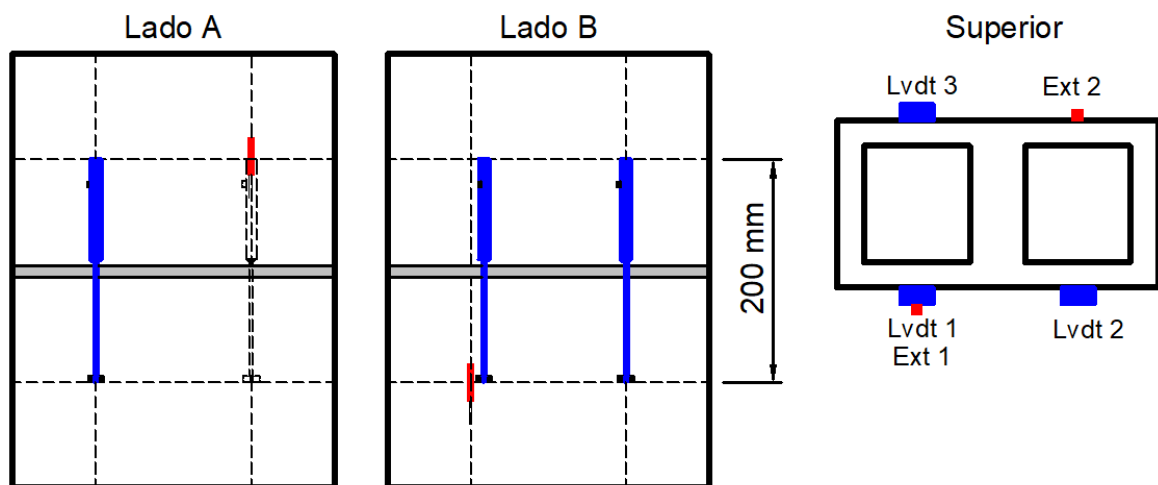
A NBR 15961-1 (ABNT, 2011) estabelece que a resistência à compressão de paredes de alvenaria pode ser estimada através do ensaio de resistência à compressão de prismas. Neste estudo, foram ensaiados prismas de dois blocos. Os blocos já apresentavam a idade de 28 dias na data de fabricação dos prismas. Todo o processo de produção dos prismas está descrito no item 3.3.5 deste capítulo. Ao final do processo de fabricação, os prismas foram submetidos ao processo de cura. O processo de cura dos prismas ocorreu de forma diferente ao processo de cura utilizado para os blocos, argamassas e corpos-de-prova de CAA. O processo de cura foi feito da seguinte maneira: os prismas foram confeccionados em um determinado espaço, onde os mesmos foram molhados duas vezes ao dia, durante um período de sete dias, permanecendo no mesmo local até a data dos ensaios.

Com o objetivo de instrumentar os prismas de modo a se obter o máximo possível de informações em cada ensaio, os prismas foram instrumentados com extensômetros (Strain-Gages) e LVDTs, para análise das deformações. Foram realizadas as leituras das deformações específicas no elemento do bloco e do conjunto bloco-argamassa.

Para garantir o posicionamento correto dos LVDTs e dos extensômetros, foram realizados os seguintes procedimentos:

- a) inicialmente, fez-se necessário a realização das marcações para o posicionamento dos extensômetros e LVDTs. Estas marcações foram executadas da seguinte maneira: as horizontais foram feitas na metade da altura do bloco, as verticais foram efetuadas na metade da área vazada do bloco. Como a alvenaria não é homogênea, as deformações podem variar ao longo da altura e comprimento do elemento. Deste modo, os LVDTs foram posicionados no prisma com uma base de medida de 200 mm, ou seja, do centro do bloco superior ao centro do bloco inferior. Foram posicionados no total três LVDTs em cada prisma. Os extensômetros foram posicionados um de cada lado do elemento, sempre em posição diagonal um com o outro, conforme sua marcação. As Figuras 37 e 38 mostram detalhes a respeito da instrumentação.

Figura 37 - Marcações e posicionamentos dos LVDTs e extensômetros (Strain-Gages)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 38 - Marcações para o posicionamento dos extensômetros e LVDTs

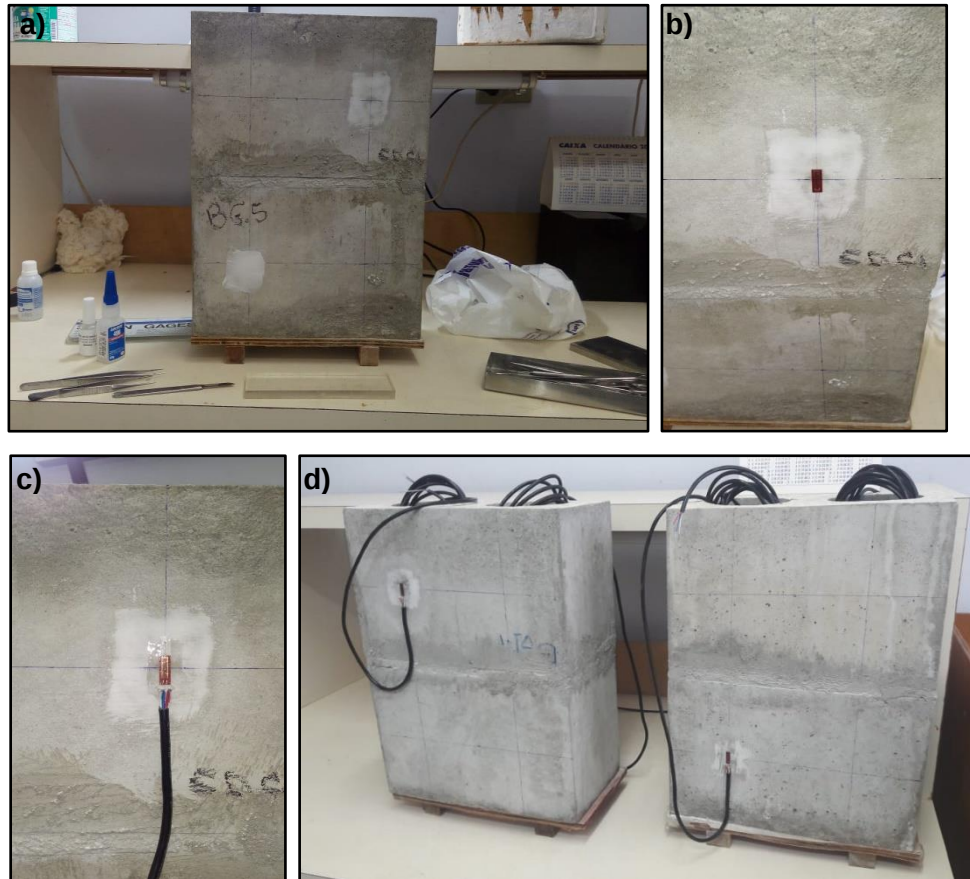


Fonte: Elaboração do próprio autor.

- b) para alcançar bons resultados na fixação dos extensômetros, é fundamental a regularização da superfície onde os mesmos serão colados. Para tal fim, a regularização foi feita manualmente através do uso de uma lixa;
- c) posteriormente foi aplicada uma massa acrílica, com a finalidade de preencher os poros da superfície, aspirando à não interferência nas leituras dos extensômetros durante o ensaio, e posteriormente utilizou-se novamente a lixa para o lixamento da massa acrílica;
- d) procedeu-se à fixação e à instalação dos cabos com saída PS2, de modo a serem conectados ao sistema de aquisição de dados. Foi utilizado um adesivo instantâneo para colagem dos extensômetros
- e) a posteriori, os prismas foram transportados e armazenados, prontos para a realização dos ensaios.

A Figura 39 mostra os detalhes da colagem dos extensômetros.

Figura 39 – Colagem dos extensômetros - a) Limpeza e regularização da superfície, b) Extensômetro posicionado, c) Extensômetro posicionado com o cabo de saída PS2, d) Armazenamento dos prismas com os extensômetros



Fonte: Elaboração do próprio autor.

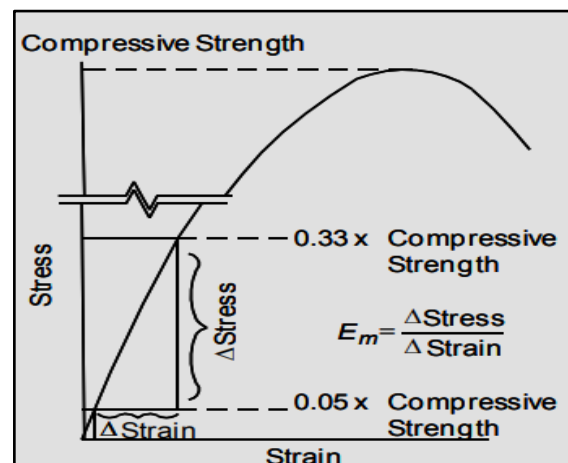
Depois de efetuada a etapa de preparação e instrumentação, os prismas foram levados até a prensa e conectados ao sistema de aquisição de dados para a realização do ensaio, de acordo com a NBR 15961-2 (ABNT, 2011). As medidas obtidas no ensaio do prisma são: Resistência à compressão axial; deformações na face dos blocos, obtidas pelos extensômetros, e deslocamentos relativos ao comprimento (Δ_L), captados pelos LVDTs, quando aplicada uma determinada tensão de compressão.

Foram fabricados um total de 36 prismas, variando-se as geometrias das unidades. Para cada tipo de bloco foram confeccionados seis prismas. Em todas as amostras foram colocados extensômetros, totalizando 72 extensômetros utilizados. No caso dos LVDTs, foram instrumentadas três amostras para cada geometria.

O conhecimento do comportamento da tensão *versus* deformação da alvenaria quanto aos esforços de compressão é fundamental, uma vez que as características

da curva tensão *versus* deformação influenciam nos modos de deformação da alvenaria. Com base no diagrama tensão *versus* deformação, o módulo de elasticidade pode ser calculado, a partir da inclinação da reta entre 5% e 33% da resistência à compressão máxima de ruptura (Figura 40), conforme as recomendações da TMS 402-13/ ACI 530-13/ ASCE 5-13/ (TMS, 2013).

Figura 40 - Cálculo do módulo de elasticidade



Fonte: ACI 530-13/ ASCE 5-13/ TMS 402-13 (TMS, 2013).

3.3.6 Análise de elementos finitos da transferência de calor dos blocos vazados de concreto

A transferência de calor pode ser transmitida de três maneiras: por condução, convecção ou radiação térmica (DEL COZ DÍAZ *et al.*, 2006; INCROPERA; DEWITT, 1996).

O processo de transferência de calor por condução acontece na parte sólida dos blocos, enquanto que a transferência de calor por convecção e radiação acontece entre o ar ambiente e as superfícies externas e internas da unidade, assim como nas partes vazadas de ar dos blocos (AL-TAMIMI *et al.*, 2017).

Uma análise de elementos finitos (*finite element analysis*, FEA) foi realizada para determinar a influência da geometria dos blocos vazados de concreto na resistência térmica da parede. A análise foi realizada para os seis diferentes blocos vazados e para um bloco maciço de concreto, este utilizado como referência. Os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação térmica

foram considerados para a realização das análises. A convecção e a radiação na parte vazada dos furos dos blocos foram incluídas na modelagem.

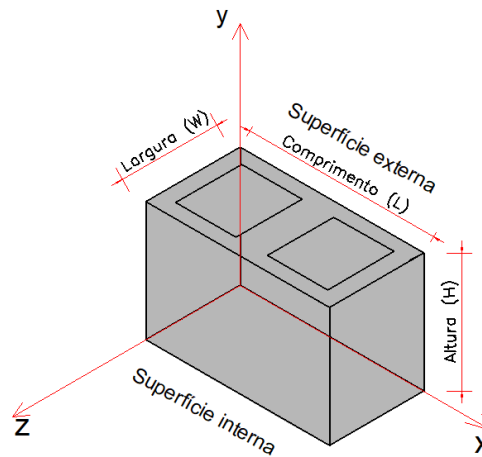
3.3.6.1 Modelo matemático

A distribuição da temperatura no bloco para um regime permanente, a condução de calor tridimensional no sólido com uma condutividade térmica constante é dada pela seguinte equação diferencial, conforme Bejan (1996):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

A Figura 41 mostra o sistema de coordenadas cartesianas tridimensional de um sólido. As condições de contorno utilizadas em todas as superfícies do bloco foram identificadas. Na superfície exposta ao sol durante o período do dia, a seguinte condição de contorno foi utilizada:

Figura 41 - Sistema de coordenadas cartesianas tridimensional



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em $z = 0$, $-k \frac{\partial T}{\partial z} = q''_{solar} + q''_{conv.} + q''_{rad.}$ (9)

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q''_{solar} + h_{co} (T_{ao} - T(x, y, z = 0)) + \epsilon \sigma (T_{so}^4 - T^4(x, y, z = 0)) \quad (10)$$

Para a superfície interna do bloco vazado (superfície não exposta ao sol), foram realizadas as seguintes condições:

$$\text{Em } z = W, -k \frac{\partial T}{\partial z} = q''_{conv.} + q''_{rad.} \quad (11)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h_{ci} [T(x, y, z = W) - T_{ai}] + \varepsilon \sigma [T^4(x, y, z = W) - T_{si}^4] \quad (12)$$

Para as superfícies superior, inferior e lateral do bloco, assumiu que não ocorreu nenhuma perda de calor. Logo, as seguintes condições de contorno devem ser obedecidas:

Em $x = 0, x = L$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ em } x = 0, L \quad (13)$$

Em $y = 0, y = H$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \text{ em } y = 0, H \quad (14)$$

Nas superfícies internas dos furos do bloco, a seguinte condição de contorno é obedecida:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{eq} [T_n - T_{va}], \text{ n = coordenada em qualquer superfície normal ao furo} \quad (15)$$

Onde:

$q''_{conv.}$ = Fluxo de calor por convecção;

$q''_{rad.}$ = Fluxo de calor por radiação;

$q''_{solar.}$ = Fluxo de calor devido à radiação solar;

$T(x, y, z)$ = Temperatura do bloco em todo o domínio;

T_{ai} = Temperatura interna do ar= 25 °C;

T_{ao} = Temperatura externa do ar= 46,6 °C;

T_{si} = Temperatura interna ambiente= 25 °C;

T_{so} = Temperatura externa ambiente= 46,6 °C;

T_n = Temperatura nas coordenadas normal ao vazio do bloco;

T_{va} = Temperatura interna no vazio do bloco;

W = Largura do bloco;

L = Comprimento do bloco;

H = Altura do bloco;

ε = Coeficiente de emissividade;

σ = Constante de Stefan-Boltzmann;

h_{co} = Coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície externa;

h_{ci} = Coeficiente de transferência de calor por convecção para a superfície interna;

h_{eq} = Coeficiente de transferência de calor equivalente para os furos dos blocos.

3.3.6.2 Propriedades térmicas dos blocos vazados de concreto e o modelo de elementos finitos

As propriedades térmicas dos materiais utilizados para a elaboração do modelo estão mostradas na Tabela 10. As propriedades térmicas utilizadas para representar as propriedades do bloco foram as mesmas utilizadas no trabalho de Al-Tamimi *et al.* (2017) e baseadas no estudo de Asadi, Shafigh, Hassan e Mahyuddin (2018).

Tabela 10 - Propriedades térmicas do material

Propriedade térmica	Valores
Condutividade térmica (K)	0,72 (W/m·K)
Coeficiente de transferência de calor (h)	8,9 (W/m ² ·K)
Coeficiente de emissividade (ε)	0,93

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A condução térmica por meio dos blocos depende principalmente do coeficiente de condutividade térmica, conforme exibido na Tabela 10. O número total de nós dentro do modelo foi variado, variando de 65805 nós (bloco maciço) a 94620 nós (Bloco GH-2). Para a convecção, as temperaturas dos ambientes internos e externos utilizados foram de 25 °C e 46,6 °C, sendo a temperatura do ambiente externo, temperatura máxima nos dias de verão na cidade de Ilha Solteira – SP, obtidos do Canal Clima da UNESP de Ilha Solteira. A convecção foi aplicada na superfície externa e interna do bloco. O coeficiente de transferência de calor utilizado foi de 8,9 W/m²·K para as faces internas e externas do bloco. Na área vazada, foram aplicadas

convecção e radiação utilizando-se um coeficiente equivalente de $6,34 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (ALTAMIMI et al., 2017).

Quanto à transmissão por radiação aplicadas nas faces internas e externas dos blocos, foi mediante a interação da radiação de superfície, no qual depende do coeficiente de emissividade do bloco (Tabela 10), da temperatura ambiente e da constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$). Um fluxo de calor solar de $270,83 \text{ W/m}^2$ foi aplicado nas superfícies externas, obtidos do Canal Clima da UNESP de Ilha Solteira.

Em relação ao tamanho da malha utilizada na realização do modelo, foi utilizada uma malha com elementos tetraédricos com tamanhos globais variando de 8,1 mm (bloco GH-2) a 10,1 mm (bloco maciço).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão relatados os resultados obtidos por meio de todos os ensaios correspondentes ao programa experimental. O objetivo fundamental é analisar a influência da geometria e da espessura da parede em blocos vazados de concreto, por meio de ensaios de resistência a compressão axial de blocos e de prismas, confeccionados com o concreto autoadensável. As Tabelas indicadas neste capítulo apresentam os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios e os resultados individuais de cada ensaio estão apresentados no Apêndice A.

Também foram realizados testes estatísticos para uma melhor análise e compreensão dos resultados. Estas análises estão explanadas e apresentadas no Apêndice B. O Apêndice C mostra as curvas - deformação dos prismas, obtidas com o auxílio de LVDT e extensômetros.

4.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

No estado fresco, os ensaios de espalhamento e tempo de escoamento obtiveram resultados de 620 milímetros e 3,0 segundos, respectivamente. Estes resultados mostraram que o concreto atingiu os requisitos de fluidez necessários para ser considerado um CAA, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2008). A Figura 42 ilustra a superfície do concreto observada no ensaio de espalhamento.

Figura 42 - Ensaio de espalhamento para o concreto autoadensável



Fonte: Elaboração do próprio autor.

