

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado

KATIA CRISTINA ZANATTA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PRISMAS DE
ALVENARIA DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC

MARINGÁ
2015

KATIA CRISTINA ZANATTA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PRISMAS DE
ALVENARIA DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Nelcí Helena Maia Gutierrez

MARINGÁ
2015

KATIA CRISTINA ZANATTA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PRISMAS DE ALVENARIA
DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Nelcí Helena Maia Gutierrez – UEM

Prof. Dr. Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis - UEM

Prof. Dr. Roberto Lopes Ferraz - UFJF

Ao meu esposo, Juliano, pelo constante apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai, por ter me dado forças para conseguir chegar a este lugar, por me mostrar saídas humanamente impossíveis e me dar a tranquilidade necessária.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV) pela oportunidade de vivenciar e complementar os estudos.

À minha orientadora, professora Nelcí Helena Maia Gutierrez, por não desistir quando parecia que não tinha como continuar, pelos conselhos, pelas orientações e pela paciência.

Ao professor Júlio César Pigozzo (UEM) pela contribuição na instrumentação dos prismas e pelas discussões técnicas para o aprimoramento desta pesquisa.

Aos professores José Wilson Assunção (UEM), Wilson Wesley Wutzow (UEM), Munir Mauad (UFGD), Luiz Henrique Moreira de Carvalho (UNIGRAN) pela contribuição ao longo deste estudo.

À todos os funcionários do DEC, da UEM, da UNIGRAN e da UFGD, técnicos e de apoio, pela contribuição nos ensaios e preparação do material.

À empresa ConstruEco, pela disponibilidade da prensa e dos funcionários que tornou possível a produção dos tijolos de solo-cimento-RCC.

À empresa Ambiental, pelo fornecimento e processamento do resíduo da construção civil – RCC.

Ao meu paciente esposo pela compreensão de me dividir com outras causas, pelo nosso bem comum.

Aos meus filhos, Felipe e Alexandre, pelos sorrisos que sempre animaram.

Aos meus pais, pela vida, amor e exemplo.

RESUMO

A busca por novas tecnologias, aliadas ao conceito do desenvolvimento sustentável consciente, permite o crescimento de ações voltadas à reciclagem de resíduos. Esta pesquisa objetivou investigar a aplicação de resíduos da construção civil – RCC na fabricação de tijolos vazados de solo-cimento. Foram estudados três teores de cimento: 6%, 8% e 10%, combinados com diferentes dosagens de RCC: 20%, 40% e 60% em massa. O solo utilizado nas misturas foi o arenoso. O RCC utilizado era composto por restos de material cerâmico, concreto e argamassa. Foram selecionadas quatro dosagens para fabricação de tijolos, porém, devido a problemas de moldagem, para avaliação dos prismas houve necessidade de uma nova dosagem com 50% de solo, 50% de RCC e 10% de cimento. Foram confeccionados 350 tijolos com esta dosagem, visando à execução de prismas para avaliar o comportamento da alvenaria produzida com estes componentes em relação à resistência a compressão e ao módulo de deformação. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade de uso do material estudado para a finalidade proposta.

Palavras-chave: módulo de elasticidade; resíduo da construção; resistência à compressão.

ABSTRACT

The search for new technologies, combined with the concept of conscious sustainable development, allows the growth of actions aimed at recycling waste. This study investigated the use of construction waste - RCC in the manufacture of soil-cement hollow brick. Three cement contents were studied: 6%, 8% and 10%, combined with different doses of RCC: 20%, 40% and 60% by mass. The soil was sandy in mixtures. The RCC used consisted of remains of ceramic, concrete and mortar. Four dosages were selected for the manufacture of bricks, however, due to molding issues for the evaluation of the prisms was no need for a new dosing with 50% soil, 50% of RCC and 10% cement. 350 bricks were made with this dosage, seeking enforcement of prisms to evaluate the behavior of masonry produced with these components for resistance to compression and the modulus of elasticity. The results demonstrated the feasibility of use of the material studied for the proposed purpose.

Key-words: modulus of elasticity; construction residue; compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – RCC coletado nas Regiões do Brasil – ton/dia	22
Figura 2 - Sistema em alvenaria convencional	34
Figura 3 - Sistema em alvenaria com tijolos de solo-cimento.....	34
Figura 4 - Exemplar de tijolo de solo-cimento-RCC.....	35
Figura 5 - Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão simples.....	44
Figura 6 - Comportamento geral dos prismas sob carga de compressão uniforme.....	47
Figura 7 - Estudo da evolução da resistência de cálculo da alvenaria em função da resistência dos materiais constituintes.....	48
Figura 8 - Resistência à compressão simples de blocos, argamassas e prismas.....	49
Figura 9 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Hilsdorf.....	50
Figura 10 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Hamid e Drysdale (1979)	51
Figura 11 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Atkinson e Noland (1985)	52
Figura 12 – Localização das cidades de Caarapó e Dourados no Estado do Mato Grosso do Sul.....	62
Figura 13 – Local de coleta do solo (Av. Duque de Caxias - Caarapó/MS)	62
Figura 14 – Perfil de solo no local de coleta – Caarapó/MS	63
Figura 15 – Solo depositado ao ar livre	63
Figura 16 – Solo peneirado sobre lastro de concreto	63
Figura 17 - Etapas de preparo do Resíduo da Construção Civil (RCC) - (a) Processo de fabricação do RCC; (b) RCC coletado; (c) RCC peneirado sobre lastro de concreto e (d) Amostra de RCC.....	64
Figura 18 - Ensaio de caracterização dos solos: (a) Compactação; (b) Limite de liquidez; (c) Peneiramento e (d) Sedimentação e massa específica dos grãos.....	67
Figura 19 - Processo de fabricação dos tijolos	71
Figura 20 - Ensaio de análise dimensional de tijolo de solo-cimento-RCC.....	72
Figura 21 – Processo de execução do ensaio de resistência à compressão dos tijolos.....	73
Figura 22 - Rompimento de corpos-de-prova de argamassa	75
Figura 23 - Ensaio da trabalhabilidade da argamassa - mesa de consistência.....	75

Figura 24 - Prismas preparados para o ensaio de resistência à compressão.....	76
Figura 25 - Equipamento dos testes em prismas	77
Figura 26 - Plano de carregamento dos prismas.....	78
Figura 27 - Detalhe de instrumentação de primas	78
Figura 28 - Instrumentação dos prismas.....	79
Figura 29 - Sistema de aquisição de dados de deslocamentos	79
Figura 30 - Curva granulométrica - Solo.....	81
Figura 31 - Curva de compactação do solo natural	82
Figura 32 - Curva granulométrica – RCC com e sem uso de dispersão.....	83
Figura 33 - Curvas granulométricas – Solo, RCC e misturas de Solo-RCC sem o uso de dispersão.....	84
Figura 34 - Curvas de compactação das misturas de solo cimento e solo-cimento-RCC.....	85
Figura 35 - Curvas de resistência dos corpos de prova cilíndricos de solo-cimento-RCC	87
Figura 36 - Aumento da resistência individual máxima dos CP's com o acréscimo de RCC..	87
Figura 37 - Curva granulométrica da areia.....	89
Figura 38 - Evolução da resistência para as diferentes combinações de solo-cimento-RCC...	92
Figura 39 - Curva granulométrica da dosagem SC ₁₀ R ₅₀	96
Figura 40 - Curva de compactação da dosagem SC ₁₀ R ₅₀	97
Figura 41 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC ₁₀ R ₅₀)	97
Figura 42 - Comparativo da evolução da resistência à compressão da dosagem SC ₁₀ R ₅₀ com as demais dosagens utilizadas	98
Figura 43 - Padrão de ruptura observado nos prismas.....	101
Figura 44 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC ₆ R ₄₀)	110
Figura 45 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC ₈ R ₄₀)	110
Figura 46 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC ₈ R ₆₀)	111
Figura 47 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC ₁₀ R ₆₀)	111
Figura 48 - Curva tensão deformação - Prisma 01	112
Figura 49 - Curva tensão deformação - Prisma 02	112
Figura 50 - Curva tensão x deformação - Prisma 03	113

Figura 51 - Curva tensão x deformação - Prisma 04	113
Figura 52 - Curva tensão x deformação - Prisma 05	114
Figura 53 - Curva tensão x deformação - Prisma 06	114
Figura 54 - Curva tensão x deformação - Prisma 07	115
Figura 55 - Curva tensão x deformação - Prisma 08	115
Figura 56 - Curva tensão x deformação - Prisma 09	116
Figura 57 - Curva tensão x deformação - Prisma 10	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração e reciclagem de RCC - Europa.....	21
Tabela 2 - Classificação do tamanho dos grãos de solo	25
Tabela 3 - Classificação do índice de plasticidade	27
Tabela 4 - Resistência à compressão simples e módulo de elasticidade médio em corpos de prova de solo-cimento	30
Tabela 5 - Tipos e dimensões nominais de tijolos de solo-cimento	36
Tabela 6 - Limites especificados para tijolos de solo-cimento.....	37
Tabela 7 - Estudos da resistência e do fator de eficiência em alvenaria de blocos de concreto	38
Tabela 8 - Alguns traços, resistência à compressão e uso de argamassas de cimento, cal e areia	40
Tabela 9 - Evolução da resistência à compressão (MPa) em blocos	41
Tabela 10 - Número mínimo de corpos de prova por tipo de elemento de alvenaria.....	46
Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão em blocos de concreto e prismas	48
Tabela 12 - Valores de \emptyset em função da quantidade de elementos de alvenaria	56
Tabela 13 - Composição das dosagens de solo-cimento-RCC	68
Tabela 14 - Unidades fabricadas para realização de ensaios	70
Tabela 15 – Caracterização geotécnica - Solo.....	80
Tabela 16 - Caracterização do resíduo da construção civil (RCC).....	82
Tabela 17 - Características do solo, RCC e das diferentes combinações entre solo e RCC	84
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de compactação das misturas de solo-cimento e solo-cimento-RCC	86
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de Resistência à Compressão (kgf/cm ²) – 7 dias (Imersão prévia de 4 horas)	86
Tabela 20 - Dosagens selecionadas para confecção dos tijolos.....	88
Tabela 21 - Estudo da composição granulométrica da areia	89
Tabela 22 - Propriedades da areia.....	90
Tabela 23 - Dados de resistência à compressão da argamassa (MPa).....	90
Tabela 24 - Dimensões nominais do tijolo de solo-cimento-RCC	91
Tabela 25 - Resistência à compressão dos tijolos (MPa) – após imersão em água por 16 horas	91

Tabela 26 - Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa) e em tijolos (MPa) – 7 dias	92
Tabela 27 - Resultados dos ensaios de absorção de água dos tijolos (%)	93
Tabela 28 - Grau de compactação dos tijolos de solo-cimento-RCC.....	94
Tabela 29 - Estudo estatístico para a resistência à compressão dos tijolos com 7 dias.....	94
Tabela 30 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 14 dias.....	94
Tabela 31 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 28 dias.....	95
Tabela 32 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 56 dias.....	95
Tabela 33 - Caracterização da dosagem SC ₁₀ R ₅₀	96
Tabela 34 - Resistência à compressão individual e carga de ruptura nos prismas aos 28 dias	99
Tabela 35 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão da alvenaria segundo diferentes autores	99
Tabela 36 - Módulo de deformação da alvenaria de tijolos de solo-cimento-RCC	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

γ_s – peso específico dos grãos do solo

γ – peso específico aparente do solo

γ_d – peso específico aparente seco do solo

$\gamma_{d\text{ máx}}$ – peso específico aparente seco máximo do solo

$w_{ót}$ – umidade ótima de compactação

E_{at} – módulo de deformação tangente da argamassa

E_{as} – módulo de deformação secante da argamassa

f_{arg} – resistência característica à compressão da argamassa

f_{pk} – resistência característica do prisma de alvenaria

f_{bk} – resistência característica à compressão do tijolo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	SUSTENTABILIDADE	20
2.2	RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC).....	20
2.3	SOLO	23
2.3.1	Origem.....	23
2.3.2	Propriedades	24
2.3.2.1	Granulometria.....	24
2.3.2.2	Composição mineralógica	25
2.3.2.3	Estrutura	26
2.3.2.4	Limites de consistência	27
2.3.2.5	Compactação	28
2.3.3	Estabilização dos solos.....	28
2.3.3.1	Solo-cimento	29
2.4	ALVENARIA	31
2.4.1	Conceituações preliminares.....	31
2.4.2	Alvenaria de tijolos de solo-cimento.....	32
2.4.2.1	Tijolo de solo-cimento	34
2.4.3	Fatores que influenciam na resistência da alvenaria	37
2.4.3.1	Resistência à compressão do tijolo.....	38
2.4.3.2	Características da argamassa.....	39
2.4.3.3	Espessura das juntas horizontais	44
2.4.3.4	Geometria da unidade.....	45
2.4.3.5	Tipo de assentamento	45
2.4.4	Mão-de-obra	45

2.4.5	Prisma.....	46
2.4.6	Modelos de ruptura.....	49
2.4.7	Determinação da resistência à compressão da alvenaria.....	54
2.4.8	Determinação do módulo de elasticidade da alvenaria	58
2.5	COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA.....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	MATERIAIS.....	62
3.1.1	Solo.....	62
3.1.2	Cimento	63
3.1.3	Cal hidratada.....	64
3.1.4	Água	64
3.1.5	Resíduo da construção civil – RCC.....	64
3.1.6	Outros materiais	65
3.2	EQUIPAMENTOS	65
3.3	MÉTODOS	65
3.3.1	Procedimentos aplicados ao solo.....	66
3.3.2	Procedimentos aplicados ao resíduo da construção civil – RCC	67
3.3.3	Definição das dosagens das misturas de solo-cimento-RCC	68
3.3.4	Fabricação das amostras de tijolos de solo-cimento-RCC	69
3.3.5	Procedimentos aplicados à argamassa.....	74
3.3.6	Confecção de prismas.....	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	SOLO	80
4.2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC	82
4.3	DOSAGENS DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-RCC	83
4.4	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO.....	88
4.5	TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC.....	91

4.5.1	Estudo estatístico dos resultados obtidos com tijolos de solo-cimento-RCC	94
4.6	O TIJOLO DE SOLO-CIMENTO-RCC (SC ₁₀ R ₅₀).....	95
4.7	PRISMAS COM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC (SC ₁₀ R ₅₀)	98
4.7.1	Resistência à compressão	99
4.7.2	Módulo de deformação.....	100
4.7.3	Fator de eficiência	100
4.7.4	Tipo de ruptura dos prismas	101
5	CONCLUSÃO.....	101
REFERENCIAS		104
APÊNDICE A – Evolução da resistência à compressão dos tijolos		110
APÊNDICE B – Curvas tensão x deformação – Prismas		112

1 INTRODUÇÃO

Cresce a cada dia a necessidade de preservação ambiental em função das constantes campanhas publicitárias, bem como políticas nacionais e internacionais ligadas ao meio ambiente. A procura por novas soluções construtivas, reciclagem de resíduos, assim como eliminação do desperdício no canteiro de obras são metas que devem ser buscadas por profissionais ligados à construção civil e também pela sociedade, de forma a garantir um crescimento sustentável.

Neste sentido, a Lei 12.305/2010, também conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos, regula o manejo ambientalmente correto dos resíduos sólidos, através da implantação de metas de redução, reutilização e/ou reciclagem no intuito de propiciar a redução da quantidade de resíduos e rejeitos para destinação final.

O ato de construir em si é um ato de destruição ambiental. O ambiente construído é fruto da transformação de recursos naturais em materiais de construção o que, em função da forma utilizada para sua obtenção, pode provocar maior ou menor impacto ambiental.

Tem-se ainda que, entre as necessidades básicas do ser humano está a moradia. Desta forma, torna-se um desafio minimizar o déficit habitacional, buscando novas soluções construtivas, aliadas ao conceito de desenvolvimento sustentável e eliminação de desperdício em canteiro, através da racionalização de materiais e mão de obra.

A terra está entre os primeiros materiais de construção utilizados pelas civilizações, sendo seu uso milenar. No Brasil, exploradores portugueses utilizavam o solo como material de construção. Podem ser encontradas edificações do período colonial que demonstram a durabilidade desta técnica. Surge, então, a possibilidade de retomar a utilização do solo por tratar-se de um material construtivo abundante, de fácil obtenção e manuseio, favorecendo seu emprego na construção civil.

Pinheiro e Soares (2010) citam que pesquisas realizadas pelo Banco Nacional de Habitação (BNH) verificaram que a construção com tijolos de solo-cimento apresenta as seguintes vantagens: utilização do solo local, reduzindo ou eliminando o custo de transporte; a regularidade de suas formas as quais garantem um baixo consumo de argamassas de assentamento e revestimento com espessura mínima e uniforme, ou até mesmo, dispensar o uso de revestimento (desde que haja proteção da ação direta da água); baixo consumo energético na fabricação por dispensar o processo de queima.

O emprego do solo-cimento foi utilizado com diversas finalidades no Brasil. Registros do uso dessa técnica podem ser encontrados a partir de 1940. A Associação Brasileira de

Cimento Portland (ABCP), passou a utilizá-lo a partir de 1948 em edificações, porém, sua utilização foi desaparecendo em função dos novos materiais que foram surgindo.

A utilização de estabilizantes permite melhorar as propriedades do solo, conferindo maior resistência aos elementos, maior estabilidade volumétrica e maior durabilidade. Podem ser utilizados como estabilizantes: cimento, cal, cinzas volantes, materiais pozolânicos, entre outros.

De acordo com a ABCP (1999), as reações que envolvem a mudança de propriedades dos solos por adição de cimento precisam ser melhor estudadas, pois enquanto em solos arenosos, a ação de cimentação é a mesma que se processa nos concretos, através do desenvolvimento de vínculos de coesão nos pontos de contato entre os grãos; nos solos argilosos, além das reações normais de endurecimento, ocorrem reações entre a superfície dos grãos de argila e a cal liberada na hidratação do cimento.

Embora possam ser encontradas diversas pesquisas que utilizam agregados reciclados, a maioria dos casos se refere apenas ao potencial de aproveitamento deste material, deixando de lado, muitas vezes, a avaliação do seu comportamento enquanto produto final.

Neste contexto, esta pesquisa visa estudar a possibilidade de utilização de resíduos de materiais cerâmicos, argamassas e concreto, provenientes da construção civil, na obtenção de tijolos de solo-cimento, bem como contribuir com o estudo do comportamento de alvenarias executadas com esses materiais, por meio da avaliação de prismas.

A escolha deste tipo de resíduo permite potencializar o aproveitamento do material, uma vez que se trata de um resíduo encontrado em maior quantidade e com mais facilidade em caçambas de entulho, seja em construções novas ou em obras de reforma.

Santos, Oliveira e Marques (2012) relatam que o reaproveitamento de resíduos cerâmicos se torna bastante oportuno, por se tratar de um material, normalmente, descartado de forma inadequada. Baseado em pesquisas concluem que a incorporação de resíduos cerâmicos possibilita condições técnicas favoráveis para a produção de tijolos de solo-cimento com boa qualidade e adequados às normas vigentes.

O solo utilizado para confeccionar os tijolos foi retirado de uma área de empréstimo da Prefeitura Municipal de Caarapó-MS, por se tratar de um solo arenoso com características adequadas à fabricação dos tijolos de solo-cimento. O resíduo da construção civil – RCC foi coletado em uma usina de processamento localizada na cidade de Dourados/MS.

Este estudo pode demonstrar, além do potencial da aplicação do resíduo da construção civil na produção de tijolos de solo-cimento, o comportamento estrutural da alvenaria construída a partir destes tijolos, visando sua utilização em edificações.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica da aplicação de resíduo da construção civil – RCC, em tijolos vazados modulares de solo-cimento, bem como a avaliação do comportamento da alvenaria fabricada a partir destes materiais, visando sua utilização na construção civil.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a melhor dosagem para confecção de tijolos de solo-cimento-RCC;
- Estudar a evolução da resistência mecânica e da absorção de água dos tijolos de solo-cimento-RCC;
- Confeccionar tijolos vazados de solo-cimento-RCC, produzidos em prensa hidráulica, mediante cura normal por aspersão de água, isto é, sem processo de queima.
- Caracterizar a alvenaria executada com tijolos de solo-cimento-RCC, por meio de ensaios de prismas em relação à resistência característica (compressão axial) e ao módulo de elasticidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SUSTENTABILIDADE

O processo de industrialização representa um dos principais componentes da poluição ambiental, onde subprodutos são descartados na forma de resíduos, podendo representar risco potencial à saúde pública e aos ecossistemas. O reaproveitamento desses resíduos ajuda a promover o crescimento harmônico e sustentável da sociedade.

