

Gustavo Henrique Nalon
Lucas Aleksander Faccini Fioresi
Mônica Cristina Pinto

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
PROPRIEDADES DA ARGAMASSA E DA ESPESSURA
DA JUNTA NO COMPORTAMENTO DA ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS**

Universidade Federal de Viçosa
Curso de Graduação em Engenharia Civil
Viçosa-MG
2016

Gustavo Henrique Nalon
Lucas Aleksander Faccini Fioresi
Mônica Cristina Pinto

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ARGAMASSA E DA
ESPESSURA DA JUNTA NO COMPORTAMENTO DA
ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Rita de Cássia Silva Sant'Anna
Alvarenga – 6514-5

Universidade Federal de Viçosa
Curso de Graduação em Engenharia Civil
Viçosa-MG
2016

Gustavo Henrique Nalon
Lucas Aleksander Faccini Fioresi
Mônica Cristina Pinto

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ARGAMASSA E DA
ESPESSURA DA JUNTA NO COMPORTAMENTO DA
ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da conclusão do curso de graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga – 6514-5

Aprovada em: 16 de novembro de 2016.

José Carlos Lopes Ribeiro,
Membro da Banca Examinadora.

Leonardo Gonçalves Pedroti,
Membro da Banca Examinadora.

Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga,
Orientadora.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus pela saúde e força ao longo de nossa vida.

Aos nossos pais, pelo amor, apoio e incentivos que foram essenciais durante nossa trajetória.

À professora Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga, pela motivação, orientação, disponibilidade e atenção dispendida ao nosso grupo durante todo este trabalho.

Aos professores José Carlos Lopes Ribeiro, Leonardo Gonçalves Pedroti e Gustavo de Souza Veríssimo, pelas ideias, contribuições e sugestões que enriqueceram nosso trabalho.

À empresa Cerâmica Argibem Ltda, pelo fornecimento dos blocos cerâmicos estruturais usados neste trabalho.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa, por todo apoio e suporte oferecido durante a realização desta pesquisa.

RESUMO

NALON, G. H.; FIORESI, L. A. F.; PINTO, M. C. **Avaliação experimental da influência das propriedades mecânicas da argamassa e da espessura da junta no comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.** 2016. 160 f. Trabalho final de curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência das propriedades mecânicas da argamassa e da espessura da junta no comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Estudos experimentais foram realizados usando prismas feitos com blocos cerâmicos estruturais submetidos à compressão axial. Foi realizado um planejamento fatorial 3^2 , em que foram considerados os fatores resistência da argamassa e espessura da junta, cada um deles com três níveis de variação. Foram produzidos três diferentes traços de argamassa, com resistência à compressão de 30%, 50% e 90% da resistência à compressão dos blocos na área líquida. Para cada nível de resistência da argamassa, foram produzidos lotes de prismas de blocos cerâmicos com espessura da junta de argamassa de 0,5 cm, 1,0 cm e 1,5 cm. A variação da resistência à compressão da argamassa não afetou significativamente a eficiência dos prismas. Prismas com argamassa mais flexível romperam por esmagamento da argamassa seguido ou não por tração no bloco. Prismas com argamassa mais rígida romperam por esmagamento do bloco ou por perda de estabilidade no cordão de argamassa fissurado. A redução da espessura da junta resultou em aumento da eficiência dos prismas, especialmente quando usado argamassa de 30% e 90% da resistência à compressão dos blocos na área líquida. Prismas com espessura de junta de 0,5 cm apresentaram ruptura frágil, independentemente das variáveis analisadas neste trabalho. Os modos de ruptura de prismas com maior espessura dependeram da deformação transversal diferencial entre seus componentes. O módulo de deformação dos prismas não foi estatisticamente afetado por nenhum dos parâmetros mencionados.

Palavras-Chave: Alvenaria estrutural, Blocos cerâmicos, Propriedades da argamassa, Espessura da junta de argamassa.

ABSTRACT

NALON, G. H.; FIORESI, L. A. F.; PINTO, M. C. **Experimental evaluation of the influence of mortar's mechanical properties and joint thickness on the behavior of clay masonry.** 2016. 160 f. Senior Thesis. (Graduation in Civil Engineering) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

This study aims to evaluate the influence of mortar's mechanical properties and joint thickness on the behavior of clay masonry. Experimental studies were performed using prisms of clay blocks under axial compression. A 3^2 factorial experiment was performed, considering three levels for each of two factors: mortar's compressive strength and prism's joint thickness. Three mortar compositions were used, which had compressive strength around 30%, 50%, and 90% of the clay blocks' net area compressive strength. For each mortar composition, prisms were produced with mortar joint thickness of 0.5 cm, 1.0 cm, and 1.5 cm. Changes in the mortar compressive strength did not affect significantly prisms' efficiency. When using more flexible mortars, specimens failed by mortar crushing followed or not by block's tensile splitting. Prisms with stiffer mortars failed by block crushing or stability loss in the cracked mortar joint. Reduction of mortar joint thickness resulted in an increase of prisms' efficiency, especially when using mortar with compressive strength of 30% and 90% of the clay blocks' net area compressive strength. Five centimeters joint thick specimens presented fragile failure, regardless of the variables analyzed in this study. Failure mechanisms of 1.0 cm and 1.5 cm joint thick prisms depend on the difference of transverse strain between its composing materials. Prisms' modulus of elasticity was not significantly affected by any of the mentioned parameters.

Keywords: Masonry structures, Clay blocks, Mortar properties, Mortar joint thickness.

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Considerações iniciais	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Organização do trabalho	16
2	Objetivos	17
2.1.1	Objetivo geral	17
2.1.2	Objetivos específicos	17
3	Revisão de literatura	18
3.1	Alvenaria estrutural	18
3.2	Componentes da alvenaria estrutural	19
3.2.1	Bloco cerâmico	19
3.2.2	Argamassa	24
3.3	Comportamento da alvenaria estrutural	29
3.3.1	Influência da resistência da argamassa	29
3.3.2	Influência da espessura da junta	31
4	Materiais e métodos	33
4.1	Caracterização dos materiais e componentes	33
4.1.1	Caracterização da areia	33
4.1.2	Caracterização dos aglomerantes	35
4.1.3	Caracterização dos blocos cerâmicos	37
4.2	Dosagem e preparo das argamassas	43
4.2.1	Metodologia de dosagem	43
4.2.2	Preparação da argamassa de assentamento dos blocos	44
4.2.3	Corpos de prova de argamassa	46
4.3	Produção de prismas	47
4.3.1	Capeamento dos blocos	47
4.3.2	Assentamento	48
4.3.3	Cura e transporte	48

4.4	Ensaio de argamassas	49
4.5	Ensaio de prismas	50
4.6	Análise estatística.....	52
4.6.1	Identificação de <i>outliers</i>	53
4.6.2	Determinação de intervalo de confiança	53
4.6.3	Análise de variância.....	53
4.6.4	Teste de Tukey	54
5	Resultados e Discussão.....	55
5.1	Caracterização dos materiais e componentes empregados.....	55
5.1.1	Caracterização da areia	55
5.1.2	Caracterização dos aglomerantes	58
5.1.3	Caracterização dos blocos cerâmicos.....	60
5.1.4	Caracterização das argamassas	65
5.2	Resultados dos ensaios de prismas.....	69
5.2.1	Curvas tensão-deformação dos prismas	69
5.2.2	Resistência à compressão e deformabilidade dos prismas	75
5.2.3	Análise estatística dos resultados	78
5.2.4	Interação entre os componentes dos prismas e modos de ruptura.....	95
6	Conclusões.....	103
6.1	Considerações finais	103
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	105
	Referências bibliográficas.....	106
	APÊNDICE A – ENSAIOS DE ARGAMASSAS	111
	APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DEFORMABILIDADE DOS PRISMAS	123
	APÊNDICE C – MECANISMOS DE RUPTURA DOS PRISMAS	128
	APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Sistema construtivo em alvenaria estrutural.....	18
Figura 3.2: Formato de blocos estruturais.....	20
Figura 3.3: Posições de medição da espessura de paredes externas e septos dos blocos cerâmicos.	21
Figura 3.4: Relação entre resistência à compressão da argamassa e seu coeficiente de Poisson.	28
Figura 4.1: Materiais de construção empregados na confecção dos prismas	33
Figura 4.2: Análise dimensional, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces dos blocos cerâmicos	38
Figura 4.3: Determinação de massa seca, úmida e aparente dos blocos cerâmicos.....	39
Figura 4.4: Capeamento dos blocos cerâmicos e ensaio de resistência à compressão	40
Figura 4.5: Ensaio de determinação indireta da resistência à tração dos blocos	41
Figura 4.6: Posicionamento dos extensômetros elétricos de fixação externa nas laterais dos blocos cerâmicos	42
Figura 4.7: Carregamento e instrumentação para determinação do módulo de deformação dos blocos cerâmicos	43
Figura 4.8: Preparo da argamassa de assentamento dos prismas.....	45
Figura 4.9: Ensaio de determinação do índice de consistência da argamassa	46
Figura 4.10: Moldagem e cura de corpos de prova prismáticos e cilíndricos de argamassa	46
Figura 4.11: Assentamento de prismas	48
Figura 4.12: Cura e transporte dos prismas	49
Figura 4.13: Ensaio de argamassa. a) Resistência à tração na flexão. b) Resistência à compressão. c) Módulo de elasticidade estático.	49
Figura 4.14: Instrumentação de prismas proposta pela ABNT NBR 15812-2:2010 e realizada no presente trabalho.	51
Figura 4.15: Aplicação de carga automatizada para os ensaios de prismas.....	52
Figura 5.1: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos	63
Figura 5.2: Curva tensão-deformação do ensaio de compressão dos blocos cerâmicos.....	64
Figura 5.3: Resistência à tração dos blocos cerâmicos.....	65
Figura 5.4: Diagrama de dosagem de argamassas para assentamento de alvenaria estrutural	66
Figura 5.5: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E0,5	70
Figura 5.6: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E1,0	71
Figura 5.7: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E1,5	71
Figura 5.8: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E0,5	72
Figura 5.9: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E1,0	72

Figura 5.10: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E1,5	73
Figura 5.11: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E0,5	73
Figura 5.12: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,0	74
Figura 5.13: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,5	74
Figura 5.14: Curva tensão-deformação desconsiderada (P6 do lote T90 E1,0).....	75
Figura 5.15: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E0,5; T30 E1 e T30 E1,5	79
Figura 5.16: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E0,5; T30 E1 e T30 E1,5	80
Figura 5.17: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T50 E0,5; T50 E1 e T50 E1,5	81
Figura 5.18: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T50 E0,5; T50 E1 e T50 E1,5	82
Figura 5.19: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T90 E0,5; T90 E1 e T90 E1,5	83
Figura 5.20: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T90 E0,5; T90 E1 e T90 E1,5	84
Figura 5.21: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5	85
Figura 5.22: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5	86
Figura 5.23: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E1; T50 E1 e T90 E1	87
Figura 5.24: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E1; T50 E1 e T90 E1	88
Figura 5.25: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5	89
Figura 5.26: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5	90
Figura 5.27: Diagrama de caixas para módulos de deformação de todos os lotes de prismas	91
Figura 5.28: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para módulos de deformação dos lotes de prismas	92
Figura 5.29: Curva de tendência para os lotes feitos com T30.....	93
Figura 5.30: Curva de tendência para os lotes feitos com T50.....	94
Figura 5.31: Curva de tendência para os lotes feitos com T90.....	94
Figura 5.32: Curva de tendência para todos os dados de resistência à compressão de prisma obtidos nesse trabalho.	95
Figura 5.33: Mecanismo de ruptura do prisma P1 do lote T30 E0,5.....	99
Figura 5.34: Mecanismo de ruptura do prisma P6 do lote T30 E1,5	100
Figura 5.35: Mecanismo de ruptura do prisma P4 do lote T90 E0,5	101
Figura 5.36: Mecanismo de ruptura do prisma P3 do lote T90 E1,5	101
Figura 5.37: Mecanismo de ruptura do prisma P1 do lote T90 E1,0.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas à dimensão efetiva	20
Tabela 3.2: Tolerâncias dimensionais relacionadas à média das dimensões efetivas	21
Tabela 3.3: Tolerância dimensional para planeza das faces e o desvio em relação ao esquadro.....	21
Tabela 3.4: Tipos e características de argamassas mistas de cal e cimento segundo a normatização americana.	29
Tabela 3.5: Redução da resistência à compressão com aumento da espessura da junta.	31
Tabela 4.1: Valores de ψ em função da quantidade de blocos da amostra	40
Tabela 4.2: Traços de argamassa produzidos na etapa de dosagem.	44
Tabela 4.3: Características dos prismas produzidos neste trabalho	47
Tabela 5.1: Composição granulométrica da areia.....	55
Tabela 5.2: Materiais pulverulentos na areia	56
Tabela 5.3: Massa específica da areia.....	57
Tabela 5.4: Massa unitária no estado solto da areia (4 determinações)	57
Tabela 5.5: Massa unitária no estado compacto da areia (4 determinações)	57
Tabela 5.6: Massa específica do cimento e da cal	58
Tabela 5.7: Determinação da água da pasta de consistência normal	58
Tabela 5.8: Determinação da resistência à compressão do cimento	59
Tabela 5.9: Características geométricas dos blocos de concreto	60
Tabela 5.10: Absorção dos blocos cerâmicos	61
Tabela 5.11: Área líquida dos blocos cerâmicos.....	61
Tabela 5.12: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos.....	62
Tabela 5.13: Módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos, referido à área bruta.....	63
Tabela 5.14: Resistência à tração dos blocos cerâmicos.....	64
Tabela 5.15: Consistência e resistência à compressão (f_c) para os traços produzidos para dosagem da argamassa.....	65
Tabela 5.16: Traços de argamassa produzidos: proporções entre constituintes e condições de preparo ...	67
Tabela 5.17: Resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos.....	67
Tabela 5.18: Resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos	68
Tabela 5.19: Módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos	69
Tabela 5.20: Propriedades mecânicas e espessura da junta dos prismas	76
Tabela 5.21: Comparação entre módulo de deformação na área bruta aqui obtidos com os valores da literatura	77

Tabela 5.22: Eficiência prisma/bloco para os diferentes lotes ensaiados	77
Tabela 5.23: Coeficientes de redução de resistência e rigidez com aumento da espessura obtidos nesta pesquisa.....	78
Tabela 5.24: Comparação entre resistências e rigidezes dos componentes da alvenaria.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA: Analysis of Variance (Análise de Variância)

ASTM: American Society for Testing and Materials

CH: Cal hidratada

CP: Corpo de prova

CP II E-32: Cimento Portland Composto com adição de escória

CV: Coeficiente de variação

DEC: Departamento de Engenharia Civil

DP: Desvio padrão

IC: Intervalos de confiança

GPa: Giga Pascal

LMC: Laboratório de Materiais de Construção

LVDT: Linear Variable Differential Transformer (Transdutores de Deslocamento Variável Linear)

MPa: Mega Pascal

NBR: Norma Brasileira

NM: Normalização no Mercosul

UFV: Universidade Federal de Viçosa

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A alvenaria é um sistema construtivo que se encontra entre as formas mais antigas de construção empregadas pelo homem. Percebe-se que, no passado, o conhecimento da capacidade portante da estrutura e dos seus materiais era empírico, a partir de experiências passadas de geração a geração. Isto resultou em projetos com paredes espessas, com perda de espaço interior, aumento de tempo, mão-de-obra e custos (SANTOS, 2008).

Segundo Gomes (1974), a primeira tentativa para elaboração de especificações para tijolos comuns maciços foi em 1931. Uma comissão elaborou um texto básico e delineou os ensaios necessários. Esse texto foi baseado no Código Saboya e no Caderno de Obrigações da Prefeitura do Distrito Federal e utilizou várias publicações estrangeiras do período entre 1895 e 1931. Porém, somente em 1977 foi formada a primeira comissão para a criação de uma norma brasileira para projeto de alvenaria estrutural.

Parsekian e Soares (2010) afirmam que foi a partir daí que a estrutura de alvenaria projetada e construída de forma empírica deu lugar ao que se pode chamar hoje de alvenaria estrutural, na qual a estrutura é dimensionada a partir de conceitos técnicos e detalhada de forma racional.

Costa (2014) afirma que “hoje em dia tem havido uma progressiva busca da racionalização dos processos construtivos, visando ao aumento da produtividade, a redução dos custos de construção e sustentabilidade”. Projetos de edificações em alvenaria estrutural atendem a estes requisitos, pois o processo exige um rígido controle de qualidade, diminuindo assim improvisos e desperdícios associados a uma maior rapidez na execução.

Leão (2008) diz que, apesar do grande número de pesquisas existentes, a alvenaria estrutural ainda não tem o comportamento totalmente entendido. Modelos de cálculo ainda precisam ser aprimorados e adaptados às diferentes características dos materiais existentes. Além disso, materiais variam suas propriedades em cada região. Assim, deve-se preocupar também em estudar, conhecer e caracterizar os diferentes materiais existentes.

O sistema construtivo em alvenaria estrutural utiliza blocos, argamassa e, eventualmente, graute para resistir e transferir os esforços solicitantes. Assim, as propriedades destes componentes e a interação entre os mesmos influenciam de forma significativa no comportamento da alvenaria estrutural. Na elaboração de projetos, a resistência à compressão dos blocos e do graute recebem primordial importância quando se determina a capacidade portante da estrutura. A resistência à compressão e rigidez da argamassa é muitas vezes colocada em segundo plano, priorizando-se suas propriedades apenas no estado fresco. Assim, visando a contribuir para a mudança desse quadro, o presente trabalho aborda um estudo da influência das propriedades das juntas de argamassa na resistência à compressão, na deformabilidade e no modo de ruptura da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

1.2 Justificativa

Este trabalho foca no estudo da influência das propriedades mecânicas da argamassa e da espessura da junta de assentamento nos comportamentos médios da alvenaria estrutural.

Muito se discute a respeito da resistência à compressão e da rigidez adequadas para a argamassa de assentamento da alvenaria estrutural. Percebe-se na literatura técnica uma grande divergência entre os valores recomendados por normas, pela prática comum ou por diferentes pesquisadores. Alguns critérios relacionam a resistência da argamassa à resistência dos blocos, referida à área bruta. Outros, referida à área líquida. Normas internacionais classificam blocos e argamassas quanto às suas propriedades, os agrupam e os compatibilizam de forma a atender as especificações dos projetos em alvenaria estrutural. Já a normatização brasileira estabelece, através da ABNT NBR 15812-1:2010 – Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 1: Projetos, uma resistência à compressão da argamassa entre 1,5 MPa e 70% da resistência característica especificada para o bloco, referida à área líquida. Gomes (1974) recomenda com base em resultados de ensaios de paredes que a resistência da argamassa deve estar entre 70% e 100% da resistência à compressão dos blocos na área bruta. Parsekian e Soares (2010) recomendam a utilização de argamassas com resistência à compressão próxima a 70% da resistência dos blocos na área bruta.

Outro aspecto importante relacionado à junta de argamassa da alvenaria estrutural constitui na sua espessura. Segundo a ABNT NBR 15812-2:2010 – Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos – Parte 2: Execução e controle de obras, o valor da espessura de juntas horizontais e verticais deve ser de (10 ± 3) mm, exceto na primeira fiada, na qual admitem-se espessuras entre 5 e 20 mm. Em trechos inferiores a 50 cm, admite-se até mesmo que a espessura atinja 30 mm. Quando a mão-de-obra não é qualificada, a espessura das juntas pode sair dos padrões normatizados. As próprias irregularidades geométricas dos blocos também podem dificultar o controle de espessuras. Com vista a quantificar o impacto de espessuras de junta inadequadas na alvenaria, justificam-se estudos que visam analisar a influência da espessura da junta no comportamento da estrutura.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 consta de uma introdução à alvenaria estrutural, na qual estão comentados generalidades e aspectos históricos da utilização deste sistema construtivo, além das justificativas para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 2 encontram-se os objetivos geral e específicos referentes a esta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos componentes básicos da alvenaria estrutural, além de um resumo de trabalhos já desenvolvidos relacionados à influência da resistência à compressão da argamassa e da espessura da junta no comportamento da alvenaria estrutural cerâmica.

No capítulo 4 tem-se uma descrição do programa experimental desenvolvido, o qual consiste na produção de prismas de blocos cerâmicos, variando-se a resistência à compressão e a espessura da junta de argamassa.

No capítulo 5 estão apresentados todos os resultados obtidos e a discussão relativa a eles.

No capítulo 6 estão mostradas as conclusões finais do trabalho.

Por fim, estão apresentados toda a bibliografia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho e os apêndices contendo tabelas, gráficos e fotos referentes aos ensaios realizados.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho foi analisar a influência da variação de propriedades da argamassa e da espessura da junta de argamassa no comportamento de prismas de blocos cerâmicos estruturais.

2.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais componentes da alvenaria estrutural (blocos cerâmicos estruturais, cimento, cal e areia);
- Dosar traços de argamassa com específicas resistências à compressão;
- Avaliar a resistência à compressão, o módulo de deformação e o mecanismo de ruptura dos prismas, quando variada a resistência à compressão e o módulo de deformação da argamassa;
- Avaliar a resistência à compressão, o módulo de deformação e o mecanismo de ruptura dos prismas, quando variada a espessura da junta de assentamento;
- Indicar a combinação mais adequada entre resistência à compressão da argamassa e espessura da junta.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural consiste em um sistema construtivo que utiliza blocos, unidos por argamassa e preenchidos ou não por graute e armadura, para formar elementos capazes de resistir e transmitir o carregamento atuante até os apoios externos. Como a própria alvenaria exerce a função estrutural, dispensa-se a necessidade de vigas e pilares, elementos típicos das estruturas convencionais em aço, concreto e madeira. Na Figura 3.1 é apresentada a execução de uma obra em alvenaria estrutural.



Figura 3.1: Sistema construtivo em alvenaria estrutural.

Fonte: ANTUNEZ Projetos e Consultoria (2010)

Ramalho e Corrêa (2003) descrevem os principais pontos positivos e negativos do sistema. Como vantagens, destacam-se a economia de formas, a redução da espessura dos revestimentos, a diminuição de desperdícios de material, além da versatilidade e rapidez de execução. Já as principais desvantagens são a existência de limitações para futuras adaptações arquitetônicas, a exigência de mão-de-obra bem qualificada, além das maiores dificuldades de se compatibilizar o projeto estrutural com os projetos arquitetônicos e de instalações elétricas e hidráulicas.

3.2 Componentes da alvenaria estrutural

A compreensão do comportamento da alvenaria é feita com base no estudo das interações entre seus materiais componentes. É importante analisar como as propriedades físicas e químicas desses componentes são afetadas por diferentes fatores. Nesse trabalho, os componentes da alvenaria estrutural caracterizados foram blocos cerâmicos e argamassa. A seguir serão apresentados alguns conceitos e características de cada um deles.

3.2.1 Bloco cerâmico

Parsekian, Hamid e Drysdale (2012) citam tijolos cerâmicos como as unidades mais utilizadas ao longo do tempo em alvenaria. Seu uso costuma ser economicamente viável devido à presença de jazidas de argila em diferentes regiões, além do seu histórico de boa aparência e baixa manutenção.

A norma brasileira ABNT NBR 15270-2:2005 – Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos define bloco cerâmico estrutural como o componente da alvenaria estrutural que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm. Estes são produzidos para serem assentados com os furos na vertical e podem ser de paredes vazadas, paredes maciças ou perfurados.

Na Figura 3.2 são ilustrados diferentes tipos de blocos cerâmicos. Os blocos de paredes vazadas possuem paredes externas e internas com vazados (a). Os blocos de paredes maciças são unidades em que a parede externa é maciça e a interna pode ser maciça ou não (b e c). Já os blocos perfurados são aqueles que possuem vazados distribuídos em toda a sua face de assentamento (d) (ABNT NBR 15270-2:2005).

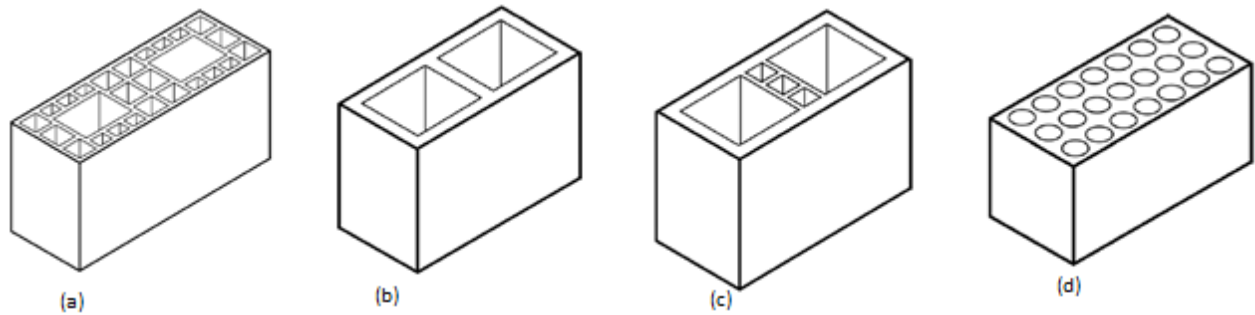


Figura 3.2:Formato de blocos estruturais

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005

Os blocos representam de 80% a 95% do volume da alvenaria, sendo determinantes de grande parte das características da estrutura (PARSEKIAN e SOARES, 2010). Para garantir o seu bom desempenho na estrutura, os blocos devem atender aos requisitos mínimos exigidos pela normatização brasileira.

3.2.1.1 Características geométricas

Segundo Parsekian e Soares (2010), a precisão dimensional do bloco está diretamente ligada à da parede. Variações na espessura do bloco causam variações na espessura da parede, assim como variações na largura e altura podem causar problemas com a modulação, pois pode não ser possível a distribuição dos blocos conforme o projeto devido os seus tamanhos diferentes.

A norma brasileira ABNT NBR 15270-2:2005 fornece as variações aceitáveis para cada dimensão do bloco. As tolerâncias são baseadas em valores individuais (Tabela 3.1) e na variação média de uma amostra (Tabela 3.2). O tamanho usual da amostra é de 13 blocos.

Tabela 3.1: Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas à dimensão efetiva

Grandezas controladas	Tolerância (mm)
Largura (L)	
Altura (H)	± 5
Comprimento (C)	

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005

Tabela 3.2: Tolerâncias dimensionais relacionadas à média das dimensões efetivas

Grandezas controladas	Tolerância (mm)
Largura (L)	± 3
Altura (H)	
Comprimento (C)	

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005

Essa mesma norma estabelece tolerâncias dimensionais para paredes externas e septos, medidos nos locais indicados na Figura 3.3.

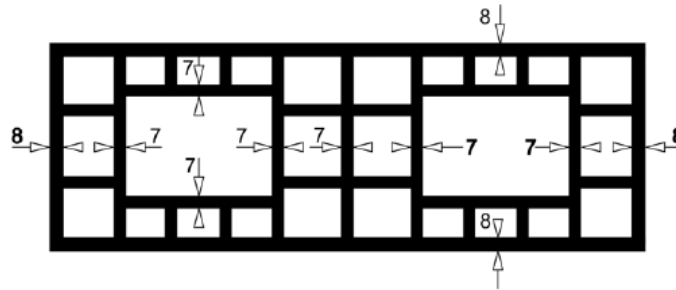


Figura 3.3: Posições de medição da espessura de paredes externas e septos dos blocos cerâmicos.

Na Tabela 3.3 apresentam-se as tolerâncias para a planeza das faces e o desvio em relação ao esquadro.

Tabela 3.3: Tolerância dimensional para planeza das faces e o desvio em relação ao esquadro

Grandezas controladas	Tolerância (mm)
Planeza das faces	≤ 3
Desvio em relação ao esquadro	

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005

3.2.1.2 Absorção e área líquida

O índice de absorção é um indicador da permeabilidade do bloco à água e é influenciado pela composição da argila, o que dificulta seu controle (CARVALHO, 2003). A ABNT NBR 15270-2:2005 estabelece que o índice de absorção dos blocos cerâmicos deve estar entre 8% e 22%.

A área líquida é a área delimitada pelas arestas do bloco descontadas as áreas dos furos presentes naquela face. Ela é calculada pela equação (3.1), obtida da ABNT NBR 15270-3:2005 – Componentes cerâmicos – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação –

Métodos de ensaio. De acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2012), este valor costuma estar entre 40% e 75% da área bruta da seção transversal.

$$A_{liq} = \frac{(m_u - m_a)}{\gamma \cdot H} \quad (3.1)$$

onde:

A_{liq} é igual à área líquida, em centímetros quadrados, com aproximação decimal;

m_u é igual à massa do bloco saturado, em gramas;

m_a é igual à massa aparente do bloco, em gramas;

H é igual à altura do bloco, em centímetros;

γ é igual à massa específica da água, tomada igual a 1, em gramas por centímetros cúbicos.

3.2.1.3 Resistência à compressão

“A resistência à compressão é utilizada há muito tempo como a principal medida de qualidade de um bloco, bem como, indiretamente, para prever as demais características da alvenaria” (PARSEKIAN, HAMID, DRYSDALE, 2012). Portanto, conhecer a resistência à compressão dos blocos é imprescindível no estudo do comportamento da alvenaria estrutural. Porém, vale ressaltar que a resistência da alvenaria não aumenta proporcionalmente com o aumento da resistência do bloco, pois há também um aumento entre a resistência deste e a resistência à compressão da argamassa (SILVA, 2007).

A ABNT NBR 15270-2:2005 estabelece o valor mínimo de 3,0 MPa, referida à área bruta, para a resistência característica à compressão (f_{bk}) dos blocos cerâmicos estruturais.

3.2.1.4 Resistência à tração

Ramalho e Corrêa (2003) esclarecem que apesar de a alvenaria estrutural trabalhar principalmente sob tensões de compressão, também haverá tensões de tração restringidas a alguns pontos específicos da estrutura, em pequena magnitude.

Segundo Garcia (2000), forças de tração se desenvolvem perpendicularmente à direção do carregamento de compressão, causando fissuração. Por sua vez, essa fissuração diminui a capacidade resistente do conjunto e um aumento do carregamento pode levá-lo à ruína. Portanto, quanto maior a resistência à tração do bloco, maior será a capacidade da parede de resistir a esforços de compressão.

Pela dificuldade de se executar uma metodologia confiável de determinação direta da resistência à tração dos blocos cerâmicos, a determinação de tal parâmetro pode ser feita por meio de um método indireto, proposto pela norma americana ASTM C1006-07:2013 – Standard test method for splitting tensile strength of masonry units.

3.2.1.5 Módulo de deformação

A capacidade de se deformar antes da ruptura é uma propriedade desejável para componentes estruturais como o bloco. O módulo de deformação pode ser conhecido através do traçado do gráfico tensão-deformação específica, obtido na compressão, a fim de avaliar e quantificar a deformação ocorrida durante o ensaio.

Por falta de norma específica para a determinação do módulo de deformação de blocos cerâmicos, a ABNT NBR 15270-3:2005 sugere o uso da ABNT NBR 8522:2008 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Esta determina o módulo de deformação a partir do gráfico tensão-deformação no intervalo os pontos de tensão 0,5 MPa e de 30% da tensão de ruptura estimada.

De acordo com Brooks (2015), o valor do módulo de deformação de blocos cerâmicos extrudados, em GPa, é cerca de 40% do valor da resistência à compressão do bloco, em MPa.

3.2.1.6 Coeficiente de Poisson

Quando submetidos a esforços axiais, os componentes tendem a deformar-se não só longitudinalmente, como também na direção transversal. O coeficiente de Poisson é definido

pela razão entre a deformação transversal de um componente e a deformação longitudinal do mesmo. Matematicamente, tem-se a equação 3.2:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transv}}{\varepsilon_{long}} \quad (3.2)$$

onde:

ν é o coeficiente de Poisson;

ε_{transv} é a deformação transversal sofrida pelo componente;

ε_{long} é a deformação longitudinal sofrida pelo componente;

Todas as variáveis envolvidas na equação 3.2 são adimensionais. O sinal negativo se deve ao fato de que, na maioria dos componentes, um alongamento longitudinal (considerado deformação positiva) gera um encurtamento na direção transversal (considerado deformação negativa).

A ABNT NBR 15812-1:2010 especifica o coeficiente de Poisson para blocos cerâmicos estruturais de alvenaria como 0,15.

3.2.2 Argamassa

As argamassas são compostas por agregado miúdo, água, aglomerante(s) e, eventualmente, aditivos, possuindo diferentes aplicações, como por exemplo o assentamento e revestimento de alvenaria, assentamento de ladrilhos e azulejos, impermeabilização, ou como elementos refratários, anticorrosivos, isolantes, entre outros.

3.2.2.1 Definição e função das argamassas

O foco deste trabalho são as argamassas para assentamento em alvenaria estrutural. De acordo com a ABNT NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, a argamassa para assentamento em alvenaria estrutural consiste em uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, indicada para ligação de componentes de vedação no assentamento em alvenaria, com função estrutural.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), além de solidarizar os blocos, esse tipo de argamassa transmite de forma uniforme o carregamento atuante através das paredes de cada unidade, absorve pequenas deformações naturais da estrutura e impede a passagem de água ou vento pelas juntas. Além disso, a argamassa ainda compensa variações dimensionais dos blocos.

3.2.2.2 Propriedades das argamassas

As principais propriedades da argamassa de assentamento no estado fresco são a trabalhabilidade e a retenção de água. A seguir, serão apresentadas informações obtidas por diferentes autores a respeito dessas propriedades:

➤ **Trabalhabilidade:**

De acordo com Franco (1988), a trabalhabilidade é a capacidade das partículas constituintes da argamassa no estado fresco de deslizarem e rolarem entre si, devido à lubrificação da pasta e ao ar incorporado na mistura. Essa propriedade é influenciada principalmente pela relação água/aglomerante, pela quantidade de cal e pela granulometria e forma dos grãos do agregado. A consistência da argamassa, um dos fatores que caracterizam a trabalhabilidade, é determinada pela ABNT NBR 13276:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. O valor adequado para o uso em alvenaria estrutural é de (230 ± 10) mm. Argamassas com trabalhabilidade inadequada são de difícil manuseio e pouco coesas, não se espalhando e não se aderindo à fiada de blocos com consistência adequada.

➤ **Retenção de água:**

Segundo Rodrigues (1985), a retenção de água da argamassa se refere à capacidade do material no estado fresco de evitar perdas consideráveis da água de amassamento por evaporação antes do uso ou por absorção pela superfície dos blocos após o assentamento. O aumento da relação cal/cimento de argamassas mistas contribui para um aumento na retenção de água da argamassa. Por possuir uma maior superfície específica quando comparada ao cimento, a cal é uma excelente retentora de água. Tal propriedade pode ser determinada conforme prescrito pela ABNT NBR 13277:2005 – Argamassa para

assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Silva (2007) destaca que uma baixa retenção de água provoca perda imediata de aderência e plasticidade da argamassa, além de prejudicar a reação de hidratação do cimento, diminuindo ganhos de resistência. Quando a água não retida pela argamassa é absorvida pelo bloco, este expande e passa a possuir maior potencial de retração por secagem.