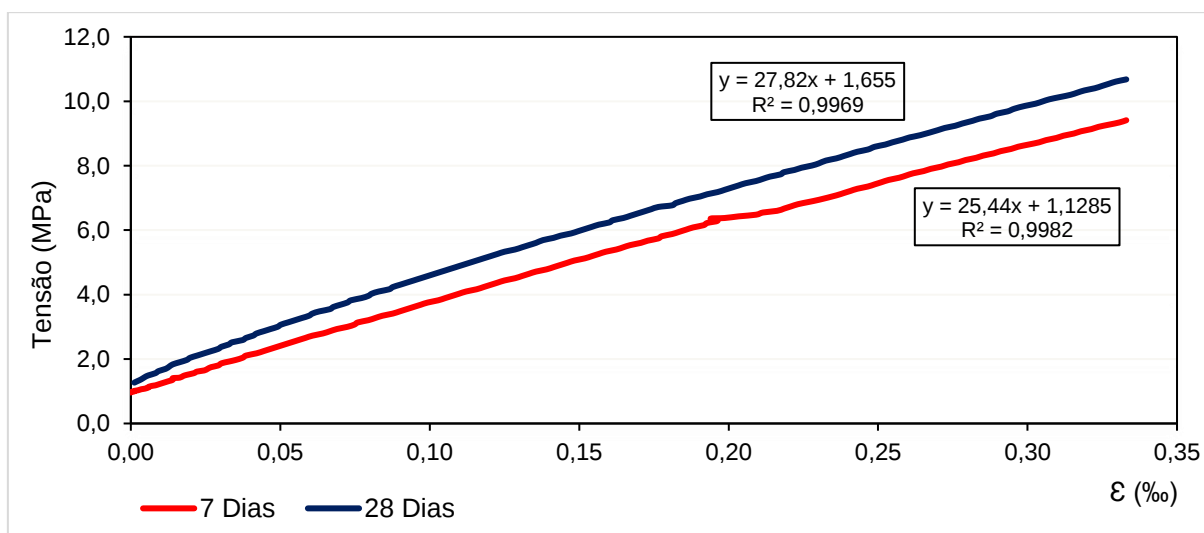
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 11, e a curva tensão – deformação, na Figura 43. Nos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, as amostras apresentaram um aumento de 20,90% em relação às amostras com 7 dias. O módulo de elasticidade estático, a medida de deformação do CAA ocorreu aproximadamente até 70% da carga de ruptura, visando a integridade do instrumento medidor de deslocamento. O módulo foi medido a partir do intervalo entre 5% e 50% da resistência à compressão máxima de ruptura. As amostras aos 28 dias obtiveram um acréscimo de 9,35% em relação às amostras com 7 dias. É importante salientar que os valores de desvios e de coeficientes de variação, mostraram padrões aceitáveis nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Tabela 11 - Propriedades do estado endurecido do concreto autoadensável

Dias	Resistência à Compressão			Módulo de Elasticidade		
	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)	Média (GPa)	Sd (GPa)	C.V (%)
7	19,28	0,44	2,30	25,44	0,63	2,49
28	23,31	0,20	0,86	27,82	0,86	3,09

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 43 - Gráfico Tensão - Deformação do CAA



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 BLOCO VAZADO DE CONCRETO

4.2.1 Resistência à compressão axial

No ensaio de resistência à compressão axial dos blocos vazados de concreto, os valores foram calculados para a área bruta e líquida dos blocos. Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias estão relatados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 - Resistência à compressão média dos blocos vazados de concreto aos 7 dias

Tipo de Bloco	Média (f_{bm}) (MPa)		Sd (MPa)	C.V (%)
	Área Bruta	Área Líquida		
GC-1	11,16	17,47	0.89	5,09
GC-2	9,21	16,36	1.53	9,35
GH-1	10,35	17,24	0.37	2,14
GH-2	8,16	15,78	1.10	6,94
GR-1	9,33	16,56	1.01	6,11
GR-2	8,92	16,47	0.86	5,21

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13 - Resistência à compressão média dos blocos vazados de concreto aos 28 dias

Tipo de Bloco	Média (f_{bm}) (MPa)		Sd (MPa)	C.V (%)
	Área Bruta	Área Líquida		
GC-1	14,94	23,38	0.40	1,70
GC-2	11,39	20,23	1.81	8,95
GH-1	12,73	21,21	0.78	3,66
GH-2	10,20	19,73	1.14	5,76
GR-1	11,64	20,66	0.66	3,20
GR-2	10,82	19,99	1.78	8,90

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Constata-se que os resultados de resistência à compressão média, para os seis diferentes tipos de blocos estudados, apresentaram valores de coeficientes de variação inferiores a 10%.

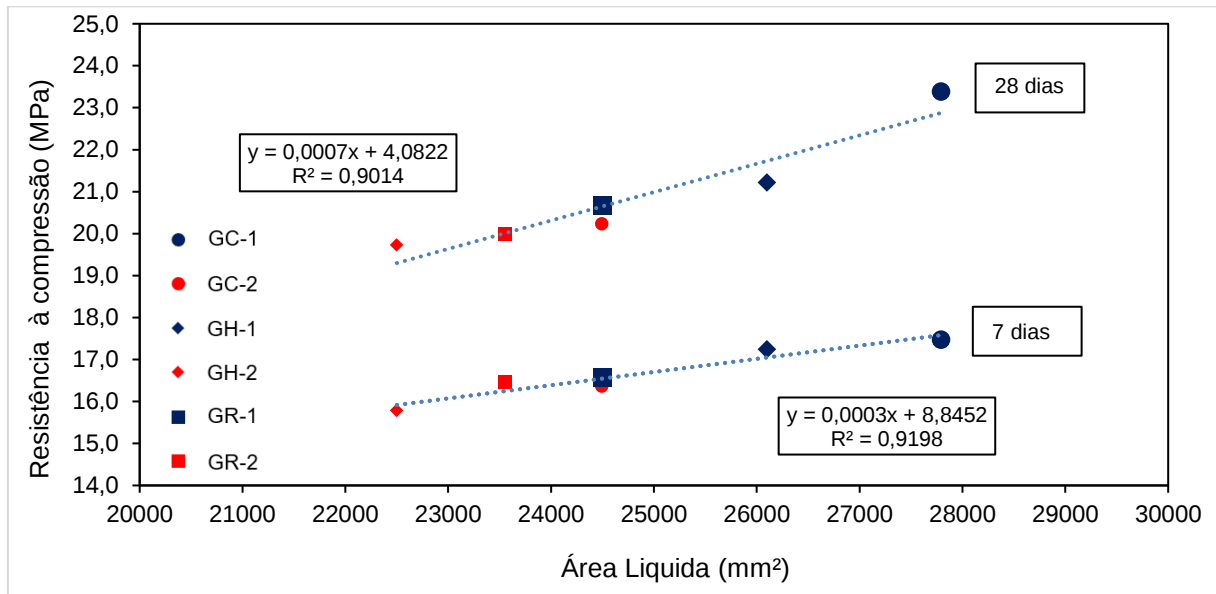
Com base nos resultados obtidos de resistência à compressão axial referida à área líquida aos 28 dias, os blocos GC-1, GH-1, GR-1, que possuíam maior espessura de parede longitudinal, apresentaram maior resistência à compressão axial entre os formatos geométricos, como mostrado na Figura 44, no qual ilustra a resistência à compressão média em função da área líquida dos blocos, sendo a geometria circular GC-1 obtendo o melhor aproveitamento de resistência entre as geometrias analisadas, ficando acima da linha de tendência. O bloco GH-2, o qual possui a menor líquida entre os tipos de blocos obteve o melhor aproveitamento de resistência em função da área líquida, ficando acima da linha de tendência (Figura 44). Entretanto, este resultado, aparentemente, está incomum; sendo que pode ter ocorrido interferências no momento da fabricação do componente ou do ensaio.

A Figura 45 mostra a resistência à compressão em função da relação área líquida / área bruta dos blocos. Conforme o aumento da relação área líquida / área bruta, maior a resistência à compressão axial das unidades, no qual os blocos GC-1 e GH-2, com relação área líquida / área bruta de 0,64 e 0,52, apresentaram a maior e menor resistência entre as geometrias, respectivamente. Estes apresentaram uma diferença de resistência de 18,5%, ao considerar a área líquida. Também é observado um aumento de tendência linear da resistência à compressão em função área líquida / área bruta das unidades, conforme justificado pelos coeficientes de determinação (R^2) próximos ao valor unitário.

Os blocos com formatos geométricos circulares GC-1 e GC-2 apresentaram um aumento de resistência à compressão, com aumento da idade de 7 para 28 dias, de 33,87% e 23,66%, respectivamente. Os blocos com formatos geométricos hexagonais GH-1 e GH-2, tiveram um aumento de resistência, com a idade, de 23% e 25% e os blocos com formatos geométricos retangulares GR-1 e GR-2 apresentaram um aumento de 24,75% e 21,30%, respectivamente.

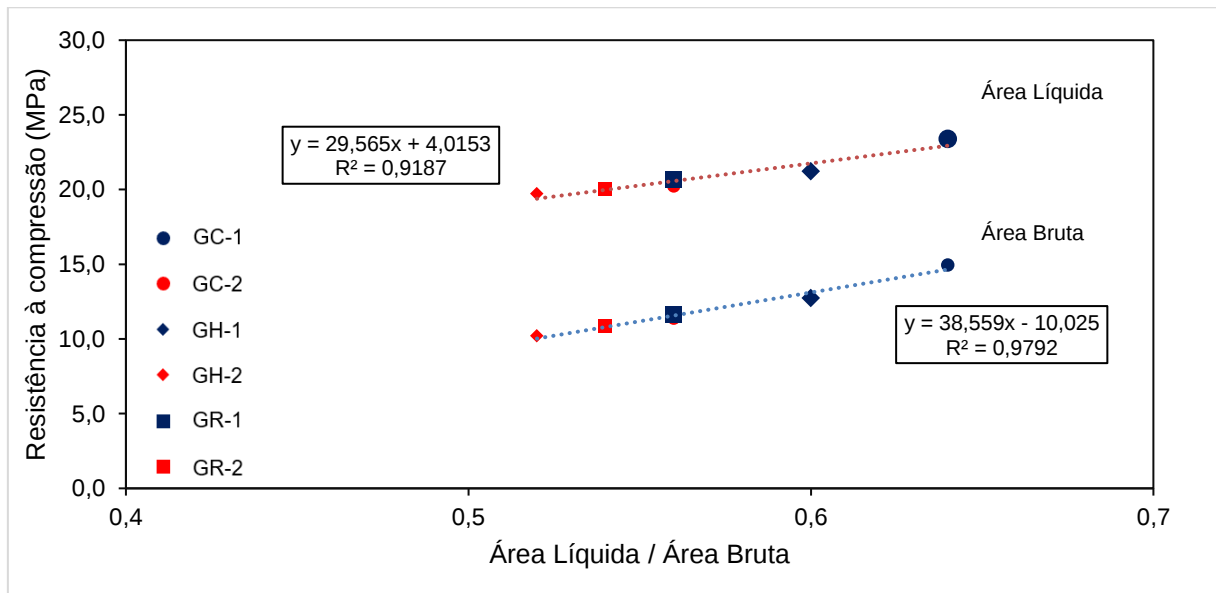
Todas as geometrias utilizadas neste trabalho se enquadraram na classe de blocos com função estrutural de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016).

Figura 44 - Resistência à compressão calculada com a área líquida, em função da área líquida dos blocos vazados de concreto aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 45 - Resistência à compressão dos blocos em função da relação área líquida / área bruta para 28 dias



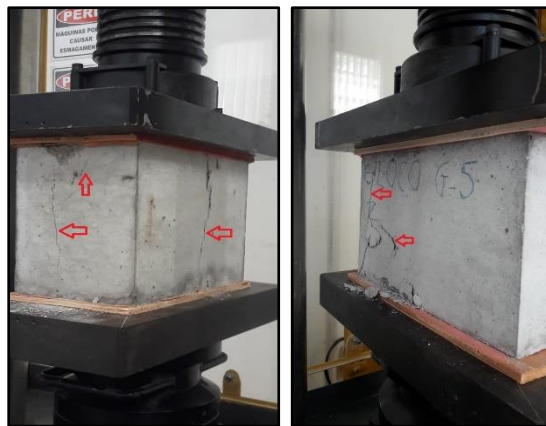
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em geral, todos os blocos apresentaram o mesmo comportamento no ensaio a resistência à compressão. Os blocos não mostraram excessivas deformações até o momento exato da ruína. No entanto, surgiram fissuras externas perceptíveis próximas à carga máxima de ruptura. A maior parte dos blocos exibiu ruptura em

formato cônico, apresentando fissuras verticais nas paredes transversais. Ainda, ocorreram fissuras inclinadas nas paredes longitudinais dos blocos, desprendendo pequenas lascas na camada superficial de concreto, como mostrado na Figura 46.

Uma unidade do bloco GH-2 retratou o desprendimento da parede transversal do bloco, após a ruptura, devido à estreita espessura da parede transversal, entretanto a resistência à compressão axial, aos 28 dias, foi próxima das outras unidades da mesma geometria. A Figura 47 ilustra o desprendimento do concreto do bloco GH-2.

Figura 46 - Ruptura dos blocos: Fissuras verticais e inclinadas e desprendimento do concreto na camada superficial do bloco



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 47 - Desprendimento do concreto do bloco GH-2

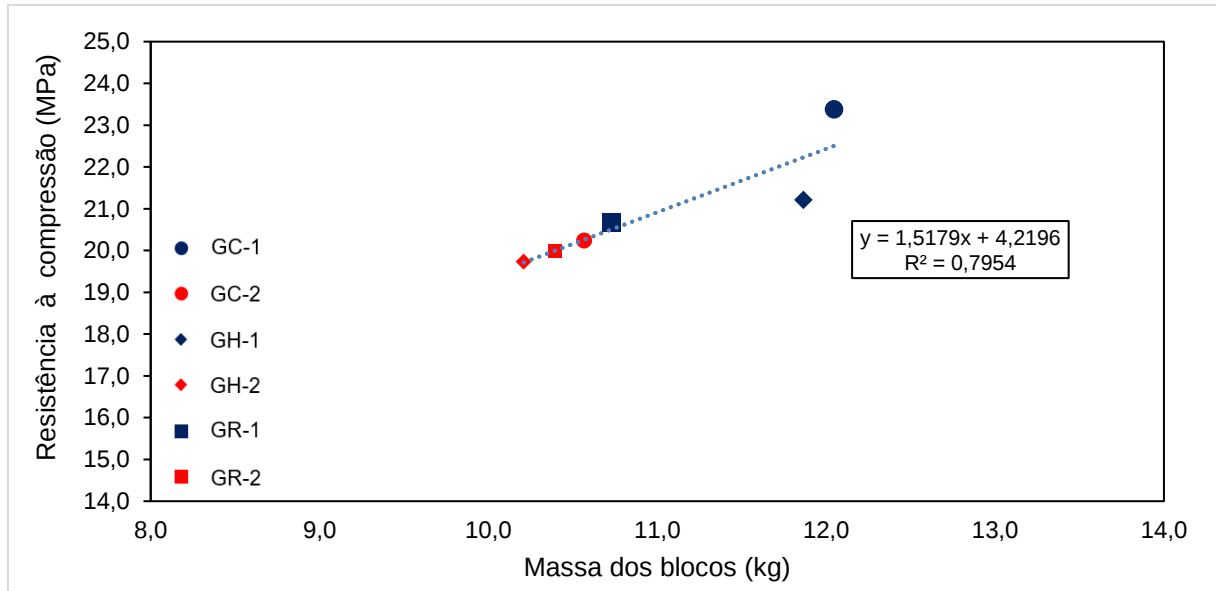


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 48 mostra a resistência média à compressão das unidades em função da massa média dos blocos. Os blocos GC-1 e GH-1 apresentaram o maior e o menor valor da relação resistência pela área líquida, entre os tipos de blocos analisados, respectivamente, conforme observado pelo posicionamento em relação à linha de

tendência na Figura 48. No entanto, os blocos GH-2 e GR-1, obtiveram valores próximos ao bloco GC-1, apesar de apresentarem resistência inferiores.

Figura 48 - Relação resistência média à compressão versus massa média dos blocos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em relação aos resultados dos ensaios de Pinto (2018), que trabalhou com blocos de concreto fluido, o bloco GC-1 alcançou uma resistência à compressão de 14,92 MPa aos 28 dias, referida à área bruta, este resultado foi levemente superior ao obtido pelo autor, no qual o autor utilizou uma mistura de concreto 1:5 e a mesma geometria.

Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) alcançaram um valor de resistência à compressão de 15 MPa referida à área bruta dos blocos, utilizando-se uma mistura de concreto vibrado de 1:6. Comparando-se os resultados obtidos de resistência à compressão com os dos autores, a geometria GC-1 foi a que obteve resultados de resistência mais próximos aos dos autores, enquanto que, as outras geometrias atingiram valores de resistência à compressão inferiores. Entretanto, os autores trabalharam com outra dimensão, geometria e área líquida do bloco. A área líquida do bloco era de aproximadamente 30663 mm², ou seja, 10,33% maior que a do bloco GC-1, utilizada no presente trabalho.

Comparando-se os resultados de resistência referida à área líquida com a literatura, os blocos apresentaram resistência à compressão média superior aos

resultados obtidos por Izquierdo *et al.* (2017) e Steil (2003). O bloco GC-1 alcançou resistência superior em aproximadamente 1% a resistência do bloco obtida por Pinto (2018), utilizando a mistura de 1:5 e a mesma relação área líquida/ área bruta. Os outros blocos mostraram resistências um pouco inferiores à resistência obtida pelo autor.

Os blocos apresentaram resistências inferiores aos obtidos por Fonseca *et al.* (2019), Casali *et al.* (2012) e por Mohamad *et al.* (2017), com exceção do bloco GC-1 que obteve resultado de resistência superior em 1,20% ao alcançado por Mohamad *et al.* (2017), no qual os autores usaram bloco com área líquida de 338 cm² e uma relação área líquida e área bruta de 0,62.

Para melhor compreensão dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos blocos, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de um fator. Mais detalhes sobre os testes estatísticos podem ser vistos no Apêndice B.

A análise de variância, realizada com os resultados do ensaio de resistência aos 7 dias, em relação à área bruta e líquida, estão apresentados no Apêndice B.2.1. A análise relata que as médias das amostras, considerando-se a área bruta o valor-p calculado foi de 0.0005, indicando que as amostras são estaticamente diferentes, rejeitando a hipótese nula. Para um nível de significância de 5%, a resistência à compressão dos blocos GC-1 e GH-1, estas com espessuras da parede longitudinal e áreas líquidas maiores, são significativamente maiores que os demais tipos de blocos, comprovado pelo Teste de Scott-Knott. Em relação à resistência na área líquida, o valor-p calculado foi de 0.4113 resultando na similaridade entre os tratamentos, aceitando a hipótese nula.

A ANOVA conduzida aos 28 dias em relação à resistência na área bruta e área líquida, estão apresentados no Apêndice B.2.2. As análises apresentaram valor-p calculado de 0,00002 e 0,0317, respectivamente, rejeitando a hipótese nula. Aplicando um nível de significância de 5%, a resistência do bloco GC-1 foi superior aos demais tipos de blocos, comprovado estaticamente pelo Teste de Scott-Knott.

Assim, considerando o espaço amostral executado pode-se aferir que os formatos geométricos dos furos influenciaram na resistência à compressão dos blocos, no qual o bloco com formato geométrico circular apresentou a maior resistência entre os formatos geométricos.

4.2.2 Absorção de água

A Tabela 14 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água para os diferentes tipos de blocos estudados.

Tabela 14 - Absorção de água para os diferentes tipos de blocos

Tipo de Bloco	Absorção de água (%)		
	Média	Sd	C.V (%)
GC-1	7,28	0,43	5,96
GC-2	7,33	0,14	1,92
GH-1	7,78	0,36	4,64
GH-2	7,18	0,14	1,93
GR-1	7,53	0,41	5,41
GR-2	7,03	0,19	2,73

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a absorção de água, para os blocos de concreto com função estrutural, apresente valor menor ou igual a 8,0%. Todos os tipos de blocos estudados no presente trabalho apresentaram valores de absorção de água de 7,03 a 7,78%, atendendo aos requisitos estabelecidos pela norma.

4.3 ARGAMASSA

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos do ensaio no estado fresco (Determinação do índice de consistência) e no estado endurecido (Determinação da resistência à compressão) da argamassa de assentamento.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios da argamassa de assentamento

Argamassa mista	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão aos 28 dias		
		Média (f_a) (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
1:0,5:4,5	300	11,76	0,25	2,16

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos blocos, obedeceram aos limites recomendados por Mohamad (1998), no qual estabelece que

a resistência da argamassa deve variar entre 0,7 a 1 vez a resistência do bloco, e Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), em que os autores recomendam que a resistência da argamassa deve variar entre 70% a 150% da resistência do bloco referida à área bruta. Os resultados de todas as amostras estão apresentados no apêndice A.4.