De acordo com John (2000) apud Lima (2010), desenvolvimento sustentável é aquele capaz de atender às necessidades básicas de toda a população e garantir a todos a oportunidade de satisfazer suas aspirações para uma vida melhor, sem comprometer as possibilidades das próximas gerações em atender suas próprias demandas. Desta forma, o desenvolvimento sustentável deve estar alicerçado sobre três pilares: o crescimento econômico, a equidade na distribuição da renda e a preservação da natureza.

Além disso, Cunha (2011) cita que a sustentabilidade visa estabelecer meios de utilizar menos os materiais naturais e energia para sua produção, projetar o ciclo de vida para a menor geração de resíduos, prezando a “longevidade do produto”, e gerir o reuso, reaproveitamento e reciclagem no processo construtivo, explorando os resíduos como potenciais fontes de energia e matéria-prima para usos diversos, como, por exemplo, a produção de novos componentes para a construção.

Para algumas sociedades em desenvolvimento o manejo adequado do que se descarta é parte integrante dos seus costumes; não como uma iniciativa para o meio ambiente, mas como medida alternativa para remediar situações de necessidade. Para outras culturas que não lidam com isso de forma natural e incorporada, a relação com os materiais deve ser reconstruída, visando buscar resultados positivos para o meio ambiente. Esse parece ser um desafio enorme para uma sociedade acostumada ao consumo e às facilidades que os objetos proporcionam.

2.2 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

A construção civil representa um importante segmento da economia brasileira, tida como indicativo do crescimento econômico e social. Porém, representa uma atividade produtora de grandes impactos ambientais, e seus resíduos representam um problema a ser administrado. Grandes empreendimentos além de promover a alteração da paisagem, produzem, como todas as demais atividades da sociedade, uma elevada carga de resíduos.

Diante da visibilidade mundial sobre a problemática dos resíduos, pesquisadores têm buscado alternativas para a minimização de sua geração, procurando reduzir os impactos associados à construção e demolição de edifícios. Considerando o grande volume de resíduos gerados pela construção, a política dos 3 R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) pode ser uma alternativa viável, bem como necessária para a consolidação de uma comunidade sustentável.

Historicamente, após a 2ª Guerra Mundial, houve necessidade de promover a aplicação de agregados reciclados na reconstrução de cidades europeias, as quais tiveram suas edificações demolidas. Desta forma, para atender à demanda de consumo da época, o entulho resultante foi britado e aplicado no próprio local.

De acordo com Mehta (2002) apud Buttler (2007) são geradas mundialmente cerca de 900×10^6 t/ano de RCC, sendo que grande parte desse volume de resíduos não é reciclado devido à existência de regulamentações normativas restritivas que impedem a utilização de materiais reciclados.

Na União Europeia, a quantidade de resíduos de construção é estimada em 216×10^6 t/ano (MARCIANO JR, 2000 apud BUTTLER, 2007). Na Tabela 1, apresenta-se alguns dados sobre a geração e reciclagem de RCC.

Tabela 1 - Geração e reciclagem de RCC - Europa

País	Produção Anual (x 10⁶)	Porcentagem reciclada
Bélgica	7,0 (1990)	87%
França	24,0 (1990)	15%
Reino Unido	30,0 (1990)	45%
Espanha	38,5 (2003)	10%

Fonte: BUTTLER (2007)

Pesquisa recente, realizada pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), demonstra que entre os municípios avaliados o total coletado de RCC em 2013 representou cerca $11,7 \times 10^3$ t/dia, ou seja, aproximadamente $42,1 \times 10^6$ t/ano. Importante ressaltar que a população dos municípios avaliados representa 45,3% da população brasileira indicada pelo IBGE em 2013. O total de RCC coletado por região no Brasil pode ser observado na Figura 1. Em algumas cidades brasileiras, estima-se um valor médio de 0,50 t/hab.ano na geração de RCC (KARPINSK, 2009).

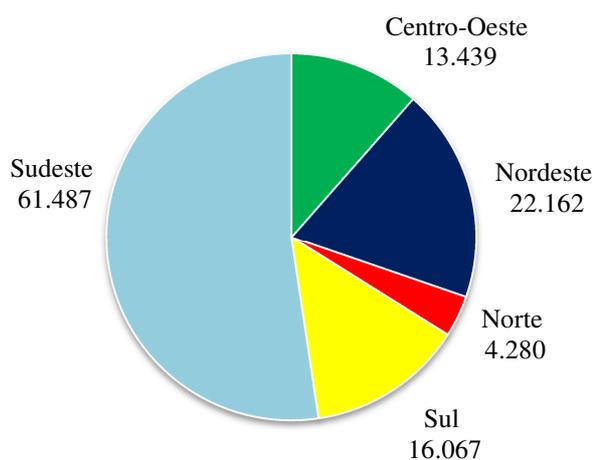


Figura 1 – RCC coletado nas Regiões do Brasil – ton/dia

Fonte: ABRELPE (2013)

Campos (2006) apud Buttler (2007) cita que 61% do total de resíduos gerados são representados pelos resíduos de construção e 28% por resíduos domiciliares. Desse volume, 59% são originários de reformas, 20% e 21% originários da construção de residências e prédios, respectivamente.

Ressaltam-se, ainda, os problemas provocados pelo grande volume de RCC no que tange à vida útil dos aterros sanitários públicos. Algumas cidades brasileiras vêm perdendo seus aterros sanitários gradativamente em função do volume de RCC gerado em seu território, fato que implica na necessidade de métodos para gerenciar e reduzir o desperdício.

De acordo com a Resolução nº 307/431/448 do CONAMA (BRASIL, 2002), os resíduos da construção civil são classificados, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, bem como telhas e demais materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Através da lei 12305/2002, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos econômicos aplicáveis.

Dentro dessa política, está a instituição do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, com atualização a cada 4 (quatro) anos. Este plano apresenta o diagnóstico da situação dos resíduos sólidos no Brasil, cenários macro-econômicos e institucionais, diretrizes e estratégias, bem como as metas para destinação final ambientalmente adequada de rejeitos.

Boscov (2008) aponta que o material reciclado pode ser utilizado como concreto não estrutural, argamassa de assentamento e revestimento, e cascalho de estradas, assim como no preenchimento de valas escavadas para finalidades diversas. A tecnologia de emprego dos agregados na produção de concreto e de componentes pré-fabricados como blocos de pavimentação, meios-fios e blocos de alvenaria deve ser melhor pesquisada, pois a variabilidade de sua composição exige considerações especiais, como caracterização de cada lote, análise estatística de parâmetros ou estabelecimento de requisitos mínimos de aceitação.

2.3 SOLO

2.3.1 Origem

Segundo Pinto (2006), os solos são constituídos por um conjunto de partículas com água (ou outro líquido) e ar nos espaços intermediários. As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar entre si, sendo que o comportamento dos solos depende da quantidade relativa de cada um dos seus componentes (sólidos, água e ar) e do movimento dessas partículas sólidas.

De acordo com Das (2011), intemperismo é o processo de desgaste rochoso por meio de processos mecânicos e químicos. Importante observar que no intemperismo mecânico não há alteração na composição química, enquanto no intemperismo químico, os minerais originais da rocha são transformados em novos minerais.

Caputo (2008a) aponta que a desintegração mecânica ocorre através de agentes como a água, temperatura, vegetação e vento, formando-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias), e, somente em condições especiais, as argilas (partículas finas).

A decomposição química promove a modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água, a qual age por mecanismos de oxidação, hidratação, carbonatação e efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição.

Desta forma, o solo é determinado em função da rocha-mãe e dos diferentes agentes de alteração.

2.3.2 Propriedades

Diversas propriedades dos solos descrevem suas características e comportamentos, tais como: granulometria, composição mineralógica, estrutura, limites de consistência e compactação.

2.3.2.1 Granulometria

A primeira característica que diferencia os solos, segundo Pinto (2006), é o tamanho das partículas que o compõe. Num solo, geralmente, convivem partículas de diversos tamanhos. Denominações específicas são empregadas para as diversas faixas de tamanhos de grãos, entretanto, seus limites variam conforme os sistemas de classificação. O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

Caputo (2008a) também apresenta que as frações constituintes dos solos recebem designações próprias em função das dimensões de suas partículas. A análise granulométrica constitui-se da determinação das dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, representada pela curva granulométrica.

Os limites das frações de solo em função do tamanho dos grãos, indicados pela ABNT NBR 6502 (1995), são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do tamanho dos grãos de solo

Fração	Tamanho dos grãos
Pedregulho	De 60 mm a 2,0 mm
Areia grossa	De 0,6 mm a 2,0 mm
Areia média	De 0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	De 0,06 mm a 0,2 mm
Silte	De 0,002 mm a 0,06 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: ABNT 6502 (1995)

Diferentemente desta terminologia adotada pela ABNT, a separação entre as frações silte e areia é usualmente tomada como 0,075 mm, correspondente à abertura da malha da peneira n° 200, que é a mais fina utilizada nos laboratórios. A fração fina do solo é representada pelo conjunto de silte mais argila, enquanto a fração grossa é constituída pelo conjunto de areia e pedregulho.

Nas frações grossas do solo, como as areias, encontramos grãos de quartzo de forma arredondada, ou angulares. São agregados não coesivos de fragmentos de rochas ou minerais constituídos de grãos de até 2 mm.

Nas frações finas ou muito finas de um solo, segundo Terzaghi & Peck (1961) apud Grande (2003), qualquer partícula consiste, em geral, de um só mineral. São partículas friáveis, frequentemente de forma achatada, angular, lamelar ou em agulhas.

Podemos dividir os solos finos em dois grandes grupos: SILTES, com granulometria entre 0,002 mm e 0,075 mm, cujos grãos apresentam pouca ou nenhuma plasticidade; e as ARGILAS, compostas por agregados de partículas microscópicas (partículas menores do que 0,002 mm).

Importante ressaltar que uma adequada classificação dos solos deve levar em conta o diâmetro das partículas, bem como suas propriedades físicas, baseado no propósito de sua utilização.

2.3.2.2 Composição mineralógica

O comportamento mecânico de um solo pode ser descrito em função de sua granulometria. No entanto, partículas que apresentam a mesma forma e estrutura podem apresentar comportamentos diferentes devido à composição mineralógica.

Caputo (2008a) aponta que os minerais encontrados nos solos são os mesmos das rochas de origem, além de outros formados pela sua decomposição. Os principais minerais

encontrados nos solos grossos são os silicatos, os óxidos, os carbonatos e os sulfatos. Dentro dos solos finos, as argilas apresentam uma complexa constituição química, formada por argilo-minerais (caolinitas, montmorilonitas e ilitas).

Pedregulhos e areias fornecem ao solo atrito interno. São grãos constituídos por minerais resistentes ao intemperismo, em geral, o quartzo é o mais comum. É fato que solos arenosos necessitam de menores teores de cimento para a sua estabilização, pois apresentam melhor comportamento mecânico. (GRANDE, 2003)

A origem e ocorrência desses argilo-minerais dependem das condições ambientais (clima, drenagem e escoamento de águas no solo) e, de acordo com Grande (2003), a sua influência no solo-cimento é, de fato, determinante, pois as argilas montmorillonitas mesmo em baixas concentrações são capazes de causar reações expansivas na pasta de cimento, que ocasionam desagregações no compósito.

2.3.2.3 Estrutura

Caputo (2008a) define estrutura como sendo o arranjo ou a disposição das partículas constituintes do solo. Os solos podem apresentar estrutura granular simples, alveolar, floclenta ou em esqueleto.

As areias e pedregulhos apresentam estrutura granular simples, predominando as forças de gravidade na disposição das partículas, que se apoiam diretamente umas sobre as outras. A estrutura alveolar é comum nos siltes mais finos e em algumas areias, onde um grão cai sobre o sedimento já formado e mantém-se nesta posição devido à predominância da atração molecular sobre o seu peso.

A estrutura floclenta ocorre apenas em solos com partículas muito pequenas, fazendo com que ocorra a formação de arcos que se sedimentam uns sobre os outros. A estrutura em esqueleto ocorre nos solos onde, além de grãos finos, há grãos mais grossos, dispostos de forma que os interstícios são parcialmente ocupados pelos grãos mais finos.

A ocupação dos vazios existentes entre as partículas pode ser realizada pelo ar e pela água. Genericamente, classifica-se a água da seguinte maneira, conforme Caputo (2008a):

- Água de constituição: faz parte da estrutura molecular da partícula sólida;
- Água adsorvida: refere-se a película de água que envolve e adere fortemente a partícula sólida;
- Água livre: é a que se encontra em uma determinada zona do terreno, preenchendo todos os vazios;

- Água higroscópica: é a que ainda se encontra em um solo seco ao ar livre;
- Água capilar: é aquela que nos solos de grãos finos sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas sólidas, além da superfície livre da água.

Compreender a importância da água na configuração da estrutura do solo permite avaliar incidentes patológicos característicos em solo-cimento, como, por exemplo, o surgimento de fissuras devido à retração por secagem. Além disso, o conhecimento das estruturas permite o entendimento de diversos fenômenos, como por exemplo, a compactação das areias, a sensibilidade das argilas, a permeabilidade, etc.

2.3.2.4 Limites de consistência

Segundo Das (2011), quando existe a presença de materiais argilosos em um solo granular fino, esse pode ser remoldado na presença de alguma umidade sem desagregar. Essa natureza coesiva é causada pela água adsorvida ao redor das partículas de argila. Desta forma, com teores de umidade muito baixos, o solo se comporta como um sólido, enquanto com teores de umidade elevados, o solo e a água podem fluir como um líquido.

Os limites de consistência permitem a identificação dos estados físicos de uma amostra de solo, quando submetida à ação da umidade. O limite de liquidez (LL) caracteriza a passagem do estado plástico para o estado líquido e o limite de plasticidade (LP) é caracterizado pelo momento em que, se retirada, progressivamente, a umidade do solo, este passa do estado plástico para o estado semi-sólido. À diferença entre o LL e o LP denomina-se índice de plasticidade (IP).

De acordo com Burmister (1949) apud Das (2011) o índice de plasticidade pode ser classificado qualitativamente, como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do índice de plasticidade

IP	Descrição
0	Não plástico
1-5	Ligeiramente plástico
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: DAS (2011)

2.3.2.5 Compactação

Segundo Caputo (2008a) entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios, promovendo o aumento de sua resistência, tornando-o mais estável.

Ao realizar a compactação do solo, sob diferentes condições de umidade e para uma determinada energia de compactação, obtém-se uma curva de variação dos pesos específicos aparentes secos (γ_d) em função da umidade (w), denominada curva de compactação. Esta curva mostra que há um determinado ponto onde γ_d é máximo, ao qual corresponde uma umidade denominada por umidade ótima ($w_{ót}$). Desta forma, para cada solo, sob uma dada energia de compactação, existem, uma $w_{ót}$ e um $\gamma_{d,máx}$.

Proctor, em 1933, propôs um ensaio para determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo de um solo. Este ensaio, hoje em dia conhecido como ensaio normal de Proctor, padronizado pela ABNT, consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, com aproximadamente 1000 cm³, em três camadas sucessivas, sob a ação de 26 golpes de um soquete, pesando 2,5kg, caindo de 30,5 cm de altura.

O ensaio é repetido para diferentes teores de umidade, determinando-se o peso específico aparente seco em cada uma delas. Com os resultados obtidos traça-se a curva $\gamma_d = f(w)$, de onde retiramos o $\gamma_{d,máx}$ e a $w_{ót}$.

2.3.3 Estabilização dos solos

De acordo com Vargas (1977), a estabilização dos solos é o processo pelo qual o solo adquire maior resistência às cargas ou ao desgaste ou à erosão, utilizando-se de compactação adequada, correção da granulometria e da plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de seus grãos.

Ainda, de acordo com Caputo (2008b), a estabilização do solo permite aumentar a resistência do solo, atuando no ângulo de atrito interno ou na coesão ou em ambos. Esses parâmetros dependem de três fatores: granulometria, compacidade e umidade.

Na granulometria a fração grossa contribui como elemento inerte, atuando sobre o atrito interno, enquanto que a fração fina contribui como elemento aglutinante influenciando na coesão.

A compacidade permite melhorar a qualidade do solo, não apenas em relação à resistência, mas também à permeabilidade, compressibilidade e absorção de água.

A umidade influencia predominantemente na coesão do solo, demonstrando a influência do percentual da fração fina no seu comportamento.

Vargas (1977) aponta que para serem considerados solos estabilizados, é necessário que o possível ligante desses solos não seja muito ativo, pois caso umedecidos, haveria expansão ou retração, destruindo a estabilidade. Desta forma, os solos finos devem ter plasticidade limitada a um índice de plasticidade inferior a 6 e um limite de liquidez inferior a 25.

Dentre os tipos de estabilização citam-se: a estabilização mecânica e a estabilização por adição de aglutinantes.

Na estabilização mecânica (ou estabilização granulométrica), a granulometria do solo é conservada ou corrigida pela mistura com um ou mais solos, antes da compactação, de forma a aumentar a coesão ou o ângulo de atrito interno, ou ambos os parâmetros.

Na estabilização por adição de aglutinantes são adicionadas ao solo substâncias que aumentam a sua coesão ou promovem sua impermeabilização, impedindo a redução de sua resistência devido à influência da água. Para a primeira finalidade, emprega-se o cimento, a cal ou produtos betuminosos; para a segunda, as resinas, os produtos betuminosos ou produtos químicos.

2.3.3.1 Solo-cimento

De acordo com a ABCP (1998), solo-cimento é o material endurecido resultante da mistura homogênea e compactada de solo, cimento e água, em proporções adequadas obtidas através de ensaios específicos ou determinados pela experiência local. O produto obtido apresenta boas características quanto à resistência à compressão, à durabilidade e impermeabilidade, além de baixa retração volumétrica, quando submetido à cura adequada.

O solo é o componente da mistura que entra em maior quantidade. A proporção de cimento varia de 5% a 10% em massa, de forma a garantir a estabilização do solo, conferindo-lhe as propriedades desejadas. Recomenda-se, ainda que, sejam ensaiados três teores, diferindo entre si de dois pontos percentuais para a escolha da dosagem adequada. (ABCP, 1998, p. 7).

A dosagem do solo-cimento é feita em corpos de prova compactados no cilindro Proctor como no ensaio normal de compactação. De acordo com Vargas (2007), um corpo de prova com teor de cimento que lhe confira uma resistência de 20 kgf/cm² ao final de uma cura de 7 dias, apresentará resultados satisfatórios em relação à sua durabilidade.

Na Tabela 4 podem ser verificadas as resistências e os módulos de elasticidade para diferentes teores de cimento e tipos de solo.

Tabela 4 - Resistência à compressão simples e módulo de elasticidade médio em corpos de prova de solo-cimento

Tipo de solo	% cimento	R _s (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)
A1	4	21	3500
A2/4	4	21	63000
A2/4	6	46	84000
A3	8	35	-
A4	8	35	35000
A4	11	49	42000
A6	6	34	56000
A6	8	44	63000
A7/6	8	28	-

Fonte: VARGAS (1977)

A ABCP (1999) promoveu um estudo de módulo de elasticidade do solo-cimento em painéis de alvenaria, o qual atingiu valores de 2.000 kg/cm² a 4.500 kg/cm².

O estudo da dosagem de solo-cimento permite a fixação dos seguintes parâmetros: quantidade de cimento a ser adicionada, quantidade de água a ser incorporada à mistura e a massa específica aparente a ser alcançada após a compactação.

Todas as variedades de solo apresentam uma melhoria de propriedades mecânicas quando devidamente misturados com cimento e compactados. No entanto, existem limitações ao uso de determinados tipos de solo, por razões de trabalhabilidade e de consumo de cimento. Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade. Quanto maior o valor destes limites, mais dificuldades no destorroamento, mistura e na secagem (quando necessária) serão encontradas.

O consumo de cimento depende do tamanho dos grãos do solo e de sua uniformidade. O acréscimo nos teores de silte e argila, ou a ocorrência de grãos com tamanhos uniformes, acarretam em aumento nos teores de cimento. No entanto, os solos devem ter um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento compactado é devida à coesão da fração fina compactada, uma vez que ainda não se processaram as reações de endurecimento do cimento.

2.4 ALVENARIA

A alvenaria é um sistema composto por materiais distintos que interagem entre si para responder às cargas verticais e horizontais produzidas pelo peso próprio, ventos ou sismos durante a vida útil, cuja natureza resistente é frágil à tração. Como se trata de um material composto, anisotrópico e heterogêneo, surgem dificuldades em determinar o seu comportamento.

Salienta-se que o comportamento do conjunto não depende apenas da qualidade de cada material empregado, mas também das interações físico-químicas entre os materiais constituintes. Desta forma, o comportamento da alvenaria deve ser analisado como um material compósito, fruto da interação da unidade, da argamassa, e, quando utilizado, do graute.