Já as principais propriedades da argamassa de assentamento no estado endurecido são:

➤ **Aderência bloco/argamassa:**

A resistência de aderência é definida por Sabbatini (1986) como a “capacidade que a interface bloco/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se”. Assim, essa propriedade se relaciona não apenas à argamassa, mas também aos blocos que serão assentados. Rodrigues (1985) afirma que a aderência é influenciada tanto pela natureza dos constituintes e do traço da argamassa, quanto pelas características do bloco, como absorção e textura da superfície de assentamento. A falta de aderência entre bloco e argamassa é responsável por fissuras nas proximidades da junta, comprometimento da estanqueidade e problemas de umidade.

➤ **Resistência à compressão:**

A resistência à compressão é a capacidade da argamassa no estado endurecido de receber e transferir adequadamente os esforços de compressão atuantes através da área resistente do bloco. A resistência à compressão da argamassa de assentamento é inversamente proporcional à relação água/cimento da mistura. Também é interferida pela natureza dos agregados e aglomerantes utilizados, além da técnica de aplicação sobre o bloco. Os procedimentos para determinação dessa propriedade estão dispostos na ABNT NBR 13279:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Para argamassas de assentamento em projetos de alvenaria estrutural, a ABNT NBR 15812-1:2010 estabelece uma resistência à compressão mínima de 1,5 MPa e máxima de 70% da resistência característica especificada para o bloco, referida à área líquida. Argamassas de resistência

à compressão excessivamente baixa não transferem de forma adequada as tensões de compressão, enquanto que argamassas com resistência à compressão excessivamente alta não acomodam as deformações naturais da estrutura, ocasionando uma ruptura mais frágil da alvenaria.

➤ **Elasticidade:**

Segundo Sabbatini (1986), a elasticidade ou resiliência é a capacidade da argamassa de se deformar sem se romper quando submetida a um carregamento e retornar às dimensões originais quando o carregamento é removido. Para argamassas, é aceitável até mesmo que se chegue ao estado de deformação plástica caracterizado por fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais. A elasticidade de uma argamassa é inversamente proporcional à resistência à compressão e ao módulo de deformação longitudinal da mesma. Logo, a elasticidade é também influenciada pela relação água/cimento adotada na mistura, bem como pela natureza dos agregados e aglomerantes utilizados. Como o módulo de deformação e a elasticidade são inversamente proporcionais, ensaios de determinação do módulo de elasticidade do material permitem perceber quão elástico ele é. Por exemplo, o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa pode ser obtido conforme descrito pela ABNT NBR 15630:2008 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Argamassas de assentamento com elasticidade muito baixa são rígidas ao ponto de não acomodarem pequenos movimentos da estrutura e ocasionarem uma ruptura excessivamente frágil da alvenaria.

➤ **Coefficiente de Poisson:**

Swamy (1971) determinou o coeficiente de Poisson de argamassas com diferentes níveis de resistência e concluiu que ele diminui com o aumento da resistência à compressão da argamassa. Trabalhos como o de Mohamad *et al.* (2009), apontam uma tendência do coeficiente de Poisson das argamassas diminuir quando aumentada a resistência da argamassa e quando aumentadas as tensões confinantes na mesma. Esta tendência de redução do coeficiente de Poisson de argamassas com o aumento de sua resistência à compressão também foi verificado por Amjad (1990). Os dados medidos por este autor

foram plotados no gráfico apresentado na Figura 3.4. Construindo-se uma curva de tendência com estes dados, obtém-se um coeficiente de correlação satisfatório entre os parâmetros.

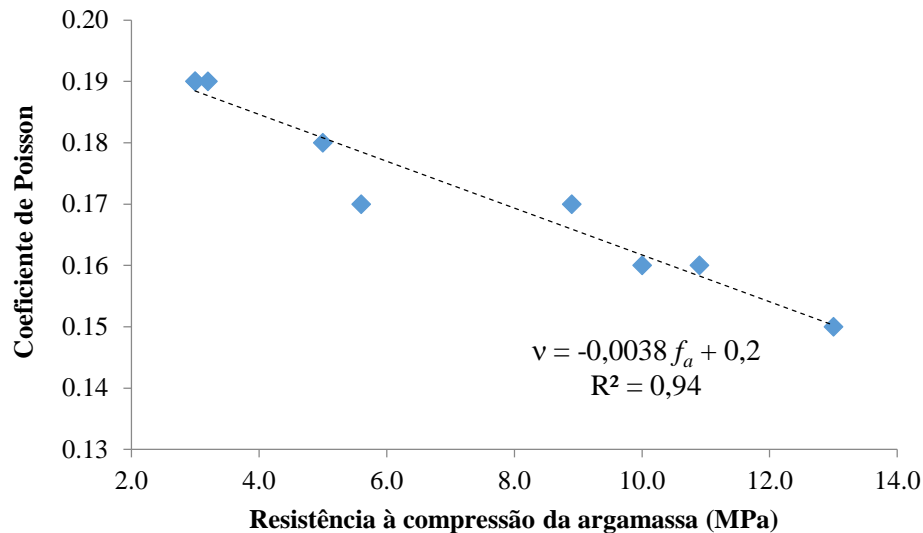


Figura 3.4: Relação entre resistência à compressão da argamassa e seu coeficiente de Poisson.
Fonte: Amjad (1990).

3.2.2.3 Composição da argamassa de assentamento

As propriedades requeridas para uma argamassa de assentamento em alvenaria estrutural podem ser obtidas utilizando-se constituintes apropriados na proporção adequada. As argamassas de cal são aquelas constituídas apenas por areia, cal e água. Elas tendem a apresentar boa trabalhabilidade e retenção de água, mas possuem baixa resistência à compressão. As argamassas de cimento são produzidas com areia, cimento e água. Apesar de rapidamente alcançarem elevada resistência à compressão, elas podem apresentar trabalhabilidade inadequada e um maior custo financeiro. Sabbattini (1986) afirma, portanto, que “as argamassas mais adequadas para paredes de alvenaria resistente são as argamassas mistas de cal e cimento”.

Na Tabela 3.4 mostram-se os tipos e características de argamassas mistas de cal e cimento, conforme estabelecido pela norma americana ASTM C270:2014 – Standard specification for mortar for unit masonry. Argamassas do tipo M possuem maior durabilidade e resistência

mecânica, podendo ser empregadas até mesmo abaixo do solo. Argamassas do tipo O possuem menor resistência à compressão, mas apresentam ótima trabalhabilidade e baixo custo.

Tabela 3.4: Tipos e características de argamassas mistas de cal e cimento segundo a normatização americana.

Tipo de argamassa	Traço em volume			Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	Retenção de água mínima (%)	Ar incorporado máximo (%)
	Cimento	Cal	Areia			
M	1	0,25	Entre 2,25 e 3 vezes a soma dos volumes dos aglomerantes	17,2	75	12
S	1	0,25 a 0,50		12,4	75	12
N	1	0,50 a 1,25		5,2	75	14
O	1	1,25 a 2,25		2,4	75	14

Fonte: ASTM C270:2014 – Padrão de especificação para argamassas de alvenaria estrutural.

3.3 Comportamento da alvenaria estrutural

Estudos analisando a influência da resistência da argamassa e da espessura da junta foram realizados por diversos autores. A seguir, serão apresentadas informações obtidas em diferentes trabalhos a respeito dessas variações:

3.3.1 Influência da resistência da argamassa

Mendes (1998) estudou a resistência de prismas de blocos estruturais cerâmicos e concluiu que o aumento na resistência da argamassa aumenta consideravelmente o fator de eficiência de prismas não-grauteados e tal aumento evidencia a necessidade de compatibilizar blocos e argamassas usados na composição de alvenaria estrutural.

De maneira análoga, Leão (2008) afirmou, a partir de seu estudo, que a variação da resistência da argamassa influenciou significativamente na resistência dos prismas. Em todos os casos, um incremento na resistência da argamassa resultou em aumento na resistência dos prismas.

Estudando prismas de blocos cerâmicos de paredes vazadas, Santos (2008) notou uma relação linear ascendente entre resistência da argamassa e resistência dos prismas. Em seu trabalho, foram analisados quatro traços de argamassa distintos, com resistência à compressão entre 4 MPa e 17 MPa. Quanto ao tipo de ruptura, foi constatado que prismas produzidos com argamassas mais fracas rompem de forma lenta, uma vez que esse tipo de argamassa é dúctil e possui maior

capacidade de absorver deformações. Era esperado que prismas com argamassas mais fortes rompessem de maneira explosiva, porém tal comportamento não foi verificado durante seus experimentos. Houve, para esse tipo de argamassa, ruptura predominantemente por fendilhamento vertical.

Dafico e Resende (2009) destacam a influência das características da argamassa no fator eficiência de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais. Dessa forma, um estudo foi realizado buscando correlacionar as propriedades da argamassa com o fator de eficiência da alvenaria. Concluiu-se que há correlação entre os dois itens analisados, porém não foi possível determinar um modelo matemático confiável que demonstre tal relação. O autor recomenda, no entanto, o emprego de argamassas mais resistentes, pois estas demonstraram maior fator de eficiência no estudo realizado.

Lima (2010) afirma que, para uma mesma espessura de junta, o aumento da resistência da argamassa produz aumento na resistência à compressão dos prismas e que tal aumento é estatisticamente significativo. Ao comparar as argamassas com maior e menor resistência de seu trabalho (7,5 MPa e 18,9 MPa, ou seja, 152% de diferença), verificou-se que o ganho de resistência à compressão dos prismas foi de apenas 60%. Isso permitiu o autor concluir que o aumento na resistência à compressão da argamassa não possui relação linear com o aumento de resistência à compressão dos prismas.

Os resultados de Oliveira (2015) corroboram com os dos autores destacados anteriormente. Há ganho de resistência à compressão dos prismas quando é usado um traço de argamassa com maior resistência à compressão. Além disso, o autor afirma que argamassas mais fortes resultaram em uma ruptura mais frágil do prisma.

Com relação ao mecanismo de ruptura de prismas não-grauteados, Franco (1988) afirma que quando é utilizada uma argamassa menos rígida que os blocos, o modo de ruptura é caracterizado pelo surgimento de fissuras de tração paralelas à direção do eixo de carregamento. Neste caso, por possuir um módulo de deformação menor que o do bloco, a argamassa tende a apresentar maiores deformações laterais que ele. Contudo, a aderência entre o bloco e a argamassa impede a

movimentação da mesma. Surgem, portanto, tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa. Quanto maior a diferença entre os módulos de deformação do bloco e da argamassa, maiores as tensões geradas. Se a máxima tensão de tração principal no bloco superar a resistência à tração do material, a ruptura ocorre por tração no bloco. Se a tensão de compressão axial na argamassa superar a sua resistência no estado confinado, a ruptura da alvenaria se dá por esmagamento da argamassa.

3.3.2 Influência da espessura da junta

O estudo realizado por Lima (2010) abrangeu a variação da espessura da junta de argamassa em prismas de blocos estruturais cerâmicos. O autor constatou que um aumento na espessura da junta causa um decréscimo estatisticamente significativo na resistência à compressão dos prismas. Ao analisar ambas as variáveis (resistência da argamassa e espessura da junta) simultaneamente, Lima (2010) não encontra interação significativa entre estas variáveis.

Mota *et al.* (2012) verificou a resistência à compressão de prismas de blocos cerâmicos executados com juntas de 10, 15 e 20 mm de espessura. Concluiu que os prismas com junta de 10 mm apresentam maior resistência média à compressão e maior eficiência.

Parsekian, Hamid e Drysdale (2012) afirmam que o aumento da espessura da junta contribui para a redução da resistência de prismas não-grauteados, ocasionando maiores deformações laterais e o aparecimento de fissuras a menores níveis de carregamento. Na Tabela 3.5 apresentam-se coeficientes de redução da resistência à compressão propostos pelos autores, quando aumentada a espessura da junta de argamassa.

Tabela 3.5: Redução da resistência à compressão com aumento da espessura da junta.

Espessura da junta (mm)	Fator de redução
6	1,00
10	0,89
13	0,75
16	0,62
20	0,48

Fonte: Parsekian, Hamid e Drysdale (2012)

Os resultados encontrados por Oliveira (2015) também confirmaram a relação de proporcionalidade inversa entre espessura da junta de argamassa e resistência à compressão dos prismas. Além disso, constatou-se que o confinamento da argamassa é mais acentuado para juntas menos espessas. Por fim, o autor argumenta contra a prática de espessuras de junta acima de 10 mm, pois, além de consumir mais material, ela também causa diminuição da resistência mecânica da alvenaria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A produção e os ensaios de prismas de blocos cerâmicos e os ensaios de caracterização de seus componentes foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (DEC/UFV). Os procedimentos adotados seguiram o recomendado pela normatização brasileira vigente. Normas internacionais e métodos de diferentes autores foram aplicados quando não encontrada referência nas normas nacionais.

4.1 Caracterização dos materiais e componentes

Os materiais de construção utilizados neste trabalho foram blocos cerâmicos, areia, cimento e cal, mostrados na Figura 4.1.



Figura 4.1: Materiais de construção empregados na confecção dos prismas

4.1.1 Caracterização da areia

Neste projeto foi utilizada areia natural, quartzosa, procedente do Rio Piranga, em Porto Firme (MG). Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização do agregado miúdo:

➤ **Determinação da composição granulométrica da areia**

A granulometria do agregado foi determinada com base no prescrito pela ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Duas amostras de agregado secas em estufa a 105°C atravessaram, uma de cada vez, um conjunto de peneiras limpas no agitador mecânico. As peneiras tinham aberturas de malha 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,2 mm, 2,4 mm, 4,5 mm, 6,3 mm e 9,5 mm. O

material retido em cada peneira após 15 minutos de peneiramento foi retirado com uma escova e pesado em uma balança com precisão de 0,001 kg.

➤ **Determinação do teor de materiais pulverulentos na areia**

Fez-se o ensaio de duas amostras do agregado secas em estufa a 105°C, de massa inicial conhecida, conforme recomendado pela ABNT NBR NM 46:2003 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Cada amostra foi inicialmente colocada para decantar em um recipiente com água. Em seguida, escoou-se a água de lavagem sobre as peneiras de 1,2 e 0,075 mm. Fizeram-se novas lavagens com água até que a água estivesse limpa. A amostra lavada foi recolocada na estufa para secagem. Após 24 horas, a massa final de cada amostra foi determinada.

➤ **Determinação da massa específica da areia**

Conforme descrito pela ABNT NBR NM 52:2002 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, foram pesadas duas amostras de 500 g de areia no estado saturada superfície seca. Em seguida, cada amostra foi deixada por uma hora em um frasco cheio de água até bem próximo à marca de 500 cm³, em temperatura ambiente. Registrou-se a massa do conjunto. Depois, o agregado foi retirado do frasco e seco em estufa a 105°C até massa constante. A massa do agregado seco foi também registrada.

➤ **Determinação da massa unitária nos estados solto e compacto da areia**

Adotou-se o Método C descrito pela ABNT NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Uma amostra de areia seca em estufa a 105°C foi colocada em um recipiente previamente tarado. O agregado foi despejado de uma altura de cinco centímetros acima do topo do recipiente até transbordar. Após nivelar a superfície, o recipiente com areia foi pesado. A massa unitária no estado compacto foi determinada pelo Método A da ABNT NBR NM 45:2006, no qual fizeram-se os mesmos procedimentos descritos para o Método C, acrescentando-se agora o adensamento do agregado (aplicação de 25 golpes da haste de adensamento) após encher o recipiente com 1/3, 2/3 e 3/3 de seu volume total.

4.1.2 Caracterização dos aglomerantes

O cimento utilizado nesse projeto é o cimento Portland composto CP II E-32, fabricado pela empresa Tupi. Utilizou-se cal hidratada comum CHIII, Supercal da Ical Indústria de Calcinação. Ambos os materiais foram devidamente estocados no Laboratório de Materiais de Construção do DEC/UFV.

➤ **Determinação da massa específica da cal e do cimento**

Seguindo a ABNT NBR NM 23:2000 – Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, colocou-se querosene em um frasco volumétrico de Le Chatelier até a marca de 0,90 cm³. A seguir, ele foi submetido a um banho termorregulador por 30 minutos para depois ser feita a leitura inicial do volume. Então, acrescentou-se uma massa de 60 g de cimento de modo que o volume da mistura atingisse um valor entre 18 e 24 cm³. Após novo banho termorregulador, fez-se a leitura final do volume. O processo foi repetido para nova determinação de massa específica do cimento. Para a cal, foram adotados os mesmos procedimentos, porém a massa adicionada ao frasco volumétrico de Le chatelier foi de 50 g em cada determinação.

➤ **Determinação do índice de finura do cimento**

O ensaio foi realizado segundo os procedimentos definidos pela ABNT NBR 11579:2013 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Primeiramente, uma amostra de 50 g do cimento foi peneirada na peneira nº 200, através de um suave vaivém horizontal por quatro minutos. O segundo passo foi golpear a peneira com um bastão e passar o pincel médio e a flanela pela superfície da peneira. Continuou-se o peneiramento por mais 17 minutos, frequentemente girando o conjunto e limpando a tela com o pincel médio. Todo o material que atravessou a peneira foi desprezado. O terceiro passo do ensaio foi acoplar tampa e fundo à peneira, segurar o conjunto com leve inclinação e, por 60 segundos, executar o vaivém rápido girando o sistema de 60° a cada dez segundos. O material passante foi guardado e pesado. Esse passo foi repetido até que a massa de cimento passante fosse menor que 0,05 g. Com a massa do material retida na peneira pôde-se determinar o índice de finura do cimento.

➤ **Determinação da água da pasta de consistência normal**

Para a execução dos ensaios de pega e expansibilidade do cimento foi necessário a preparação de uma pasta de cimento e água com uma consistência dita normal. O processo de preparação dessa pasta seguiu a ABNT NBR NM 43:2003 – Cimento portland – Determinação da água da pasta de consistência normal. Em um misturador mecânico, colocou-se 140,5 g de água e, lentamente, 500,0 g de cimento. Após 30 segundos ativou-se o misturador à velocidade baixa, por mais 30 segundos. O misturador foi então desligado e assim mantido por 120 segundos. Nos 15 segundos iniciais todo o material foi raspado até o fundo da cuba. Em seguida, o misturador foi novamente ativado, agora na velocidade alta por 60 segundos. Terminada a mistura, preencheu-se um molde tronco-cônico com a pasta de cimento, retiraram-se as bolhas com batidas na placa de vidro da base, e fez-se a rasadura do topo do molde. O conjunto foi colocado sob a sonda de Tetmajer, de modo que ela tocasse levemente a superfície da pasta. Após 45 segundos do fim do amassamento, soltou-se a sonda, e após 30 segundos de sua descida, mediu-se a distância da extremidade da sonda até a placa de vidro.

➤ **Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**

Através dos procedimentos descritos pela ABNT NBR 11582:2012 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier, seis agulhas de Le Chatelier apoiadas sobre placas de vidro foram preenchidas com a pasta de consistência normal previamente preparada. Fez-se o rasamento do topo do molde e colocou-se a outra placa de vidro e um peso sobre a agulha. Terminada a cura inicial, três das agulhas foram submetidas à cura a frio, ficando por sete dias imersas em água à aproximadamente 23°C. As outras três foram submetidas à cura a quente, ficando imersas em água à 100°C, primeiro por três horas seguidas e, depois, de duas em duas horas, até que o afastamento das hastas das agulhas se estabilizasse.

➤ **Determinação do tempo de pega do cimento**

De acordo com os procedimentos definidos pela ABNT NBR NM 65:2003 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, uma pasta de consistência normal foi preparada e colocada no molde sob a agulha de Vicat. Mediu-se periodicamente a

penetração da agulha na pasta de cimento, em câmara úmida. O instante do início de pega foi definido quando a agulha desceu até estacionar a cerca de cinco milímetros da placa de vidro. Após esse instante, inverteu-se o molde cheio e fez-se leituras no aparelho de dez em dez minutos. O tempo de fim de pega ficou definido quando o acessório anular da agulha de Vicat não mais deixou sua marca na pasta.

➤ **Determinação da resistência à compressão do cimento**

Conforme definido pela ABNT NBR 7215:1996 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, foram submetidos à compressão axial um total de 12 corpos de prova cilíndricos de dimensões 50 mm x 100 mm, produzidos em misturador mecânico com argamassa cujo traço em massa é de uma parte do cimento para três de areia normalizada, e com relação água/cimento igual a 0,48. O adensamento foi realizado através de 30 golpes com soquete, em quatro camadas. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por um dia, até serem desmoldados e colocados em água saturada de cal até o momento da ruptura. Foram submetidos à compressão axial quatro corpos de prova aos três dias, outros quatro aos sete dias e os quatro últimos aos 28 dias de idade.

4.1.3 Caracterização dos blocos cerâmicos

As unidades para alvenaria estrutural utilizadas neste trabalho foram blocos cerâmicos de paredes vazadas, fabricados por empresa localizada em Três Rios, Rio de Janeiro. O lote era composto de 180 blocos cerâmicos inteiros, de dimensões nominais de (14 x 19 x 39) cm. Os ensaios de análise dimensional, absorção, área líquida e resistência à compressão foram executados segundo prescrito pela ABNT NBR 15270-3:2005.

4.1.3.1 Características geométricas

Com um paquímetro e uma régua metálica, foram medidas as dimensões efetivas das faces de 15 blocos cerâmicos, sobre uma mesa plana e indeformável. Foram obtidos os valores da altura, largura e comprimento dos blocos, medidos nas regiões indicadas pela ABNT NBR 15270-3:2005. A seguir, mediu-se a espessura das paredes externas e dos septos, nos pontos indicados pela mesma norma, procurando-se as menores espessuras.

Com um esquadro metálico e uma régua metálica, mediu-se em cada bloco o desvio em relação ao esquadro entre uma das faces de trabalho do bloco e sua maior face de revestimento. Finalmente, determinou-se a planeza de uma das faces de revestimento de cada bloco, medindo-se a flecha máxima formada na diagonal da face, conforme descrito pela normatização. Estas medições são apresentadas na Figura 4.2.



Figura 4.2: Análise dimensional, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces dos blocos cerâmicos

4.1.3.2 Absorção e área líquida

Para determinação do índice de absorção d'água, seis blocos foram colocados em estufa por 24 horas e pesados até constância de massa, momento em que foi registrada a massa seca de cada bloco.

Para se determinar a área líquida, 13 blocos, incluindo os seis anteriormente citados, foram imersos em um tanque com água à temperatura ambiente por 24 horas. Após este tempo, os 13 blocos saturados foram retirados e colocados em uma bancada para escoamento do excesso de água. Após passar um pano úmido na superfície de cada bloco, sua massa úmida foi então medida. Para a determinação da área líquida, também foi determinada a massa aparente de cada bloco, obtida pesando-se cada corpo de prova imerso em água à temperatura ambiente. Estes procedimentos são mostrados na Figura 4.3.



Figura 4.3: Determinação de massa seca, úmida e aparente dos blocos cerâmicos

4.1.3.3 Resistência à compressão

Para a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão, 13 blocos cerâmicos foram capeados com argamassa 1:2. Primeiramente, uma das faces de trabalho dos 13 blocos cerâmicos foi capeada. Colocou-se a argamassa no molde de capeamento, sobre superfície plana e rígida, e comprimiu-se a face de trabalho umedecida do bloco contra ela. Usando martelo de borracha e nível de bolha, o bloco foi posicionado de modo que suas paredes ficassem perpendiculares à superfície de apoio. Após 24 horas, fez-se o mesmo para a outra face de trabalho. O capeamento apresentou-se plano, uniforme e com espessura menor que 3 mm. Os blocos recém capeados são apresentados na Figura 4.4.

Cada bloco capeado foi devidamente colocado entre os pratos de apoio (de dimensões 20 cm x 42 cm) da prensa de compressão EMIC, série PC 200 C, equipada com rótula esférica. Aumentou-se progressivamente e sem choques a carga de compressão aplicada sobre o corpo de prova, até sua ruptura, a uma razão de 0,05 MPa/s (tensão em relação à área bruta), conforme recomendado pela ABNT NBR 15270-3:2005. Ao término do ensaio, a carga de ruptura foi registrada. A execução do ensaio de compressão dos blocos cerâmicos é mostrada na Figura 4.4.



Figura 4.4: Caapeamento dos blocos cerâmicos e ensaio de resistência à compressão

O valor da resistência à compressão característica dos blocos cerâmicos f_{bk} foi então obtido pela equação (4.1):

$$f_{bk} = 2 \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (4.1)$$

sendo: $i = n/2$, se n for par; $i = (n-1)/2$, se n for ímpar;

onde:

- f_{bk} é a resistência à compressão característica dos blocos cerâmicos, em MPa;
- $f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{b(i)}$ são os valores de resistência à compressão individuais dos corpos de prova da amostra, em ordem crescente;
- n é a quantidade de blocos da amostra.

Considerou-se que o valor da resistência à compressão característica calculado pela equação (4.1) não deveria ser menor que $\psi \cdot f_{b(1)}$, onde o fator multiplicador ψ depende do número de blocos da amostra, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores de ψ em função da quantidade de blocos da amostra

Quantidade de blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	≥ 18
ψ	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: ABNT NBR 15270-2:2005

4.1.3.4 Resistência à tração

Pela dificuldade de se executar uma metodologia confiável de determinação direta da resistência à tração dos blocos cerâmicos, tal parâmetro foi obtido através de um método indireto, proposto pela norma americana ASTM C1006-07:2013 – Standard test method for splitting tensile strength of masonry units. Neste ensaio, cinco blocos cerâmicos (capeados conforme descrito no item anterior) foram comprimidos entre duas barras de aço, até que ocorresse a ruptura por tração, caracterizada por fissuras verticais nas paredes do bloco, como mostrado na Figura 4.5. O capeamento garantiu a transferência adequada de cargas ao longo da geratriz da barra de aço para o bloco, evitando o esmagamento do bloco na região de contato com a barra. Assim, a ruptura do conjunto de fato ocorreu por tração no bloco, conforme mostrado na figura.



Figura 4.5: Ensaio de determinação indireta da resistência à tração dos blocos

A resistência à tração do bloco f_{bt} foi então obtida pela equação (4.2), proposta pela normatização americana.

$$f_{bt} = \frac{2.P}{\pi.L.H} \quad (4.2)$$

onde:

- f_{bt} é a resistência à tração indireta por compressão, em MPa;
- P é a carga de ruptura, em N;
- L é a largura do bloco cerâmico, em mm;
- H é a altura do bloco cerâmico, em mm.

4.1.3.5 Módulo de deformação

A normatização brasileira não apresenta procedimentos de determinação de módulo de deformação específicos para blocos cerâmicos. Neste trabalho, optou-se por seguir o recomendado pelo Anexo D da ABNT NBR 15270-3:2005, o qual propõe a utilização dos procedimentos de aplicação de carga prescritos pela ABNT NBR 8522:2008. Essa norma descreve a obtenção do módulo de deformação tangente inicial do material equivalente ao módulo de deformação secante definido entre os pontos de tensão 0,5 MPa e 30% de sua resistência à compressão. Para aprimorar a representatividade do ensaio, optou-se por ensaiar cinco corpos de prova, ou seja, dois a mais que o recomendado pela ABNT NBR 8522:2008.

Para a medição de deformação específica longitudinal durante a aplicação de carga foram utilizados dois extensômetros elétricos de fixação externa (*clip gage*), presos às maiores faces laterais do bloco, em lados opostos, com uma fita elástica, conforme mostrado na Figura 4.6.

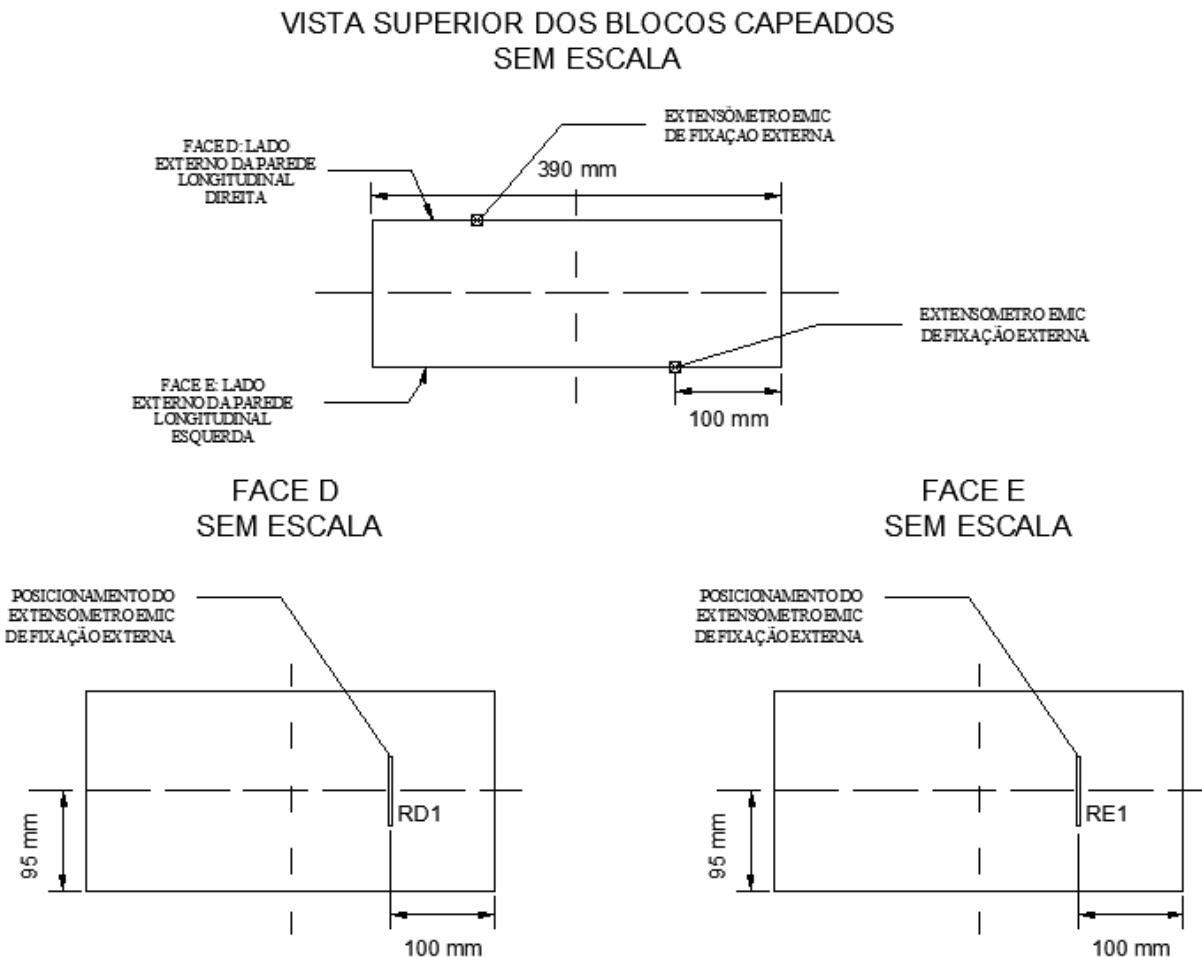


Figura 4.6: Posicionamento dos extensômetros elétricos de fixação externa nas laterais dos blocos cerâmicos

O ensaio foi realizado em uma prensa de compressão EMIC de série PC 200 C, equipada com rótula esférica e pratos para compressão de blocos, de dimensões (20 x 42) cm. Aplicou-se um método de ensaio implementado em um programa de automação compatível com a prensa EMIC (o TESC - Versão 3.04), capaz de executar os carregamentos e descarregamentos seguindo a metodologia A da ABNT NBR 8522:2008. A curva tensão-tempo, da Figura 4.7, apresenta os ciclos de carga e descarga. A tensão aplicada é referida à área bruta dos blocos.

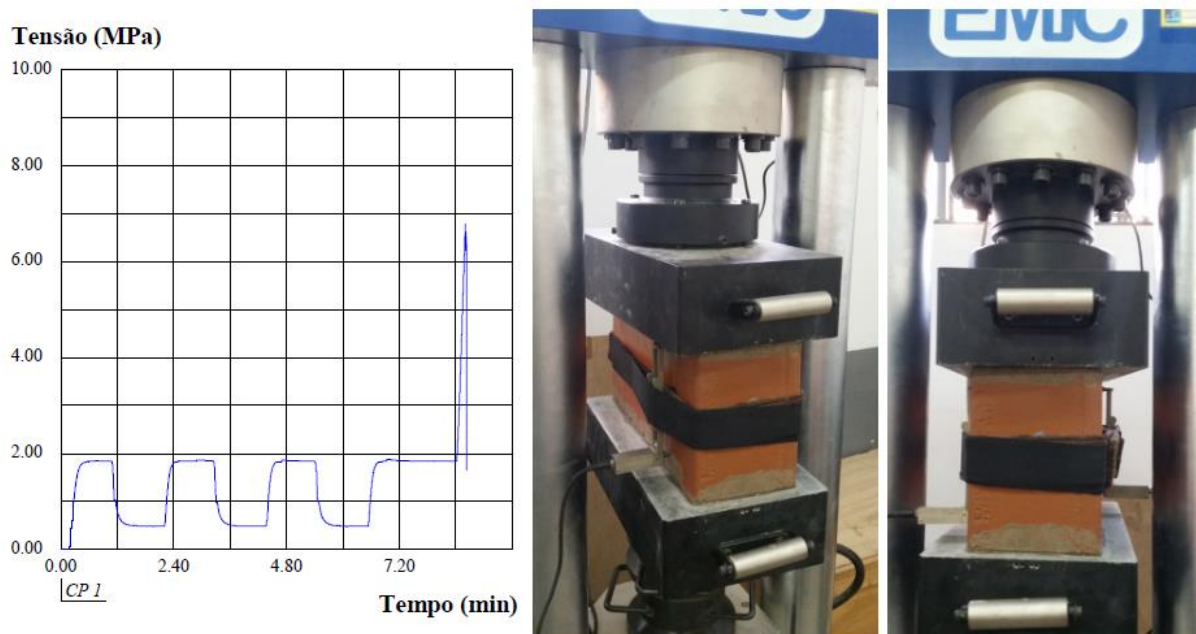


Figura 4.7: Carregamento e instrumentação para determinação do módulo de deformação dos blocos cerâmicos

4.2 Dosagem e preparo das argamassas

4.2.1 Metodologia de dosagem

Para se verificar o efeito das propriedades mecânicas da argamassa mista de cal e cimento no comportamento da alvenaria estrutural cerâmica, objetivou-se produzir: um traço de argamassa com resistência próxima ao limite máximo estipulado pela normatização, outro traço com resistência à compressão além deste limite e outro menos resistente que os demais. Nomeados como T30, T50 e T90, estes traços possuíam, respectivamente, uma resistência à compressão estimada em 30%, 50% e 90% da resistência característica à compressão dos blocos cerâmicos, referida à área líquida.

Para dosagem dos traços de argamassa, foram previamente produzidas misturas com base nas proporções de cimento, areia e cal recomendadas pela ASTM C270:2014, para uso em alvenaria estrutural, conforme descrito no item 3.2.2.3. Adotou-se para cada traço uma quantidade de água tal que proporcionasse uma consistência dentro do intervalo (230 ± 10) mm, adequado para aplicação em alvenaria estrutural. Conhecendo-se a resistência à compressão dos blocos na área líquida e as resistências estimadas fornecidas pela norma americana, foram selecionados os traços cuja resistência à compressão provavelmente estaria no intervalo desejado para o desenvolvimento da presente pesquisa. Na Tabela 4.2 apresentam-se os traços produzidos na etapa de dosagem, bem como sua classificação, resistência à compressão (quando produzida a argamassa em laboratório) e retenção de água estimadas, segundo a ASTM C270:2014.