4.4 PRISMA

Os ensaios com os prismas permitiram estudar as propriedades de resistência à compressão axial e suas respectivas deformações através da utilização de extensômetros e LVDTs. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos prismas foram calculados utilizando-se as áreas bruta e líquida dos blocos, e estão apresentados na Tabela 16, assim como os fatores de eficiência prisma/bloco. A relação h/t dos prismas foi de 2,60, no qual é necessário realizar um fator de correção altura-espessura prescrito em ASTM C1314 (ASTM, 2018). Os resultados individuais estão mostrados no apêndice A.5.

Tabela 16 - Resistência à compressão média dos prismas

Tipo de Prisma	Média (f_{pm}) (MPa)		Sd (MPa)	C.V (%)
	Área Bruta	Área Líquida		
PGC-1	14,25	22,30	2,88	12,90
PGC-2	9,15	16,24	3,97	24,47
PGH-1	12,55	20,92	4,31	20,62
PGH-2	10,92	21,12	2,91	13,78
PGR-1	10,07	17,88	2,84	15,88
PGR-2	8,81	16,27	4,16	25,54

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com base nos resultados, o prisma PGC-1 apresentou a maior resistência à compressão axial entre os prismas. O prisma com o formato geométrico hexagonal PGH-2 em que possui a menor espessura de parede e área líquida, apresentou resultado de resistência média acima do esperado, sendo necessário realizar mais amostras para obter um resultado mais confiável. O prisma PGC-2 e os prismas com formatos geométricos retangulares PGR-1 e PGR-2 exibiram as menores resistências à compressão referida à área líquida entre os demais, no qual apresentaram

resistências 37,31% 24,72% e 37,1% inferiores comparado ao PGC-1, respectivamente.

Ao considerar os prismas com espessura de parede longitudinal de 25 mm, o prisma com formato geométrico retangular PGR-1 obteve a menor resistência à compressão entre os demais formatos geométricos.

Os formatos geométricos mostraram influência na resistência à compressão dos prismas. Os prismas com formato geométrico circular e hexagonal apresentaram maior resistência em relação aos prismas com formato retangular. O prisma com formato geométrico hexagonal, de menor área líquida, obteve maior resistência em relação aos prismas com formato retangular com maior área líquida.

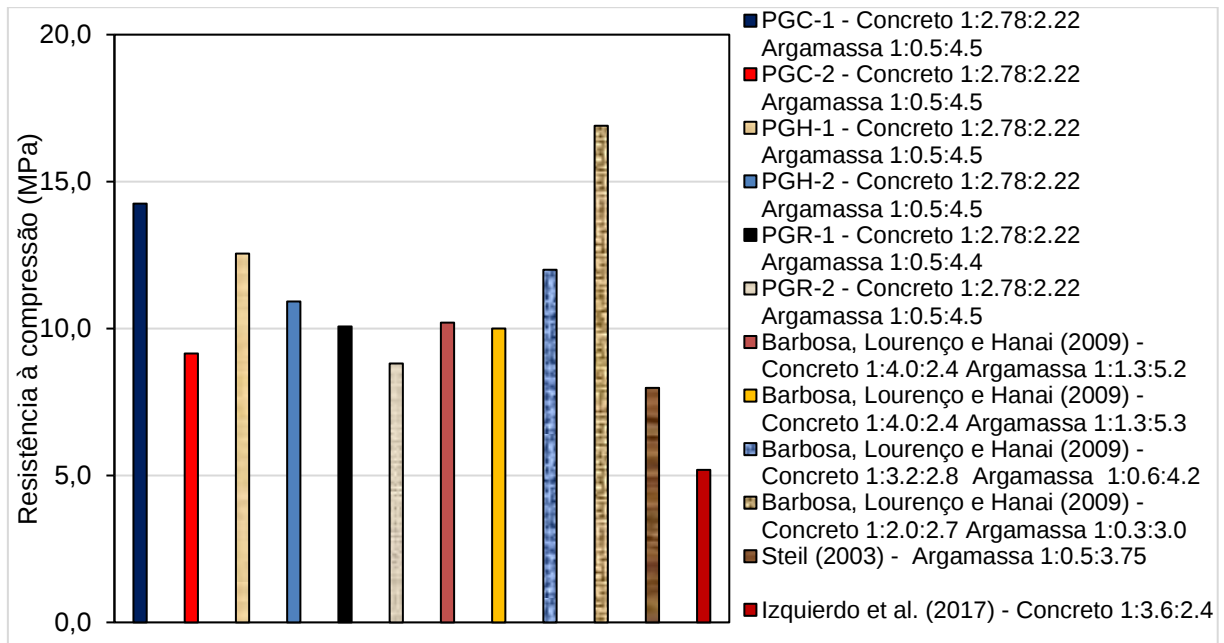
No que diz respeito ao coeficiente de variação, os prismas PGC-1 e PGH-2 mostraram coeficiente de variação inferiores a 15%, atingindo a condição B de acordo com a NBR 15961-2 (2011). Os demais apresentaram um C.V superiores a 15% atingindo a condição A da norma.

Uma análise de variância (ANOVA) de um fator, realizada com os resultados do ensaio de resistência à compressão dos prismas referida à área bruta e líquida estão relatados no Apêndice B.4. As análises apresentaram um valor de valor-p calculado de 0,0006 e 0,0233, respectivamente, rejeitando a hipótese nula. Para um nível de significância de 5%, na resistência na área bruta os prismas PGC-1, PGH-1 foram estatisticamente superiores aos demais prismas. Considerando a resistência na área líquida os prismas PGC-1, PGH-1 e PGH-2 são significativamente maiores que os demais prismas, comprovado estaticamente pelo Teste de Scott-Knott.

Analisando-se os resultados obtidos de resistência à compressão axial dos prismas, em relação à área bruta e líquida, com a literatura (Figuras 49 e 50), o PGC-1 e PGH-1 alcançaram resistências superiores aos prismas de Steil (2003), Izquierdo *et al.* (2017), e três prismas de diferentes misturas de Barbosa, Lourenço e Hanai (2009) em relação à área bruta. Todavia, nesta pesquisa foram utilizadas diferentes misturas de concreto e de argamassa.

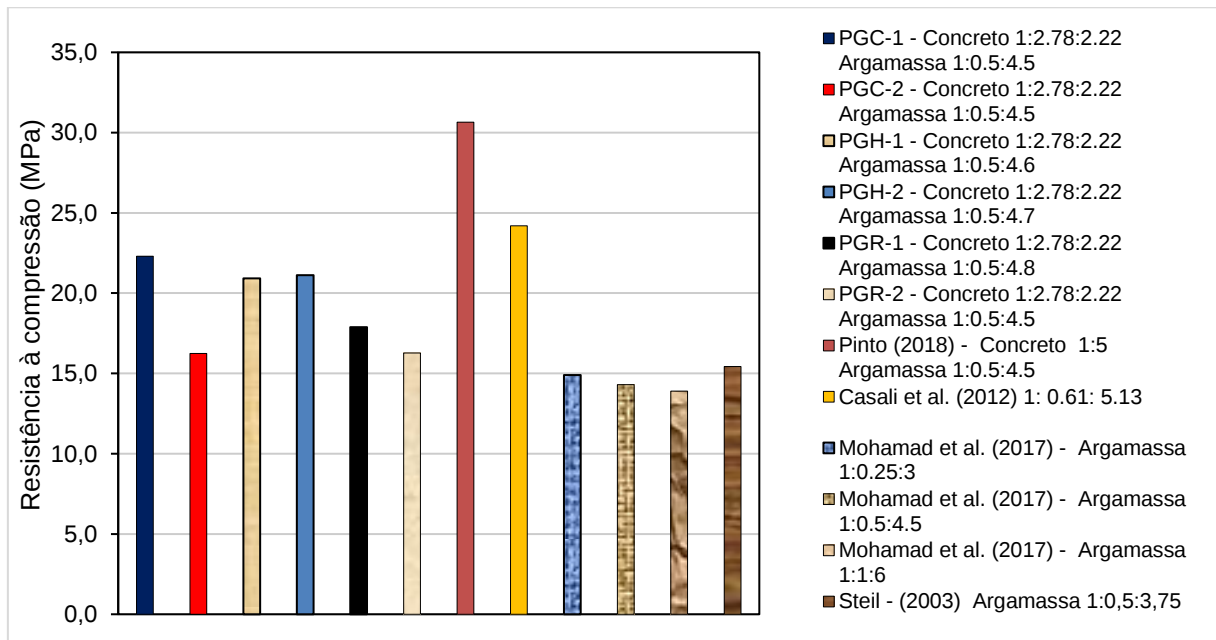
Comparando-se os resultados de resistência à compressão axial referida à área líquida com a literatura, os prismas apresentaram resistências maiores em relação aos prismas de Mohamad *et al.* (2017) e Steil (2003) e resistências inferiores aos prismas de Pinto (2018) e Casali *et al.* (2012).

Figura 49 - Comparação de resultados de resistência à compressão axial de prismas referida à área bruta com os resultados encontrados na literatura



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 - Comparação de resultados de resistência à compressão axial de prismas referida à área líquida com os resultados encontrados na literatura



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O cálculo do módulo de elasticidade dos prismas foi realizado a partir da inclinação da reta entre 5% e 33% da resistência à compressão máxima de ruptura,

conforme comentado no capítulo 3. O cálculo do módulo de elasticidade e das deformações foram efetuadas em função da área líquida das unidades, mediante leitura dos LVDTs. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos de módulo de elasticidade dos prismas e suas respectivas deformações. A coluna deformação 33% é referente à deformação de 33% da tensão de ruptura do prisma e a coluna deformação última é relativa à deformação no momento da retirada dos LVDTs e da ruptura, obtidas com o auxílio dos extensômetros. Os extensômetros foram utilizados até o momento da ruptura do prisma, realizando a leitura dos dados até o momento exato da ruptura. Todavia, os LVDTs foram removidos com aproximadamente 70% da carga de ruptura, com o objetivo de garantir a integridade do equipamento, devido ao não conhecimento do real comportamento do elemento. As Figuras de 51 a 62 mostram de acordo com o tipo de prisma específico, as curvas tensão - deformação referida à área líquida dos prismas. O Apêndice C apresenta as curvas tensão – deformação de cada prisma.

Tabela 17 - Módulo de elasticidade e deformações médias dos prismas

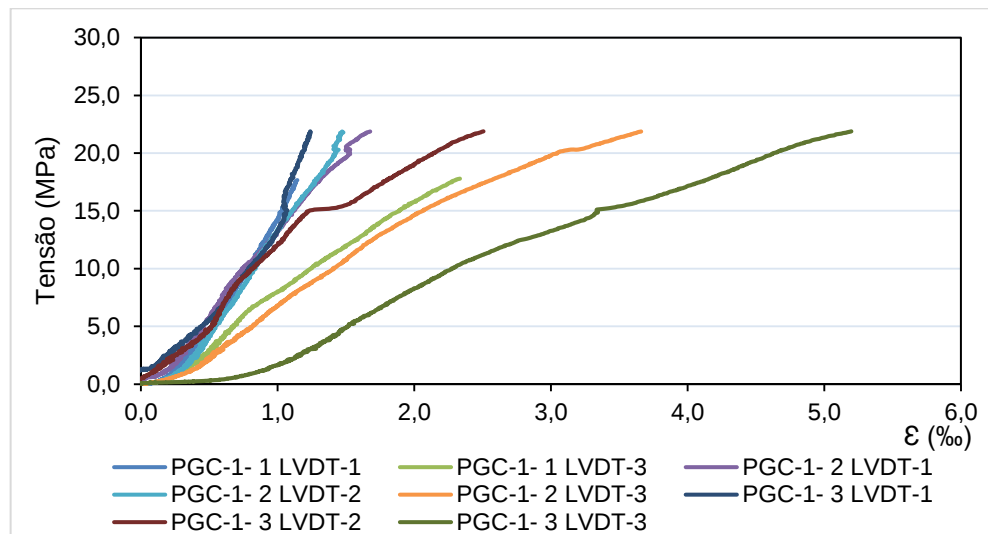
Tipo de Prisma	Deformação 33% (‰)	Deformação Última (‰) *	Deformação Última (‰) **	Módulo (E) (MPa)	Relação E/f_p
PGC-1	1,24	2,55	0,93	16390	735
PGC-2	0,97	1,24	0,88	13117	808
PGH-1	1,07	2,19	1,03	15418	737
PGH-2	0,66	1,45	1,07	15486	733
PGR-1	0,56	1,63	0,73	13304	744
PGR-2	0,71	1,30	0,88	13169	809

Nota: * Deformação obtida no momento da retirada do LVDT

Nota: **Deformação obtida no momento da ruptura do prisma captada pelo extensômetro

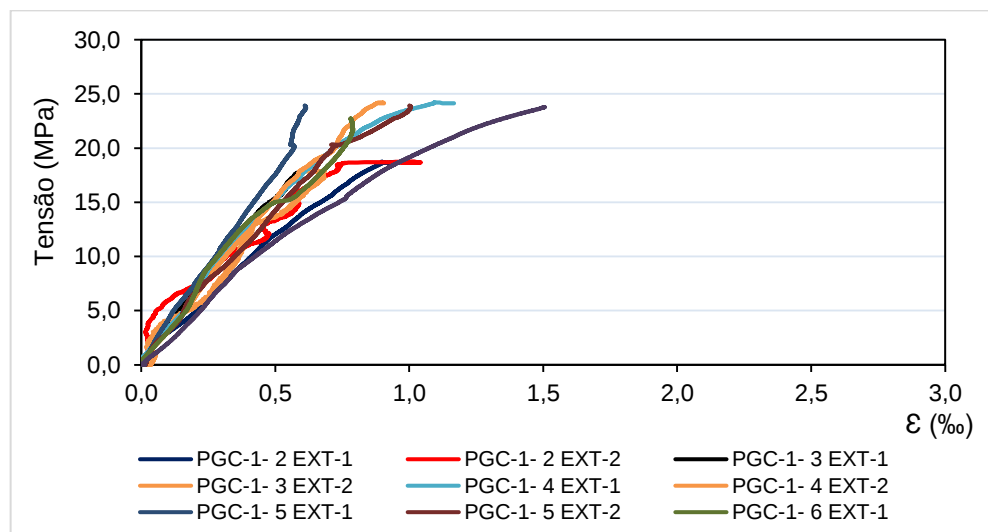
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 51 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 - LVDT Colocar os valores médios se possível



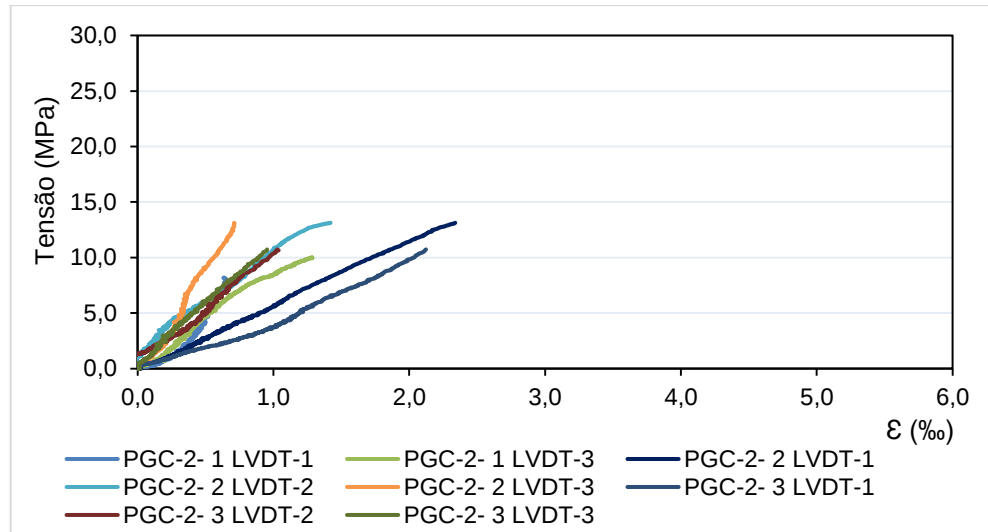
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 52 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 – Extensômetro



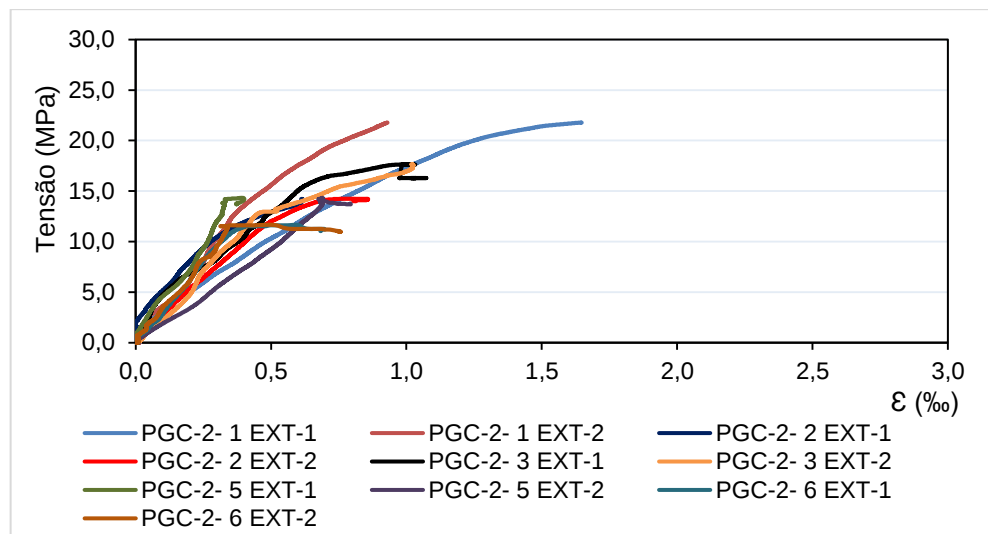
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 53 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 - LVDT



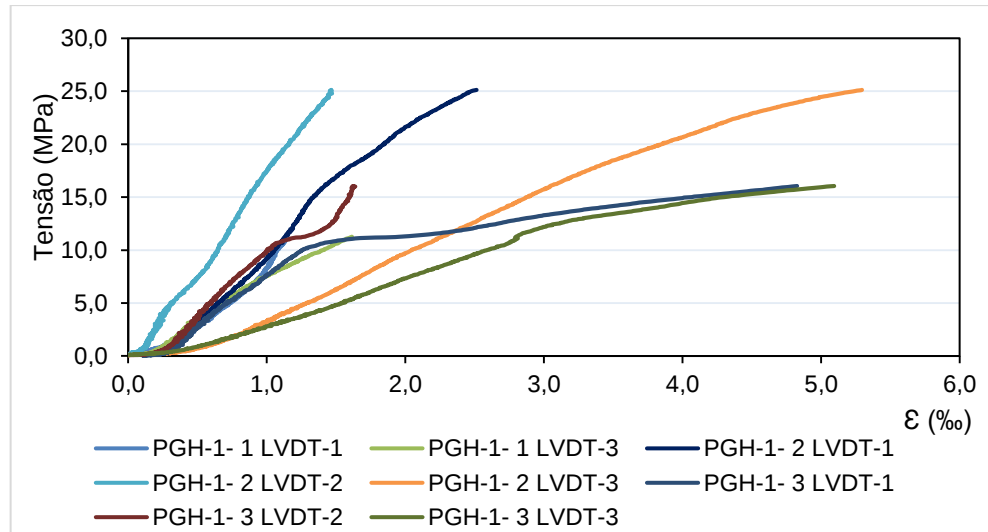
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 54 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 – Extensômetro



