

UNIVERSIDADE FUMEC
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – FEA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO – MESTRADO PROFISSIONAL EM
PROCESSOS CONSTRUTIVOS

Luanna da Silva Diamantino

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO
COMPORTAMENTO DE PRISMAS DE BLOCOS DE CONCRETO
PREENCHIDOS COM GRAUTE PRODUZIDO COM RESÍDUO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL.

Prof^a. Orientadora: Dra. Edna Alves Oliveira

Prof^a. Coorientadora: Dra. Jamile Salim Fuina

Belo Horizonte

Julho / 2018

Luanna da Silva Diamantino

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE
PRISMAS DE BLOCOS DE CONCRETO PREENCHIDOS COM GRAUTE
PRODUZIDO COM RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL.**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Processos Construtivos da Universidade Fumec, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Processos Construtivos.

Área de concentração: Processos Construtivos.

Prof^a. Orientadora: Dra. Edna Alves Oliveira

Prof^a. Coorientadora: Dra. Jamile Salim Fuina

Belo Horizonte

Julho / 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

D537a Diamantino, Luanna da Silva.
 Análise experimental e numérica do comportamento de prismas de blocos de concreto preenchidos com graute produzido com resíduo da construção civil / Luanna da Silva Diamantino. – Belo Horizonte (MG), 2018.
 119 f.

 Orientadora: Edna Alves Oliveira.
 Coorientadora: Jamile Salim Fuina.

 Dissertação (Mestrado em Processos Construtivos) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade FUMEC.

 1. Alvenaria estrutural. 2. Construção civil – Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc). 3. Engenharia civil. I. Oliveira, Edna Alves. II. Fuina, Jamile Salim. III. Universidade FUMEC. IV. Título.

CDU 624.01

Luanna da Silva Diamantino

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE
PRISMAS DE BLOCOS DE CONCRETO PREENCHIDOS COM GRAUTE
PRODUZIDO COM RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL.**

Prof.: Dra^a. Edna Alves Oliveira (Orientadora)
Universidade Fumec

Prof.: Dra^a. Jamile Salim Fuina (Coorientadora)
Universidade Fumec

Prof.: M.Sc. Oswaldo Teixeira Baião Filho (Convidado)
Universidade Fumec

Prof.: Dr^a. Danielle Meireles de Oliveira (Convidada)
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Julho / 2018

“Entusiasmo significa transe,
arrebatamento, ligação com Deus.

O Entusiasmo é Ágape dirigido
a alguma ideia, alguma coisa.

Quando amamos e acreditamos
do fundo de nossa alma, em algo, nos
sentimos mais fortes que o mundo, e
somos tomados de uma serenidade que
vem da certeza de que nada poderá
vencer a nossa fé. Esta força estranha faz
com que sempre tomemos a decisão
certa, na hora exata e, quando atingimos
nossos objetivos ficamos surpresos com
nossa própria capacidade.”

Paulo Coelho

“Comece fazendo o que é necessário,
depois o que é possível,
e de repente você estará fazendo o impossível”

São Francisco de Assis

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que esteve sempre ao meu lado, protegendo-me e guiando-me nos momentos de dificuldade em todos os momentos da vida. A Ele toda honra e toda glória para sempre.

Ao meu amado marido Edir, pelo companheirismo, incentivo, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis. Agradeço a Deus pela sua existência em minha vida.

Aos meus pais Ana Luísa e Antônio (*in memoriam*). Sei que de onde estão, sempre me guiaram pelo melhor caminho. Obrigada por serem minha estrela, aquela que nunca deixou meu caminho sem luz.

A Prof^a. Edna Alves Oliveira, agradeço pelo incentivo, pelas palavras confortantes e pela atenção prestada nos momentos de dificuldade. Agradeço por suas valiosas orientações e pelas contribuições durante o desenvolvimento desse trabalho.

A Prof^a. Jamile Salim Fuina, obrigada pelas orientações.

Ao Prof. Luiz Antônio Melgaço, obrigada pelas orientações e sugestões.

Aos funcionários do laboratório Diego e Bruno, e aos alunos da iniciação científica Bernardo de Matos e Maria Luíza Serpa, que foram verdadeiros companheiros durante as atividades experimentais e numéricas. Agradeço pelo apoio, pela boa vontade e disponibilidade para a realização dessa pesquisa.

A todos os colegas do mestrado, em especial, a Thamyrys, Bruno Antunes, Alencar e André pela parceria e pelos momentos de descontração.

A todos os meus familiares e amigos em especial a Silvana Diniz pelo incentivo na realização do mestrado e Débora Reis pela ajuda no acesso aos periódicos CAPES. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Fumec pela bolsa concedida.

Agradeço em especial às empresas Bloco Sigma e Martins Lana pelas contribuições com os materiais utilizados nessa pesquisa.

RESUMO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que vem se destacando no Brasil e no mundo, graças às suas vantagens executivas e estruturais. Contudo, como todo sistema construtivo, a alvenaria estrutural também contribui para geração de resíduos de construção civil (RCD). Visando a sustentabilidade, este cenário é preocupante, pois a construção civil consome grandes quantidades de matérias primas, sendo responsável por uma parcela significativa de impactos ambientais em todo o mundo. Na indústria de fabricação de blocos de concreto estruturais, o resíduo é gerado no momento da prensagem do bloco. Esse resíduo gerado possui granulometria similar a do agregado, normalmente utilizado na execução do concreto e micro concreto. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho mecânico de blocos de concreto estruturais, preenchidos com graute confeccionado a partir da substituição integral do agregado natural pelo resíduo gerado no momento da prensagem do bloco. Para análise do desempenho mecânico desse graute que foi utilizado no reforço de paredes de alvenaria estrutural, foram realizadas análises experimentais e numéricas em prismas de blocos de concreto. No estudo experimental foi feita a caracterização dos agregados naturais e do resíduo. Avaliou-se, também, as propriedades físicas e mecânicas do graute, da argamassa de assentamento, dos blocos e prismas. Foram ensaiados 15 prismas com dois blocos, preenchidos com graute convencional e 15 com graute produzido com resíduos da construção civil. Para validar os resultados obtidos no estudo experimental, foram realizadas simulações numéricas através do método dos elementos finitos utilizando software Abaqus, sendo aplicado o modelo de Plasticidade por Dano de Concreto (*Concrete Damage Plasticity – CDP*) para simular o comportamento dos prismas. Os resultados obtidos no estudo experimental e numérico mostraram que o graute produzido a partir da substituição integral do agregado natural graúdo por resíduo, apresenta propriedades mecânicas adequadas para o reforço de paredes de alvenaria estrutural.

Palavras chave: Alvenaria estrutural, resíduo da construção civil, graute, prismas, método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The structural masonry is a constructive system that has been standing out in Brazil and in the world, thanks to its executive and structural advantages. However, like all construction systems, structural masonry also contributes to the generation of construction waste (RCD). Aiming at sustainability, this scenario is worrying, since construction consumes large amounts of raw materials and is responsible for a significant portion of environmental impacts worldwide. In the manufacturing industry of structural concrete blocks, the residue is generated at the moment of block pressing. This generated residue has granulometry similar to that of the aggregate, usually used in the execution of the concrete and micro concrete. Thus, this work has as main objective to analyze the mechanical performance of structural concrete blocks, filled with grate made from the replacement integral of the natural aggregate by the residue generated at the moment of block pressing. In order to analyze the mechanical performance of this grate that was used in the reinforcement of structural masonry walls, experimental and numerical analyzes were performed on concrete block prisms. In the experimental study the characterization of the natural aggregates and the residue was made. It was also evaluated the physical and mechanical properties of grate, mortar, blocks and prisms. Fifteen prisms with two blocks, filled with conventional grate and 15 with grate produced with construction residues were tested. To validate the results obtained in the experimental study, numerical simulations were performed using the finite element method using Abaqus software, and the Concrete Damage Plasticity (CDP) model was applied to simulate the behavior of the prisms. The results obtained in the experimental and numerical study showed that the grate produced from the integral replacement of the heavy natural aggregate by residue presents adequate mechanical properties for the reinforcement of structural masonry walls.

Key words: Structural masonry, construction waste, grate, prisms, finite elements method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de disposição inadequada de resíduos da construção civil	22
Figura 2 - Basílica de Maxentius e Constantino Roma, 307-312 DC e Pirâmides de Gisé Egito, 2.000 AC	27
Figura 3 - Basílica de Santa Sofia Istambul, Turquia, 532 a 537 DC e Catedral de Milão, Duomo, Itália, 1386 a 1887	27
Figura 4 - Bloco vazado de concreto simples.....	30
Figura 5 - Amarração de paredes em L e T.	32
Figura 6 - Amarração indireta com grampos ou tela.	33
Figura 7 - Ruptura devido à perda de coesão da argamassa	35
Figura 8 - Representação esquemática do módulo de deformação	37
Figura 9 - Deformações longitudinais e transversais.....	38
Figura 10 - Quantidade RCD por regiões.....	44
Figura 11 - Ano de publicação x número de pesquisas no banco de dados dos agregados reciclados de concreto.	45
Figura 12 - Resíduos gerados no processo de prensagem dos blocos.....	47
Quadro 1 - Resumo dos diferentes modelos numéricos.	48
Figura 13 - Tipos e formas de elementos.....	50
Figura 14 - Modelagem para estruturas de alvenaria: (a) exemplar da alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem.....	52
Fluxograma 1 - Etapas do estudo experimental	55
Figura 15 - Conjunto de peneiras e agitador mecânico.....	57
Figura 16 – Amostras do agregado miúdo natural utilizado no ensaio de granulometria.....	57
Figura 17 – Amostras do agregado graúdo natural utilizado no ensaio de granulometria.....	58
Figura 18 - Amostras do resíduo utilizado no ensaio de granulometria.....	58
Figura 19 - Corpos de prova para realização da análise dimensional.....	59
Figura 20 - Moldagem de corpos de prova prismáticos de argamassa	60
Figura 21 - Processo de capeamento dos blocos estruturais vazados de concreto.....	63
Figura 22 - Montagem dos prismas.....	63
Figura 23 - Grauteamento dos prismas.....	64
Figura 24 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão para determinar a deformação em corpos de prova cilíndricos	65
Figura 25 - Equipamento desenvolvido para auxiliar na fixação dos LVDT's e extensômetros analógicos nos prismas.....	66
Figura 26 - Malha de elementos finitos utilizada na discretização do prisma... ..	69

Figura 27 - Elemento de malha C3D8	69
Figura 28 - Condições de contorno e aplicação do carregamento	70
Figura 30 - Curva tensão <i>versus</i> deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1 (2004).....	74
Figura 31 - Curva representativa do concreto tracionado para o modelo numérico.....	75
Figura 32 - Diagrama tensão <i>versus</i> deslocamento pós-pico admitido para o prisma convencional tracionado	75
Figura 33 - Diagrama tensão <i>versus</i> deslocamento pós-pico admitido para o prisma com resíduo tracionado	76
Figura 34 - Porcentagem retida por peneira do agregado natural miúdo	81
Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado natural miúdo	82
Figura 35 - Porcentagem retida por peneira do agregado natural graúdo.....	82
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado natural graúdo	83
Figura 36 - Porcentagem retida por peneira do resíduo	83
Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo.....	84
Figura 37 - Comparação entre a curva granulométrica dos agregados naturais e do resíduo	85
Figura 38- Tensão média de ruptura dos traços de graute analisados	87
Quadro 2 - Valores de Ψ em função da amostra.....	91
Figura 39 - Comparativo resistência à compressão dos prismas com graute convencional e prismas com graute com resíduo.....	92
Figura 40 - Resistência média à compressão dos prismas	93
Figura 41 - Absorção da água do graute pelo prisma	94
Gráfico 4 – Média do módulo de deformação do graute	94
Gráfico 5 – Gráfico tensão x deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute convencional.....	95
Gráfico 6 – Gráfico tensão x deformação transversal dos prismas confeccionados com graute convencional.....	96
Gráfico 7 – Gráfico tensão x deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute com resíduo	96
Gráfico 8 - Gráfico tensão x deformação transversal dos prismas confeccionados com graute com resíduo	97
Figura 42 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute convencional: (a) simulação numérica; (b) teste experimental.....	99
Figura 43 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute com resíduo: (a) simulação numérica; (b) teste experimental.....	100
Gráfico 9 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute convencional	101

Gráfico 10 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute com resíduo	101
Figura 44 - Distribuição de tensões principais máximas obtidas numericamente: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo.	102
Figura 45 - Distribuição de deformações equivalentes: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo	103
Figura 46 - Rompimento dos prismas iniciando pela argamassa	104
Figura 47 - Prisma com rompimento por compressão.....	105
Figura 48 - Prismas com deslocamento das paredes laterais	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões nominais	31
Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos.....	31
Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração.....	33
Tabela 4 - Porcentagem de recuperação de resíduo de construção e demolição na Europa.....	42
Tabela 5 - Quantidade total de RCD coletado por regiões e total no Brasil	43
Tabela 6 - Agregados naturais e reciclado utilizados no estudo experimental .	56
Tabela 7 – Ensaio realizados e normas da ABNT adotadas para execução dos prismas	61
Tabela 8 - Pontos utilizados no diagrama tensão versus deslocamento pós-pico.....	76
Tabela 9 - Análise dimensional dos blocos de concreto.....	78
Tabela 10 - Análise dimensional das espessuras das paredes dos blocos de concreto.....	79
Tabela 11 - Análise dimensional do diâmetro dos furos dos blocos de concreto.....	79
Tabela 12 - Análise dimensional da mísula de acomodação	79
Tabela 13 - Índice de absorção de água dos blocos	80
Tabela 14 - Características granulométricas do agregado natural miúdo	81
Tabela 15 - Características granulométricas do agregado natural graúdo.....	82
Tabela 16 - Características granulométricas do resíduo	83
Tabela 17 - Resistência média à compressão dos traços de graute	86
Tabela 18 - Traço da argamassa de assentamento utilizada na execução dos prismas	88
Tabela 19 - Resistência à tração por flexão e compressão da argamassa	89
Tabela 20 - Resistência à compressão dos blocos de concreto.....	90
Tabela 21 - Resistência característica à compressão dos blocos	91
Tabela 22 - Resistência à compressão dos prismas preenchidos com graute convencional e graute com resíduo.....	92
Tabela 23 - Tensão de ruptura obtida no estudo experimental e numérico ...	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe –	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
ACI –	<i>American Concrete Institute</i>
CBIC –	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CDP –	<i>Concrete Damage Plasticity</i>
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP IV –	Cimento Portland Pozolânico
EPA –	Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos
LESC –	Laboratório de Ensaios de Sistemas Construtivos
LVDT –	Linear Variable Displacement Transducers
MEF –	Método dos Elementos Finitos
MG –	Minas Gerais
NBR –	Normas Brasileiras
RCD –	Resíduos de Construções e Demolições
SNIS –	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Especiais

LISTA DE SIMBOLOS E UNIDADES

B	–	Relação deformação-deslocamento
C	–	Matriz de rigidez global da estrutura
cm	–	Centímetros
D	–	Vetor de forças nodais
d_c	–	Dano à compressão uniaxial
d_t	–	Dano à tração uniaxial
E	–	Módulo de deformação
E_{cm}	–	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_t	–	Matriz constitutiva
f_c	–	Resistência à compressão dos corpos-de-prova
f_{cm}	–	Resistência média à compressão dos corpos-de-prova
f_{ctm}	–	Resistência à tração dos corpos-de-prova
F_i	–	Estado de tensão corrente de cada elemento
GPa	–	Gigapascal
kg	–	Quilograma
K_t	–	Matriz de rigidez tangente
m	–	Metro
mm	–	Milímetro
MPa	–	Megapascal
P	–	Vetor de cargas de referência
Q	–	Vetor de cargas residuais
t	–	Tonelada
V	–	Volume do elemento
X	–	Vetores nodais de deslocamento
σ	–	Tensão
σ_c	–	Tensão da resistência à compressão
ε	–	Deformação
ε_c	–	Deformação do concreto à compressão
ε_{long}	–	Deformação longitudinal do prisma
ε_{transv}	–	Deformação transversal do prisma
ψ	–	Ângulo de dilatação

ϵ –	Excentricidade do potencial plástico
μ –	Coefficiente de poisson
μ_{vis} –	Viscosidade
δ_U –	Vetor de deslocamento incremental
δ_λ –	Incremento do fator de cargas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS	20
3	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	21
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4.1	Alvenaria estrutural	24
4.1.1	<i>Histórico da alvenaria.....</i>	26
4.1.2	<i>Blocos de concreto estrutural</i>	30
4.2	Propriedades mecânicas.....	34
4.2.1	<i>Resistência à compressão.....</i>	34
4.2.2	<i>Módulo de deformação.....</i>	36
4.2.3	<i>Coefficiente de Poisson</i>	37
4.3	Graute	38
4.3.1	<i>Agregados componentes do graute.....</i>	39
4.4	Resíduo de construção e demolição.....	40
4.4.1	<i>Geração e reciclagem de RCD.....</i>	41
4.4.2	<i>Diferença entre resíduos de concreto e resíduos de construção e demolição.....</i>	44
4.5	Análise numérica da alvenaria estrutural	47
4.5.1	<i>Método dos Elementos Finitos.....</i>	48
4.5.2	<i>Tipos de modelagem da alvenaria: micromodelagem e macromodelagem.....</i>	51
4.5.3	<i>Modelo não linear</i>	53
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
5.1	Estudo experimental.....	55
5.1.1	<i>Caracterização dos agregados.....</i>	56
5.1.2	<i>Caracterização dos blocos de concreto e índice de absorção de água</i>	59
5.1.3	<i>Moldagem dos corpos de prova de argamassa para testes de compressão axial e tração na flexão</i>	59
5.1.4	<i>Moldagem dos corpos de prova de graute para testes de compressão axial e módulo de deformação</i>	60

5.1.5	<i>Preparação dos blocos e montagem dos prismas para testes de resistência à compressão.....</i>	61
5.1.6	<i>Preparação dos prismas para determinação do módulo de deformação.....</i>	65
5.2	Estudo Numérico	66
5.2.1	<i>Geometria e discretização da malha de elementos finitos ...</i>	68
5.2.2	<i>Condições de contorno e carregamento</i>	70
5.2.3	<i>Modelagem constitutiva</i>	71
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1	Análise experimental	78
6.1.1	<i>Análise dimensional</i>	78
6.1.2	<i>Índice de absorção de água dos blocos de concreto.....</i>	80
6.1.3	<i>Caracterização dos agregados</i>	81
6.1.4	<i>Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova do graute.....</i>	85
6.1.5	<i>Determinação da resistência à compressão e à tração por flexão da argamassa.....</i>	88
6.1.6	<i>Determinação da resistência característica à compressão do bloco.....</i>	89
6.1.7	<i>Determinação da resistência à compressão dos prismas</i>	91
6.1.8	<i>Módulo de deformação do graute</i>	94
6.1.9	<i>Módulo de deformação dos prismas.....</i>	95
6.1.10	<i>Coeficiente de Poisson</i>	98
6.2	Estudo numérico.....	99
6.3	Modos de ruptura dos prismas.....	103
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
	REFERÊNCIAS.....	110

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que vem se destacando no Brasil e no mundo, devido às suas vantagens como construção racionalizada, quantidade reduzida de mão de obra, construção limpa e redução no tempo de sua realização. Porém, muitas vezes a sua utilização se baseia em métodos intuitivos, demonstrando que, embora muitos estudos tenham sido realizados, ainda há muito a ser pesquisado a fim de aprimorar o sistema de dimensionamento e a técnica construtiva (CAMACHO, 2006).

É um sistema constituído pela interação de materiais distintos, dimensionados para suportar as cargas solicitantes que atuam nas paredes estruturais, devendo o sistema trabalhar de maneira que bloco, argamassa e graute interajam de forma conjunta, como um sistema monolítico (RAMALHO e CORRÊA, 2008). Por isso, o desempenho estrutural das paredes da alvenaria não pode ser estimado sem a realização de ensaios com paredes ou prismas. Estes ensaios permitem analisar as principais propriedades mecânicas da alvenaria, que são a resistência à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento.

Assim como todo sistema construtivo, a alvenaria estrutural também contribui para geração de resíduos, seja na fabricação dos blocos, no transporte, na execução de um projeto não compatibilizado, ou na falta de treinamento da mão de obra para a sua execução. Podendo ainda, ser o sistema construtivo que mais gere resíduos na construção, devido, justamente, ao grande número de variáveis, mas que por sua vez, quando controlados e racionalizados, viabilizam o sistema no âmbito sustentável e econômico (MARTINS, 2012).

Esses resíduos gerados por construções e demolições (RCD) podem ser definidos pela mistura de rejeitos oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, sendo o seu armazenamento muitas vezes realizado de forma inapropriada onde, segundo John e Agopyan (2013),

podem ser depositados em bota-fora clandestino, nas margens de rios e córregos ou em terrenos baldios.

Com a urbanização acelerada, resultando no rápido adensamento das cidades, e, conseqüentemente, o crescimento das atividades do setor construtivo, além da larga exploração dos recursos naturais, a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) alcançou índices elevados, produto do desperdício nas obras de construções, reformas e demolições (HALMEMAN, SOUZA e CASARIN, 2009).

Em países como, Bélgica, Dinamarca e Hong Kong existem normas que regulamentam o gerenciamento e o descarte dos RCD's, com a aplicação de severas taxas sobre os resíduos que são descartados no meio ambiente. Na Inglaterra, por exemplo, o governo cobra pelos resíduos gerados nas obras e impõe elevadas taxas para a exploração de agregados naturais visando incentivar o reaproveitamento de resíduos (BUTTLER, *et al.*, 2006).

Na Holanda, país considerado modelo quanto ao reaproveitamento de RCD, a forma encontrada pelo governo para diminuir o desperdício e promover a reciclagem, atingindo níveis superiores a 80%, foi aumentar em cerca de cinco vezes as taxas para descarte dos resíduos no meio ambiente. Além das taxas, existe uma enorme pressão da sociedade contra a utilização de áreas para o descarte de resíduos e exploração de recursos naturais (BUTTLER, *et al.*, 2006).

No Brasil, a resolução n° 307 do conselho nacional do meio ambiente – CONAMA (2002), estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

Segundo Padovan (2013) apud Pinto (1986), o primeiro estudo para utilização do RCD no Brasil foi realizado pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, em 1986, tendo como tema de sua pesquisa o estudo do uso de material reciclado na produção de argamassas.

Diante do exposto, sabe-se que a Indústria da Construção Civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, mas por outro lado, comporta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais sendo responsável por grande porcentagem de geração de resíduos sólidos, tornando necessária a busca por materiais alternativos a fim de minimizar a degradação ambiental.

A utilização de agregados de concreto reciclado é muito atraente do ponto de vista da redução dos custos e da sustentabilidade. É neste contexto que este trabalho se insere. Será avaliado o comportamento da alvenaria estrutural com blocos de concreto reforçados com graute produzido a partir da substituição integral do agregado graúdo por resíduos da fabricação de blocos de concreto.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o desempenho mecânico de prismas de bloco de concreto estruturais, preenchidos com graute executado a partir da substituição integral do agregado natural graúdo por resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto. Estabelece, também, os seguintes objetivos específicos:

- determinar a resistência à compressão e módulo de deformação do graute convencional e do graute com resíduos, por meio de estudo experimental;
- determinar a resistência à compressão e módulo de deformação dos prismas preenchidos com graute convencional e graute com resíduo, por meio de estudo experimental;
- comparar os diagramas de tensões normais à compressão x deformação dos prismas com blocos de concreto estruturais reforçados com graute convencional e com graute produzido com resíduo da fabricação de blocos de concreto;
- determinar o comportamento mecânico dos prismas executados com blocos de concreto estruturais reforçados com graute convencional e graute produzido com resíduo, por meio de simulações numéricas;
- comparar os resultados obtidos via simulações numéricas com os resultados experimentais.

3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Com o desenvolvimento tecnológico e o aumento da população nos centros urbanos, cresceram a quantidade e diversidade de poluentes ambientais vindo a comprometer de forma contínua a qualidade de vida dos seres vivos no meio ambiente. Surgiu, então, a necessidade de criação de novos modelos de desenvolvimento, buscando a sustentabilidade através da preservação dos recursos naturais (KARPINSK, *et al.*, 2009).

O setor da construção civil é responsável por cerca de 50% de consumo dos recursos naturais, sendo ainda o maior gerador de resíduos de toda a sociedade (FERNANDES e AMORIN, 2014).

A extração dos agregados utilizados na construção civil causa grandes impactos podendo degradar ambientes delicados modificando o perfil de rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais como modificação em sua estrutura hidrológica e hidro geológica, pois existem casos de extração ilegal (SILVA, *et al.*, 2016). A extração de materiais de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma atividade prejudicial ao meio-ambiente, uma vez que altera permanentemente a paisagem e provoca problemas de instabilidade. Tais considerações justificam a substituição de agregados convencionais por agregados reciclados, que pode diminuir a utilização de matéria prima natural, conseqüentemente, minimizar a degradação ambiental.

A Figura 1 ilustra exemplos de disposição de resíduos de construção civil de modo ambientalmente inadequado.

Figura 1 - Exemplo de disposição inadequada de resíduos da construção civil



Fonte: Motta (2005).

John e Agopyan (2013) identificaram algumas ações para a menor geração de RCD: aperfeiçoamento de projeto; capacitação de pessoal; uso de ferramentas adequadas; melhor gestão de processos; e medidas de controle de disposição. Citam, ainda, que o reaproveitamento e a reciclagem devem ser tratados como soluções intermediárias, quando a redução da geração de RCD não for alcançada.