O conhecimento existente sobre alvenaria é limitado e não existem regras simples que possam antecipar todas as situações. Assim como a resistência à compressão é utilizada para caracterizar o concreto, é possível determinar a resistência à compressão da alvenaria através do ensaio de prismas, pequenas paredes e paredes, ou ainda, através de equações resultantes de teorias baseadas em dados experimentais.

2.4.1 Conceituações preliminares

No intuito de estabelecer uma linguagem comum, esta pesquisa utilizará as seguintes conceituações durante seu desenvolvimento:

Componente é a menor parte constituinte da alvenaria. Os principais são: bloco/tijolo, junta de argamassa, graute e armadura. Cada material possui propriedades mecânicas individuais, que serão mobilizadas conforme o estado de tensões que for aplicado à alvenaria. Nesta pesquisa, os componentes analisados serão o tijolo e a argamassa.

Elemento é o conjunto de componentes, representado aqui pelo prisma de alvenaria, ou seja, dois blocos unidos por uma junta horizontal de argamassa. Estes elementos servem para previsão da resistência última das alvenarias, na ausência de resultados obtidos com paredes. Nesta pesquisa, o elemento é representado pelo prisma.

Parede é o elemento laminar que resiste predominantemente a carregamentos de compressão e cuja maior dimensão da seção transversal exceda cinco vezes a menor dimensão. Podem ser estruturais (toda parede admitida como participante da estrutura) e não estruturais (toda parede não admitida como participante da estrutura).

Tijolo é um componente básico da alvenaria, também designado por unidade.

Argamassa é o componente composto por areia, água e um ou mais aglomerantes (cimento, cal, cimento e cal) que, por suas características plásticas, de aderência a materiais porosos e endurecimento após certo tempo, é utilizado para unir os blocos ou tijolos, formando as juntas de argamassa.

Área bruta é a área do componente ou elemento considerando-se as suas dimensões externas, desprezando-se a existência dos vazados.

Área líquida é a área de um componente ou elemento considerando-se as suas dimensões externas, descontada a existência de vazios.

Área efetiva é a área de um componente ou elemento considerando apenas a região sobre a qual a argamassa de assentamento é distribuída, desconsiderando os vazios.

Fator de eficiência é definido como sendo a relação entre a resistência à compressão axial do prisma (f_p) pela resistência do tijolo (f_t).

Deformação específica refere-se à grandeza adimensional que representa a variação do comprimento da base de medida em relação ao seu comprimento inicial.

Módulo de elasticidade representa o coeficiente de proporcionalidade entre a tensão e a deformação sob um carregamento.

Resistência à compressão axial da alvenaria é o valor limite da capacidade da alvenaria suportar cargas verticais aplicadas ao longo do seu plano axial longitudinal, sendo abreviado para resistência à compressão.

2.4.2 Alvenaria de tijolos de solo-cimento

A terra como material de construção é uma manifestação marcante das possibilidades de utilização de recursos naturais abundantes na convivência do homem com a natureza.

Várias obras executadas em terra alcançam nossos dias desafiando séculos de ação abrasiva de ventos e chuvas: na China, a Grande Muralha; na Índia e no Paquistão, descobriu-se um edifício construído em terra há três mil anos; na Babilônia, Mesopotâmia e no Egito, encontram-se blocos usados na construção de arcos e domos. (ABCP, 1999, p. 18)

As primeiras tentativas de formulação de uma tecnologia de construção com terra aparecem na Rússia, em 1870, quando foi criada em Nikolsk uma escola para ensino de métodos de construção com terra; outra manifestação ocorreu em 1806, quando nos Estados Unidos é escrito um livro sobre construção com terra compactada. Na França e na Alemanha também aparecem alguns livros-texto de construção com terra, no início do século XIX.

O desenvolvimento das facilidades de transporte, o surgimento da produção industrial de materiais duráveis e a abolição da mão-de-obra escrava contribuíram para o declínio da técnica construtiva em terra, provocando sua substituição por padrões estéticos ditados por novos materiais. Porém, entre populações menos favorecidas, tais técnicas sobreviveram justamente em função dos altos custos da construção no mercado.

Após as duas primeiras guerras, essa técnica construtiva passa a ser revivida. No Brasil, as construções com terra constituem a grande maioria de nossa arquitetura colonial. O emprego do solo-cimento em habitações foi iniciado no Brasil em 1948, com a construção das casas do Vale Florido, na Fazenda Inglesa, em Petrópolis/RJ. O excelente estado de conservação atual daquelas construções atesta a durabilidade dessa técnica construtiva. (ABCP, 1998, p. 5)

Em 1950, foi executado um hospital com 10.800 m² na cidade de Manaus, utilizando a técnica construtiva do solo-cimento, conduzida pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

O principal requisito de um solo-cimento é resistir às variações das condições climáticas. Assim, o elemento produzido deverá possuir um teor de cimento adequado à durabilidade exigida. Nota-se que o acréscimo do teor de cimento ocasiona a redução de perda de massa nos ensaios de durabilidade. Ainda, a resistência à compressão cresce linearmente com o teor de cimento, para idades até 6 meses. (ABCP, 1983, p. 16)

Os solos arenosos requerem, quase sempre, menores quantidades de cimento do que os argilosos e siltosos. Ressalta-se, entretanto, que a presença de argila na composição do solo é necessária para dar à mistura de solo e cimento, quando umedecida e compactada, coesão suficiente que permita a desmoldagem e o manuseio dos blocos e tijolos após a prensagem.

Moliterno (1995) classifica as alvenarias em não estruturais ou vedação e alvenarias estruturais ou portantes. As alvenarias não estruturais são empregadas como revestimento na proteção de taludes e como paredes de fechamento e divisórias. Neste grupo podem ser encontradas as alvenarias de: pedra arrumada, blocos de concreto articulados, tijolos furados, concreto leve e taipa de mão.

As alvenarias estruturais ou portantes são estruturas que colaboram para absorver ações secundárias como: ventos, variações térmicas, recalques diferenciais etc. Neste grupo estão agrupadas as alvenarias de: pedra argamassada, tijolos maciços, adobe, taipa de pilão, blocos vazados de concreto, blocos sílico-calcário, concreto simples concreto ciclópico e blocos de solo-cimento.

Na Figura 2 e na Figura 3 visualizam-se, respectivamente, exemplos de dois sistemas: alvenaria convencional e a alvenaria executada em tijolos de solo-cimento. Como pode ser observada, uma das principais diferenças consiste no modelo de transmissão de esforços da

estrutura, pois, enquanto na alvenaria convencional o sistema estrutural é composto por lajes, vigas e pilares que recebem os esforços atuantes; na alvenaria executada em tijolos de solo-cimento as cargas são recebidas pela alvenaria que apresenta componentes especiais (linhas de grautemento) que ajudam a distribuir as cargas.



Figura 2 - Sistema em alvenaria convencional

Fonte: Autora (2015)



Figura 3 - Sistema em alvenaria com tijolos de solo-cimento

Fonte: Autora (2015)

2.4.2.1 Tijolo de solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento representam uma alternativa para a construção da alvenaria em edificações e sua viabilidade de produção depende da presença de solos adequados à sua confecção.

A terra passou a ser usada de forma comprimida quando o colombiano G. Ramires criou a prensa manual para a fabricação de tijolos, a CINVA-RAM. Ela foi inventada quando este trabalhava no Chile no Centro Interamericano de Vivienda y Planejamento – CINVA em 1961. A partir daí iniciou o desenvolvimento da tecnologia de prensas manuais e hidráulicas para fabricação de diversos tipos de tijolos e blocos de solo-cimento compactado. (GRANDE, 2003, p. 39)

A qualidade dos tijolos de solo-cimento prensado depende da compactação dos grãos, que promovem uma alta densidade e baixa porosidade. Diversas pesquisas apontam a inserção de outros materiais na composição do tijolo de solo-cimento, como: casca de arroz, resíduos do beneficiamento do granito, resíduos da construção civil entre outros.

A Figura 4 mostra o tijolo de solo-cimento-RCC produzido para esta pesquisa, executado em uma prensa hidráulica da marca EcoMáquinas.



Figura 4 - Exemplar de tijolo de solo-cimento-RCC

Fonte: Autora (2015)

De acordo com a ABNT NBR 8491 (2012), tijolo de solo-cimento é a unidade da alvenaria constituída pela mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água, e eventualmente, aditivos e/ou pigmentos, cuja altura (h) seja menor que sua largura (L). Podem ser maciços ou vazados. Quando a altura for maior que a largura a unidade será denominada bloco.

O tijolo vazado de solo-cimento apresenta furos verticais, cujo volume total é inferior a 85% do volume total aparente e a espessura mínima das paredes em seu entorno é de 25 mm. No tijolo maciço o volume será igual ou superior a 85% do seu volume total aparente.

Os tijolos devem ser fabricados de forma a ter arestas vivas e sem apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que possam comprometer o assentamento, a resistência ou a durabilidade da alvenaria.

O solo inicialmente é preparado, através da desagregação dos torrões e da eliminação do material retido na peneira ABNT 4,8 mm. No preparo da mistura, o solo e o cimento devem ser homogeneizados até obter-se uma coloração uniforme. A água deve ser adicionada por aspersão até atingir a umidade ideal.

A mistura obtida é transferida do misturador para uma prensa, onde um molde dará forma à peça (tijolo ou bloco). Após a prensagem, a peça deve ser armazenada em pallets e

mantida em período de cura à sombra. Após seis horas da moldagem e durante os sete primeiros dias, as peças devem ser umedecidas de forma constante, a fim de garantir uma cura eficiente.

As prensas hidráulicas utilizadas podem ser com um sentido ou duplo sentido de compactação. As prensas com um sentido de compactação são recomendadas para peças até 80 mm de altura, enquanto as prensas com duplo sentido de compactação podem ser utilizadas para obter peças de até 200 mm.

Segundo ABCP (1989), as principais vantagens dos tijolos e blocos de solo-cimento são:

- a) Podem, em geral, ser produzidos com o solo do local da aplicação (ou região) e no próprio canteiro de obra, reduzindo-se ou eliminando-se o custo de transporte;
- b) A regularidade de suas formas, a planeza e a lisura de suas faces requerem argamassa de assentamento e de revestimento de espessura mínima e uniforme;
- c) Podem dispensar o uso de revestimento, desde que protegidos da ação direta da água, sendo, portanto, recomendáveis para paredes com elementos à vista;
- d) Não consomem combustível na fabricação, por dispensar a queima;
- e) Não necessita mão-de-obra especializada.

A ABNT NBR 8491 (2012) apresenta as dimensões nominais que os tijolos devem atender, conforme Tabela 5. Sugere ainda que, os tijolos podem apresentar dimensões diferentes das estabelecidas, desde que permaneça com a altura menor que a sua largura.

Tabela 5 - Tipos e dimensões nominais de tijolos de solo-cimento

Tipos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
A	200	100	50
B	240	120	70

Fonte: ABNT NBR 8491 2012)

A utilização dos tijolos na execução da alvenaria é recomendada após 14 dias de sua fabricação.

Os solos ideais para produção de tijolos de solo-cimento adequados, segundo a ABNT NBR 10833 (2012), têm que possuir:

- 100% do material passante na peneira com abertura de malha de 4,8 mm;
- 10% a 50% do material passante na peneira com abertura de malha 0,075 mm;
- Limite de liquidez menor que 45%;

- Índice de plasticidade menor que 18%.

O desenvolvimento dos sistemas de produção de tijolos de solo-cimento permite viabilizar programas habitacionais, uma vez que pode ser executado por mão de obra local.

“A resistência à compressão é, em geral, superior à do tijolo convencional, assim também como a qualidade e o aspecto final das peças, com maior regularidade dimensional e planicidade de suas faces.” (SOUZA, 2006, p. 29)

De acordo com Rodrigues (2008), os tijolos de solo-cimento oferecem, ainda, conforto térmico e acústico superior ao das construções convencionais e redução de desperdícios nos canteiros de obras gerando menor quantidade de entulho.

Segundo Walker (1994) apud Rodrigues (2008) tijolos deste material (utilizando 10% de cimento) consomem 0,1 MJ/kg de energia, enquanto que os tijolos cerâmicos, com queima em forno, consomem de 8 a 16 vezes mais energia, o que ressalta a importância dessa tecnologia do ponto de vista ambiental e social.

A ABNT NBR 8491 (2012) apresenta requisitos específicos para as seguintes propriedades dos tijolos de solo-cimento: análise dimensional, resistência à compressão e absorção de água. Os limites estabelecidos e o número de amostras podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites especificados para tijolos de solo-cimento

Propriedade	Número de amostras	Aceitabilidade
Resistência à compressão	7	Valor médio $\geq 2,0$ MPa
		Valor individual $\geq 1,7$ MPa
Absorção de água	3	Valor médio $\geq 20\%$
		Valor individual $\geq 22\%$
Variação dimensional	10	± 1 mm para comprimento, largura e altura

Fonte: adaptada da ABNT NBR 8491 (2012)

2.4.3 Fatores que influenciam na resistência da alvenaria

Construções em alvenaria utilizam tijolos/blocos, argamassa, graute, armaduras, telas entre outros materiais, como por exemplo, os de impermeabilização. Desta forma, existem vários fatores que influenciam na resistência à compressão da alvenaria e no seu desempenho em longo prazo. A seguir serão abordadas algumas propriedades básicas dos tijolos e da argamassa, as quais serão apresentadas e discutidas nesta pesquisa.

2.4.3.1 Resistência à compressão do tijolo

A resistência à compressão é utilizada há muito tempo como a principal medida da qualidade de um tijolo, bem como, indiretamente, para prever as demais características da alvenaria. Porém, é importante ressaltar que o aumento da resistência dos tijolos não representa incrementos proporcionais de resistência na alvenaria.

Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) relatam que ensaios de resistência à compressão realizados com capeamento rígido e carregamento em toda a face vertical resultam em um formato de ruptura cônico. No caso de ensaios de tijolos de solo-cimento, a ABNT NBR-8492 indica que o capeamento deve ser feito sobre toda a face do tijolo.

Resultados observados por Juste (2001) em estudos realizados em blocos de concreto por diversos pesquisadores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Estudos da resistência e do fator de eficiência em alvenaria de blocos de concreto

Autor	Resistência da alvenaria	Fator de eficiência
Medeiros (1993)	-	25 a 75%
Hendry (1981)	$\sqrt{f_b}$	-
Salin (1971)	-	25 a 50%

Fonte: JUSTE (2001)

O ensaio à compressão dos tijolos normalmente requer que estes sejam capeados para reduzir a rugosidade e a falta de planicidade das faces.

A ABNT NBR-8492 (2012) normatiza a execução do ensaio à compressão simples em tijolos de solo-cimento. A amostra é composta por sete corpos de prova que devem ser ensaiados da seguinte maneira:

- a) Cortar o tijolo ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão;
- b) Superpor, por suas faces maiores, as duas metades obtidas e as superfícies cortadas invertidas, ligando-as por uma fina camada de pasta de cimento Portland, com espessura de 2 a 3 mm, e aguardar o endurecimento da pasta.
- c) O corpo de prova deve apresentar suas faces planas e paralelas, podendo ser regularizadas por meio de capeamento com pasta de cimento Portland, com espessura máxima de 3 mm.
- d) Após o endurecimento do material utilizado, os corpos de prova devem ser identificados e imersos em água por no mínimo 6 h.

- e) As dimensões das faces de trabalho devem ser determinadas com exatidão de 1 mm, sem o desconto das áreas dos furos ou reentrâncias.
- f) A aplicação da carga deve ser gradativamente elevada até ocorrer a ruptura do corpo de prova.

No caso de blocos, “a resistência da alvenaria à compressão cresce consideravelmente com a resistência dos blocos. Entretanto, o aumento de resistência das alvenarias não é linearmente proporcional ao aumento de resistência dos blocos.” (PASQUALI, 2007, p. 29)

2.4.3.2 Características da argamassa

De acordo com Sanchez (2013) as propriedades mecânicas das argamassas contribuem de forma significativa na resistência da alvenaria, já que o mecanismo de ruptura da parede está diretamente ligado à interação entre juntas e os blocos.

A argamassa permite o apoio uniforme e a aderência entre um bloco e outro, garantindo o bom desempenho das alvenarias. Argamassas constituídas somente por cimento apresentam características inadequadas que comprometem a sua durabilidade, exceto em condições específicas. Argamassas mistas (cimento e cal) melhoram as propriedades do produto final, são mais econômicas e tecnicamente corretas.

Desta forma, argamassa pode ser definida como a mistura de um ou mais aglomerantes com o agregado miúdo e a água e, eventualmente, um aditivo responsável por melhorar alguma propriedade do produto final. São compostas por um material ativo (pasta) e um material inerte (agregado miúdo).

O processo de escolha da argamassa leva em conta dois fatores antagônicos: resistência e capacidade de acomodar deformações. Desta forma, ao aumentar a quantidade de cimento eleva-se a sua resistência, porém sua trabalhabilidade e capacidade de acomodar deformações ficam comprometidas. De maneira inversa, aumentando a quantidade de cal, melhora-se a capacidade de deformação e a trabalhabilidade, comprometendo a resistência da argamassa.

No estado endurecido, a resistência à compressão é uma propriedade importante, pois seu resultado influencia na resistência à compressão da alvenaria.

O Eurocode 6 (2002) apud Sanchez (2013) recomenda que as argamassas de assentamento para uso em alvenaria estrutural armada não devem ter resistência à compressão menor do que 2 N/mm^2 .

A ABNT NBR 15812-1 (2010) designa as argamassas destinadas ao assentamento de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, bem como estabelece a resistência mínima à compressão de 1,5 MPa e o máximo limitado a $0,7.f_{bk}$ (resistência característica do bloco) referida à área líquida.

Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) indicam, de maneira geral, a utilização de argamassas com resistência à compressão dentro de uma faixa de 0,7 a 1,5 vezes o valor da resistência característica do bloco. Na Tabela 8, pode-se verificar a recomendação de alguns traços, resistências e usos.

Tabela 8 - Alguns traços, resistência à compressão e uso de argamassas de cimento, cal e areia

Traço (cimento:cal:areia) em volume	Resistência à compressão esperada aos 7 dias (MPa)	Resistência à compressão esperada aos 28 dias (MPa)	Uso recomendado
1:0,25:2,5	9 a 11	14 a 17,5	Argamassa de alta resistência, baixa deformabilidade, recomendada apenas para alvenaria de resistência muito elevada (blocos acima de 20 MPa). Pode eventualmente ser necessária para elementos enterrados e ambientes muito agressivos com presença de sulfatos.
1:0,5:3,5 a 4,5	5 a 7,5	8,5 a 12,5	Uso geral em elementos em contato com o solo e os que estão sujeitos a ações laterais predominantemente.
1:1:4,5 a 6,0	2 a 3	3,5 a 5	Resistência à compressão moderada e boa deformabilidade. Recomendada para alvenarias não enterradas de resistência à compressão média e ação lateral não predominante. (blocos até 6,0 MPa)
1:2:9	1 a 1,5	2 a 2,5	Baixa resistência à compressão, adequada apenas para alvenaria de vedação ou eventualmente para reparo em edificações históricas.
1:3:12	0,2 a 0,3	0,4 a 0,5	Baixa resistência à compressão, eventualmente adequada apenas para alvenaria de vedação, ou ainda, para reparo em edificações históricas.

Fonte: PARSEKIAN, HAMID E DRYSDALE (2013)

Estudos indicam que ao provocar um grande aumento na resistência à compressão da argamassa (f_a) ocorre um pequeno benefício na resistência à compressão da alvenaria (f_k), segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2013). Por exemplo, um aumento de 100% em f_a normalmente proporciona aumento de menos de 10% em f_k .

De acordo com Sanchez (2013) na execução de prismas e paredes, os valores de consistência devem ser definidos de forma que o assentador consiga manter constante a espessura da junta horizontal, de maneira a ajustar as unidades, resultando em relações água/cimento variáveis.

Estudos desenvolvidos por Tango (1981) apud Juste (2001) ressaltam que o controle da resistência à compressão da argamassa feita em moldes cilíndricos deve ser tratado como um fator de qualidade, pois a resistência desenvolvida na parede não é a mesma, devido às diferenças nas condições de adensamento e cura, ao estado de tensão a que fica submetido e aos fatores circunstanciais, como a absorção de água pelo bloco.

Ensaio realizados em prismas por Mohamad (1998) demonstraram que o aumento de resistência do prisma não é proporcional ao aumento da resistência da argamassa. De acordo com o autor, a variação da resistência do prisma com a resistência do bloco é mais evidenciada quando é utilizada argamassa fraca, ocasionada pela distribuição das tensões surgidas no prisma quando submetido às cargas de ruptura.