Tabela 4.2: Traços de argamassa produzidos na etapa de dosagem.

TRAÇO	TRAÇO UNITÁRIO EM VOLUME				Tipo de argamassa	Resistência à compressão estimada (MPa)	Retenção de água estimada (%)
	Cimento	Cal	Areia	Água			
D1	1,00	2,50	9,50	5,93	O	2,4	75
D2	1,00	2,75	10,00	6,52	O	2,4	75
D3	1,00	2,00	8,50	4,75	O	2,4	75
D4	1,00	2,00	7,50	4,27	O	2,4	75
D5	1,00	2,00	6,75	4,34	O	2,4	75
D6	1,00	1,50	7,50	4,26	O	2,4	75
D7	1,00	1,00	6,00	3,48	N	5,2	75
D8	1,00	0,75	5,00	2,80	N	5,2	75
D9	1,00	1,00	5,00	3,08	N	5,2	75
D10	1,00	0,50	4,50	2,45	S	12,4	75
D11	1,00	0,50	3,50	1,96	S	12,4	75
D12	1,00	0,25	3,50	1,84	M	17,2	75

Com as resistências à compressão obtidas para os traços D1 a D12, plotou-se uma curva de dosagem com os consumos de cada constituinte, empregada para se determinar os traços adequados para as argamassas de assentamento de cada lote de prismas.

4.2.2 Preparação da argamassa de assentamento dos blocos

A argamassa para produção dos prismas foi preparada conforme definido pela ABNT NBR 13276:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, utilizando-se a cal, a areia e o cimento

caracterizados conforme descrito anteriormente. No dia anterior ao assentamento de cada prisma preparou-se uma argamassa de cal hidratada, misturando-se mecanicamente areia seca em estufa por 24 horas, cal e água. A mistura foi então pesada e deixada em processo de maturação por aproximadamente 24 horas. Imediatamente antes do início do assentamento dos prismas, o conjunto foi novamente pesado a fim de se identificar e compensar perdas de água por evaporação. Também foi adicionado o cimento e realizada uma mistura manual. A temperatura e a umidade do ambiente no momento da mistura com o cimento foram registradas. Na Figura 4.8 mostram-se detalhes do processo de preparo da argamassa.



Figura 4.8: Preparo da argamassa de assentamento dos prismas

A argamassa preparada foi então submetida ao ensaio de determinação do índice de consistência. Para isso, utilizou-se um molde tronco-cônico centralizado em uma mesa para índice de consistência, ambos com superfície ligeiramente úmida. A argamassa foi colocada no interior do tronco-cônico em três camadas de mesma altura, adensadas através de 15, 10 e 5 golpes com o soquete, respectivamente. Após o rasamento da argamassa, o tronco-cônico foi retirado e a manivela da mesa acionada de modo a provocar a subida e a queda da mesa por 30 vezes, em 30 segundos. Com um paquímetro, fizeram-se três determinações do diâmetro da argamassa espalhada sobre a mesa, cuja média corresponde ao índice de consistência da argamassa. Na Figura 4.9 mostra-se o processo de execução desse ensaio.



Figura 4.9: Ensaio de determinação do índice de consistência da argamassa

4.2.3 Corpos de prova de argamassa

Para cada traço de argamassa de assentamento dos prismas, foram moldados os seguintes corpos de prova, mostrados na Figura 4.10:

- seis corpos de prova prismáticos de dimensões (4 x 4 x 16) cm, moldados em duas camadas niveladas e adensadas mediante 30 quedas da mesa de adensamento;
- quatro corpos de prova cilíndricos de dimensões ϕ 5 cm x 10 cm, moldados em quatro camadas, cada uma adensada através de 30 golpes do soquete;



Figura 4.10: Moldagem e cura de corpos de prova prismáticos e cilíndricos de argamassa

Os corpos de prova foram desformados após 24 horas da moldagem. A cura de todos os corpos de prova de argamassa foi feita por 28 dias em câmara úmida.

4.3 Produção de prismas

Como o foco desta pesquisa é avaliar a influência da resistência da argamassa e da espessura da junta no comportamento da alvenaria estrutural, foram selecionadas diferentes composições de argamassa e espessuras de junta para o assentamento de prismas de dois blocos, não grauteados. Os prismas foram produzidos com apenas dois blocos, atendendo a limitação imposta pela distância máxima entre os pratos da prensa de compressão utilizada. Os blocos utilizados na montagem dos prismas pertencem ao lote caracterizado conforme já descrito em item anterior.

Como já mencionado anteriormente, a ABNT NBR 15812-1:2010 estabelece o limite mínimo de resistência à compressão da argamassa de 1,5 MPa e máximo de 70% da resistência característica dos blocos, referida à área líquida. Neste trabalho, buscou-se produzir prismas com as características apresentadas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Características dos prismas produzidos neste trabalho

Nome do lote de prismas	Níveis de resistência das argamassas (MPa)	Níveis de espessura das juntas de argamassas (cm)	Nº de prismas do lote
T30 E0,5		0,5	6
T30 E1,0	30% de f_{bk}^1	1,0	6
T30 E1,5		1,5	6
T50 E0,5		0,5	6
T50 E1,0	50% de f_{bk}^1	1,0	6
T50 E1,5		1,5	6
T90 E0,5		0,5	6
T90 E1,0	90% de f_{bk}^1	1,0	6
T90 E1,5		1,5	6

¹Resistência da argamassa referenciada à resistência característica dos blocos cerâmicos na área líquida.

A seguir serão apresentadas as etapas de produção dos prismas de dois blocos, de acordo com o estabelecido pelo Anexo A da ABNT NBR 15812-2:2010.

4.3.1 Capeamento dos blocos

Como os prismas são formados por dois blocos, foi necessário capear com argamassa 1:2 a face de trabalho dos blocos que ficaria em contato com as placas da prensa no momento dos ensaios

de determinação da resistência à compressão e módulo de deformação dos prismas. Foram aplicados os métodos descritos em 4.1.3.3, em apenas uma das faces de trabalho de cada bloco.

4.3.2 Assentamento

Com a argamassa produzida conforme descrito no item 4.2.2, procedeu-se ao assentamento dos blocos cerâmicos, sobre suportes de madeira planos, limpos e indeformáveis. Para tal, foram utilizados martelo de borracha, nível, régua e colher de pedreiro, conforme mostrado na Figura 4.11. Imediatamente antes do assentamento, foi umedecida a face não capeada de cada bloco cerâmico que comporia o prisma. Em todos os casos foi realizado um argamassamento total. A espessura da junta de argamassa foi ajustada em 0,5 cm, 1,0 cm ou 1,5 cm, utilizando-se taliscas de madeira com espessura correspondente como gabarito. Imediatamente após o assentamento, foram medidas com uma régua milimetrada as espessuras da junta nas laterais de cada prisma, de modo a identificar e corrigir eventuais desacordos com a espessura desejada para o lote.

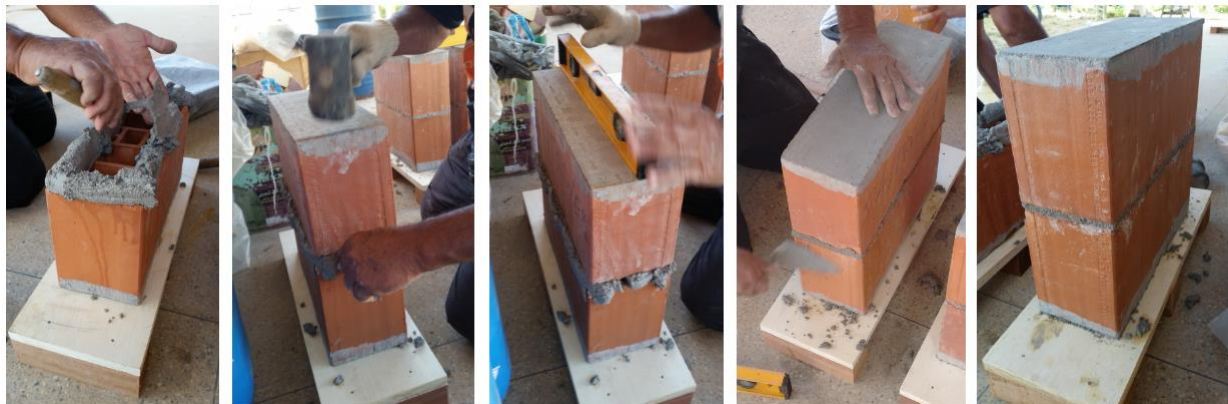


Figura 4.11: Assentamento de prismas

4.3.3 Cura e transporte

Todos os prismas foram mantidos imóveis em um mesmo local até a idade de 28 dias, protegidos do sol e do vento com uma lona plástica, conforme mostrado na Figura 4.12. Quando os prismas completavam a idade de 28 dias, eram então cuidadosamente transportados até a prensa de compressão, conforme mostrado na mesma figura.



Figura 4.12: Cura e transporte dos prismas

4.4 Ensaio de argamassas

Aos 28 dias de idade dos corpos de prova, foram realizados os seguintes ensaios de argamassa, cujas imagens estão na Figura 4.13:

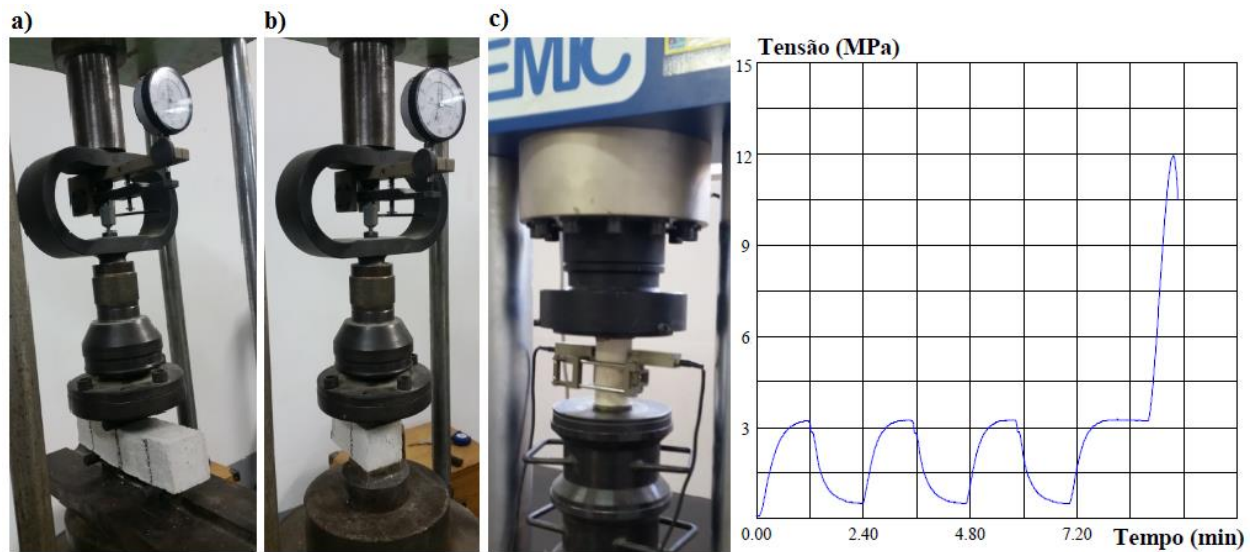


Figura 4.13: Ensaio de argamassa. a) Resistência à tração na flexão. b) Resistência à compressão. c) Módulo de elasticidade estático.

a) *Determinação da resistência à tração na flexão da argamassa:* os corpos de prova prismáticos foram colocados na prensa de compressão sobre dois roletes de suporte e sob um rolete superior, nas posições especificadas pela ABNT NBR 13279:2005. A seguir, aplicou-se carga através do rolete superior, até que o corpo de prova se quebrasse em duas partes. A carga de ruptura foi registrada a partir de um relógio comparador de constante elástica 696 kgf/mm.

b) *Determinação da resistência à compressão da argamassa:* cada metade do corpo de prova prismático foi colocada na mesma prensa, entre dois pratos de aço de dimensões (4 x 4 x 1) cm, como determinado pela ABNT NBR 13279:2005. Aumentou-se a carga de compressão até a ruptura, momento em que se registrou a carga máxima suportada, através do mesmo relógio analógico. Além dos prismáticos, um dos corpos de prova cilíndricos de dimensão ϕ 5 cm x 10 cm foi capeado com enxofre e também submetido à um ensaio de compressão axial simples, na prensa EMIC, série PC 200 C, equipada com um prato superior oscilante. A carga de ruptura registrada pelas células de carga da própria prensa foi utilizada como previsão no ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático da argamassa descrito a seguir.

c) *Determinação do módulo de deformação da argamassa:* com base na carga de ruptura prevista, ensaiaram-se três corpos de prova cilíndricos de dimensão ϕ 5 cm x 10 cm (capeados com enxofre) na prensa de compressão EMIC - PC 200 C. Como recomendado pelo Anexo D da ABNT NBR 15270-3:2005, foi utilizado um método de ensaio capaz de realizar carregamentos e descarregamentos seguindo-se a metodologia A da ABNT NBR 8522:2008. As deformações no corpo de prova foram obtidas através de extensômetros elétricos de fixação externa (*clip gage*). O módulo de deformação foi calculado no intervalo de 0,5 MPa e 30% da resistência à compressão estimada.

4.5 Ensaio de prismas

Foram determinados a resistência à compressão axial e o módulo de deformação de cada prisma, segundo a metodologia proposta pelo Anexo A da ABNT NBR 15812-2:2010. Também foi analisado o modo de ruptura de todos os prismas ensaiados. Como mostrado na Figura 4.14, cada prisma foi centralizado entre pratos de (20 x 42) cm de uma máquina universal EMIC, modelo DL 60000, em uma prensa de compressão da série PC 200 C, equipada com rótula esférica.

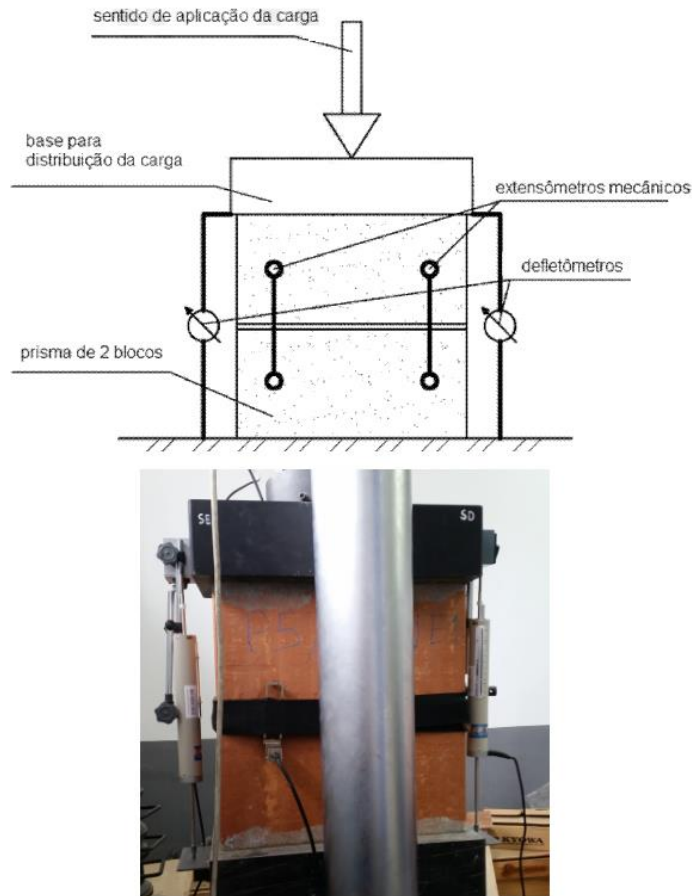


Figura 4.14: Instrumentação de prismas proposta pela ABNT NBR 15812-2:2010 e realizada no presente trabalho.

As deformações foram calculadas a partir das medições de dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDT, na sigla em inglês). Estes transdutores foram devidamente calibrados e colocados nas laterais do prisma. Os dois transdutores de deslocamento utilizados eram da marca Kyowa, modelo DT-100A, com curso de 100 mm. Fixados por bases magnéticas no prato superior, os transdutores mediram o deslocamento do prato inferior na direção vertical. A deformação do prisma na direção do eixo de carga dos pratos da prensa foi então determinada a partir da média entre os deslocamentos medidos por cada transdutor Kyowa. O módulo de deformação de cada prisma foi calculado no intervalo correspondente à curva secante entre 5% e 30% da carga de ruptura real do mesmo.

O procedimento de aplicação de carga durante o ensaio foi automatizado no TESC - Versão 3.04, e é mostrado na Figura 4.15 a seguir.

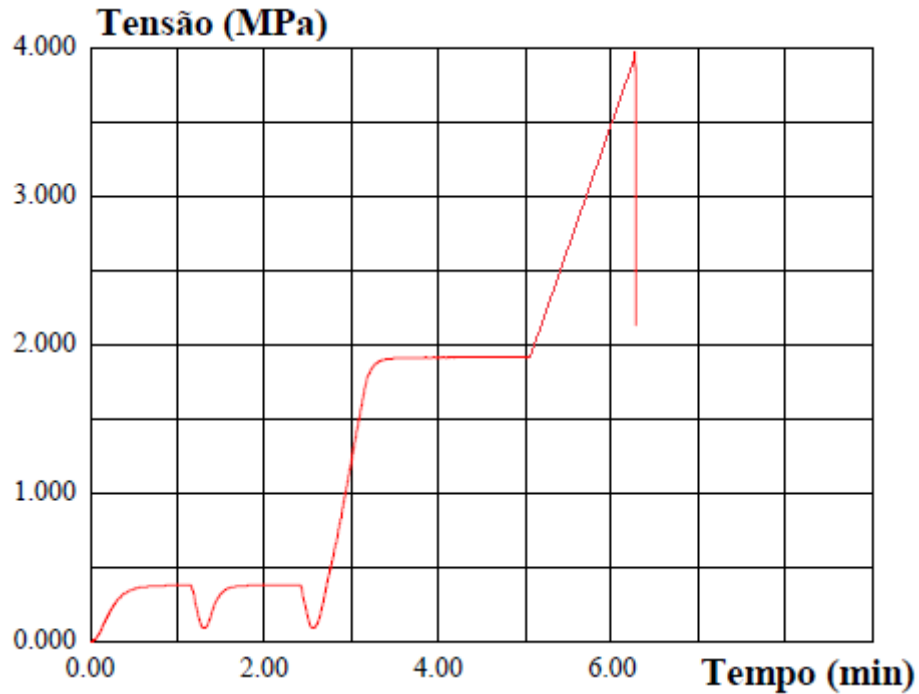


Figura 4.15: Aplicação de carga automatizada para os ensaios de prismas.

Em um primeiro momento, foram aplicados dois ciclos de carga e descarga na velocidade de 0,05 MPa/s, ambos até 10% da carga estimada de ruptura, com patamares de parada de um minuto. Estes ciclos foram realizados a fim de garantir a acomodação das faces superior e inferior do prisma aos pratos da prensa. Terminado o segundo descarregamento, seguiu-se o recomendado pela ABNT NBR 15812-2:2010: a carga foi novamente elevada com velocidade constante de 0,05 MPa/s, até alcançar 50% da carga de ruptura estimada. Neste momento, a tensão foi mantida constante por dois minutos, tempo suficiente para a retirada de toda a instrumentação do prisma. A seguir, a carga foi novamente aumentada até a ruptura.

4.6 Análise estatística

Foi realizado um delineamento fatorial do tipo 3^2 , sendo os fatores correspondentes à resistência da argamassa e à espessura da junta, cada um deles com três níveis de variação, conforme Tabela 4.3.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação de prismas foram submetidos a um tratamento estatístico utilizando o *Minitab 17 Statistical Software* (2016). A análise estatística abordou os seguintes aspectos:

4.6.1 Identificação de outliers

Foi utilizada uma ferramenta do *Minitab17* para identificação dos *outliers*, valores anômalos que destoam dos demais dados e que, conseqüentemente, impactavam as médias de resistência à compressão e módulo de deformação de cada conjunto de prismas. Os *outliers* detectados foram desconsiderados, para a seguir dar prosseguimento à análise estatística.

4.6.2 Determinação de intervalo de confiança

Foram estimados intervalos de confiança (IC) para os parâmetros de resistência à compressão e módulo de deformação de cada lote de prismas, para um nível de significância de 5%. Em outras palavras, foi definido, para cada lote de seis prismas, um intervalo de estimativas prováveis de resistência à compressão e outro de módulo de deformação. Assim, a probabilidade de o intervalo estimado conter o parâmetro obtido é de 95%.

4.6.3 Análise de variância

Com o intuito de se identificar diferenças estatisticamente significantes entre as médias de resistência à compressão ou módulo de deformação de cada lote de prismas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Para cada nível de resistência de argamassa, foram comparadas as médias de resistência à compressão e módulo de deformação dos lotes de prismas de diferentes espessuras. Para cada valor de espessura, foram também comparadas as médias de resistência à compressão e módulo de deformação de prismas com argamassas de diferentes níveis de resistência e rigidez. Adotou-se como hipótese nula (H_0) a afirmação de que as médias comparadas eram todas iguais. Como hipótese alternativa (H_A), considerou-se que pelo menos uma das médias era diferente. O cálculo da ANOVA foi feito no *Minitab17*, para um nível de significância de 5%. Se o “P-valor” fornecido é menor que 5%, então as médias podem ser consideradas estatisticamente diferentes. Pôde-se, portanto, perceber se os parâmetros variados

(propriedades mecânicas da argamassa e espessura da junta) de fato influenciavam a resistência à compressão ou a deformabilidade da alvenaria estrutural.

4.6.4 Teste de Tukey

O *Minitab 17* também foi utilizado para se realizar comparações emparelhadas de Tukey. Com esta ferramenta, é possível comparar as médias de resistência à compressão ou módulo de deformação de diferentes lotes de prismas, e montar grupos formados por médias consideradas estatisticamente iguais entre si. O software oferece, para cada comparação realizada, um gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, o qual apresenta os intervalos prováveis das diferenças entre as médias comparadas. Se o intervalo da diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero, então essas médias não são significativamente diferentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais e componentes empregados

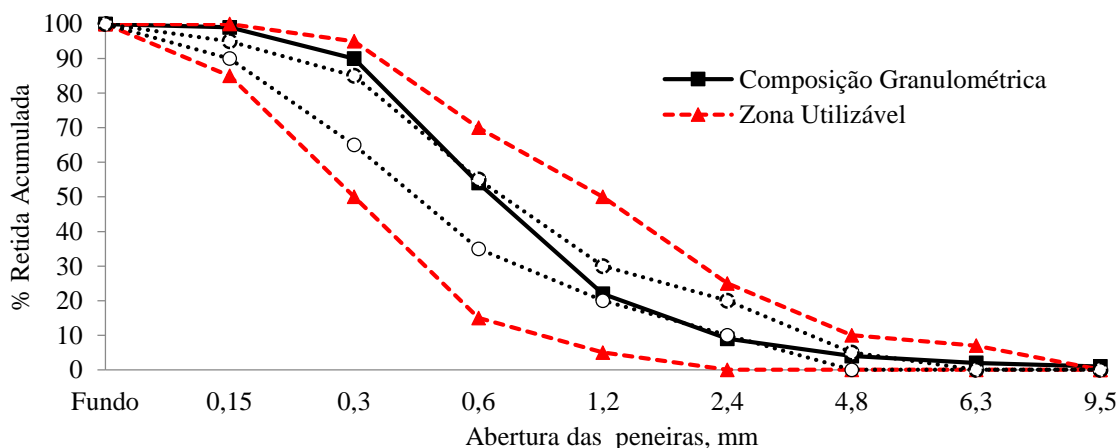
5.1.1 Caracterização da areia

5.1.1.1 Composição granulométrica da areia

Na Tabela 5.1 são mostrados os resultados obtidos no ensaio de determinação da composição granulométrica da areia. Foram obtidos um módulo de finura de 2,79 e a dimensão máxima característica do agregado de 4,8 mm.

Tabela 5.1: Composição granulométrica da areia

Amostra	1	2	1	2	Média	Porcentagem retida acumulada (%)
Massa inicial (g)	550,18	547,72	Porcentagem retida individual (%)			
Peneiras (mm)	Massa retida individual (g)					
9,5	2,64	4,23	0,48	0,77	0,63	1
6,3	3,88	8,48	0,71	1,55	1,13	2
4,8	9,24	7,61	1,68	1,39	1,54	4
2,4	29,35	28,29	5,34	5,17	5,25	9
1,2	64,66	75,88	11,77	13,86	12,81	22
0,6	183,77	173,17	33,45	31,63	32,54	54
0,3	199,76	195,18	36,36	35,65	36,01	90
0,15	49,9	48,5	9,08	8,86	8,97	99
Fundo	6,21	6,1	1,13	1,11	1,12	100
Massa final (g)	549,41	547,44	D_{max} (mm)			4,8
Diferença (%)	-0,14	-0,05	Módulo de finura			2,79



Percebe-se que os valores de porcentagem retida individualmente para cada amostra ensaiada não diferem mais que 4% entre si, estando de acordo com a normatização. O módulo de finura encontrado está entre 2,40 e 3,30, intervalo no qual se classifica o agregado miúdo como areia média, segundo Petrucci (1970). Além disso, a curva granulométrica da areia ensaiada se encontra inteiramente dentro da zona utilizável definida pela ABNT NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – Especificação, podendo essa areia ser utilizada como agregado miúdo para concreto. O módulo de finura também se encontra na zona ótima definida pela mesma norma, correspondente ao intervalo entre 2,20 e 2,90.

5.1.1.2 Determinação do teor de materiais pulverulentos na areia

Na Tabela 5.2 são expostas as medições obtidas no ensaio de determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. A diferença entre as duas determinações foi menor que o limite máximo de 1% estabelecido pela normatização.

Tabela 5.2: Materiais pulverulentos na areia

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Mat. Pulverulento (%)	
1	538,65	533,94	0,874	Média arredondada
2	580,55	575,47	0,875	
Diferença entre duas determinações (%):			0,001	0,9

5.1.1.3 Determinação da massa específica da areia

Os dados obtidos no ensaio de determinação de massa específica da areia estão expostos na Tabela 5.3. A massa específica aparente obtida foi de 2,57 g/cm^3 , a massa específica do agregado no estado saturado superfície seca foi de 2,60 g/cm^3 e a massa específica real foi de 2,65 g/cm^3 . A diferença entre a massa específica real encontrada em cada uma das duas repetições foi de 0,003 g/cm^3 , valor menor que o máximo estipulado pela normatização de 0,02 g/cm^3 . Segundo Petrucci (1970), a massa específica real do agregado miúdo é cerca de 2,65 kg/dm^3 . Portanto, o valor encontrado neste ensaio foi exatamente o mesmo citado pela referência.

Tabela 5.3: Massa específica da areia

Amostra	1	2	Média
Massa do frasco + água (g) = m_1	649,56	620,76	
Massa do frasco + água + agregado (g) = m_2	957,10	928,56	
Volume do frasco (cm ³) = V	500,00	500,00	
Volume de água adicionada ao frasco (cm ³) = V_a	307,54	307,80	-
Massa do agregado sat. superfície seca (g) = m_s	500,00	500,00	
Massa do agregado seco em estufa (g) = m	493,93	494,02	
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,566	2,570	2,57
Massa específica estado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,598	2,601	2,60
Massa específica da areia (g/cm ³)	2,650	2,653	2,65

5.1.1.4 Determinação da massa unitária nos estados solto e compacto da areia

A massa unitária obtida para a areia no estado solto foi de 1,40 kg/dm³ e no estado compacto foi de 1,49 kg/dm³. Os resultados obtidos em cada medição estão mostrados nas Tabelas 5.4 e 5.5. A variação entre as medições foi menor que 0,040 kg/dm³, máximo permitido pela normatização.

Tabela 5.4: Massa unitária no estado solto da areia (4 determinações)

Determinação	1	2	3	4
Massa agregado + massa recipiente (kg)	19,52	19,62	19,74	19,75
Massa do recipiente (kg)		5,22		
Massa do agregado (kg)	14,3	14,4	14,52	14,53
Volume do recipiente (dm ³)		10,30		
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)	1,388	1,398	1,410	1,411
Massa unitária média (kg/dm ³)		1,400		
Intervalo de variação (kg/dm ³)	-	0,010	0,012	0,001
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)		1,40		

Tabela 5.5: Massa unitária no estado compacto da areia (4 determinações)

Determinação	1	2	3	4
Massa agregado + massa recipiente (kg)	21,05	21,09	21,12	21,17
Massa do recipiente (kg)		5,22		
Massa do agregado (kg)	15,83	15,87	15,9	15,95
Volume do recipiente (dm ³)		10,3		
Massa unitária no estado compacto (kg/dm ³)	1,537	1,541	1,544	1,549
Massa unitária média (kg/dm ³)		1,486		
Intervalo de variação (kg/dm ³)	-	0,004	0,003	0,005
Massa unitária no estado compacto (kg/dm ³)		1,49		

As massas unitárias obtidas condizem com os dados apresentados na literatura técnica. Segundo Petrucci (1970), a massa unitária no estado seco e solto de areias médias é cerca de 1,50 kg/dm³, que se aproxima do valor encontrado.

5.1.2 Caracterização dos aglomerantes

5.1.2.1 Determinação da massa específica do cimento e da cal

Os dados obtidos no ensaio de determinação da massa específica do cimento e da cal seguem na Tabela 5.6. A diferença entre o resultado das duas determinações foi menor que 0,01 g/cm³.

Tabela 5.6: Massa específica do cimento e da cal

Amostra	Cimento		Cal	
	1	2	1	2
Temperatura do banho (°C)	25,20	25,20	23,00	23,00
Massa da amostra (g)	60	60	50	50
Leitura inicial (cm ³)	0,90	0,90	0,80	0,30
Leitura final (cm ³)	21,28	21,22	22,40	21,90
Volume da amostra (cm ³)	20,38	20,32	21,60	21,60
Massa específica da amostra (g/cm ³)	2,94	2,95	2,32	2,32
Diferença entre amostras (g/cm ³)	0,009		0,000	
Massa Específica (g/cm ³)	2,95		2,32	

5.1.2.2 Determinação do índice de finura do cimento

O resíduo na peneira nº 200 após a execução do ensaio de determinação do índice de finura do cimento pesou 2,01 g. Conhecida a massa inicial da amostra, de 50 g, pôde-se calcular a porcentagem, em massa, de cimento cujas dimensões de grãos são maiores que 75 µm. Portanto, o índice de finura obtido foi de 4,0%.

5.1.2.3 Determinação da água da pasta de consistência normal

Na Tabela 5.7 apresentam-se dados para determinação da água da pasta de consistência normal.

Tabela 5.7: Determinação da água da pasta de consistência normal

Temperatura ambiente (°C)	26,7	Massa de cimento (g)	500,0
Umidade relativa do ar (%)	81,0	Massa de água (g)	140,5
Temperatura da água (°C)	27,0	Consistência (mm)	6,0

5.1.2.4 Determinação da expansibilidade a quente e a frio

As expansibilidades a frio e a quente obtidas pela média entre as três determinações (0,0 mm e 0,0 mm, respectivamente), satisfazem ao limite máximo de 5,0 mm estipulado pela ABNT NBR 11578:1991 – Cimento Portland composto – Especificação.

5.1.2.5 Determinação do tempo de pega do cimento

O tempo de início de pega obtido foi de 2 horas e 30 minutos, enquanto o tempo de fim de pega foi de 3 horas e 55 minutos. Ambos satisfazem às exigências para o cimento CP II-E-32, segundo a ABNT NBR 11578:1991, a qual determina um tempo de início de pega maior que uma hora e de fim de pega menor que dez horas.

5.1.2.6 Determinação da resistência à compressão do cimento

Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores de resistência à compressão obtidos para os corpos de prova cilíndricos produzidos conforme prescrito pela ABNT NBR 7215:1996. Para quaisquer das idades, o desvio relativo máximo obtido foi menor que 6%, satisfazendo à exigência da mesma norma. Obteve-se uma resistência à compressão média aos 28 dias de 34,5 MPa, satisfazendo ao valor de fábrica de 32,0 MPa.

Tabela 5.8: Determinação da resistência à compressão do cimento

CP	Idade (dias)	Diâmetro médio (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	f_c médio (MPa)	Desvio Relativo (%)	DP (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)	C.V. (%)
13	3	5,0	5250	26,70		0,7			
14	3	5,0	5170	26,40	26,9	1,8	0,38	1,9	1,41
19	3	5,0	5310	27,06		0,6			
20	3	5,0	5400	27,41		1,9			
15	7	5,0	6370	32,39		0,8			
16	7	5,0	6410	32,73	32,2	1,8	0,46	2,0	1,42
21	7	5,0	6270	31,95		0,6			
22	7	5,0	6210	31,52		2,0			
17	28	5,0	6850	34,77		0,8			
18	28	5,0	6840	34,51	34,5	0,1	0,19	0,8	0,54
23	28	5,0	6810	34,29		0,5			
24	28	5,0	6820	34,34		0,4			

5.1.3 Caracterização dos blocos cerâmicos

5.1.3.1 Análise dimensional dos blocos cerâmicos

Na Tabela 5.9 mostram-se as medições encontradas no ensaio de análise dimensional dos blocos cerâmicos, com precisão de milímetros.

Tabela 5.9: Características geométricas dos blocos de concreto

Amostra	Dimensões médias dos blocos (mm)			Espessuras mínimas (mm)		Desvios máximos (mm)	
	Largura média	Altura média	Comprimento médio	Paredes externas	Septos	Esquadro	Flecha
1	141	189	390	9	9	3	1
2	141	189	389	10	10	2	1
3	141	189	388	9	9	3	1
4	142	189	390	9	9	3	1
5	141	188	389	10	9	3	1
6	141	189	387	9	9	3	0
7	142	191	389	9	9	3	1
8	142	191	389	10	9	4	1
9	141	191	388	9	10	1	0
10	141	190	391	9	9	4	2
11	142	188	390	10	10	2	1
12	141	190	387	9	9	2	0
13	141	188	387	9	9	3	2
14	141	189	387	9	10	1	2
15	141	189	387	9	10	2	3
Média	141	189	388	9	9	3	1
D.P.	0,46	0,99	1,31	0,4	0,4	0,8	0,6
C.V. (%)	0,33	0,52	0,34	4,4	3,9	30	69,4

Todas as dimensões estão de acordo com a ABNT NBR 15270-2:2005, onde comprimento, largura e altura não diferem 5 mm das dimensões efetivas de cada bloco e 3 mm considerando o valor médio. As dimensões das paredes externas e dos septos também estão de acordo com essa mesma norma, que exige no mínimo 8 mm para paredes externas e 7 mm para septos.

5.1.3.2 Determinação da absorção e da área líquida dos blocos cerâmicos

Apresentam-se na Tabela 5.10 os dados obtidos no ensaio de determinação da absorção e, na Tabela 5.11, os dados referentes ao ensaio de determinação da área líquida dos blocos cerâmicos. A absorção dos blocos está compreendida na faixa necessária de 8% a 22%, conforme determina

a normatização. A relação entre área líquida e área bruta de 0,37 está próxima ao obtido na literatura para blocos vazados cerâmicos.