De acordo com a EPA (2018), os materiais RCD constituem um volume significativo de resíduos nos Estados Unidos que quando reciclados ou excluídos do descarte podem trazer muitos benefícios como:

- criação de emprego nas indústrias de reciclagem;
- redução das despesas de projeto através de economia ou eliminação de compra;
- conservação dos aterros sanitários;
- diminuição do impacto ambiental associado à extração e ao consumo de recursos naturais e produção de novos materiais.

Diante do exposto, é importante que sejam realizadas pesquisas para definir alternativas a fim de que os problemas, resultantes de alguns processos construtivos, sejam minimizados com perspectiva na sustentabilidade do setor

de construção civil. Além disso, poucos estudos analisam a aplicação de resíduos gerados durante a prensagem dos blocos de concreto, que se diferem dos resíduos obtidos das sobras ou quebra dos blocos no estado endurecido.

Vale considerar também, que as construções em alvenaria estrutural têm sido projetadas de maneira evolutiva no Brasil com estruturas cada vez mais altas, contribuindo, assim, para o aumento no nível de compressão nas paredes estruturais resultante dos carregamentos verticais. Como consequência, os furos verticais de blocos estruturais são usualmente grauteados para uniformização da classe do bloco, para paredes com carregamentos diferenciados ou mesmo como solução de reforço estrutural. No entanto, embora amplamente estudado, o comportamento de paredes de alvenaria estrutural grauteadas não é perfeitamente entendido, sendo foco de divergências entre pesquisadores quanto à interferência das características dos materiais no desempenho da alvenaria.

Como forma de destinar o resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto, pretende-se, neste trabalho, utilizar o mesmo em substituição dos agregados graúdos para a fabricação do graute. Essa proposta contribui com as diretrizes publicadas pela Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão contempladas as características da Alvenaria estrutural, dos blocos de concreto, dos agregados, dos resíduos da construção civil e da análise numérica da Alvenaria estrutural.

4.1 Alvenaria estrutural

Já há algum tempo, a alvenaria estrutural se tornou um dos principais processos construtivos utilizados em todo o mundo, pois permite que sejam feitas adaptações de acordo com as condições locais, maior produtividade, racionalização e economia quando comparada aos métodos construtivos tradicionais (NESSRALLA, 2013).

Camacho (2008) conceitua a alvenaria estrutural como o processo construtivo no qual a alvenaria tem função estrutural e seus elementos constituintes são projetados, dimensionados e executados de forma padronizada e racional.

Embora existam algumas diferenças nas propriedades mecânicas da alvenaria devido aos diversos métodos de construção e dos materiais utilizados, é possível identificar algumas características comuns, como a baixa resistência à tração, uma fraca resistência ao cisalhamento e uma resistência à compressão razoável (PROENÇA, GAGO e CHAVES, 2018).

Freire e Cavalcante (2012) apontam o graute como um importante reforço da alvenaria, pois o preenchimento das cavidades do bloco com este micro concreto, além de colaborar para um melhor posicionamento da armadura vertical, proporciona um aumento da capacidade de resistência à compressão.

De acordo com a NBR 15961- 1 “Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projeto” (ABNT, 2011) determina como componentes elementares da alvenaria estrutural: os blocos, a argamassa, o graute e o aço. É a partir de dois ou mais desses componentes que se obtêm os elementos da alvenaria, como por exemplo, as paredes e prismas (RAMALHO e CORRÊA, 2008).

Do ponto de vista do material, Silva, Richter e Désir (2010) afirmam que a alvenaria estrutural pode ser considerada como um compósito heterogêneo, anisotrópico, descontínuo e de comportamento complexo, e por isso, apresenta propriedades distintas que dificultam sua caracterização mecânica. Tal ocorrência acontece devido aos diferentes tipos de materiais utilizados, sua procedência e diferentes tipos de degradação.

A melhor maneira de avaliar as propriedades mecânicas da alvenaria é através de testes experimentais, que podem ser destrutivos ou não destrutivos (PROENÇA, GAGO e CHAVES, 2018).

O estudo dos componentes da alvenaria submetidos aos esforços previstos em norma que é possível prever o comportamento do conjunto. O principal conceito estrutural utilizado para se avaliar a alvenaria estrutural é a transmissão de ações através de tensões de compressão. Esse é o conceito crucial a ser levado em conta quando se discute a alvenaria como processo construtivo para a elaboração de estruturas (RAMALHO e CORRÊA, 2008).

Em adição a esses fatores, Nessralla (2013) aponta que a mão de obra treinada é outro fator que interfere na qualidade das alvenarias estruturais, pois é necessário garantir que as paredes estejam bem aprumadas e alinhadas para que as cargas sejam distribuídas pela estrutura de forma correta.

Segundo Kalil (2007), as maiores vantagens do método de construção por alvenaria estrutural, em relação ao concreto armado são: (a) maior rapidez e facilidade de construção; (b) ótimas características de isolamento termo acústico; (c) redução no uso de concreto e armação; (d) redução na mão de obra em carpintaria e armação; (e) facilidade no treinamento de mão de obra qualificada; (f) menor número de equipes ou subcontratados de trabalho. Por outro lado, as desvantagens citadas por Kalil (2007) seriam a limitação de vãos livres, a impossibilidade de remoção das paredes portantes, resultando na impossibilidade de efetuar maiores modificações arquitetônicas. Além do condicionamento da arquitetura, esse tipo de tecnologia de construção não admite improvisações na execução da obra.

Tanto a procedência dos materiais quanto a mão de obra são de extrema importância, pois esse processo construtivo utiliza as paredes não somente como vedação, mas também como elementos que resistem às ações de peso próprio, de cargas verticais e laterais, como cargas provenientes das lajes, sobrecargas, vento e possíveis alterações no prumo (KATO, 2002).

A NBR 15961- 1 (ABNT, 2011) considera que a alvenaria estrutural deve ser projetada também para resistir às ações ambientais externas e ações excepcionais que possam influenciar na vida útil da estrutura.

4.1.1 Histórico da alvenaria

A alvenaria estrutural foi um dos primeiros processos construtivos desenvolvidos pelo homem que substituíam os blocos estruturais por rochas, sendo inserida como tecnologia de construção civil em meados do século XVII, quando os princípios de estatística foram aplicados para a investigação da estabilidade de arcos e domos (HENDRY, 2002).

As construções da época eram então erguidas segundo regras puramente empíricas, baseadas nos conhecimentos adquiridos ao longo dos séculos (CAMACHO, 2006).

Entre os séculos XIX e XX, foram construídos edifícios em alvenaria estrutural com espessuras excessivas de paredes (HENDRY, 2002), como por exemplo, o edifício Monadnock em Chicago, que se tornou um símbolo da moderna alvenaria estrutural, mesmo com suas paredes com base de 1,80m (RAMALHO e CORRÊA, 2008). Este edifício foi considerado, na época, como limite dimensional máximo para estruturas de alvenaria calculadas pelos métodos empíricos. Acredita-se que com os procedimentos de dimensionamento atuais, a mesma construção com os mesmos materiais, possuiria espessura inferior a 30cm (RAMALHO e CORRÊA, 2008).

A alvenaria estrutural permaneceu como principal técnica estrutural até o início do século XX, onde ao longo do tempo foram sendo executadas diversas obras importantes, como por exemplo, o Coliseu, na Itália, construído em torno de 80 d.C. e a Catedral de Amiens, na França, construída entre 1211 e 1300 d.C. Podem ser citados, também, vários exemplos de construções como catedrais europeias, medievais, construções egípcias e romanas (RAMALHO e CORRÊA, 2008), conforme ilustram as figuras 2 e 3.

Figura 2 - Basílica de Maxentius e Constantino Roma, 307-312 DC e Pirâmides de Gisé Egito, 2.000 AC



Fonte: Franco (2004).

Figura 3 - Basílica de Santa Sofia Istambul, Turquia, 532 a 537 DC e Catedral de Milão, Duomo, Itália, 1386 a 1887



Fonte: Franco (2004).

Entre 1700 e 1900, foram desenvolvidos os conceitos de alvenaria armada e de edifícios em alvenaria estrutural. Na construção do Panthéon, em Paris, Gauthey estabeleceu as bases para o conceito da alvenaria armada. Surgiram pontes construídas em Paris, por Perronet. Marc Brunel executou o Túnel sob

o Rio Tamisa, em Londres, com colunas de ventilação executadas com paredes de 75 cm de espessura armadas verticalmente e horizontalmente (GOUVEIA, LOURENÇO e VASCONCELOS, 2007).

A Igreja de Saint Jean de Montmartre, em Paris, é outro exemplo em alvenaria armada de tijolos furados constituindo paredes de 12 cm de espessura, reforçadas com barras de aço verticais e de juntas (GOUVEIA, LOURENÇO e VASCONCELOS, 2007).

Segundo Hendry (2002), a baixa velocidade de construção evidenciou o declínio na aceitação de edifícios altos em alvenaria estrutural frente ao crescimento da alternativa de estruturas de concreto armado que, em conjunto com os novos materiais, possibilitaram a construção de obras de maior porte e arrojado. Surgiram, também, novas técnicas construtivas com embasamento científico que se desenvolveram rapidamente. Em meio a isso, a alvenaria foi relegada a um segundo plano, passando a ser usada quase exclusivamente como elemento de vedação (CAMACHO, 2006).

No final da década de 1940, no período pós-guerra, houve uma retomada na utilização da alvenaria estrutural, principalmente não armada, para a reconstrução das cidades (CAMACHO, 2006).

Em 1951, Paul Haller realizou estudos experimentais que conduziram à construção de um edifício em alvenaria não armada de 13 pavimentos (41,4 m de altura) e com paredes de 37,5 cm de espessura. Este edifício é considerado como um marco da alvenaria estrutural não armada. Este período marca o retorno da investigação e do interesse desta técnica de construção, quando, em 1967, ocorreu o primeiro congresso de estruturas de alvenaria (*International Brick / Block Masonry Conference*), em Austin, Texas (GOUVEIA, LOURENÇO e VASCONCELOS, 2007).

Atualmente, o Hotel Cassino Excalibur, concluído em 1999, na cidade de Las Vegas, é considerado o edifício mais alto do mundo em alvenaria estrutural armada. O mesmo é constituído de cinco pavimentos com paredes de blocos

de concreto de 29 cm de largura e os pavimentos restantes com blocos de concreto de 19 cm de largura (TECHNE, 2003).

No Brasil, a alvenaria estrutural é utilizada desde o início do século XVI. Entretanto, a alvenaria estrutural com blocos estruturais, considerada como um processo construtivo voltado para a obtenção de edifícios mais econômicos e racionais demorou muito a encontrar seu espaço (RAMALHO e CORRÊA, 2008).

A cronologia das edificações realizadas com blocos vazados estruturais é um pouco controversa, mas pode-se citar, por exemplo, o condomínio Central Park da Lapa, com prédios de 4 pavimentos construídos com blocos de concreto, sendo um dos primeiros edifícios construídos no Brasil, em 1972 (CAMACHO, 2006).

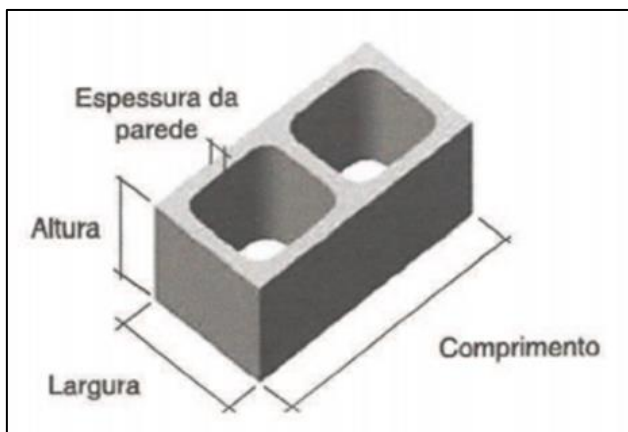
Logo depois foi construído o edifício Muriti, em São José dos Campos, com 16 pavimentos, sendo executado em alvenaria armada de blocos vazados de concreto. Em alvenaria não armada, apenas em 1977 se tem notícia dos primeiros edifícios, com nove pavimentos. Essas edificações foram executadas com blocos sílico-calcáreos, com 24 cm de espessura para as paredes estruturais (RAMALHO e CORRÊA, 2008).

Mesmo com sua chegada tardia, observa-se que a tendência de utilização deste processo construtivo é crescente. A alvenaria estrutural acabou se firmando como uma alternativa eficiente e econômica sendo muito bem aceita, como demonstra o grande volume de obras construídas por meio desse sistema, assim como, o aumento do número de empresas fabricantes de blocos estruturais.

4.1.2 Blocos de concreto estrutural

De acordo com a NBR 6136 “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – Requisitos” (ABNT, 2016), bloco vazado é o elemento da alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta (Figura 4).

Figura 4 - Bloco vazado de concreto simples



Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016).

Segundo Ramalho e Corrêa (2008), os blocos são os principais responsáveis pela determinação da resistência da estrutura, sendo os blocos de concreto os mais utilizados em alvenaria estrutural no Brasil. Os blocos norteiam a resistência à compressão e determinam os procedimentos para utilização da técnica da coordenação modular nos projetos (CAMACHO, 2006).

As unidades da alvenaria podem ser maciças (tijolos) ou vazados (blocos). São considerados blocos maciços os que possuem um índice de vazios de no máximo 25% da área total. Se os vazios ultrapassarem esse limite, o bloco é classificado como vazado (RAMALHO e CORRÊA, 2008). A tensão equivalente à área total do bloco, ignorando os vazios, é chamada tensão em relação à área bruta e a tensão calculada subtraindo-se a área de vazios é chamada de tensão em relação a área líquida.

As dimensões nominais e a determinação da classe dos blocos vazados de concreto devem corresponder às definições que estão descritas na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Dimensões nominais

FAMÍLIA		20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	7,5x40	
Medida Nominal (mm)	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração 'L'	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração 'T'	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta Inteira	390	390	290	390	240	365	390	290	-
		Meia Canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-

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

Tabela 2 - Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes dos blocos.

CLASSE	LARGURA NOMINAL mm	PAREDES LONGITUDINAIS mm	PAREDES TRANSVERSAIS	
			PAREDES ^a mm	ESPESSURA EQUIVALENTE ^b mm/m
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

a Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito

b Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros) dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros)

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016).

Foram utilizados, para o desenvolvimento do estudo experimental, blocos vazados de concreto com as seguintes dimensões: 140 mm (largura), 190 mm (altura) e 340 mm (comprimento). Conforme dados apresentados na

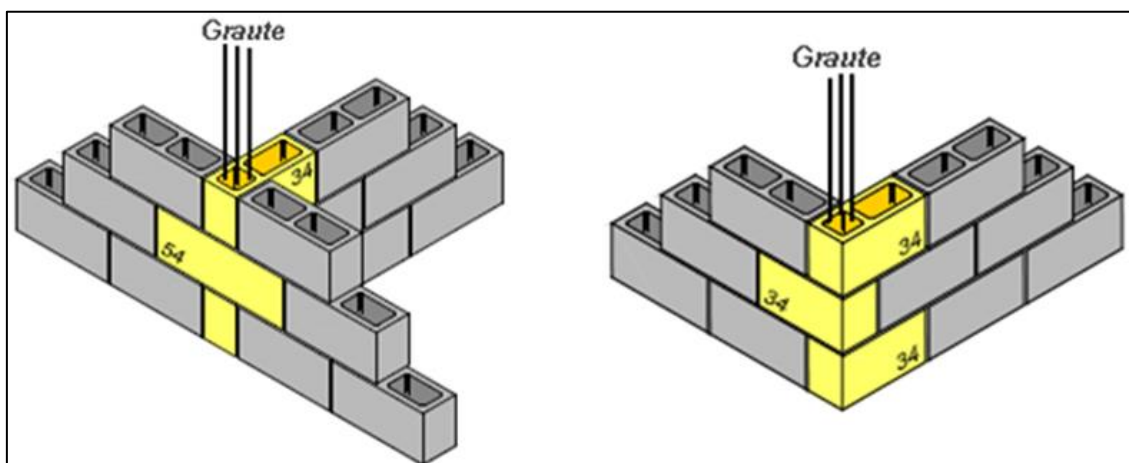
Tabela 1, são blocos utilizados para amarração tipo “L” que são utilizados no encontro entre paredes.

Em projetos de alvenaria estrutural o tratamento de encontro entre paredes é de suma importância devido as concentrações de tensões que ocorrem nesses pontos e da transferência de cargas que ocorre de uma parede para outra (PARSEKIAN e MELO, 2010).

Diante disso, deve-se realizar a amarração entre as paredes que se encontram, de forma a garantir um funcionamento adequado do processo construtivo em alvenaria estrutural.

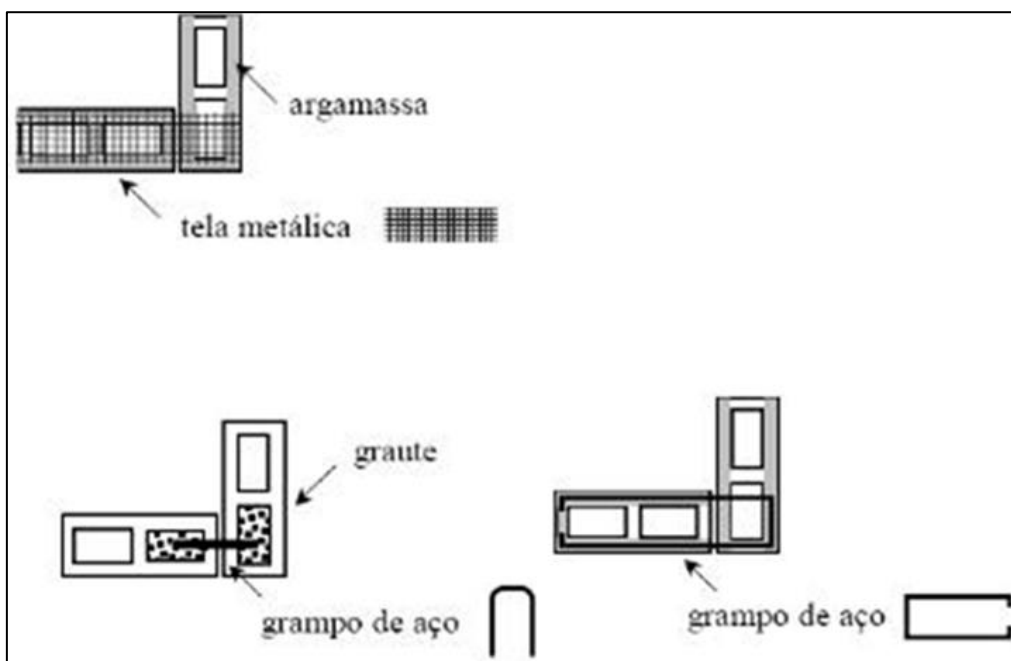
Essa amarração entre paredes pode ser efetuada por amarração direta (amarração em L ou T), conforme “Figura 5”, definida pela sobreposição dos blocos de uma parede na outra a cada duas fiadas, e amarração indireta, onde não ocorre a sobreposição dos blocos das paredes. Nesse caso utilizam-se grampos ou telas (Figura 6).

Figura 5 - Amarração de paredes em L e T.



Fonte: Désir (2010).

Figura 6 - Amarração indireta com grampos ou tela.



Fonte: Adaptado de Franco (2010).

Quanto à aplicação, os blocos podem ser classificados como estruturais ou de vedação. Segundo a norma NBR 6136 (ABNT, 2016), os blocos de concreto estruturais são fabricados conforme sua resistência característica à compressão (Tabela 3).

Tabela 3 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração.

CLASSIFICAÇÃO	CLASSE	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO AXIAL ^a (Mpa)	ABSORÇÃO %				RETRAÇÃO ^d %
			AGREGADO NORMAL ^b		AGREGADO LEVE ^c		
			INDIVIDUAL	MÉDIA	INDIVIDUAL	MÉDIA	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 8,0$	$\leq 6,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 8,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 12,0$	$\leq 10,0$			

a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias

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

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

d Ensaio Facultativo.

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

4.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Resistência à compressão

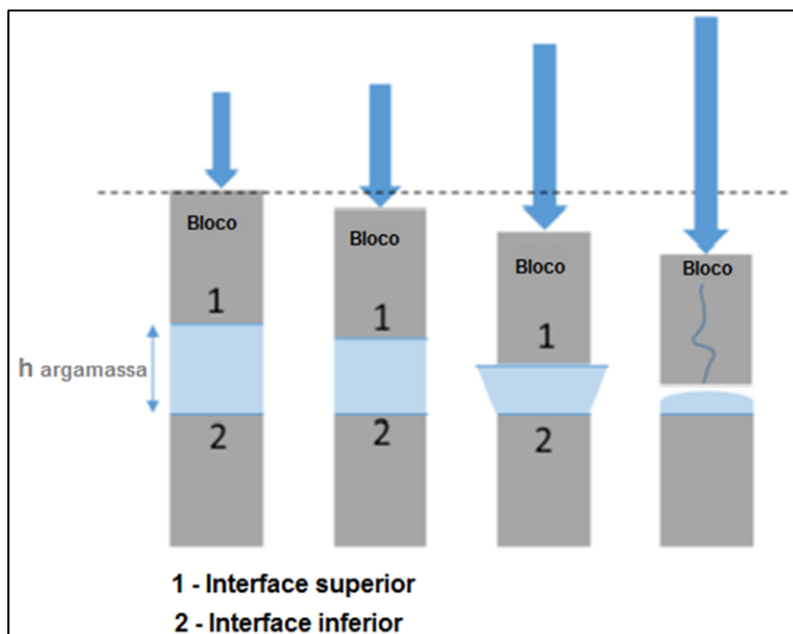
Um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a alvenaria estrutural é a resistência à compressão. De acordo com Silva, Camacho e Rodrigues (2011), a melhor forma de se obter uma estimativa da resistência à compressão de uma parede de alvenaria é através de ensaios representativos que podem ser feitos a partir de ensaios em amostras individuais, em prismas ou pequenas paredes.

A NBR 15961- 2 “Alvenaria estrutural – Blocos de concreto - Parte 2: Execução e controle de obras” (ABNT, 2011) demonstra que para realizar o ensaio de resistência à compressão de prismas, cada corpo de prova deve ser composto por dois blocos principais sobrepostos cheios ou ocos que são unidos por uma junta de argamassa. Porém, alguns autores afirmam que esse método de execução é de difícil correlação com o comportamento real da alvenaria, pois ocorre confinamento do topo e da base do prisma fazendo com que a resistência seja aumentada e o modo de ruptura alterado.

Para Castro, *et al.* (2016), o que mais contribui para a resistência final da alvenaria é a resistência à compressão do bloco. Porém, o mesmo autor ressalta que o ganho de resistência do bloco não é proporcional ao ganho de resistência da alvenaria e considera que o aumento da resistência do bloco causa um aumento de sua rigidez em relação à argamassa, aumentando a diferença de deformação entre os elementos, o que pode causar a ruptura de forma mais brusca.

Mohamad, *et al.* (2017) mostram através da Figura 7 que, quando a alvenaria é submetida a ensaios de compressão, o processo de ruptura ocorre inicialmente pelo esmagamento da junta de argamassa, no qual há perda da coesão da argamassa, e depois pelo esfacelamento da superfície de contato entre bloco e argamassa. O mesmo autor indica que deve haver compatibilidade de resistências entre os componentes principais da alvenaria.

Figura 7 - Ruptura devido à perda de coesão da argamassa



Fonte: Adaptado de Mohamed et al (2017).

Nessralla (2013) ressalta a importância do ensaio de compressão, pois o peso das lajes, das próprias paredes e até possivelmente de andares superiores exercem um esforço de compressão sendo necessário assegurar que a alvenaria estrutural suportará todas as cargas as quais será submetida in loco. Além disso, Nessralla (2013) destaca os principais fatores que influenciam na resistência à compressão da alvenaria que são: a resistência à compressão do bloco, da argamassa e do graute; a geometria, dimensão e tipo do material do bloco; tipo de assentamento; espessura da junta e mão de obra.

Os componentes principais da alvenaria também devem ser ensaiados à compressão, conforme descrito na NBR 15961-2 (ABNT, 2011). O ensaio à compressão do bloco de concreto é direcionado pela NBR 12118 “Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria” (ABNT, 2013), que tem como requisitos a análise dimensional, determinação de absorção de água, área líquida, resistência à compressão e retração por secagem. O ensaio à compressão do graute deve atender às especificações contidas na NBR 5739 “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 2007).

4.2.2 Módulo de deformação

Além da resistência à compressão, Silva, Ritcher e Désir (2010) citam como outra característica importante para estruturas em alvenaria, o módulo de deformação, ou também chamado de módulo de elasticidade, quando se trabalha com materiais no regime elástico.

O módulo de deformação permite que se tenha um maior controle sobre as deformações, podendo levar a uma possível redução de dimensões nas estruturas e um melhor desempenho quando se trata de patologias. No entanto, considerando que a alvenaria estrutural se comporta de forma não linear é difícil prever com precisão o módulo de deformação (SANTOS, *et al.*, 2017).

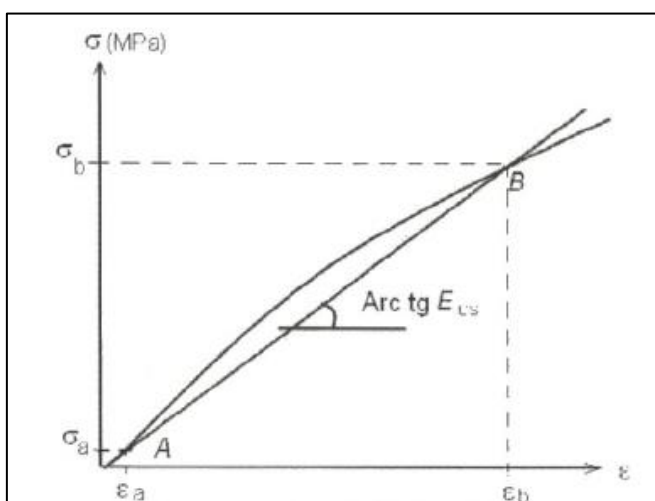
A relação entre tensão e deformação, para determinados intervalos, pode ser considerada linear (Lei de Hooke), ou seja, $\sigma = E \cdot \varepsilon$, sendo σ a tensão, ε a deformação específica e E o módulo de deformação longitudinal (PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS, 2010).