Gomes (1974) conclui que a resistência da argamassa deve estar entre 0,7 e 1,0 da resistência do bloco, pois argamassas mais rígidas provocam uma ruptura excessivamente frágil na alvenaria, bem como não absorverá eventuais movimentos da estrutura. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos pelo pesquisador para paredes executadas com um mesmo bloco e dois tipos diferentes de argamassa.

Tabela 9 - Evolução da resistência à compressão (MPa) em blocos

Argamassa	Bloco	Parede
5,10	7,50	2,56
11,97	7,50	2,93

Fonte: GOMES (1974)

A resistência à compressão da argamassa está entre os requisitos de classificação das argamassas da ABNT NBR 13281 (2005) e sua classificação varia de P1 a P6. As normas de projeto e execução de alvenaria estrutural referem-se a este requisito para especificar algumas propriedades físicas da alvenaria, como resistência ao cisalhamento e resistência à tração na flexão.

A ABNT NBR-13279 (2005) prescreve o ensaio para determinação da resistência à compressão em corpos de prova prismáticos (4x4x16) cm de argamassa. Sanchez (2013) constatou por meio de revisão bibliográfica sobre “corpos de prova prismáticos” que os cilíndricos tendem a resultados menores, na ordem de 5%, minimizando os valores de carga.

Observa-se que os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova de argamassa não representam a resistência do material aplicado, uma vez que a quantidade de água que permanece no material após o assentamento varia em função de sua capacidade de retenção de água e da absorção dos blocos. Além disso, tem-se que o

estado de tensões no corpo de prova não reproduz o estado real ao que o material está sujeito quando compoendo uma junta de alvenaria.

No estado fresco, a trabalhabilidade da argamassa representa uma importante propriedade, sendo função do índice de absorção inicial do bloco, da retenção de água e do tempo de endurecimento da argamassa, além das condições ambientais durante a construção. Na obra, sua avaliação depende da sensibilidade e experiência do pedreiro.

Em laboratório, uma maneira de avaliar a trabalhabilidade é através do ensaio de consistência, descrito na ABNT NBR 13276 (2005). Neste ensaio, a argamassa é moldada em um tronco de cone e submetida a uma série de 30 golpes durante 30 segundos em uma mesa de consistência. Após o ensaio, é medido o diâmetro do cone espalhado. Os valores para boa trabalhabilidade normalmente encontram-se na faixa de 230 mm.

Após testes realizados em argamassas utilizadas em diferentes obras, Prudêncio Jr, Oliveira e Bedin (2002) constataram que o valor da consistência varia entre 230 e 280 mm, o que caracteriza uma faixa bastante ampla, pois o valor da consistência é dependente da composição da argamassa. Observa-se ainda, que uma consistência dentro desses limites, por si só não é garantia de trabalhabilidade.

O módulo de elasticidade permite verificar o deslocamento do material em função de um determinado carregamento. Seu valor é determinado através da declividade da curva tensão-deformação específica do material.

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido, proporcionado pelo cimento hidratado, dependente da razão água/cimento e da disposição/espacos entre as partículas dos agregados devido à forma, à rugosidade dos grãos e teor de material pulverulento; sendo assim, à medida que aumenta a razão de cal/cimento, diminui a densidade de massa causada pelo aumento do teor de cal que produz um aumento no consumo de água. Essa água excedente na mistura não hidrata com o cimento, não participa das reações químicas com os componentes da cal, promovendo o aumento do índice de vazios e a queda do módulo de elasticidade. (SANCHEZ, 2013, p. 146)

Através da análise da argamassa de assentamento por Cheema e Klingner (1986) apud Mohamad (1998), os autores concluem que o módulo de elasticidade tangente da argamassa (E_{at}) pode ser determinado em função da resistência à compressão da mesma, e que o módulo secante (E_{as}) representa metade do módulo tangente, conforme equação:

$$E_{at} = 1000 \cdot f_a \quad (1)$$

$$E_{as} = 500 \cdot f_a \quad (2)$$

Os ensaios apresentados por Glanville e Barnett (1934) e Hildsdorf (1965) apud Juste (2001) apresentam expressões que permitem relacionar o módulo de elasticidade da argamassa com sua resistência à compressão, obtendo as seguintes expressões:

$$E_{at} = 1000. f_a \quad (3)$$

$$E_{at} = 0,0428. \gamma_a^{1,5} \cdot \sqrt{f_a} \quad (4)$$

Onde:

γ_a : massa unitária do concreto em kgf/m³

f_a : resistência à compressão da argamassa

As equações foram obtidas a partir de curvas tensão-deformação experimentais, para concretos com resistência entre 150 e 450 kfg/cm². De acordo com os autores é uma aproximação válida para a maioria das argamassas, sendo recomendada a utilização da equação (3) para argamassas de baixa resistência e a expressão (4) para argamassas de alta resistência.

Khalaf e Fairbain (1992) apud Mohamad (1998) determinaram as propriedades mecânicas para três diferentes tipos de argamassa e encontraram as seguintes expressões:

$$E_{at} = 600. f_a \quad (5)$$

$$E_{as} = 340. f_a \quad (6)$$

Mohamad (1998) apresenta uma formulação obtida experimentalmente para caracterizar as argamassas utilizadas em sua pesquisa. Desta forma, o módulo de elasticidade da argamassa pode ser descrito pela função:

$$E_{as} = -18,9. f_a^2 + 939,4. f_a \quad (7)$$

De acordo com Vasconcelos e Giamusso (1998), através do módulo de deformação pode-se analisar a deformação microscópica do material. Como pode ser observado na Figura 5, as microfissuras ocorrem na zona de transição dos agregados com a pasta de cimento, após

um carregamento superior a 30% da tensão última. Na faixa de 50 a 75% da tensão última, o comportamento do material adquire características não lineares, e ao superar 75%, os agregados perdem aderência com a pasta de cimento, com tendência das microfissuras unirem-se e tornar o sólido instável e sujeito à ruptura.

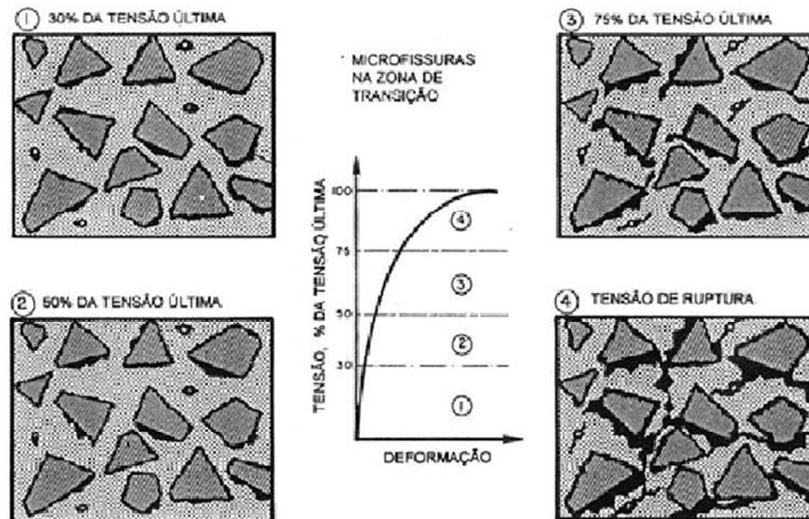


Figura 5 - Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão simples

Fonte: VASCONCELOS E GIAMUSSO (1998)

2.4.3.3 Espessura das juntas horizontais

Estudos diversos apontam a espessura ideal da junta horizontal em 1 cm. Quanto menor a espessura mais resistente a alvenaria, porém juntas horizontais menores que este valor podem não absorver adequadamente as imperfeições executivas. A execução de juntas com espessuras superiores a 1 cm podem diminuir a resistência da alvenaria face ao aparecimento de tensões maiores de tração lateral nos componentes.

Hamid e Drysdale (1979) apud Juste (2001) observaram uma redução de 16% na resistência de prismas de blocos de concreto não grauteados e uma redução de 3% para prismas grauteados, ao realizar estudos sobre o aumento da espessura da junta de argamassa de 10 para 19 mm.

Sahlin (1983) apud Pasquali (2007) aponta que a resistência da alvenaria diminui 15% para cada aumento de 3 mm na espessura da junta e vice-versa.

Mohamad (1998) demonstrou, através de ensaios, um incremento de 32% na resistência do prisma ao diminuir a espessura da junta de argamassa de 1,0 cm para 0,7 cm.

2.4.3.4 Geometria da unidade

Diversos estudos experimentais relatam diferentes resultados para resistência de blocos em função da variação de sua geometria. Blocos vazados, em função da disposição e do tipo dos furos podem apresentar diferentes concentrações de tensões, podendo reduzir a resistência da alvenaria.

Pasquali (2007) reforça o risco da generalização dos resultados realizados com determinado tipo de unidade, pois há um universo amplo de geometrias com comportamentos desconhecidos.

Rizzatti (2003) aponta que não apenas a distribuição geométrica dos componentes, mas também a sua área líquida influenciam na resistência dos prismas. Observa-se que em séries com maior relação área líquida/área bruta, os valores de resistência à compressão aumentam.

2.4.3.5 Tipo de assentamento

O tipo de assentamento é um fator que pode influenciar na resistência da alvenaria, pois pode surgir concentração de tensões em paredes que não tenham sido solidarizadas pela utilização da argamassa, causando redução na resistência do prisma.

Pasquali (2007) ao estudar a influência do tipo de argamassamento em alvenaria estrutural cerâmica encontra maiores valores para os módulos de elasticidade com a utilização de argamassamento pleno, devido à presença de uma maior área de argamassa para resistir aos esforços. Os módulos de deformação variam de 3.409 a 5.185 MPa na utilização de argamassa de 2 MPa e de 3.151 a 5.200 MPa para argamassa de 4 MPa.

Experimentos realizados em prismas por Romagna (2000) permitiram observar a redução média de 22% da resistência à compressão dos prismas quando utilizado o assentamento lateral em detrimento do total.

2.4.4 Mão-de-obra

Estudos demonstram que a escolha da mão-de-obra é um fator muito importante na resistência à compressão da alvenaria. Problemas executivos como produção incorreta das misturas de argamassa, erros de preenchimento e espessura de juntas, perda de alinhamento, prumo e nível, entre outros, podem comprometer a qualidade final da alvenaria.

Gomes (1974) aponta ganhos na ordem de 30 a 60% na resistência das paredes executadas com fiscalização.

2.4.5 Prisma

O comportamento da alvenaria varia de unidade para unidade e com os diferentes tipos de argamassa e graute. Desta forma, o desempenho estrutural de paredes de alvenaria não pode ser avaliado sem a realização de ensaios com prismas, pequenas paredes ou paredes executados com blocos, argamassas e graute de mesma origem e características dos que serão efetivamente utilizados na estrutura.

Testes em paredes na escala real são demasiadamente caros e dependem de estrutura laboratorial de grande porte; portanto, para compreensão do comportamento dos materiais envolvidos, são executados testes em escalas menores em elementos denominados prismas.

A ABNT NBR 15961-1 (2011) define prisma como sendo o corpo de prova obtido pela superposição de blocos unidos por uma junta de argamassa, grauteados ou não; utilizando-se de dois blocos como padrão.

O número mínimo de corpos de prova por tipo de elemento de alvenaria é fornecido na Tabela 10, presente na ABNT NBR 15961-2 (2011).

Tabela 10 - Número mínimo de corpos de prova por tipo de elemento de alvenaria

Tipo de elemento de alvenaria	Número de corpos de prova
Prisma	12
Pequena parede	6
Parede	3

Fonte: ABNT NBR 15961:2 (2011)

O controle da resistência da alvenaria através do ensaio de prismas é determinado por uma amostra de no mínimo 12 prismas, sendo seis utilizados para o ensaio e seis para eventual contraprova.

O comportamento geral dos prismas sujeitos à compressão é representado na Figura 6, que relaciona a evolução das tensões de tração no bloco com as tensões de confinamento da argamassa em função da tensão uniaxial aplicada ao conjunto, ou seja, à medida que se aplica uma força vertical de compressão na alvenaria, surgem tensões de tração no bloco e tensões de compressão na argamassa. A ruptura pode acontecer no bloco por atingir o limite de resistência à tração ou na junta por se atingir a resistência à compressão da argamassa.

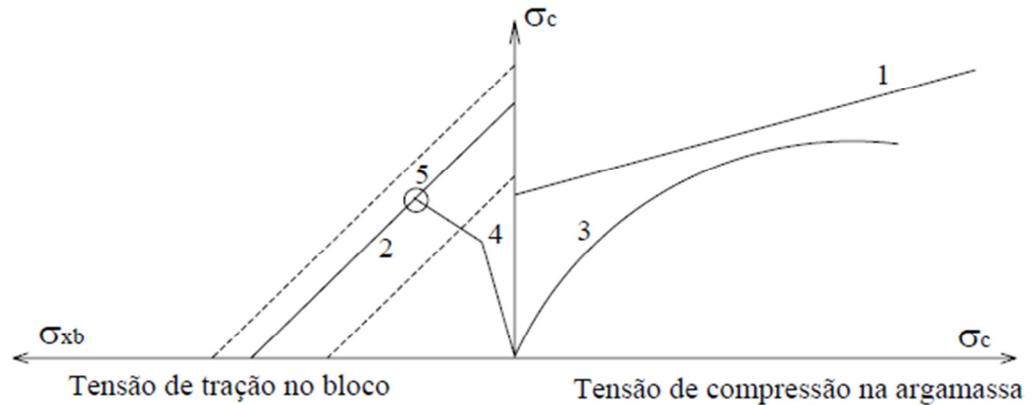


Figura 6 - Comportamento geral dos prismas sob carga de compressão uniforme

Fonte: MOHAMAD (1998)

De acordo com Sanchez (2013), a linha “1” é a envoltória de ruptura da argamassa sob compressão triaxial; a linha “2” é a envoltória de ruptura dos blocos sob compressão e tração biaxial; a linha “3” é a curva de carregamento da argamassa; a linha “4” é a curva de carregamento do bloco; “5” é o ponto em que a ruptura ocorreu por tração no bloco, antes de atingir o esmagamento da junta de argamassa.

Para avaliar a influência da resistência dos blocos na resistência à compressão dos prismas utiliza-se o fator de eficiência, definido por:

$$E_f = \frac{f_p}{f_b} (\%) \quad (8)$$

Onde:

E_f : fator de eficiência prisma/bloco

f_p : resistência à compressão do prisma

f_b : resistência à compressão do bloco

Ramalho e Correa (2008) verificaram uma eficiência de 0,5 a 0,9 ao relacionar a resistência de prismas e blocos.

Juste (2001) observa que o fator de eficiência da alvenaria diminui com o acréscimo da resistência da unidade.

A resistência das paredes em alvenaria é determinada pela resistência de seus componentes. Entretanto, observa-se que o aumento de resistência no bloco não é

proporcional ao acréscimo de resistência da alvenaria. A Figura 7 ilustra a evolução da resistência de cálculo da alvenaria em função do aumento da resistência característica do bloco e do tipo de argamassa, possibilitando a estimativa da carga suportada pela alvenaria.

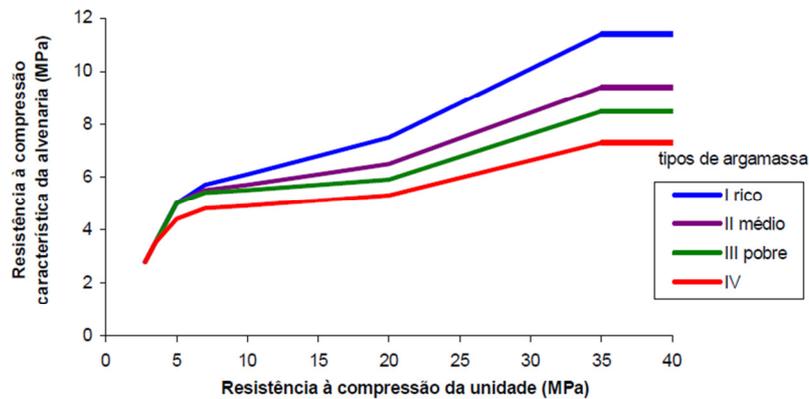


Figura 7 - Estudo da evolução da resistência de cálculo da alvenaria em função da resistência dos materiais constituintes

Fonte: BS 5628 part 1, 1978 apud FONSECA (2002)

Romagna (2000) apud Grohmann (2006) executou ensaios de blocos de concreto com diferentes resistências obtendo os resultados constantes na Tabela 11. Observa-se que ao aumentar a resistência do bloco em 64%, obteve-se um aumento na resistência dos prismas de 37%.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão em blocos de concreto e prismas

Resistência	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
Resistência do bloco (MPa)	10,23	15,86	16,77
Resistencia do prisma (MPa)	7,22	9,10	9,87

Fonte: Romagna (2000) apud Grohmann (2006)

Pesquisas com blocos cerâmicos evidenciam comportamentos semelhantes. Calçada (1998) encontrou incrementos no máximo na ordem de 183% da resistência de prismas comparadas a 110% da resistência de blocos.

Ensaio de prismas com baixa relação altura/largura (menor que 2:1) tendem a ter uma ruptura cônica de cisalhamento-compressão. Esta é similar ao tipo de ruptura comum de cilindros de concreto e pode ser explicada pelo efeito de confinamento pelo atrito com as placas de aplicação de carregamento nas extremidades. (PARSEKIAN; HAMID; DRYSDALE, 2013, p. 234)

Mohamad (2007) apresentou um estudo correlacionando autores que fizeram análises em prismas de blocos, onde pôde verificar que a maioria dos autores utilizou argamassa menos resistente que o bloco e que as resistências encontradas para os prismas foram menores que as resistências observadas nos blocos. Na Figura 6 podem ser observadas as relações entre resistência do bloco, da argamassa e do prisma.

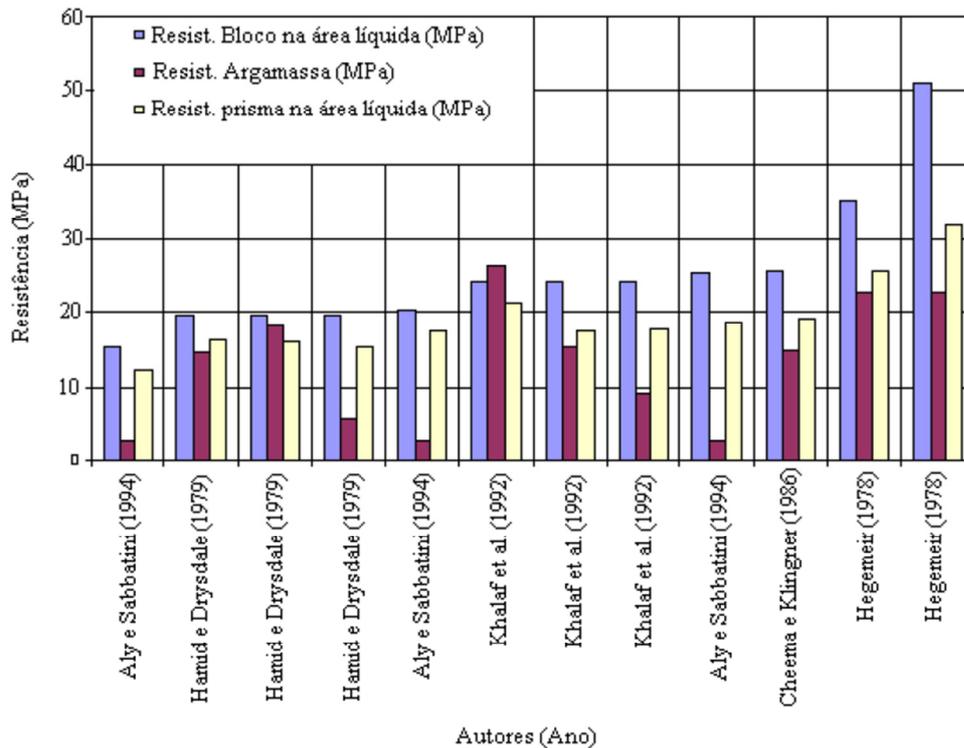


Figura 8 - Resistência à compressão simples de blocos, argamassas e prismas

Fonte: Mohamad (2007)

2.4.6 Modelos de ruptura

O estudo da resistência à compressão da alvenaria é um fator importante no seu dimensionamento, visto que o carregamento vertical combinado com o esforço horizontal deverá ser suportado pela mesma.

Monk (1967) apud Santos (2008), em seus resultados obtidos em testes de laboratório ficou evidente que em praticamente todos os casos em que a ruptura ocorre no bloco cerâmico pelo fendilhamento vertical, as tensões de tração ultrapassam a resistência à tração da unidade. Quando unidades cerâmicas são ensaiadas à compressão, o prato de aço da prensa sendo muito mais rígido do que o bloco, produz nestes deformações laterais de compressão, ocasionando a ruptura por cisalhamento.