Tabela 5.10: Absorção dos blocos cerâmicos

Amostra	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Índice de absorção (%)
1	6920	8260	19,36
2	6985	8360	19,69
3	6890	8215	19,23
4	6970	8335	19,58
5	6950	8300	19,42
6	6890	8245	19,67
Média			19,49
D.P.			0,18
C.V. (%)			0,93

Tabela 5.11: Área líquida dos blocos cerâmicos

Amostra	Altura média (mm)	Massa úmida (g)	Massa aparente (g)	Área líquida A_{liq} (mm ²)	Área bruta A_b (mm ²)	Relação A_{liq}/A_b (%)
1	189	8260	4392	20412	54708	37,31
2	189	8360	4378	20958	55380	37,84
3	189	8215	4364	20430	54514	37,48
4	189	8335	4412	20593	55185	37,32
5	188	8300	4353	20774	55044	37,74
6	189	8245	4358	20458	55044	37,17
7	191	8290	4369	20369	55327	36,82
8	191	8210	4362	20468	54374	37,64
9	191	8315	4432	20330	54708	37,16
10	190	8240	4401	20206	54708	36,93
11	188	8340	4398	20693	55327	37,40
12	190	8340	4419	20583	55380	37,17
13	188	8365	4425	20682	55806	37,06
Média		8293	4389	20535	55039	37,31
D.P.		54,44	27,29	2,05	4,14	0,31
C.V. (%)		0,67	0,62	0,99	0,75	0,83

5.1.3.3 Determinação da resistência à compressão dos blocos cerâmicos

Na Tabela 5.12 mostram-se os resultados do ensaio de compressão dos blocos cerâmicos. Obteve-se uma resistência à compressão média dos blocos f_{bm} , referida à área bruta, de 6,4 MPa. Nenhum *outlier* foi identificado quando utilizado o software de análises estatísticas *Minitab 17*. Como a amostra possui um total de 14 blocos, o valor de $\psi \cdot f_{b(1)}$, com ψ obtido na Tabela 4.1, foi de 4,9 MPa. A resistência à compressão característica dos blocos, referida à área bruta e obtida pela equação (4.1), foi de 4,9 MPa, maior que os 3,0 MPa exigidos pela ABNT NBR 15270-2:2005, para blocos cerâmicos estruturais. Através da relação A_{liq}/A_b de 0,37, conclui-se que a resistência à compressão característica dos blocos f_{bk} , referida à área líquida, é igual a 13,1 MPa.

Tabela 5.12: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos

Nº do corpo de prova	Largura média (mm)	Comprimento médio (mm)	Carga de ruptura P (N)	Área bruta A_b (mm ²)	Tensão de ruptura f_b (MPa)
1	141	389,5	268349	54745	4,9
2	141	388,5	347099	54779	6,3
3	141	387,5	381139	54444	7,0
4	142	390,0	307901	55380	5,6
5	141	388,5	386788	54779	7,1
6	141	387,0	361506	54567	6,6
7	142	388,5	298947	54973	5,4
8	142	389,0	356818	55044	6,5
9	141	387,5	363291	54638	6,6
10	141	390,5	384993	55061	7,0
11	142	389,5	378040	55114	6,9
13	141	387,0	358191	54374	6,6
14	141	387,0	436461	54374	8,0
15	141	386,5	305969	54497	5,6
				f_{bm} (MPa)	6,4
				D.P. (MPa)	0,81
				C.V. (%)	12,66
				f_{bk} , referida à área bruta (MPa)	4,9
				f_{bk} , referida à área líquida (MPa)	13,1

Na Figura 5.1 apresenta-se um diagrama de barras com os valores de resistência à compressão obtidos para os blocos cerâmicos ensaiados.

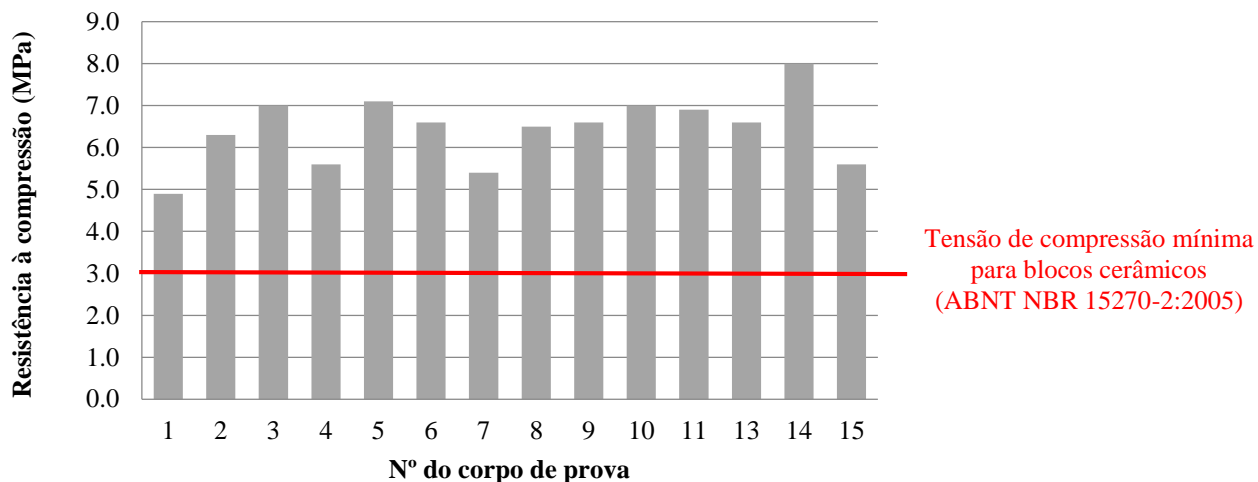


Figura 5.1: Resistência à compressão dos blocos cerâmicos

5.1.3.4 Determinação do módulo de deformação dos blocos cerâmicos

Na Tabela 5.13 são mostrados os resultados dos ensaios de módulo de deformação dos blocos cerâmicos. O valor médio obtido foi de 2,54 GPa, referido à área bruta. Segundo a equação proposta por Brooks (2015), o módulo de deformação na área bruta (em GPa), esperado para blocos cerâmicos extrudados está em torno de 40% de sua resistência à compressão (em MPa), referida à área bruta. Tomando 40% da resistência à compressão média dos blocos na área líquida (6,4 MPa), obtém-se o valor de 2,56 GPa, valor muito próximo do encontrado experimentalmente.

Tabela 5.13: Módulo de elasticidade dos blocos cerâmicos, referido à área bruta

Corpo de prova	Tensão de ruptura f_b (MPa)	Módulo de elasticidade E_b (GPa)
CP9	6,6	2,27
CP10	7,0	2,72
CP11	6,9	2,20
CP13	6,6	2,89
CP14	8,0	2,61
	E_b (GPa)	2,54
	D.P. (GPa)	0,30
	C.V. (%)	11,63

As curvas tensão-deformação obtidas para os cinco corpos de prova ensaiados são apresentadas na Figura 5.2. Elas contemplam o trecho até 30% da carga de ruptura estimada, momento em que foram retirados os extensômetros, por medidas de proteção do equipamento.

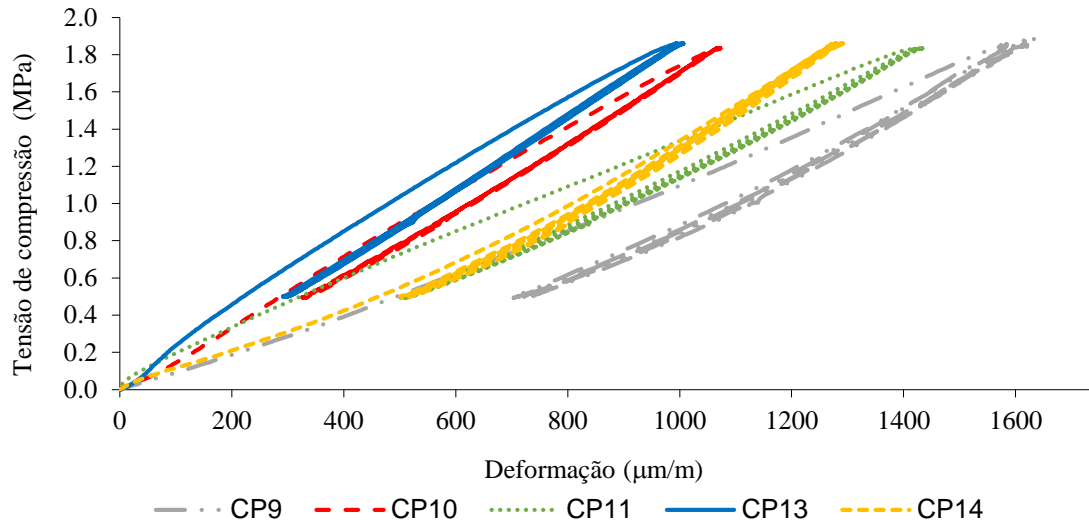


Figura 5.2: Curva tensão-deformação do ensaio de compressão dos blocos cerâmicos

5.1.3.5 Determinação da resistência à tração dos blocos cerâmicos

Na Tabela 5.14 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à tração de cada bloco cerâmico ensaiado. Nenhum *outlier* foi identificado quando utilizado o software *Minitab 17*. O valor médio da resistência à tração na flexão obtido foi de 0,44 MPa, correspondente a aproximadamente 7% da resistência média à compressão dos blocos na área bruta (6,4 MPa), em acordo com a literatura.

Tabela 5.14: Resistência à tração dos blocos cerâmicos

Amostra	Carga de ruptura (N)	Resistência à tração f_{tb} (MPa)
1	25080	0,60
2	22270	0,53
3	14402	0,34
4	13559	0,32
5	16158	0,39
f_m (MPa)		0,44
D.P. (MPa)		0,12
C.V. (%)		27,87

Na Figura 5.3 apresenta-se um diagrama de barras com os valores de resistência à tração obtidos para os blocos cerâmicos ensaiados.

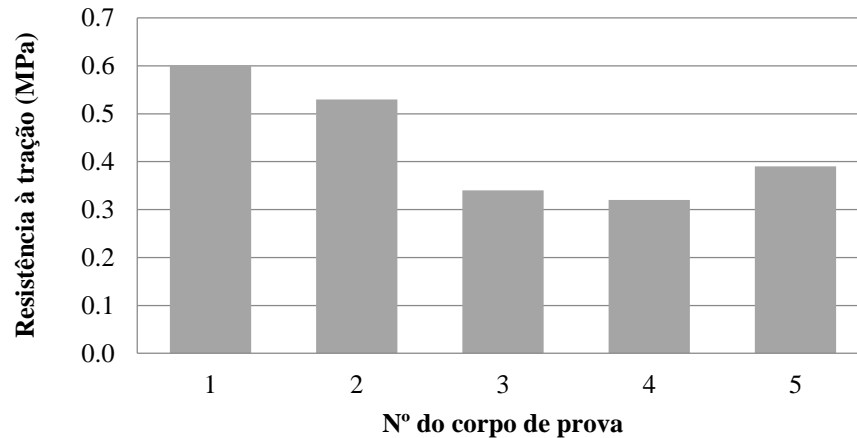


Figura 5.3: Resistência à tração dos blocos cerâmicos

5.1.4 Caracterização das argamassas

5.1.4.1 Resultados da dosagem

Na Tabela 5.15 apresentam-se a consistência e a resistência à compressão aos 28 dias dos 12 traços de argamassa mista de cal e cimento produzidos na etapa de dosagem.

Tabela 5.15: Consistência e resistência à compressão (f_a) para os traços produzidos para dosagem da argamassa

TRAÇO	TRAÇO UNITÁRIO EM VOLUME				PORCENTAGEM DE MATERIAIS EM VOLUME				Tipo (ASTM C270: 2014)	Consistência (mm)	f_a 28 dias (MPa)
	Cimento	Cal	Areia	Água	Cimento	Cal	Areia	Água			
D1	1,00	2,50	9,50	5,93	5,28	13,20	50,17	31,34	O	239	5,4
D2	1,00	2,75	10,00	6,52	4,93	13,57	49,34	32,16	O	239	5,6
D3	1,00	2,00	8,50	4,75	6,15	12,31	52,30	29,24	O	230	6,3
D4	1,00	2,00	7,50	4,27	6,77	13,54	50,79	28,89	O	234	7,2
D5	1,00	2,00	6,75	4,34	7,10	14,20	47,92	30,78	O	224	7,4
D6	1,00	1,50	7,50	4,26	7,01	10,52	52,60	29,87	O	234	8,6
D7	1,00	1,00	6,00	3,48	8,71	8,71	52,28	30,29	N	231	10,8
D8	1,00	0,75	5,00	2,80	10,47	7,86	52,37	29,30	N	231	12,8
D9	1,00	1,00	5,00	3,08	9,92	9,92	49,61	30,55	N	226	13,6
D10	1,00	0,50	4,50	2,45	11,83	5,91	53,23	29,03	S	222	15,6
D11	1,00	0,50	3,50	1,96	14,38	7,19	50,32	28,12	S	224	18,4
D12	1,00	0,25	3,50	1,84	15,17	3,79	53,10	27,94	M	225	19,4

A partir dos dados desta tabela, foi construído o diagrama de dosagem apresentado na Figura 5.4. Com este diagrama, é possível entrar com o valor desejado de resistência à compressão de argamassa e determinar o traço em volume capaz de fornecer este nível de resistência. Ao utilizar a proporção entre materiais obtida graficamente, a consistência da mistura no estado fresco estará no intervalo de (230 ± 10) mm, recomendado para assentamento de blocos estruturais. Este diagrama é específico para os materiais de construção utilizados na presente pesquisa, podendo servir apenas como referência quando utilizados diferentes materiais. Nestes casos, sugere-se a criação de novas curvas de dosagem para o material empregado.

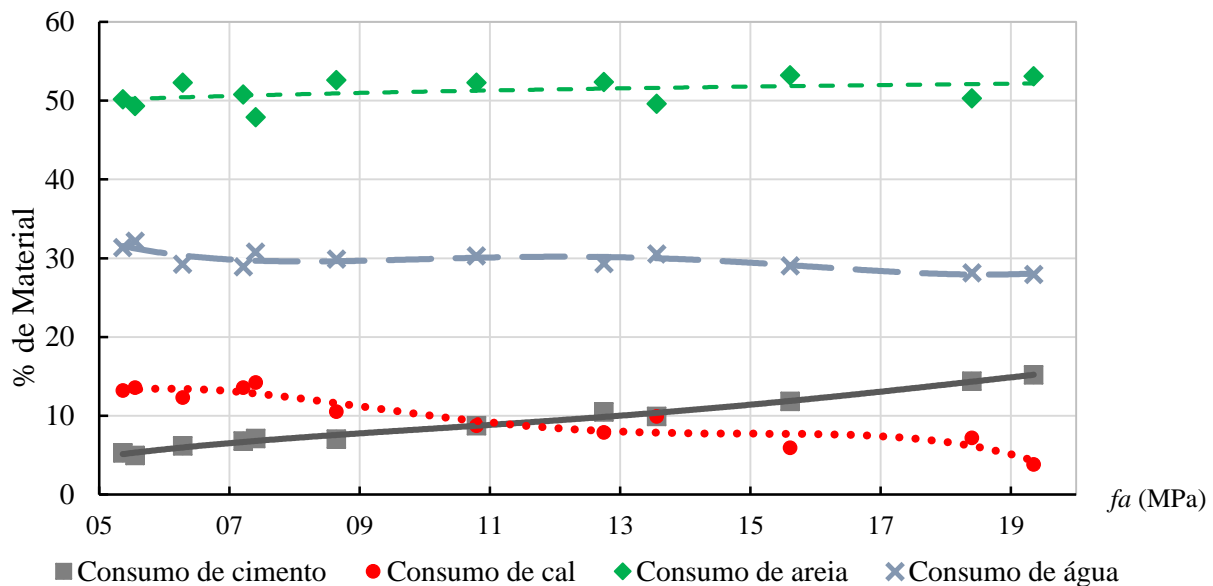


Figura 5.4: Diagrama de dosagem de argamassas para assentamento de alvenaria estrutural

Quando produzida em maior quantidade que no laboratório e em condições mais próximas às de campo, a argamassa exige um maior consumo de água e pode apresentar menor resistência à compressão. Segundo a ASTM C1586:2005 – Standard Guide for Quality Assurance of Mortars, devido ao maior consumo de água na construção real da alvenaria, a argamassa produzida e amostrada em campo tipicamente apresenta uma resistência à compressão menor que a produzida em laboratório. Em campo são diferentes as condições ambientais, a forma de mistura e a cura. Além disso, em campo a argamassa é colocada sobre os blocos cerâmicos (e não em moldes metálicos), os quais também podem absorver parte da água da argamassa. Assim, empregou-se com cautela o diagrama de dosagem obtido em laboratório. Para produção dos prismas, em

condições mais próximas às do canteiro de obras, foram selecionados traços com resistência à compressão ligeiramente acima dos valores desejados, conforme apresentado na Tabela 5.16, já prevendo possíveis quedas de resistência com o eventual aumento do consumo de água.

Tabela 5.16: Traços de argamassa produzidos: proporções entre constituintes e condições de preparo

Nome do lote de prismas no qual se utilizou a argamassa	Traço unitário em volume				Consistência média (mm)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
	Cimento	Cal	Areia	Água			
T30 E0,5	1,00	2,50	9,50	6,71	231	19,6	70
T30 E1,0	1,00	2,50	9,50	6,52	235	20,0	68
T30 E1,5	1,00	2,50	9,50	6,97	227	22,8	66
T50 E0,5	1,00	1,50	6,75	4,39	220	18,5	78
T50 E1,0	1,00	1,50	6,75	4,47	235	19,3	66
T50 E1,5	1,00	1,50	6,75	4,21	226	19,5	79
T90 E0,5	1,00	1,00	5,00	3,39	240	19,2	71
T90 E1,0	1,00	1,00	5,00	3,31	265	18,4	62
T90 E1,5	1,00	1,00	5,00	3,60	269	23,5	56

5.1.4.2 Determinação da resistência à tração na flexão

Após a caracterização dos blocos cerâmicos e dosagem da argamassa, definiram-se os traços denominados T30, T50 e T90 e estes foram usados para produção dos prismas. Na Tabela 5.17 apresentam-se, de maneira resumida, os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassa prismáticos. Os resultados detalhados desse ensaio encontram-se no Apêndice A. Nenhum *outlier* foi identificado quando utilizado o software *Minitab 17*.

Tabela 5.17: Resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos

Lote	f_{ta} (MPa)	D.P. (MPa)	CV (%)
T30 E0,5	1,41	0,11	7,78
T30 E1,0	1,41	0,11	7,78
T30 E1,5	1,20	0,08	6,67
T50 E0,5	1,87	0,20	10,69
T50 E1,0	2,05	0,21	10,47
T50 E1,5	2,61	0,15	5,77
T90 E0,5	2,88	0,32	11,11
T90 E1,0	3,47	0,15	4,35
T90 E1,5	3,04	0,13	4,30

5.1.4.3 Determinação da resistência à compressão

Na Tabela 5.18 são apresentados, de maneira resumida, os resultados obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa prismáticos. Os resultados detalhados desse ensaio encontram-se no Apêndice A. Nenhum *outlier* foi identificado quando utilizado o software *Minitab 17*.

Tabela 5.18: Resistência à compressão dos corpos de prova prismáticos

Lote	f_a (MPa)	D.P. (MPa)	CV (%)	f_a/f_{bk} (%)
T30 E0,5	4,0	0,21	5,35	30,61
T30 E1,0	3,9	0,35	9,10	29,39
T30 E1,5	3,6	0,31	8,63	27,18
T50 E0,5	6,9	0,65	9,37	52,47
T50 E1,0	6,3	0,42	6,69	48,00
T50 E1,5	7,0	0,42	6,11	52,92
T90 E0,5	10,4	0,31	2,93	79,49
T90 E1,0	12,4	0,66	5,36	94,04
T90 E1,5	11,0	0,77	7,00	84,06

Os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os lotes T30 E1,0 e T50 E0,5. Isso representa uma maior heterogeneidade entre os corpos de prova que compõem estes lotes.

5.1.4.4 Determinação do módulo de elasticidade

Na Tabela 5.19 são apresentados, de maneira resumida, os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos corpos de prova de argamassa cilíndricos. Os resultados detalhados desse ensaio encontram-se no Apêndice A. Para essa propriedade, *outliers* foram identificados quando utilizado o software *Minitab 17*. Os *outliers* encontrados também são indicados no Apêndice A. Todos os valores anômalos foram descartados e, portanto, não foram considerados para o cálculo do módulo de elasticidade médio.

Tabela 5.19: Módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos

Lote	E_a (MPa)	D.P. (MPa)	CV (%)
T30 E0,5	7820	1172,0	14,99
T30 E1,0	4480	742,5	16,58
T30 E1,5	5220	167,4	3,21
T50 E0,5	9232	291,4	3,16
T50 E1,0	8734	231,8	2,65
T50 E1,5	10410	300,0	2,88
T90 E0,5	14240	746,4	5,24
T90 E1,0	13155	775,0	5,89
T90 E1,5	12545	505,0	4,03

5.2 Resultados dos ensaios de prismas

5.2.1 Curvas tensão-deformação dos prismas

O programa experimental adotado permitiu a obtenção de curvas tensão-deformação para os seis prismas de cada lote produzido, as quais são apresentadas nas Figuras 5.5 a 5.13. As deformações ao longo da aplicação de carga foram obtidas calculando-se a média entre as deformações calculadas a partir do deslocamento medido pelos LVDT's posicionados nas laterais do prisma. Estas curvas não contemplam o trecho próximo ao momento da ruptura do prisma, uma vez que os transdutores de deslocamento foram retirados, por motivo de segurança, quando a carga aplicada alcançou o patamar de 50% da capacidade estimada do prisma. Estão representados nestes gráficos os pares tensão-deformação medidos ao longo do trecho entre 5% e 30% da carga de ruptura real de cada corpo de prova, intervalo no qual foi calculado o módulo de deformação.

Algumas vezes, a curva tensão-deformação apresentou uma concavidade voltada para cima no início do ensaio, o que foi prontamente corrigido através dos dois ciclos de carga e descarga aplicados até 10% da carga de ruptura estimada. Este comportamento é comum neste tipo de ensaio e ocorre devido aos efeitos de acomodação do corpo de prova ao prato da prensa. Ainda que capeadas as faces de trabalho superior e inferior dos prismas, é possível encontrar certas irregularidades no contato entre o corpo de prova e os pratos da prensa, responsáveis por este

aparente ganho de rigidez no início do carregamento. Observa-se que após os dois ciclos iniciais de carga e descarga aplicados, a curva tensão-deformação de todos os prismas é corrigida, admitindo o formato aproximado de uma reta, comportamento esperado para o regime elástico-linear do material. O módulo de deformação foi calculado neste último trecho de cada curva. Por motivos de segurança, os transdutores de deslocamento foram retirados antes do regime inelástico, onde seria possível notar perdas de rigidez do corpo de prova. Portanto, esta região não está representada nos gráficos a seguir.