Para o concreto, a expressão do módulo de elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva tensão versus deformação ou, quando não existe uma parte retilínea, a expressão é aplicada à tangente da curva. Desta forma é obtido o módulo de deformação tangencial Inicial conforme determina a NBR 8522 “Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão” (ABNT, 2017) (PINHEIRO, MUZARDO e SANTOS, 2010).

Devido à falta de uma norma específica para determinar o módulo de deformação em paredes de alvenaria estrutural, a norma NBR 8522 (ABNT, 2017) que especifica a determinação do módulo de elasticidade à compressão do concreto endurecido em corpos de prova cilíndricos, é frequentemente utilizada. Portanto, o módulo de deformação é obtido através do gráfico tensão-deformação que é obtido através do ensaio de compressão (CASTRO, *et al.*, 2016).

De acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), o módulo de deformação tangente à curva ou inicial é equivalente ao coeficiente angular da reta secante entre as tensões σ_a e 30% da tensão de ruptura (f_c), formada no gráfico tensão-deformação, conforme demonstrado na Figura 8. O módulo de deformação pode ser obtido no intervalo entre 40% e 70% da carga de ruptura para o módulo secante, ou a 30% da carga para o módulo tangente inicial (CASTRO, *et al.*, 2016).

Figura 8 - Representação esquemática do módulo de deformação



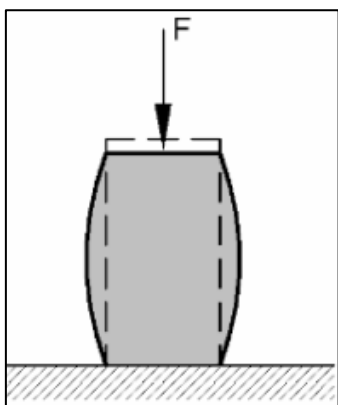
Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017).

4.2.3 Coeficiente de Poisson

Um parâmetro essencial para se realizar a simulação do comportamento de deformação de uma alvenaria em modelos matemáticos é o coeficiente de Poisson. Este coeficiente é obtido no ensaio de compressão da alvenaria através da leitura das deformações específicas longitudinais e transversais (SILVA, RICHTER e DÉ SIR, 2010).

De acordo com Januzzi, *et al.* (2014), o coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação longitudinal, que ocorre na direção da carga, e simultaneamente uma deformação transversal do elemento estudado conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Deformações longitudinais e transversais



Fonte: PINHEIRO, SANTOS, *et al.* (2010).

4.3 Graute

A NBR 15961-1 (ABNT, 2011) conceitua o graute como um micro concreto utilizado para preencher as cavidades dos blocos com a finalidade de aumentar a estabilidade, das armaduras e do conjunto, assim como a capacidade de resistência do sistema. Ehrenbring, Tutikian e Medeiros (2017) complementam que o graute é um composto fluido à base de cimento aplicado em diversas áreas da construção civil. Devido a sua consistência ele é amplamente utilizado no preenchimento de blocos, colaborando para a constituição de um sistema monolítico na alvenaria estrutural.

O graute é composto por cimento, areia, agregados e água, podendo ser incluídos aditivos químicos e cal hidratada com o intuito de melhorar a trabalhabilidade e a coesão, respectivamente. A consistência e fluidez são as principais características desejáveis do micro concreto, no estado fresco, pois deve-se garantir o total preenchimento dos vazios do bloco. A diferença presente no graute, em relação ao concreto, é uma menor granulometria presente nos agregados utilizados (NESSRALLA, 2013).

Outro fator importante a ser levado em consideração para manter a qualidade do graute são as suas características no estado fresco como, por exemplo, estabilidade de suspensão e baixa exsudação. Essas características são necessárias para manter o graute homogêneo, podendo ser afetadas devido à

necessidade de uma maior fluidez, na qual é necessário elevar a relação água/cimento (EHRENBRING, TUTIKIAN e MEDEIROS, 2017).

A principal propriedade do graute em estado endurecido é a resistência à compressão. A NBR 15961-1 (ABNT, 2011) orienta que a resistência à compressão do graute deve ser de no mínimo 15 MPa aos 28 dias.

A resistência do graute muito superior à resistência do bloco na área líquida não traz benefícios à alvenaria e deve ter a resistência especificada maior ou duas vezes maior que a resistência à compressão do bloco. O preenchimento dos vazios do bloco com o graute permite um aumento da capacidade de distribuição e absorção dos esforços de compressão, pois o sistema funciona monoliticamente, ou seja, como uma peça única (RAMALHO e CORRÊA, 2008). Nessralla (2013) salienta a importância da resistência à compressão do graute, porém afirma que quando o graute atinge resistências muito elevadas, as peças apresentam alta rigidez impedindo que se deformem levando a uma ruptura antecipada.

4.3.1 Agregados componentes do graute

A norma NBR 9935 “Agregados – Terminologia” (ABNT, 2011) indica que os agregados podem ser definidos como: material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para preparação de argamassa ou concreto.

A mesma norma ainda descreve o agregado reciclado de concreto como: material granular obtido por reciclagem de resíduos de concreto fresco ou endurecido, constituído na sua fração graúda (>4,75 mm) de no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland.

A extração dos agregados ocorre através da britagem de pedreiras (pedra britada) e de exploração de material particulado natural (areia).

Para utilização dos agregados naturais em concretos ou graute, as principais características a serem analisadas são: granulometria, absorção de água, forma, textura, resistência à compressão e módulo de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para uso dos agregados reciclados, essas características devem ser avaliadas de forma criteriosa, pois a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do conhecimento de seu comportamento na estrutura do concreto ou graute (GIESELER e TUTIKIAN, 2013). Segundo Werle *et al.* (2010), os agregados reciclados possuem forma mais angulosa, textura superficial rugosa e grande potencial de absorção de água; assim, o concreto ou graute produzido com esses agregados apresentam comportamento diferenciado em relação ao convencional.

De acordo com a dimensão máxima dos agregados adotados, o graute pode ser classificado como fino ou grosso. No fino a dimensão máxima dos agregados é de 4,8 mm, enquanto no grosso são adotados agregados com dimensão superior a esta. A dimensão máxima do agregado do graute deve ser inferior a um terço da menor dimensão dos furos dos blocos que serão preenchidos (GIESELER e TUTIKIAN, 2013).

4.4 Resíduo de construção e demolição

Atualmente, o tema sustentabilidade e a preocupação com o meio ambiente têm levado a sociedade, principalmente, grupos de pesquisadores a buscarem alternativas que possibilitem crescimento sustentável e desenvolvimento de novos materiais. A reciclagem de resíduos da construção é uma das alternativas, com possibilidades favoráveis na tentativa de incorporação destes resíduos como fonte de matéria prima.

Resíduos de construção e demolição (RCD) são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos

cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico e vidros (ABRELPE, 2015).

4.4.1 Geração e reciclagem de RCD

O Relatório Avançando Gestão de Materiais Sustentáveis da EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) estimou que, em 1996 foram gerados 136 milhões de toneladas de RCD de construções de edifícios e quase 170 milhões de toneladas em 2003 (EPA, 2018).

O mesmo relatório apontou que, no ano de 2014, foram gerados 534 milhões de toneladas de RCD sendo maioria em sua composição o concreto (70%), seguido do concreto asfáltico (14%). Os resíduos de madeira representaram sete por cento e a soma de aço, gesso, telhas e tijolos cerâmicos (9%) (EPA, 2018).

Na União Europeia, cerca de um oitavo do total de resíduos gerados foi composto por RCD. Cerca de 320 milhões de toneladas, ou 636 kg per capita. Estima-se que no mesmo ano, quase 18 milhões de toneladas de RCD foram reciclados (EUROSTAT, 2017).

As últimas publicações referentes às taxas de reciclagem de RCD nos principais países da Europa, foram fornecidos pela EUROSTAT (2017), podendo ser observadas as porcentagens recuperadas nos anos de 2010, 2012 e 2014 na Tabela 4.

Tabela 4 - Porcentagem de recuperação de resíduo de construção e demolição na Europa

REGIÃO GEOGRÁFICA	2010 (%)	2012 (%)	2014 (%)
UE (28 países)	78	86	88
Bélgica	74	99	32
Bulgária	62	12	96
República Checa	91	91	90
Dinamarca	84	87	92
Alemanha	95	94	ND/C
Estônia	96	96	98
Irlanda	97	100	100
Grécia	0	0	0
Espanha	65	84	70
França	66	66	71
Croácia	2	51	69
Itália	97	97	97
Chipre	0	60	38
Letônia	91	96	92
Lituânia	73	88	92
Luxemburgo	98	99	ND/C
Hungria	61	75	86
Malta	16	100	100
Países Baixos	100	100	99
Áustria	92	92	94
Polónia	93	92	96
Portugal	58	74	96
Roménia	47	67	65
Eslovénia	94	92	98
Eslováquia	47	38	54
Finlândia	5	12	83
Suécia	78	81	55
Reino Unido	95	94	95
Islândia	75	100	86
Liechtenstein	ND	ND	ND
Noruega	44	75	78
Suíça	ND	ND	ND
Montenegro	ND	ND	ND
Albânia	ND	ND	ND
Sérvia	5	0	3
Peru	0	20	ND

ND: não disponível

C: confidencial

Fonte: Adaptado de Eurostat (2017).

Segundo o sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS, 2017), referente aos dados de até 2015, a indústria da construção civil gera grande quantidade de resíduos. Os dados mais recentes fornecidos pelo governo

federal apontam uma evolução na quantidade de resíduos totais recebidos nas unidades de reciclagem dos municípios. Dentre os dados, destaca-se que as massas de RCD, destinadas a área de transbordo e triagem, área de reciclagem e aterro somaram 1.887.853 em 2015 (SNIS, 2017), 3.050.416t em 2014 (SNIS, 2014) e 3.784.560t em 2013 (SNIS, 2013).

Quanto às unidades receptoras para reciclagem e aterros de RCD, as quantidades recebidas por elas somam mais de 4,0 milhões de toneladas em 2015 (SNIS, 2017), 3,1 milhões de toneladas em 2014 (SNIS, 2014) e 3,8 milhões de toneladas em 2013 (SNIS, 2013). Contudo, devido à carência de informações do setor específico de resíduos de construção, é interessante citar a quantidade encaminhada para as unidades de reciclagem de RCD, cujo valor é de 1,45 milhões de toneladas no ano de 2015, 1.125 mil toneladas no ano de 2014 e 1.000 mil toneladas no ano de 2013, o que representa uma expansão sobre o apurado no decorrer dos anos.

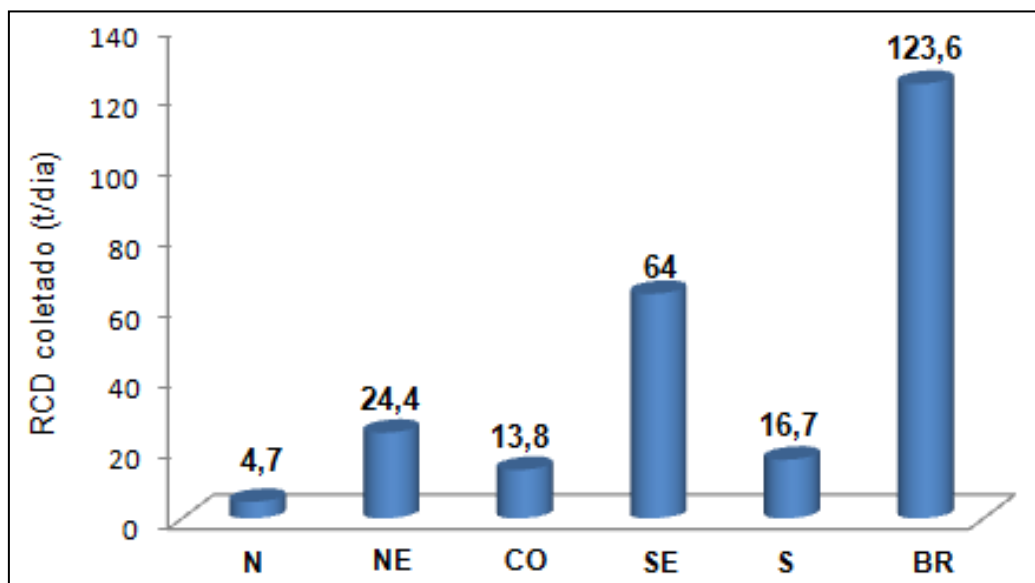
No ano de 2016, os municípios brasileiros tiveram uma pequena queda na coleta de RCD quando comparado no ano de 2015, como mostra a Tabela 5 e Figura 10. Esta situação, também foi observada em anos anteriores, se tornando uma situação preocupante, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios geralmente coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados em vias públicas (ABRELPE, 2016).

Tabela 5 - Quantidade total de RCD coletado por regiões e total no Brasil

REGIÃO	2015		2016	
	RCD Coletado (t/dia) / Índice (Kg/hab/dia)	RCD Coletado (t/dia)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (Kg/hab/dia)
Norte	4.736 / 0,271	4.720		0,266
Nordeste	24.310 / 0,430	24.387		0,428
Centro-Oeste	13.916 / 0,901	13.813		0,882
Sudeste	64.097 / 0,748	63.981		0,741
Sul	16.662 / 0,570	16.718		0,568
Brasil	123.721 / 0,605	123.619		0,600

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2016).

Figura 10 - Quantidade RCD por regiões



Fonte: A autora (2018).

A bibliografia revela que um dos principais empecilhos para o gerenciamento dos RCD é a falta de dados, estudos e documentações sobre as suas taxas de geração (OLIVEIRA, *et al.*, 2011).

4.4.2 Diferença entre resíduos de concreto e resíduos de construção e demolição

Como a presente pesquisa utiliza o resíduo da fabricação de blocos de concreto, torna-se necessário o detalhamento da diferença entre o resíduo de concreto e o resíduo de construção e demolição (RCD).

Os autores Mehta e Monteiro (2008) evidenciam que o concreto de cimento Portland é o material manufaturado mais utilizado no mundo, sendo assim, imprescindível o aumento na incorporação de materiais alternativos na produção do concreto com a finalidade de preservar o meio ambiente. A durabilidade desses novos materiais possui grande relevância, pois é esta que define a vida útil do novo concreto.

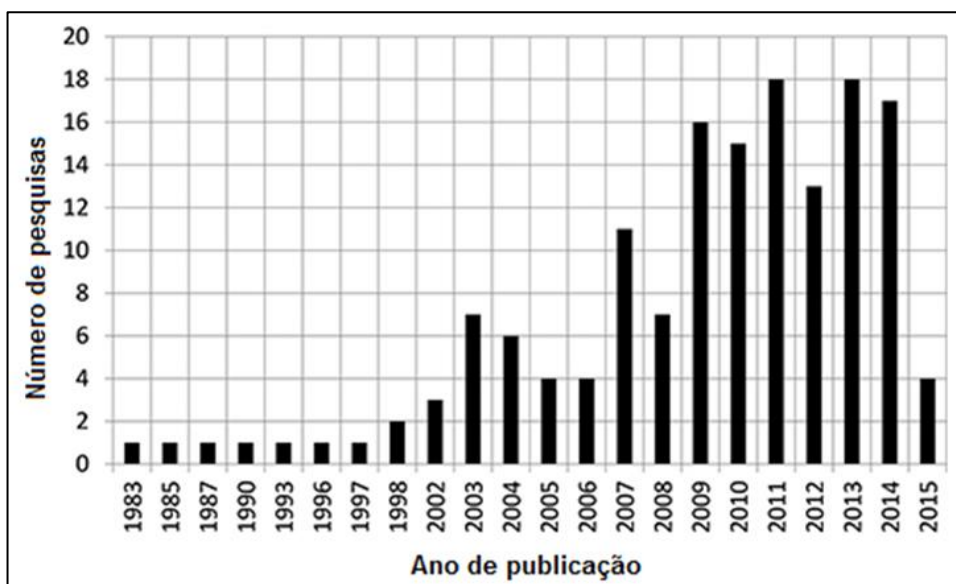
Os Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) são todos os resíduos gerados no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição (TROMBIM, PORTELA e GONÇALVES, 2016).

Já os resíduos de concreto, são os resíduos originários de atividades da construção civil e demolições, que são separados, e os oriundos de fábricas e usinas de concreto, sendo caracterizados, geralmente, pela possibilidade de conhecimento das propriedades mecânicas (BUTTLER, *et al.*, 2006).

Na fabricação de blocos de concreto, o resíduo gerado possui característica homogênea, não ocorrendo contaminação com outros materiais. Em comparação a este, o RCD possui natureza heterogênea, não uniforme, com frações variantes do canteiro de obras em que foi gerado, dificultando sua utilização (MARTINS, 2012).

Baseado por extensas pesquisas científicas, o uso de agregados de concreto reciclado obteve grande crescimento nos últimos anos, conforme pode ser verificado na Figura 11. Um número significativo de trabalhos de pesquisas foi publicado, reduzindo a insegurança relacionada ao seu desempenho na utilização em concreto (GONZÁLEZ, *et al.*, 2016).

Figura 11 - Ano de publicação x número de pesquisas no banco de dados dos agregados reciclados de concreto.



Fonte: Adaptado de González, *et al.* (2016).

A qualidade do concreto ou grante com a substituição do agregado natural por agregado reciclado depende diretamente das propriedades dos agregados reciclados. Os resíduos de concreto são os agregados mais adequados para a execução de concreto estrutural reciclado. Além do agregado natural, o outro componente importante deste agregado reciclado é a argamassa de cimento aderida. Este material é a causa das principais diferenças entre agregados naturais e dos agregados reciclados de concreto (AKBARNEZHAD, *et al.*, 2013). A presença de argamassa aderida é responsável por aumentar consideravelmente, a absorção de água de agregados de concreto reciclado (PEDRO, BRITO e EVANGELISTA, 2017).

Segundo Nagataki, *et al.*, (2004) existe uma grande variedade na qualidade desse tipo de agregado, estando relacionada ao concreto original e suas características. O concreto original de baixa qualidade induz uma argamassa aderente de baixa qualidade e, conseqüentemente, agregados reciclados de baixa qualidade.

Além disso, segundo Buttler *et al.* (2006), os processos de reciclagem para os resíduos de fábricas de pré-moldado podem ser considerados simplificados e realizado no próprio local de geração. Essas características dos resíduos de concreto facilitam seu emprego em aplicações de alto valor agregado, tal como, produção de concreto estrutural. Esse é o caso do resíduo utilizado nessa pesquisa. O mesmo é gerado durante o processo de fabricação de blocos de concreto estruturais, no momento da sua prensagem (em estado fresco). Os resíduos foram fornecidos por uma fábrica de blocos de concreto situada na região metropolitana de Belo Horizonte (MG).

A Figura 12 mostra o processo de prensagem dos blocos e os resíduos gerados durante o processo.

Figura 12 - Resíduos gerados no processo de prensagem dos blocos



Fonte: A autora (2018).

4.5 Análise numérica da alvenaria estrutural

A alvenaria é um conjunto estrutural composto de blocos e argamassa podendo ainda ser reforçada com graute. Conforme apresentado por Peleteiro (2002), pode-se afirmar que a alvenaria (conjunto bloco e argamassa) é um material heterogêneo que apresenta, resistência à compressão elevada dependente, principalmente, da resistência à compressão dos blocos. Por outro lado, a resistência à tração desse conjunto é baixa e está determinada pela adesão dos blocos com a argamassa.

O desenvolvimento de uma análise realizada com *software* consiste em diferentes etapas. Inicialmente, é necessário definir um modelo que descreva todo o conjunto de parâmetros observado no modelo real. Devido à complexidade de uma estrutura de alvenaria, existem vários estudos que mostram diferentes formas de descrevê-la. Cada modelo visa a obter diferentes resultados, tornando-se de grande importância um estudo aprofundado nessa fase (JANUZZI, *et al.*, 2014).

Peleteiro (2002) apresenta um resumo dos diferentes tipos de análise computacional da alvenaria estrutural, sendo apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos diferentes modelos numéricos.

MODELO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Modelo discreto com comportamento linear isotrópico.	Bons resultados em estruturas submetidas a níveis baixos de tensão.	Não adequação para casos em que as tensões aplicadas são altas e onde é necessária uma análise de redistribuição de tensões.
Modelo homogeneizado com comportamento linear ortotrópico.	Adequado para estudos do comportamento global da estrutura. Com a vantagem de uma modelagem mais simples e um tempo de processamento menor que o modelo discreto.	Em termos locais, grandes diferenças podem ser encontradas, mesmo numa análise linear. O modelo não é capaz de identificar picos de tensões em regiões localizadas, que o modelo discreto consegue determinar.
Modelo discreto com comportamento elástico linear para as unidades e elemento de ligação não linear nas juntas.	Modelagem apropriada com a vantagem de determinação das características do material através de ensaios uniaxiais.	Não considera a fissuração e a não linearidade da unidade. Não é capaz de determinar a ruptura da estrutura, quando fortemente influenciada pelas rupturas nas unidades.
Modelo discreto com características de deformação não linear para a unidade e a argamassa, critério para a ruptura da unidade, da argamassa e da junta.	A idealização proposta é capaz de representar o comportamento nas estruturas em alvenaria, determinar a carga inicial de fissuração, a carga última e o padrão de ruptura com boa precisão.	São necessários ensaios complexos de caracterização das unidades, da argamassa e de amostras de parede.
Modelo de fissuras discretas considerando-se as propriedades não lineares dos materiais.	Mais apropriados para análise de painéis submetidos a forças concentradas.	Apresenta um custo computacional elevado.
Modelo de fissuras espalhadas com a consideração do comportamento não linear dos componentes.	Bons resultados na determinação da força última de ruptura e no padrão de ruptura dos painéis. Tempo de processamento mais baixo.	Podem aparecer tensões de travamento e os resultados devem ser analisados com cuidado devido à dependência da dimensão da rede.

Fonte: Peleteiro (2002).

4.5.1 Método dos Elementos Finitos

A ideia básica do MEF é executar uma divisão do domínio de integração de uma estrutura de interesse em um conjunto de pequenas regiões, chamadas de elementos finitos, transformando o domínio de análise de contínuo em discreto. Essa divisão do domínio é conhecida como malha, que é o conjunto

de elementos finitos resultante da discretização. A malha é formada por elementos compostos de nós, que são pontos de interseção e ligação entre os elementos. A grande vantagem do MEF é de não buscar uma função analítica que satisfaça às condições de contorno para todo o domínio, o que pode ser praticamente impossível em um problema complexo, mas buscar essas soluções em cada elemento separadamente (SILVA, 2009).

A discretização gera um número elevado de equações algébricas, que são geradas e resolvidas com o auxílio de computadores digitais. Assim, podem-se utilizar procedimentos padrões, aplicáveis aos sistemas discretos, que não envolvem decisões de engenharia durante o procedimento computacional (LOTTI, *et al.*, 2006).

Segundo Penna (2011), na mecânica computacional de uma análise estática, tem-se a equação 1 reduzida:

$$C \cdot X = D \quad (1)$$

Visto que a matriz C é a matriz de rigidez global da estrutura, o X são os vetores nodais de deslocamento e D o vetor de forças nodais. Na análise não linear, a matriz C depende dos deslocamentos X . Com um processo incremental iterativo na equação 2 gera-se uma a nova equação reescrita na forma:

$$K_t \cdot \delta_U = \delta_\lambda \cdot P + Q \quad (2)$$

Onde K_t é a matriz de rigidez tangente, " δ_U " é o vetor de deslocamento incremental, " δ_λ " é um incremento do fator de cargas, P é o vetor de cargas de referência e Q é o vetor de cargas residuais do modelo.

A matriz K_t e o vetor F_i são montados a partir da contribuição de cada elemento finito, baseando-se em duas operações (Equações 3 e 4):

$$K_t = \int V B_t E_t B_d V \quad (3)$$

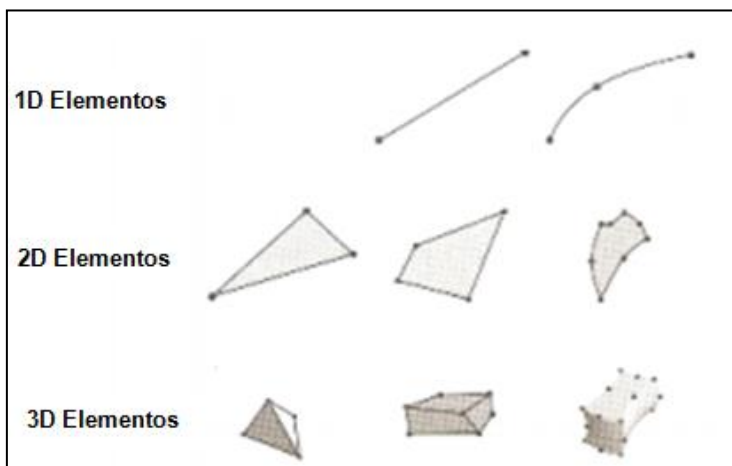
e

$$F_i = \int V B_t \sigma_d V \quad (4)$$

Onde F_i corresponde ao estado de tensão corrente de cada elemento, σ a tensão em cada elemento finito, K_t a rigidez tangente, B a relação deformação-deslocamento, E_t a matriz constitutiva e V o volume do elemento.