Mohamad (1998) aponta que a ruptura em blocos de concreto ocorre devido alguns fatores como: esmagamento e tração na argamassa e tração no bloco.

Santos (2008) cita os trabalhos de vários pesquisadores que estudaram os modelos a fim de explicar o comportamento da alvenaria, entre eles: Hilsdorf (1967); Hamid e Drysdale (1979); Atkinson e Noland (1985); Cheema e Klingnerr (1986). Estes estudos são apresentados a seguir:

a) Modelo de Hilsdorf (1969)

Santos (2008) aponta que Hilsdorf (1969) foi o primeiro pesquisador a chegar a conclusões satisfatórias sobre a forma de ruptura na alvenaria, elaborando um modelo matemático (Figura 9) considerando o comportamento elástico e baseando-se em esforços resistidos pelos componentes da alvenaria.

As hipóteses adotadas foram: comportamento de ruptura semelhante ao critério de Mohr (de acordo com este critério haverá ruptura quando a tensão de cisalhamento se igualar à resistência de cisalhamento); perfeita aderência entre bloco (tijolo maciço) e argamassa; distribuição uniforme de tensões laterais e verticais.

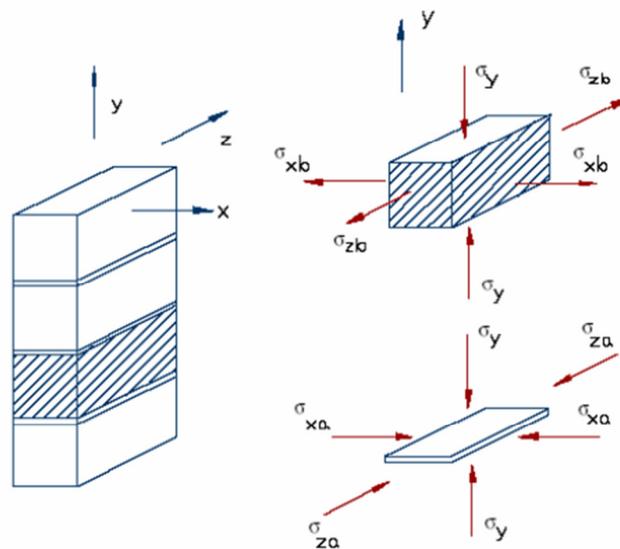


Figura 9 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Hilsdorf

Fonte: SANTOS (2008)

Este modelo admite que, ao mesmo tempo, o bloco rompe sob estado bi-axial (tração-compressão) e a argamassa, sob estado triaxial de compressão. Desta forma, a aplicação de cargas de compressão à argamassa, com um módulo de deformação menor que o do bloco, tende a se expandir lateralmente. Quando as tensões de tração no bloco ultrapassarem a sua

resistência à tração ocorre fissuração na unidade em função da aderência entre o bloco e a argamassa, sugerindo tensões de compressão triaxiais na argamassa, o que gera tensões de tração no bloco.

b) Modelo de Hamid e Drysdale (1979)

Através do estudo de prismas grauteados de blocos de concreto e da análise do comportamento de seus componentes – os blocos, a argamassa e o graute, sob estado multiaxial de tensões, os pesquisadores Hamid e Drysdale (1979) desenvolveram um modelo de ruptura para a alvenaria.

Na Figura 10 pode-se observar o estado de tensões gerado no prisma grauteado no momento da aplicação de uma carga de compressão uniaxial. Ao aplicar uma carga na alvenaria o graute atinge sua capacidade resistente de compressão não confinado, expandindo-se, devido as suas deformações inelásticas ocasionadas pela microfissuração. O bloco tende a restringir estas deformações e a confinar o graute, gerando, assim tensões de tração nas paredes do bloco. No caso do graute não atingir a sua capacidade resistiva antes do conjunto bloco/argamassa, as faces do bloco serão tracionadas devido à restrição das deformações da argamassa. Neste caso, o bloco sempre romperá por tensões de tração geradas pela deformação dos demais componentes.

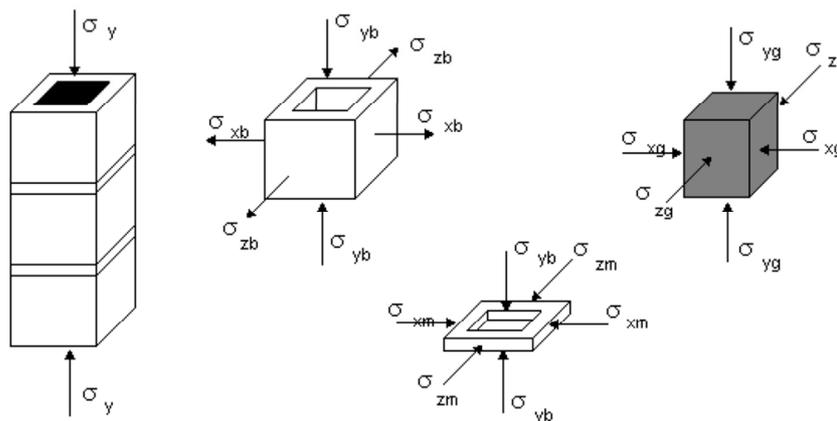


Figura 10 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Hamid e Drysdale (1979)

Fonte: GROHMANN (2006)

Grohmann (2006) aponta as seguintes conclusões baseadas no modelo: a resistência do prisma (considerando a área líquida) diminui para prismas grauteados; a influência do tipo do bloco e da argamassa diminui para prisma grauteados; a ruptura do prisma grauteado ocorre

pela ruptura à tração do bloco induzida pela deformação lateral do graute; grandes aumentos na resistência dos grautes têm pouco efeito na resistência dos prismas; e a ruptura do graute governa a ruptura dos prismas.

c) Modelo de Atckinson e Noland (1985)

Diversas pesquisas demonstram a teoria de Atckinson e Noland (1985) a qual relaciona propriedade de resistência e deformação de prismas submetidos a esforços de compressão, sendo baseada no critério de Hilsdorf (1969). Esta propõe que o comportamento da alvenaria é baseado na compatibilidade de deformação dos blocos e argamassas.

Atckinson e Noland (1985) apud Mohamad (1998) consideraram os prismas como camadas de tijolos e argamassa sujeitos à uma tensão de compressão vertical uniforme, σ_1 , e as tensões laterais em ambos materiais também uniformes, conforme Figura 11.

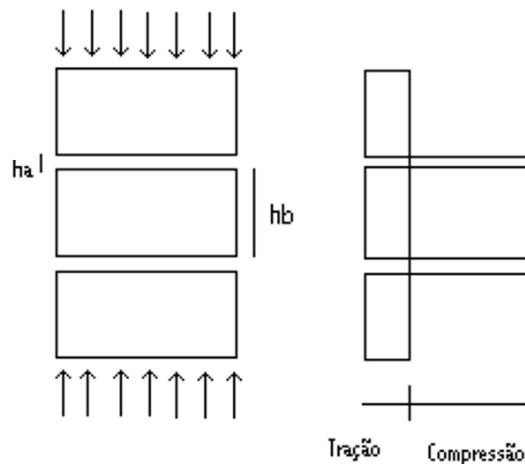


Figura 11 - Distribuição de tensões no prisma conforme modelo de Atckinson e Noland (1985)

Fonte: MOHAMAD (1998)

O modelo propõe uma distribuição de tensões uniforme ao longo de toda a altura da unidade, fato pelo qual não deve ser aplicado a blocos com altura muito maior que a altura da junta. Este modelo serve apenas como uma aproximação inicial das tensões de tração desenvolvidas pelo bloco.

Grohmann (2006) cita que estudos desenvolvidos em prismas com blocos cerâmicos por McNary e Abrams (1985) baseados neste modelo levaram a conclusão que a argamassa tem tendência a se expandir lateralmente, porém, por ser mecanicamente ligada ao bloco, ela é restringida lateralmente, provocando tensões laterais de tração no bloco e de compressão na argamassa.

Argamassas mais fortes têm um comportamento na curva tensão x deformação essencialmente linear, seus prismas fissuraram subitamente e romperam explosivamente no carregamento último, já argamassas mais fracas apresentam um comportamento na curva tensão x deformação não linear, têm comportamento mais dúctil ocorrendo fissuração lenta nos prismas, ou seja, de acordo com essa teoria, considerando a não linearidade da argamassa, pode ocorrer o fendilhamento do blocos ao invés do esmagamento da argamassa. (GROHMANN, 2006, p. 43)

Desta forma, a resistência dos prismas é governada pela resistência à tração dos blocos e pelas propriedades de deformação da argamassa.

d) Modelo de Cheema e Klingner (1986)

Segundo Mohamad (1998) estes pesquisadores desenvolveram um modelo de comportamento mais complexo para prever a resistência à compressão e o modo de ruptura para prismas de alvenaria de blocos de concreto grauteados e não grauteados. O modelo é baseado em gráficos que relacionam, para diferentes proporções entre módulo de elasticidade da argamassa e do bloco, as tensões de tração induzidas no bloco por unidade de tensão aplicada nos prismas, a resistência da argamassa confinada em relação à compressão axial, as tensões principais na argamassa por unidade de tensão aplicada e também, a resistência do graute confinado para diferentes níveis de resistência à compressão uniaxial.

Uma contribuição importante deste trabalho sobre os mecanismos de ruptura, é que para uma dada relação entre o módulo de elasticidade da argamassa e o módulo de elasticidade do bloco, a ruptura ocorrerá, principalmente por tração no bloco ou esmagamento da argamassa, como demonstrado a seguir:

$$\begin{array}{ll} E_{arg}/E_{bloco} \geq 0,66 & \text{Ruptura por esmagamento da argamassa} \\ E_{arg}/E_{bloco} < 0,66 & \text{Ruptura por tração no bloco} \end{array}$$

Com base nesta relação entre os módulos, os pesquisadores desenvolveram ainda uma modelagem por elementos finitos para prever a resistência e o tipo de ruptura dos prismas.

Grohmann (2006) aponta que para os pesquisadores existem cinco tipos de ruptura que podem ocorrer na alvenaria grauteada:

- Fendilhamento lateral do bloco: ocorre quando a resistência à tração do bloco é atingida;

- Esmagamento da argamassa: acontece quando a máxima tensão de confinamento é atingida pela tensão atuante na argamassa;
- Esmagamento do bloco: ocorre quando é atingida a resistência à compressão do bloco;
- Fendilhamento na argamassa: se dá quando é atingida a resistência à tração máxima na argamassa;
- Esmagamento do graute: ocorre quando a máxima tensão atuante no graute atinge a tensão à compressão confinada do graute.

2.4.7 Determinação da resistência à compressão da alvenaria

Diversos pesquisadores buscam desenvolver equações que possibilitem calcular a resistência da alvenaria, a fim de explicar matematicamente sua resistência final, sem que ocorra sua ruptura. Todas as equações utilizam como referência as propriedades físicas e mecânicas dos componentes da alvenaria, sendo algumas aqui apresentadas:

a) La Rovere e Soliz (1995)

Uniformizam e apresentam as equações adotadas por Priestley e Yuk e também por Hamid e Drysdale para o cálculo da resistência da alvenaria. Pelo critério de Hilsdorf, a resistência à compressão da alvenaria é dada pela expressão:

$$f'_m = \frac{\sigma_y}{k_1} \quad (9)$$

Onde:

k_1 : coeficiente para considerar a não uniformidade de distribuição de tensões laterais, variando entre 1,1 e 2,5

σ_y : resistência à compressão do bloco

b) Priestley e Yuk apud Pasquali (2007)

Adotaram a mesma equação que Hilsdorf (1969) utilizou no estudo de alvenaria de tijolos, considerando o valor de 1,5 como valor do coeficiente k_1 :

$$f_m = 5,91(0,1f'_{cb} + 0,01284f'_a) \quad (10)$$

c) Hamid e Drysdale apud Santos (2008)

Adotam a equação de Hilsdorf, assumindo k_1 igual a 1,08 e chegando à seguinte equação para a resistência à compressão da alvenaria:

$$f_m = 8,08(0,1 f'_{cb} + 0,01460f'_a) \quad (11)$$

Onde:

f'_{cb} : resistência à compressão do bloco

f'_a : resistência à compressão da argamassa

d) Mohamad (1998)

Em função da rigidez entre blocos e argamassa, o pesquisador estabelece duas equações para estimar a resistência da alvenaria em blocos de concreto não grauteados. A primeira equação determina a resistência à compressão dos prismas, em função da resistência da argamassa e a segunda, em função da resistência à tração do bloco. Desta forma, segundo o autor, a ruptura ocorrerá no menor valor obtido entre as duas equações.

$$F_m = f_a \cdot 0,5794 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right)^{-1,1093} \quad (12)$$

$$F_m = f_{bt} \cdot \left[5,4491 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right)^2 + 3,6377 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right) + 10,219 \right] \quad (13)$$

Onde:

F_m : resistência à compressão da alvenaria

f_a : resistência à compressão da argamassa

f_{bt} : resistência do bloco à tração, calculada por:

$$f_{bt} = 0,41 \cdot \sqrt{f_b} \quad (14)$$

E_a : módulo de elasticidade da argamassa

E_b : módulo de elasticidade do bloco

e) ABNT NBR 15961-2 (ABNT, 2011) e ABNT NBR 15812-2 (ABNT, 2010)

As normas brasileiras abrangem o cálculo para alvenaria estrutural de blocos de concreto e blocos cerâmicos, respectivamente. A resistência característica do elemento de alvenaria obtida nos ensaios deve ser igual ou superior à resistência especificada pelo projetista estrutural. Especifica ainda que, para uma amostragem menor do que 20 e maior do que 6 corpos de prova, a resistência característica é determinada pela equação:

$$f_{ek,est} = 2 \cdot \left[\frac{f_{e(1)} + f_{e(2)} + \dots + f_{e(i-1)}}{i-1} \right] - f_{ei} \quad (15)$$

Onde:

$f_{ek,est}$: resistência característica estimada da amostra expressa em MPa

$f_{e1}, f_{e2}, \dots, f_{ei}$: valores dos resultados individuais dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova da amostra, ordenados em ordem crescente

i : se n for par, $\frac{n}{2}$; se n for ímpar, $\frac{n-1}{2}$

n : quantidade de elementos da amostra

O valor de f_{ek} não deve ser inferior ao resultado da expressão $\phi \cdot f_{e(1)}$, sendo os valores de ϕ obtidos na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de ϕ em função da quantidade de elementos de alvenaria

Número de elementos	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 e 17	18 e 19
ϕ	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: ABNT NBR 15961-2 (2011)

Assim, se $f_{ek,est} < \phi \cdot f_{e(1)}$; então $f_{ek} = \phi \cdot f_{e(1)}$; caso contrário, $f_{ek} = f_{ek,est}$ (não se adotando $f_{ek,est}$ maior que 85% da média f_{em}).

Desta forma, a resistência característica à compressão da alvenaria deve ser estimada em 70% da resistência característica à compressão simples obtida para o prisma.

f) BS 5628 part 1 (1978) apud Santos (2008)

Na Norma Britânica não são estabelecidas diferenças entre as alvenarias de blocos cerâmicos ou de concreto. A resistência característica à compressão da alvenaria f_k pode ser obtida por:

- Teste de resistência final em painéis de tijolos ou blocos, cujas dimensões devem ser de 1,20 m a 1,80 m de comprimento por 2,40 m de altura, com área mínima da seção transversal de 0,125 m² em que a execução e a argamassa empregadas nos painéis testes devem ser as mesmas utilizadas na prática;
- Correlações empíricas, tendo por base a resistência da unidade e o tipo de argamassa a ser empregada.

A resistência característica à compressão (f_k) pode ser obtida por:

$$f_k = \frac{F_m}{A} \cdot \frac{\varphi_v \cdot \varphi_m}{1,2} \quad (16)$$

Onde:

F_m : média da carga máxima de dois painéis teste;

A : área da seção transversal de qualquer painel;

φ_m : fator de redução da resistência da argamassa e

φ_v : fator de redução para amostras de elementos estruturais

g) Eurocode (2006) apud Juste (2001)

Possibilita determinar a resistência característica à compressão da alvenaria (f_k) não apenas em função do elemento estrutural, mas também considera a influência da resistência da argamassa (f_a):

$$f_k = k \cdot f_b^{0,75} \cdot f_a^{0,25} \quad (17)$$

Onde:

f_a : resistência média à compressão da argamassa (MPa)

f_b : resistência média à compressão do bloco (MPa)

$$k = 0,4 \cdot \varphi \quad (18)$$

Onde:

$$\text{Para } f_b > 15 \text{ N/mm}^2 \quad \varphi = (15/f_b)^{0,33} \leq 1,5$$

$$\text{Para } f_b < 15 \text{ N/mm}^2 \quad \varphi = 1$$

Observa-se que a contribuição da argamassa é menos significativa comparada com a contribuição do bloco na resistência da alvenaria.

A revista Prisma (2002) apud Fonseca (2002) cita que é comum relacionar as resistências à compressão dos blocos e prismas. Devido à influência da esbeltez dos prismas, da resistência da argamassa e da espessura da junta de argamassa de assentamento, a resistência dos prismas varia de 70% a 90% da resistência característica dos blocos de concreto.

2.4.8 Determinação do módulo de elasticidade da alvenaria

O módulo de elasticidade da alvenaria é um parâmetro importante de estudo, pois representa a rigidez da estrutura. No entanto esta variável torna-se de difícil determinação devido a grande variação que existe entre os tipos de blocos e argamassas utilizadas na execução da alvenaria. Até mesmo o método construtivo produz variações, visto que cada pedreiro assenta os blocos de maneira diferente.

É comum em pesquisas e normas técnicas buscar uma relação entre o módulo de elasticidade da alvenaria e sua resistência última à compressão. Essas expressões são utilizadas por projetistas de estruturas para estimar o valor do módulo de elasticidade da alvenaria:

a) BS 5628 (1992) apud Juste (2001)

Esta norma sugere a determinação do módulo de elasticidade da alvenaria de blocos cerâmicos, sílico-calcáreos e de concretos, incluindo a alvenaria grauteada através da equação:

$$E_m = 900 \cdot f_{alv} \quad (19)$$

b) Eurocode 6 (1996) apud Fonseca (2002)

Esta norma sugere a determinação do módulo de elasticidade da alvenaria de blocos cerâmicos, sílico-calcáreos e de concretos, incluindo a alvenaria grauteada através da equação:

$$E_m = 1000 \cdot f_{alv} \quad (20)$$

Onde:

E_m : módulo de elasticidade da alvenaria

f_{alv} : resistência à compressão da alvenaria

c) Plowman apud Juste (2001)

Baseado em trabalhos experimentais, o pesquisador estabelece as equações para determinar o módulo de elasticidade da alvenaria em função da sua resistência à compressão e da resistência à compressão dos blocos:

$$E_{alv} = (f_{alv} - 0,6894) \cdot 100 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (21)$$

$$E_{alv} = (f_b - 20,6841) \cdot 200 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (22)$$

Onde:

E_{alv} : módulo de elasticidade da alvenaria

f_{alv} : resistência à compressão da alvenaria

f_b : resistência à compressão do bloco

d) Dhanasekar (1985) apud Mohamad (2007)

Dhanasekar (1985) sugere uma relação não linear para estabelecer o módulo de elasticidade da alvenaria em função da resistência à compressão, dada pela expressão:

$$E_{alv} = 1180. f_{alv}^{0,83} \quad (23)$$

Onde:

E_{alv} : módulo de elasticidade da alvenaria

f_{alv} : resistência à compressão da alvenaria

e) ABNT NBR 15961-2 (ABNT, 2011) e ABNT NBR 15812-2 (ABNT, 2010)

Em seu anexo A (Ensaio para determinação da resistência à compressão em prismas) esta norma recomenda que o módulo de deformação deva ser calculado no intervalo correspondente à curva secante entre 5% e 30% da tensão de ruptura de cada corpo de prova.

Esta norma permite ainda a determinação do módulo de deformação através da seguinte expressão:

$$E_{alv} = 800. f_{pk} \quad (24)$$

Onde:

E_{alv} : módulo de deformação da alvenaria

f_{pk} : resistência à compressão do prisma

De acordo com Fonseca (2002) vários estudos têm demonstrado que os módulos de elasticidade são muito divergentes, pois os resultados experimentais variaram de $700.f_{alv}$ a $1000.f_{alv}$.

2.5 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA

Com base na revisão da literatura pode-se verificar a existência de uma grande lacuna de trabalhos voltados para o estudo da deformabilidade de paredes de alvenaria de tijolos de solo-cimento.

Os trabalhos relacionados com este assunto referem-se apenas ao estudo da resistência à compressão dos elementos. Alguns poucos trabalhos, desenvolvidos pela ABCP avaliaram a deformação em painéis de alvenaria de solo-cimento. Vargas (1977) também estabeleceu um estudo sobre módulo de elasticidade, porém em corpos de prova executados com solo-cimento.