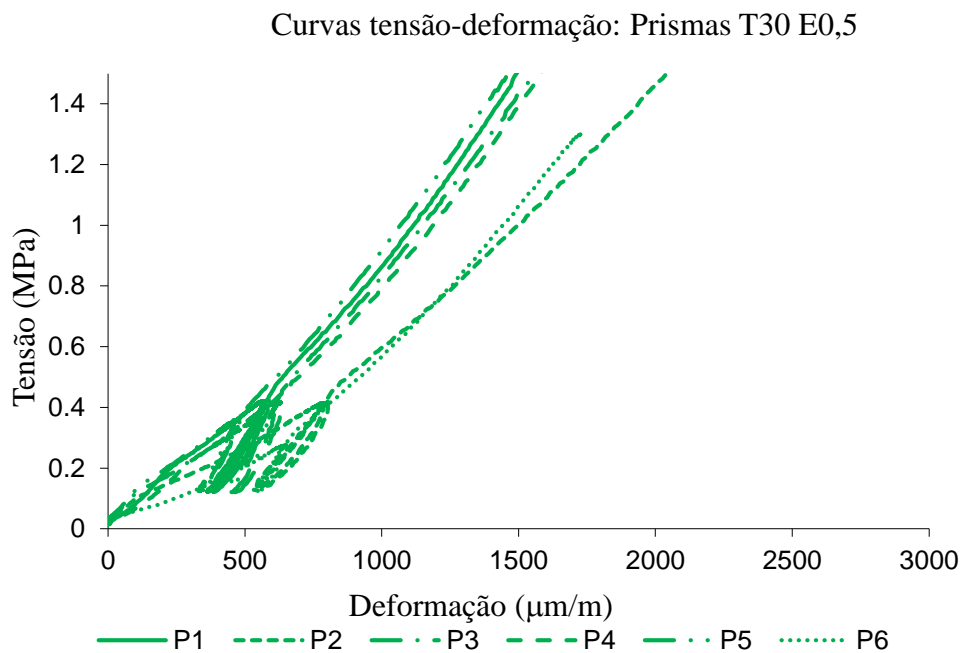


Figura 5.5: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E0,5

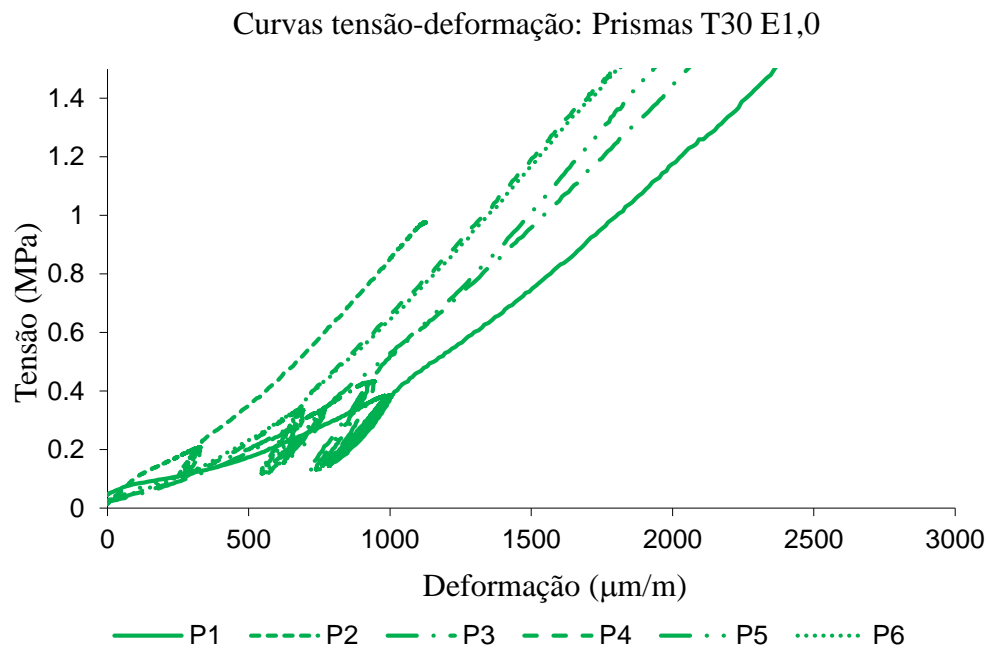


Figura 5.6: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E1,0

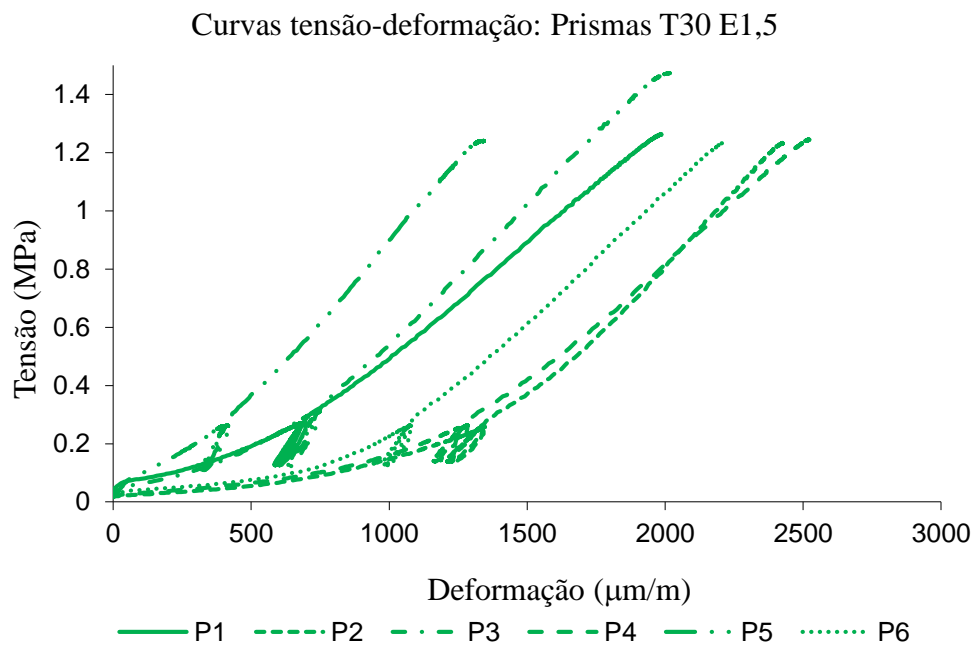


Figura 5.7: Curvas tensão-deformação: Prismas T30 E1,5

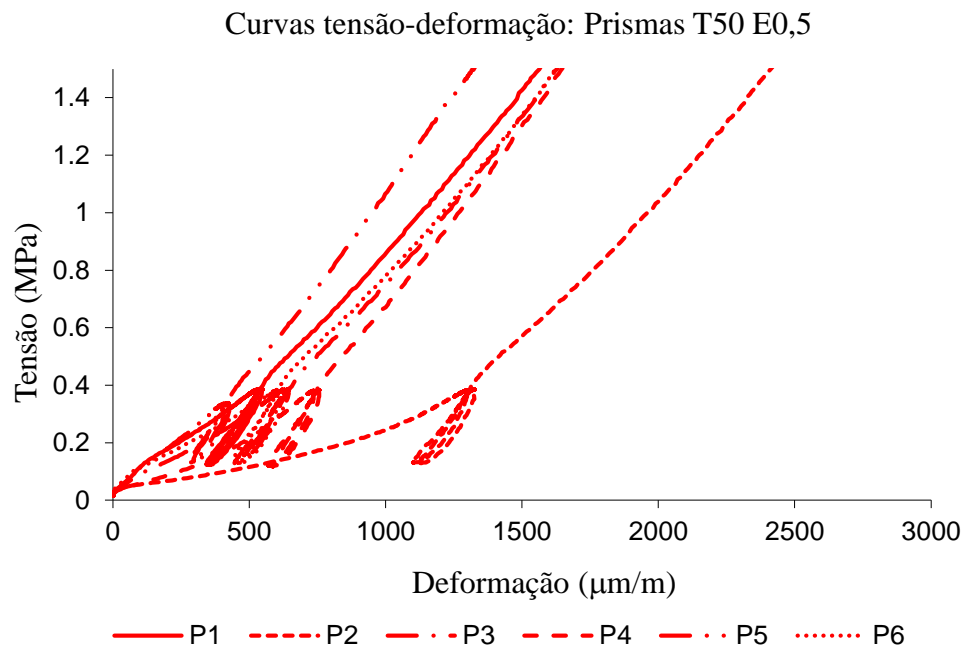


Figura 5.8: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E0,5

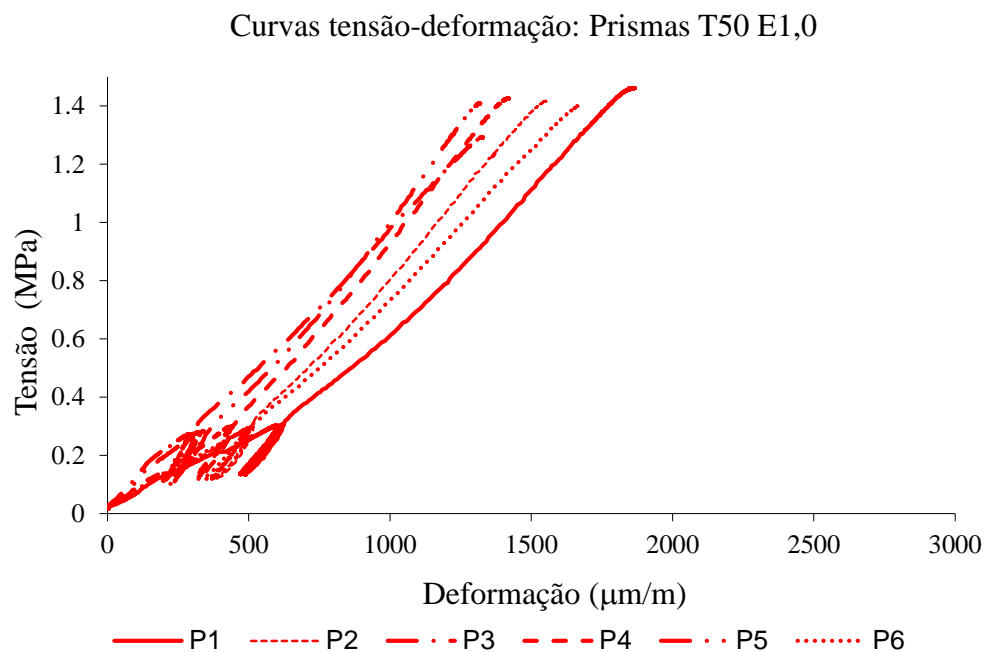


Figura 5.9: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E1,0

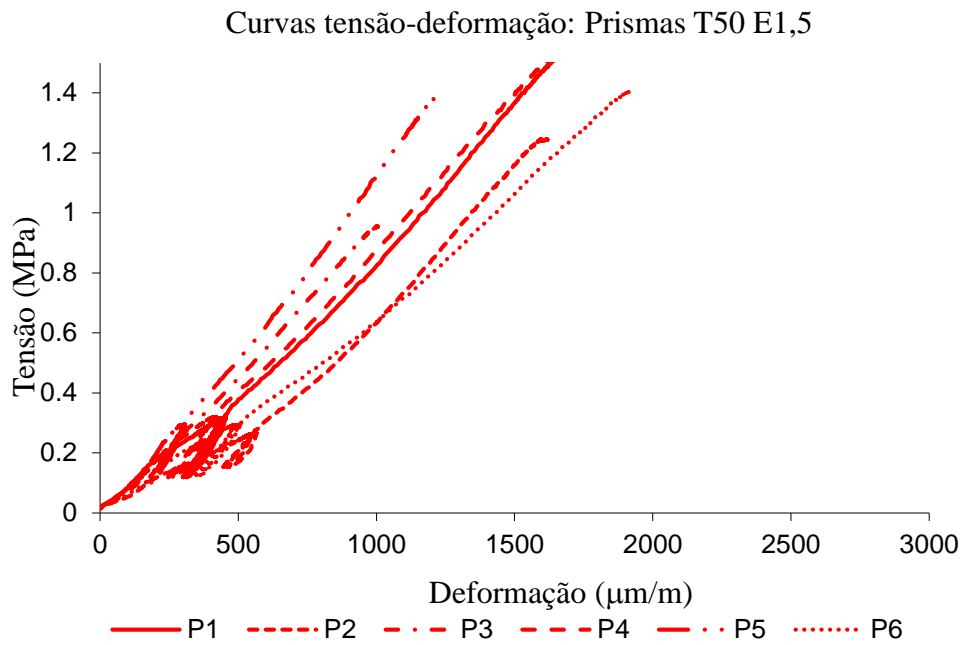


Figura 5.10: Curvas tensão-deformação: Prismas T50 E1,5

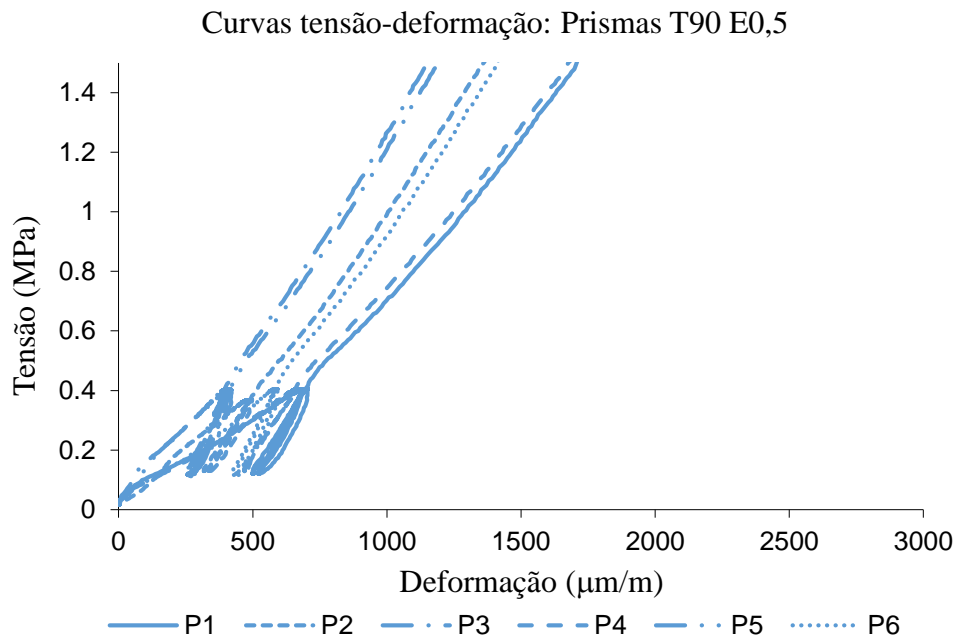


Figura 5.11: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E0,5

Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,0

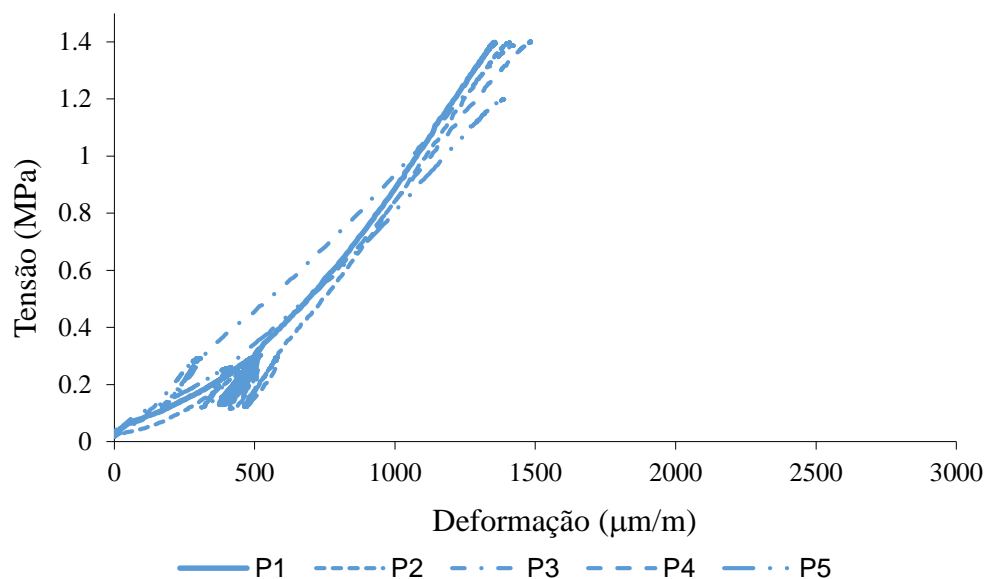


Figura 5.12: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,0

Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,5

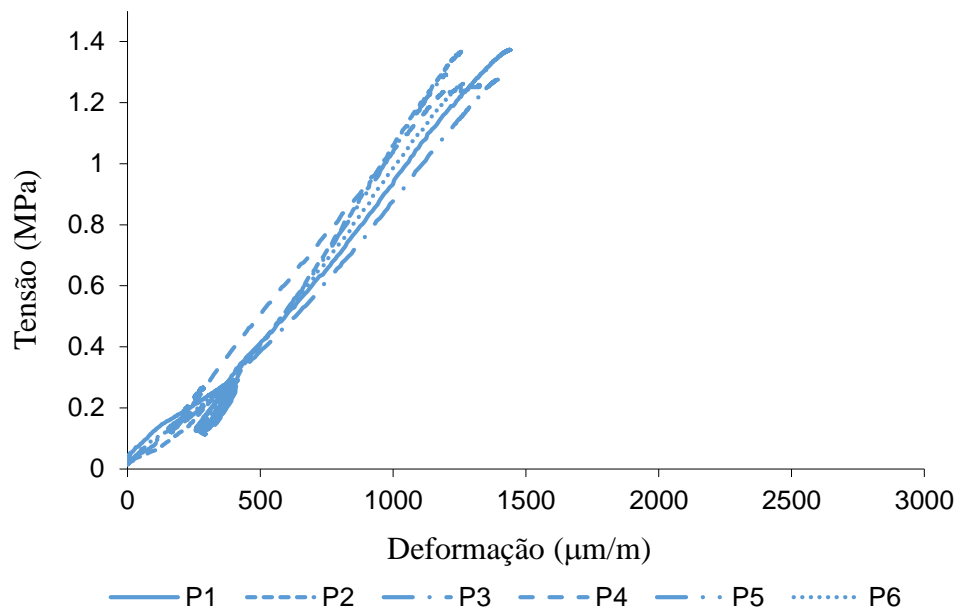


Figura 5.13: Curvas tensão-deformação: Prismas T90 E1,5

Foi desconsiderada a curva referente ao prisma P6 do lote T90 E1, a qual apresentou um comportamento totalmente fora do padrão observado pelas outras 35 curvas. O lote T90 E1 foi o primeiro a ser produzido e o prisma P6 foi o último a ser montado, quando apenas restava pouca argamassa de assentamento, uma vez que foram previstos gastos menores de material que aqueles que de fato ocorreram. Dessa forma, um dos lados do prisma assentado não foi devidamente preenchido por argamassa. No momento do ensaio, percebeu-se que um dos lados do prisma se deformou muito mais que o outro, o que pode ser notado nas imagens da Figura 5.14. Foram notados alongamento em um dos lados do prisma (início da curva azul pontilhada) e encurtamento no outro (curva verde tracejada). O prato superior foi consideravelmente rotacionado. A curva vermelha representa a média entre as deformações de cada lado do prisma. Portanto, optou-se por desconsiderar os dados obtidos referentes a ele.

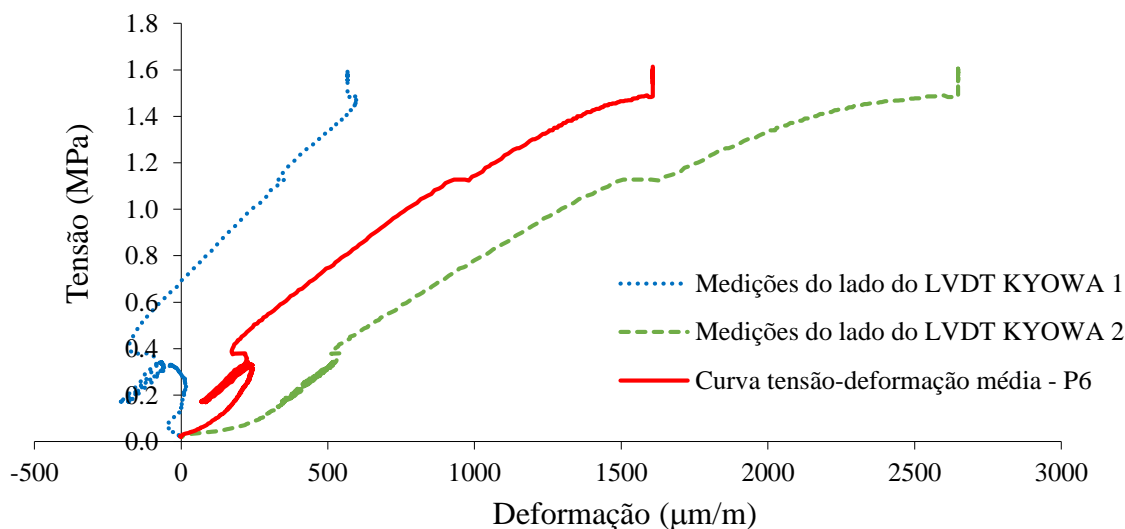


Figura 5.14: Curva tensão-deformação desconsiderada (P6 do lote T90 E1,0)

5.2.2 Resistência à compressão e deformabilidade dos prismas

No Apêndice B apresentam-se os valores obtidos para as resistências à compressão e para os módulos de deformação calculados a partir das curvas anteriores, para cada corpo de prova ensaiado. Os valores individuais de cada lote foram submetidos ao Teste de Grubbs, no *Minitab 17*, a fim de se identificar os valores anômalos para um nível de significância de 5% (resultados apresentados também no Apêndice B). Quando aplicado aos valores de resistência à compressão, o teste apontou apenas um valor expurgo, no lote T30 E1,0, para o prisma P2 (obteve-se um “P-

valor” de 0,035, menor que 0,050). Portanto, as informações referentes a este corpo de prova foram descartadas do conjunto de dados desta pesquisa. Nenhum valor anômalo foi encontrado na análise dos módulos de deformação.

Na Tabela 5.20 é apresentado um resumo dos valores obtidos para a resistência à compressão média e característica, para o módulo de deformação médio e para as espessuras médias da junta de argamassa, para os diferentes lotes produzidos.

Tabela 5.20: Propriedades mecânicas e espessura da junta dos prismas

Nome do lote de prismas	Resistência à compressão na área bruta				Módulo de deformação na área bruta			Espessura da junta de argamassa		
	f_{pm} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	f_{pk} (MPa)	E_p (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Espessura média (cm)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T30 E0,5	4,2	0,50	11,94	3,2	1102	138,46	12,56	0,61	0,04	6,74
T30 E1,0	3,1	0,18	5,85	2,9	1015	117,07	11,53	1,01	0,07	7,13
T30 E1,5	2,5	0,23	9,19	2,1	958	115,27	12,03	1,47	0,08	5,72
T50 E0,5	3,8	0,68	17,96	2,6	1162	107,57	9,26	0,68	0,05	7,90
T50 E1,0	3,2	0,22	7,03	2,7	1064	89,21	8,38	1,03	0,05	5,08
T50 E1,5	3,2	0,33	10,39	2,6	1006	131,44	13,07	1,49	0,17	11,15
T90 E0,5	4,1	0,49	12,14	3,0	1333	176,88	13,27	0,69	0,03	4,94
T90 E1,0	3,4	0,52	15,43	2,9	1167	162,69	13,95	1,11	0,15	13,19
T90 E1,5	2,6	0,23	8,55	2,0	1176	99,22	8,44	1,53	0,08	5,41

De forma geral, percebe-se que a rigidez da alvenaria aumentou com o aumento da resistência à compressão da argamassa e com a redução da espessura da junta. No entanto, este fato não fica tão evidente no que se refere à resistência à compressão da alvenaria. No próximo item será feita uma análise estatística das médias obtidas para os diferentes parâmetros analisados, de forma a entender melhor a relação existente entre eles.

Na Tabela 5.21 é apresentada uma comparação entre os valores dos módulos de deformação obtidos para os prismas neste trabalho, referidos à área bruta, e os valores mínimos e máximos estimados, calculados a partir das equações propostas por Parsekian, Hamid e Drysdale (2012), para prismas de blocos cerâmicos. Também são apresentados os valores de módulo de deformação da alvenaria prescritos pela ABNT NBR 15812-1:2010. A ordem de grandeza dos módulos de deformação obtidos muito se assemelha à dos valores esperados. Os módulos de deformação dos lotes com argamassa de traço T50 foram os que melhor seguiram o intervalo

proposto pelos autores. De forma geral nos demais casos, nos quais foram utilizadas argamassas demasiadamente fracas ou fortes, os valores calculados para o módulo de deformação apresentaram pequenos desvios com relação ao intervalo esperado. Todos os módulos de deformação obtidos nesta pesquisa e estimados pelos autores citados estavam abaixo do módulo de deformação da alvenaria E_m proposto pela ABNT NBR 15812-1:2010.

Tabela 5.21: Comparação entre módulo de deformação na área bruta aqui obtidos com os valores da literatura

Nome do lote de prismas	f_{pk} (MPa)	E_p obtido nesta pesquisa (MPa)	Intervalo esperado de E_p para prismas de blocos cerâmicos (PARSEKIAN, HAMID e DRYSDALE, 2012)			Módulo de deformação da alvenaria E_m (NBR 15812-1:2010)
			De	$390.f_{pk}$	até $444.f_{pk}$	
T30 E0,5	3,2	1102		1265	1441	1947
T30 E1,0	2,9	1015		1134	1292	1745
T30 E1,5	2,1	958		837	953	1288
T50 E0,5	2,6	1162		1032	1175	1587
T50 E1,0	2,7	1064		1040	1184	1600
T50 E1,5	2,6	1006		1016	1157	1563
T90 E0,5	3,0	1333		1164	1325	1791
T90 E1,0	2,9	1167		1130	1287	1739
T90 E1,5	2,0	1176		797	908	1227

Na Tabela 5.22 apresenta-se a eficiência prisma/bloco obtida para cada lote de prismas. Segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2012), eficiências de até 0,3 são relatadas para blocos cerâmicos de pior qualidade, enquanto que eficiências de até 0,60 são relatadas para os de melhor qualidade. As eficiências obtidas para os lotes muito se aproximam deste intervalo. Eficiências maiores foram verificadas para prismas de menor espessura da junta.

Tabela 5.22: Eficiência prisma/bloco para os diferentes lotes ensaiados

Nome do lote de prismas	Espessura média (cm)	f_{pk} (MPa)	f_a (MPa)	Eficiência prisma/bloco f_{pk}/f_{bk}
T30 E0,5	0,61	3,2	4,0	0,66
T30 E1,0	1,01	2,9	3,9	0,59
T30 E1,5	1,47	2,1	3,6	0,44
T50 E0,5	0,68	2,6	6,9	0,54
T50 E1,0	1,03	2,7	6,3	0,54
T50 E1,5	1,49	2,6	7,0	0,53
T90 E0,5	0,69	3,0	10,4	0,61
T90 E1,0	1,11	2,9	12,4	0,59
T90 E1,5	1,53	2,0	11,0	0,42

Na Tabela 5.23 apresentam-se, para cada traço de argamassa produzido, os fatores de redução de resistência à compressão e módulo de deformação de prismas de blocos cerâmicos, com o aumento da espessura da junta de argamassa, relativos à menor espessura média entre os lotes ensaiados. A maior queda de resistência à compressão com aumento da espessura da junta foi observada quando utilizada a argamassa menos resistente, situação em que a resistência caiu em 42%, quando aumentada a espessura de 0,6 cm para 1,5 cm. A queda de resistência com o aumento da espessura observada para o traço T90 foi muito próxima do proposto por Parsekian, Hamid e Drysdale (2012) na Tabela 3.5. A queda no módulo de deformação do prisma com o aumento da espessura da junta foi menos significativa que a queda de sua resistência à compressão. Para qualquer nível de resistência de argamassa o módulo de deformação caiu em aproximadamente 12%, quando aumentada a espessura de 0,6 cm para 1,5 cm.

Tabela 5.23: Coeficientes de redução de resistência e rigidez com aumento da espessura obtidos nesta pesquisa

Traço de argamassa do prisma	Espessura média da junta (mm)	Fator de redução de f_p	Fator de redução de E_p
T30	6	1,00	1,00
	10	0,73	0,92
	15	0,58	0,87
T50	7	1,00	1,00
	10	0,84	0,92
	15	0,85	0,87
T90	7	1,00	1,00
	11	0,83	0,88
	15	0,65	0,88

5.2.3 Análise estatística dos resultados

5.2.3.1 Influência da espessura das juntas na resistência à compressão de prismas

Neste item será avaliada a influência da espessura da junta de assentamento na resistência à compressão de prismas. Serão apresentadas comparações entre as médias de resistência à compressão de diferentes lotes de prismas, feitas através do software *Minitab 17*, para um nível de confiança de 95%. Diagramas de caixa e gráficos de intervalo de confiança de 95% de Tukey para as variadas comparações são apresentados nas Figuras 5.15 a 5.20.

5.2.3.1.1 Comparação entre os lotes T30 E0,5; T30 E1 e T30 E1,5:

No diagrama de caixa a seguir apresentam-se os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator espessura da junta de argamassa, para uma argamassa consideravelmente flexível e de baixa resistência à compressão.

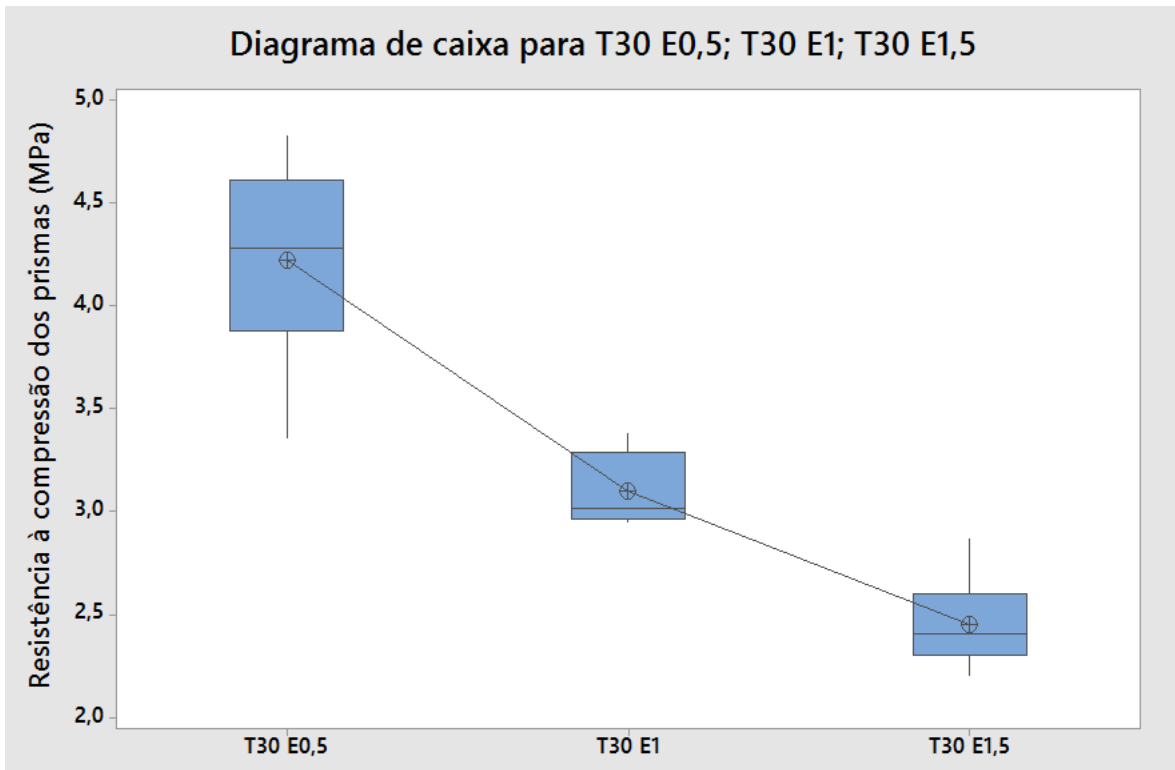


Figura 5.15: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E0,5; T30 E1 e T30 E1,5

A partir da análise estatística ANOVA apresentada no Apêndice D, conclui-se que as médias dos três lotes são significativamente diferentes entre si, para um nível de significância de 5%. Apesar de a análise estatística ANOVA ter constatado diferença significativa entre as médias destes lotes, realizou-se o Teste de Tukey para fins demonstrativos, conforme mostrado na Figura 5.16. Nenhum intervalo de diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, confirmando que as médias são de fato diferentes estatisticamente.

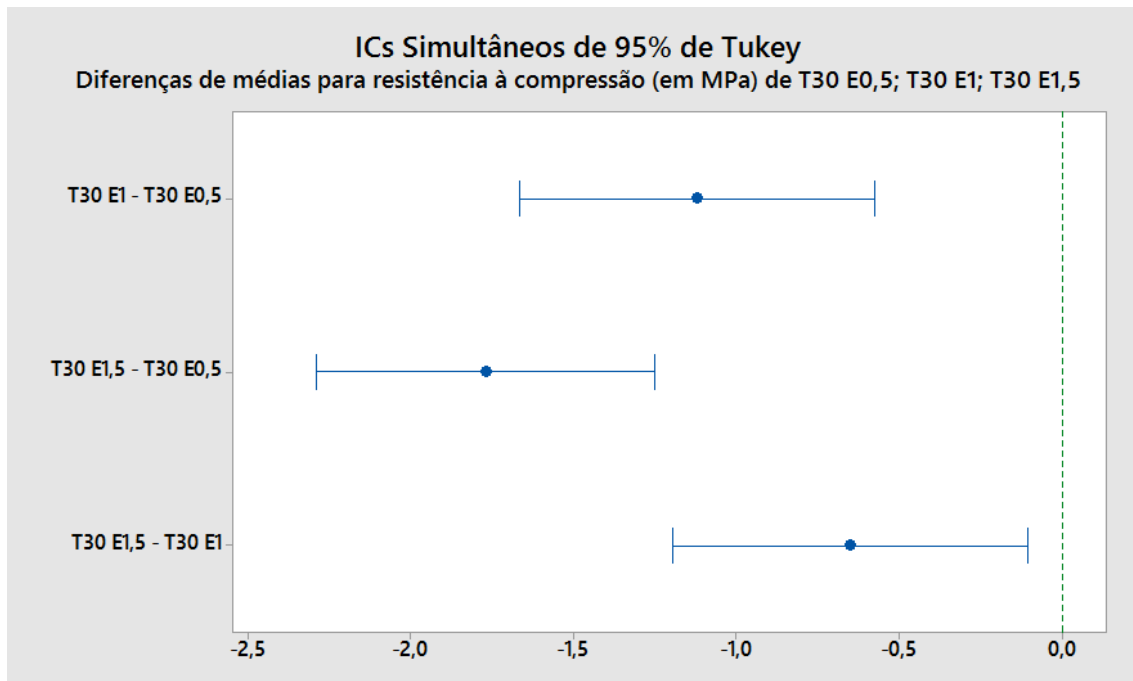


Figura 5.16: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E0,5; T30 E1 e T30 E1,5

Portanto, quando se adota uma argamassa mais fraca e mais flexível, a espessura da junta de argamassa influencia na resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Nestes casos, quanto menor a espessura da junta, maior a resistência à compressão da alvenaria.

5.2.3.1.2 Comparação entre os lotes T50 E0,5; T50 E1 e T50 E1,5:

No diagrama de caixa a seguir apresentam-se os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator espessura da junta de argamassa, para uma argamassa com resistência à compressão mediana (em torno de metade da resistência à compressão dos blocos na área líquida).

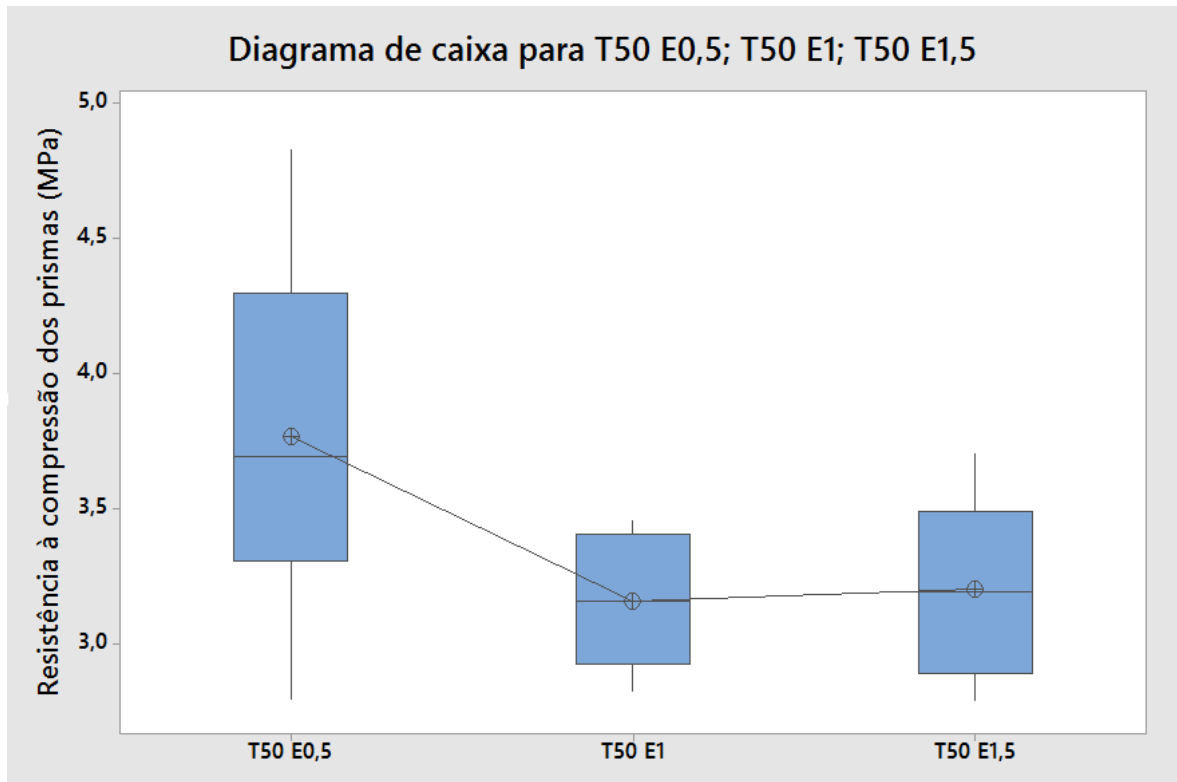


Figura 5.17: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T50 E0,5; T50 E1 e T50 E1,5

A partir da análise estatística ANOVA apresentada no Apêndice D, conclui-se que as médias dos três lotes não são significativamente diferentes entre si, para um nível de significância de 5%. O Teste de Tukey apontou que as três médias comparadas não são significativamente diferentes, sendo colocadas em um mesmo grupo. De fato, o intervalo da diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey mostrado a seguir.

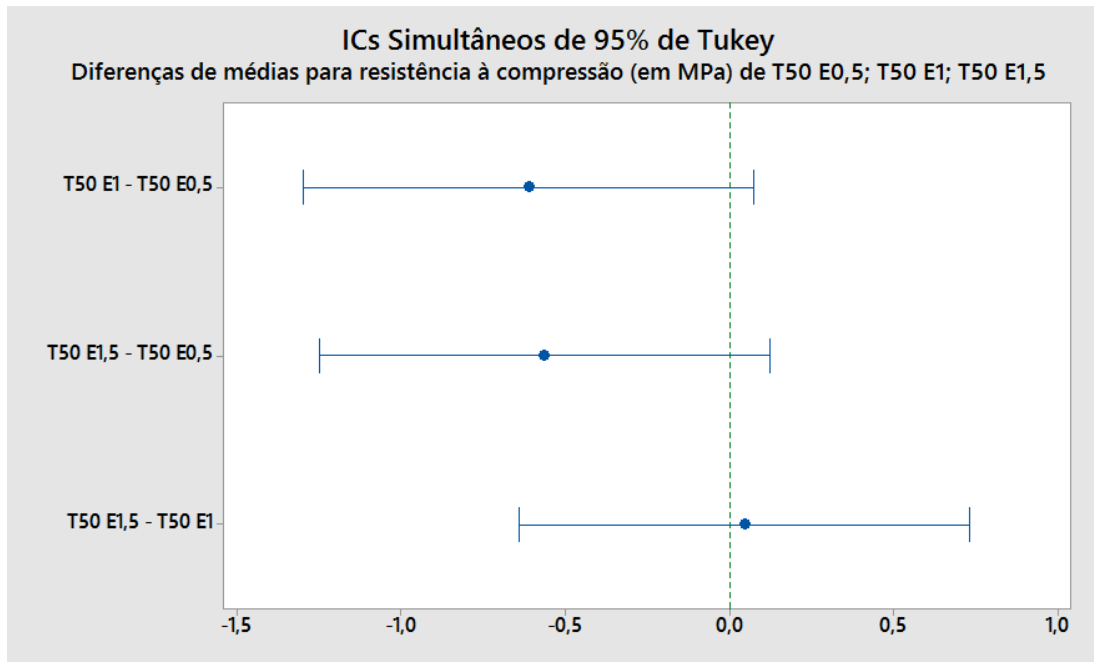


Figura 5.18: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T50 E0,5; T50 E1 e T50 E1,5

Portanto, quando adotado um traço de argamassa de resistência à compressão mediana, a espessura da junta de argamassa não influencia significativamente na resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

5.2.3.1.3 Comparação entre os lotes T90 E0,5; T90 E1 e T90 E1,5:

No diagrama de caixa a seguir apresentam-se os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator espessura da junta de argamassa, para uma argamassa consideravelmente rígida e de elevada resistência à compressão.

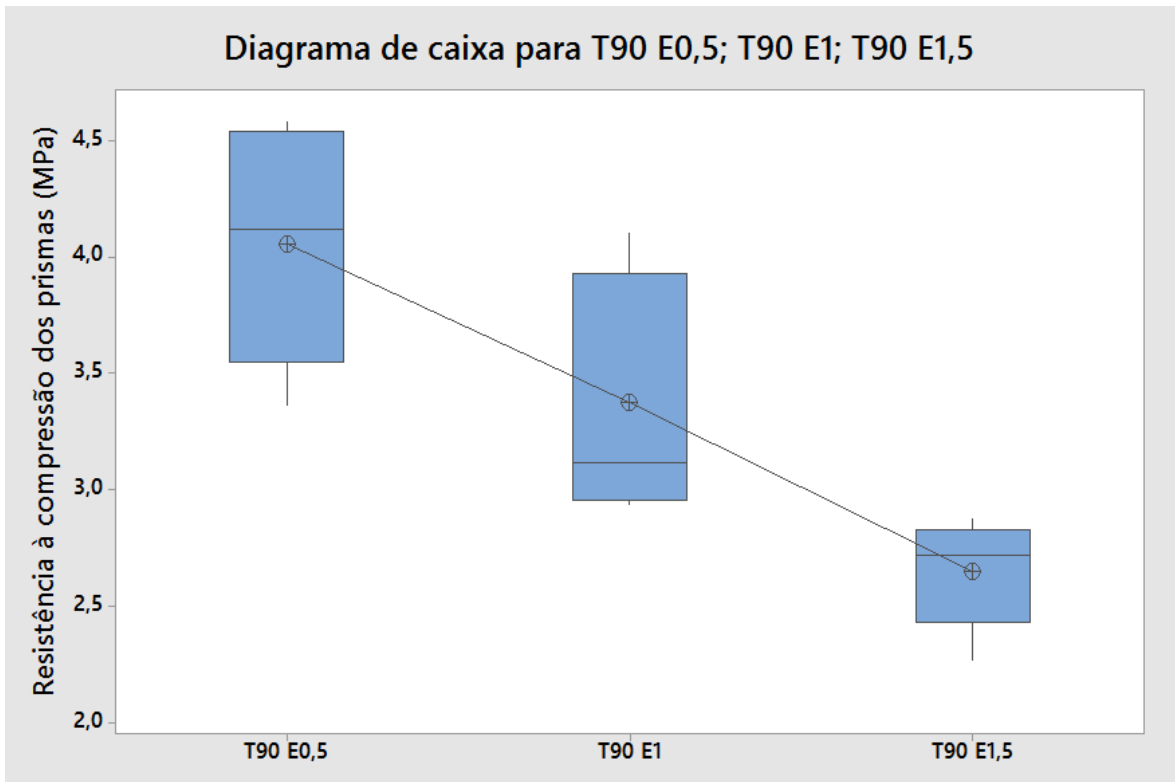


Figura 5.19: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T90 E0,5; T90 E1 e T90 E1,5

A partir da análise estatística ANOVA apresentada no Apêndice D, conclui-se que as médias dos três lotes são significativamente diferentes entre si, para um nível de significância de 5%. Nenhum intervalo de diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, confirmando que as médias são de fato diferentes estatisticamente.

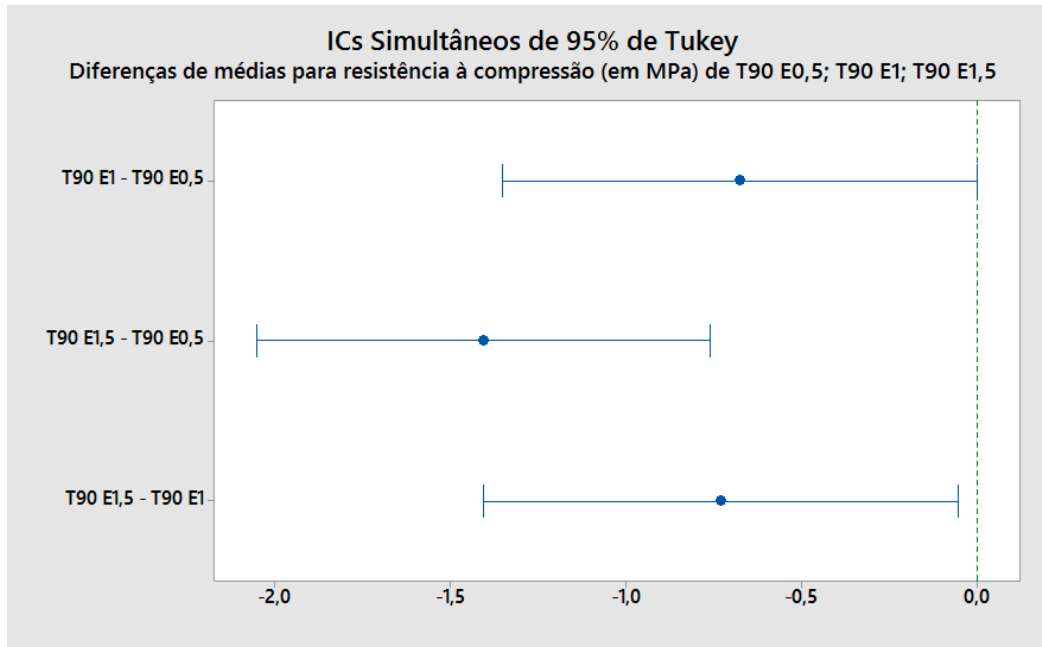


Figura 5.20: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T90 E0,5; T90 E1 e T90 E1,5

Portanto, quando empregada uma argamassa mais resistente e rígida, a espessura da junta de argamassa influencia na resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Nestes casos, quanto menor a espessura da junta, maior a resistência à compressão da alvenaria.