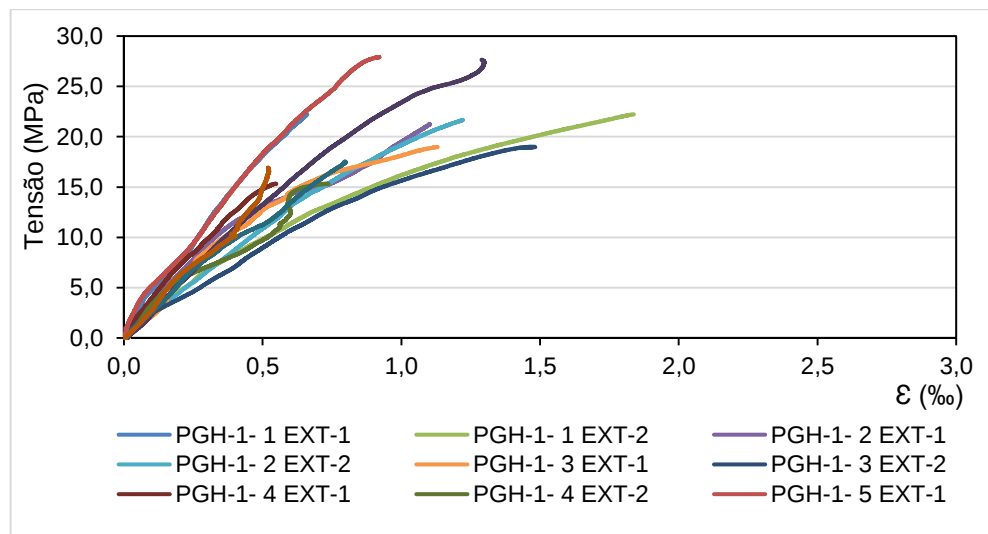
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 55 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 - LVDT



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 56 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 – Extensômetro



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 57 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 - LVDT

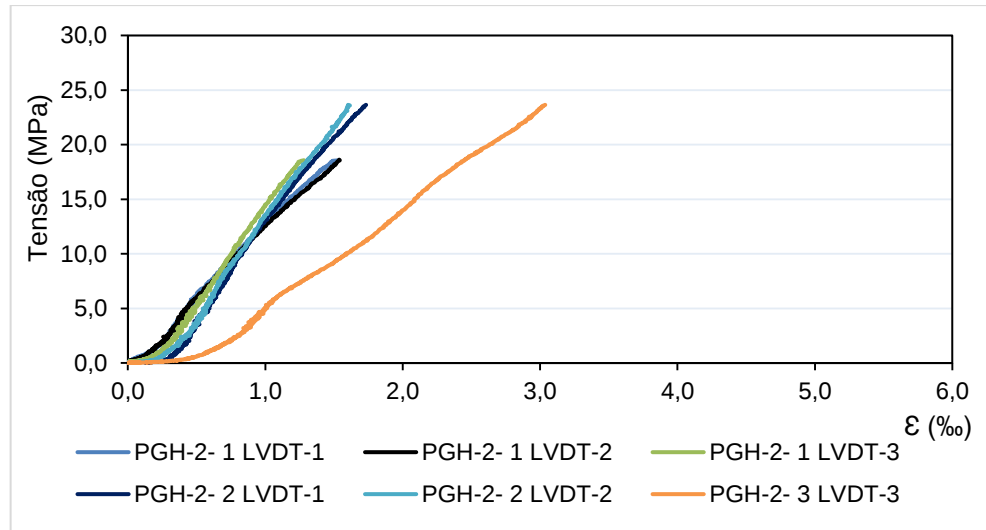


Figura 58 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 – Extensômetro

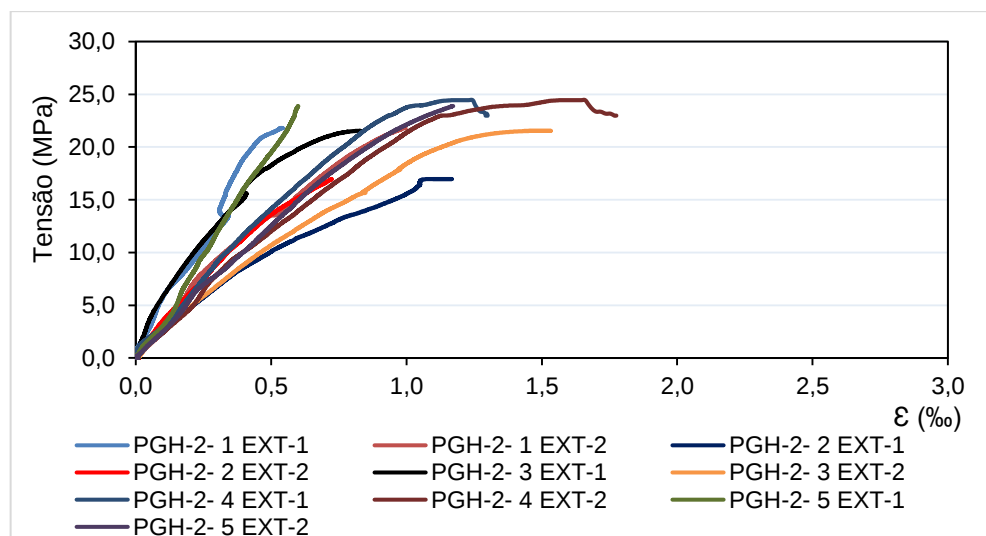
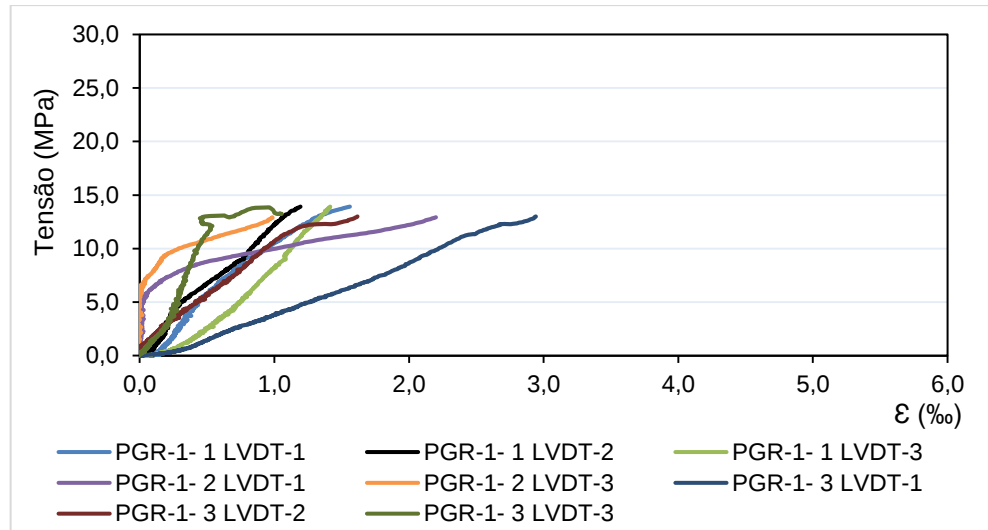
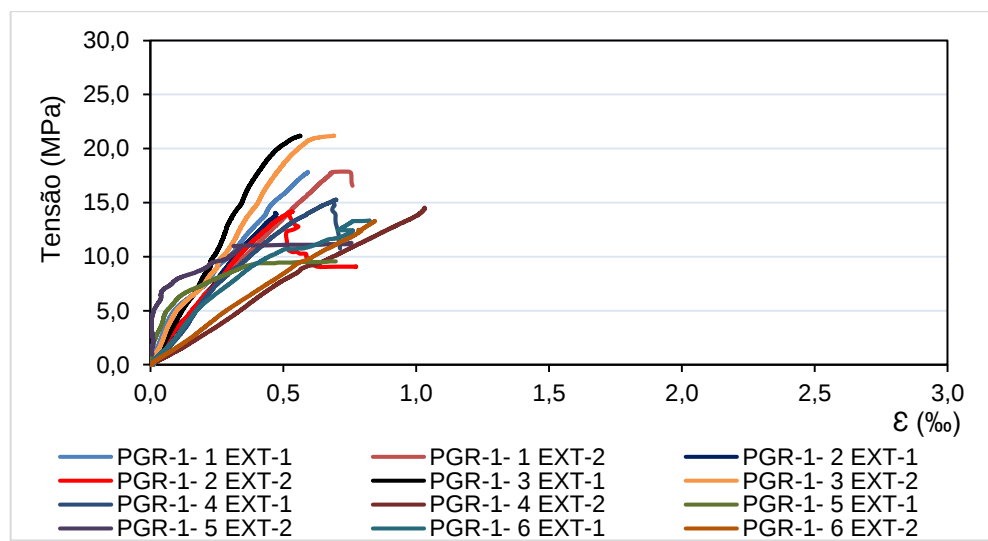


Figura 59 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 - LVDT



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 60 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 – Extensômetro



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 61 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 - LVDT

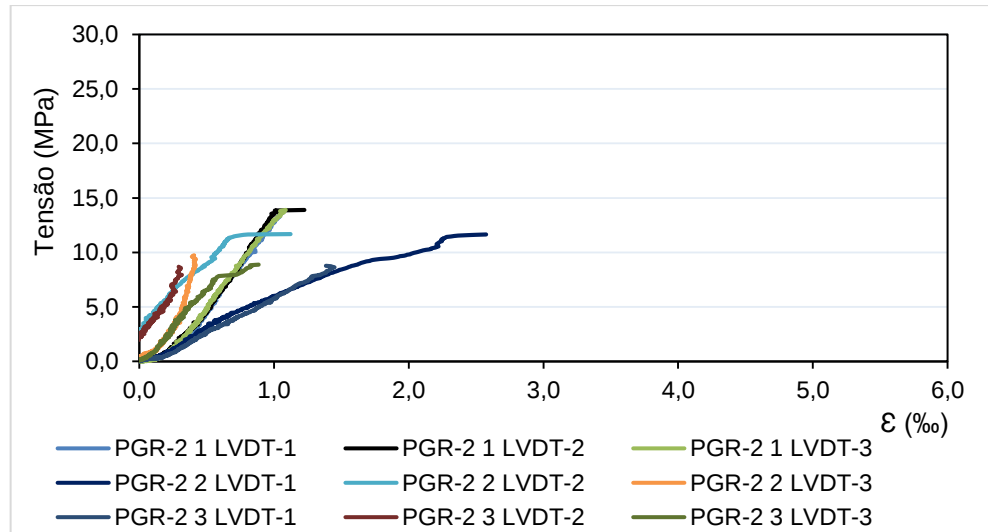
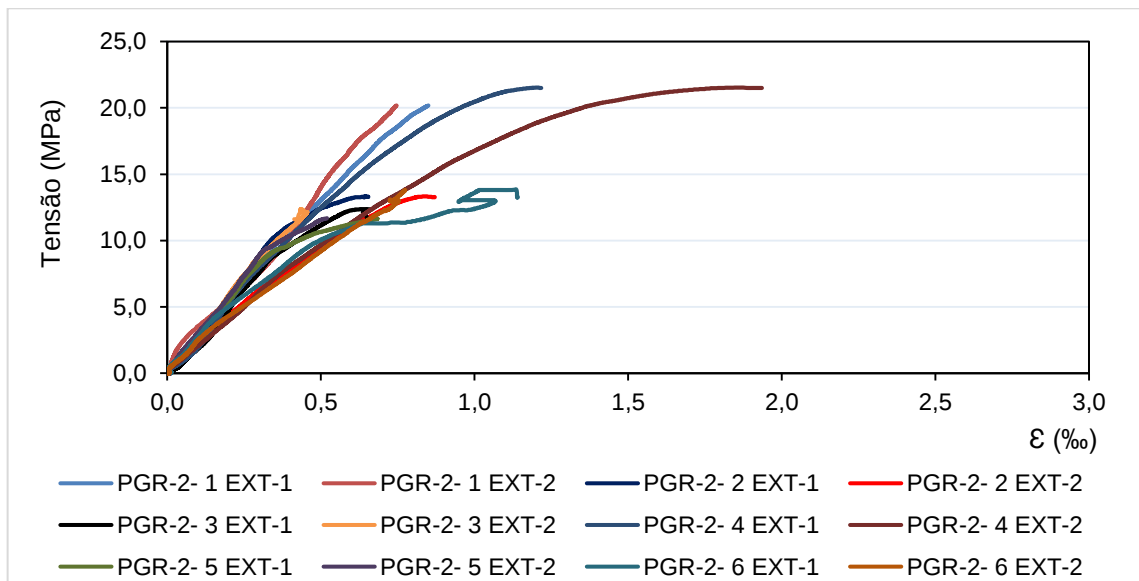


Figura 62 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 – Extensômetro



As deformações obtidas no momento da retirada dos LVDTs variaram de 1,2 a 2,55‰, no qual os prismas PGC-2 e PGC-1 exibiram a menor e a maior deformação média, respectivamente. Os valores de deformação última foram semelhantes aos obtidos por Mohamad *et al.* (2017).

Em relação à deformação última média das faces dos blocos, obtida com auxílio de extensômetros, estas variaram de 0,73 a 1,07‰, sendo os prismas PGR-1 e PGH-2 os que apresentaram a menor e a maior deformação, respectivamente. São perceptíveis a pouca deformação e a não-linearidade do material, apresentando características específicas de um material frágil, por exemplo o concreto. As alterações nas inclinações nas curvas podem estar associadas a fissuras internas na argamassa, evidenciando o comportamento não linear do prisma (MOHAMAD *et al.*, 2017).

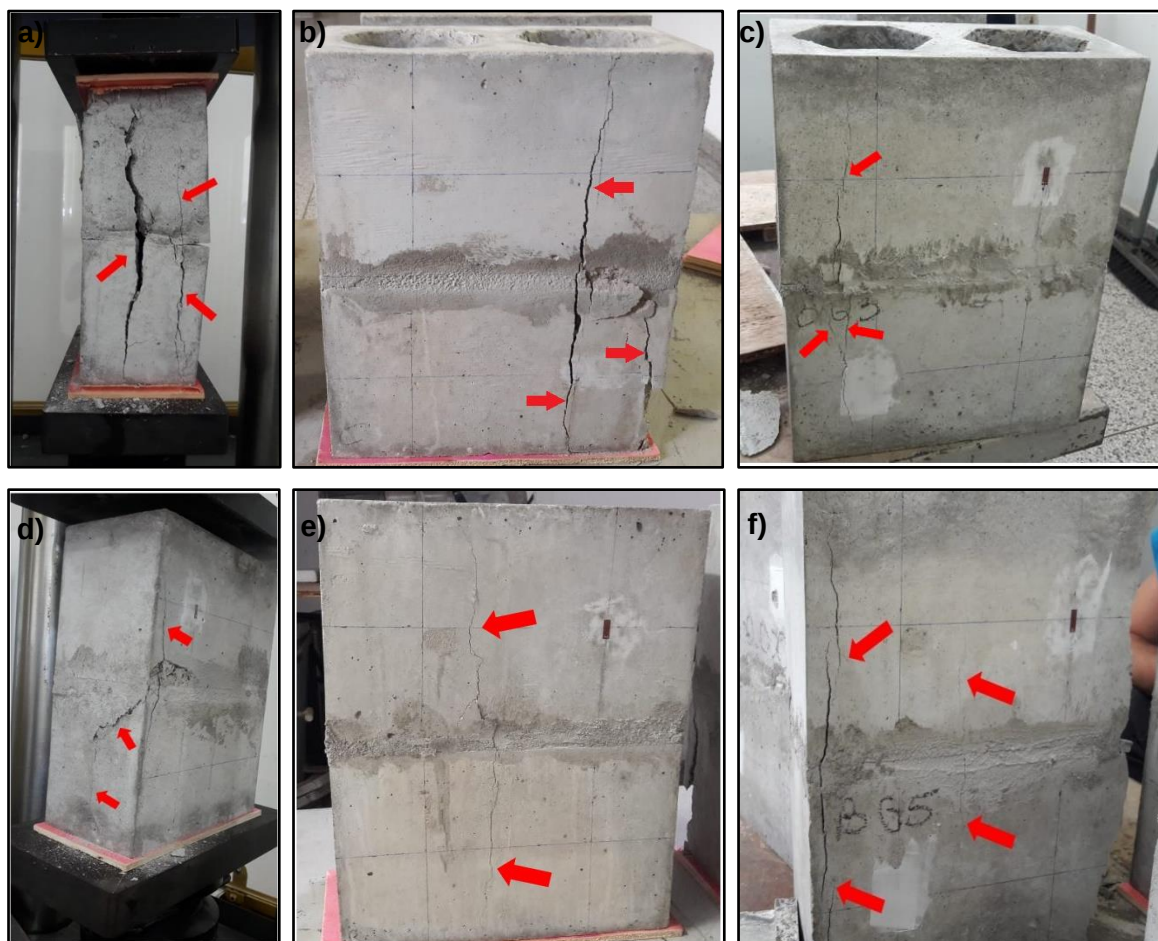
A maior espessura da parede longitudinal da unidade apresentou uma maior tensão de ruptura e maior capacidade de deformação longitudinal para os furos circulares, já os formatos geométricos hexagonais apresentaram tensão de ruptura semelhantes, no entanto, o de menor área líquida obteve uma menor deformação. Nos formatos geométricos retangulares, a espessura da parede não influenciou nas deformações e na tensão de ruptura.

O módulo de elasticidade dos prismas variou de 16390 a 13117 MPa, em que os prismas PGC-1 e PGC-2 apresentaram a maior e a menor rigidez entre os prismas, respectivamente. Os valores obtidos foram superiores aos encontrados por Izquierdo *et al.* (2017), um tipo de prisma de Casali *et al.* (2012) próximos aos obtidos por Steil (2003) e inferiores ao de Mohamad *et al.* (2017). A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos prismas variaram de 733 a 809 para os prismas PGH-2 e PGR-2, respectivamente. Foram encontradas relações semelhantes em Fortes (2017) e relações inferiores em Izquierdo *et al.* (2017).

No que diz a respeito à forma de ruptura dos prismas, estas ocorreram de forma frágil, apresentando fissuras na posição vertical, com início próximo à região da argamassa e partindo em direção ao bloco, em decorrência do estado triaxial de tensões (Figura 63). Mohamad *et al.* (2017) e Martins *et al.* (2018) relatam que, quando utilizada argamassa mista, esta exibe uma maior expansão lateral, causando tensões de tração no bloco, provocando o surgimento de fissuras verticais e consequentemente a ruína do prisma.

A razão entre a carga da primeira fissura até a carga máxima de ruptura foi de 77,50% para o prisma PGC-1, 85,09% para o prisma PGC-2, 80% para o prisma PGH-1, 79,38% para o prisma PGH-2, 70% para o prisma PGR-1 e 83,48% para o prisma PGR-2.