No Brasil, existem procedimentos definidos pela ABNT para determinação do módulo de elasticidade em alvenaria estrutural de blocos de concreto e blocos cerâmicos. O procedimento recomendado em ambas as normas é o mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a fase experimental desta pesquisa, caracterizando detalhadamente os materiais, equipamentos e procedimentos adotados durante a realização dos ensaios. Todos os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Mecânica dos Solos, de Materiais de Construção e de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Conjuntamente, serão descritos os procedimentos utilizados para instrumentação dos prismas de tijolos de solo-cimento-RCC com o objetivo de obter dados necessários para a determinação da resistência e das características elásticas da alvenaria composta por estes materiais.

Inicialmente, optou-se por realizar a investigação das misturas selecionadas através da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos para obter uma estimativa da resistência de cada mistura. A execução deste ensaio teve por objetivo escolher, no mínimo, três misturas para a fabricação dos tijolos de solo-cimento-RCC. Foram escolhidas quatro misturas para confecção dos tijolos, as quais foram ensaiadas segundo as normas pertinentes, visando selecionar o melhor resultado para a fabricação dos tijolos a serem utilizados na confecção de prismas. Porém, como detalhado mais adiante no item 4.6, a produção dos tijolos com a dosagem escolhida não obteve sucesso, obrigando no momento da fabricação, a escolha de uma quinta mistura. Com os tijolos obtidos foram confeccionados os prismas utilizados para avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

O solo utilizado foi coletado em uma área de empréstimo da Prefeitura Municipal da cidade de Caarapó, localizada no sul do estado do Mato Grosso do Sul, próxima à cidade de Dourados, conforme Figura 12. Apresenta características de Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 2013), de textura média (teor de argila menor que 30%). Foi extraído de profundidade superior a um metro, de maneira a evitar a extração de matéria orgânica juntamente com o solo. Nas Figura 13 e Figura 14 observa-se a região de coleta do solo.

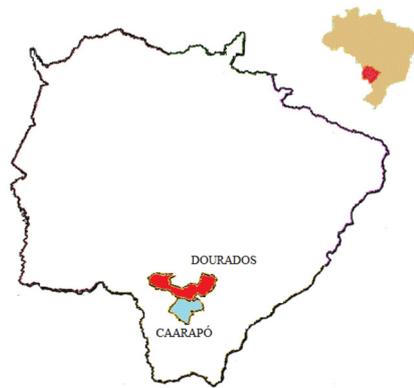


Figura 12 – Localização das cidades de Caarapó e Dourados no Estado do Mato Grosso do Sul

Fonte: Autora (adaptada) - (2015)



Figura 13 – Local de coleta do solo (Av. Duque de Caxias - Caarapó/MS)

Fonte: Autora (2015)



Figura 14 – Perfil de solo no local de coleta – Caarapó/MS

Fonte: Autora (2015)

O material coletado foi depositado sobre piso de concreto, ao ar livre, em local coberto e protegido das precipitações para secagem prévia até atingir a umidade higroscópica, conforme Figura 15. Procedeu-se, então, ao peneiramento na malha 4,8 mm, de maneira a eliminar possíveis torrões (Figura 16). Após, foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado até o momento da sua utilização.



Figura 15 – Solo depositado ao ar livre

Fonte: Autora (2015)



Figura 16 – Solo peneirado sobre lastro de concreto

Fonte: Autora (2015)

3.1.2 Cimento

Foi utilizado cimento Portland CP II Z-32 (Votoran), NBR 11578 – Cimento Portland Composto. Esse tipo de cimento é o normalmente comercializado na região de estudo e suas propriedades são satisfatórias para aplicação em solo-cimento.

3.1.3 Cal hidratada

Na confecção da argamassa de assentamento dos corpos de prova da alvenaria (prismas) foi utilizada cal hidratada CH III (marca Solofino) fabricada na cidade de Colombo – PR.

3.1.4 Água

Foi utilizada água potável proveniente da rede pública de abastecimento.

3.1.5 Resíduo da construção civil – RCC

O resíduo utilizado nesta pesquisa é proveniente do processo de britagem e peneiramento na malha 4,8 mm de restos de materiais cerâmicos, argamassas e concreto, resultando em um produto de coloração avermelhada. O material foi coletado em uma Usina de Beneficiamento de Resíduos da Construção, localizada no Município de Dourados-MS. O material coletado ficou ao ar livre e, após peneiramento, foi colocado em lastro de concreto para secagem. Todas as etapas de preparação do RCC podem ser visualizadas na Figura 17.



Figura 17 - Etapas de preparo do Resíduo da Construção Civil (RCC) - (a) Processo de fabricação do RCC; (b) RCC coletado; (c) RCC peneirado sobre lastro de concreto e (d) Amostra de RCC

3.1.6 Outros materiais

Enxofre para o capeamento dos corpos de prova.

3.2 EQUIPAMENTOS

Na realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Prensa hidráulica, da marca EcoMáquinas, para produzir os tijolos de solo-cimento;
- Prensa de ensaios CBR com deformação controlada de 1,27 mm/min, capacidade de 5 toneladas, marca Solotest;
- Prensa universal de ensaios com carga controlada, medidor analógico com calibração até 20 toneladas, modelo MVE-100;
- Sistema de aquisição de dados marca HBM modelo Spider 8 com transdutores indutivos de deslocamento modelo WI marca HBM com sensibilidade de 0,001 mm;
- Soquete e cilindro Proctor para produzir os corpos-de-prova cilíndricos com $\varnothing = 10$ cm e $h = 12,73$ cm, no ensaio de compactação;
- Balança, da marca Marte, com capacidade máxima de $5 \text{ kg} \pm 0,01 \text{ g}$;
- Balança, da marca Lucas, com capacidade máxima de $150 \text{ kg} \pm 100 \text{ g}$;
- Estufa de secagem, da marca Marconi, modelo MA 033;
- Equipamentos usuais para ensaios de laboratório.

3.3 MÉTODOS

Adotou-se para o desenvolvimento desta pesquisa a execução de seis etapas principais que constituem as partes deste experimento, descritas sucintamente a seguir:

- Procedimentos aplicados aos materiais: caracterização através de ensaios de granulometria, massa específica dos grãos e limites de consistência e, ensaios de compactação;
- Procedimentos aplicados às diferentes misturas de solo-cimento-RCC: granulometria, massa específica dos grãos e limites de consistência e, ensaios de compactação;

- Procedimentos aplicados aos tijolos de solo-cimento-RCC: caracterização através de análise dimensional, ensaios de absorção de água e ensaios de resistência à compressão axial simples para idades de 7, 14, 28 e 56 dias;
- Procedimentos aplicados à argamassa: caracterização, ensaios de trabalhabilidade e ensaios de resistência à compressão;
- Procedimentos aplicados aos prismas: caracterização através de ensaios de resistência à compressão axial simples e do módulo de elasticidade.

3.3.1 Procedimentos aplicados ao solo

O solo coletado foi passado na peneira malha 4,8 mm e, em seguida, depositado sobre piso de concreto para secagem ao ar livre, protegido das intempéries. Após secagem prévia, foi armazenado em sacos plásticos e transportado para o laboratório de Mecânica dos Solos do DEC/UEM onde foram realizados os ensaios de caracterização e de compactação.

A caracterização do solo foi realizada em conformidade com as Normas Brasileiras pertinentes, descritas a seguir:

- NBR 6457/86 – Preparação de amostras de solo para ensaios de caracterização e de compactação;
- NBR 6508/84 – Determinação da massa específica dos grãos;
- NBR 7181/84 – Análise granulométrica de solos
- NBR 6459/84 – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/84 – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7182/88 – Ensaio de compactação.

Para o ensaio de compactação foi utilizado o método “A” utilizando cilindro pequeno, com 3 camadas e com aplicação de 26 golpes por camada com soquete pequeno.

A Figura 18 mostra a realização de alguns desses ensaios.



Figura 18 - Ensaio de caracterização dos solos: (a) Compactação; (b) Limite de liquidez; (c) Peneiramento e (d) Sedimentação e massa específica dos grãos.

Fonte: Autora (2015)

3.3.2 Procedimentos aplicados ao resíduo da construção civil – RCC

O resíduo foi coletado na Usina de Beneficiamento Ambiente em Dourados/MS. Após a coleta, o material foi passado na peneira de malha 4,8 mm e, em seguida, seco ao ar livre e protegido das intempéries. Após secagem prévia, foi armazenado em sacos plásticos e transportado para o Laboratório de Mecânica dos Solos do DEC/UEM onde foram realizados os ensaios de caracterização, considerando o resíduo como um tipo de solo e aplicando-se os procedimentos adotados para o solo natural.

A caracterização do RCC foi realizada através da utilização das normas brasileiras aplicadas ao estudo de solos, descritas a seguir:

- NBR 6457/86 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6508/84 – Determinação da massa específica dos grãos;
- NBR 6459/84 – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/84 – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7181/84 – Análise granulométrica de solos

3.3.3 Definição das dosagens das misturas de solo-cimento-RCC

Na composição do solo-cimento, foram estudadas dosagens compostas por solo natural, cimento e, ainda, com adições de 20%, 40% e 60% de RCC em relação à massa seca de solo, empregando-se resíduos de materiais cerâmicos, argamassas e concreto. Para cada uma dessas dosagens foram utilizados três teores de cimento (6%, 8% e 10%) em relação à massa seca da mistura solo-RCC. A composição das dosagens pode ser observada na Tabela 13, onde cada dosagem foi identificada por:

S (solo)

*C (cimento)*_(teor de cimento–6,8,10%)

*R (Resíduo)*_(teor de resíduo–20,40,60%)

Tabela 13 - Composição das dosagens de solo-cimento-RCC

Dosagem	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo (%)	Total (%)
SC ₆ R ₂₀	78,6	5,7	15,7	100
SC ₈ R ₂₀	77,2	7,4	15,4	100
SC ₁₀ R ₂₀	75,8	9,1	15,2	100
SC ₆ R ₄₀	67,4	5,7	27,0	100
SC ₈ R ₄₀	66,1	7,4	26,5	100
SC ₁₀ R ₄₀	64,9	9,1	26,0	100
SC ₆ R ₆₀	59,0	5,7	35,4	100
SC ₈ R ₆₀	57,9	7,4	34,7	100
SC ₁₀ R ₆₀	56,8	9,1	34,1	100

Fonte: Autora (2015)

A caracterização das diferentes combinações entre solo e resíduos foi realizada através da utilização das normas brasileiras aplicadas ao estudo de solos, descritas conforme segue:

- NBR 6457/86 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6459/84 – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/84 – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7181/84 – Análise granulométrica de solos

Foram utilizadas, também, as seguintes normas referentes ao estudo de solo-cimento:

- NBR 10833/12 – Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento.
- NBR 12023/12 – Solo-cimento – Ensaio de compactação

Com a finalidade de determinar os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima foram realizados ensaios de compactação segundo as recomendações da ABNT NBR 12023 (2012). Foi utilizado o método “A” utilizando cilindro pequeno, com 3 camadas e aplicando 26 golpes por camada com soquete pequeno. Além das dosagens definidas, também foram analisadas as compactações das dosagens de solo-cimento sem adição de RCC.

Os corpos-de-prova obtidos nos ensaios de compactação foram embalados em sacos plásticos, identificados e mantidos em câmara úmida por 7 dias. Após esse período, os mesmos foram colocados em imersão em água por 4 horas e rompidos em prensa para avaliação da resistência à compressão individual máxima.

A ABNT NBR 10833 (2012) recomenda a preparação de três traços de solo-cimento para fabricação dos tijolos. Com base nos dados de resistência obtidos no rompimento dos corpos de prova dos ensaios de compactação foram escolhidos quatro traços para fabricação de tijolos. Os traços escolhidos foram SC_6R_{40} , SC_8R_{40} , SC_8R_{60} e $SC_{10}R_{60}$.

3.3.4 Fabricação das amostras de tijolos de solo-cimento-RCC

Após a caracterização do solo, do resíduo e das misturas de solo-cimento-resíduo, foram preparadas as misturas para a confecção dos tijolos, na empresa ConstruEco, em São Jorge do Ivaí - PR.

A empresa disponibilizou uma prensa hidráulica da marca Eco Máquinas, com produção de um bloco por vez, de dimensões 12,5 cm x 25 cm x 6,5 cm (largura x comprimento x altura) e encaixes nos furos internos de 6 cm de diâmetro que permitem, apesar das dimensões não serem normatizadas, a amarração direta entre componentes na

execução da alvenaria. Foram confeccionados 350 tijolos para realização dos ensaios conforme

Tabela 14.

Tabela 14 - Unidades fabricadas para realização de ensaios

Dosagem	Ensaio	Total de unidades fabricadas por ensaio
SC ₆ R ₄₀	Análise dimensional	10
	Resistência à compressão	40
	Absorção de água	10
SC ₈ R ₄₀	Análise dimensional	10
	Resistência à compressão	40
	Absorção de água	10
SC ₈ R ₆₀	Análise dimensional	10
	Resistência à compressão	40
	Absorção de água	10
SC ₁₀ R ₆₀	Análise dimensional	10
	Resistência à compressão	40
	Absorção de água	10
SC ₁₀ R ₅₀ *	Análise dimensional	10
	Resistência à compressão	40
	Absorção de água	10
	Produção de prismas	50
Total geral		350

* Ver capítulo 4.6

Fonte: Autora (2015)

Os materiais foram pesados separadamente, considerando os seus diferentes teores de umidade higroscópica, e misturados em uma betoneira, onde primeiramente foi colocado o solo e iniciada a rotação. Logo depois o resíduo e, em seguida, o cimento. Esta mistura dos materiais foi realizada até a homogeneização da mistura. Após, a água foi adicionada, aos poucos, através de adaptador com sistema de aspersão, tendo como referência o valor de umidade ótima determinado no ensaio de compactação. A mistura foi mantida em rotação por aproximadamente três minutos para adquirir uniformidade e, após o desligamento da betoneira, foi conduzida até a prensa por um sistema de esteira rolante. O processo de moldagem dos tijolos pode ser observado na Figura 19.



Figura 19 - Processo de fabricação dos tijolos

- (a) *Pesagem do material*
- (b) *Homogeneização dos materiais na betoneira e condução por esteira*
- (c) *Prensa hidráulica*
- (d) *Molde do tijolo*
- (e) *Tijolo prensado*
- (f) *Armazenamento em pallet após fabricação*
- (g) *Cura por aspersão*
- (h) *Material coberto em processo de cura*

Fonte: Autora (2015)

Foi constatado que o teor de umidade da mistura necessário para a obtenção de tijolos com boa qualidade é inferior ao teor de umidade ótima verificado no ensaio de compactação Proctor Normal. Tentativas de se moldar tijolos na umidade ótima resultavam em componentes com trincas e posterior descarte. Esse comportamento pode ser justificado tendo em vista que a quantidade de energia aplicada e os processos de compactação empregados no ensaio de compactação e na prensa são diferentes. Os corpos de prova foram moldados em laboratório com auxílio de soquete aplicando uma energia dinâmica por impacto ou percussão, enquanto que na produção dos tijolos a energia aplicada foi estática por prensagem. Desta forma, optou-se por adicionar menor quantidade de água à mistura, evitando assim a quebra dos tijolos.

Grande (2003) e Souza (2006) relatam que durante a fabricação dos tijolos também houve necessidade de utilizar umidade abaixo da umidade ótima determinada no ensaio de compactação.

Após a prensagem de cada tijolo, o mesmo era retirado e colocado em pallets para o processo de cura. A cura foi realizada após 6 horas da moldagem e durante os 7 primeiros dias. Para que os blocos permanecessem úmidos, durante o processo de cura, a aspersão de água foi realizada a cada 3 horas durante o dia e a noite. Os tijolos ficaram protegidos do vento e da insolação direta, armazenados no local de sua produção.

Após o período de 14 dias de sua fabricação, conforme recomenda a ABNT NBR 8491 (2013), as unidades foram identificadas, embaladas individualmente e transportadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos da UEM.

Os tijolos fabricados foram analisados com base nas seguintes normas técnicas:

- NBR 8492/13 – Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio
- NBR 8491/13 – Tijolo de solo-cimento – Requisitos

Para a análise dimensional foram executadas três determinações em pontos distintos de cada face, sendo realizada uma determinação em cada extremidade e uma no meio do corpo de prova, com exatidão de 0,5 mm, através da utilização de um paquímetro. Foram verificadas as medidas referentes à altura, largura e comprimento de cada tijolo. A Figura 20 ilustra a preparação para este ensaio.



Figura 20 - Ensaio de análise dimensional de tijolo de solo-cimento-RCC

Fonte: Autora (2015)

As dimensões nominais de cada amostra ensaiada devem satisfazer às tolerâncias permitidas pela ABNT NBR 8491 (2012) que é de $\pm 1,00$ mm para cada dimensão.

Em relação às características visuais, as amostras apresentaram aspecto homogêneo e arestas vivas livres de trincas e imperfeições.

Para determinação da resistência à compressão foram analisadas as idades de 7, 14, 28 e 56 dias, sendo preparados sete tijolos para cada idade. Os tijolos foram cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão e as metades foram superpostas e ligadas por uma fina pasta de cimento Portland. Após o endurecimento da pasta, os tijolos foram capeados com enxofre e registradas as suas dimensões para o cálculo da resistência à compressão. No dia do rompimento, os corpos de prova ficaram imersos em água por 16 horas e após, foram secos superficialmente com utilização de um pano. O processo para execução do ensaio pode ser observado na Figura 21.

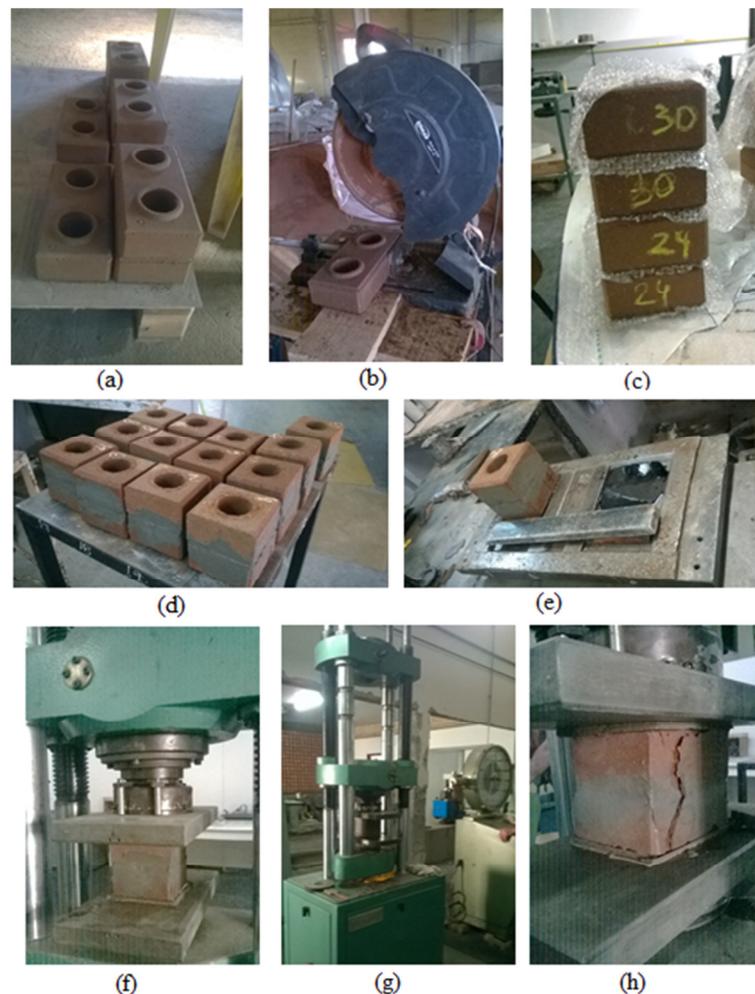


Figura 21 – Processo de execução do ensaio de resistência à compressão dos tijolos

- | | | |
|---|--|--|
| (a) Armazenamento dos tijolos | (d) Superposição das faces, ligadas por uma camada fina de pasta de cimento Portland | (g) Prensa universal para rompimento de CP's |
| (b) Serra circular para corte dos tijolos | (e) Capeamento com enxofre | (h) Ruptura dos tijolos |
| (c) Transporte dos meio-tijolos | (f) Detalhe do rompimento | |

A amostra ensaiada não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor do que 2,0 MPa nem valor individual inferior a 1,7 MPa, com idade mínima de sete dias de acordo com a ABNT NBR 8491 (2012).