5.2.3.2 Influência da resistência à compressão da argamassa na resistência à compressão de prismas

Neste item será avaliada a influência da resistência à compressão da argamassa de assentamento na resistência à compressão de prismas. Serão apresentadas comparações entre as médias de resistência à compressão de diferentes lotes de prismas, feitas através do software *Minitab 17*, para um nível de confiança de 95%. Diagramas de caixa e gráficos de intervalo de confiança de 95% de Tukey para as variadas comparações são apresentados nas Figuras 5.21 a 5.26.

5.2.3.2.1 Comparação entre os lotes T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5:

O diagrama de caixa a seguir apresenta os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator resistência à compressão da argamassa, para uma espessura de junta abaixo do recomendado pela normatização brasileira.

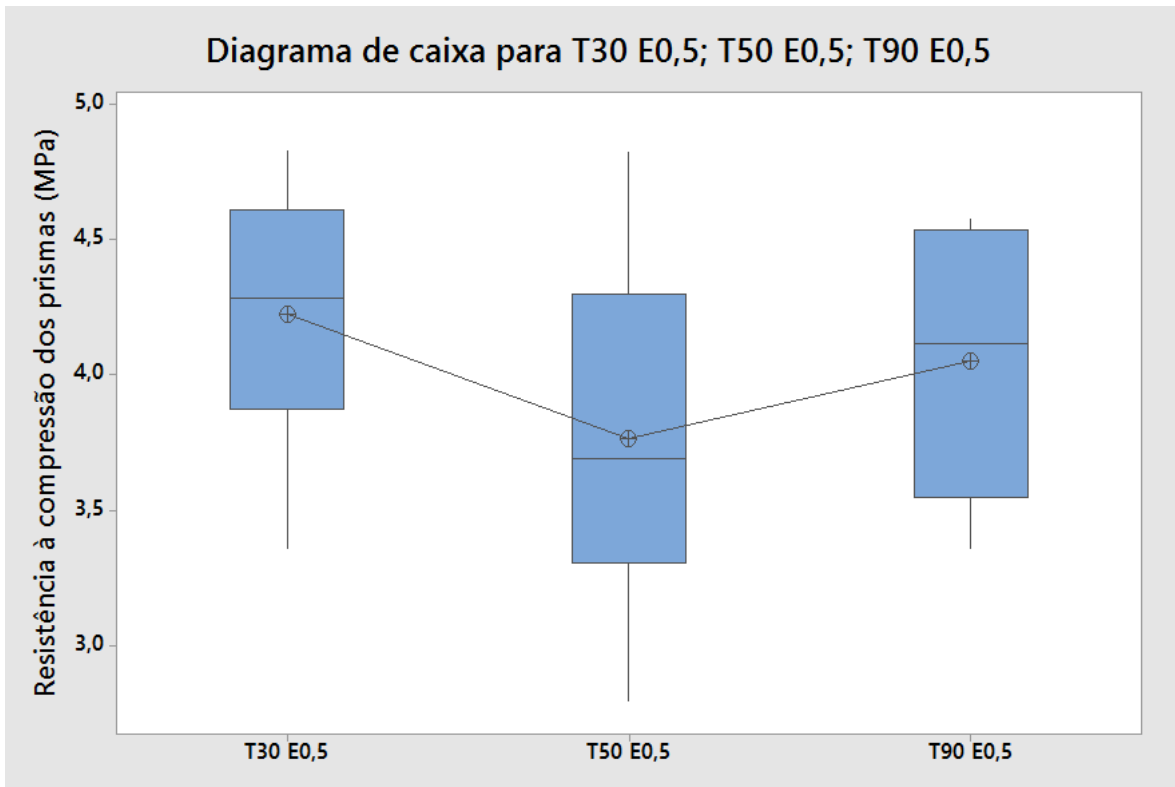


Figura 5.21: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5

A partir da análise estatística ANOVA apresentada no Apêndice D, conclui-se que as médias dos três lotes não são significativamente diferentes entre si, para um nível de significância de 5%. O Teste de Tukey apontou que as três médias comparadas não são significativamente diferentes, sendo colocadas em um mesmo grupo. De fato, o intervalo da diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, como mostrado a seguir.

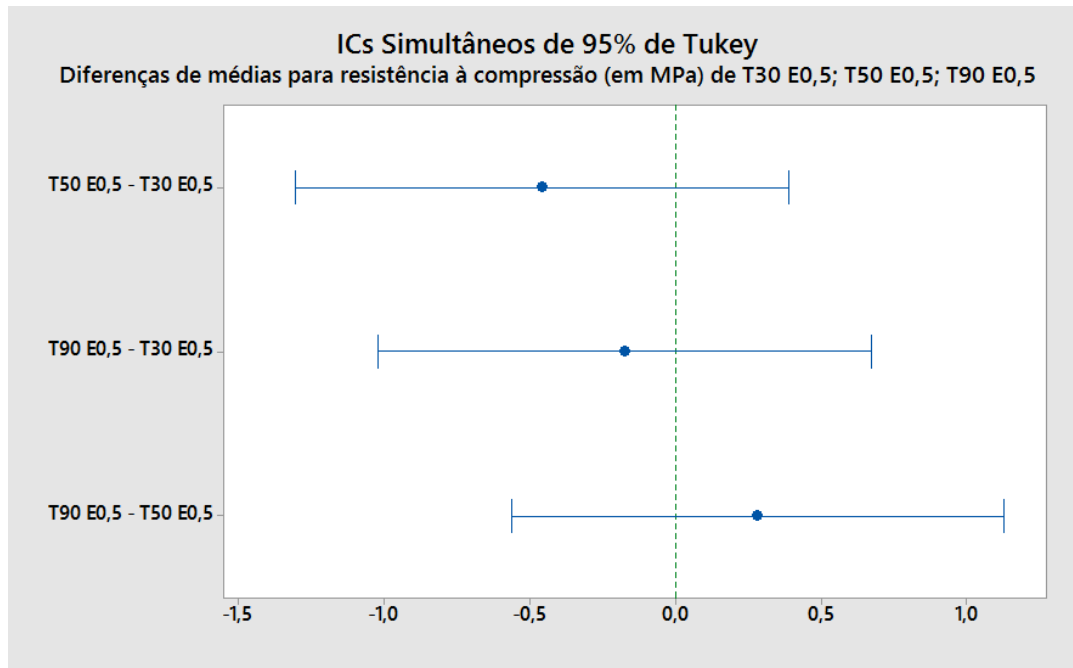


Figura 5.22: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5

Portanto, quando a espessura da junta de argamassa é menor que o estipulado pela normatização brasileira, a resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos não é significativamente afetada pela variação da resistência à compressão da argamassa.

5.2.3.2.2 Comparação entre os lotes T30 E1; T50 E1 e T90 E1:

No diagrama de caixa a seguir apresentam-se os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator resistência à compressão da argamassa, para uma espessura de junta dentro do recomendado pela normatização brasileira.

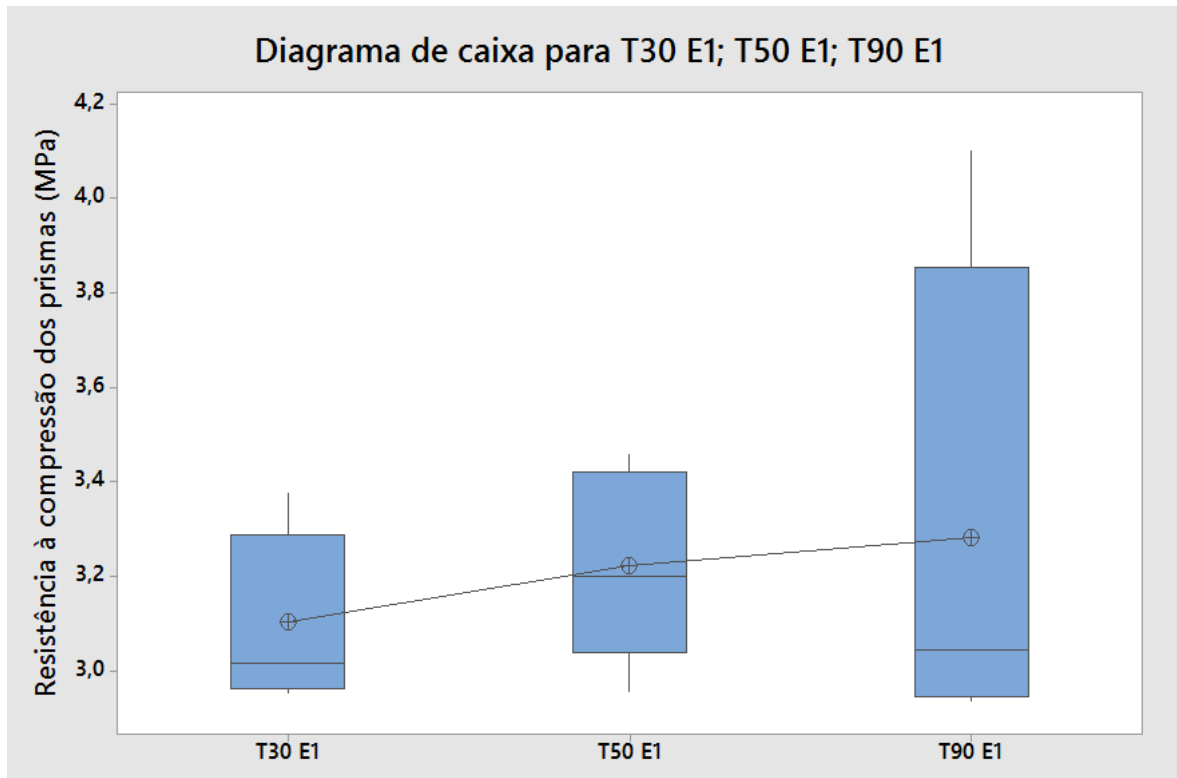


Figura 5.23: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E1; T50 E1 e T90 E1

A partir da análise estatística ANOVA apresentada no Apêndice D, conclui-se que as médias dos três lotes não são significativamente diferentes entre si, para um nível de significância de 5%. O Teste de Tukey apontou que as três médias comparadas não são significativamente diferentes, sendo colocadas em um mesmo grupo. De fato, o intervalo da diferença entre as médias de cada par intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, conforme apresentado a seguir.

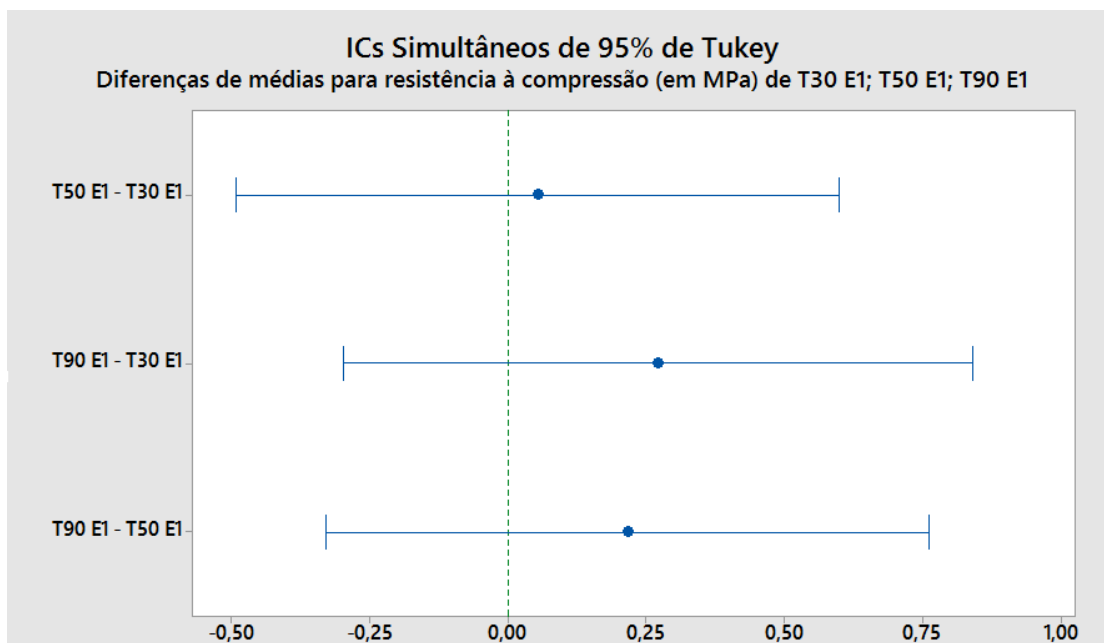


Figura 5.24: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E1; T50 E1 e T90 E1

Portanto, quando a espessura da junta de argamassa está de acordo com o estipulado pela normatização brasileira, a resistência à compressão da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos não é significativamente afetada pela resistência à compressão da argamassa.

5.2.3.2.3 Comparação entre os lotes T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5:

O diagrama de caixa a seguir apresenta os valores da variável resistência à compressão do prisma, quando variado o fator resistência à compressão da argamassa, para uma espessura de junta maior que o recomendado pela normatização brasileira.

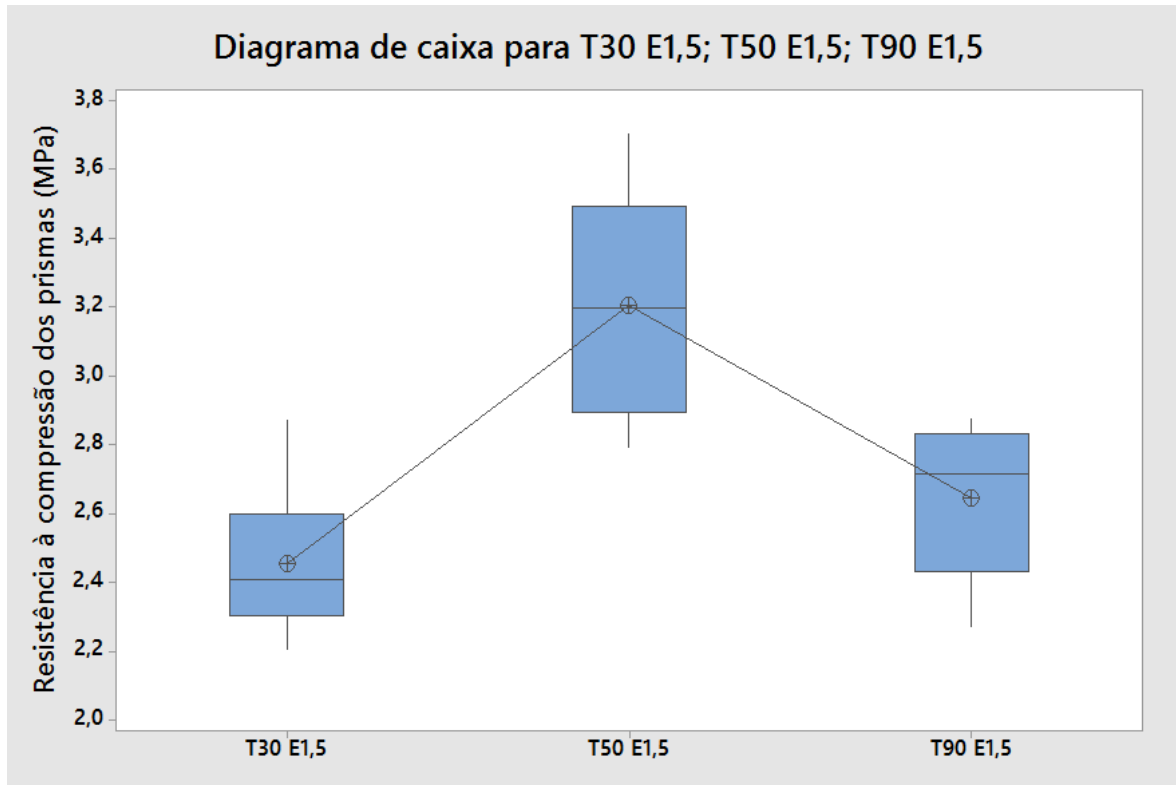


Figura 5.25: Diagrama de caixas para resistência à compressão de T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5

O Teste de Tukey apontou que duas das médias comparadas não são significativamente diferentes, sendo colocadas em um mesmo grupo: T30 E1,5 e T90 E1,5. O intervalo da diferença entre essas duas médias intercepta a linha tracejada em zero do gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey, apresentado a seguir. Já a resistência à compressão média do lote T50 E1,5 é estatisticamente diferente da média dos outros lotes.

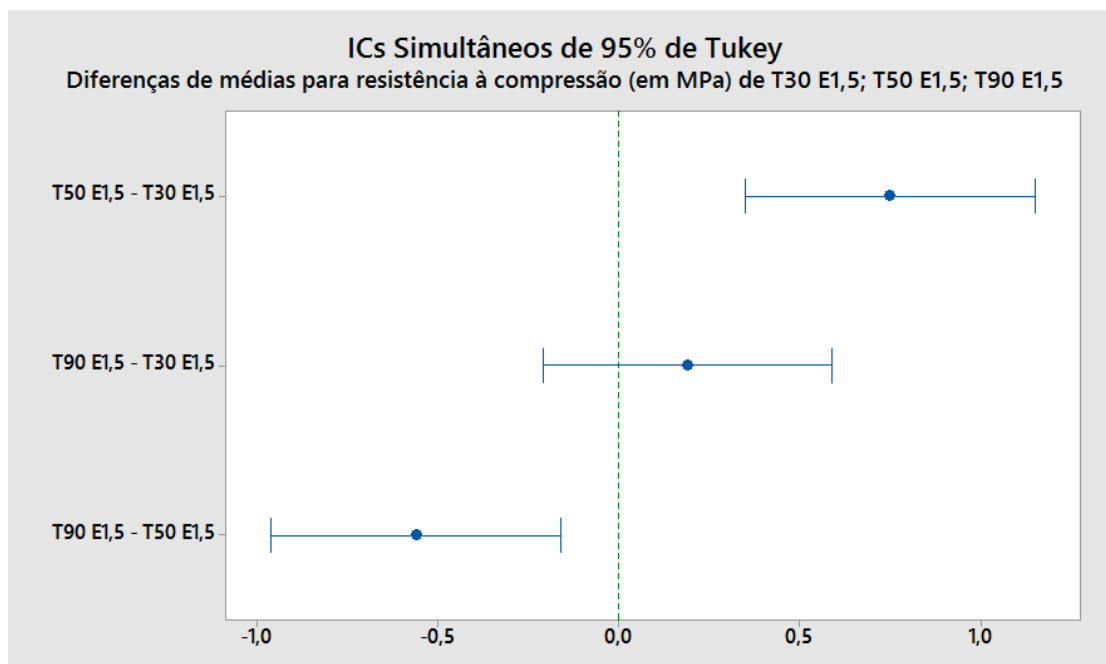


Figura 5.26: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5

Conclui-se que quando a espessura da junta de argamassa é maior que o máximo estipulado pela normatização brasileira, a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos apresenta uma resistência à compressão maior quando se utiliza uma argamassa de resistência à compressão mediana (em torno de metade da resistência à compressão dos blocos, na área líquida), quando comparada aos casos em que se usa uma argamassa muito fraca e flexível, ou muito forte e rígida.

5.2.3.3 Influência da resistência à compressão da argamassa e da espessura da junta no módulo de deformação de prismas

Neste item serão apresentadas as comparações entre as médias de módulo de deformação de diferentes lotes de prismas, feitas através do software *Minitab 17*, para um nível de confiança de 95%.

5.2.3.3.1 Comparação entre módulos de deformação de todos os lotes de prismas

No diagrama de caixa mostrado na Figura 5.27 apresentam-se os valores da variável módulo de deformação do prisma, quando variados os fatores resistência à compressão da argamassa e espessura da junta.

Diagrama de caixas para módulos de deformação - Todos os lotes de prismas

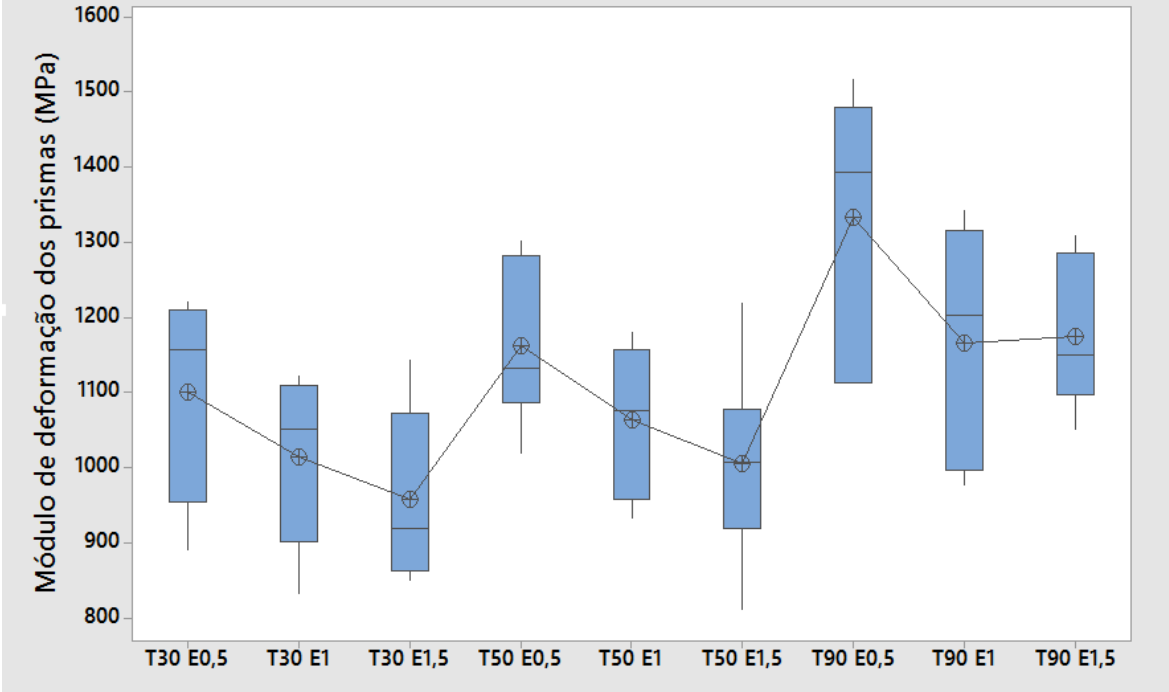


Figura 5.27: Diagrama de caixas para módulos de deformação de todos os lotes de prismas

As médias de módulo de deformação determinadas para todos os lotes não são significativamente diferentes entre si para um nível de significância de 5%, exceto quando comparados lotes com resistência à compressão da argamassa e espessura da junta situados nos extremos da análise realizada nesse trabalho. Mais especificamente, há diferença significativa entre os lotes T90 E0,5 e T30 E1, T90 E0,5 e T30 E1,5, T90 E0,5 e T50 E1 e T90 E0,5 e T50 E1,5. O gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para todos os lotes é apresentado na Figura 5.28.

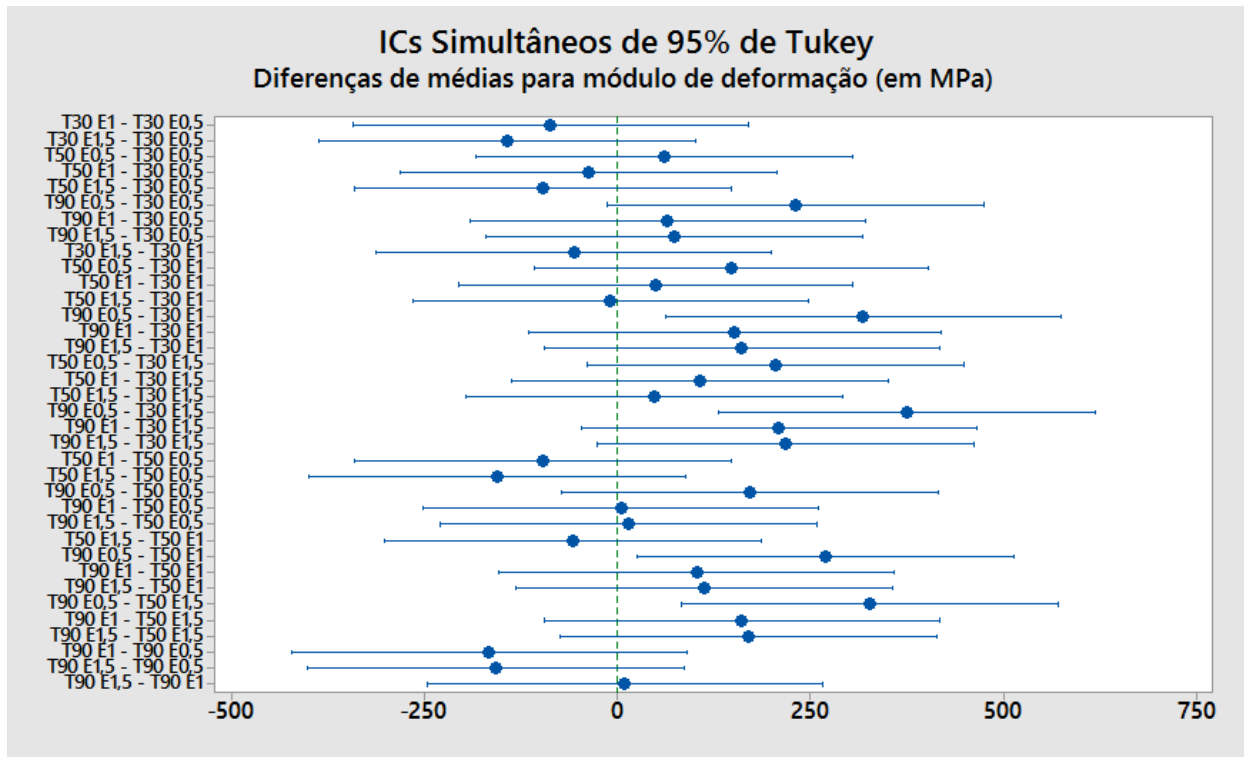


Figura 5.28: Gráfico de intervalo de confiança de 95% de Tukey para módulos de deformação dos lotes de prisms

Portanto, a resistência à compressão da argamassa e espessura da junta pouco influenciaram na deformabilidade da alvenaria estrutural. No entanto, quando combinados os dois fatores pode haver diferença significativa no módulo de deformação da alvenaria. A alvenaria produzida com maior espessura de junta e com a argamassa mais fraca e flexível possui módulo de deformação significativamente menor que o da alvenaria produzida com menor espessura de junta e com a argamassa mais forte e rígida.

5.2.3.4 Curvas de tendência

A partir dos dados obtidos, é possível propor equações matemáticas com o objetivo de relacionar as variáveis estudadas (resistência à compressão da argamassa e espessura da junta) com a resistência à compressão do prisma. Oliveira (2015) sugeriu uma relação linear positiva entre o inverso da espessura da argamassa ($1/e$) e a resistência à compressão do prisma. Franco (1988), por sua vez, apresentou uma equação potencial, em que a espessura da argamassa é a variável independente e a resistência à compressão do prisma é a dependente.

Durante o tratamento dos dados, notou-se que o modelo proposto por Franco (1988) era mais coerente com os parâmetros obtidos durante esse trabalho, oferecendo coeficientes de correlação mais próximos ao valor um. Dessa forma, na Figura 5.29 representam-se a curva de tendência da resistência à compressão dos prismas em função da espessura da argamassa para os lotes feitos com o T30. Analogamente, na Figura 5.30 representa-se a curva de tendência considerando os lotes feitos com o T50 e na Figura 5.31 a curva de tendência considerando os lotes feitos com o T90. Por fim, na Figura 5.32 é representada uma curva de tendência que considera todos os dados obtidos.

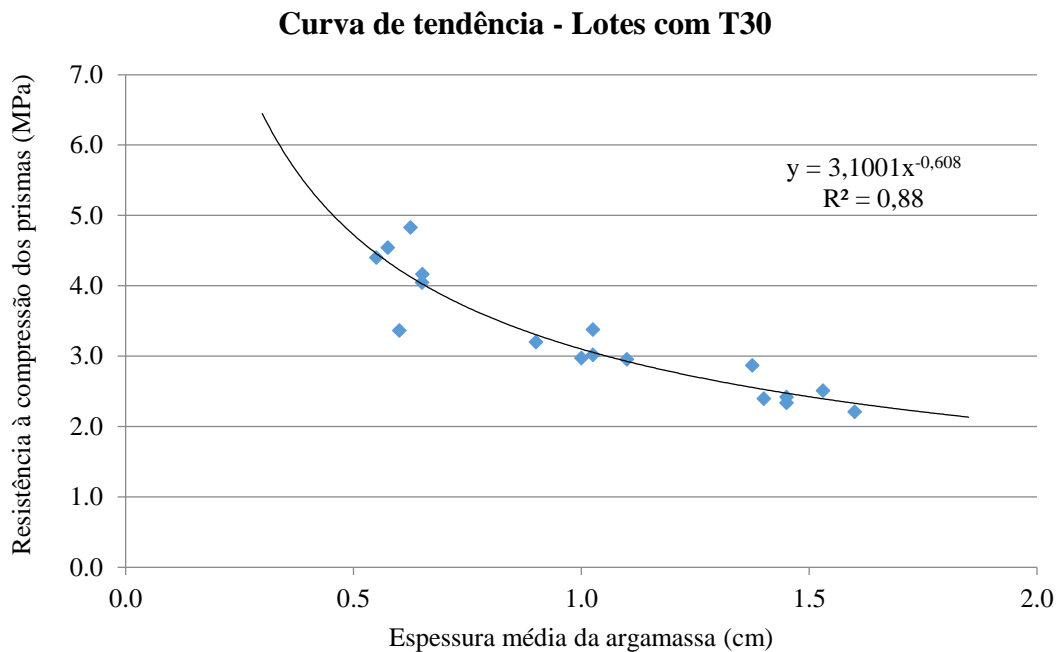


Figura 5.29: Curva de tendência para os lotes feitos com T30.

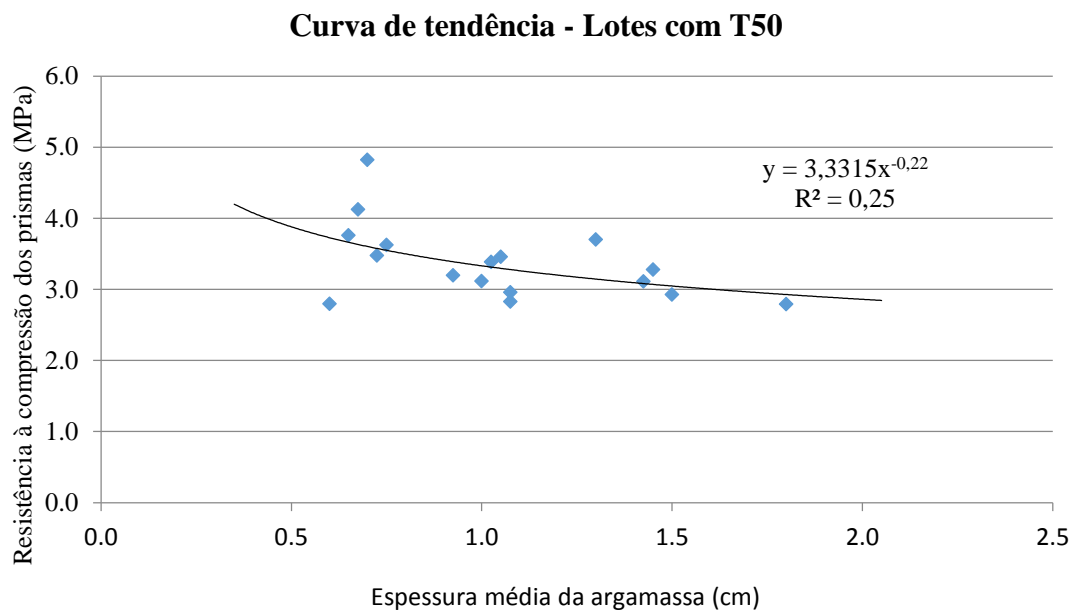


Figura 5.30: Curva de tendência para os lotes feitos com T50.

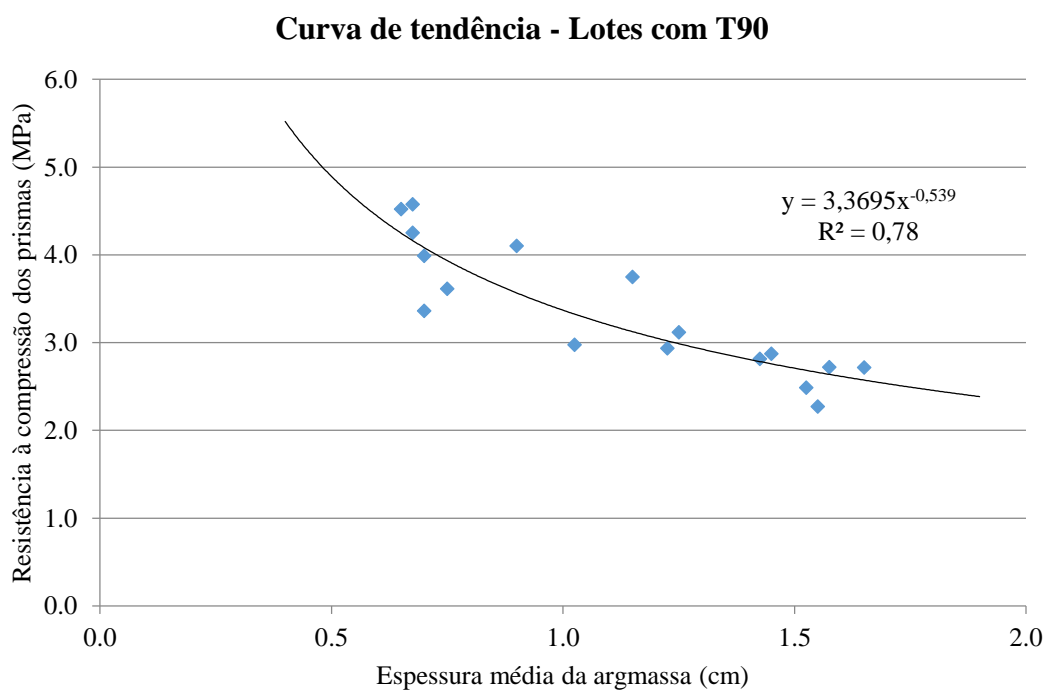


Figura 5.31: Curva de tendência para os lotes feitos com T90.