Diferentes tipos de elementos podem ser utilizados no MEF, como pode ser observado na Figura 13. Cada elemento é indicado para situações diferentes. O primeiro (1D) é normalmente aplicado em elementos de barras e vigas; já o elemento 2D é muito usado em elementos de placas, também sendo utilizado em vigas; e, por último, o 3D (tridimensional) que é utilizado como elemento sólido. Silva (2009) considera que o último elemento apresenta resultados sempre superiores aos demais, porém, a escolha de um elemento deve ser feita levando se em consideração o tipo de geometria do modelo e as aproximações de solução que se deseja obter.

Figura 13 - Tipos e formas de elementos



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

É importante que sejam realizados estudos via MEF para auxiliar na análise do comportamento da alvenaria estrutural, a fim de desenvolver novos produtos, definir projetos confiáveis para avaliar o nível de segurança e realizar potenciais medidas de adaptação. Com a finalidade de alcançar esses

objetivos, os pesquisadores têm tentado converter o comportamento indeterminado e não linear da alvenaria em algo que possa ser compreendido com um grau aceitável de certeza matemática. Como as estruturas em alvenaria possuem grande variabilidade em materiais e tecnologia a sua modelagem computacional se torna bastante complexa (LOURENÇO, 2013).

4.5.2 Tipos de modelagem da alvenaria: micromodelagem e macromodelagem

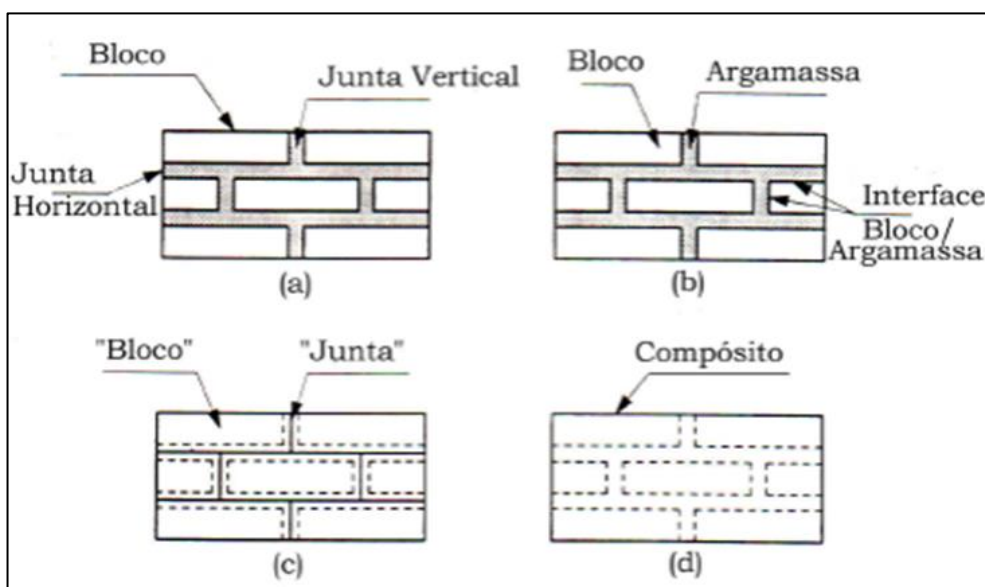
A alvenaria é material heterogêneo e anisotrópico, devido a seus diferentes materiais constituintes, tais como, argamassa, unidade (bloco), graute e juntas de argamassa nas duas direções. Considerar a alvenaria como um material homogêneo ou heterogêneo é uma decisão chave ao modelar paredes de alvenaria (BOLHASSANI, *et al.*, 2015).

Segundo Lourenço (2013), de uma forma geral, a representação numérica da alvenaria pode se concentrar na micromodelagem ou na macromodelagem. De acordo com o nível de precisão desejada, é possível utilizar as seguintes estratégias de modelagem:

- micromodelagem detalhada: os blocos e argamassas nas juntas são representados por elementos contínuos, enquanto a interface bloco-argamassa é representada por elementos descontínuos (Figura 9b);
- micromodelagem simplificada: os blocos são representados por elementos contínuos, enquanto o comportamento das juntas de argamassa e da interface bloco-argamassa é agrupado em elementos descontínuos, permitindo a representação dos planos de fissuração e deslizamentos (Figura 9c);
- macromodelagem: os blocos, argamassa e interface são moldados em um conjunto homogêneo, permitindo simular um comportamento generalizado da estrutura (Figura 9d).

Atualmente, é comum combinar as abordagens de micro e macromodelagem utilizando técnicas de homogeneização, não sendo possível afirmar a modelagem ideal, pois cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens, ficando a escolha a critério do estudo específico (LOURENÇO, 2013).

Figura 14 - Modelagem para estruturas de alvenaria: (a) exemplar da alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem.



Fonte: Adaptada de Lourenço (1996).

A definição quanto a micro ou macromodelagem deve ser feita de acordo com o objetivo a ser alcançado. O estudo da micromodelagem é necessário para se obter um bom entendimento sobre o comportamento local das estruturas em alvenaria.

A macromodelagem é adequada para análises menos detalhadas da estrutura, principalmente quando se está estudando paredes sólidas com dimensões grandes o suficiente para garantir distribuições de tensões uniformes. A macromodelagem é mais prática, apresenta um tempo de processamento reduzido e uma economia de memória dos computadores. Este tipo de modelagem é mais interessante quando existe um compromisso entre precisão e eficiência (PELETEIRO, 2002).

4.5.3 Modelo não linear

A maioria das estruturas possuem um comportamento linear elástico sob cargas de serviços. Antes de alcançar o seu limite de resistência, quase todas essas estruturas apresentarão uma resposta não linear significativa (PEREIRA, 2002).

A análise não linear é utilizada para a obtenção da resposta estrutural da alvenaria, desde o início do processo de carregamento, quando o corpo ainda está no regime elástico-linear, até a ruptura final, passando nos estágios intermediários em que o corpo está fissurado ou há esmagamentos localizados. Esta análise permite uma melhor compreensão da distribuição de tensões em todos os componentes da alvenaria (GOMES, 2001).

O comportamento não linear da alvenaria pode ser simulado pelo Abaqus através do modelo CDP, que é adotado para o concreto e outros materiais frágeis (MOHAMAD e CHEN, 2016). Esse modelo permite ainda, analisar materiais com tração e compressão diferentes, assumindo parâmetros de danos distintos. O esmagamento compressivo também é descrito por meio da introdução de deformação plástica com uma lei de amolecimento parabólico (CHOUDHURY, MILANI e KAUSHIK, 2015).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados estudos experimentais e numéricos para o desenvolvimento do presente estudo. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Ensaio de Sistemas Construtivos - LESC da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC.

A fase experimental foi constituída das seguintes etapas:

1. coleta dos materiais: blocos, agregados naturais e resíduo;
2. análise granulométrica dos agregados miúdo, graúdo e do resíduo;
3. análise de traços de graute, disponíveis na literatura, para posterior avaliação da resistência à compressão axial do graute obtido a partir da substituição integral do agregado natural miúdo por resíduo, e do graute obtido a partir da substituição integral do agregado graúdo por resíduo;
4. execução de corpos de prova cilíndricos com graute convencional (confeccionado com agregados naturais) e graute com resíduo (confeccionado com a substituição integral dos agregados naturais por resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto);
5. realização de ensaios em blocos, em corpos de prova cilíndricos de graute convencional e de resíduo, e em corpos de prova prismáticos de argamassa para determinação da resistência à compressão axial e do módulo de deformação;
6. realização de ensaios em prismas com 2 (dois) blocos preenchidos com graute convencional e graute com resíduo para determinação da resistência à compressão axial e do módulo de deformação.

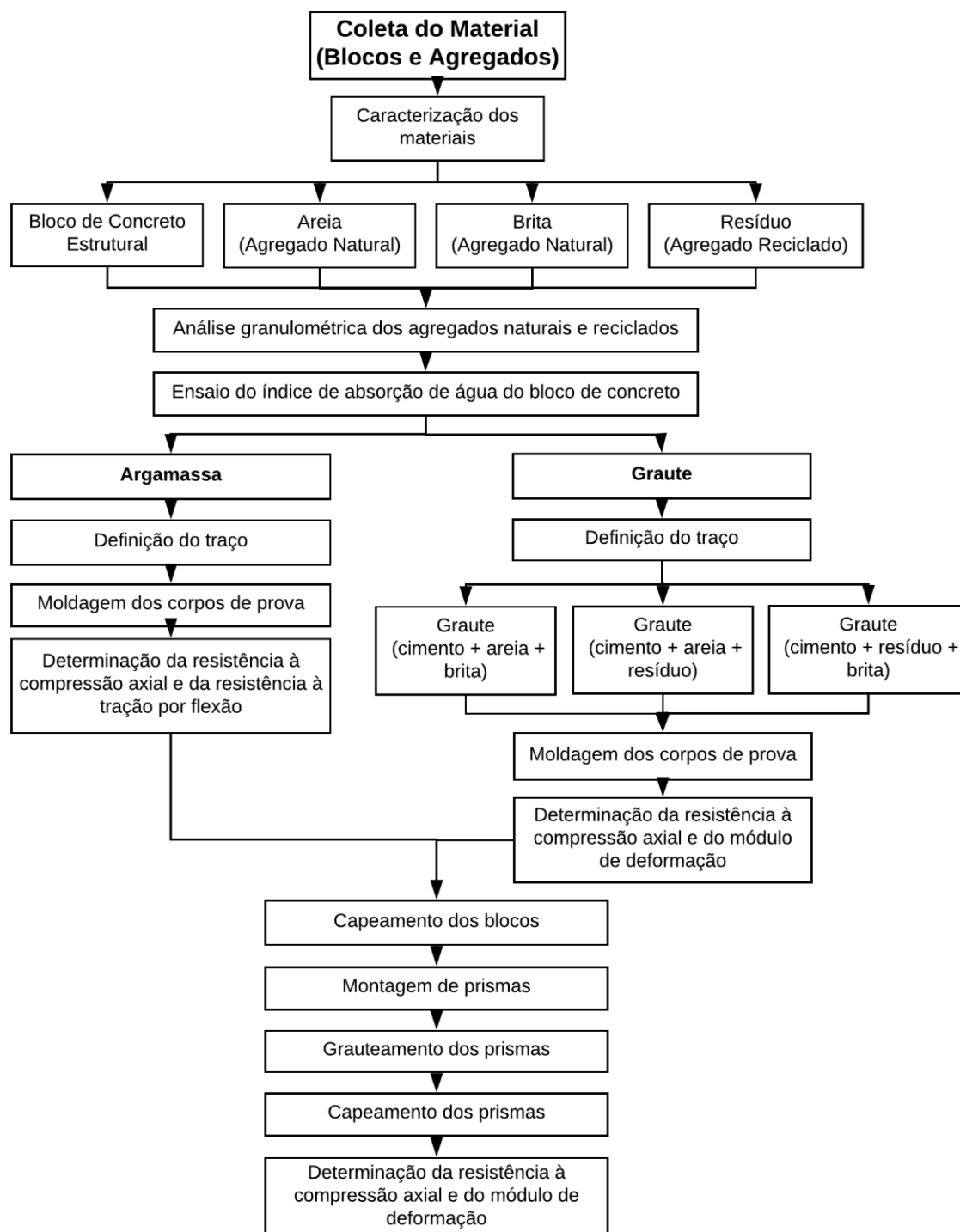
No estudo numérico, foram consideradas as seguintes etapas:

1. definição do modelo constitutivo e dos parâmetros que descrevam o comportamento não linear do prisma através da macromodelagem;
2. desenvolvimento do modelo numérico definindo as propriedades da malha e condições de contorno;
3. análise de tensões e deformações nos prismas;
4. comparação entre dados experimentais e modelo numérico.

5.1 Estudo experimental

No fluxograma 1, apresentam-se todas as etapas do programa experimental.

Fluxograma 1 - Etapas do estudo experimental



Fonte: A autora (2018).

5.1.1 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados nessa pesquisa foram fornecidos em um único lote por empresas da grande Belo Horizonte. O agregado reciclado foi coletado de acordo com a NBR 10007– “Amostragem de Resíduos Sólidos” (ABNT, 2004).

O detalhamento dos agregados utilizados é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Agregados naturais e reciclado utilizados no estudo experimental

DESCRIÇÃO	AGREGADO
Agregado miúdo natural	Areia natural Quartzosa
Agregado miúdo industrial	Areia industrial de Gnaiss
Agregado graúdo	Brita de Gnaiss
Agregado reciclado (RCD)	Resíduo da fabricação de blocos de concreto

Fonte: A autora (2018).

Determinação da composição granulométrica dos agregados miúdo, graúdo e resíduo

A composição granulométrica foi realizada com o resíduo, agregado miúdo natural e agregado graúdo natural de acordo com as recomendações da NBR 7211 “Agregados para concreto – Especificação” (ABNT, 2009), que, além de determinar a composição granulométrica dos agregados, tem como objetivo a definição do módulo de finura, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras, dividida por 100 e da dimensão máxima característica que é o valor onde o agregado possui uma porcentagem retida acumulada igual, ou imediatamente inferior, a 5% em massa.

Este ensaio consiste na caracterização física do material através de sua movimentação uma malha de peneiras. O resultado, que corresponde à porcentagem média retida e à acumulada em cada peneira, define a dimensão máxima característica da amostra ensaiada, conforme determina a NBR NM 248 “Agregados – Determinação da composição granulométrica” (ABNT, 2003). A Figura 15 ilustra o conjunto de peneiras e agitador mecânico utilizados durante o ensaio.

As informações resultantes desse ensaio são muito aplicadas na prática, sendo frequentemente utilizadas no momento da definição do traço e na dosagem de concretos ou grautes.

Figura 15 - Conjunto de peneiras e agitador mecânico



Fonte: A autora (2018).

As Figuras 16, 17 e 18 ilustram os agregados e o resíduo caracterizados durante o ensaio para determinar a composição granulométrica.

Figura 16 – Amostras do agregado miúdo natural utilizado no ensaio de granulometria



Fonte: A autora (2018).

Figura 17 – Amostras do agregado graúdo natural utilizado no ensaio de granulometria



Fonte: A autora (2018).

Figura 18 - Amostras do resíduo utilizado no ensaio de granulometria



Fonte: A autora (2018).

5.1.2 Caracterização dos blocos de concreto e índice de absorção de água

Os ensaios de caracterização dos blocos de concreto estruturais foram realizados conforme NBR 12118 “Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio” (ABNT, 2013). A referida norma determina que sejam realizados ensaios de análise dimensional (Figura 19), resistência à compressão axial e testes para determinar o índice de absorção de água.

Esses ensaios foram realizados antes da definição do traço do graute para que a resistência à compressão do bloco, graute e argamassa fossem equivalentes. A quantidade de blocos ensaiados 6 (seis unidades) foi definida de acordo com as recomendações da NBR 6136 (ABNT, 2016).

Figura 19 - Corpos de prova para realização da análise dimensional



Fonte: A autora, (2018).

5.1.3 Moldagem dos corpos de prova de argamassa para testes de compressão axial e tração na flexão

As argamassas utilizadas no assentamento dos blocos, foram caracterizadas quanto a resistência à compressão axial e à tração na flexão, através da moldagem de 9 (nove) corpos de prova prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm

(Figura 20). Para compactação da argamassa e diminuição do índice de vazios foi utilizado, durante a moldagem, uma mesa de adensamento por queda.

Figura 20 - Moldagem de corpos de prova prismáticos de argamassa



Fonte: A autora (2018).

A argamassa de assentamento foi confeccionada com cimento CP IV E 32, cal hidratada e areia industrial de granulometria média. O traço em massa utilizado foi de 1:1:0,6 (cimento:cal:areia) respeitando uma junta de aproximadamente 1,0 cm de espessura entre os blocos de concreto assentados. A mistura dos componentes da argamassa foi realizada obtendo-se a condição plástica e a trabalhabilidade adequada com uma relação água/ cimento $a/c = 1,51$ em massa. Este traço foi adotado por ser usualmente utilizado em obras de alvenaria estrutural.

5.1.4 Moldagem dos corpos de prova de graute para testes de compressão axial e módulo de deformação

Para definir o traço que seria adotado na confecção do graute, foram analisados quatro traços, sendo estes dosados para a obtenção de resistência à compressão média de 15 ± 2 MPa. A adoção dessa resistência média se deve ao valor obtido na resistência característica à compressão dos blocos de concreto. Diante dos resultados da resistência característica dos blocos,

verificou-se que o traço de graute de 15 ± 2 MPa apresentou, aproximadamente, a resistência do bloco e não sendo inferior à resistência mínima estabelecida por norma, conforme descrito no referencial teórico. A consistência adotada foi determinada a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Após análises dos quatro traços, definiu-se o traço em massa do graute convencional e com resíduo de 1:2,21:2,40 (cimento: areia: brita) e relação água cimento (a/c) de 0,950. O cimento empregado na confecção dos grautes foi o mesmo utilizado na argamassa – cimento CP IV E 32.

5.1.5 Preparação dos blocos e montagem dos prismas para testes de resistência à compressão

Esta etapa teve como objetivo preparar os blocos e prismas para analisar o desempenho mecânico da alvenaria reforçada com graute convencional e graute com resíduo. Os ensaios realizados e as normas da ABNT adotadas para caracterização dos blocos e execução dos prismas encontram-se descritos na Tabela 7.

Tabela 7 – Ensaios realizados e normas da ABNT adotadas para execução dos prismas

ENSAIO	NORMA
Análise dimensional dos blocos de concreto	NBR 12118 (ABNT,2013)
Ensaio de Compressão dos blocos de concreto	NBR 12118 (ABNT,2013)
Ensaio de Compressão do graute	NBR 5739 (ABNT,2007)
Resistência característica dos blocos de concreto	NBR 15961-2 (ABNT,2011)
Absorção de água dos blocos de concreto	NBR 6136 (ABNT,2016)
Capeamento dos blocos de concreto	NBR 15961-2 (ABNT,2011)
Preparação da argamassa de assentamento dos prismas	NBR 13276 (ABNT,2016)
Resistência à compressão da argamassa	NBR 13279 (ABNT,2005)
Produção dos prismas	NBR 15961-2 (ABNT,2011)

Fonte: A autora (2018).

Vale ressaltar que, de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), a caracterização da alvenaria deve ser realizada através de ensaios com prismas, pequenas paredes ou paredes. Os estudos para análise da resistência da alvenaria estrutural ocorrem geralmente através de prismas, pois são simulações mais simples e econômicas para a investigação das propriedades mecânicas da alvenaria. A mesma norma ainda afirma que prisma é a justaposição de dois blocos estruturais, unidos por uma junta de argamassa que deve possuir a espessura de 10 ± 3 mm.

Para o presente estudo experimental foram confeccionados dois tipos de prismas. Em ambos foram utilizados blocos estruturais vazados de concreto para amarração tipo “L” com dimensões nominais de 14 cm x 19 cm x 34 cm. Esses blocos foram justapostos e unidos por juntas horizontais de argamassa para o seu assentamento. O primeiro tipo de prisma denominado “Prisma convencional”, foi preenchido com graute executado com agregados naturais miúdo e graúdo. O segundo tipo de prisma denominado “Prisma com Resíduo” foi preenchido com graute que teve a substituição integral do agregado graúdo natural por resíduo gerado durante a fabricação de blocos de concreto.

Os prismas foram confeccionados em ambiente de laboratório, protegidos da incidência direta de luz solar e umidade, ficando livre de interferências que poderiam afetar a cura dos corpos de prova, preservando suas características originais.

Para a realização do estudo foram confeccionados e ensaiados à compressão aos 28 dias, um total de 15 (quinze) prismas para cada tipo de graute adotado - graute convencional e graute com resíduo. Os quinze blocos do traço convencional foram capeados com pasta de cimento e montados no dia seguinte. A execução dos passos para montagem dos 15 (quinze) prismas com resíduo seguiu os mesmos procedimentos dos prismas convencionais, porém como seria inviável realizar o rompimento dos 30 (trinta) prismas no mesmo dia, os mesmos foram capeados e montados um dia após a montagem dos prismas convencionais.

A Figura 21 ilustra o processo de capeamento dos blocos para a posterior execução dos prismas.

Figura 21 - Processo de capeamento dos blocos estruturais vazados de concreto



Fonte: A autora (2018).

Para assentamento dos blocos, as faces foram limpas e umedecidas através de uma rápida inserção do bloco em um recipiente com água. Esse procedimento tem por finalidade reduzir a absorção de água da argamassa pelo bloco. A argamassa foi aplicada uniformemente na face de assentamento do bloco, em toda a sua área utilizando um espaçador com 10mm de espessura (Figura 22). O uso do espaçador tem como objetivo garantir uma junta de assentamento de 1,0 cm de espessura, conforme recomendações das normas de alvenaria estrutural. Foram verificados o prumo e o alinhamento dos prismas, com o uso de um prumo de face e um nível de bolha.

Figura 22 - Montagem dos prismas



Fonte: A autora (2018).

Durante a montagem, foi removido o acúmulo de argamassa no interior dos prismas que seriam grauteados. Após aguardar o tempo de descanso mínimo de 16 (dezesesseis) horas, os alvéolos dos blocos de 15 (quinze) prismas foram preenchidos com graute convencional. O grauteamento foi realizado em duas camadas que recebiam 12 (doze) golpes em cada camada aplicados com a haste de socamento. Os quinze prismas preenchidos com graute com resíduo obedeceram ao mesmo procedimento de execução, porém foram realizados no dia seguinte em função da logística para realização dos testes de compressão axial.

A Figura 23 ilustra o processo de preenchimento dos vazados dos blocos dos prismas com graute.

Figura 23 - Grauteamento dos prismas



Fonte: A autora (2018).

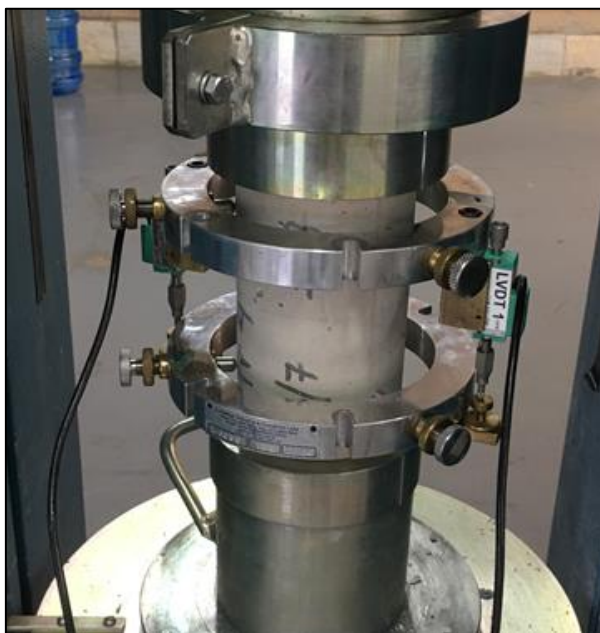
Estes procedimentos foram realizados conforme recomendam as normas NBR 15961-2 (ABNT, 2011) e NBR 5738 “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova” (ABNT, 2015). Após grauteados, os prismas foram invertidos para o capeamento da face superior.

5.1.6 Preparação dos prismas para determinação do módulo de deformação

Para a determinação do gráfico tensão x deformação e do valor do módulo de deformação dos grautes e prismas preenchidos com graute convencional e com resíduo, as normas NBR 15961-2 (ABNT, 2011), NBR 8522 (ABNT, 2008) e ACI 530-92 (1995) – *American Concrete Institute: Building Code Requirements for Masonry Structures* (“Instituto de Concreto Americano: norma de construções para estruturas de alvenaria”) foram usadas para auxílio no procedimento dos ensaios e do cálculo do módulo de deformação.

O equipamento adotado para os testes de compressão e deformação dos corpos de prova cilíndricos foi acoplado a prensa, sendo a velocidade do carregamento comandada automaticamente por um computador. Foram instalados dois transdutores lineares de deslocamentos (LVDT - Transformador Diferencial Variável Linear) para análise das deformações dos grautes convencionais e com resíduo. A Figura 24 ilustra o conjunto de equipamentos e corpo de prova utilizados durante o ensaio.

Figura 24 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão para determinar a deformação em corpos de prova cilíndricos



Fonte: A autora (2018).

Para a determinação do módulo de deformação dos prismas, foi desenvolvido um equipamento para auxiliar na fixação dos transdutores de deslocamentos (LVDT) e dos extensômetros analógicos. Foram utilizados dois LVDT's e dois extensômetros analógicos para leitura das deformações longitudinais. Para leitura das deformações transversais foram utilizados quatro extensômetros analógicos, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Equipamento desenvolvido para auxiliar na fixação dos LVDT's e extensômetros analógicos nos prismas



Fonte: A autora (2018).

Para obtenção das deformações fornecidas pelo LVDT, foi feita aquisição direta dos dados pelo computador. Para os extensômetros analógicos, as leituras foram feitas manualmente ao fim de cada intervalo de aplicação de carga.

Após a execução da leitura dos extensômetros, os prismas foram submetidos a carregamento até atingir ruptura, obtendo-se assim a resistência à compressão axial dos prismas.

5.2 Estudo Numérico

Neste estudo, por meio de simulações numéricas computacionais foi avaliado o comportamento mecânico (suas tensões e deformações) de prismas de bloco de concreto preenchidos com graute substituindo o agregado natural por RCD.

Para a criação e modelagem do comportamento mecânico da alvenaria, optou-se pela utilização do programa Abaqus (6.14) que permite realizar análise via método dos elementos finitos. Este software, de grande aplicação na engenharia, consiste em duas partes: gráfica (ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer) e Solver (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit) para a.