Figura 63 - Ruptura dos prismas- a) PGC-1, b) PGC-2, c) PGH-1, d) PGH-2, e) PGR-1, f) PGR-2

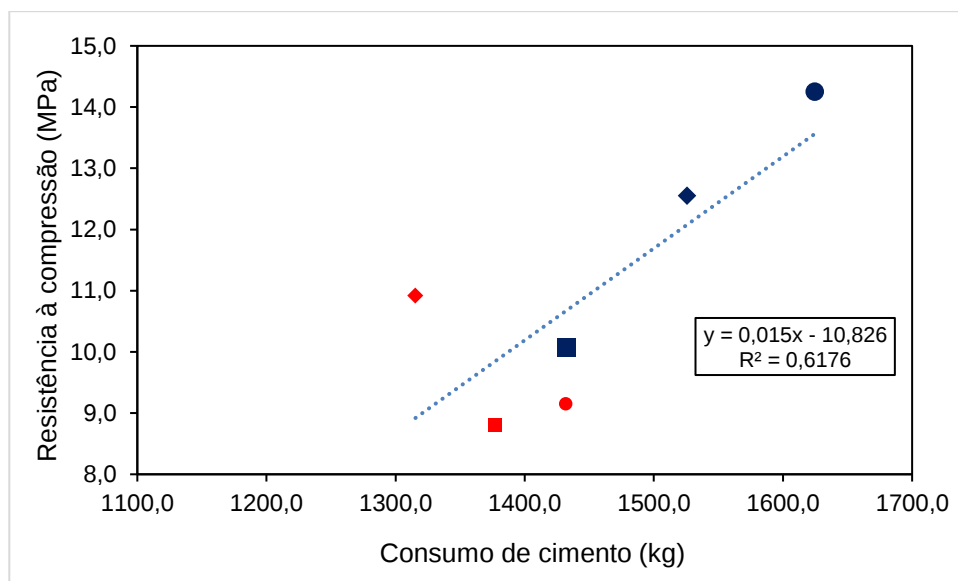


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Também foi realizada uma comparação entre a resistência à compressão média do prisma referida à área bruta e o consumo de cimento utilizado para uma construção de uma parede de 50 m² (Figura 64), com o objetivo de verificar a economia do consumo de cimento em função da resistência média do prisma. A relação mostrou que os prismas com formato geométrico circular PGC-1 e hexagonal PGH-1 e PGH-2 obtiveram relação próximas, ficando acima da linha de tendência em relação aos demais prismas. Os prismas PGH-1 e PGH-2 apresentaram uma economia no consumo de cimento de 6,09% e 8,13% em relação ao prisma PGC-1,

respectivamente, mostrando ser benéfico do ponto de vista econômico e de resistência mecânica.

Figura 64 - Relação entre a resistência à compressão média do prisma referida à área bruta e o consumo de cimento utilizado para uma construção de uma parede de 50 m²



Fonte: Elaboração do próprio autor.

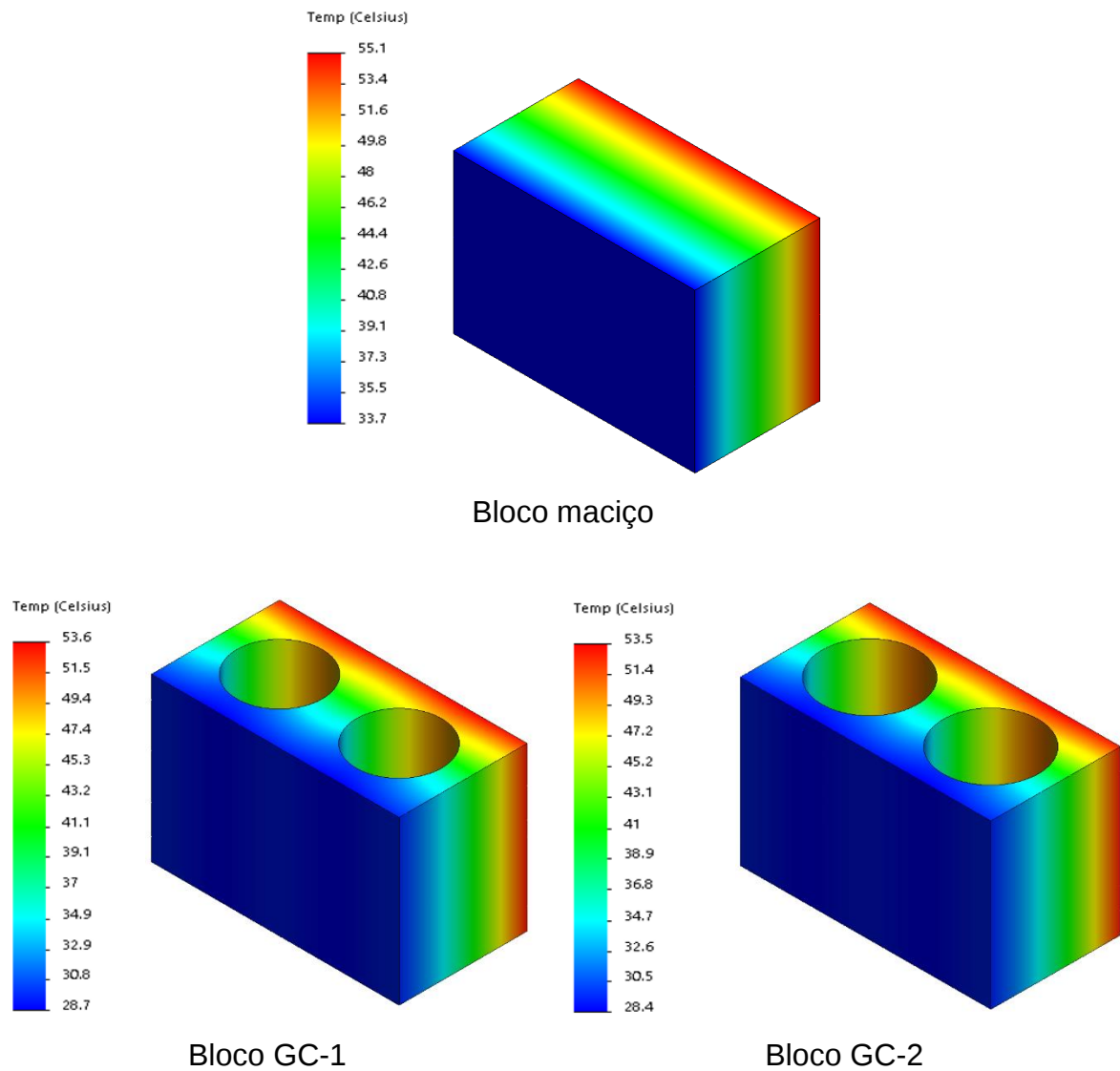
4.5 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DOS BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO

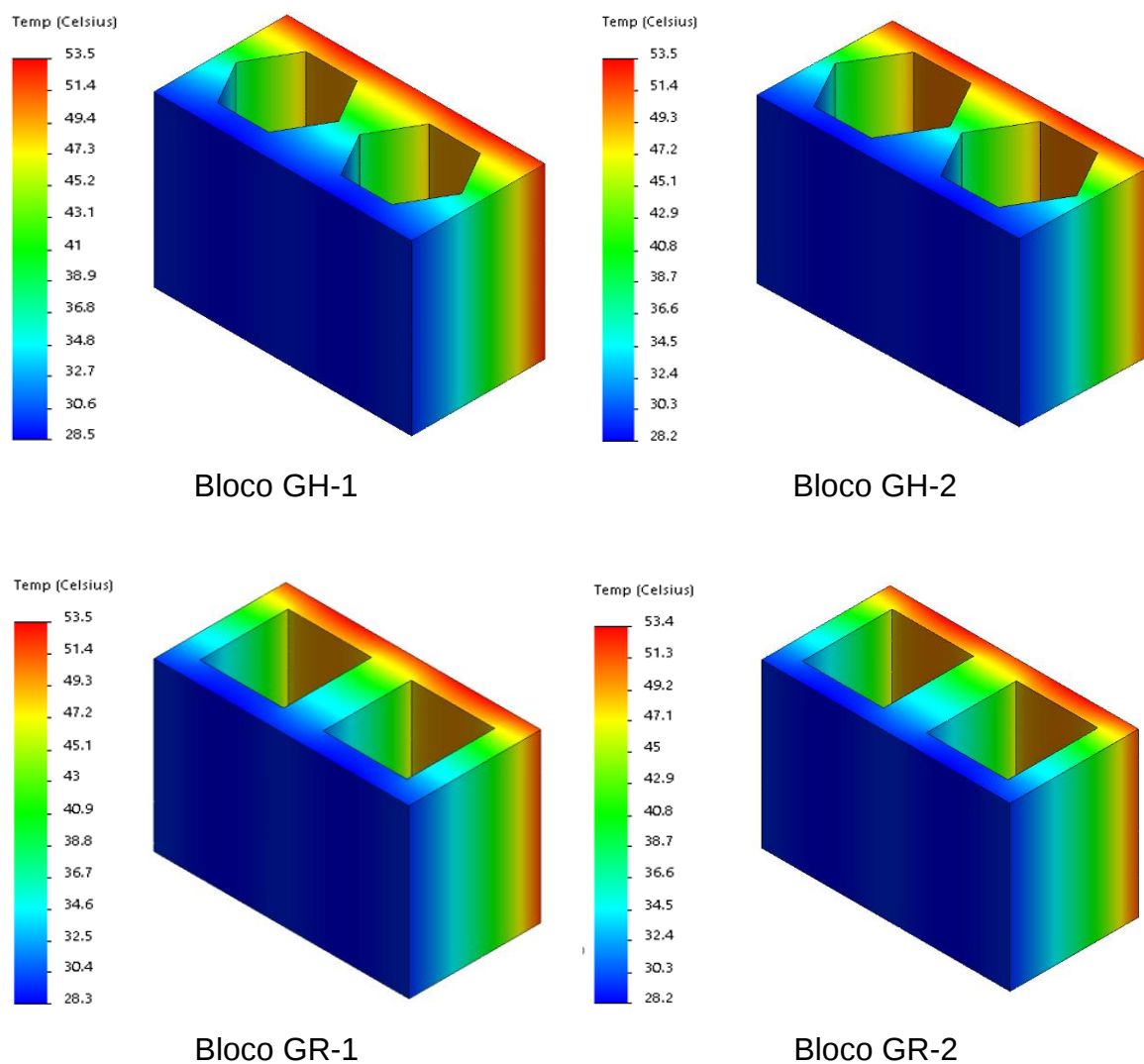
A Figura 65 mostra a distribuição de temperatura dos diferentes tipos de blocos analisados. Os diferentes níveis de cores representam a distribuição de temperatura do nível superior (superfície externa) para o nível inferior (superfície interna) do bloco. Com base nos resultados obtidos, a temperatura máxima atingida pelos blocos vazados de concreto nas superfícies externas foi de 53,6 °C, para o bloco GC-1, enquanto que a temperatura mínima obtida nas superfícies internas foi de 28,2 °C, para os blocos GH-2 e GR-2.

A Tabela 18 apresenta a temperatura mínima, média e máxima das superfícies internas, e a temperatura máxima das superfícies externas dos blocos vazados e do bloco maciço de concreto. A Figura 66 apresenta a relação entre a temperatura média do ambiente interno em função da percentagem da área de vazios das unidades. A temperatura máxima da superfície interna variou de 29,1 °C, para o bloco GH-2 (área

de vazios de 48,28%) a 33,7 °C, para o bloco maciço (área de vazios de 0%), enquanto que, nas superfícies externas dos respectivos blocos a temperatura máxima variou de 53,5 °C a 55,1 °C.

Figura 65 - Distribuição de temperatura dos blocos maciço e vazados de concreto





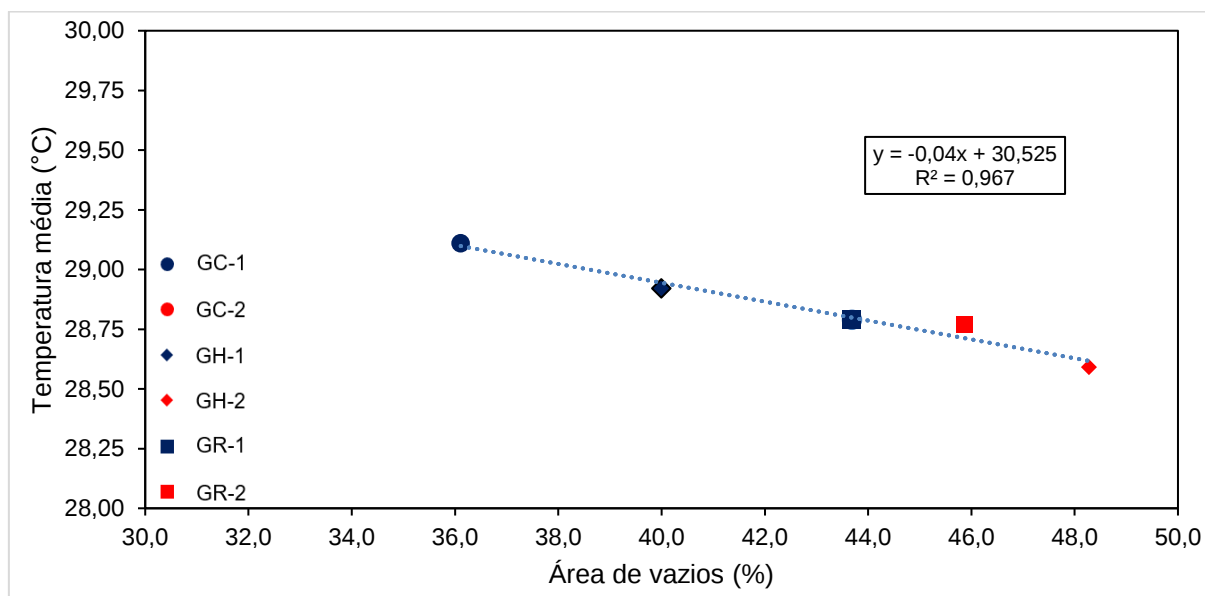
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18 – Temperatura das superfícies dos blocos vazados de concreto após a simulação

Tipo de Bloco	Área de vazios (%)	Ti mín. (°C)	Ti máx. (°C)	Ti méd. (°C)	Te máx. (°C)
GC-1	36,11	28,70	29,60	29,11	53,6
GC-2	43,69	28,40	29,30	28,79	53,5
GH-1	40,00	28,50	29,50	28,92	53,5
GH-2	48,28	28,20	29,10	28,59	53,5
GR-1	43,68	28,30	29,50	28,79	53,5
GR-2	45,86	28,20	29,40	28,77	53,4
Maciço	0,00	33,70	33,70	33,70	55,1

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 66 - Temperatura interna média em função da percentagem da área de vazios das unidades



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No que diz respeito a maior e a menor área de vazios, os blocos GH-2 e GC-1, apresentaram a menor e a maior temperatura na superfície interna, respectivamente. A diferença de temperatura interna entre os blocos foi de 0,5 °C, obtendo uma redução de temperatura de 1,70%.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, observou-se que, conforme o aumento da área de vazios, tem-se uma redução da transferência de calor da superfície externa e interna dos blocos, obtendo-se uma redução da temperatura interna de 13,65% para a área de vazios de 48,28% em relação à área de vazios de 0%. Ainda, têm-se uma diferença entre a temperatura externa e interna do bloco, de 24,4 °C a 21,4 °C para os blocos GH-2 e maciço, respectivamente. Esta diferença ocorre devido aos vazios do bloco que absorvem o calor da superfície externa para o ar dentro dos vazios dos blocos, diminuindo a temperatura nas superfícies externas e internas (AL-TAMIMI *et al.*, 2017). Também é observado que a relação entre a área de vazios e a temperatura média interna dos blocos, pode ser expressa linearmente com um coeficiente de determinação (R^2) próximos ao valor unitário.

Ainda, pode-se aferir que similares índices de vazios entre os blocos GC-2 e GR-1, conduziram a diferentes máximas de temperaturas internas, isto pode estar associado ao diferente formato geométrico dos furos e a resistência imposta para cada

um na transferência de calor. A diferença de temperatura na superfície interna dos blocos com formatos geométricos circulares é pequena em relação aos blocos com formatos hexagonais e retangulares, sendo esta diferença menor do que 2%.

Os blocos com vazados retangulares, do presente trabalho, alcançaram menores temperaturas em relação aos blocos os blocos com formatos retangulares de Al-Tamimi *et al.* (2017), cuja área de vazios das unidades eram menores em 14,14% e 18,23%, em relação aos blocos GR-1 e GR-2, respectivamente. A redução da temperatura também ocorreu para os blocos com vazados circulares, sendo que a área de vazios do bloco utilizado pelo autor foi menor em 21,63% e 35,23% em relação aos blocos GC-1 e GC-2, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de estudar e verificar a influência de diferentes tipos de geometrias de blocos de concreto, submetidos aos esforços de compressão axial, utilizando-se o concreto autoadensável para fabricação das unidades. A partir dos ensaios realizados e dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) foi estabelecida a dosagem dos blocos vazados de concreto, utilizando o concreto autoadensável;
- b) entre os tipos de blocos de concreto estudados com diferentes geometrias, os blocos GC-1, GH-1 e GR-1, estes possuindo maior área líquida entre as geometrias analisadas, obtiveram maiores valores de resistência à compressão axial, sendo o bloco GC-1 o que apresentou a maior resistência à compressão, aos 28 dias, comprovado por análise estatística.
- c) os formatos geométricos dos furos analisados influenciaram na resistência à compressão axial dos blocos, sendo o bloco com formato geométrico circular o que obteve o melhor aproveitamento de resistência, comprovado por análise estatística;
- d) foi verificado um aumento linear proporcional da resistência à compressão com o aumento da relação área líquida / área bruta do bloco, justificado pelos coeficientes de determinação (R^2) próximos ao valor unitário;
- e) as resistências à compressão dos prismas PGC-1, PGH-1 e PGH-2 referida à área líquida foram estaticamente superiores aos demais prismas, comprovado pelo Teste de Scott-Knott, mostrando que os formatos geométricos influenciaram a resistência mecânica dos prismas, em que os prismas PGC-1, PGH-1 e PGH-2 apresentaram maiores resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- f) nas curvas tensão-deformação, a maior espessura da parede longitudinal dos blocos possibilitou uma maior capacidade de absorver deformações, com exceção ao formato geométrico retangular, no qual apresentou baixa tensão de ruptura e deformação;
- g) os prismas com formato geométrico hexagonal apresentaram uma economia no consumo de cimento em relação ao prisma PGC-1, mostrando ser

benéfico do ponto de vista econômico e de resistência mecânica os prismas com formato geométrico hexagonal;

- h) na análise de elementos finitos da transferência de calor para os diferentes tipos de blocos, conforme o aumento da área de vazios é observada uma redução na transferência de calor da superfície externa e interna dos blocos, sendo o bloco com a geometria hexagonal e a geometria circular GH-2 e GC-1, as apresentaram a menor e a maior temperatura na superfície interna, respectivamente;
- i) embora o bloco GC-1 foi o que obteve a maior temperatura na superfície interna entre as seis geometrias, a diferença de temperatura foi pequena em relação às demais. Ainda, foi o bloco que apresentou o melhor aproveitamento de resistência mecânica, sendo o mais recomendado para uma obra ou para uma fábrica.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo mais detalhado sobre a modulação dos blocos, utilizando estes formatos geométricos e outras dimensões.

Ensaiai mais amostras dos prismas utilizando as mesmas geometrias, principalmente do prisma PGH-2, por apresentar resultado de resistência à compressão contraditório em comparação aos resultados dos demais prismas.

Realização de uma modelagem numérica do comportamento mecânico dos blocos e prismas com estes formatos geométricos, e comparar os resultados obtidos do programa experimental com a modelagem numérica.

Averiguar o comportamento dos blocos com estes formatos geométricos, quando submetidos aos esforços de tração e cisalhamento, bem como verificar o comportamento e a aderência dos blocos quando grauteados.