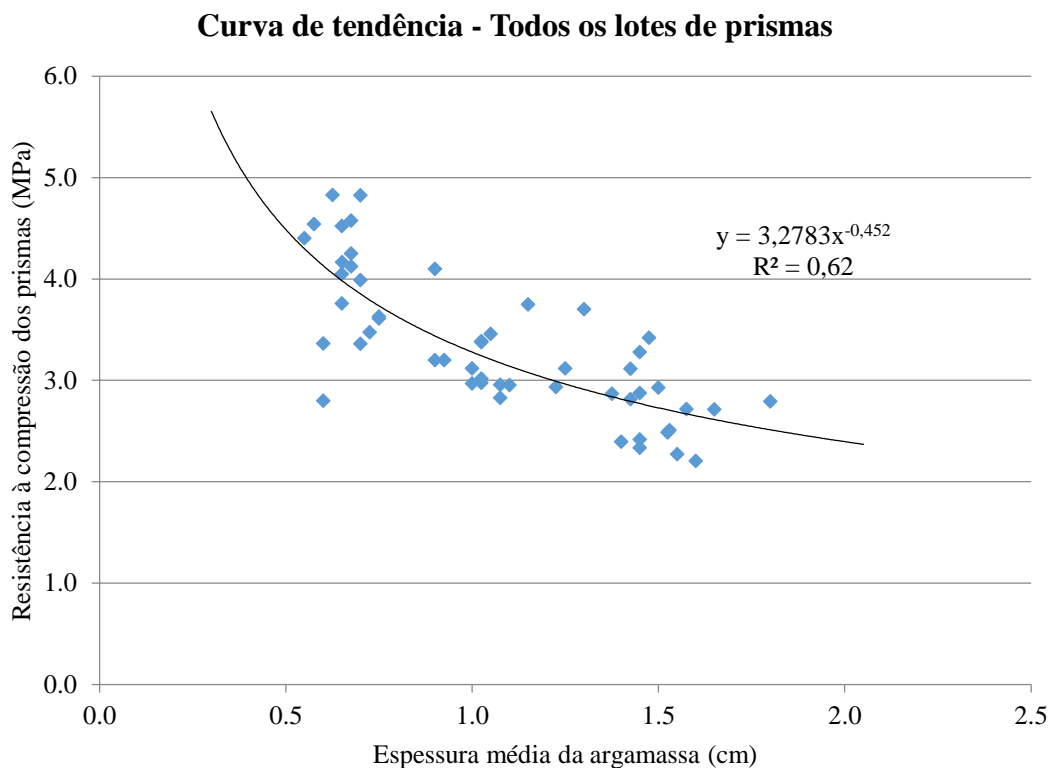


Figura 5.32: Curva de tendência para todos os dados de resistência à compressão de prisma obtidos nesse trabalho.

5.2.4 Interação entre os componentes dos prismas e modos de ruptura

As propriedades dos componentes da alvenaria estrutural e a interação entre eles determinam o comportamento da estrutura. Nesta seção será descrito este comportamento com base nas propriedades mecânicas dos componentes utilizados e nas espessuras das juntas de argamassa.

As propriedades mecânicas de blocos e argamassas foram obtidas através de ensaios uniaxiais, os quais simulam uma situação bem diferente da qual a argamassa se encontra no interior das juntas. Contudo, os resultados obtidos através destes ensaios foram capazes de oferecer subsídios para se dizer o quão fortes e rígidos eram os blocos ou a argamassa produzida com cada traço. Além disso, estes resultados ainda permitem estimar, com base em equações propostas por diferentes autores, as propriedades mecânicas da argamassa em situação mais próximas às que de fato acontecem na alvenaria.

Segundo Amrhein e Porter (2009), o módulo de elasticidade é a grandeza física que representa a deformação de um material ou combinação de materiais devido à atuação de determinado

carregamento. Da resistência dos materiais, tem-se, no regime elástico, a relação apresentada pela equação 5.1:

$$\sigma = E \times \varepsilon_{long} \quad (5.1)$$

onde:

σ é a tensão axial de compressão aplicada;

E é o módulo de elasticidade longitudinal do material;

ε_{long} é a deformação longitudinal do material devido ao carregamento aplicado.

Quando um corpo é comprimido longitudinalmente, ele se contrai na direção da força e se expande lateralmente, o que é mostrado na equação 5.2.

$$\varepsilon_{transv} = -\nu \times \varepsilon_{long} \quad (5.2)$$

onde:

ν é o coeficiente de Poisson;

ε_{transv} é a deformação transversal sofrida pelo material;

ε_{long} é a deformação longitudinal sofrida pelo material.

Aplicando-se as equações acima para a argamassa (a) e os blocos cerâmicos (b) que compõem cada prisma desta pesquisa, pode-se quantificar o quanto cada material tenderia a se expandir lateralmente durante o regime elástico, durante o aumento da carga de compressão, conforme mostrado nas equações 5.3 a 5.5.

$$\varepsilon_{long}^a = \frac{\sigma}{E_a} \quad \varepsilon_{long}^b = \frac{\sigma}{E_b} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{transv}^a = -\nu_a \times \varepsilon_{long}^a \quad \varepsilon_{transv}^b = -\nu_b \times \varepsilon_{long}^b \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{transv}^a = -\nu_a \times \frac{\sigma}{E_a} \quad \varepsilon_{transv}^b = -\nu_b \times \frac{\sigma}{E_b} \quad (5.5)$$

Finalmente, obtém-se a razão entre as tendências de deformação transversal de cada material.

$$\frac{\varepsilon_{transv}^b}{\varepsilon_{transv}^a} = \frac{-\nu_b \times \frac{\sigma}{E_b}}{-\nu_a \times \frac{\sigma}{E_a}} = \frac{\nu_b}{\nu_a} \frac{E_a}{E_b} \quad (5.6)$$

É importante dizer que a equação 5.6 apenas deixa claro qual dos componentes tende a se deformar mais durante a aplicação de carga. Devido à aderência existente na interface entre bloco e argamassa, movimentos laterais diferenciais são restringidos, e a deformação real é um valor intermediário entre as quantidades que cada componente tende a se deformar. Como consequência desta restrição de movimento, surgem tensões laterais em ambos os componentes. Os valores de módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson de cada componente permitem prever qual componente será tracionado e qual será comprimido lateralmente, no início do carregamento, uma vez que permitem apontar através desta equação quem tende a se deformar mais lateralmente. Quanto maior a diferença entre os módulos de elasticidade dos componentes da alvenaria e entre os coeficientes de Poisson dos mesmos, maior será a magnitude das tensões transversais geradas.

Na Tabela 5.24, apresentam-se algumas das propriedades de blocos, prismas e argamassas, a relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos blocos e o valor da relação obtida pela equação 5.6 para cada lote de prismas. Quando aplicada esta equação, empregou-se uma estimativa do coeficiente de Poisson da argamassa de acordo com a curva apresentada na Figura 3.4. Já o coeficiente de Poisson dos blocos cerâmicos foi considerado igual a 0,15, conforme prescrito pela ABNT NBR 15812-1:2010.

Tabela 5.24: Comparação entre resistências e rigidezes dos componentes da alvenaria

Nome do lote de prismas	Espessura média (cm)	f_{pk} (MPa)	f_a (MPa)	f_a/f_{bk} , Área líquida (%)	E_a (GPa)	E_b^* (GPa)	Coefficiente de Poisson	$\varepsilon_{transv}^b / \varepsilon_{transv}^a$
T30 E0,5	0,61	3,2	4,0	30,61	7,82		0,19	0,90
T30 E1,0	1,01	2,9	3,9	29,39	4,48		0,19	0,52
T30 E1,5	1,47	2,1	3,6	27,18	5,22		0,19	0,61
T50 E0,5	0,68	2,6	6,9	52,47	9,23		0,17	1,19
T50 E1,0	1,03	2,7	6,3	48,00	8,73	6,81	0,18	1,06
T50 E1,5	1,49	2,6	7,0	52,92	10,41		0,17	1,34
T90 E0,5	0,69	3,0	10,4	79,49	14,24		0,16	1,96
T90 E1,0	1,11	2,9	12,4	94,04	13,16		0,15	1,93
T90 E1,5	1,53	2,0	11,0	84,06	12,55		0,16	1,73

*Módulo de deformação do bloco calculado em relação à área líquida.

Nos lotes T30 E0,5, T30 E1,0 e T30 E1,5, produzidos com argamassa mais fraca e flexível, a relação $\varepsilon_{transv}^b / \varepsilon_{transv}^a$ é sempre menor que 1. Isso significa que a argamassa tende a se expandir lateralmente mais que o bloco. Devido à aderência entre os dois materiais, o bloco restringiu esta deformação transversal, gerando tensões laterais de compressão na argamassa. Portanto, a argamassa encontrava-se em um estado triaxial de compressão. A restrição de movimentos devida à aderência também provocou tensões de tração no bloco na região próxima à interface de contato entre os dois materiais. Dessa forma, a ruptura do prisma aconteceria quando a tensão principal de tração no bloco alcançasse a resistência à tração do mesmo ou quando a tensão principal de compressão da argamassa alcançasse a resistência à compressão da mesma no estado confinado.

Conforme mencionado por Oliveira (2015), quanto menor a espessura da junta de argamassa, maior o confinamento da mesma. Neste trabalho, observou-se que a redução da espessura da junta aumenta significativamente a resistência à compressão dos prismas. No caso dos lotes T30 E0,5, T30 E1,0 e T30 E1,5, atribui-se este ganho de resistência ao maior nível de confinamento da argamassa. Observa-se que para os mesmos blocos e o mesmo traço de argamassa, variando apenas a espessura da junta e o nível de confinamento da argamassa, observou-se o aumento da capacidade de carga da alvenaria. Portanto, há indícios de que a ruptura dos prismas nesses lotes ocorreu por esmagamento da argamassa e não por tração nos

blocos. Em muitos casos, nos pontos onde a argamassa foi esfacelada, houve o contato direto entre blocos, induzindo concentração de tensões, e resultando no fendilhamento vertical dos mesmos.

Agora será feita para estes mesmos lotes uma análise da influência da espessura da junta, começando-se pelo caso da menor espessura. Para alguns prismas do lote T30 E0,5, como o prisma P1 mostrado na Figura 5.33, houve um mecanismo de ruptura frágil. Foi observado o esfarelamento do cordão de argamassa, conforme descrito anteriormente. Porém, como a espessura da junta era demasiadamente pequena, houve de imediato o contato entre blocos nos pontos onde a argamassa fora localmente esmagada, seguido pelo aparecimento de fissuras verticais. Em alguns prismas, a ruptura foi significativamente frágil, com surgimento abrupto de fissuras verticais em várias regiões do bloco, originadas nas proximidades da região de contato entre os mesmos.

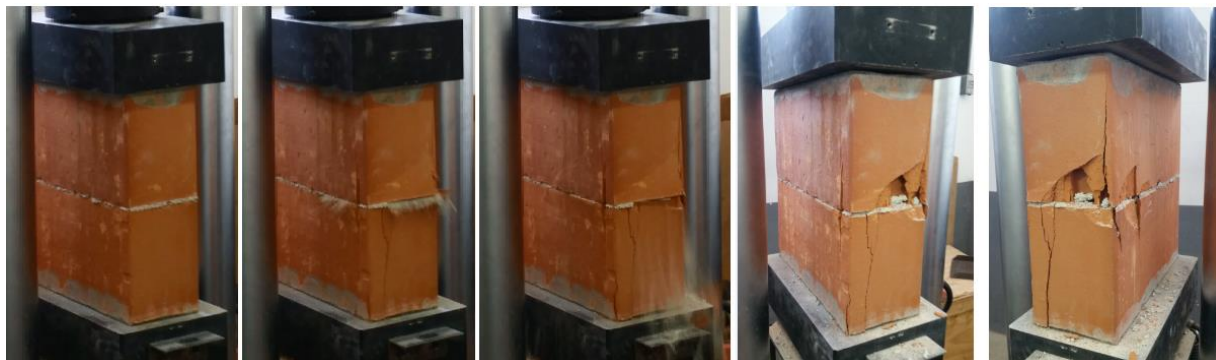


Figura 5.33: Mecanismo de ruptura do prisma P1 do lote T30 E0,5

Já para alguns prismas de maior espessura de junta, como os do lote T30 E1,5, como o prisma P6 mostrado na Figura 5.34, houve um mecanismo de ruptura dúctil. Novamente, foi possível perceber o esfarelamento da argamassa. Ao término do ensaio, o bloco superior estava descolado da junta de argamassa, conforme é notado na última imagem da Figura 5.34. Investigando-se o corpo de prova após a execução do ensaio, notou-se a microfissuração generalizada da argamassa e que os blocos ficaram praticamente intactos. Como neste caso a espessura da junta era maior, evitou-se o contato entre blocos, e o conseqüente aparecimento abrupto de fissuras verticais nos mesmos.



Figura 5.34: Mecanismo de ruptura do prisma P6 do lote T30 E1,5

Nos lotes T90 E0,5, T90 E1,0 e T90 E1,5, a relação $\varepsilon_{transv}^b / \varepsilon_{transv}^a$ é significativamente maior que 1, o que significa que a argamassa tende a se deformar transversalmente menos que o bloco. Devido à aderência entre os dois componentes, a argamassa restringe esta deformação transversal, gerando tensões laterais de compressão no bloco e de tração na argamassa. Quando a tensão principal de tração da argamassa alcança a resistência à tração da mesma, fissuras verticais dividem o cordão de argamassa em placas, as quais continuam a resistir ao carregamento axial. A ruptura do prisma pode acontecer quando a tensão principal de compressão no bloco alcança a resistência à compressão do mesmo ou quando o cordão de argamassa fissurado perde estabilidade, uma vez que está comprimido axialmente, sendo lançado para fora do conjunto, na direção perpendicular ao plano das menores faces do prisma.

Para estes lotes, observou-se novamente que a redução da espessura da junta aumenta a resistência à compressão dos prismas. Uma possível justificativa para este comportamento é que o aumento da espessura da junta diminui a estabilidade lateral do cordão de argamassa fissurado devido ao aumento do comprimento efetivo. Assim, um menor carregamento já é capaz de provocar a ruptura do prisma.

Em alguns corpos de prova, principalmente nos que possuíam menor espessura de junta, notou-se o fendilhamento vertical dos blocos, apesar de eles estarem em um estado triaxial de compressão durante o carregamento. Isso pode ser justificado analisando o comportamento do bloco pós-pico. Imediatamente após a expulsão da argamassa, ocorre o contato direto entre

blocos, induzindo fissuração vertical nos mesmos. Este contato é facilitado quando utilizadas menores espessuras de junta. Assim, os prismas dos lotes com espessura de 0,5 cm foram os que frequentemente apresentaram fissuras verticais.

Para prismas do lote T90 E0,5, observou-se ruptura frágil por perda de estabilidade do cordão da argamassa, seguido pelo contato entre blocos e surgimento de fissuras verticais, como mostrado para o P4 na Figura 5.35.



Figura 5.35: Mecanismo de ruptura do prisma P4 do lote T90 E0,5

Notou-se também a perda de estabilidade do cordão de argamassa para prismas do lote T90 E1,5. Porém, como a espessura da junta era maior, a argamassa não foi totalmente expulsa, de modo que a ruptura ocorreu de forma mais dúctil, por não ocorrer o contato entre blocos, como mostrado na Figura 5.36 para o prisma P3.



Figura 5.36: Mecanismo de ruptura do prisma P3 do lote T90 E1,5

Já a ruptura por esmagamento do bloco foi observada em menor quantidade de corpos de prova. Nestes casos, a tensão principal de compressão no bloco alcançou a resistência à compressão do bloco antes da perda de estabilidade do cordão de argamassa, fazendo surgir fissuras horizontais no bloco, como ocorrido com o prisma P1 do lote T90 E1,0, que é mostrado na Figura 5.37. Quando o bloco é esmagado, a ruptura é consideravelmente explosiva, havendo desprendimento e queda de pedaços de parede dos blocos para longe da prensa.

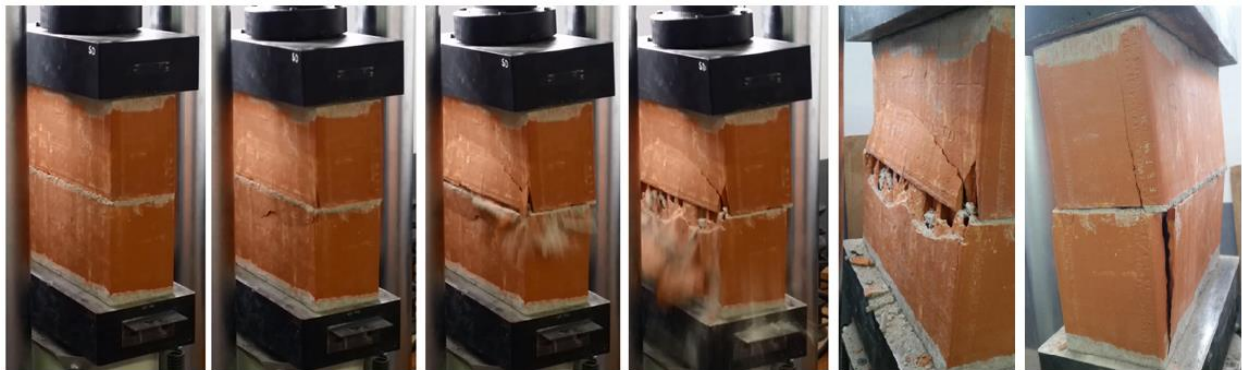


Figura 5.37: Mecanismo de ruptura do prisma P1 do lote T90 E1,0

No caso dos lotes T50 E0,5, T50 E1, T50 E1,5, a relação $\varepsilon_{transv}^b / \varepsilon_{transv}^a$ flutuou ao redor de 1, o que significa que as deformações laterais da argamassa e do bloco são praticamente iguais, minimizando o surgimento de tensões laterais entre os componentes. Em alguns casos, surgiram tensões laterais de compressão na argamassa e tração no bloco, verificando-se comportamentos semelhantes aos lotes T30 E0,5, T30 E1,0 e T30 E1,5. Em outros casos, surgiram tensões laterais de tração na argamassa e compressão no bloco, ocasionando comportamentos semelhantes aos lotes T90 E0,5, T90 E1,0 e T90 E1,5. Os comportamentos distintos observados são justificados pela própria variabilidade nas propriedades dos materiais componentes da alvenaria.

O mecanismo de ruptura observado para cada prisma ensaiado durante o programa experimental deste trabalho encontra-se explicitado no Apêndice C.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

Neste trabalho foi avaliada a influência da resistência à compressão da argamassa e da espessura da junta na resistência à compressão, deformabilidade e modo de ruptura de prismas de blocos cerâmicos. Assim, foram caracterizados os materiais utilizados (cimento, areia e cal), os componentes (blocos e argamassas), e os prismas construídos com estes componentes.

Pode-se afirmar que o presente trabalho atendeu o objetivo de determinar tanto as propriedades físicas e mecânicas dos materiais de construção empregados na alvenaria estrutural, quanto de seus constituintes básicos, blocos e argamassa. Os valores obtidos através dos ensaios de caracterização da areia, da cal, do cimento e dos blocos cerâmicos satisfazem aos valores esperados de fábrica ou aos limites prescritos pela normatização brasileira. A metodologia empregada para determinação do módulo de elasticidade estático à compressão de blocos cerâmicos e argamassas permitiu a obtenção de valores significativamente próximos aos da literatura.

No que se refere aos ensaios de prismas, este trabalho contribuiu para a análise da interação entre os componentes da alvenaria a partir de resultados encontrados em ensaios simples de compressão uniaxial desses elementos, para determinação de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Embora estes ensaios não reproduzam fielmente a situação em que blocos e argamassas se encontram nas paredes de alvenaria. Contudo, a partir da discussão dos resultados, conclui-se que ensaios de compressão de prismas ainda têm grande aplicabilidade para se obter de forma simples e rápida resultados que auxiliam o projetista no melhor entendimento do comportamento da alvenaria estrutural.

É importante destacar que os comportamentos analisados nesta pesquisa descrevem a alvenaria estrutural produzida particularmente com os materiais de construção aqui utilizados, nas condições aqui descritas. Portanto, as conclusões obtidas revelam apenas tendências gerais obtidas a partir do estudo de materiais específicos.

Quando variada apenas a espessura da junta, é possível concluir que esta afeta a resistência à compressão dos prismas e, por consequência, sua eficiência. Prismas produzidos com T30 e T90 aumentaram significativamente sua eficiência quando a espessura da junta diminuiu. O modo de ruptura também é afetado pela espessura da junta. Prismas com junta de menor espessura tendem a romper de maneira frágil e explosiva, enquanto prismas com junta de maior espessura rompem de forma dúctil. O módulo de deformação dos prismas, por sua vez, não sofreu influência tão significativa com a mudança da espessura da junta de argamassa.

Quando variada apenas a resistência da argamassa, é possível concluir que esta afeta significativamente somente a eficiência dos prismas produzidos com espessura de junta de 1,5 cm. O módulo de deformação dos prismas também não é influenciado significativamente com a variação da resistência da argamassa. Quando a deformação transversal do bloco tendia a ser menor que a da argamassa, os prismas apresentaram indícios de ruptura por tração no bloco ou por compressão na argamassa triaxialmente confinada. Quando a deformação transversal do bloco tendia a ser maior que a da argamassa, os prismas romperam por esmagamento do bloco ou por perda de estabilidade no cordão de argamassa fissurado. Prismas com juntas de 0,5 cm apresentaram ruptura frágil, independentemente da resistência da argamassa. Prismas com juntas maiores, por sua vez, apresentam modos de ruptura distintos, descritos anteriormente.

Ao se analisar os resultados obtidos neste trabalho para o conjunto de materiais aqui empregados, pode-se fazer uma sugestão de quais seriam o melhor traço e a melhor espessura a serem utilizados. De acordo com os modos de ruptura dos prismas, percebe-se que a espessura de junta de 0,5 cm conduz a uma ruptura frágil da alvenaria, o que não é recomendado para uma construção. Os prismas com junta de argamassa de 1,5 cm tiveram tendência à ruptura dúctil, mas suportaram menores carregamentos. Aqueles com espessura de 1,0 cm tiveram um comportamento intermediário, porém não tão explosivo quanto os de 0,5 cm. Então, pode-se concluir que a melhor espessura é 1,0 cm, porque esta oferece um comportamento na ruptura desejável para uma edificação e tem um consumo menor de material. Com base no teste de Tukey realizado, os lotes T30 E1,0, T50 E1,0 e T90 E1,0 não apresentaram diferença estatística quanto à resistência à compressão e módulo de deformação. Os lotes T30 E1,0 e T50 E1,0 apresentaram uma ruptura mais dúctil que o traço T90 E1,0. Assim, o uso da argamassa de traço

mais fraco se apresentou como uma excelente alternativa do ponto de vista econômico e de segurança estrutural.

Portanto, conclui-se que a melhor combinação entre espessura e traço para possível aplicação em uma obra seria: junta de 1,0 cm e argamassa com 30% da resistência à compressão dos blocos na área líquida (ou 80% da resistência à compressão dos blocos na área bruta), respeitando-se os limites da normatização brasileira. Esta combinação apresenta considerável resistência à compressão e rigidez, ruptura mais dúctil e consumo menor de cimento.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Nesse contexto de fim de trabalho, surgem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos grauteada, a partir das propriedades mecânicas de blocos e argamassa;
- Avaliar a influência da espessura da junta de argamassa no comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos grauteada;
- Utilizar os dados experimentais obtidos para abastecer modelos numéricos, possibilitando uma análise mais completa da distribuição de tensões e deformações nos corpos de prova, a diferentes níveis de solicitação.
- Elaborar e estudar métodos de ensaio de caracterização de blocos e argamassa que melhor reproduzam o comportamento destes materiais enquanto componentes da alvenaria estrutural.
- Verificar a influência da geometria dos blocos cerâmicos no comportamento da alvenaria estrutural, quando variadas as propriedades mecânicas da argamassa e/ou a espessura da junta.
- Estudar a variação do módulo de deformação e do coeficiente de Poisson da argamassa, quando esta se encontra nos diferentes estados de tensão verificados no presente trabalho;
- Analisar a aderência bloco/argamassa para as diferentes composições de argamassa propostas neste trabalho, o que permitirá descrever melhor o mecanismo de ruptura observado em cada situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1006**: Standard test method for splitting tensile strength of masonry units. Philadelphia, 2013. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1586**: Standard guide for quality assurance of mortars. West Conshohocken, 2005. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C270**: Standard specification for mortar for unit masonry. West Conshohocken, 2014. 14 p.

AMJAD, M. A. **Elasticity and strength of masonry, units and mortar**. Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Leeds, Inglaterra, 1990. 253 p.

AMRHEIN, J. E.; PORTER, M. L. **Reinforced masonry engineering handbook**. 6. ed. Washington: International Code Council (ICC) & Masonry Institute Of America (MIA), 2009. 602 p.

ANTUNEZ Projetos e Consultoria. In: Áreas de atuação. **Sistema construtivo de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto**. 2010. Disponível em: <<http://www.antunezengenharia.com.br/atuacao>>. Acesso em: 27 outubro 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. Versão corrigida: 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991. Versão corrigida: 1997. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012. Versão corrigida: 2013. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005. 3 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. 15 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 15270-2**: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3**: Componentes cerâmicos – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008. Versão corrigida: 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento portland – Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BROOKS, J. J. **Concrete and Masonry Movements**. Elsevier Inc, 2015. 595 p.

CARVALHO, J. M. **Desempenho estrutural de prismas de blocos cerâmicos com diferentes formas e dimensões**. 2003. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

COSTA, D. H. P. **Desempenho estrutural de blocos, prismas, mini-paredes e paredes de alvenaria estrutural confeccionadas com blocos cerâmicos produzidos a partir da mistura de lama vermelha com argila**. 2014. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

DAFICO, D. A.; RESENDE, P. S. de O. Estudo da influência da composição de argamassa na resistência da alvenaria de blocos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, v. 4, n. 14, p.41-46, jul. 2009.

FRANCO, L. S. **Desempenho da alvenaria à compressão**. BT – PCC 20/88. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1988. 14 p.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos**. 2000. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GOMES, N. S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1974. 291 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.

LEÃO, C. T. **Resistência de prismas de blocos estruturais cerâmicos submetidos a esforços de compressão e tração na flexão**. 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LIMA, A. N. de. **Análise experimental da influência da resistência e espessura da argamassa de assentamento no desempenho de prismas de blocos cerâmicos**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

MENDES, R. J. K. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais**. 1998. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

MINITAB, INC. **Software Minitab 17.3.0**. United States, 2016.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural - previsão e modo de ruptura. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p.824-844, jul. 2009.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, A. J. C.; BARBOSA, F. R.; CARVALHO, J. R. de. Influência da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão axial de prismas de blocos cerâmicos. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto**, Maceió, v. 1, n. 1, p.1-10, out. 2012.

OLIVEIRA, R. P. de. **Estudo experimental da influência da argamassa de assentamento na resistência à compressão da alvenaria estrutural cerâmica**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2015.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A., DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento da alvenaria estrutural**. 1. ed. São Paulo: Editora EdUFSCar, 2012. 625 p.

PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M. M. **Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos – projeto, execução e controle**. 1. ed. São Carlos: Editora Telo Melo, 2010. 234 p.

PETRUCCI, G. R. E. **Concreto de cimento Portland**. 14. ed. São Paulo: Editora Globo, 1970. 307 p.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2003. 169 p.

RODRIGUES, P. P. F. **BT-108/95: Alvenaria armada de blocos de concreto – Prática recomendada**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1985. 42 p.

SABBATINI, F. H. **BT-02/86: Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. 1. ed. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986. 26 p.

SANTOS, M. J. F. dos. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassa.** 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SILVA, A. F. da. **Avaliação da Resistência à Compressão da Alvenaria Estrutural.** 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2007.

SWAMY, N.; RIGBY, G. Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. 28 f. **Matériaux et constructions**, Paris, v. 4, n. 19, p. 13-40, 1971.

APÊNDICE A – ENSAIOS DE ARGAMASSAS

Os resultados detalhados dos ensaios realizados nas argamassas encontram-se nesse apêndice.

Para a determinação da resistência à tração na flexão aos 28 dias, obteve-se:

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T30 E0,5	1	69,60	1,60
	2	62,64	1,44
	3	62,64	1,44
	4	55,68	1,28
	5	55,68	1,28
	6	62,64	1,44
		Média (MPa)	1,4
		D.P. (MPa)	0,11
		CV (%)	7,78

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T30 E1,0	1	62,64	1,44
	2	62,64	1,44
	3	62,64	1,44
	4	55,68	1,28
	5	55,68	1,28
	6	69,60	1,60
		Média (MPa)	1,4
		D.P. (MPa)	0,11
		CV (%)	7,78

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T30 E1,5	1	48,72	1,12
	2	55,68	1,28
	3	55,68	1,28
	4	48,72	1,12
	5	48,72	1,12
	6	55,68	1,28
		Média (MPa)	1,2
		D.P. (MPa)	0,08
		CV (%)	6,67

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_t (MPa)
T50 E0,5	1	69,60	1,60
	2	83,52	1,92
	3	90,48	2,08
	4	69,60	1,60
	5	90,48	2,08
	6	83,52	1,92
		Média (MPa)	1,9
		D.P. (MPa)	0,20
		CV (%)	10,69

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_t (MPa)
T50 E1,0	1	69,60	1,60
	2	97,44	2,24
	3	97,44	2,24
	4	90,48	2,08
	5	90,48	2,08
	6	90,48	2,08
		Média (MPa)	2,1
		D.P. (MPa)	0,21
		CV (%)	10,47

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_t (MPa)
T50 E1,5	1	125,28	2,88
	2	118,32	2,72
	3	111,36	2,56
	4	111,36	2,56
	5	104,40	2,40
	6	111,36	2,56
		Média (MPa)	2,6
		D.P. (MPa)	0,15
		CV (%)	5,77

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T90 E0,5	1	118,32	2,72
	2	118,32	2,72
	3	132,24	3,04
	4	111,36	2,56
	5	153,12	3,52
	6	118,32	2,72
		Média (MPa)	2,9
		D.P. (MPa)	0,32
		CV (%)	11,11

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T90 E1,0	1	139,20	3,20
	2	160,08	3,68
	3	153,12	3,52
	4	153,12	3,52
	5	146,16	3,36
	6	153,12	3,52
		Média (MPa)	3,5
		D.P. (MPa)	0,15
		CV (%)	4,35

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_i (MPa)
T90 E1,5	1	139,20	3,20
	2	132,24	3,04
	3	139,20	3,20
	4	125,28	2,88
	5	132,24	3,04
	6	125,28	2,88
		Média (MPa)	3,0
		D.P. (MPa)	0,13
		CV (%)	4,30

Para a resistência à compressão aos 28 dias obteve-se:

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T30 E0,5	1	605,52	3,78
	2	668,16	4,18
	3	661,20	4,13
	4	682,08	4,26
	5	640,32	4,00
	6	591,60	3,70
	7	577,68	3,61
	8	640,32	4,00
	9	654,24	4,09
	10	696,00	4,35
	11	661,20	4,13
	12	633,36	3,96
		Média (MPa)	4,0
		D.P. (MPa)	0,21
		CV (%)	5,35

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T30 E1,0	1	668,16	4,18
	2	675,12	4,22
	3	584,64	3,65
	4	556,80	3,48
	5	654,24	4,09
	6	696,00	4,35
	7	675,12	4,22
	8	605,52	3,78
	9	591,60	3,70
	10	494,16	3,09
	11	598,56	3,74
	12	612,48	3,83
		Média (MPa)	3,9
		D.P. (MPa)	0,35
		CV (%)	9,10

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T30 E1,5	1	522,00	3,26
	2	591,60	3,70
	3	584,64	3,65
	4	640,32	4,00
	5	661,20	4,13
	6	591,60	3,70
	7	508,08	3,18
	8	605,52	3,78
	9	584,64	3,65
	10	549,84	3,44
	11	508,08	3,18
	12	515,04	3,22
		Média (MPa)	3,6
		D.P. (MPa)	0,31
		CV (%)	8,63

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T50 E0,5	1	1044,00	6,53
	2	1183,20	7,40
	3	1030,08	6,44
	4	1231,92	7,70
	5	1009,20	6,31
	6	988,32	6,18
	7	1099,68	6,87
	8	981,36	6,13
	9	1016,16	6,35
	10	1148,40	7,18
	11	1190,16	7,44
	12	1308,48	8,18
		Média (MPa)	6,9
		D.P. (MPa)	0,65
		CV (%)	9,37

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T50 E1,0	1	1050,96	6,57
	2	897,84	5,61
	3	939,60	5,87
	4	1134,48	7,09
	5	1016,16	6,35
	6	960,48	6,00
	7	939,60	5,87
	8	1009,20	6,31
	9	1092,72	6,83
	10	1078,80	6,74
	11	981,36	6,13
	12	1002,24	6,26
		Média (MPa)	6,3
		D.P. (MPa)	0,42
		CV (%)	6,69

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T50 E1,5	1	1183,20	7,40
	2	1037,04	6,48
	3	1197,12	7,48
	4	1057,92	6,61
	5	1127,52	7,05
	6	1141,44	7,13
	7	967,44	6,05
	8	1078,80	6,74
	9	1099,68	6,87
	10	1148,40	7,18
	11	1099,68	6,87
	12	1211,04	7,57
		Média (MPa)	7,0
		D.P. (MPa)	0,42
		CV (%)	6,11

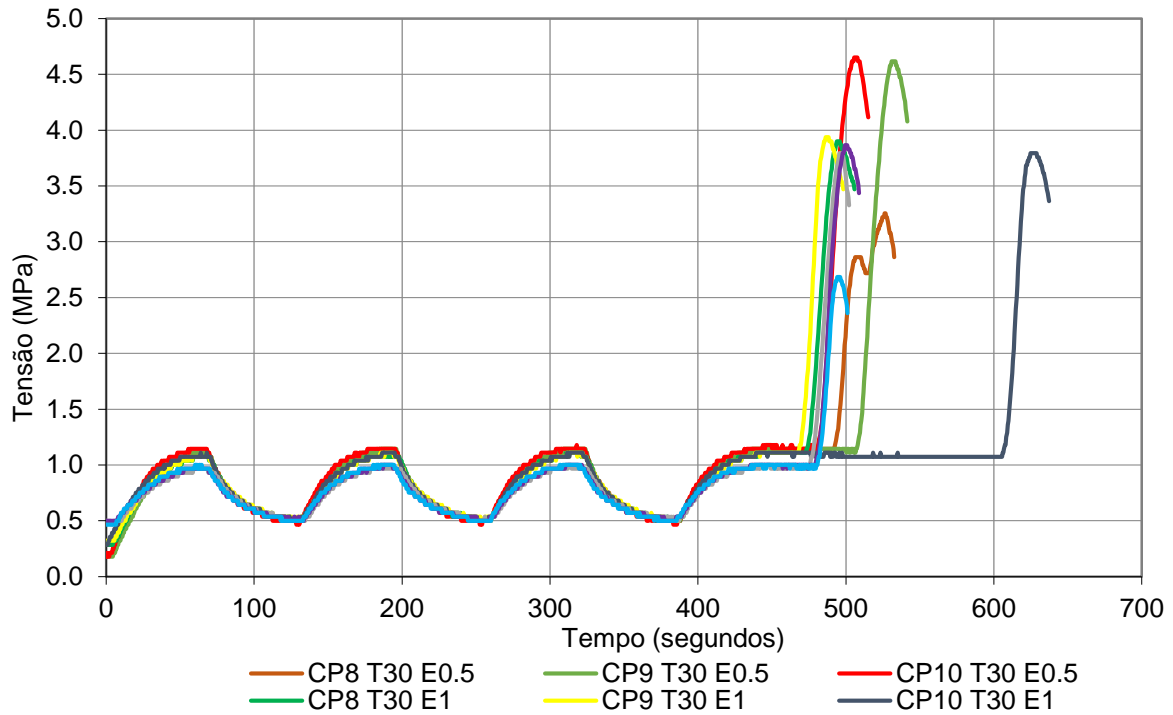
Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T90 E0,5	1	1705,20	10,66
	2	1614,72	10,09
	3	1649,52	10,31
	4	1733,04	10,83
	5	1712,16	10,70
	6	1677,36	10,48
	7	1719,12	10,74
	8	1600,80	10,01
	9	1740,00	10,88
	10	1614,72	10,09
	11	1614,72	10,09
	12	1670,40	10,44
		Média (MPa)	10,4
		D.P. (MPa)	0,31
		CV (%)	2,93

Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T90 E1,0	1	1823,52	11,40
	2	1962,72	12,27
	3	2122,80	13,27
	4	1997,52	12,48
	5	2060,16	12,88
	6	2115,84	13,22
	7	2067,12	12,92
	8	1983,60	12,40
	9	1795,68	11,22
	10	2025,36	12,66
	11	1893,12	11,83
	12	1865,28	11,66
		Média (MPa)	12,4
		D.P. (MPa)	0,66
		CV (%)	5,36

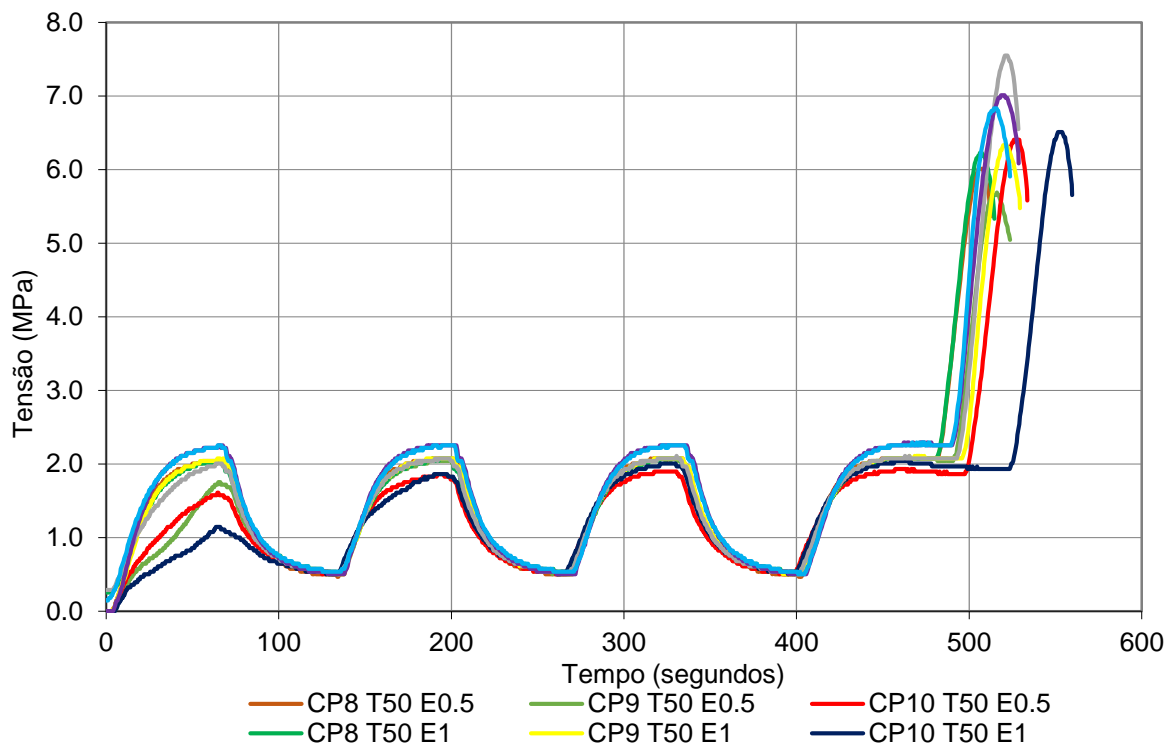
Traço	Amostra	Carga de ruptura (kgf)	f_c (MPa)
T90 E1,5	1	1503,36	9,40
	2	1712,16	10,70
	3	1698,24	10,61
	4	1733,04	10,83
	5	1920,96	12,01
	6	1844,40	11,53
	7	1767,84	11,05
	8	1934,88	12,09
	9	1948,80	12,18
	10	1767,84	11,05
	11	1698,24	10,61
	12	1670,40	10,44
	Média (MPa)		11,0
	D.P. (MPa)		0,77
	CV (%)		7,00

As curvas tensão-tempo obtidas para os corpos de prova cilíndricos ensaiados são apresentadas nas imagens a seguir.