O (MEF) originou-se da necessidade de se desenvolver procedimentos aproximados que pudessem ser aplicados independente da forma, da estrutura e do tipo de carregamento, com precisão aceitável para um problema de engenharia, tornando-se uma eficiente ferramenta numérica para análise de estruturas. Atualmente, não se imagina conceber projetos de estruturas inovadores ou arrojados sem a utilização desse método que propicia modelagens realísticas, confiáveis e de aplicações práticas na Engenharia (SORIANO e LIMA, 2003).

O *software* ABAQUS/CAE é pré e pós-processador. Como pré-processador, gera o arquivo de entrada de dados que contém os módulos até a criação do modelo. O programa ainda permite que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo usuário. Como pós-processador, o ABAQUS/CAE possibilita a visualização gráfica dos resultados (SIMULIA, 2014).

O pré-processador ABAQUS/CAE consiste em uma interface gráfica que permite a introdução das informações do modelo gerado, que podem ser feita através de ferramentas especiais que permitem verificar vários aspectos relacionados como a geometria do modelo (módulo PART), propriedades mecânicas dos materiais constituintes (módulo PROPERTY), agrupamento (módulo ASSEMBLY) e imposição da sequência de passos (módulo STEP) e de sua natureza – linear ou não linear, definição das condições de contorno e dos carregamentos (módulo LOAD), geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e finalmente obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB) (SIMULIA, 2014).

O ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit simulam computacionalmente carregamentos estáticos e dinâmicos, respectivamente (SIMULIA, 2014).

O método de convergência utilizado para os prismas nas simulações numéricas dos prismas foi o Static General. O uso desse método é aconselhado em situações nas quais se deseja obter soluções de equilíbrio estática linear ou não linear (SIMULIA, 2014).

Na simulação numérica dos prismas adotou-se a macromodelagem, modelando os dois blocos, argamassa, graute e capeamento como um sólido – material monolítico, permitindo simular um comportamento generalizado da estrutura.

Para realizar a modelagem dos prismas, conforme ensaios experimentais são necessárias informações quanto ao modelo real para criação de um modelo numérico equivalente. A relação tensão-deformação e os correspondentes parâmetros de dano à compressão e à tração dos prismas para os modelos utilizados neste estudo foram baseados em modelos definidos através da revisão bibliográfica.

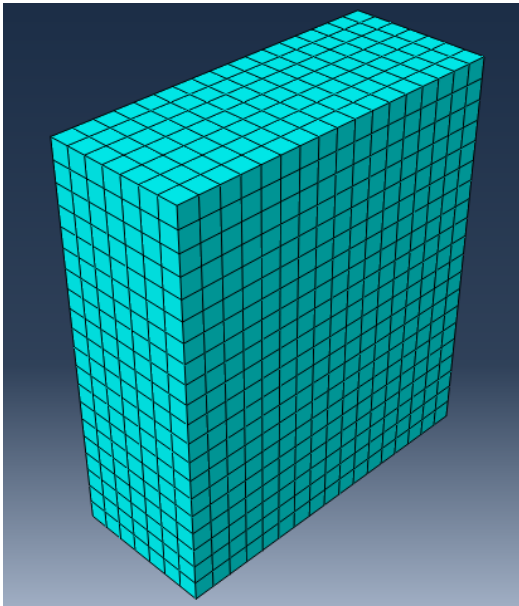
As informações de geometria, discretização da malha de elementos finitos, carregamento, condições de contorno e modelagem constitutiva fornecidas ao *software* Abaqus estão descritas a seguir.

5.2.1 Geometria e discretização da malha de elementos finitos

Consiste em informar ao programa a geometria do que será simulado. Nessa fase, o prisma foi modelado como um sólido de acordo com as dimensões dos blocos e da espessura da argamassa.

A discretização da malha de elementos finitos foi definida a partir dos testes numéricos realizados durante o processo de modelagem dos prismas, verificando a necessidade de ajustes no tamanho dos elementos finitos ou nas ferramentas de comando da malha. A partir dos testes de malha, decidiu-se por utilizar elementos com dimensão de 20 mm, como apresentado na Figura 26 que ilustra a distribuição dos elementos finitos ao longo do prisma.

Figura 26 - Malha de elementos finitos utilizada na discretização do prisma

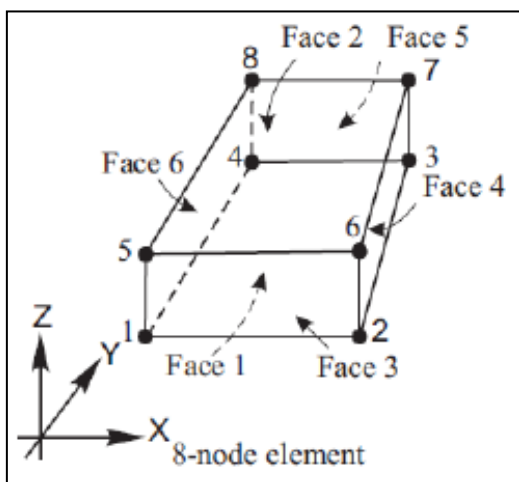


Fonte: A autora (2018).

Como resultado da discretização da malha foi obtido um modelo com 2.380 elementos e 3.024 nós.

O elemento finito utilizado para geração da malha foi o C3D8, que é um elemento sólido de oito nós com interpolação linear e integração completa, capaz de representar as translações nas direções principais x, y e z, uma vez que possui três graus de liberdade por nó (ver Figura 27).

Figura 27 - Elemento de malha C3D8



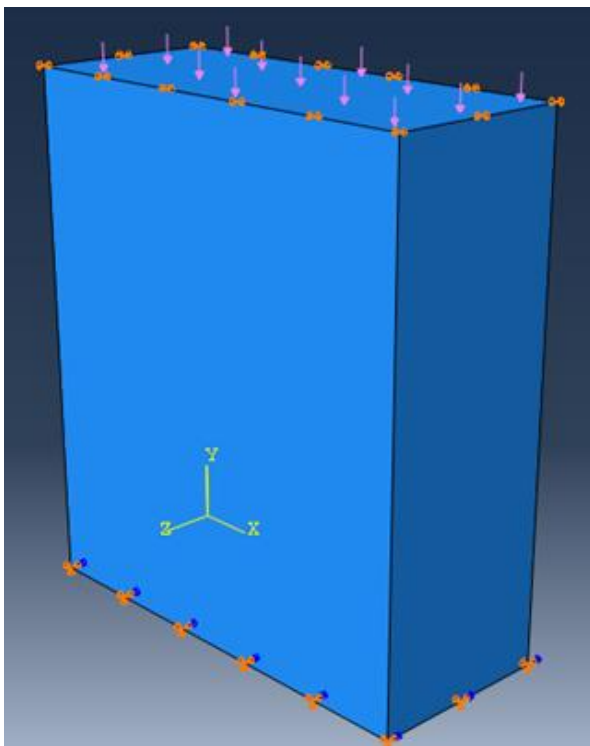
Fonte: Santos (2017).

5.2.2 Condições de contorno e carregamento

O carregamento é aquele que determina os principais esforços que surgem ao longo da estrutura do modelo. As condições de contorno são parte fundamental na simulação, pois são responsáveis por representar como a interação do elemento se desenvolve com o meio externo (JANUZZI, CRISTELI, *et al.*, 2014).

As condições de contorno utilizadas para análise dos prismas foram realizadas a fim de se conciliar as mesmas condições experimentais, ou seja, a extremidade superior do prisma move-se na direção de carregamento, enquanto a extremidade inferior é limitada em relação a todos os graus de liberdade, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 - Condições de contorno e aplicação do carregamento



Fonte: A autora (2018).

Para reproduzir as mesmas condições mecânicas do ensaio à compressão, foi aplicada uma tensão uniformemente distribuída no topo do prisma em Y, representando o carregamento do prisma.

5.2.3 Modelagem constitutiva

De acordo com o modelo constitutivo adotado, é realizado o levantamento das características a serem consideradas de modo que melhor representem o modelo real. Para tal, as seguintes propriedades foram consideradas:

- módulo de elasticidade;
- coeficiente de Poisson;
- resistência à compressão;
- dano devido à compressão;
- resistência à tração;
- dano devido à tração.

Modelo de plasticidade de dano

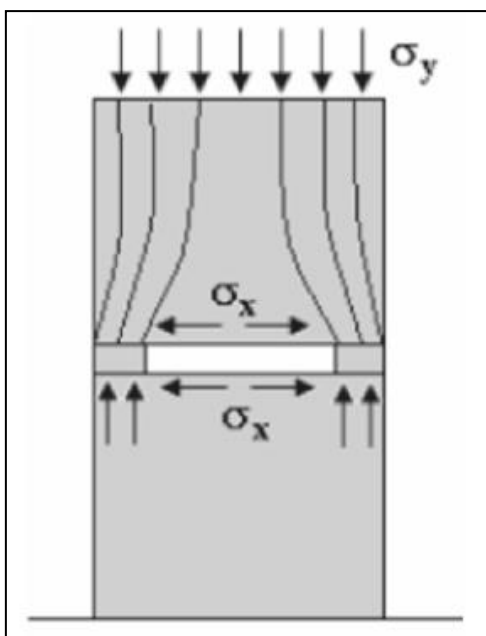
Para simular o comportamento dos prismas, o modelo de Plasticidade por Dano de Concreto (*Concrete Damage Plasticity – CDP*) do ABAQUS foi aplicado. Os dois principais mecanismos de falha que são fissuras por tração e compressão do concreto são assumidos, utilizando conceitos de dano isotrópico em combinação com plasticidade de tração e compressão isotrópica para representar o comportamento inelástico do concreto.

O fato dos resultados experimentais mostrarem que a alvenaria exibe uma relação de ortotropia moderada sob estados de estresse biaxial na região de compressão não pode ser levado em consideração quando um modelo isotrópico é utilizado. Entretanto, é comumente aceito, na literatura a utilização de modelos isotrópicos (como a abordagem de fissuras da alvenaria) após uma adaptação dos parâmetros para ajustar um comportamento médio entre compressão vertical e horizontal (CHOUDHURY, MILANI e KAUSHIK, 2015).

Estudos realizados sugerem que o mecanismo de ruptura na alvenaria ocorra devido ao surgimento de um estado biaxial tração e compressão, por consequência da pouca rigidez da argamassa. Conforme ilustrado na Figura 29, a expansão lateral da argamassa leva a tensões laterais de tração no

bloco, resultando em rachaduras verticais iniciais dos blocos próximos à interface bloco-argamassa ocorrendo o surgimento de micro fissuras ao longo de toda extensão dos prismas (SANTOS, *et al.*, 2017).

Figura 29 - Mecanismo de ruptura em prismas



Fonte: Santos, *et al.* (2017).

O modelo CDP tem a capacidade geral de modelar materiais com comportamento semi-frágil, como o concreto e a alvenaria, demonstrando através das modelagens os seus dois principais mecanismos de falha. Estas propriedades mecânicas podem ser implementadas no modelo através de leis constitutivas (OBAIDAT, EL EZZ e GALAL, 2017).

As leis constitutivas são definidas com base nos parâmetros do material e, para materiais frágeis, devem ser descritas para tração e compressão separadamente, visto que se comportam de forma diferente quando estão submetidos a estes esforços.

Além disso, quando se utiliza modelos de dano, é necessário também adotar leis para prever a evolução do dano. Dessa forma, nesse trabalho, foram adotados:

a) Parâmetros do material

Para o desenvolvimento do estudo numérico, foram realizadas investigações sobre os parâmetros utilizados para obter um modelo numérico que represente os tipos de materiais que foram desenvolvidos neste trabalho.

O modelo de dano plástico requer os parâmetros da plasticidade do dano do concreto e os valores do módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de Poisson.

Alguns parâmetros numéricos do dano utilizados são necessários para modelagem da alvenaria estrutural. Entre esses parâmetros, citam-se: o ângulo de dilatância ($\psi = 36^\circ$), a excentricidade do potencial plástico ($\epsilon = 0,1$), a razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial ($\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$), a razão entre o segundo invariante de tensão do meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão ($K = 0,667$) e o parâmetro de viscosidade que define a regularização visco plástica ($\mu_{vis} = 0,0001$) (OBAIDAT, ABO EL EZZ e GALAL, 2017).

b) Comportamento à compressão

Com o intuito de representar o comportamento à compressão não linear da alvenaria executada com blocos de concreto, e por ausência de uma norma de alvenaria que descreva o comportamento não linear da alvenaria estrutural, adotou-se as relações tensão de compressão *versus* deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1(2004) “Projeto de estruturas em concreto” para realizar as simulações numéricas, dada pela equação (5):

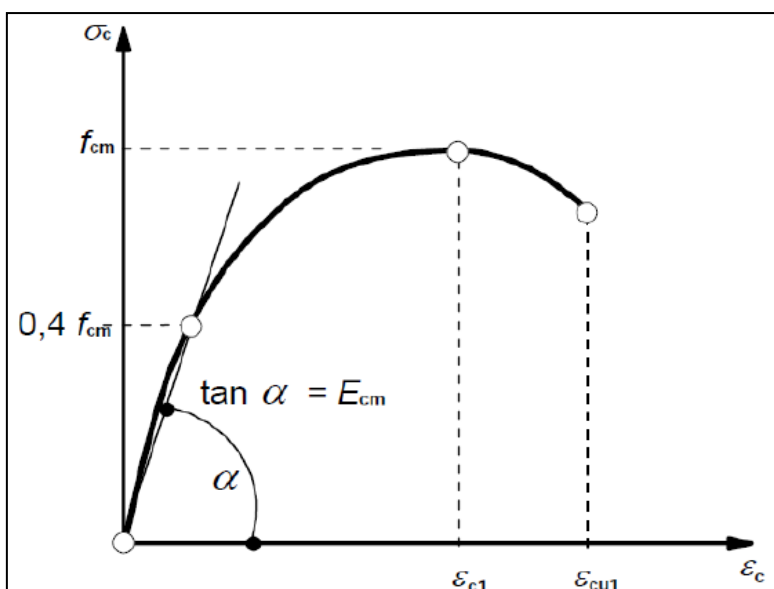
$$\sigma_c = f_{cm} \frac{K\eta - \eta^2}{1+(K-2)\eta} \quad (5)$$

Onde: f_{cm} = resistência média à compressão; $\eta = \epsilon_c/\epsilon_{c1}$; $k = 1,05E_{cm}(\epsilon_{c1}/f_{cm})$; ϵ_c é a deformação do concreto à compressão; ϵ_{c1} e $\epsilon_{cu1} ({}^0/_{00}) = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$ são as deformações do concreto obtidas através de formulações da tabela 3.1

da norma EN 1992-1-1(2004); E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto definido pela tangente à curva da Figura 30. Verificou-se após a realização do estudo numérico que a aplicação da norma referida apresentou boa similaridade com os resultados experimentais.

A Figura 30 apresenta o diagrama sugerido pela norma europeia EN 1992-1-1 (2004) para o concreto submetido à compressão uniaxial. Esse diagrama obedece à Equação 5.

Figura 30 - Curva tensão *versus* deformação proposta pela norma europeia EN 1992-1-1 (2004).

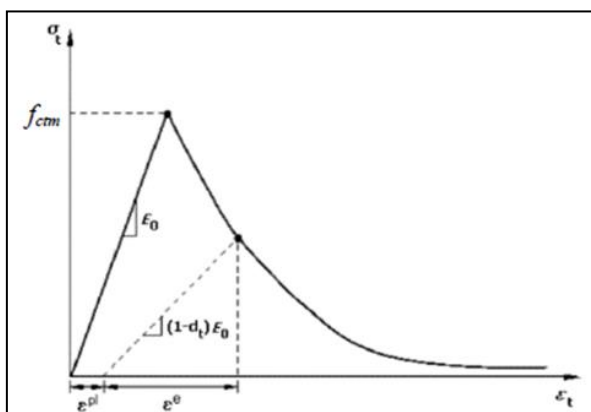


Fonte: EN 1992-1-1 (2004).

c) Comportamento à tração

Outro parâmetro necessário para modelagem no CDP é o comportamento do material quando submetido à tração. Conforme Figura 31, é possível perceber que o comportamento do concreto é elástico-linear até alcançar o valor da resistência média à tração (f_{ctm}), vindo a perder rigidez.

Figura 31 - Curva representativa do concreto tracionado para o modelo numérico

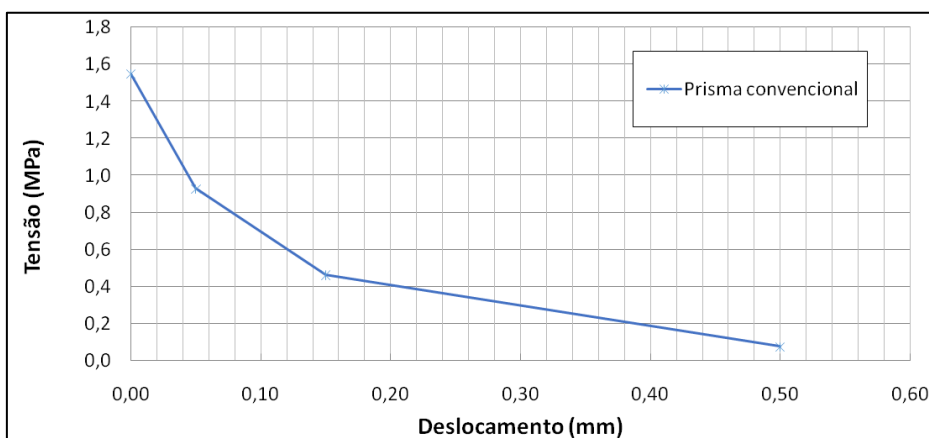


Fonte: Adaptado de Santos (2017).

De acordo com a documentação do ABAQUS, a utilização do gráfico da Figura 31, conduz à resultados mais sensíveis à malha e, por esse motivo, o ABAQUS disponibiliza critérios adicionais para definir o comportamento frágil do concreto após o valor da resistência média à tração (f_{ctm}) (SIMULIA, 2014).

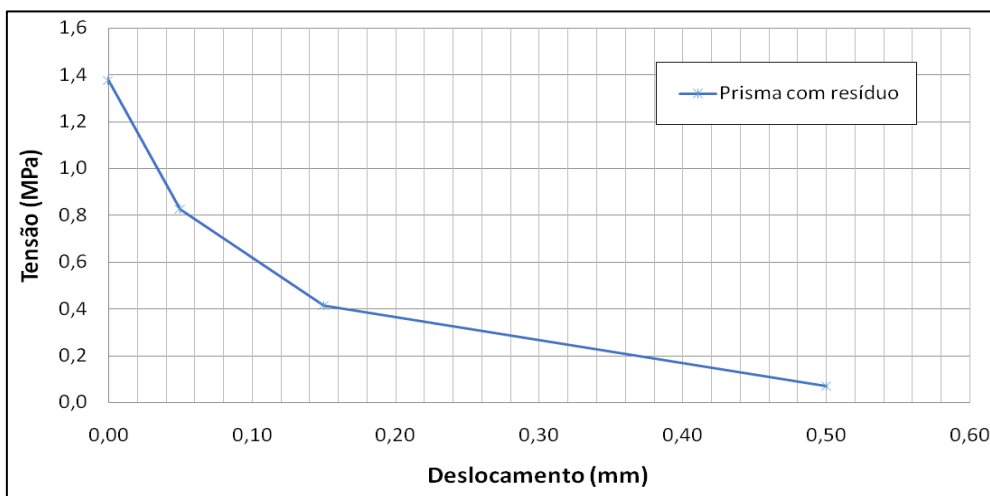
Conforme estudo realizado por Silva (2013), o comportamento frágil do concreto na fase pós-pico, pode ser caracterizado por um diagrama tensão versus deslocamento ao contrário de um diagrama tensão versus deformação. Esse deslocamento é definido pela abertura de fissuras. O diagrama tensão versus deslocamento adotado neste trabalho, para a simulação do concreto tracionado, pode ser observado nas figuras 32 e 33.

Figura 32 - Diagrama tensão versus deslocamento pós-pico admitido para o prisma convencional tracionado



Fonte: A autora (2018).

Figura 33 - Diagrama tensão versus deslocamento pós-pico admitido para o prisma com resíduo tracionado



Fonte: A autora (2018).

Os pontos utilizados nos diagramas acima foram definidos de acordo com o estudo de Silva (2013), conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Pontos utilizados no diagrama tensão versus deslocamento pós-pico

σ_t (Mpa)	u (mm)
f_{ctm}	0,00
$0,6 f_{ctm}$	0,05
$0,3 f_{ctm}$	0,15
$0,05 f_{ctm}$	0,5

Fonte: Silva (2013).

Para realização do cálculo da resistência média à tração (f_{ctm}), foi utilizada a equação 6 da norma EN 1992-1-1(2004).

$$f_{ctm} = 0,3 f_{cm}^{2/3} \quad (6)$$

Onde: f_{cm} = resistência média à compressão

d) Evolução do dano

O modelo de dano com plasticidade permite a inclusão das variáveis de dano no concreto. Essas variáveis são responsáveis pela evolução da degradação da rigidez do material. Como nesse trabalho, considerou-se os prismas como um material homogêneo de concreto, o dano gerado na alvenaria é similar ao dano gerado no concreto (SANTOS, 2017).

A lei de evolução do dano na alvenaria considerada como no concreto submetido à compressão e à tração que é governada por duas variáveis: d_c (dano à compressão uniaxial) e d_t (dano à tração uniaxial), que conforme Cardoso (2014) estão correlacionadas com a deformação do concreto submetido à compressão e deslocamento por abertura de fissura, respectivamente. As variáveis de dano são definidas conforme as equações 7 e 8:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (7)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ct}} \quad (8)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise experimental

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados para a produção dos grautes e prismas, assim como as suas características, obtidas através dos estudos experimentais.

6.1.1 Análise dimensional

Os resultados obtidos na análise dimensional dos blocos, largura (LARG), altura (H) e comprimento (COMP), espessuras das paredes e furos encontram-se nas tabelas 9, 10, 11 e 12. Considera-se que foram realizadas para cada dimensão três determinações em pontos distintos de cada face do total de seis blocos analisados.

Tabela 9 - Análise dimensional dos blocos de concreto

BLOCO	COMP (mm):	H (mm):	LARG (mm):
1	339,00	199,00	138,67
2	340,00	190,00	139,00
3	339,67	192,00	139,33
4	338,67	192,33	137,67
5	339,00	193,67	138,67
6	339,00	193,00	138,00
MÉDIA:	339,22	193,33	138,56
DESV.PADRÃO:	0,46	2,78	0,57

Fonte: A autora (2018).

Tabela 10 - Análise dimensional das espessuras das paredes dos blocos de concreto

BLOCO	ESPESSURA DAS PAREDES		
	LONGITUDINAL (mm):	TRANSVERSAL (mm):	SEPTO (mm):
1	22,52	21,07	20,44
2	22,85	20,60	21,63
3	21,90	20,89	20,46
4	21,29	20,37	20,50
5	22,93	20,47	21,07
6	21,19	20,06	19,65
MÉDIA:	22,11	20,57	20,63
DESV.PADRÃO:	0,70	1,53	0,61

Fonte: A autora (2018).

Tabela 11 - Análise dimensional do diâmetro dos furos dos blocos de concreto

BLOCO	DIMENSÕES DOS FUROS	
	LONGITUDINAL (mm):	TRANSVERSAL (mm):
1	130,13	87,48
2	130,74	86,50
3	130,60	87,28
4	130,93	86,66
5	130,93	84,01
6	130,92	86,15
MÉDIA:	130,71	86,35
DESV.PADRÃO:	0,29	1,14

Fonte: A autora (2018).

Tabela 12 - Análise dimensional da mísula de acomodação

BLOCO	RAIO MÍSULA (mm):
1	31,40
2	32,75
3	31,51
4	30,63
5	32,58
6	30,62
MÉDIA:	31,58
DESV.PADRÃO:	0,84

Fonte: A autora (2018).

A norma NBR 6136 (ABNT, 2016) estabelece que a tolerância quanto às dimensões dos blocos de concreto são de $\pm 2,0$ mm para largura e $\pm 3,0$ mm

para altura e comprimento. De acordo com os resultados é possível observar que os blocos apresentam desvios toleráveis para as dimensões, conforme limites normativos, sendo esses parâmetros inferiores ao especificado pela norma.

6.1.2 Índice de absorção de água dos blocos de concreto

O ensaio para obtenção do índice de absorção de água dos blocos de concreto foi realizado de acordo com as normas NBR 12118 (ABNT, 2013) e NBR 6136 (ABNT, 2016), que consideram que a porcentagem do índice de absorção dos blocos que deve estar abaixo de 9,0% para a média e abaixo de 10% para cada bloco utilizado.

A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para o índice de absorção, d'água considerando o número mínimo de amostras exigida pelas normas.

Tabela 13 - Índice de absorção de água dos blocos

BLOCOS	PESO m_1 ^a g	PESO m_2 ^b g	ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA %
1	5291	5553	5,0
2	5218	5275	1,1
3	5292	5562	5,1
4	5207	5605	7,6
5	5223	5309	1,6
6	5275	5463	3,6
MEDIA	5251	5461	4,0

a Massa do corpo de prova seco em estufa

b Massa do corpo de prova saturado

Fonte: A autora (2018).

É possível verificar que, em nenhum bloco, o resultado de absorção de água ultrapassou o valor estabelecido pela norma, sendo um indicador importante, pois uma grande absorção de água pode interferir no potencial de aderência entre o bloco e a argamassa.