Para o ensaio de absorção foram tomados três tijolos, os quais foram inicialmente secos em estufa à 105°C até constância de massa. Obtida a massa seca, os tijolos foram resfriados à temperatura ambiente e colocados em imersão em água por 24 horas. Após, foram secos superficialmente com um pano e pesados. A amostra ensaiada não deve apresentar a média dos valores de absorção de água maior do que 20% nem valor individual superior a 22%, com idade mínima de sete dias de acordo com a ABNT NBR 8491 (2012).

Os dados obtidos serviram de base para a definição do traço adotado para a fabricação dos tijolos utilizados na confecção dos prismas.

3.3.5 Procedimentos aplicados à argamassa

A areia utilizada na composição da argamassa foi retirada da jazida de Porto São José – PR. Para sua caracterização foram utilizadas as seguintes normas:

- NBR 7211/09 – Agregados para concreto – Especificação
- NBR 9776/87 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de Ensaio

Foram verificadas as seguintes propriedades da areia:

- Composição granulométrica
- Módulo de finura
- Diâmetro máximo
- Massa unitária
- Massa específica

O traço em volume da argamassa adotado foi de 1: 2: 7 (cimento; cal; areia), visando obter uma argamassa com resistência entre 2,0 e 3,0 MPa. Este traço corresponde a 1: 0,656: 7,234 em massa.

Para preparação da argamassa, a areia e a cal hidratada foram homogeneizadas em betoneira, com 16 horas de antecedência, conforme recomendação da ABNT NBR 13276 (2005).

Foram moldados 6 corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm de argamassa. Os corpos-de-prova foram mantidos em cura ambiente e rompidos no dia em que foram

realizados os ensaios com os prismas. Para a determinação da resistência à compressão, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre e rompidos em prensa de ensaios CBR com capacidade de 5 toneladas, com deformação controlada de 1,27 mm/min, marca Solotest, conforme Figura 22.



Figura 22 - Rompimento de corpos-de-prova de argamassa

Fonte: Autora (2015)

Para a determinação do índice de consistência foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 13276 (2005). A consistência obtida foi de 26 ± 1 cm, verificada em conjunto com o pedreiro responsável pela execução das paredes, de maneira, a obter uma trabalhabilidade próxima à realidade utilizada em obras em geral. O ensaio pode ser observado na Figura 23.



Figura 23 - Ensaio da trabalhabilidade da argamassa - mesa de consistência

Fonte: Autora (2015)

3.3.6 Confeção de prismas

A caracterização da alvenaria deve ser realizada através de ensaios de prisma, ou pequena parede ou parede, executados com blocos, argamassas e grautes de mesma origem e características dos que serão efetivamente utilizados na estrutura.

Como não existe normativa para aplicação à alvenaria executada com tijolos de solo-cimento foram utilizadas as recomendações da ABNT NBR 15961-2: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto (2011) e da ABNT NBR 15812-2: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos (2010).

Devido, ainda, às dificuldades para execução de ensaios de paredes, optou-se pela avaliação dos parâmetros de resistência característica em componentes do tipo prisma. Os componentes foram construídos no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil, protegidos da incidência direta da luz solar e de ventos.

Foram confeccionados quinze prismas, formados pela superposição de dois tijolos, executados pelo mesmo pedreiro, de maneira a evitar vícios decorrentes da mão-de-obra. Os tijolos foram molhados e assentados com uma camada de 5 mm de argamassa de cimento, cal e areia. A argamassa, além de unir os tijolos, quando devidamente aplicada, garante uma adequada transmissão de esforços e permite a regularização das imperfeições dimensionais dos encaixes dos tijolos.

Os prismas foram identificados, mantidos em condição de cura ambiente normal, protegidos das intempéries e no local onde foram assentados. Para realização do ensaio de resistência à compressão, os prismas foram capeados com enxofre de maneira a regularizar a superfície em contato com a prensa e evitar possíveis acúmulos de tensão. Os prismas foram rompidos com idade de 28 dias.



Figura 24 - Prismas preparados para o ensaio de resistência à compressão

Fonte: Autora (2015)

Os ensaios foram realizados numa prensa universal de ensaios com carga controlada, medidor analógico com calibração até 20 toneladas, modelo MVE-100, conforme Figura 25.

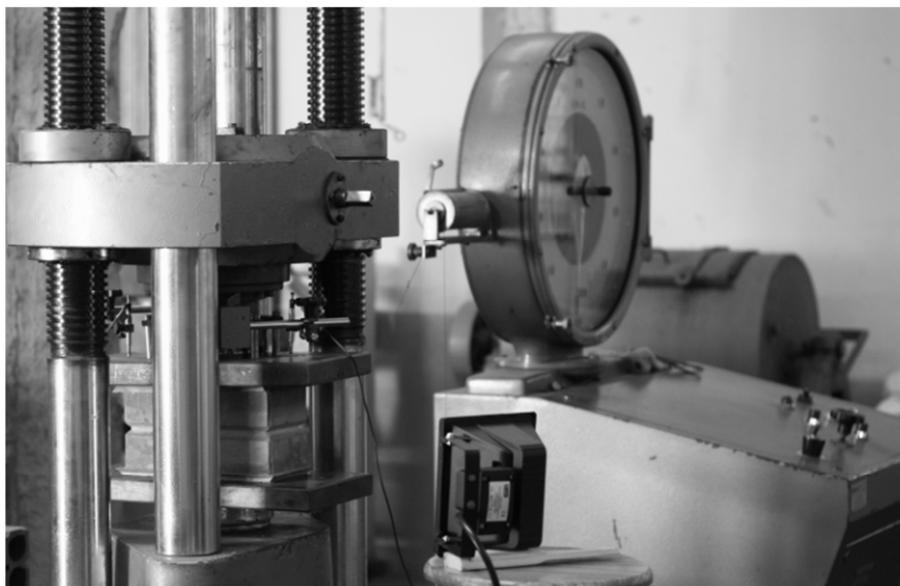


Figura 25 - Equipamento dos testes em prismas

Fonte: Autora (2015)

A ABNT NBR 15961:2 (2011) recomenda que as cargas sejam aplicadas segundo um número de vezes que permita o traçado dos gráficos carga x encurtamentos dos prismas. Indica, ainda que, opcionalmente podem ser efetuadas duas descargas, desde que a carga não tenha atingido 50% da carga de ruptura. Desta forma, o plano de carregamento foi definido após a ruptura de um prisma teste que serviu para avaliar a provável carga de ruptura.

O plano de carregamento adotado consistiu de três ciclos de carga e descarga, com tempo de permanência de 60 segundos para cada carga e descarga, sendo em seguida, o prisma carregado até a ruptura. O tempo de permanência em cada carregamento foi de pelo menos três minutos e antes de atingir 50% da provável carga de ruptura. O modelo de plano de carregamento adotado pode ser visualizado na Figura 26.

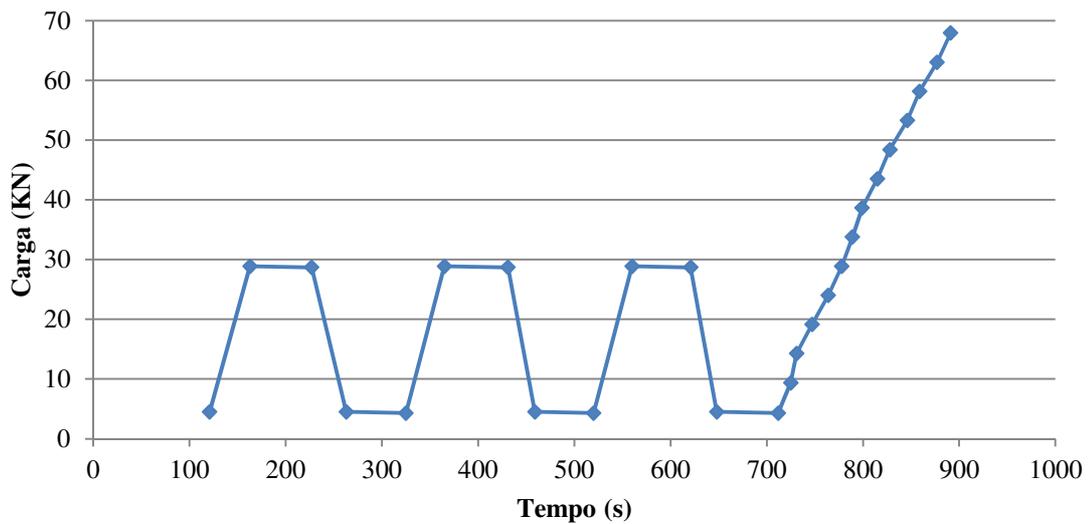


Figura 26 - Plano de carregamento dos prismas

Fonte: Autora (2015)

A ABNT NBR 15961:2 (2011) descreve a determinação do módulo de deformação, alternativamente, pela utilização de dois defletômetros instalados lateralmente. Mohmad (2007) utilizou, em sua pesquisa de doutorado, dois transdutores de deslocamento linear variável (LVDT) fixado por base magnética móvel nas laterais da prensa utilizada para rompimento dos prismas.

Nesta pesquisa, foram utilizados dois transdutores de deslocamento linear variável (LVDT) com sensibilidade de 0,001 mm, posicionados conforme Figura 27. Sobre o prisma foi apoiada uma chapa de aço de 36 mm de espessura, onde foram posicionados os lvdt's com a finalidade de acompanhar a chapa no ensaio, conforme Figura 28.

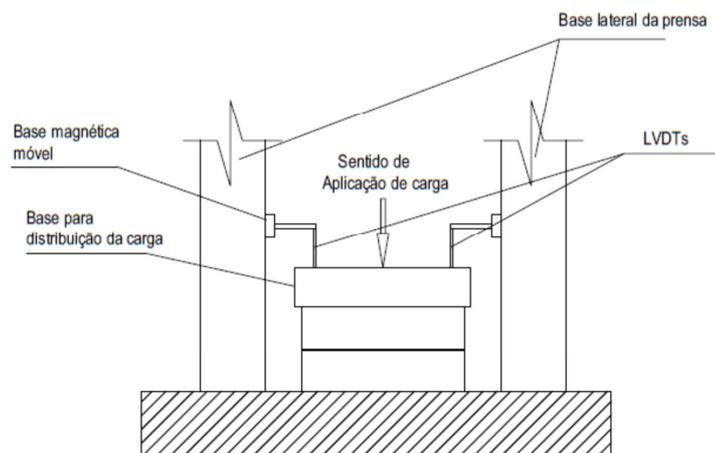


Figura 27 - Detalhe de instrumentação de prismas

Fonte: Autora (2015)



Figura 28 - Instrumentação dos prismas

Fonte: Autora (2015)

Os dados de deslocamento foram registrados por um sistema de aquisição de dados marca HBM modelo Spider 8, acoplado ao software de controle de aquisição de dados CATMAN-EASY versão 3.0, conforme Figura 29.



Figura 29 - Sistema de aquisição de dados de deslocamentos

Fonte: Autora (2015)

Os dados registrados foram exportados para uma planilha Excel® e analisados para obtenção do módulo de deformação da alvenaria. De acordo com a ABNT NBR 15961:2

(2011), o valor do módulo de deformação do prisma (E_p) deve ser calculado no intervalo correspondente à curva secante entre 5% e 30% da tensão de ruptura de cada corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios executados, descritos nos métodos utilizados para os materiais, individualmente, e para o tijolo de solo-cimento-RCC, enquanto componente construtivo.

4.1 SOLO

Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização e compactação do solo e na Figura 30 pode ser visualizada a curva granulométrica do solo.

A curva de compactação do solo é apresentada na Figura 31, onde podem ser obtidos os valores da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e o teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}t}$) de compactação para a energia normal empregada de 600 kJ/m³.

Tabela 15 – Caracterização geotécnica - Solo

Distribuição granulométrica	Material < 4,8 mm – (%)	100
	Material < 0,075 mm – (%)	25
	Pedregulho (>2,0 mm) – (%)	0
	Areia (0,06 – 2,0 mm) – (%)	77
	Silte (0,002 – 0,06 mm) – (%)	5
	Argila (< 0,002 mm) – (%)	18
Limites de consistência	Limite de Liquidez - LL (%)	20
	Limite de Plasticidade - LP (%)	14
	Índice de Plasticidade - IP (%)	6
Massa específica dos grãos	ρ_s (g/cm ³)	2,75
Ensaio de Compactação (Energia = 600 kJ/m ³)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,98
	$w_{\acute{o}t}$ (%)	10

Fonte: Autora (2015)

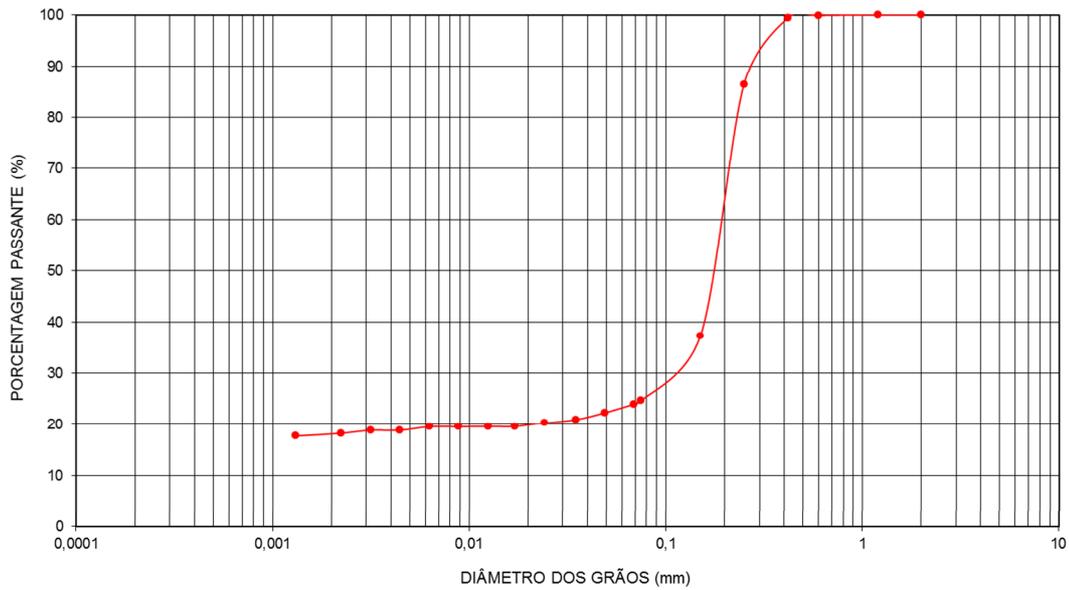


Figura 30 - Curva granulométrica - Solo

Fonte: Autora (2015)

Com base nos resultados obtidos na caracterização geotécnica, o solo é classificado, segundo a ABNT NBR 6502 (1995) como Areia Argilosa; segundo a HRB/AASHTO (ASTM D – 3282; Método M145 da AASHTO) como material A-2-4 (0) e em conformidade com a classificação UNIFICADA (ASTM D – 2487) como SC-SM (Areia Argilosa, Siltosa)

Observa-se ainda que, o solo atende às características descritas na ABNT NBR 10833 (2012), pois:

- 100% do material passou na peneira com abertura de malha de 4,8 mm;
- 10% a 50% do material passou na peneira com abertura de malha 0,075 mm;
- Limite de liquidez foi menor que 45%;
- Índice de plasticidade foi menor que 18%.

Os parâmetros do solo: massa específica aparente seca máxima de $1,98 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de 10% foram obtidos da curva de compactação do solo apresentada na Figura 31.

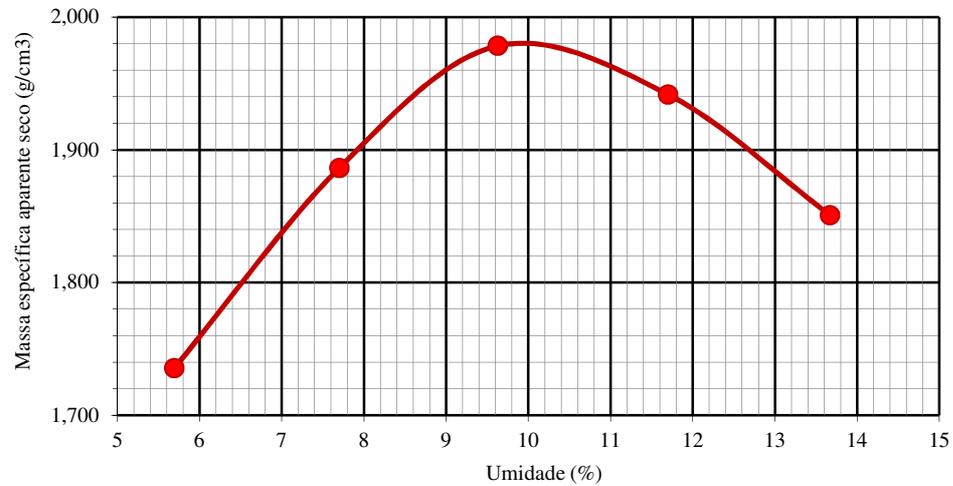


Figura 31 - Curva de compactação do solo natural

Fonte: Autora (2015)

4.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL – RCC

Na Tabela 16 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do resíduo da construção civil (RCC). Observou-se, durante a execução dos ensaios que o resíduo se apresentava como um material frágil, pois os grãos resultantes do processo de britagem quebravam com muita facilidade. Em razão deste fator, optou-se pela realização do ensaio granulométrico com e sem uso de dispersão para avaliar o impacto da quebra dos grãos na granulometria do material.

As curvas granulométricas obtidas podem ser visualizadas na Figura 32.

Tabela 16 - Caracterização do resíduo da construção civil (RCC)

Distribuição granulométrica	RCC com dispersão (%)	RCC sem dispersão (%)
Material < 4,8 mm	100	100
Material < 0,075 mm	23	12
Pedregulho (>2,0 mm)	12	14
Areia (0,06 – 2,0 mm)	65	76
Silte (0,002 – 0,06 mm)	16	7
Argila (< 0,002 mm)	7	3
Limites de Consistência	N.P. (Não Plástico)	
Massa específica dos grãos - ρ_s (g/cm ³)	2,72	

Fonte: Autora (2015)

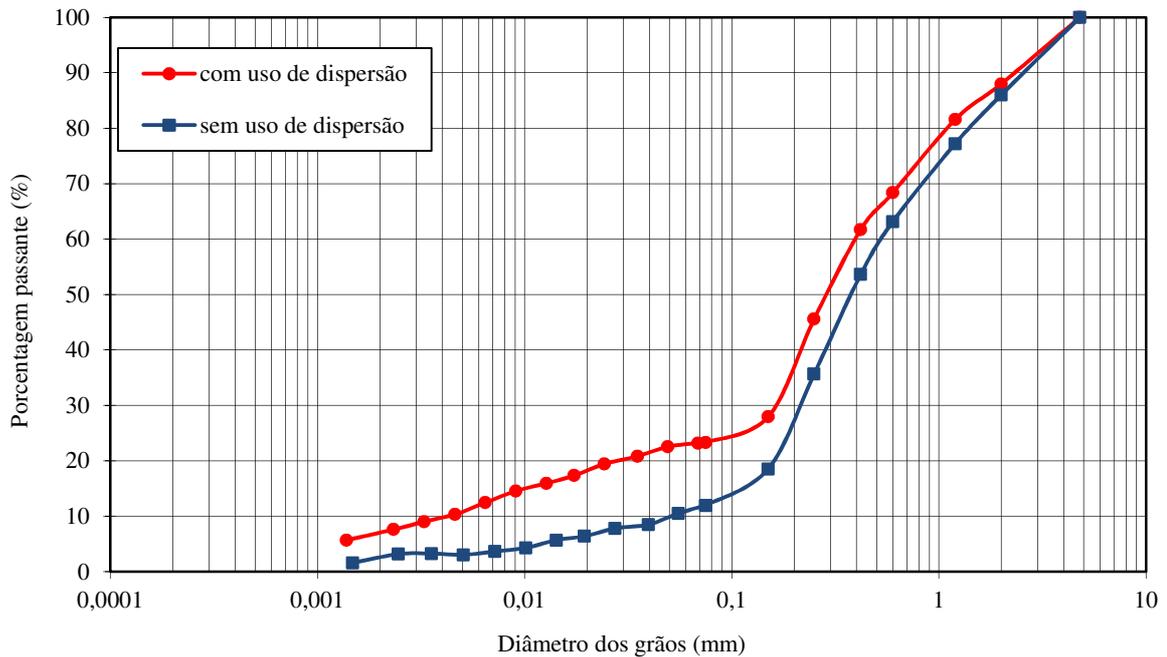


Figura 32 - Curva granulométrica – RCC com e sem uso de dispersão

Fonte: Autora (2015)

Ao analisar a influência do dispersor no ensaio de granulometria percebe-se que com a dispersão o percentual de finos aumenta, enquanto que a fração grossa diminui, demonstrando a fragilidade dos grãos de RCC, que, provavelmente, durante o processo de beneficiamento tiveram sua estrutura interna fragmentada.