Analisar a possibilidade de um sistema de produção em larga escala (escala industrial), introduzindo máquinas de alta tecnologia para a produção das unidades, como o objetivo de otimizar o processo de fabricação.

REFERÊNCIAS

- AL-TAMIMI, A. S.; AL-OSTA, M.A.; BAGHABRA AL-AMOUDI, O. S.; BEN-MANSOUR, R. Effect of Geometry of Holes on Heat Transfer of Concrete Masonry Bricks Using Numerical Analysis. **Arabian Journal For Science And Engineering**, Heidelberg, v. 42, n. 9, p. 3733-3749, 17 mar. 2017. DOI 10.1007/s13369-017-2482-6.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for load bearing concrete masonry units**. ASTM C90, West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for compressive strength of masonry prisms**. ASTM C1314, West Conshohocken, 2018.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S; RAMALHO, M. A. Brazilian results on structural masonry concrete blocks. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 104, n. 1, p. 33-39, 2007.
- ARABI, N.; MEFTAH, H.; AMARA, H.; KEBAILI, O.; BERREDJEM, L. Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: mixing recycled concrete aggregates: windshield waste glass aggregates. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 209, p. 364-376, jun. 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.024.
- ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal Of Building Engineering**, Oxford, v. 20, p.81-93, nov. 2018. DOI 10.1016/j.job.2018.07.002.
- ASSIS, W. S. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de Engenharia Civil**. 2007. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-2**: alvenaria estrutural: blocos de concreto Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011. 35 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908**: aditivos para argamassa e concreto: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2008. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823 - 2**: concreto autoadensável: parte 2: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961 - 1**: alvenaria estrutural: blocos de concreto Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011. 42 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisito. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria: requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

BARBOSA, C. S.; LOURENÇO, P. B.; HANAI, J. B. On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms. **Materials And Structures**, Dordrecht, v. 43, n. 3, p.331-344, 17 mar. 2009. DOI 10.1617/s11527-009-9492-0.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenarias de blocos de concretos**. 2005. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

BEJAN, A. **Transferência de calor**. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini e Ricardo Santilli Ekman Simões. São Paulo: Edgard Blucher, 1996.

BOULT, B.F. Concrete Masonry Prism Testing. **ACI Journal**, Oxford, v. 76, n. 4, p. 530-536, 1979.

CALÇADA, L. M. L. **Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto**. 1998. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

CASALI, J. M.; OLIVEIRA, A. L.; SAKAMOTO, C.; SCHANKOSKI, R.; PRUDÊNCIO JR., L. R. The effect of mortar bedding type and hollow concrete block geometry on the mechanical behavior of high-strength structural masonry. In: INTERNATIONAL BRICK AND BLOCK MASONRY CONFERENCE, 15., Florianopolis, 2012. **Anais [...]** Florianopolis: [s. n.], 2012.

EFNARC. **Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete**. [S. l.], 2006.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. [S. l.], 2002.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia (UFLA)*, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FARIA, E. F. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados**. 2004. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FORTES, E. S. **Influência do capeamento e caracterização da resistência à compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2012. 303 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; CAMACHO, J. S.; FONSECA, F. S. Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 10, n. 6, p.1273-1319, nov. 2017. DOI 10.1590/s1983-41952017000600008.

FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; FONSECA, F. S. Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units. **Journal of Materials In Civil Engineering**, Reston, v. 27, n. 9, set. 2015. DOI 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001204.

FONSECA, F. S.; Fortes, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; CAMACHO, J. S. Compressive strength of high-strength concrete masonry grouted prisms. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 202, p.861-876, mar. 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.037.

GANESAN T. P.; KALYANASUNDARAM, P.; AMBALAVANAN, R.; RAMAMURTHY, K. Structurally efficient hollow concrete blocks in load bearing masonry. *In*: INTERNATIONAL BRICK AND BLOCK MASONRY CONFERENCE, 8th.,1988, Dublin. **Proceedings** [...] London: Elsevier, 1988. p.1427-1436.

GRUNEWALD, S. **Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete**. 2004. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Delft University Of Technology, The Netherlands, 2004.

HAACH, V. G.; VASCONCELOS, G; LOURENÇO, P. B. Assessment of Compressive Behavior of Concrete Masonry Prisms Partially Filled by General Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 26, n. 10, out. 2014. DOI 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000956.

HALLER, P. Load capacity of brick masonry. *In*: JOHNSON, F. B. **Designing, engineering and constructing with masonry products**. Houston: Gulf, 1969. p. 129-149.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 353 p.

HENDRY, A. W. **Structural masonry**. 2. ed. Hong Kong: Macmillan, 1998.

HENDRY, E. A. Masonry walls: materials and construction. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 15, n. 8, p. 323-330, dez. 2001. DOI: 10.1016/s0950-0618(01)00019-8.

HUANG, F.; LI, H.; YI, Z.; WANG, Z.; XIE, Y. The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 166, p.833-838, mar. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.169.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

IZQUIERDO, I. S.; IZQUIERDO, O. S.; RAMALHO, M. A.; TALIERCIO, A. Sisal fiber reinforced hollow concrete blocks for structural applications: Testing and modeling. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 151, p.98-112, out. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.072.

IZQUIERDO, O. S.; CORRÊA, M. R. S.; SOTO, I. I. The influence of mortar bedding on the compressive strength of concrete block masonry structures. *In*: INTERNATIONAL BRICK AND BLOCK MASONRY CONFERENCE, 15 th., Florianopolis, 2012. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2012.

JAAFAR, M. S.; THANOON, W. A.; NAJM, A. M. S.; ABDULKADIR, M. R.; ALI, A. A. A. Strength correlation between individual block, prism and basic wall panel for load bearing interlocking mortar less hollow block masonry. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 20, n. 7, p. 492-498, set. 2006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.046.

MARTINS, R. O. G.; NALON, G.H.; ALVARENGA, R.D.C.S.S.; PEDROTI, L.G.; RIBEIRO, J.C.L. Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 182, p. 233-241, set. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091.

MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. **Building code requirements and specification for masonry structures (TMS 402-13/ ACI 530-13/ ASCE 5-13)**. Boulder: Colorado, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS, D. R. W.; LOURENÇO, P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 134, p.489-496, mar. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; RIZATTI, E.; BARBOSA, C. S. Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados à seco. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 638-657, 2011.

MOHAMAD, G.; ROMAN, H. R.; RIZATTI, E.; RIZATTI, E.; ROMAGNA, R. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**: alvenaria estrutural. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 32. p. 1045-1076.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

OKAMURA, H; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Tokyo, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. São Carlos: Ed. EdUfscar, 2014.

PARSEKIAN, G. A.; ROMAN, H. R; SILVA, O. S; FARIA, S. M. Concrete block. *In*: GHIASS, B. I.; LOURENCO, P. B. **Long-term Performance And Durability of Masonry Structures**, p. 21-57, 2019. DOI 10.1016/b978-0-08-102110-1.00002-9.

PINTO, B. H. **Execução de blocos para alvenaria estrutural utilizando concreto fluido**. 2018. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Júlio de Mesquita Filho - Unesp, Ilha Solteira, 2018.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: PINI, 2003.

RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G.; NAKANISHI, E. Y. Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 730-746, 22 set. 2011.

RIZZATTI, E. **Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão**. 2003. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROUSSEL, N.; NGUYEN, T. L. H.; COUSSOT, P. Yield stress measurements using stoppage tests. *In*: FOURTH INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2005, Chicago. **Proceedings [...]** Chicago: [s. n.], 2005.

SAINZ-AJA, J. A; CARRASCAL, I; POLANCO, J. A; THOMAS, C; SOSA, I; CASADO, J; DIEGO, S. Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 230, p. 945-955, set. 2019. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.04.386.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas**. 2007. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2007.

SÁNCHEZ, E. **Nova normalização brasileira para a alvenaria estrutural**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G. The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 58, p.111-121, maio 2014. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.025.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance. **Biometrics**, Raleigh, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

SHRIVE, N. G. A fundamental approach to the fracture of masonry. **Third Canadian Masonry Symposium**. Edmonton: University of Alberta, 1983.

SOLIZ, V.H.V. **Efeito da altura na resistência à compressão de prismas de alvenaria de blocos cerâmicos vazados com ou sem graute**. 1995. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1995.

STEIL, R. O. **Efeito da geometria do bloco de concreto e do tipo de argamassa no desempenho à compressão de prismas de alvenaria não grauteados**. 2003. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TANGO, C.E.S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994, Florianopolis. **Proceedings** [...] Florianopolis: [s. n.], 1994. p. 21-30.

THAICKAVIL, N. N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Construction Materials**, [s. l.], v. 8, p. 23-38, jun. 2018. DOI 10.1016/j.cscm.2017.12.007.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto adensáveis**. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. Porto Alegre: Pini, 2008. 144 p.

ZAHRA, T.; DHANASEKAR, M. Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 109, p.128-138, abr. 2016. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.048.

ZHOU, K.; WU, Z.Y. Strain gauge placement optimization for structural performance assessment. **Engineering Structures**, Kidlington, v. 141, p.184-197, jun. 2017. DOI 10.1016/j.engstruct.2017.03.031.

ZHU, F.; ZHOU, Q.; WANG, F.; YANG, X. Spatial variability and sensitivity analysis on the compressive strength of hollow concrete block masonry wall. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 140, p.129-138, jun. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.099.

APÊNDICE A - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Tabela A.1 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade do CAA aos 7 e 28 dias

Dias	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
7	18,96	19,28	0,44	2,30
	19,79			
	19,09			
28	23,31	23,31	0,20	0,86
	23,11			
	23,51			
Dias	Módulo de Elasticidade (GPa)	Média (GPa)	Sd (GPa)	C.V (%)
7	25,69	25,44	0,63	2,49
	26,66			
	24,79			
28	27,00	27,82	0,86	3,09
	28,71			
	27,74			

Tabela A.2 - Resistência dos blocos vazados de concreto aos 7 e 28 dias

Tipo de Bloco	Dias	Área Bruta	Média (MPa)	Sd (MPa)	Área Líquida	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
GC-1	7	11,80	11,16	0,57	18,47	17,47	0,89	5,09
		10,73			16,79			
		10,95			17,14			
	28	14,75	14,94	0,25	23,08	23,38	0,40	1,70
		15,23			23,83			
		14,85			23,24			
GC-2	7	9,23	9,21	0,86	16,40	16,36	1,53	9,35
		10,06			17,87			
		8,34			14,81			
	28	11,72	11,39	1,02	20,82	20,23	1,81	8,95
		12,21			21,68			
		10,25			18,20			
GH-1	7	10,34	10,35	0,22	17,23	17,24	0,37	2,14
		10,57			17,62			

		10,13			16,88			
		13,16			21,32			
	28	12,23	12,73	0,47	21,93	21,21	0,78	3,66
		12,79			20,39			
GH-2		7,54			14,57			
	7	8,64	8,16	0,57	16,71	15,78	1,10	6,94
		8,31			16,07			
		10,44			20,19			
	28	9,53	10,20	0,59	18,43	19,73	1,14	5,76
		10,64			20,56			
GR-1		8,67			15,40			
	7	9,60	9,33	0,57	17,05	16,56	1,01	6,11
		9,70			17,22			
		11,46			20,34			
	28	11,39	11,64	0,37	20,22	20,66	0,66	3,20
		12,07			21,42			
GR-2		8,41			15,54			
	7	9,01	8,92	0,46	16,64	16,47	0,86	5,21
		9,33			17,23			
		10,18			18,80			
	28	11,93	10,82	0,96	22,04	19,99	1,78	8,90
		10,36			19,13			

Tabela A.3 - Absorção de água dos blocos vazados de concreto

Tipo de Bloco	Massa seca M1 (g)	Massa saturada M2 (g)	Absorção (A%)	Média	Sd	C.V (%)
GC-1	11800	12715	7,75	7,28	0,43	5,96
	12035	12900	7,19			
	11880	12700	6,90			
GC-2	10170	10920	7,37	7,33	0,14	1,92
	10065	10815	7,45			
	10170	10900	7,18			
GH-1	10770	11625	7,94	7,78	4,64	4,64
	10750	11615	8,05			
	10850	11650	7,37			
GH-2	9760	10455	7,12	7,18	0,14	1,93
	9730	10420	7,09			
	9530	10230	7,35			
GR-2	9900	10600	7,07	7,53	0,41	5,41

	9980	10750	7,72			
	10030	10815	7,83			
GR-2	9620	10305	7,12			
	9490	10170	7,17	7,03	0,19	2,73
	9790	10457	6,81			

Tabela A.4 - Resistência à compressão das argamassas

Corpo-de-Prova	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
1	11,80			
2	11,76			
3	11,80			
4	12,05	11,76	0,25	2,16
5	11,88			
6	11,29			

Tabela A.5 - Resistência à compressão dos prismas

Tipo de Prisma	Área Bruta	Média (MPa)	Sd (MPa)	Área Líquida	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
PGC-1	14,83			23,21			
	12,22			19,12			
	11,63	12,89	1,84	18,20	20,17	2,67	13,21
	15,78			24,69			
	15,54			24,32			
	15,50			24,25			
PGC-2	12,50			22,21			
	8,18			14,52			
	10,13	9,15	2,24	18,00	16,24	3,98	24,48
	8,22			14,61			
	6,69			11,89			
PGH-1	13.33			22.22			
	13.53			22.56			
	11.63	12.55	2.59	19.38	20.92	4.31	20.62
	9.37			15.62			
	16.74			27.91			
	10.71			17.85			
PGH-2	11,50	10,92	1,51	22,23	21,12	2,91	13,79

	9,08			17,56			
	11,36			21,96			
	12,89			24,92			
	9,79			18,93			
PGR-1	9,86			17,51			
	10,61			18,84			
	11,69	10,07	1,60	20,76	17,88	2,84	15,88
	8,43			14,96			
	11,80			20,96			
	8,04			14,27			
PGR-2	10,91			20,15			
	7,66			14,14			
	7,10	8,81	2,25	13,12	16,27	4,16	25,54
	12,37			22,84			
	7,18			13,26			
	7,65			14,12			

APÊNDICE B - TESTES ESTATÍSTICOS

Neste apêndice, será apresentado os testes estatísticos que vão colaborar para uma melhor compreensão dos resultados e fazer uma análise rigorosa dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água e resistência à compressão dos blocos e prismas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SISVAR. A seguir será dada uma breve explicação dos testes estatísticos utilizados nesta pesquisa.

B.1 Análise de Variância (ANOVA: Analysis of variance)

A Análise de Variância (ANOVA) é um método utilizado para analisar a igualdade de três ou mais médias populacionais, com base na análise das variâncias amostrais. Particularmente, a ANOVA verifica se várias populações possuem a mesma média, comparando o afastamento entre as médias amostrais com determinadas variações presentes dentro das amostras. Os dados amostrais são diferenciados em grupos, de acordo com a sua característica (fator). Este teste tem a peculiaridade de averiguar a influência dos fatores de forma isolada, ou de forma conjunta sobre a variável resposta.

Os resultados do teste de ANOVA fornecem um valor F e um valor p, para tomada de decisão de rejeitar ou aceitar a hipótese nula. Valores grandes de F são evidência adversa à hipótese nula de que todas as médias são iguais. Quanto menor for o valor de p, com base no nível de significância adotado, maior será a evidência contra a hipótese nula fornecida pelos dados, ou seja, mais significativa é a diferença entre as amostras. Para aceitação da hipótese nula o valor de p deve ser maior que o nível de significância estabelecido. Comumente é utilizado a letra grega alfa, para representar o nível de significância.

Se caso acontecer de rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias, para um dado nível de significância, o procedimento a ser tomado, é a comparação de médias dos fatores, através de testes de comparações múltiplas. Estes testes permitem analisar quais fatores se diferem entre si. Nesta pesquisa é utilizado o teste de Scott- Knott para comparações múltiplas. O teste de Scott-Knott (1974) aplica a razão de verossimilhança para demonstrar a significância de que n podem ser divididos em grupos que maximizem a soma de quadrados entre os grupos.

B.2. Testes estatísticos dos resultados de resistência à compressão axial dos blocos

B.2.1 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão dos blocos referida à área bruta e líquida aos 7 dias

Tabela B.1 - Análise de variância da resistência à compressão referida à área bruta aos 7 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Bloco GC-1	3	33,475	11,15833	0,3210123
Bloco GC-2	3	27,639	9,21300	0,7425130
Bloco GH-1	3	31,039	10,34633	0,0487003
Bloco GH-2	3	24,487	8,16233	0,3216103
Bloco GR-1	3	27,987	9,32900	0,3255610
Bloco GR-2	3	26,750	8,91667	0,2154263

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tipo de bloco	5	17.114872	3.422974	10.400	0.0005
Erro	12	3.949647	0.329137		
Total corrigido	17	21.064519			
CV (%) =	6.03				
Média geral:	9.5209444	Número de observações:		18	

Tabela B.2 - Teste de Teste Scott-Knott (1974) para comparação de médias de cada tipo de bloco

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Bloco GH-2	8.162	a1
Bloco GR-2	8.917	a1
Bloco GC-2	9.213000	a1
Bloco GR-1	9.329000	a1
Bloco GH-1	10.346333	a2
Bloco GC-1	11.158333	a2

Tabela B.3 - Análise de variância da resistência à compressão referida à área líquida aos 7 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Bloco GC-1	3	52,400392	17,466797	0,7914836
Bloco GC-2	3	49,088956	16,362985	2,3424856
Bloco GH-1	3	51,731452	17,243817	0,1357983
Bloco GH-2	3	47,341724	15,780575	1,2009317
Bloco GR-1	3	49,689522	16,563174	1,0266857
Bloco GR-2	3	49,410679	16,470226	0,7354325

ANOVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tipo de bloco	5	5.694609	1.138922	1.096	0.4113
Erro	12	12.465955	1.038830		
Total corrigido	17	18.160564			
CV (%) =	6.12				
Média geral:	16.6477222	Número de observações:		18	

B.2.2 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão dos blocos referida à área bruta e líquida aos 28 dias

Tabela B.4 - Análise de variância da resistência à compressão referida à área bruta aos 28 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Bloco GC-1	3	44,8220	14,9407	0,0643213
Bloco GC-2	3	34,1790	11,3930	1,0396170
Bloco GH-1	3	38,1830	12,7277	0,2170103
Bloco GH-2	3	30,6170	10,2057	0,3480543
Bloco GR-1	3	34,9110	11,6370	0,1384770
Bloco GR-2	3	32,4660	10,8220	0,9288480

ANOVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tipo de bloco	5	42.816122	8.563224	18.777	0.00002
Erro	12	5.472656	0.456055		
Total corrigido	17	48.288778			
CV (%) =	5.65				
Média geral:	11.9543333	Número de observações:		18	

Tabela B.5 - Teste de Teste Scott-Knott (1974) para comparação de médias de cada tipo de bloco

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Bloco GH-2	10.205667	a1
Bloco GR-2	10.822000	a1
Bloco GC-2	11.393000	a2
Bloco GR-1	11.637000	a2
Bloco GH-1	12.727667	a2
Bloco GC-1	14.940667	a3

Tabela B.6 - Análise de variância da resistência à compressão referida à área líquida aos 28 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Bloco GC-1	3	52,400392	17,466797	0,7914836
Bloco GC-2	3	49,088956	16,362985	2,3424856
Bloco GH-1	3	51,731452	17,243817	0,1357983
Bloco GH-2	3	47,341724	15,780575	1,2009317
Bloco GR-1	3	49,689522	16,563174	1,0266857
Bloco GR-2	3	49,410679	16,470226	0,7354325

ANOVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tipo de bloco	5	26.899527	5.379905	3.612	0.0317
Erro	12	17.872111	1.489343		
Total corrigido	17	44.771638			
CV (%) =	5.65				
Média geral:	20.8682778	Número de observações:		18	

Tabela B.7 - Teste de Teste Scott-Knott (1974) para comparação de médias de cada tipo de bloco

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Bloco GH-2	19.728333	a1
Bloco GR-2	19.989000	a1
Bloco GC-2	20.234000	a1
Bloco GR-1	20.661667	a1
Bloco GH-1	21.212333	a1
Bloco GC-1	23.384333	a2

B.3 Análise estatística dos resultados de resistência à compressão dos prismas

Tabela B.8 - Análise estatística de resistência à compressão dos prismas referida à área líquida

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Prisma PGC-1	6	133.8061	22.30102	8.271572
Prisma PGC-2	5	81.22266	16.24453	15.81276
Prisma PGH-1	6	125.5293	20.92156	18.61768
Prisma PGH-2	5	105.6066	21.12133	8.477369
Prisma PGR-1	6	107.293	17.88217	8.064745
Prisma PGR-2	6	97.64282	16.2738	17.27107

ANOVA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tipo de bloco	5	199.322683	39.864537	3.115	0.0233
Erro	28	358.285851	12.795923		
Total corrigido	33	557.608534			
CV (%) =	18.68				
Média geral:	19.1500164	Número de observações:		34	

Tabela B.9 - Teste de Teste Scott-Knott (1974) para comparação de médias de cada tipo de prisma

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Prisma PGC-2	16.244532	a1
Prisma PGR-2	16.273804	a1
Prisma PGR-1	17.882167	a1
Prisma PGH-1	20.921556	a2
Prisma PGH-2	21.121328	a2
Prisma PGC-1	22.301015	a2

Tabela B.10 - Análise estatística de resistência à compressão dos prismas referida à área bruta

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Prisma PGC-1	6	85,500	14,250	3,378
Prisma PGC-2	5	45,720	9,144	5,010
Prisma PGH-1	6	75,318	12,553	6,702
Prisma PGH-2	5	54,624	10,925	2,268
Prisma PGR-1	6	60,430	10,072	2,553
Prisma PGR-2	6	52,870	8,812	5,067

Tabela B.11 - Teste de Teste Scott-Knott (1974) para comparação de médias de cada tipo de prisma

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Prisma PGR-2	8.811667	a1
Prisma PGC-2	9.144000	a1
Prisma PGR-1	10.071667	a1
Prisma PGH-2	10.924000	a1
Prisma PGH-1	12.551667	a2
Prisma PGC-1	14.250000	a2

APÊNDICE C – CURVA TENSÃO - DEFORMAÇÃO DOS PRISMAS

Figura C.1 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 - LVDT

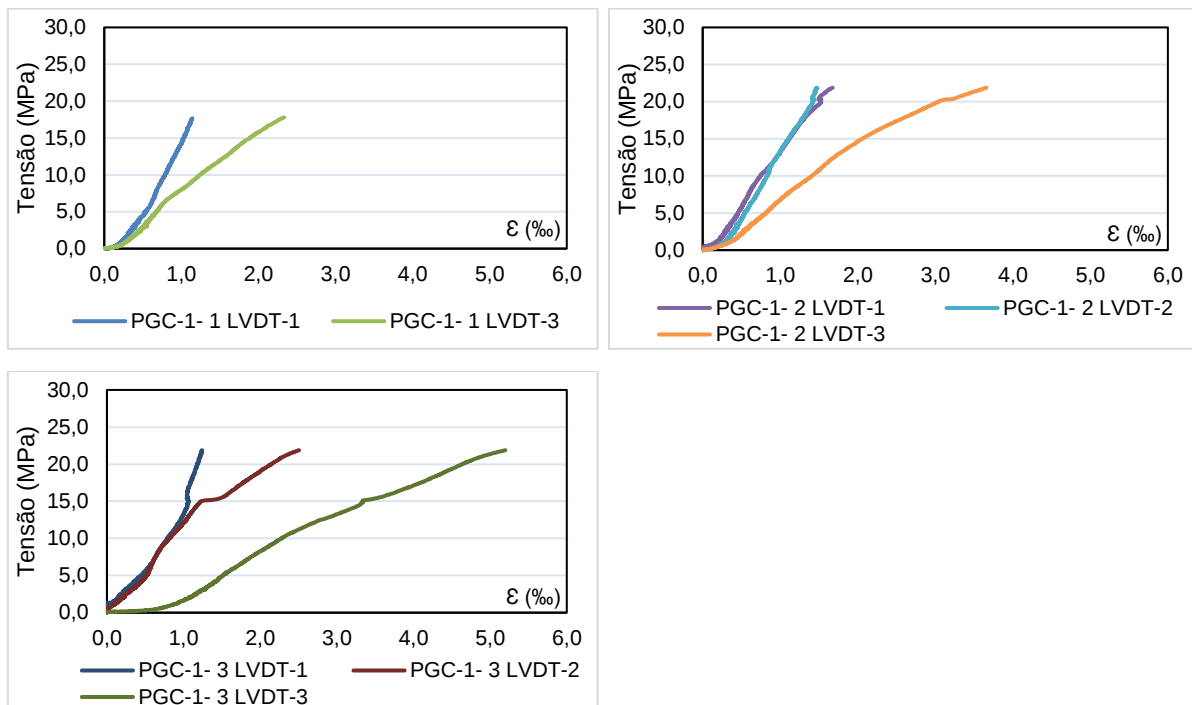


Figura C.2 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-1 – Extensômetro

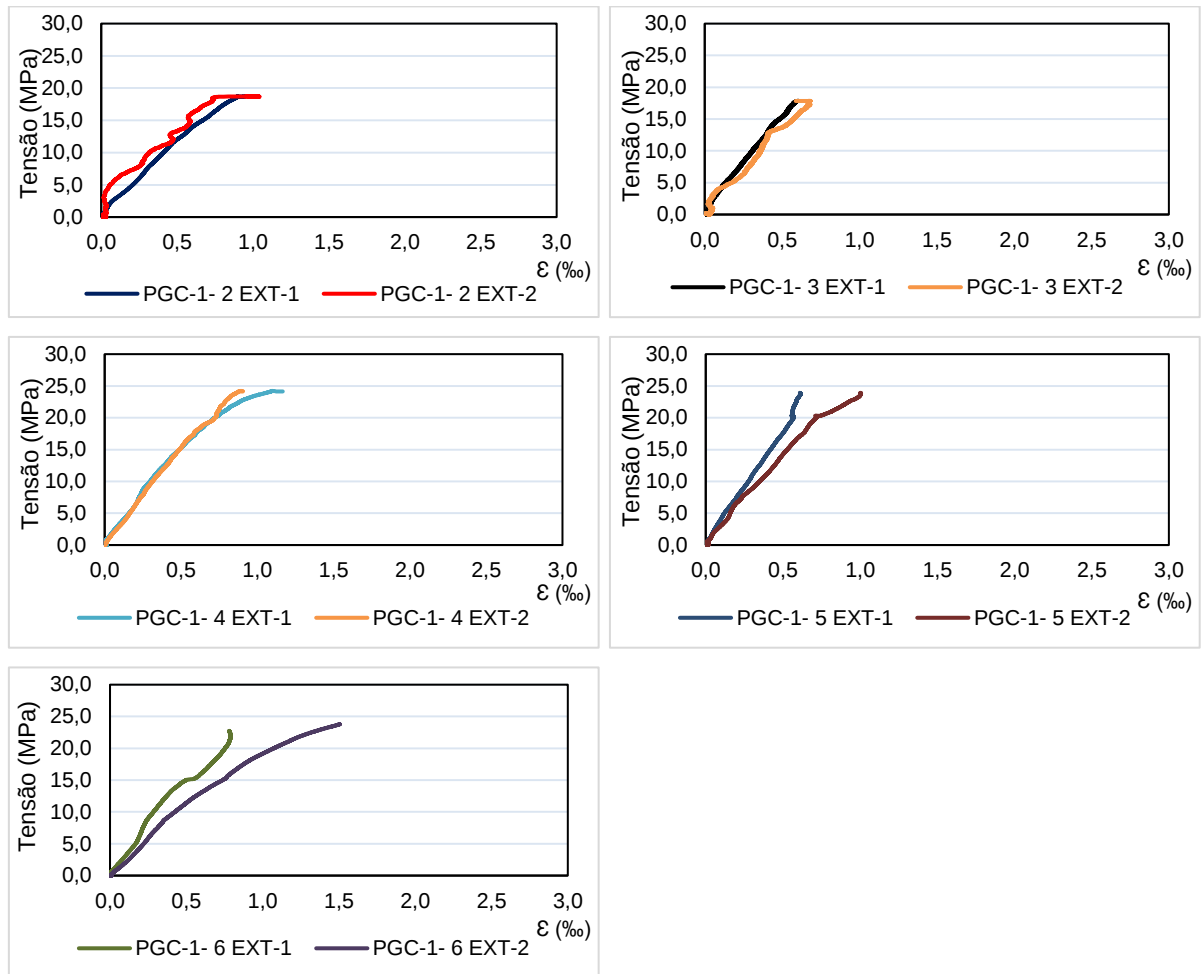


Figura C.3 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 - LVDT

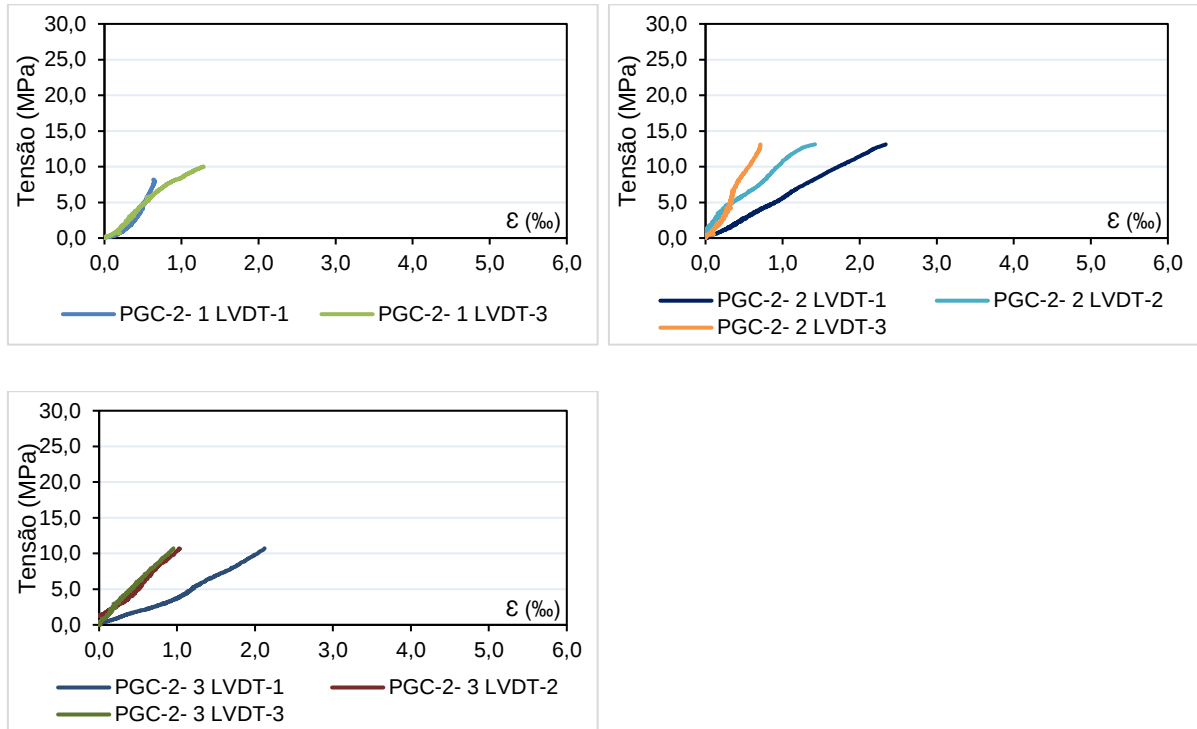
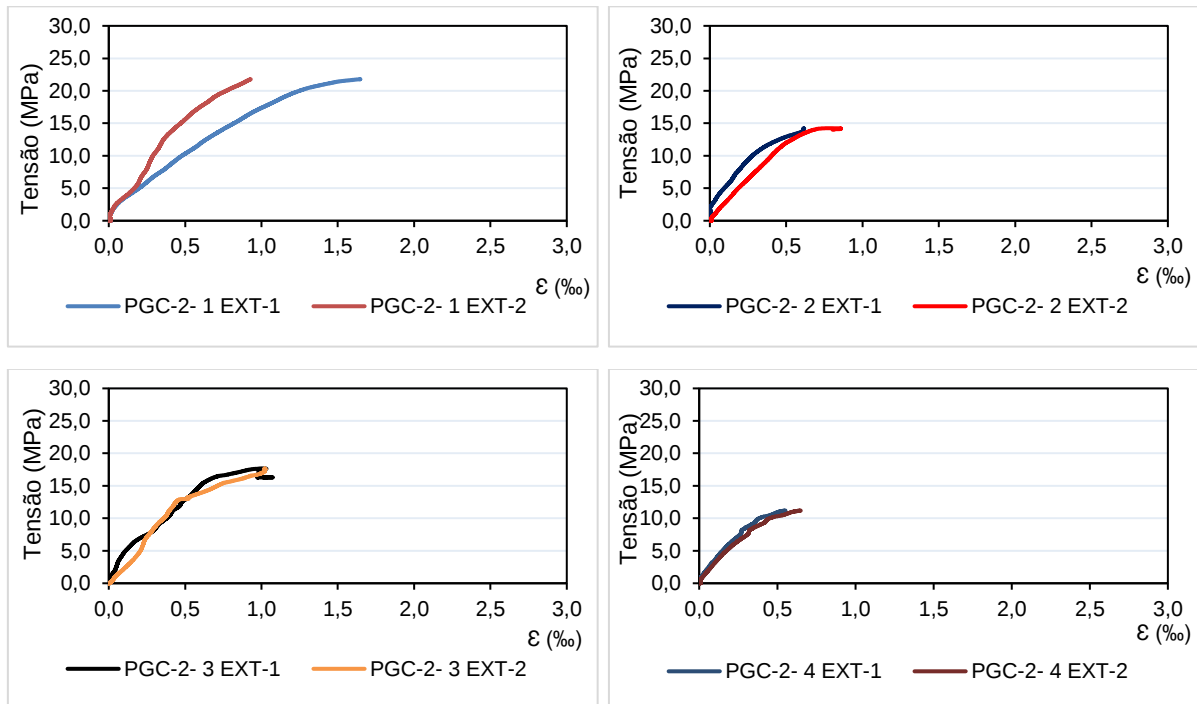


Figura C.4 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGC-2 – Extensômetro



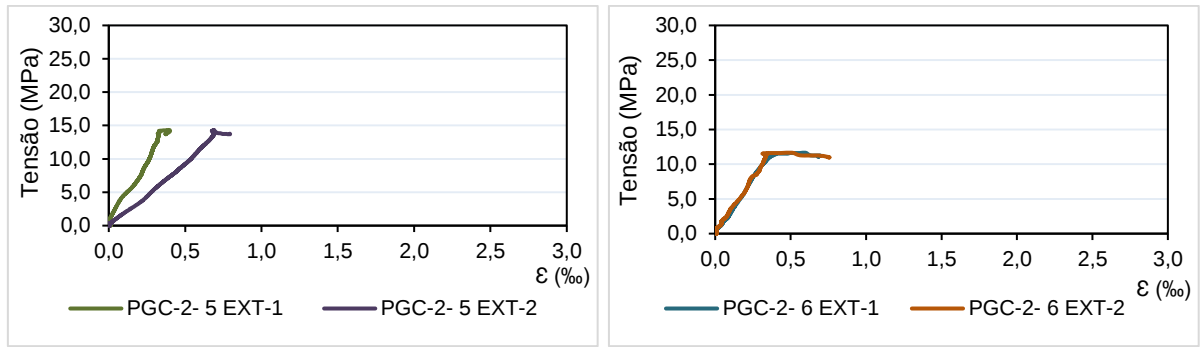


Figura C.5 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 - LVDT

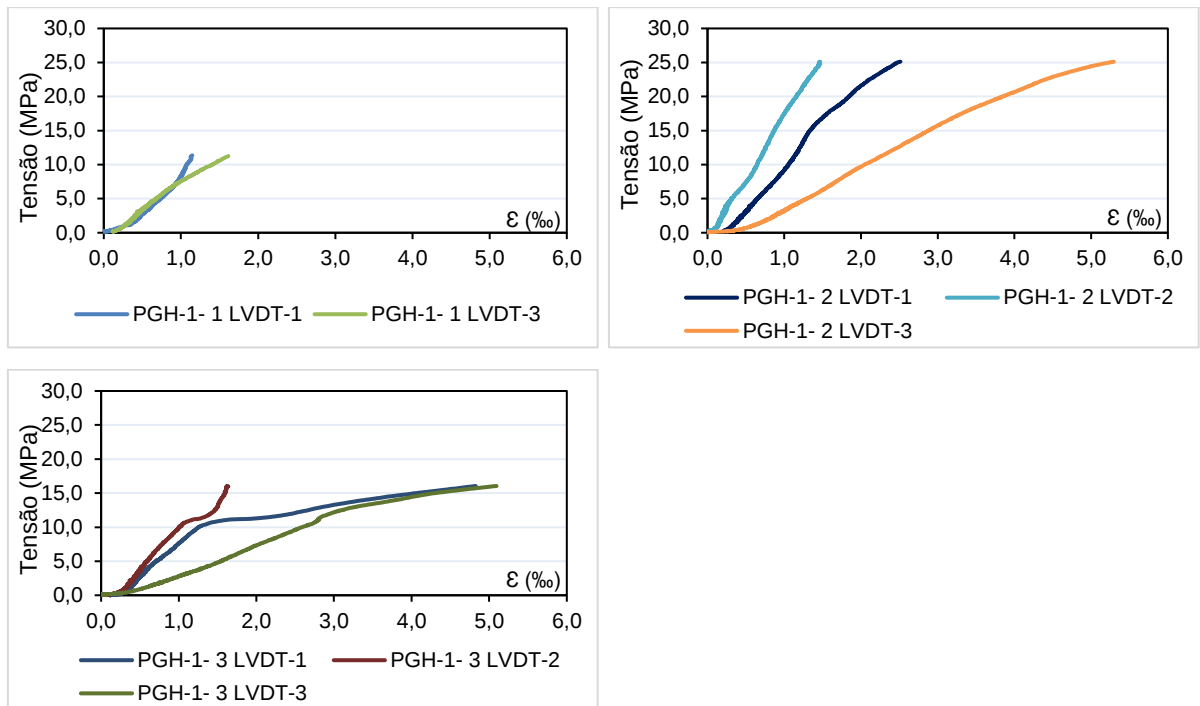
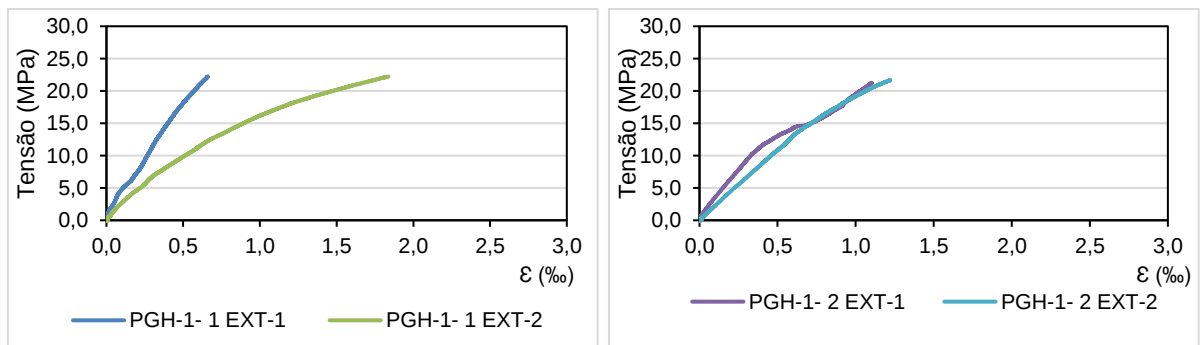