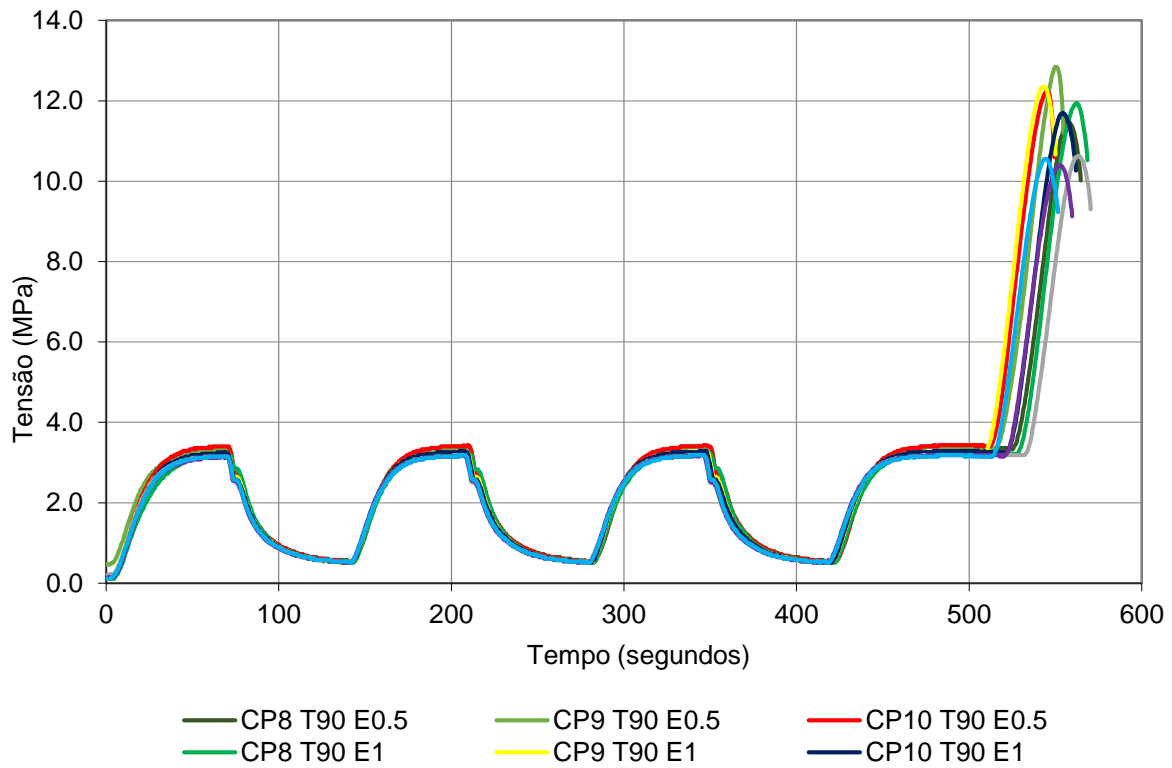
Curvas tensão-tempo para os corpos de prova cilíndricos do T30



Curvas tensão-tempo para os corpos de prova cilíndricos do T50



Curvas tensão-tempo para os corpos de prova cilíndricos do T90



Como exposto nos resultados, *outliers* foram encontrados durante a análise dos resultados da determinação do módulo de elasticidade. Os valores anômalos não foram considerados no cálculo de média e desvio padrão, e encontram-se destacados em vermelhos e marcados com um asterisco (*). Dessa maneira, para a determinação do módulo de elasticidade tem-se:

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T30 E0,5	1	3,26	9476
	2	4,62	7060
	3	4,65	6925
		Média (MPa)	7820
		D.P. (MPa)	1172,0
		CV (%)	14,99

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T30 E1,0	1	3,90	13080*
	2	3,94	5222
	3	3,79	3737
		Média (MPa)	4480
		D.P. (MPa)	742,5
		CV (%)	16,58

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T30 E1,5	1	3,79	4991
	2	3,86	5284
	3	2,68	5386
		Média (MPa)	5220
		D.P. (MPa)	167,4
		CV (%)	3,21

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T50 E0,5	1	6,01	9074
	2	5,69	8982
	3	6,40	9641
		Média (MPa)	9232
		D.P. (MPa)	291,4
		CV (%)	3,16

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T50 E1,0	1	6,23	8517
	2	6,33	8629
	3	6,51	9055
		Média (MPa)	8733
		D.P. (MPa)	231,8
		CV (%)	2,65

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T50 E1,5	1	7,55	10710
	2	7,01	10110
	3	6,83	15560*
		Média (MPa)	10410
		D.P. (MPa)	300,0
		CV (%)	2,88

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T90 E0,5	1	11,49	13280
	2	12,84	15100
	3	12,24	14340
		Média (MPa)	14240
		D.P. (MPa)	746,4
		CV (%)	5,24

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T90 E1,0	1	11,95	49690*
	2	12,34	13930
	3	11,70	12380
		Média (MPa)	1315
		D.P. (MPa)	775,0
		CV (%)	5,89

Traço	Amostra	f_c (MPa)	E_a (MPa)
T90 E1,5	1	10,63	13050
	2	10,41	25430*
	3	10,55	12040
		Média (MPa)	12545
		D.P. (MPa)	505,0
		CV (%)	4,03

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DEFORMABILIDADE DOS PRISMAS

Neste apêndice, apresentam-se os resultados individuais de resistência à compressão e módulo de deformação obtidos nos ensaios de prismas. Também são apresentados os resultados do Teste de Grubbs para identificação dos valores anômalos.

T30 E0,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	4,0	0,20	1,21	0,000443	0,001281	1208	0,65
P2	3,4	0,17	1,01	0,000577	0,001520	891	0,60
P3	4,8	0,24	1,45	0,000527	0,001514	1222	0,63
P4	4,5	0,23	1,36	0,000462	0,001480	1115	0,58
P5	4,4	0,22	1,32	0,000410	0,001326	1201	0,55
P6	4,2	0,21	1,25	0,000604	0,001672	975	0,65
Média	4,2					1102	0,61
D.P.	0,50					138,46	0,04
C.V. (%)	11,9					12,6	6,7

T30 E1,0							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	3,0	0,15	0,89	0,000814	0,001700	833	1,10
P2	*	*	*	*	*	*	*
P3	3,2	0,16	0,96	0,000753	0,001513	1053	0,90
P4	3,0	0,15	0,89	0,000567	0,001229	1122	1,00
P5	3,4	0,17	1,01	0,000637	0,001507	970	1,03
P6	3,0	0,15	0,90	0,000573	0,001260	1098	1,03
Média	3,1					1015	1,01
D.P.	0,18					117,07	0,07
C.V. (%)	5,8					11,5	7,1

*Outlier

T30 E1,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	2,2	0,11	0,66	0,000611	0,001224	899	1,60
P2	2,4	0,12	0,73	0,001232	0,001930	867	1,45
P3	2,5	0,13	0,75	0,000637	0,001234	1050	1,53
P4	2,3	0,12	0,70	0,001187	0,001874	850	1,45
P5	2,9	0,14	0,86	0,000344	0,000972	1143	1,38
P6	2,4	0,12	0,72	0,000996	0,001634	939	1,40
Média	2,5					958	1,47
D.P.	0,23					115,27	0,08
C.V. (%)	9,2					12,0	5,7

T50 E0,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	2,8	0,14	0,84	0,000360	0,000986	1118	0,60
P2	3,5	0,17	1,04	0,001160	0,002012	1020	0,73
P3	4,1	0,21	1,24	0,000527	0,001426	1147	0,68
P4	4,8	0,24	1,45	0,000664	0,001609	1277	0,70
P5	3,8	0,19	1,13	0,000323	0,001045	1302	0,65
P6	3,6	0,18	1,09	0,000478	0,001295	1110	0,75
Média	3,8					1162	0,68
D.P.	0,68					107,57	0,05
C.V. (%)	18,0					9,3	7,9

T50 E1,0							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	3,5	0,17	1,04	0,000505	0,001431	934	1,05
P2	2,8	0,14	0,85	0,000394	0,001045	1085	1,08
P3	3,1	0,16	0,94	0,000230	0,000960	1069	1,00
P4	3,4	0,17	1,02	0,000358	0,001075	1180	1,03
P5	3,0	0,15	0,89	0,000273	0,000916	1150	1,08
P6	3,2	0,16	0,96	0,000400	0,001228	967	0,93
Média	3,2					1064	1,03
D.P.	0,24					97,73	0,06
C.V. (%)	7,7					9,2	5,6

T50 E1,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	3,7	0,19	1,11	0,000362	0,001279	1009	1,30
P2	2,8	0,14	0,84	0,000464	0,001194	956	1,80
P3	2,9	0,15	0,88	0,000209	0,000918	1032	1,50
P4	3,1	0,16	0,93	0,000292	0,001068	1005	1,43
P5	3,3	0,16	0,98	0,000228	0,000900	1219	1,45
P6	3,4	0,17	1,03	0,000409	0,001462	812	1,48
Média	3,2					1006	1,49
D.P.	0,33					131,46	0,17
C.V. (%)	10,4					13,1	11,2

T90 E0,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	3,6	0,18	1,08	0,000560	0,001371	1114	0,75
P2	4,0	0,20	1,20	0,000388	0,001092	1416	0,70
P3	4,6	0,23	1,37	0,000319	0,001074	1516	0,68
P4	3,4	0,17	1,01	0,000497	0,001252	1113	0,70
P5	4,2	0,21	1,27	0,000321	0,001045	1467	0,68
P6	4,5	0,23	1,36	0,000494	0,001318	1372	0,65
Média	4,1					1333	0,69
D.P.	0,49					176,88	0,03
C.V. (%)	12,1					13,3	4,9

T90 E1,0							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	4,1	0,21	1,23	0,000439	0,001233	1290	0,90
P2	3,7	0,19	1,12	0,000499	0,001197	1343	1,15
P3	2,9	0,15	0,88	0,000204	0,000956	977	1,23
P4	3,1	0,16	0,94	0,000432	0,001079	1204	1,25
P5	3,0	0,15	0,89	0,000345	0,001076	1018	1,03
P6*	2,03*	*	*	*	*	*	*
Média	3,4					1167	1,11
D.P.	0,52					162,69	0,15
C.V. (%)	15,4					13,9	13,2

*Prisma descartado por motivo descrito no item 5.1.5.1.

T90 E1,5							
CP	f_p (MPa)	$\sigma_{5\%}$ (MPa)	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\epsilon_{5\%}$	$\epsilon_{30\%}$	E_p (MPa)	t_a (cm)
P1	2,3	0,11	0,68	0,000278	0,000789	1112	1,55
P2	2,8	0,14	0,84	0,000311	0,000849	1309	1,43
P3	2,9	0,14	0,86	0,000306	0,000989	1052	1,45
P4	2,5	0,12	0,75	0,000176	0,000724	1133	1,53
P5	2,7	0,14	0,81	0,000303	0,000834	1278	1,65
P6	2,7	0,14	0,82	0,000286	0,000868	1169	1,58
Média	2,6					1176	1,53
D.P.	0,23					99,22	0,08
C.V. (%)	8,5					8,4	5,4

Teste de Grubbs para identificação de *outliers* no *Minitab 17*:

- Para os valores obtidos de resistência à compressão:

```
Null hypothesis      All data values come from the same normal population
Alternative hypothesis  Smallest or largest data value is an outlier
Significance level    $\alpha = 0,05$ 
```

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
T30 E0,5	6	4,224	0,504	3,363	4,828	1,71	0,227
T30 E1	6	3,282	0,466	2,954	4,174	1,91	0,035
T30 E1,5	6	2,4562	0,2258	2,2076	2,8695	1,83	0,093
T50 E0,5	6	3,769	0,677	2,798	4,826	1,56	0,458
T50 E1	6	3,1583	0,2432	2,8274	3,4583	1,36	0,889
T50 E1,5	6	3,206	0,333	2,792	3,703	1,49	0,595
T90 E0,5	6	4,052	0,492	3,362	4,577	1,40	0,790
T90 E1	5	3,376	0,521	2,936	4,100	1,39	0,608
T90 E1,5	6	2,6471	0,2262	2,2720	2,8737	1,66	0,298

Outlier

Variable	Row	Outlier
T30 E1	2	4,17381

- Para os valores obtidos de módulo de deformação:

Null hypothesis All data values come from the same normal population
 Alternative hypothesis Smallest or largest data value is an outlier
 Significance level $\alpha = 0,05$

Grubbs' Test

Variable	N	Mean	StDev	Min	Max	G	P
T30 E0,5	6	1102,0	138,5	891,2	1221,8	1,52	0,532
T30 E1	6	1006,6	106,8	833,3	1122,0	1,62	0,352
T30 E1,5	6	958,1	115,3	850,3	1142,8	1,60	0,386
T50 E0,5	6	1162,2	107,6	1020,2	1301,6	1,32	0,991
T50 E1	6	1064,3	97,7	933,9	1180,3	1,33	0,955
T50 E1,5	6	1005,7	131,4	812,1	1219,5	1,63	0,346
T90 E0,5	6	1333,2	176,9	1113,0	1516,5	1,24	1,000
T90 E1	5	1166,6	162,7	977,2	1343,3	1,16	1,000
T90 E1,5	6	1175,5	99,2	1052,1	1308,7	1,34	0,935

* NOTE * No outlier at the 5% level of significance

APÊNDICE C – MECANISMOS DE RUPTURA DOS PRISMAS

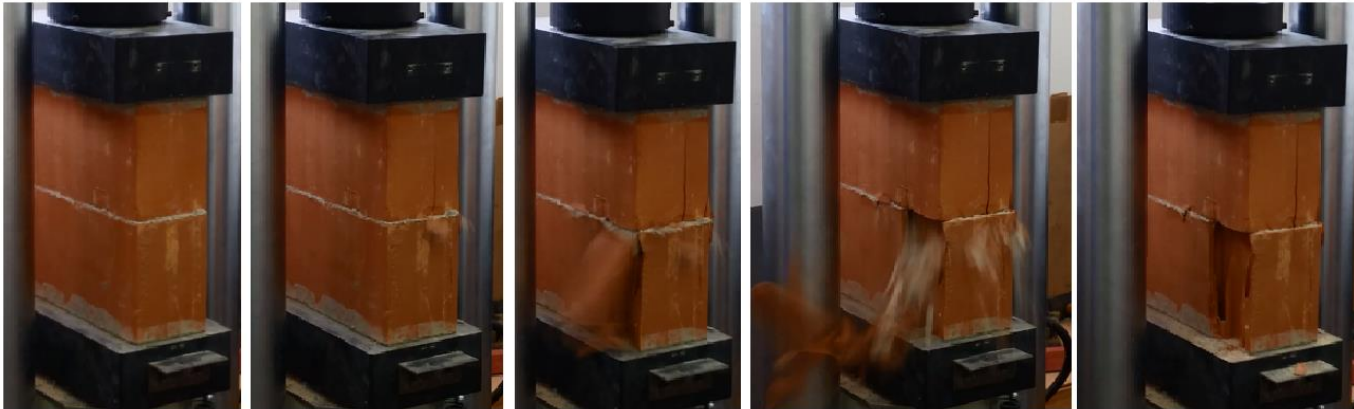
P1 T30 E0,5



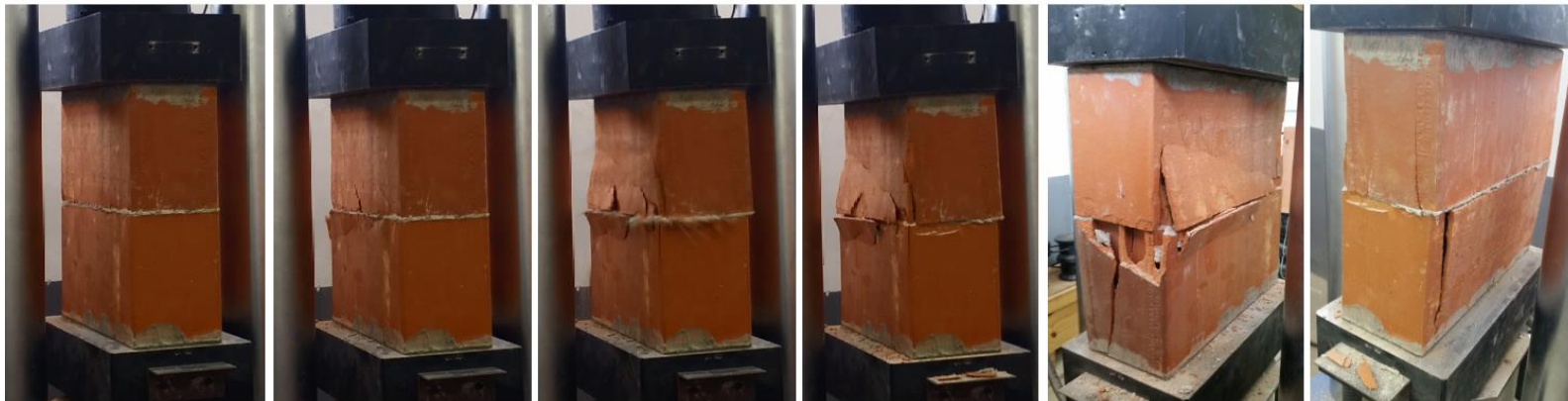
P2 T30 E0,5



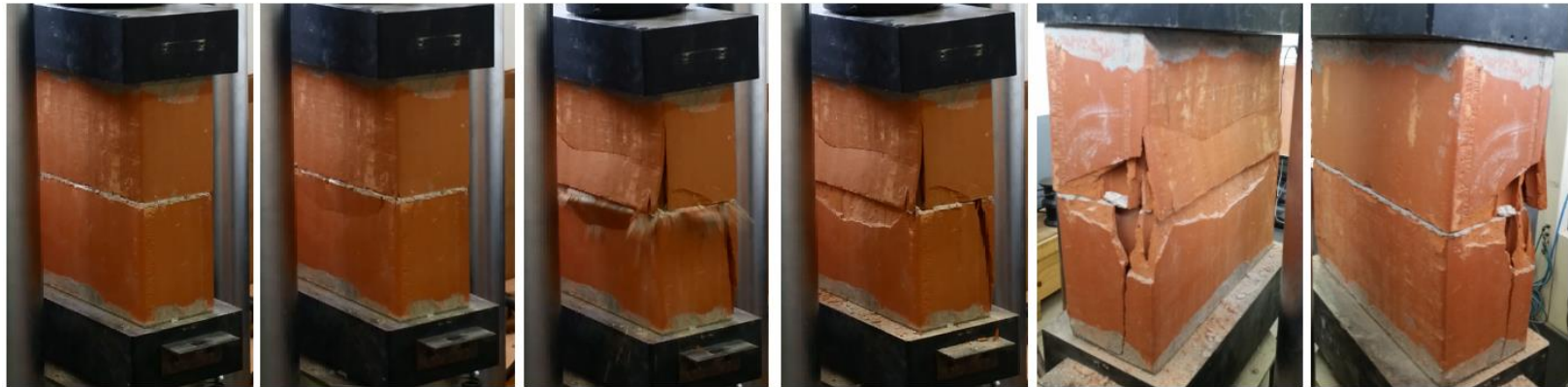
P3 T30 E0,5



P4 T30 E0,5



P5 T30 E0,5



P6 T30 E0,5



P1 T30 E1



P2 T30 E1



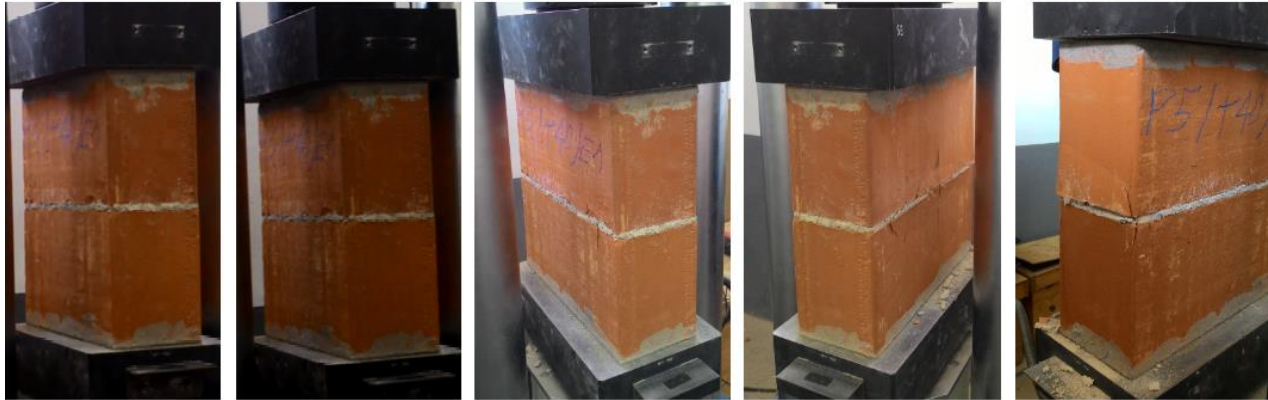
P3 T30 E1



P4 T30 E1



P5 T30 E1



P6 T30 E1



P1 T30 E1,5



P2 T30 E1,5



P3 T30 E1,5



P4 T30 E1,5



P5 T30 E1,5



P6 T30 E1,5



P1 T50 E0,5



P2 T50 E0,5



P3 T50 E0,5



P4 T50 E0,5



P5 T50 E0,5



P6 T50 E0,5



P2 T50 E1



P3 T50 E1



P4 T50 E1



P5 T50 E1



P6 T50 E1



P1 T50 E1,5



P2 T50 E1,5



P3 T50 E1,5



P4 T50 E1,5



P6 T50 E1,5



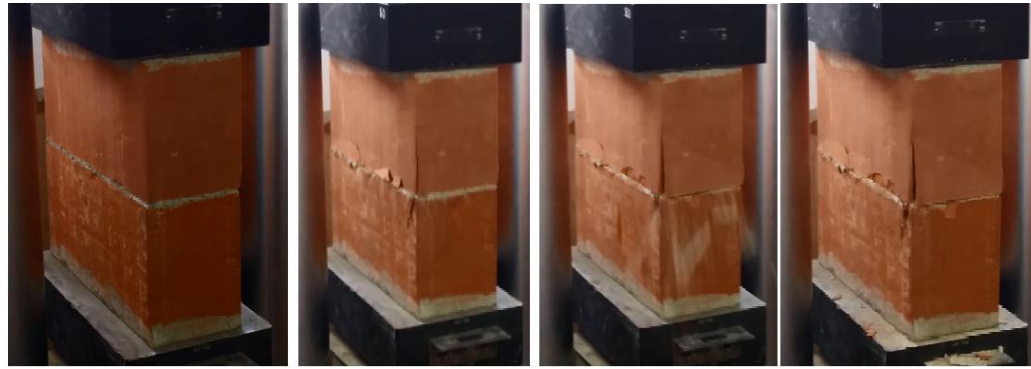
P1 T90 E0,5



P2 T90 E0,5



P3 T90 E0,5



P4 T90 E0,5



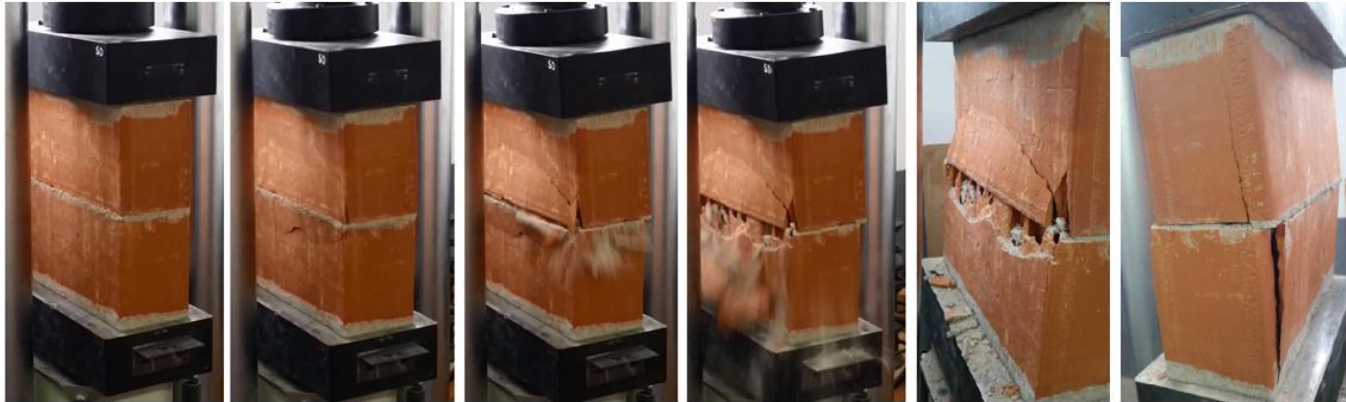
P5 T90 E0,5



P6 T90 E0,5



P1 T90 E1



P2 T90 E1



P3 T90 E1



P4 T90 E1



P5 T90 E1



P6 T90 E1



P1 T90 E1,5



P2 T90 E1,5



P3 T90 E1,5



P4 T90 E1,5



P5 T90 E1,5



P6 T90 E1,5



APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste apêndice, apresentam-se os resultados das análises ANOVA e Teste de Tukey obtidos através do *Minitab 17*, comparando-se as médias de resistência à compressão ou módulo de deformação obtidas para os diferentes lotes de prismas.

a) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T30 E0,5; T30 E1,0 e T30 E1,5:

One-way ANOVA: T30 E0,5; T30 E1; T30 E1,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	9,575	4,7873	40,41	0,000
Error	14	1,658	0,1185		
Total	16	11,233			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,344185	85,24%	83,13%	78,60%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T30 E0,5	6	4,224	0,504	(3,923; 4,526)
T30 E1	5	3,1040	0,1815	(2,7739; 3,4342)
T30 E1,5	6	2,4562	0,2258	(2,1548; 2,7576)

Pooled StDev = 0,344185

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T30 E0,5	6	4,224	A
T30 E1	5	3,1040	B
T30 E1,5	6	2,4562	C

Means that do not share a letter are significantly different.

b) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T50 E0,5; T50 E1,0 e T50 E1,5:

One-way ANOVA: T50 E0,5; T50 E1; T50 E1,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	1,382	0,6911	3,30	0,065
Error	15	3,142	0,2095		
Total	17	4,525			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,457697	30,55%	21,29%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T50 E0,5	6	3,769	0,677	(3,370; 4,167)
T50 E1	6	3,1583	0,2432	(2,7600; 3,5566)
T50 E1,5	6	3,206	0,333	(2,808; 3,604)

Pooled StDev = 0,457697

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T50 E0,5	6	3,769	A
T50 E1,5	6	3,206	A
T50 E1	6	3,1583	A

Means that do not share a letter are significantly different.

c) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T90 E0,5; T90 E1,0 e T90 E1,5:

One-way ANOVA: T90 E0,5; T90 E1; T90 E1,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	5,924	2,9621	16,25	0,000
Error	14	2,551	0,1822		
Total	16	8,476			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,426906	69,90%	65,60%	55,08%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T90 E0,5	6	4,052	0,492	(3,678; 4,426)
T90 E1	5	3,376	0,521	(2,966; 3,785)
T90 E1,5	6	2,6471	0,2262	(2,2733; 3,0209)

Pooled StDev = 0,426906

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T90 E0,5	6	4,052	A
T90 E1	5	3,376	B
T90 E1,5	6	2,6471	C

Means that do not share a letter are significantly different.

d) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T30 E0,5; T50 E0,5 e T90 E0,5:

One-way ANOVA: T30 E0,5; T50 E0,5; T90 E0,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,6353	0,3177	1,00	0,392
Error	15	4,7735	0,3182		
Total	17	5,4088			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,564123	11,75%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T30 E0,5	6	4,224	0,504	(3,733; 4,715)
T50 E0,5	6	3,769	0,677	(3,278; 4,259)
T90 E0,5	6	4,052	0,492	(3,561; 4,543)

Pooled StDev = 0,564123

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T30 E0,5	6	4,224	A
T90 E0,5	6	4,052	A
T50 E0,5	6	3,769	A

Means that do not share a letter are significantly different.

e) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T30 E1,0; T50 E1,0 e T90 E1,0:

One-way ANOVA: T30 E1; T50 E1; T90 E1

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,2092	0,1046	0,90	0,431
Error	13	1,5129	0,1164		
Total	15	1,7222			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,341144	12,15%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T30 E1	5	3,1040	0,1815	(2,7744; 3,4336)
T50 E1	6	3,1583	0,2432	(2,8574; 3,4592)
T90 E1	5	3,376	0,521	(3,046; 3,705)

Pooled StDev = 0,341144

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T90 E1	5	3,376	A
T50 E1	6	3,1583	A
T30 E1	5	3,1040	A

Means that do not share a letter are significantly different.

f) Comparando-se a resistência à compressão dos traços T30 E1,5; T50 E1,5 e T90 E1,5:

One-way ANOVA: T30 E1,5; T50 E1,5; T90 E1,5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	1,822	0,91110	12,82	0,001
Error	15	1,066	0,07105		
Total	17	2,888			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,266561	63,10%	58,17%	46,86%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T30 E1,5	6	2,4562	0,2258	(2,2243; 2,6882)
T50 E1,5	6	3,206	0,333	(2,974; 3,438)
T90 E1,5	6	2,6471	0,2262	(2,4152; 2,8791)

Pooled StDev = 0,266561

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T50 E1,5	6	3,206	A
T90 E1,5	6	2,6471	B
T30 E1,5	6	2,4562	B

Means that do not share a letter are significantly different.

g) Comparando-se o módulo de deformação de todos os traços:

One-way ANOVA: Todos os prismas

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	8	618707	77338	4,61	0,000
Error	43	720655	16759		
Total	51	1339361			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
129,458	46,19%	36,18%	21,05%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
T30 E0,5	6	1102,0	138,5	(995,4; 1208,6)
T30 E1	5	1015,1	117,1	(898,4; 1131,9)
T30 E1,5	6	958,1	115,3	(851,5; 1064,7)
T50 E0,5	6	1162,2	107,6	(1055,6; 1268,7)
T50 E1	6	1064,3	97,7	(957,7; 1170,9)
T50 E1,5	6	1005,7	131,4	(899,1; 1112,3)
T90 E0,5	6	1333,2	176,9	(1226,6; 1439,8)
T90 E1	5	1166,6	162,7	(1049,8; 1283,3)
T90 E1,5	6	1175,5	99,2	(1069,0; 1282,1)

Pooled StDev = 129,458

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
T90 E0,5	6	1333,2	A
T90 E1,5	6	1175,5	A B
T90 E1	5	1166,6	A B
T50 E0,5	6	1162,2	A B
T30 E0,5	6	1102,0	A B
T50 E1	6	1064,3	B
T30 E1	5	1015,1	B
T50 E1,5	6	1005,7	B
T30 E1,5	6	958,1	B

Means that do not share a letter are significantly different.