6.1.3 Caracterização dos agregados

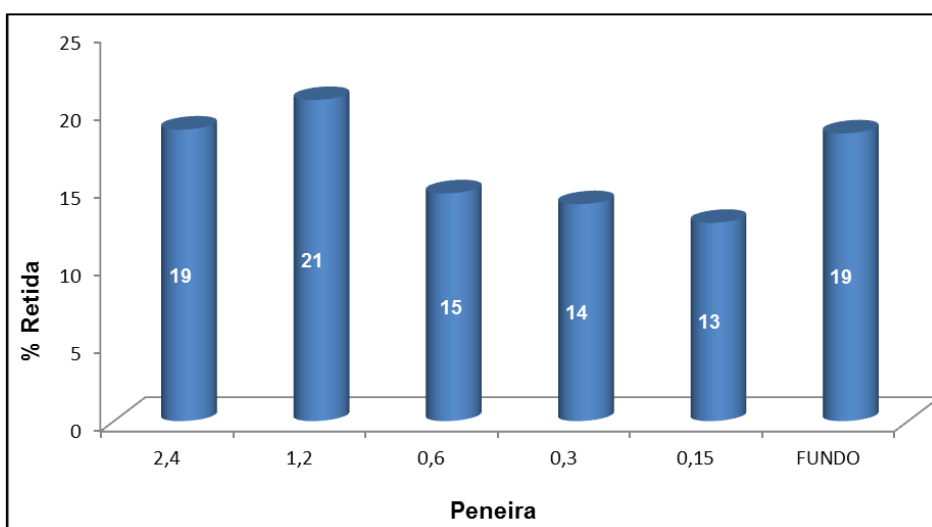
Os resultados da composição granulométrica dos agregados naturais encontram-se nas tabelas 14, 15 e 16, nas figuras 34, 35 e 36 e nos gráficos 1, 2 e 3.

Tabela 14 - Características granulométricas do agregado natural miúdo

PENEIRA #	% RETIDA:	% ACUMULADA
2,4	19	19
1,2	21	40
0,6	15	54
0,3	14	68
0,15	13	81
FUNDO	19	100
Ø MÁXIMO CARACTERÍSTICO		4,8
MÓDULO DE FINURA		2,63

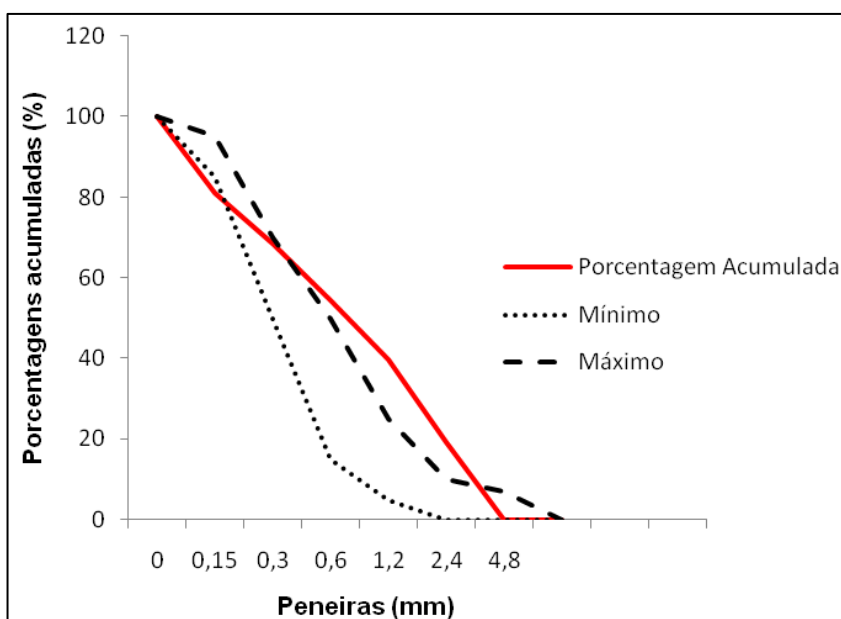
Fonte: A autora (2018).

Figura 34 - Porcentagem retida por peneira do agregado natural miúdo



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado natural miúdo



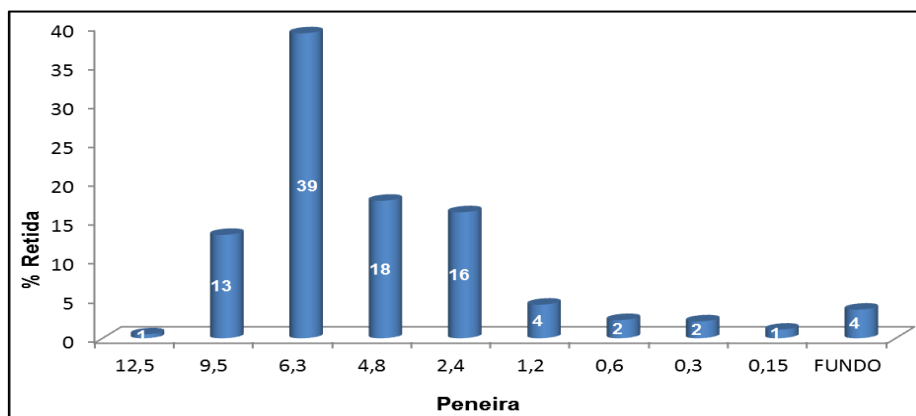
Fonte: A autora (2018).

Tabela 15 - Características granulométricas do agregado natural graúdo

PENEIRA #	% RETIDA:	% ACUMULADA
12,5	1	0
9,5	13	13
6,3	39	52
4,8	18	70
2,4	16	86
1,2	4	90
0,6	2	93
0,3	2	95
0,15	1	96
FUNDO	4	100
Ø MÁXIMO CARACTERÍSTICO		12,5
MÓDULO DE FINURA		5,43

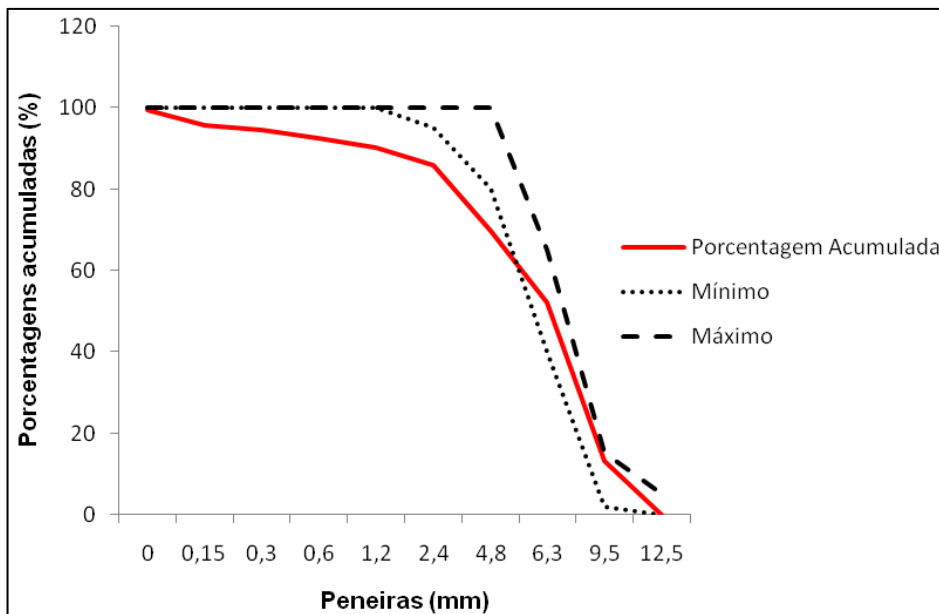
Fonte: A autora (2018).

Figura 35 - Porcentagem retida por peneira do agregado natural graúdo



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado natural graúdo



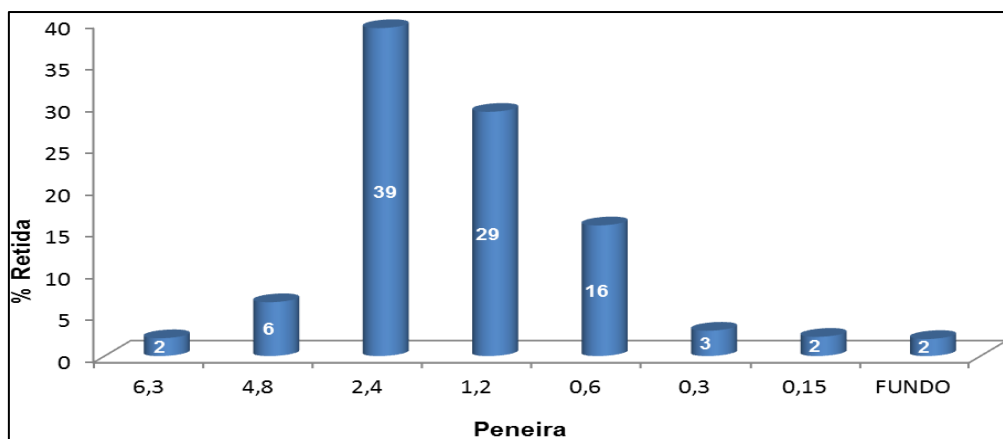
Fonte: A autora (2018).

Tabela 16 - Características granulométricas do resíduo

PENEIRA #	% RETIDA:	% ACUMULADA
6,3	2	2
4,8	6	9
2,4	39	48
1,2	29	77
0,6	16	93
0,3	3	96
0,15	2	98
FUNDO	2	100
Ø MÁXIMO CARACTERÍSTICO		6,3
MÓDULO DE FINURA		4,19

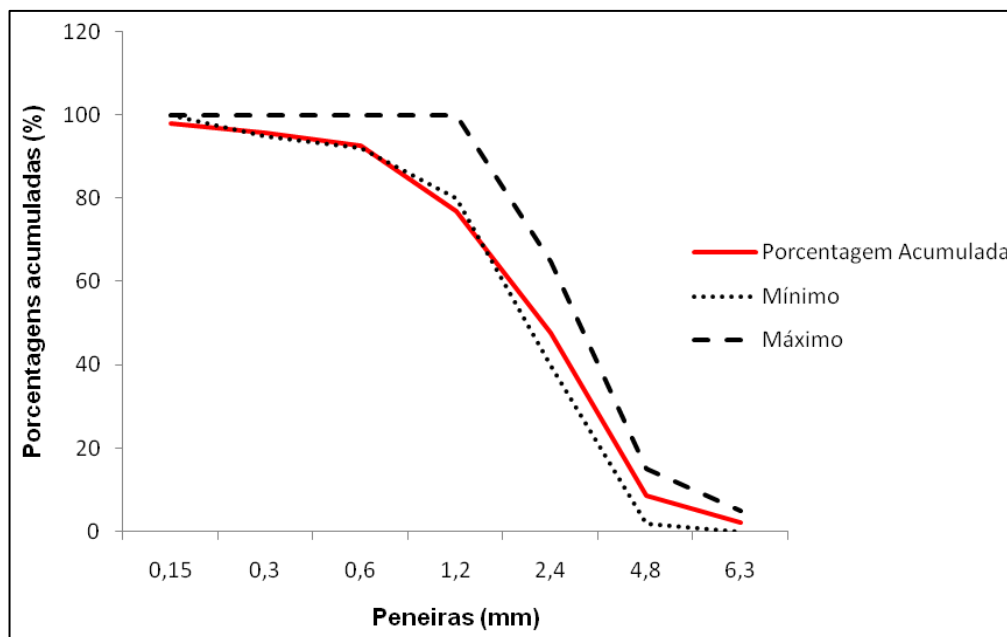
Fonte: A autora (2018).

Figura 36 - Porcentagem retida por peneira do resíduo



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 3 - Curva granulométrica do resíduo



Fonte: A autora (2018).

De acordo com os resultados apresentados, verifica-se que:

- a maior parte do resíduo possui granulometria menor que 4,8mm e a maioria é composta pelo diâmetro de 2,4 mm;
- o módulo de finura e diâmetro máximo característico do resíduo se encontra entre as características granulométricas dos dois tipos de agregados naturais, que podem ser observados nos gráficos 1, 2 e 3.

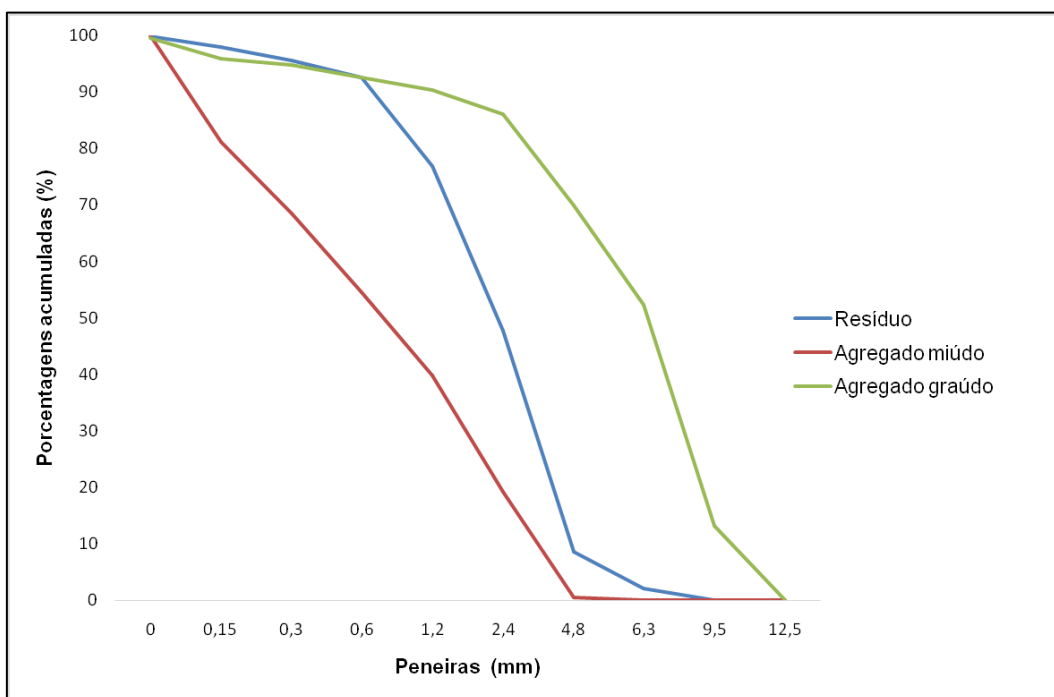
Os ensaios para determinar a curva granulométrica são extremamente importantes para a tomada de decisão sobre a porcentagem e o tipo de substituição do agregado natural pelo resíduo. Além disso, somente com esses resultados é possível dar início as definições e preparações dos traços de graute, para posterior moldagem e rompimento de corpos de prova a fim de verificar a resistência à compressão.

Nos traços analisados de graute com resíduo, conforme apresentado no item Materiais e métodos, foi considerada a substituição integral do agregado natural miúdo pelo resíduo. Entretanto, sabe-se que quanto maior o módulo de finura de um agregado que será utilizado em concreto, maior é o número de

grãos por unidade de volume de suas partículas, aumentando a área de superfície destes, por consequência, a necessidade de água para envolver os grãos.

Diante dos resultados obtidos na caracterização dos agregados naturais e do resíduo, verificou-se que o resíduo apresentou composição granulométrica que se enquadra entre os agregados naturais miúdos e graúdos, conforme ilustra a figura 37. Entretanto, é possível concluir que o resíduo apresentou módulo de finura (4,19) mais próximo do agregado graúdo (5,43).

Figura 37 - Comparação entre a curva granulométrica dos agregados naturais e do resíduo



Fonte: A autora (2018).

6.1.4 Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova do graute

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova dos grautes foi realizada conforme as recomendações da norma NBR 5739 “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 2007).

Foram executados seis corpos de prova para cada um dos quatro traços analisados.

O traço 1, denominado traço piloto, foi confeccionado com agregados naturais e fator água/cimento (a/c) igual a 0,76. Porém, este traço não obteve a consistência compatível para realização do preenchimento dos prismas de bloco de concreto.

Com o intuito de alcançar a consistência desejada, foram adicionados 190ml de água no traço piloto (denominado traço 2). O traço 3 foi confeccionado com a substituição integral do agregado graúdo pelo resíduo e relação a/c igual a 0,95. Quanto ao traço 4, foi substituído 100% do agregado miúdo pelo resíduo, com a/c = 0,95 – Tabela 17.

Os dados obtidos através do rompimento dos corpos de prova cilíndricos, aos 28 dias, tiveram a resistência à compressão aproximada à resistência dos blocos de concreto, conforme será apresentado no item 6.1.6. A média das resistências à compressão obtida em cada traço analisado, dos seis corpos de provas ensaiados, encontra-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Resistência média à compressão dos traços de graute

TRAÇO	CIMENTO (Kg)	AGREGADO MIÚDO (Kg)	AGREGADO GRAÚDO (Kg)	RESÍDUO (Kg)	FATOR a/c	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
2	1	2,2	2,4	-	0,95	9,7
3	1	2,2	-	2,4	0,95	11,5
4	1	-	2,4	2,2	0,95	12,5

Fonte: A autora (2018).

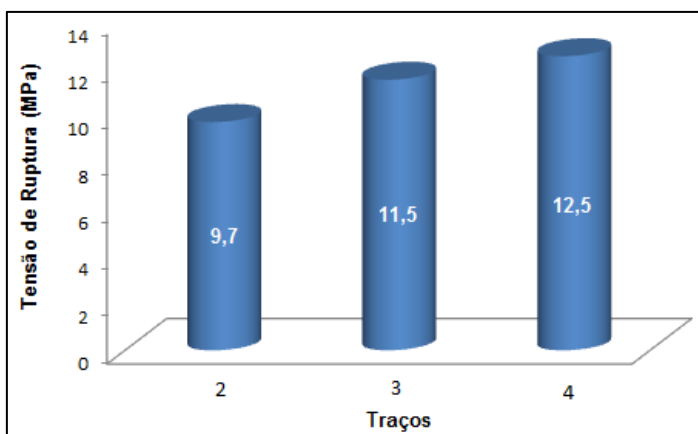
Após analisar os resultados comparativos entre os ensaios de caracterização física dos agregados, e levando-se em consideração o objetivo do trabalho que é a produção de um graute que possua características de fluidez e plasticidade aceitáveis, considerou-se a substituição do agregado natural graúdo pelo resíduo da fabricação dos blocos de concreto estruturais, devido a maior semelhança do resíduo com o agregado graúdo. Com base nas análises dos

resultados dos traços obtidos e nas considerações descritas acima, o traço 3 foi adotado para ser utilizado na presente pesquisa para o preenchimento dos prismas.

Apesar do traço 4 apresentar maior resistência média à compressão, de 12,5 MPa, a fluidez e a plasticidade não foram compatíveis com as exigidas para graute utilizado no preenchimento de blocos para alvenaria estrutural. A fluidez e plasticidade incompatíveis com o recomendado podem aumentar o número de vazios e, conseqüentemente, diminuir a aderência entre bloco e argamassa, o que ocasiona a redução da resistência à compressão da alvenaria. Tais fatos, além dos demais descritos anteriormente, contribuíram para a adoção do traço 3, apesar de ter apresentado resistência média à compressão inferior à 15 MPa.

A figura 38 apresenta os resultados da tensão média de ruptura à compressão de cada traço de graute analisado.

Figura 38- Tensão média de ruptura dos traços de graute analisados



Fonte: A autora (2018).

Após análise dos valores das resistências à compressão axial dos grautes apresentados na Tabela 17 e na figura 38, é possível afirmar que o graute com a substituição tanto do agregado graúdo, quanto do agregado miúdo pelo resíduo apresentaram maior resistência à compressão quando comparados ao graute confeccionado com agregado natural (convencional).

6.1.5 Determinação da resistência à compressão e à tração por flexão da argamassa

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão e à tração da argamassa foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 13279 “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão” (ABNT, 2005), sendo executados nove corpos de prova com o traço apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Traço da argamassa de assentamento utilizada na execução dos prismas

CIMENTO (Kg)	CAL (Kg)	AREIA (Kg)	ÁGUA (l)
1	1	6	1,5

Fonte: A autora (2018).

Para o cálculo das resistências à tração por flexão e à compressão, a norma NBR 13279 (ABNT, 2005) adota as equações 9 e 10, respectivamente.

Cálculo da resistência à tração na flexão:

$$R_t = \frac{1,5 \times F_y \times L}{40^3} \quad (9)$$

Onde:

- R_t é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- F_y é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;
- L é a distância entre os suportes, em mm.

Cálculo da resistência à compressão:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (10)$$

Onde:

- R_c é a resistência à compressão, em MPa;
- F_c é a carga máxima aplicada, em N;
- 1600 é a área da seção transversal do corpo de prova prismático, em mm².

A resistência média à tração e compressão dos corpos de prova podem ser visualizados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resistência à tração por flexão e compressão da argamassa

CP	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
1	1,9	5,1
2	1,6	5,3
3	2,0	5,3
4	1,9	5,4
5	2,0	5,0
6	1,8	5,0
7	1,9	5,1
8	2,1	4,9
9	1,7	5,1
MÉDIA:	1,9	5,1

Fonte: A autora (2018).

De acordo com Ramalho e Corrêa (2008), a resistência da argamassa é importante apenas quando inferior a 30% ou 40% da resistência do bloco. Os autores citam que argamassas com resistência de até 50% da resistência do bloco dificilmente afetam a resistência dos prismas.

6.1.6 Determinação da resistência característica à compressão do bloco

A determinação da resistência característica à compressão dos blocos foi realizada conforme as recomendações da norma NBR 6136 (ABNT, 2016).

Foram ensaiados seis blocos, sendo esta quantidade a mínima estabelecida pela norma para lotes de até 5.000 blocos, onde os resultados da resistência à compressão podem ser visualizados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resistência à compressão dos blocos de concreto

BLOCO	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
1	10,0
2	9,7
3	12,1
4	9,2
5	10,1
6	8,8
MÉDIA:	10,0

Fonte: A autora (2018).

A resistência característica à compressão foi calculada, considerando o método no qual não se conhece o desvio-padrão da fábrica, através da Equação 11:

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{bi} \quad (11)$$

Onde:

- $f_{bk,est}$ é a resistência característica estimada da amostra, em MPa;
- $f_{b1}, f_{b2}, \dots, f_{bi}$ são os valores da resistência à compressão individuais dos corpos de prova da amostra, ordenados crescentemente, em MPa;
- i é igual a quantidade de blocos da amostra dividido por dois.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) ressalta que o valor obtido para o $f_{bk,est}$ não deve ser menor que $\Psi \cdot f_{b1}$. O valor de Ψ utilizado foi igual a 0,89 pois está em função da quantidade de blocos da amostra, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Valores de Ψ em função 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: NBR 6136 (ABNT, 2016).

Aplicando a Equação 11, obteve-se uma resistência característica à compressão dos blocos igual a 8,3 MPa, superior à resistência de 4,5 Mpa definida para blocos com função estrutural conforme pode ser visto Tabela 21.

Tabela 21 - Resistência característica à compressão dos blocos

BLOCOS	f_{bi} (MPa)	$f_{bk,est}$ (MPa)	$\psi \cdot f_{b1}$ (MPa)	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (MPa)
1	8,8			
2	9,2			
3	9,7			
4	10,0	8,3	7,8	8,3
5	10,1			
6	12,1			

Fonte: A autora (2018).

6.1.7 Determinação da resistência à compressão dos prismas

Para determinar a resistência à compressão dos prismas, foram confeccionados 30 (trinta) prismas, sendo 15 (quinze) preenchidos com o graute convencional e 15 (quinze) com o graute produzido com resíduo.

Conforme considerado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova do graute, o traço definido para o preenchimento dos alvéolos dos prismas foi com 100% de resíduo em substituição ao agregado graúdo. Os resultados dos ensaios são apresentados na tabela 22.

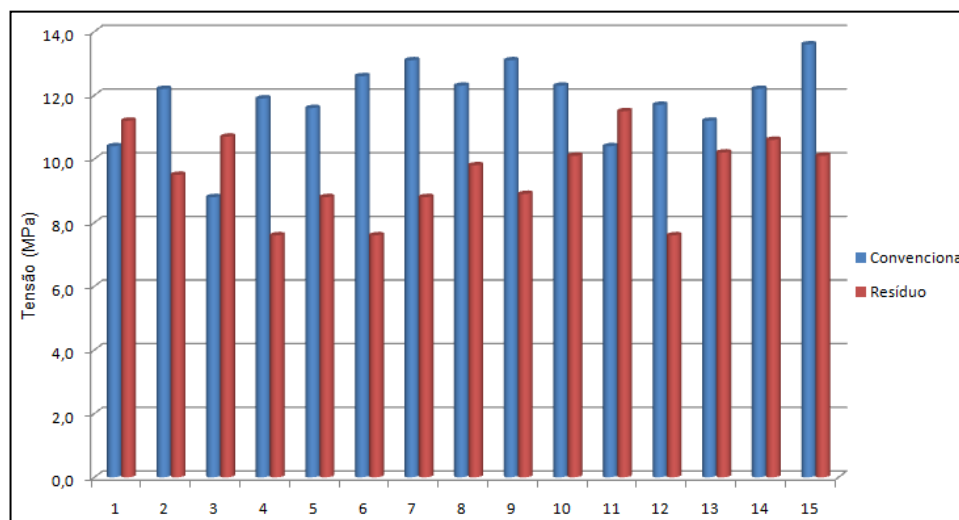
Tabela 22 - Resistência à compressão dos prismas preenchidos com graute convencional e graute com resíduo

PRISMA CONVENCIONAL		TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	PRISMA COM RESÍDUO		TENSÃO DE RUPTURA (MPa)
1		10,4	1		11,2
2		12,2	2		9,5
3		8,8	3		10,7
4		11,9	4		7,6
5		11,6	5		8,8
6		12,6	6		7,6
7		13,1	7		8,8
8		12,3	8		9,8
9		13,1	9		8,9
10		12,3	10		10,1
11		10,4	11		11,5
12		11,7	12		7,6
13		11,2	13		10,2
14		12,2	14		10,6
15		13,6	15		10,1
MÉDIA: 11,7 (MPa)			MÉDIA: 9,5 (MPa)		

Fonte: A autora (2018).