Figura C.6 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-1 – Extensômetro



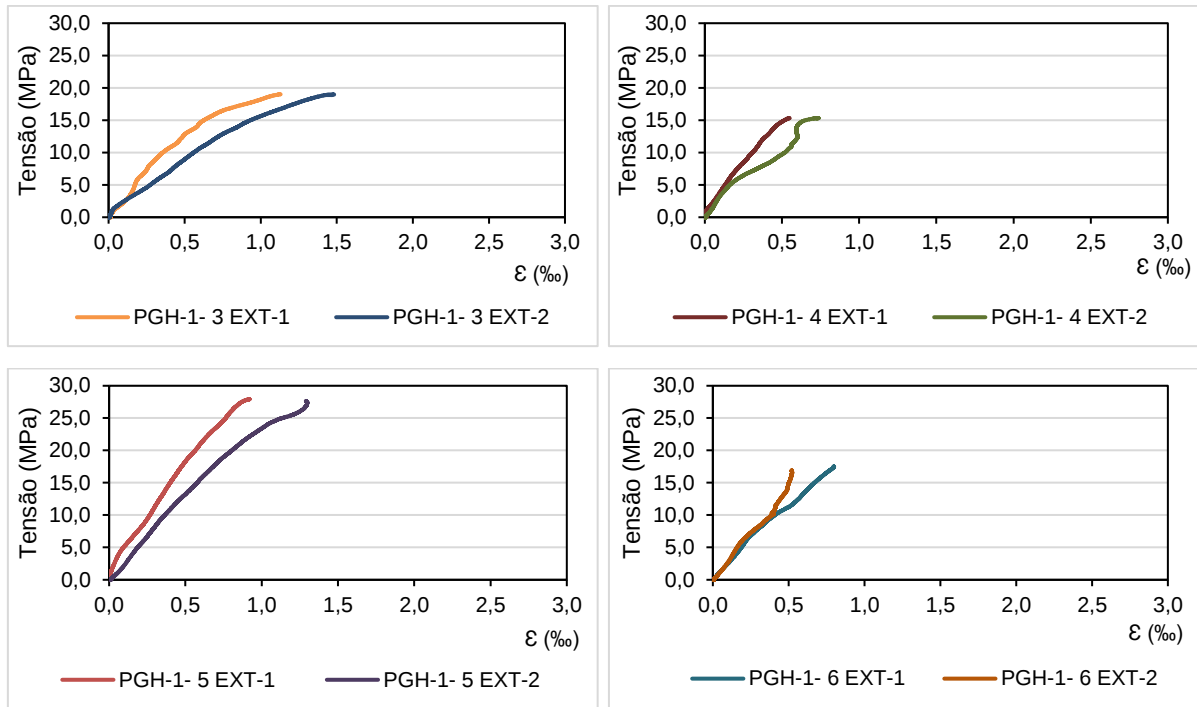


Figura C.7 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 - LVDT

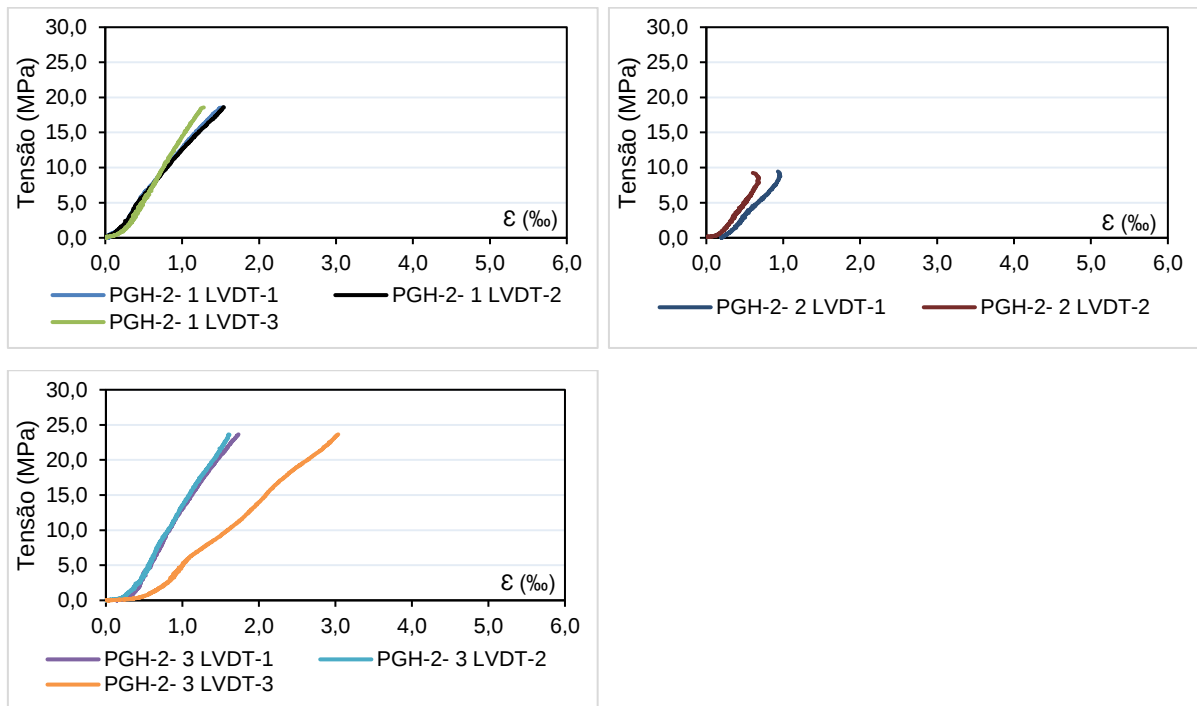


Figura C.8 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGH-2 – Extensômetro

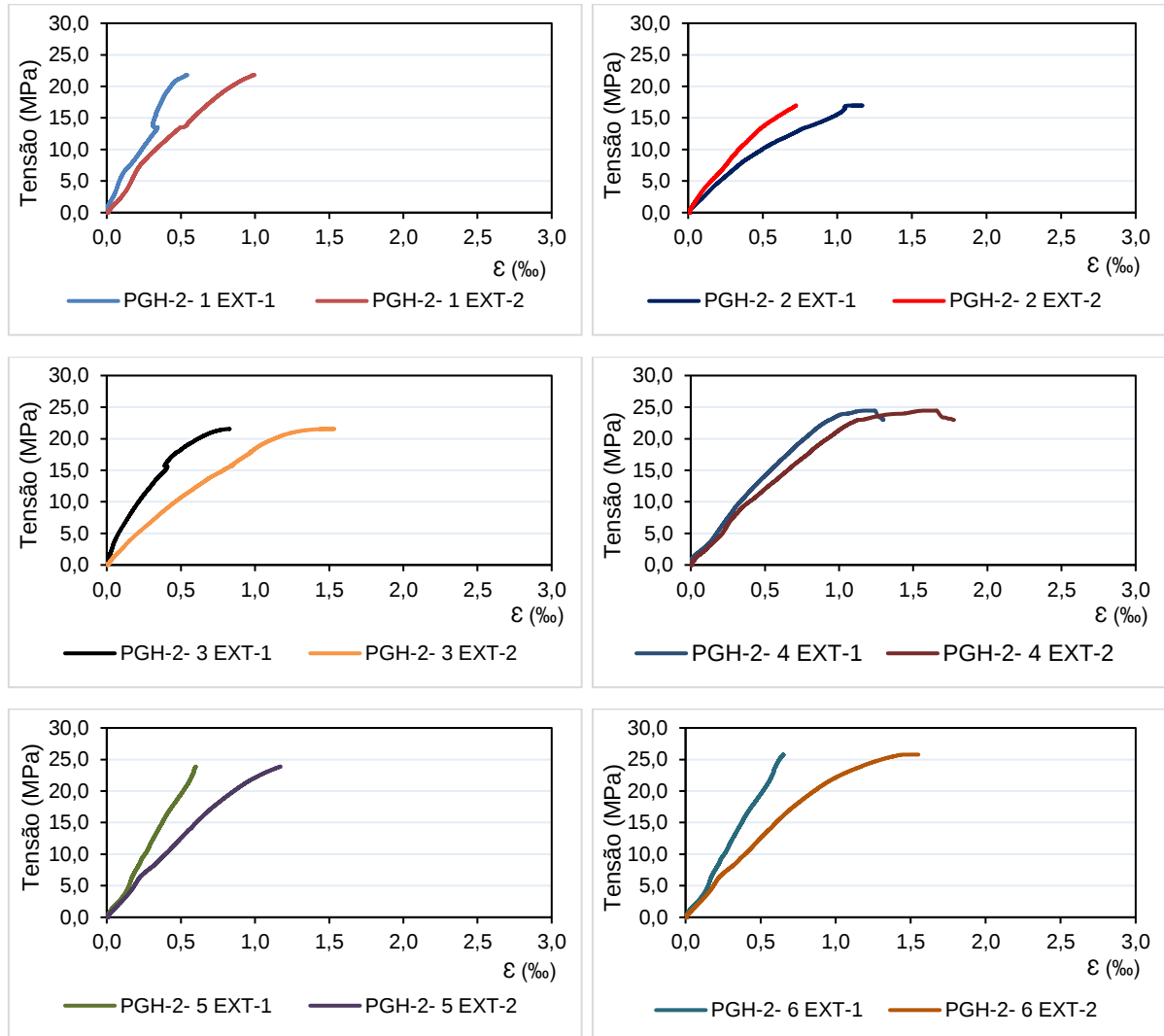
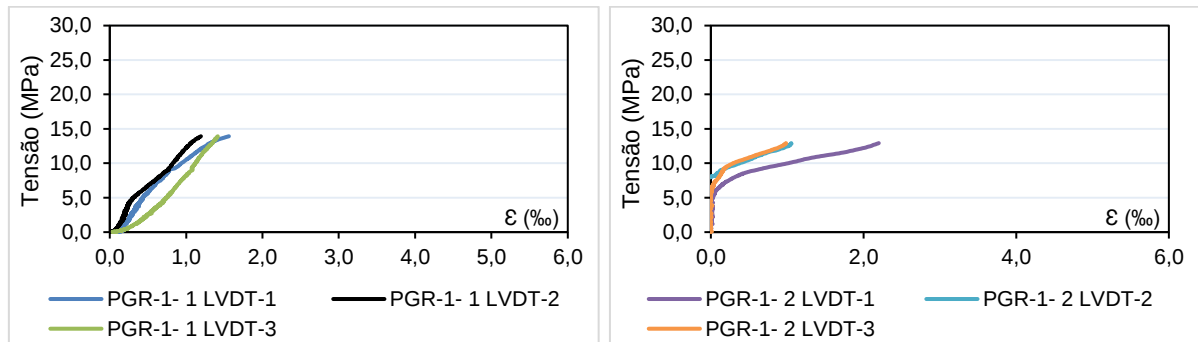


Figura C.9 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 - LVDT



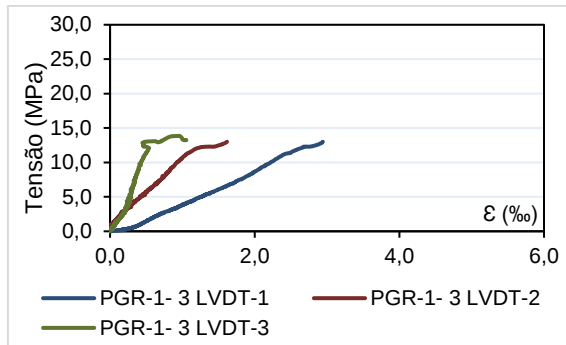


Figura C.10 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-1 – Extensômetro

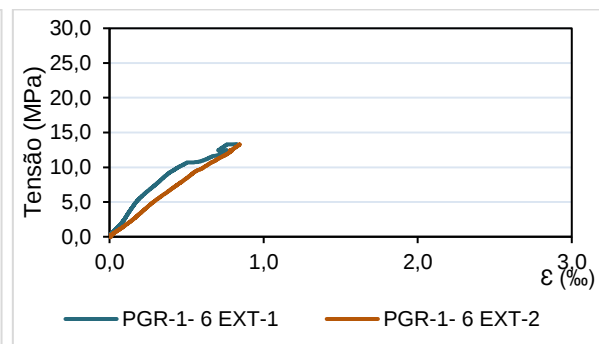
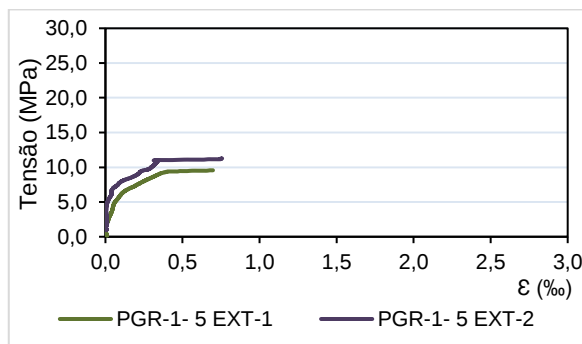
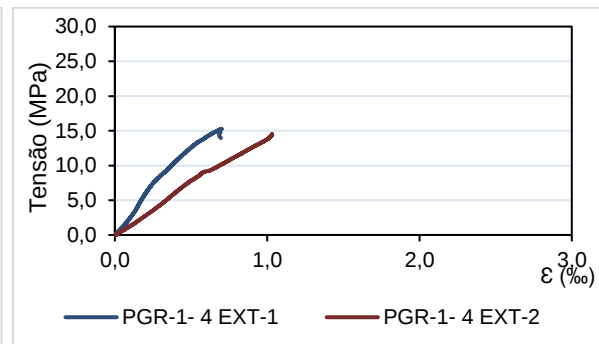
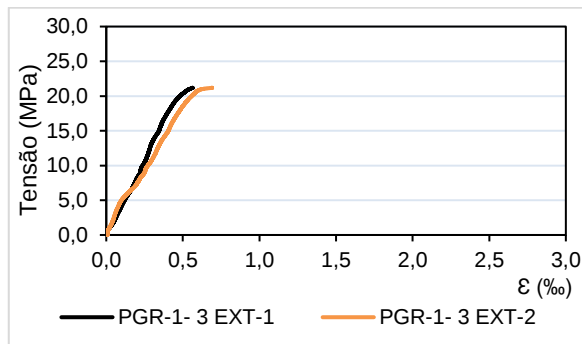
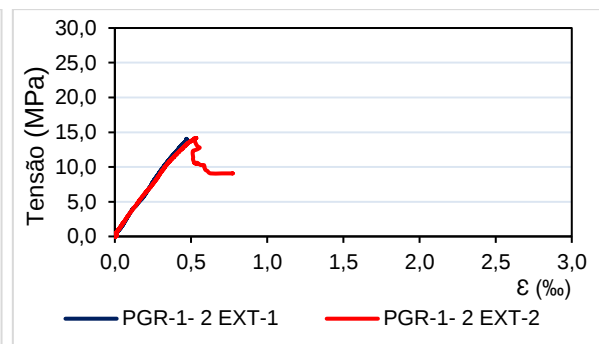
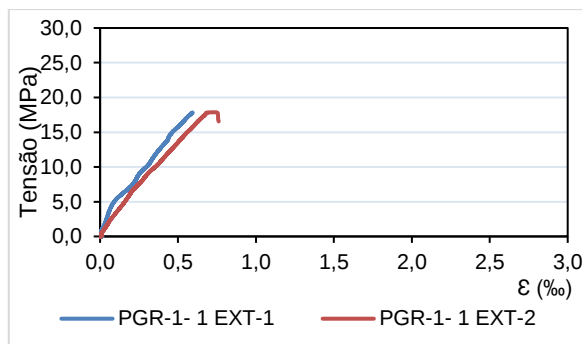


Figura C.11 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 - LVDT

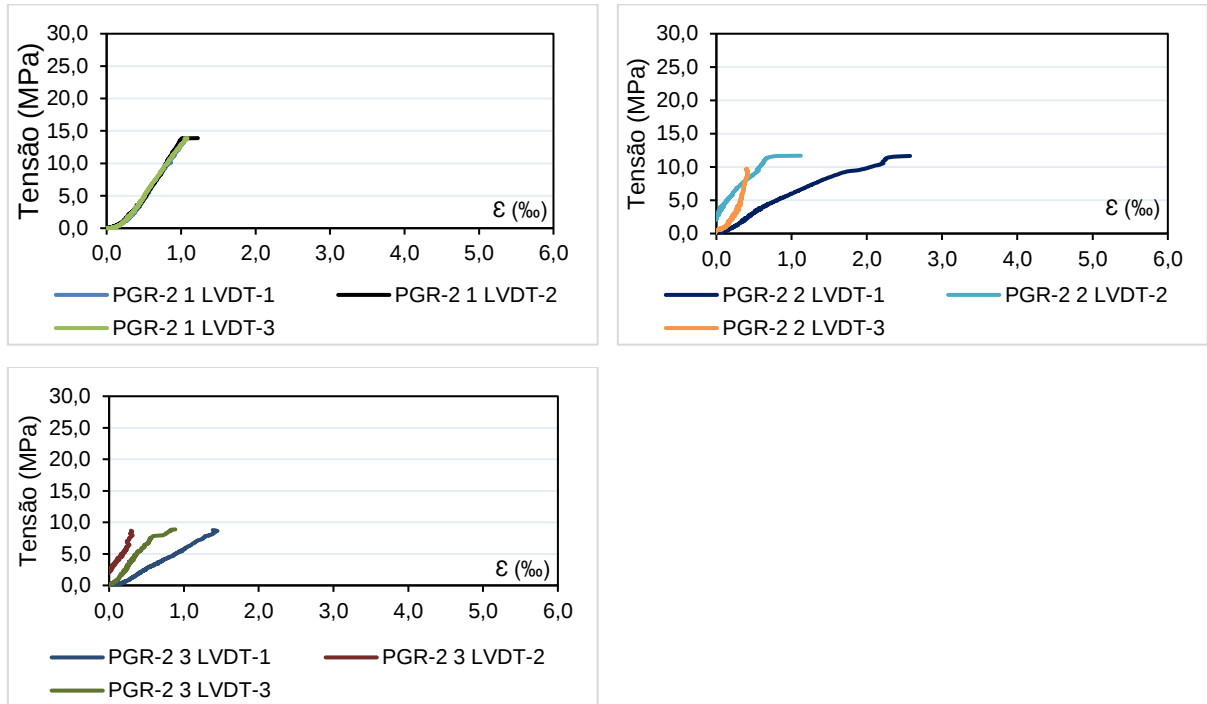


Figura C.12 - Curva tensão - deformação (área líquida) do PGR-2 – Extensômetro