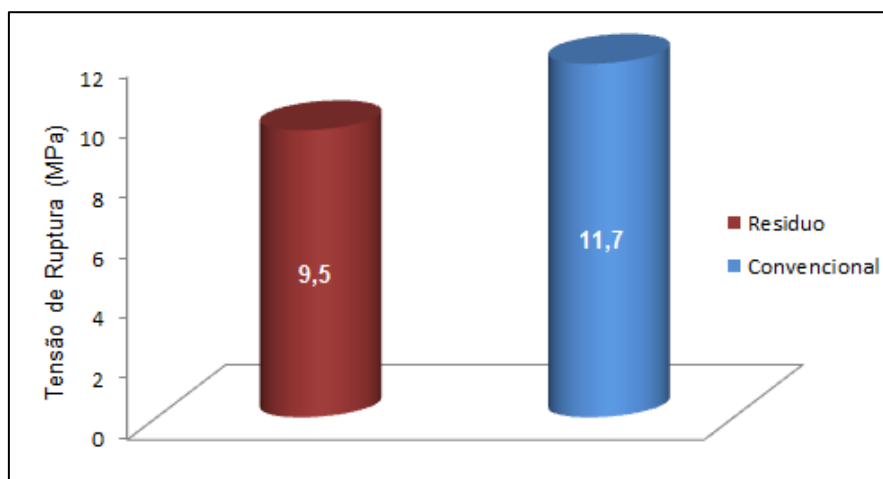
Com base nos valores das resistências à compressão axial dos prismas, pode-se dizer que, houve uma redução média da resistência mecânica à compressão de (20%) do prisma com resíduo em relação ao prisma preenchido com graute convencional, conforme pode ser observado na Figura 39 e 40.

Figura 39 - Comparativo resistência à compressão dos prismas com graute convencional e prismas com graute com resíduo



Fonte: A autora (2018).

Figura 40 - Resistência média à compressão dos prismas



Fonte: A autora (2018).

De acordo com os resultados obtidos nos testes experimentais de resistência à compressão do graute, esperava-se que os prismas confeccionados com a substituição do agregado graúdo pelo resíduo apresentassem melhor desempenho mecânico, mas verificou-se uma variação nos resultados. Acredita-se que este efeito tenha ocorrido por consequência da perda de água para os blocos e argamassa, podendo influenciar no fator a/c do graute, conforme observa-se na Figura 41.

Além disso, conforme dito anteriormente, sabe-se que quanto maior o módulo de finura de um agregado, maior é o número de grãos por unidade de volume de suas partículas, aumentando a área de superfície destes, por consequência, a necessidade de água para envolver os grãos. Isto é, a composição granulométrica tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. A realização da substituição do agregado graúdo que possui o módulo de finura maior que o agregado miúdo, que por sua vez é diferente do módulo de finura do resíduo, conforme caracterização granulométrica, pode ter influenciado na queda do desempenho mecânico dos prismas confeccionados com graute com resíduo.

Figura 41 - Absorção da água do graute pelo prisma

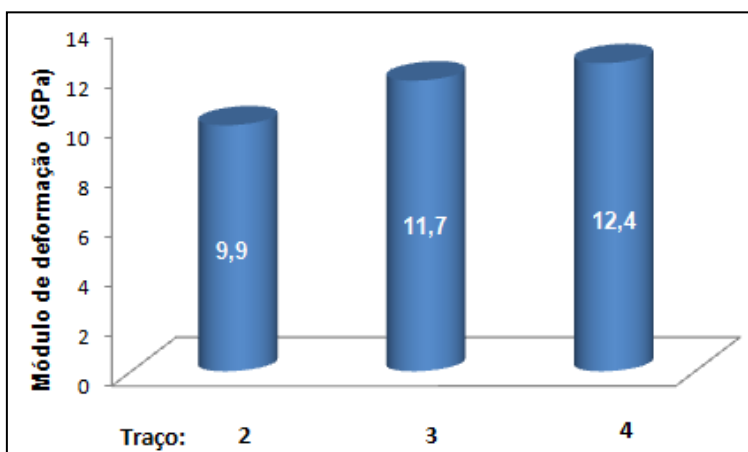


Fonte: A autora (2018).

6.1.8 Módulo de deformação do graute

Os valores para o módulo de deformação de cada traço foram obtidos através da média dos módulos dos corpos de prova cilíndricos. Os valores médios para os traços estão demonstrados no Gráfico 4. Os traços 3 e 4 que foram confeccionados com a substituição do agregado natural pelo resíduo obtiveram módulo superior ao traço convencional (traço 2).

Gráfico 4 – Média do módulo de deformação do graute



Fonte: A autora (2018).

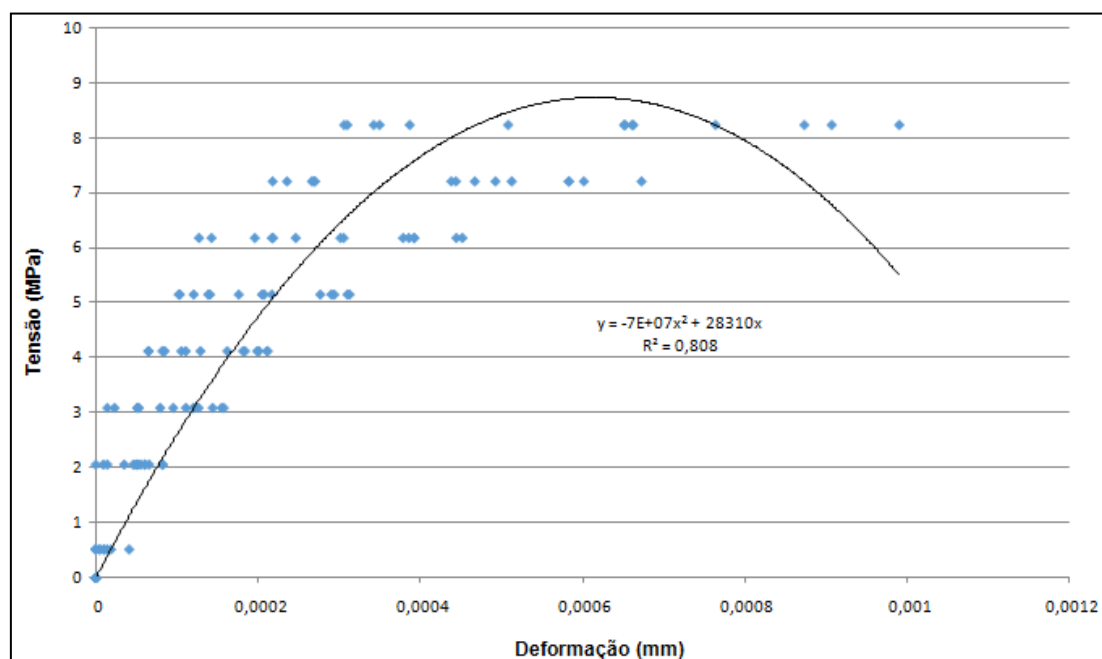
6.1.9 Módulo de deformação dos prismas

O valor do módulo de deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute convencional e com resíduo foram de 24,9 GPa e 11,6 GPa respectivamente. Na ausência de uma norma específica para determinar o módulo de deformação da alvenaria estrutural, adota-se a NBR 8522 (ABNT, 2008) que descreve o método de obtenção do módulo de deformação tangencial inicial, caracterizando a deformabilidade do concreto submetido às tensões entre 0,5 MPa e 30% da tensão característica de ruptura.

Os dados de alguns prismas foram descartados devido a dispersão entre os resultados. Foram realizadas análises para definir quais pontos seriam descartados com base em conceitos da estatística: desvios estatísticos e dispersão.

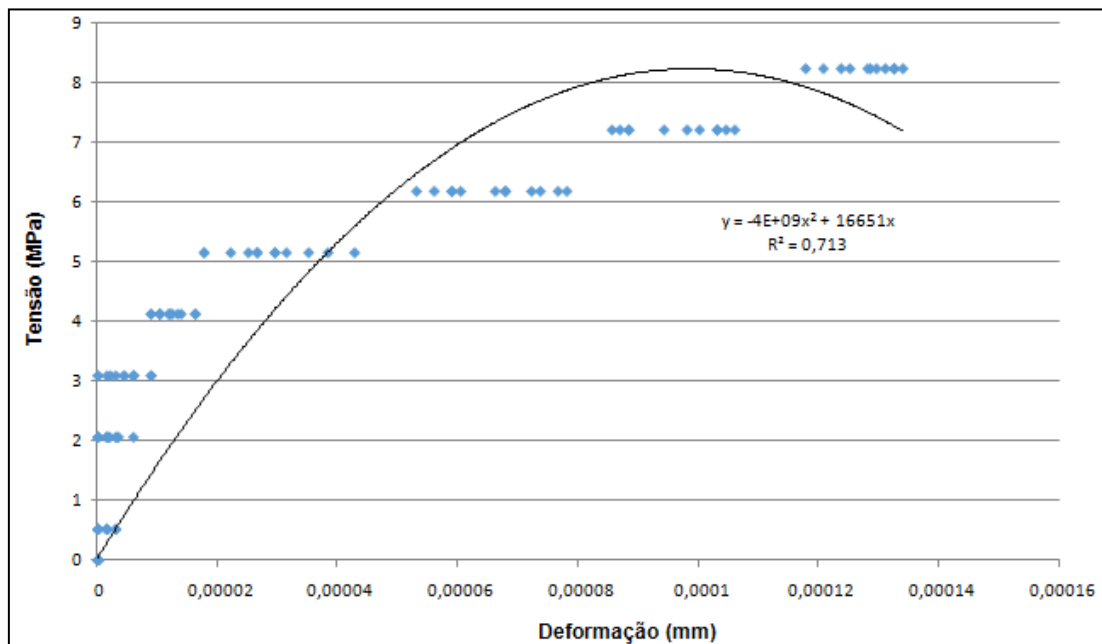
Nos gráficos 4, 5, 6 e 7 apresentam-se as curvas tensão x deformação dos prismas confeccionados com graute convencionais e com resíduo após realização das análises estatísticas dos resultados obtidos experimentalmente.

Gráfico 4 – Gráfico tensão x deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute convencional



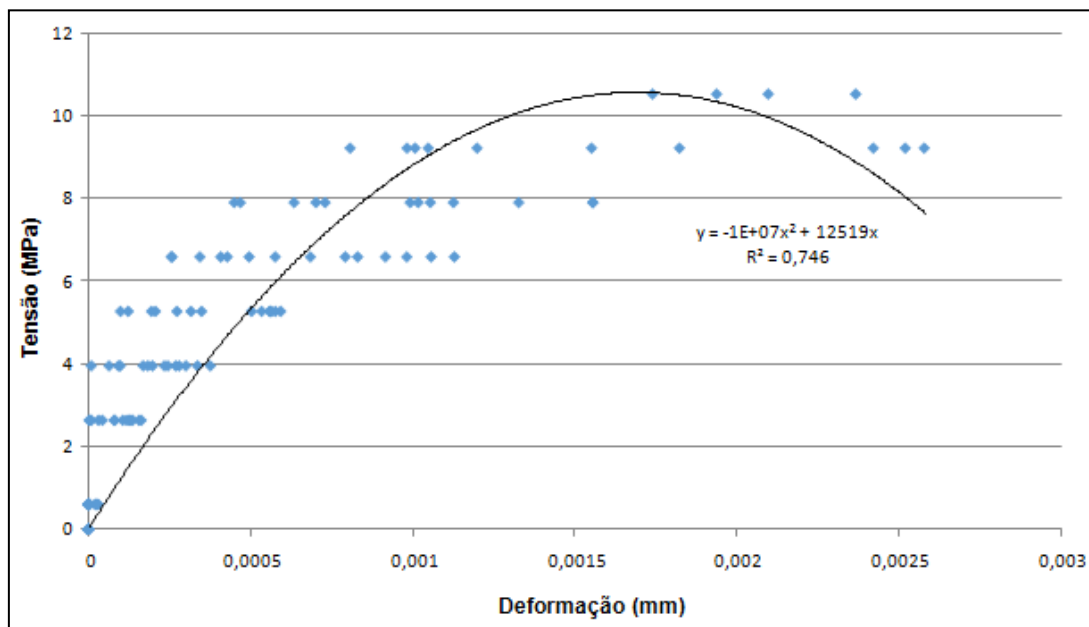
Fonte: A autora (2018).

Gráfico 5 – Gráfico tensão x deformação transversal dos prismas confeccionados com graute convencional



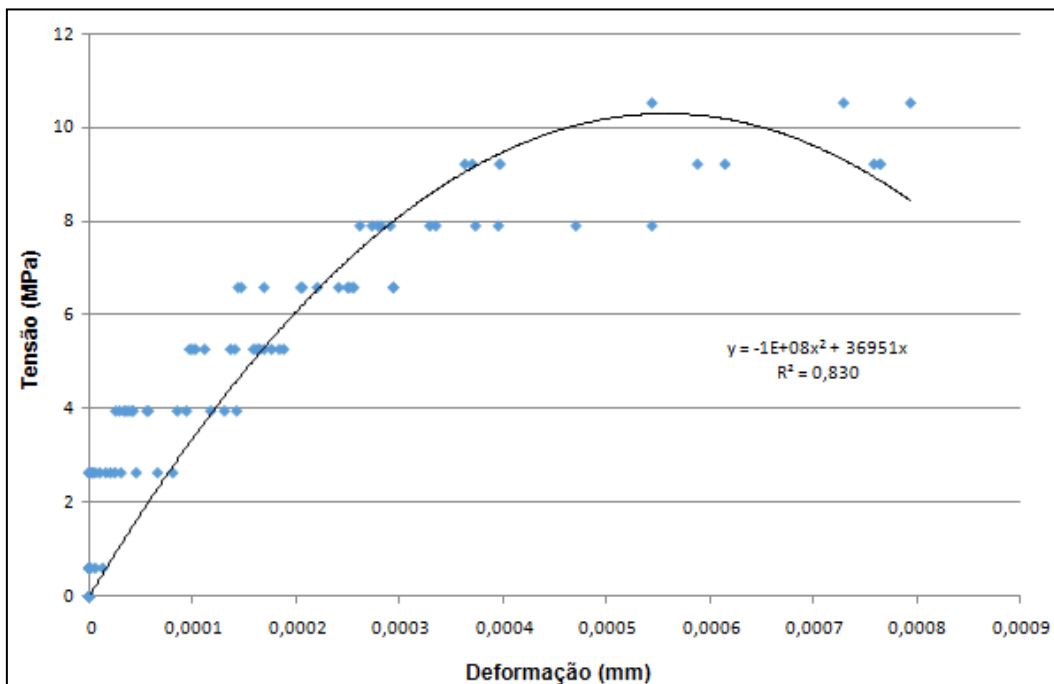
Fonte: A autora (2018).

Gráfico 6 – Gráfico tensão x deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute com resíduo



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 7 - Gráfico tensão x deformação transversal dos prismas confeccionados com graute com resíduo



Fonte: A autora (2018).

A norma NBR 8522 (ABNT, 2008) define o módulo de deformação, em GPa, pela equação 12:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Onde:

σ_b – tensão maior, em MPa ($\sigma_b = 0,3.f_c$);

σ_a – tensão básica, em MPa ($\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$);

ε_b – deformação específica média dos corpos-de-prova submetidos à tensão maior;

ε_a – deformação específica dos corpos-de-prova ensaiados submetidos à tensão básica.

Verifica-se, a partir dos gráficos, que os prismas confeccionados com graute convencional apresentaram maior fragilidade, fato que é justificado por um módulo de elasticidade elevado (25 GPa). Já as amostras dos prismas com graute com resíduo apresentaram maiores deformações. Tais fatos podem ser observados nos gráficos das linhas de tendência tensão x deformação de compressão.

A partir das curvas ilustradas nos gráficos 5 e 7, observa-se que, para um nível de deformação de compressão de aproximadamente 0,001, os prismas com graute com resíduo apresentaram tensão média de aproximadamente 9 MPa – os valores apresentados no gráfico 7 ilustram o fim do comportamento linear das amostras. Entretanto, para o mesmo nível de deformação de 0,001, os valores apresentados na curva do gráfico 5 mostram fim da capacidade resistente dos prismas confeccionados com graute convencional. Portanto, os prismas com graute convencional mostraram-se mais frágeis se comparados com os prismas confeccionados com graute com resíduo – amostras com menor módulo de deformação.

6.1.10 Coeficiente de Poisson

Com os resultados das deformações transversais e longitudinais determinou-se o coeficiente de Poisson, seguindo a Equação 13. O valor médio do coeficiente de Poisson tanto dos prismas convencionais quanto dos prismas com resíduo foi de 0,2.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{transv}}{\varepsilon_{long}} \quad (13)$$

Onde:

μ – coeficiente de Poisson;

ε_{transv} – deformação transversal do prisma;

ε_{long} – deformação longitudinal do prisma;

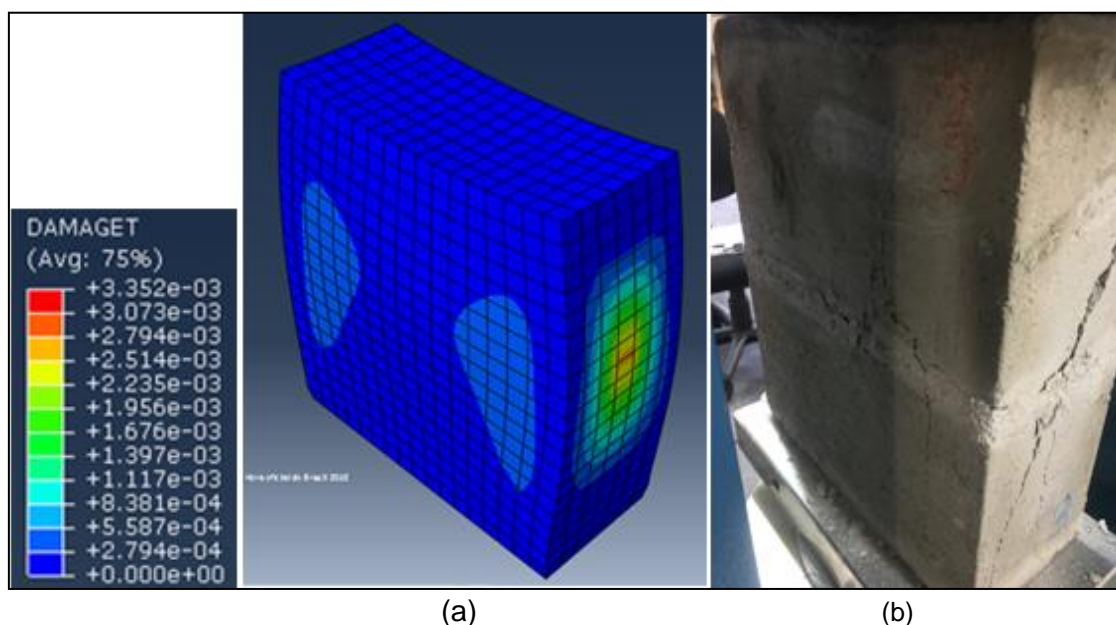
6.2 Estudo numérico

Para a obtenção dos resultados dos modelos numéricos dos prismas confeccionados com graute convencional e com resíduo, foi necessário realizar uma análise quanto a sua degradação e perda de rigidez.

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das modelagens numéricas e a comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Verificam-se, também, o valor do dano à compressão e/ou à tração conforme o número de incrementos analisados, a fim de comparar com o modo de ruptura dos prismas observado durante os testes experimentais.

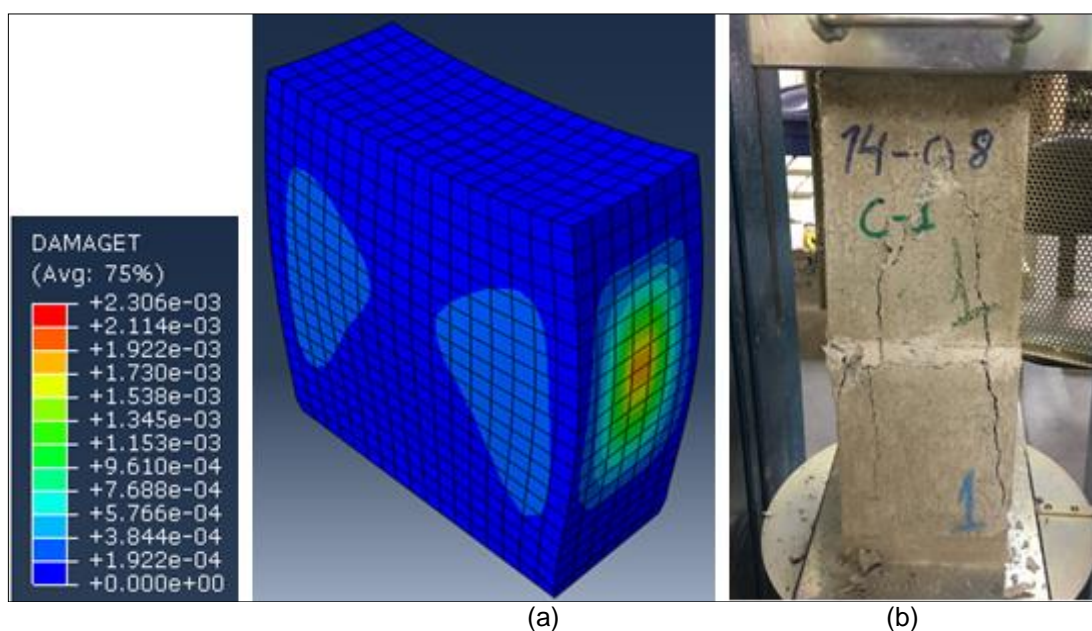
Foi possível verificar de forma clara que o colapso da estrutura se deu pelos esforços de tração no bloco ocasionados pelo esmagamento da argamassa conforme pode ser observado nas comparações entre os resultados numérico e experimental ilustrados na Figura 42 e 43.

Figura 42 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute convencional: (a) simulação numérica; (b) teste experimental



Fonte: A autora (2018).

Figura 43 - Modo de ruptura dos prismas confeccionados com graute com resíduo: (a) simulação numérica; (b) teste experimental



Fonte: A autora (2018).

Nota-se através dos resultados apresentados na Tabela 23 que os modelos numéricos dos prismas representaram bem o comportamento mecânico obtido experimentalmente, com relação a tensão de ruptura e deformação.

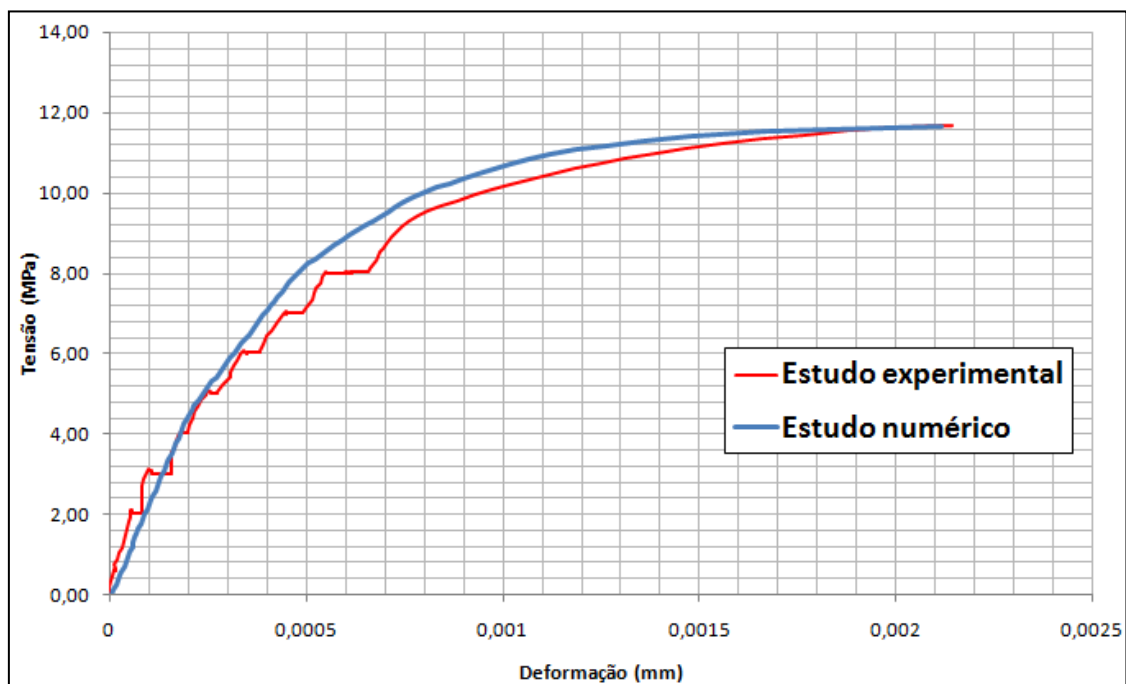
Tabela 23 - Tensão de ruptura obtida no estudo experimental e numérico

PRISMA:		TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)
CONVENCIONAL	EXPERIMENTAL	11,7	0,0021430
	NUMÉRICO	11,65	0,0021145
RESÍDUO	EXPERIMENTAL	9,5	0,0020380
	NUMÉRICO	9,5	0,0020761

Fonte: A autora (2018).

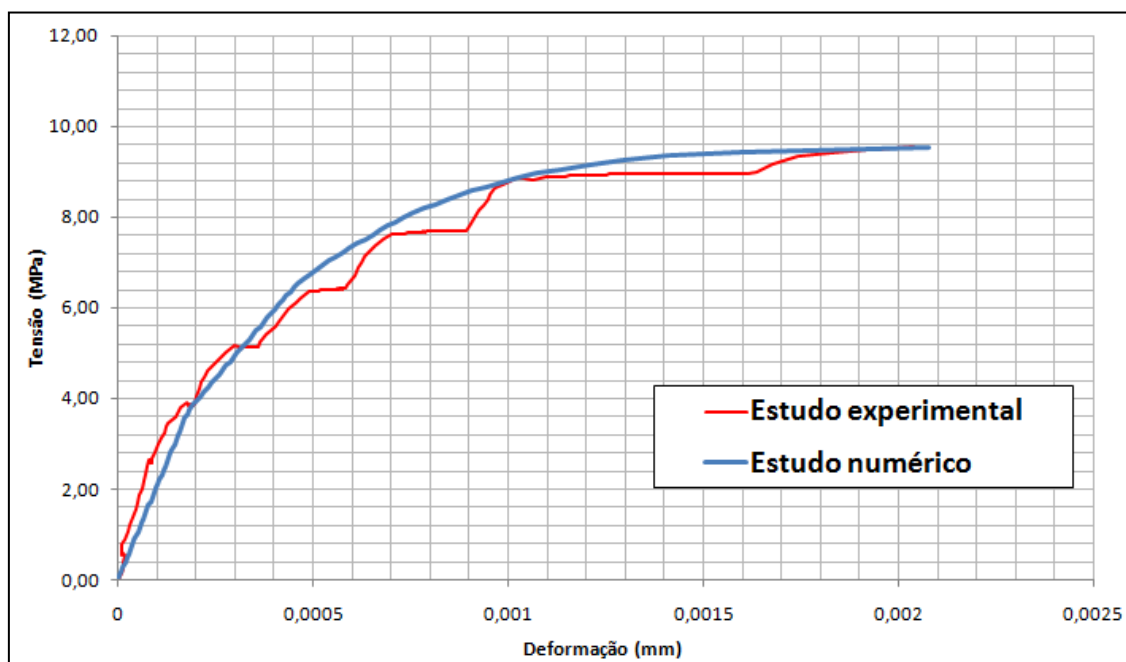
Nos gráficos 8 e 9, são apresentadas as curvas tensão x deformação do modelo numérico para os dois tipos de prismas analisados. Ambos os resultados são comparados com os obtidos experimentalmente.

Gráfico 8 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute convencional



Fonte: A autora (2018).

Gráfico 9 - Curvas tensão x deformação obtidas no estudo experimental e simulação numérica dos prismas confeccionados com graute com resíduo



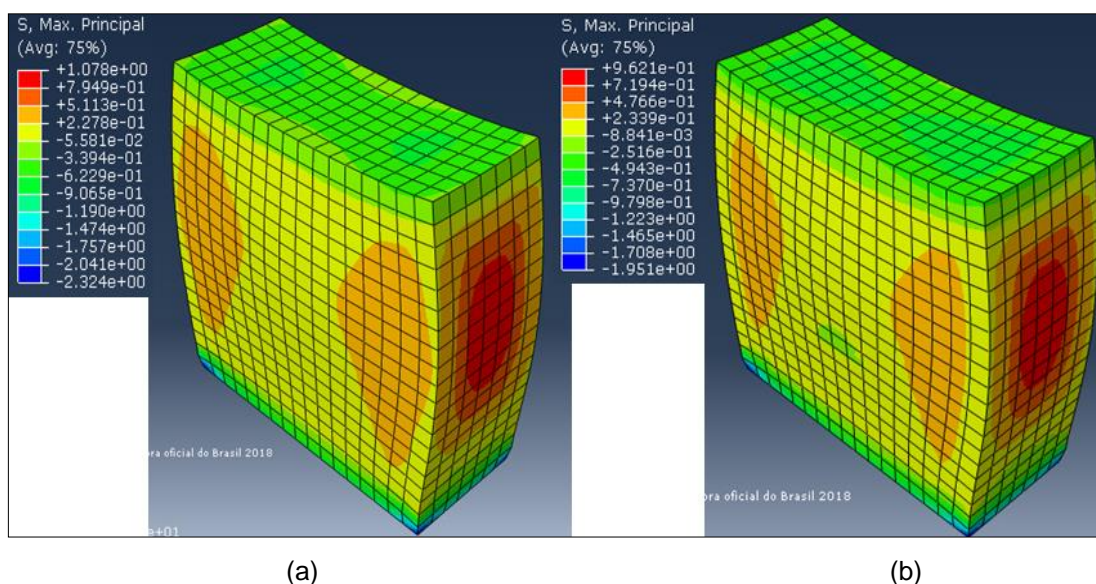
Fonte: A autora (2018).

Baseado nos resultados apresentados nos gráficos acima, é possível perceber que os dois tipos de prisma apresentaram comportamento não linear. Os dados obtidos na análise numérica mostraram-se adequados a esse comportamento. Pode-se constatar que houve um bom ajuste da curva numérica à curva experimental para os dois modelos.

Na Figura 44 é possível verificar as distribuições e acúmulo de tensões máximas nos prismas submetidos a esforços de compressão uniaxial, obtidos numericamente.

Ao analisar as tensões principais máximas atuantes nos prismas, nota-se que surgem tensões de tração, que se propagam ao longo da estrutura do prisma, principalmente, nas faces laterais, representando o processo que originou o colapso dos mesmos. Esse comportamento coincidiu com os resultados obtidos nos modelos experimentais, conforme será apresentado no próximo item.

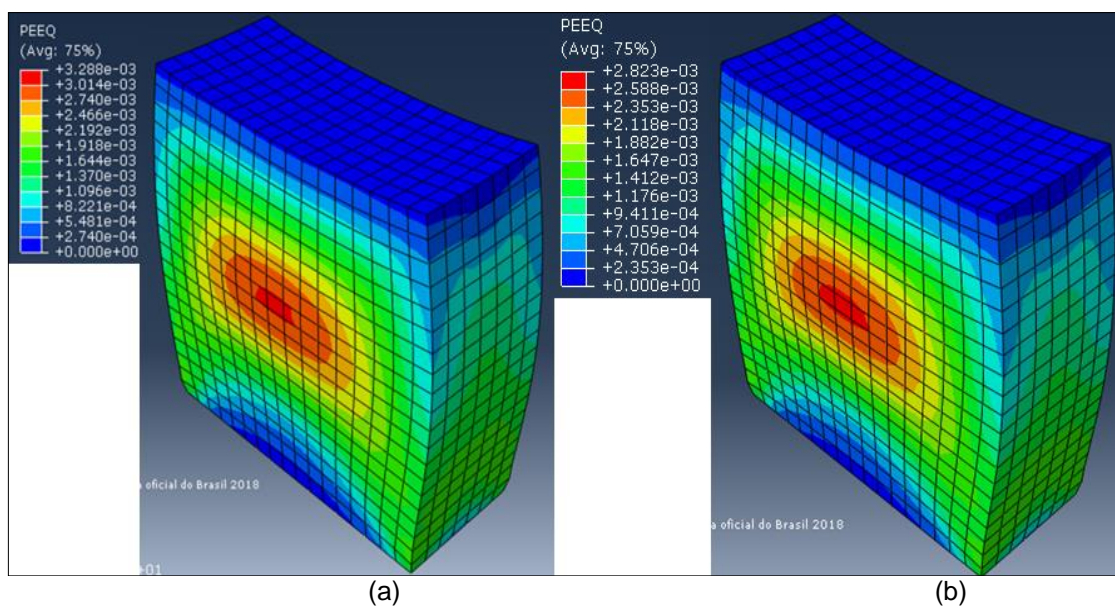
Figura 44 - Distribuição de tensões principais máximas obtidas numericamente: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo.



Fonte: A autora (2018).

Na Figura 45 apresentam-se as distribuições das deformações equivalentes, obtidas numericamente que se propagaram nos modelos dos prismas, quando carregados uniaxialmente. Nota-se que os dois modelos apresentaram deformações similares.

Figura 45 - Distribuição de deformações equivalentes: (a) prisma preenchido com graute convencional; (b) prisma preenchido com graute com resíduo



Fonte: A autora (2018).

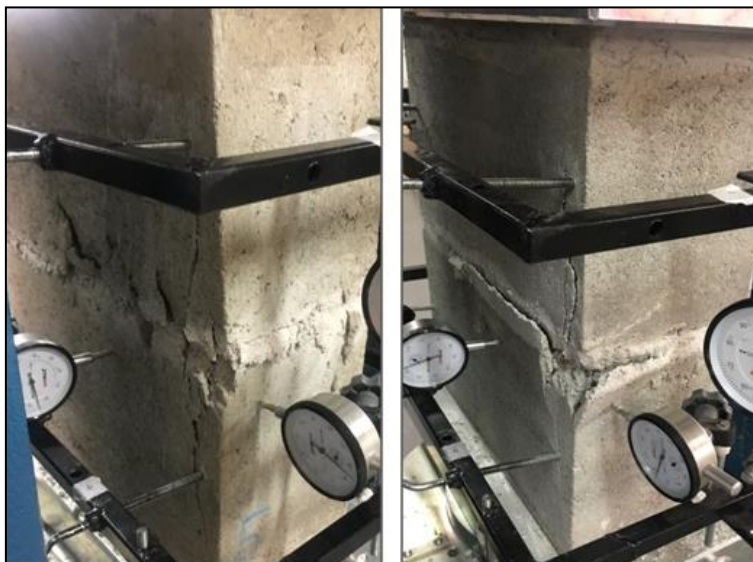
6.3 Modos de ruptura dos prismas

Após a realização do carregamento uniaxial nos prismas via estudo experimental e numérico, foi possível identificar que o modo de ruptura apresentou-se de acordo com o que foi exposto por Nalon, *et al.*, (2016), conforme descrito no referencial teórico.

Na Figura 46 é possível visualizar as imagens registradas após a ruptura de um dos prismas preenchidos com graute convencional e com resíduo. Foi possível perceber o esfacelamento da argamassa entre a junção bloco-argamassa. Este ocorreu de forma dispersa, com expulsão do material fragmentado em pontos localizados da junta. Ao fim dos ensaios, já havia ocorrido a microfissuração generalizada da argamassa. Também se notou o início do fendilhamento da superfície dos blocos na região próxima à junta de assentamento.

Este comportamento de esmagamento localizado da junta foi verificado em alguns prismas durante a realização dos testes experimentais. Pode-se dizer que, neste caso, no instante que os prismas atingem a carga de ruptura, alguns pontos da argamassa já haviam superado sua resistência à compressão confinada, gerando o esmagamento da junta. O esmagamento da argamassa causa concentração de tensões que geram fissuras nos blocos, conseqüentemente, surgem fissuras nas paredes, conforme se observa na Figura 46. A concentração de tensões nas paredes laterais dos prismas pôde ser observada, também, nos resultados obtidos numericamente, conforme ilustra a Figura 44.

Figura 46 - Rompimento dos prismas iniciando pela argamassa



Fonte: A autora (2018).

Na Figura 47 apresenta-se o mecanismo de ruptura observado, durante o aumento do carregamento. À medida que se aumentava o carregamento pôde-se escutar o som típico do esfarelamento do cordão de argamassa, mas o prisma continuou a resistir a cargas de compressão maiores. A seguir, fissuras verticais começaram a surgir nas paredes dos blocos. A ruptura ocorreu logo depois do aparecimento destas fissuras, quando o graute rompeu por compressão.

Figura 47 - Prisma com rompimento por compressão



Fonte: A autora (2018).

Como no caso do prisma anterior, indícios sonoros do esmagamento da argamassa puderam ser observados durante a execução do ensaio. Na maioria dos prismas, fissuras verticais surgiram nas paredes dos blocos nos instantes próximos à ruptura. Estas fissuras se justificam pelo surgimento de esforços de tração no bloco, gerados pela restrição de movimento da argamassa de assentamento, aliados com os esforços de tração no bloco gerados pela expansão do graute.

Em alguns prismas preenchidos com graute com resíduo, foi possível observar o descolamento de pedaços dos blocos, expulsando as suas paredes trincadas (Figura 48). Verificou-se que, durante o ensaio de compressão destes prismas, a expansão do graute causou tensões de tração nas paredes laterais do bloco; comportamento também evidenciado na análise numérica.

Figura 48 - Prismas com deslocamento das paredes laterais



Fonte: A autora (2018).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização deste trabalho foi possível perceber que a utilização de agregados de concreto reciclado é muito atrativa do ponto de vista da sustentabilidade, visto que existe uma forte relação entre a construção civil e o meio ambiente. Além disso, a indústria da construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, porém, comporta-se ainda como grande geradora de impactos ambientais, sendo responsável por grande porcentagem de geração de resíduos sólidos.

Ainda se tratando de sustentabilidade, o presente trabalho favoreceu a continuação de pesquisas com a substituição de agregados naturais por resíduos. Podendo minimizar os impactos ambientais gerados pelo descarte sem controle deste tipo de resíduo e diminuir o consumo de matérias primas naturais.

Considera-se que o recolhimento do resíduo na fábrica de blocos de concreto é um processo simples, pois não há a contaminação durante ou após a prensagem dos blocos durante a fabricação, o que favorece a sua reutilização em graute ou concreto como agregado.

Diante dos resultados obtidos nos testes experimentais, foi possível verificar que o graute produzido a partir da substituição integral do agregado natural graúdo ou miúdo apresentou comportamento mecânico adequado, quando se considera a resistência mecânica à compressão axial.

Na avaliação da resistência à compressão dos prismas, os que foram preenchidos com graute convencional obtiveram valor médio de resistência à compressão (11,7 MPa) superior quando comparados aos prismas com substituição integral do agregado graúdo natural por resíduo (9,5 MPa). Este fato pode ser explicado, pela variação da resistência do concreto de fabricação do bloco ou pela absorção da água do graute pelo bloco e pela argamassa,

pois em alguns prismas preenchidos com graute com resíduo, a resistência à compressão foi superior a dos prismas preenchidos com graute convencional. Entretanto, verificou-se que a resistência à compressão axial do graute confeccionado com a substituição integral do agregado natural por resíduo foi superior ao graute convencional. A resistência média à compressão do graute com resíduo foi de 11,5 MPa e a do graute convencional de 9,7 MPa, o que corresponde a um aumento na ordem de 18,55%.

O valor do módulo de deformação longitudinal dos prismas confeccionados com graute convencional e com resíduo foram de 24,9 GPa e 11,6 GPa, respectivamente. Os prismas confeccionados com graute convencional apresentaram maior fragilidade, fato que é justificado por um módulo de elasticidade elevado (25 GPa). Já as amostras dos prismas com graute com resíduo apresentaram menores deformações.

Quanto à simulação numérica, considera-se que o modelo de dano plástico (CDP) representou de forma adequada os componentes da alvenaria estrutural, por ter sido capaz de reproduzir o comportamento mecânico e o modo de ruptura dos prismas. Além disso, a macromodelagem aliada ao modelo de dano adotado foi capaz de representar a ruptura dos prismas, que se deu por tração no bloco, ocasionada, principalmente, pelo esmagamento da argamassa. Esse comportamento foi exatamente igual ao que foi observado nos ensaios experimentais. Pode-se concluir que o modelo numérico foi capaz de representar de forma adequada o modelo experimental do prisma, com relação ao valor de resistência à compressão e deslocamento.

O modelo numérico mostrou-se como uma ferramenta segura para tomada de decisões em futuras pesquisas.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- analisar outros traços com outras porcentagens de substituição do agregado tendo o objetivo de expandir as pesquisas com utilização de RCD;
- utilizar aditivos plastificantes ou aceleradores de pega na confecção do graute;
- analisar o comportamento do graute e da argamassa com substituição dos agregados naturais pelo resíduo;
- analisar experimentalmente o comportamento do graute com resíduo em mini paredes;
- realizar simulações numéricas em paredes com dimensões reais considerando os mesmos parâmetros e modelos constitutivos adotados nesse trabalho;
- realizar uma micro-modelagem para avaliar o comportamento dos prismas;
- realizar simulações numéricas considerando outro modelo constitutivo para avaliar se ocorrerão diferenças significativas nos resultados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – **ACI 530 – 92 (1995)**: Building Code Requirements for Masonry Structures. New York, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 15961-1/2011**: Alvenaria Estrutural – Blocos de Concreto – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 15961-2/2011**: Alvenaria Estrutural – Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 12118/2013**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 9935/2011**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 5739/2007**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– **ABNT. NBR 8522/2017**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 7211/2009**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 5738/2015**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 13279/2005**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 13276/2016**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro 2016.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 2018.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Brasil. 2016.

AKBARNEZHAD, A. et al. Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, Dezembro 2013.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1º. ed. Porto: [s.n.], 2003.

BOLHASSANI, M. et al. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 159-173, Maio 2015.

BUTTLER, A. M. Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural. Tese (Doutorado em Estrutura) - Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, 2007.

BUTTLER, A. M. et al. Avaliação das propriedades de agregados reciclados de concreto gerados em uma fábrica de pré-moldados. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, 2006.

CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de Alvenaria Estrutural**. Ilha Solteira: [s.n.], 2006.

CARDOSO, H. S. Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. **Dissertação (Mestrado)**. UFMG, Belo Horizonte, 2014.

CASTRO, L. O. et al. Avaliação experimental da interação entre paredes de blocos de concreto de alta resistência sob ações verticais. **IBRACON**, v. 9, 2016.

CHOUDHURY, T.; MILANI, G.; KAUSHIK, H. B. Comprehensive numerical approaches for the design and safety assessment of masonry buildings retrofitted with steel bands in developing countries: The case of India. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 227-246, Junho 2015. ISSN 0950-0618.

CONAMA. Resolução CONAMA n^o 307 Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução N^o 307, Brasília, 05 Julho 2002.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; MEDEIROS, D. R. Estudo de teores de substituição de agregado natural por chamote de blocos estruturais cerâmicos para desenvolvimento de grautes. **Revista Matéria**, v. 22, Agosto 2017. ISSN 1517-7076.

Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juiz de Fora, Outubro 2010.

EPA. Relatório Avançando Gestão de Materiais Sustentáveis. **Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos**, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials>>. Acesso em: 16 Janeiro 2018.

EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

EUROSTAT. Estatísticas de resíduos na Europa, 2017. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&code=cej_wm040&language=en>. Acesso em: 04 Janeiro 2018.

FERNANDES, A. V. B.; AMORIN, J. R. R. Concreto sustentável aplicado na construção civil. **Caderno de Ciências Exatas e Tecnológicas UNIT**, Aracaju, v. 2, 2014.

FREIRE, A. S.; CAVALCANTE, J. R. Avaliação do potencial de uso de agregado reciclado nas aplicações destinadas ao sistemas construtivo em alvenaria estrutural: Bloco, Graute e Argamassa. **XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnológico Ambiente Construído**, Juiz de Fora, 2012.

GIESELER, S. E.; TUTIKIAN, B. F. Estudo de grautes produzidos com agregado reciclado de resíduo de bloco cerâmico incorporando teores de cal hidratada. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 303-315, 2013. ISSN 1678-8621.

GOMES, I. R. Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Novembro 2001.

GONÇALVES, R. D. C. Agregados reciclados de resíduos de concreto - Um novo material para dosagens estruturais. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo., São Carlos, 2001.

GONZÁLEZ, T. I. et al. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. **Materiales de Construcción**, A Coruña, v. 66, 2016.

GOUVEIA, J. P.; LOURENÇO, P. B.; VASCONCELOS, G. Soluções construtivas em alvenaria. Congresso nacional da construção., Coimbra, Portugal. Dezembro 2007.

HALMEMAN, M. C. R.; SOUZA, C.; CASARIN, A. N. Caracterização dos resíduos de construção e demolição na unidade de recebimento de resíduos sólidos no município de Campo Mourão - PR. **Revista Tecnológica**, n. Edição especial ENTECA, 2009.

HENDRY, A. W. Engineered design of masonry buildings: fifty years development in Europe. Prog. Struct. Eng. Mater. University of Edinburgh, Scotland., 2002.

JANUZZI, R. V. et al. Estudo do comportamento mecânico de blocos produzidos com escória de aciaria elétrica visando à aplicabilidade em alvenaria estrutural. **IBRACON**, 2014.

JOHN, V. M.; AGOPYAN,. Reciclagem de resíduos da construção. Seminário Reciclagem de Resíduos Domiciliares, São Paulo, 05 Abril 2013.

KALIL, S. M. B., 2007. Disponível em:
<http://www.feng.pucrs.br/professores/soares/Topicos_Especiais_-_Estruturas_de_Madeira/Alvenaria.pdf>. Acesso em: 09 Janeiro 2018.

KARPINSK, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil - Uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2009.

KATO, R. B. Comparação entre o sistema construtivo convencional e o sistema construtivo em alvenaria estrutural segundo a teoria da construção enxuta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial** , Maringá, v. 11, Abril 2006.

LOURENÇO, P. B. Computational strategies for masonry structures: multi-scale modelling, dynamics, engineering applications and other challenges. **Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería** , Bilbao, 2013.

MARTINS, D. D. G. Utilização de resíduos gerados na fabricação de blocos de concreto, no momento da prensagem, para confecção de micro concreto. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. **IBRACON**, 2008.

MOHAMAD, A.-B.; CHEN, Z. Experimental and Numerical Analysis of the compressive and Shear Behavior for a New Type of Self-Insulating Concrete Masonry System. **Applied Sciences**, v. 6, p. 245, Junho 2016. ISSN ISSN: 20763417.

MOHAMAD, G. et al. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths. **Construction and Buildings Materials**, 2017.

NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2004.

NALON, G. et al. Análise dos mecanismos de ruptura de prismas de blocos de concreto submetidos à compressão axial. **IBRACON**, Outubro 2016.

NESSRALLA, M. A. NESSRALLA, M. A. Resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

OBAIDAT, A. T.; ABO EL EZZ, A.; GALAL, K. Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements. **ScienceDirect (Elsevier B.V.)**, v. 132, p. 562-575, Fevereiro 2017. ISSN 0141-0296.

OLIVEIRA, M. M. et al. Determinação da taxa de geração de RCC: Estudo de caso das obras do campus I da UFPB. **Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e ambiental**, Porto Alegre-RS, 2011.

PADOVAN, R. G. Influência da pré molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto. Dissertação (Mestrado). UNISINOS, São Leopoldo - RS, Setembro 2013.

PARSEKIAN, G. A.; MELO, M. M. **Alvenaria estrutural em blocos cerâmicos**: projeto, execução e controle. 1º. ed. São Paulo: [s.n.], v. 1, 2010.

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, Novembro 2017.

PELETEIRO, S. C. Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

PENNA, S. S. Formulação Multipotencial para Modelos de Degradação Elástica: Unificação Teórica, Proposta de Novo Modelo, Implementação Computacional e Modelagem de Estruturas de Concreto. Tese (Doutorado). UFMG, Belo Horizonte, 2011.

PEREIRA, A. Projeto ótimo de pórticos planos com restrição à flambragem. Dissertação (Mestrado). PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

PINHEIRO, L. M. et al. Estruturas de Concreto - Aço para armaduras. Notas de aula. **USP – EESC – Departamento de Engenharia de Estruturas**, São Paulo, 2010.

PROENÇA, J.; GAGO, A.; CHAVES, F. A simplified methodology for the seismic assessment of masonry buildings with RC slabs. **Bulletin of Earthquake Engineering**, Janeiro 2018.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. 1º. ed. São Paulo: Pini Ltda, v. 3, 2008.

SANTOS, A. C. et al. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, 2017.

SANTOS, C. F. R. et al. Numerical and experimental evaluation of masonry. **Ibracon Structures and materials journal**, v. 10, p. 477 - 508, Abril 2017. ISSN ISSN 1983-4195.

SANTOS, L. R. Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares mistos Circulares Preenchidos com Concreto. **Dissertação (Mestrado)**. UFMG, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, H. P. Simulação Numérica do Comportamento de Conectores de Cisalhamento Tipo Crestbond. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SILVA, I. F. M. et al. Viabilidade técnica da utilização de graute produzido com agregados reciclados para o reforço de blocos cerâmicos de alvenaria estrutural.. **Anais do 58º Congresso Brasileiro do concreto**, 2016.

SILVA, J. B.; RICHTER, C.; DÉsir, J. M. Análise do comportamento anisotrópico de prismas de alvenaria estrutural cerâmica.. **XIII ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Juiz de Fora, Outubro 2010.

SILVA, R. F.; CAMACHO, J. S.; RODRIGUES, R. O. Modelo Teórico para a previsão da resistência à compressão da alvenaria armada.. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, Dezembro 2011.

SILVA, S. Notas de Aula - Introdução ao Método dos elementos Finitos.. **Centro de Engenharia e Ciências Exatas - CECE**, Foz do Iguaçu, 2009. SIMULIA. **Software ABAQUS 6.14**.. Dassault Systèmes. USA. 2014.

SNIS, S. N. D. I. S. S. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2013**. Ministério das cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2013.

SNIS, S. N. D. I. S. S. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014**. Ministério das cidades - secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2014.

SNIS, S. N. D. I. S. S. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2015**. Ministério das cidades - Secretaria nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2017.

SORIANO, H. L.; LIMA, D. S. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

TECHNE, São Paulo, p. 43, Junho 2003.

TROMBIM, D. C.; PORTELA, ; GONÇALVES,. Concreto reciclado:Estudo e caracterização das matérias primas. **Educação e ciência para a cidadania global**, São José dos Campos, Outubro 2016.

WERLE, A. P. et al. Análise de Metodologias utilizadas para a caracterização da absorção de água de concreto reciclado como agregado. **ENTAC**, Canela, v. 1, p. 1-11, 2010.