Com base nos resultados obtidos na análise granulométrica, o RCC é classificado segundo a ABNT NBR 6502 (1995) como Areia Siltosa com pedregulho.

4.3 DOSAGENS DAS MISTURAS DE SOLO-CIMENTO-RCC

Considerando a fragilidade dos grãos de RCC, optou-se pela execução do ensaio granulométrico sem dispersão, evitando a quebra de grãos durante o ensaio. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para o solo, para o RCC e para as misturas de solo-RCC. As curvas granulométricas do solo, do RCC e das misturas de solo-RCC podem ser verificadas na Figura 33.

Para uma melhor análise e interpretação dos resultados, na Tabela 17 e Figura 33, são também apresentados os resultados referentes ao solo e ao RCC sem o uso de dispersão.

Tabela 17 - Características do solo, RCC e das diferentes combinações entre solo e RCC

Característica		Solo	RCC	SR _{20%}	SR _{40%}	SR _{60%}
Distribuição granulométrica	Material < 4,8 mm – (%)	100	100	100	100	100
	Material < 0,075 mm – (%)	25	12	22	18	17
	Pedregulho (>2,0 mm) – (%)	0	14	3	4	8
	Areia (0,06 – 2,0 mm) – (%)	77	76	77	80	76
	Silte (0,002 – 0,06 mm) – (%)	5	7	7	12	9
	Argila (< 0,002 mm) – (%)	18	3	13	4	7
Limites de consistência	Limite de Liquidez - LL (%)	20	NP	NP	NP	NP
	Limite de Plasticidade - LP (%)	14				
	Índice de Plasticidade - IP (%)	6				
Massa específica dos grãos	ρ_s (g/cm ³)	2,75	2,72	2,74	2,73	2,72

Fonte: Autora (2015)

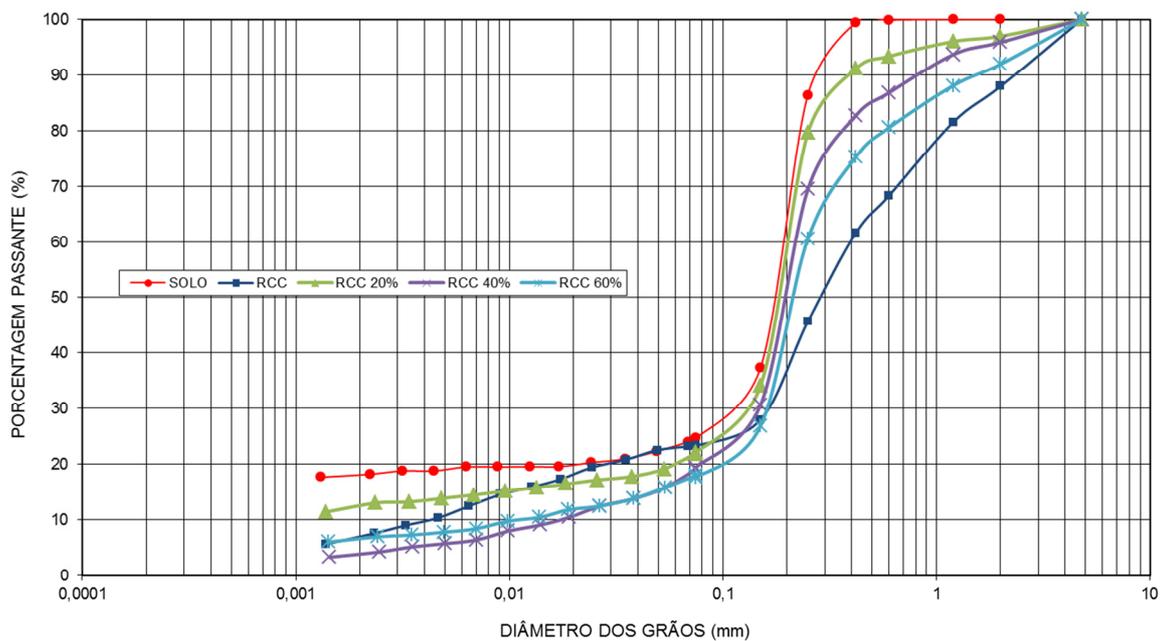


Figura 33 - Curvas granulométricas – Solo, RCC e misturas de Solo-RCC sem o uso de dispersão.

Fonte: Autora (2015)

As curvas resultantes dos ensaios de compactação do solo e das misturas em laboratório, realizados em conformidade com a ABNT NBR 7182 (1988), sem reuso do solo na energia Normal (600 kJ/m³) podem ser visualizadas na Figura 34.

As curvas encontradas são condizentes com as características de solos arenosos, ou seja, uma curva pontiaguda, onde pequenas diferenças no teor de umidade resultam em maior variação na massa específica aparente seca do material.

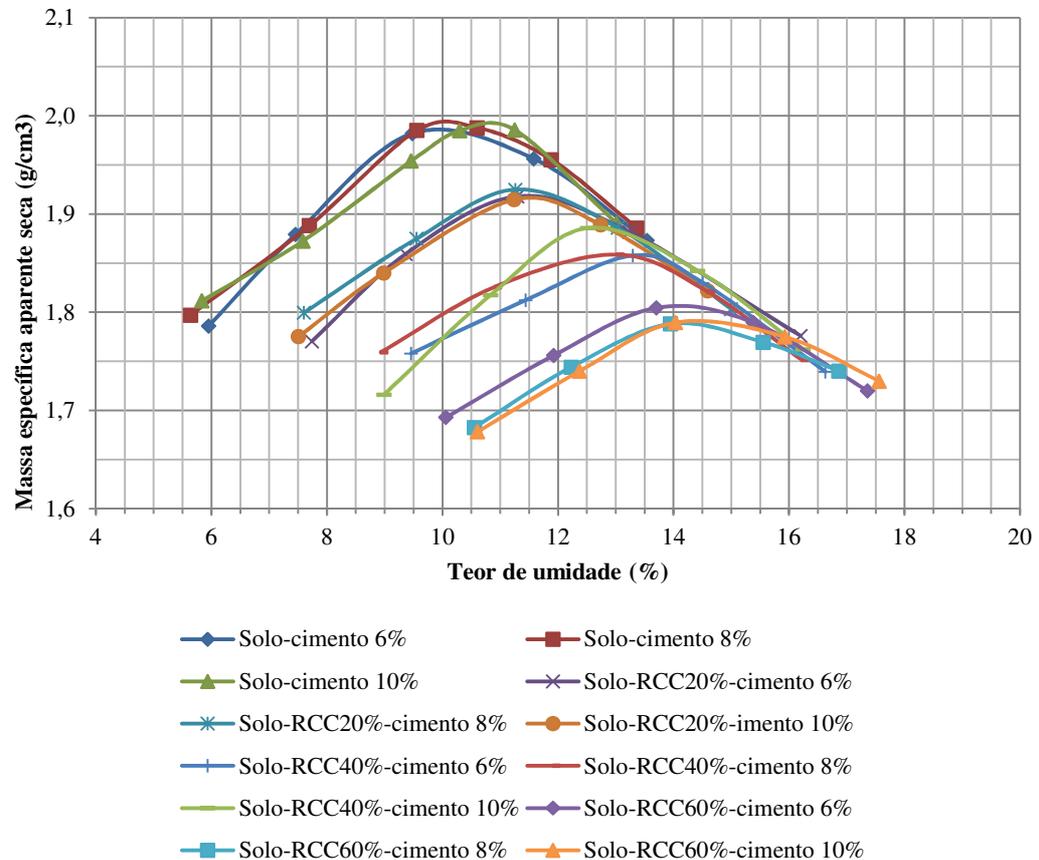


Figura 34 - Curvas de compactação das misturas de solo cimento e solo-cimento-RCC

Fonte: Autora (2015)

Os resultados encontrados para a umidade ótima ($w_{ót}$) de compactação e para a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) em cada mistura podem ser observados na Tabela 18. Percebe-se que o aumento no percentual de resíduo da construção civil na mistura provoca o deslocamento da curva de compactação, aumentando o valor da umidade ótima e diminuindo a massa específica aparente seca máxima dentro do mesmo teor de cimento. Tal fato pode ser atribuído ao aumento de partículas finas proveniente do processo de beneficiamento do resíduo, o que provoca a necessidade de aumento na quantidade de água para garantir uma boa compactação.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de compactação das misturas de solo-cimento e solo-cimento-RCC

Dosagem	Umidade Ótima	Massa específica aparente seca máxima
	w_{ot} (%)	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)
Solo Natural	10,0	1,980
Solo + 6% de cimento	10,0	1,985
Solo + 8% de cimento	10,2	1,992
Solo + 10% de cimento	10,8	1,994
Solo + 6% de cimento + 20% de RCC	11,6	1,920
Solo + 8% de cimento + 20% de RCC	11,4	1,925
Solo + 10% de cimento + 20% de RCC	11,6	1,918
Solo + 6% de cimento + 40% de RCC	13,3	1,858
Solo + 8% de cimento + 40% de RCC	13,0	1,859
Solo + 10% de cimento + 40% de RCC	12,7	1,886
Solo + 6% de cimento + 60% de RCC	14,1	1,810
Solo + 8% de cimento + 60% de RCC	14,2	1,770
Solo + 10% de cimento + 60% de RCC	14,4	1,790

Fonte: Autora (2015)

Os corpos de prova obtidos nos ensaios de compactação, após cura de 7 dias em câmara úmida, foram rompidos para uma avaliação preliminar da resistência à compressão das misturas. Tal procedimento teve como objetivo a escolha de quatro dosagens para a fabricação dos tijolos de solo-cimento-RCC. Os resultados podem ser verificados na Tabela 19 e as curvas de resistência podem ser visualizadas na Figura 35 e na Figura 36.

Tabela 19 - Resultado dos ensaios de Resistência à Compressão (kgf/cm²) – 7 dias (Imersão prévia de 4 horas)

Dosagem	Corpo de prova (N)				
	01	02	03	04	05
Solo + 6% de cimento	9,32	19,98	34,76	16,90	11,24
Solo + 8% de cimento	12,99	25,21	35,40	23,43	22,09
Solo + 10% de cimento	10,44	26,48	33,74	30,81	25,34
Solo + 6% de cimento + 20% de RCC	10,44	15,79	25,85	28,78	19,35
Solo + 8% de cimento + 20% de RCC	19,23	30,30	32,72	26,23	18,72
Solo + 10% de cimento + 20% de RCC	13,37	37,18	39,22	26,23	24,83
Solo + 6% de cimento + 40% de RCC	19,35	28,27	30,30	23,94	19,10
Solo + 8% de cimento + 40% de RCC	22,92	36,92	36,67	28,01	24,45
Solo + 10% de cimento + 40% de RCC	-	-	44,95	32,09	24,19
Solo + 6% de cimento + 60% de RCC	19,16	28,52	37,43	32,09	26,23
Solo + 8% de cimento + 60% de RCC	22,92	36,16	42,13	35,65	28,39
Solo + 10% de cimento + 60% de RCC	24,19	33,87	49,27	40,36	33,87

Fonte: Autora (2015)

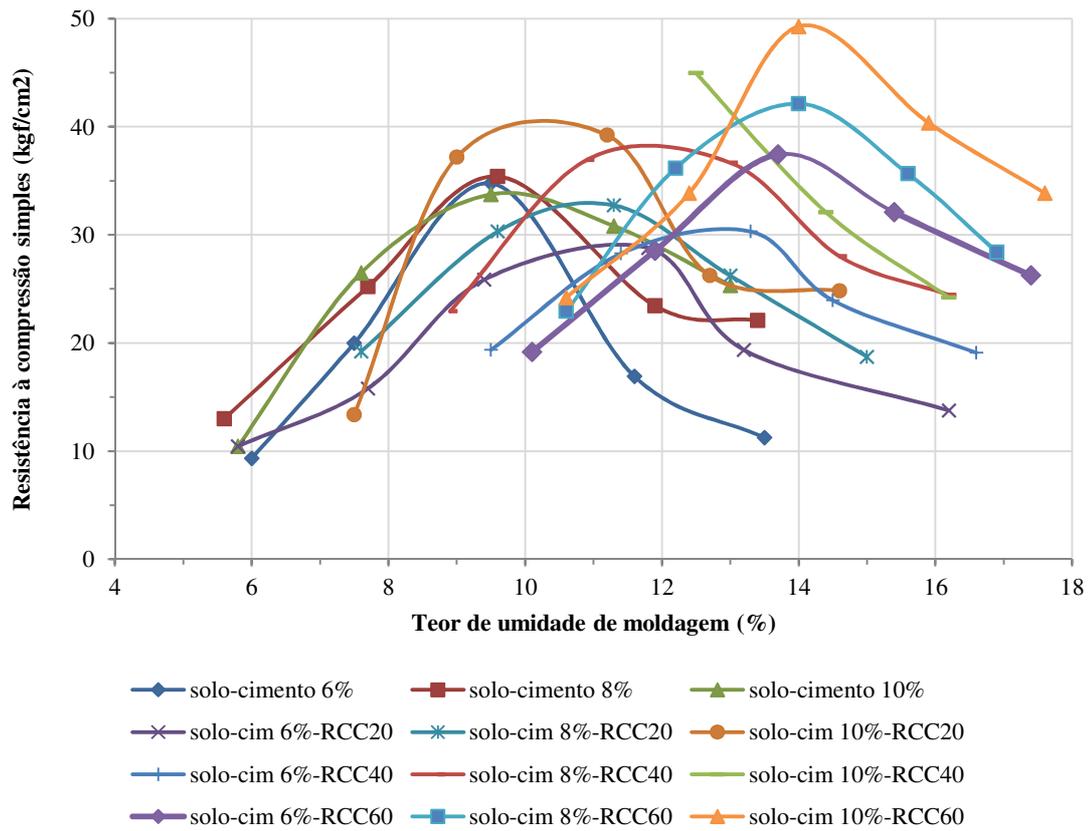


Figura 35 - Curvas de resistência dos corpos de prova cilíndricos de solo-cimento-RCC

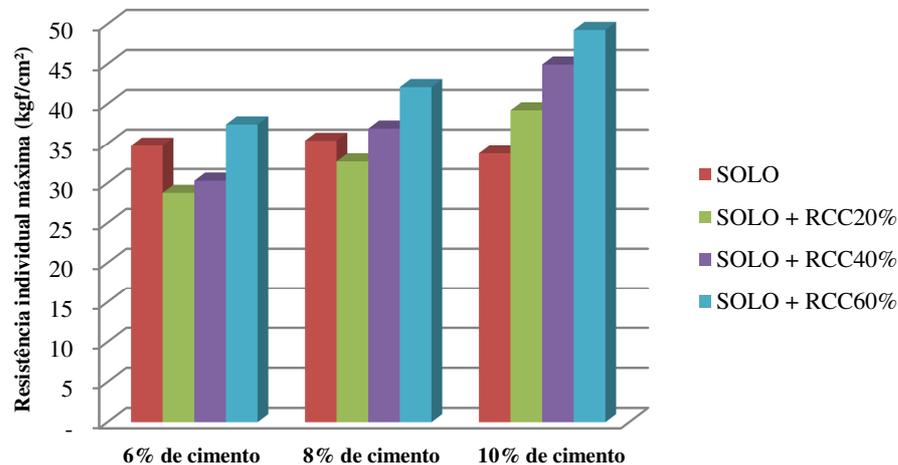


Figura 36 - Aumento da resistência individual máxima dos CP's com o acréscimo de RCC

Fonte: Autora (2015)

A partir da análise da Figura 36 e da Tabela 19, é possível constatar ganhos de resistência significativos ao comparar a resistência do solo-cimento com e sem adição de resíduos. No caso da mistura de 6% de cimento, o aumento na resistência foi de 7,7%; na

mistura de 8% de cimento o aumento na resistência foi de 19% e, ao analisar a mistura com 10% de cimento, a resistência aumentou 46%, demonstrando a viabilidade na utilização do RCC. Além disso, observa-se uma tendência de melhora na resistência com o acréscimo de RCC dentro de um mesmo teor de cimento.

Considerando a necessidade de definir no mínimo três traços para a confecção dos tijolos de solo-cimento-RCC, foram escolhidas, preliminarmente, as quatro misturas apontadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Dosagens selecionadas para confecção dos tijolos

Dosagem	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo (%)	Resistência preliminar – 7 dias (MPa)
SC ₆ R ₄₀	67,4	5,7	27,0	3,0
SC ₈ R ₄₀	66,1	7,4	26,5	3,7
SC ₆ R ₆₀	59,0	5,7	35,4	3,7
SC ₈ R ₆₀	57,9	7,4	34,7	4,2

Fonte: Autora (2015)

A escolha das misturas teve como objetivo o aproveitamento máximo de resíduo e o menor consumo de cimento, associado à análise das resistências preliminares obtidas no rompimento dos corpos de prova do ensaio de compactação. Desta forma, foram eliminadas, inicialmente, as misturas que continham menor percentual de RCC e maior percentual de cimento.

4.4 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

O resultado obtido no estudo da composição granulométrica do agregado miúdo pode ser visualizado na Tabela 21.

Tabela 21 - Estudo da composição granulométrica da areia

PENEIRAS (mm)	ENSAIO 1	500 gramas		ENSAIO 2	500,00 gramas		PORCENTAGEM MÉDIA RETIDA E ACUMULADA (%)
	MASSA DE MATERIAL RETIDO	PORCENTAGEM DE MATERIAL		MASSA DE MATERIAL RETIDO	PORCENTAGEM DE MATERIAL		
		RETIDO	RETIDO E ACUMULADO		RETIDO	RETIDO E ACUMULADO	
	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	
9,5	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0
6,3	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0
4,75	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0
2,36	0,34	0,1	0,1	0,62	0,1	0,1	0
1,18	2,39	0,5	0,5	1,66	0,3	0,5	1
0,60	5,64	1,1	1,7	3,48	0,7	1,2	1
0,30	49,75	10,0	11,6	46,07	9,2	10,4	11
0,15	401,50	80,4	92,0	405,54	81,2	91,6	92
FUNDOS	39,76	8,0	100,0	41,96	8,4	100,0	100

Fonte: Autora (2015)

Na Figura 37 é apresentada a curva granulométrica obtida para o agregado miúdo.

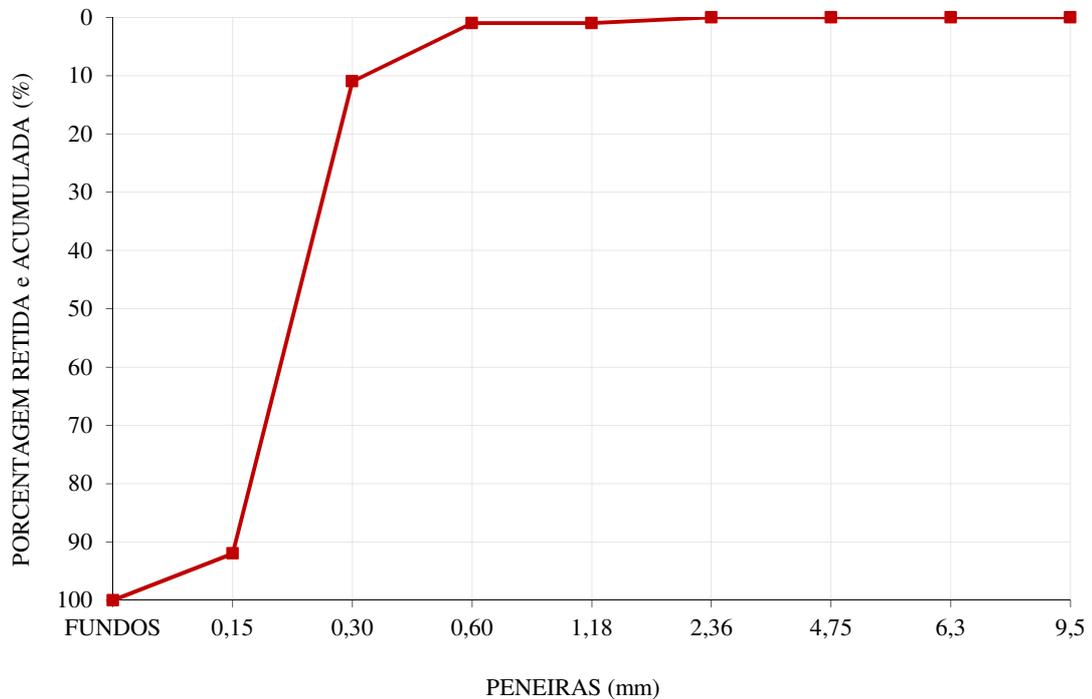


Figura 37 - Curva granulométrica da areia

Fonte: Autora (2015)

Foram analisadas algumas propriedades da areia descritas na Tabela 22.

Tabela 22 - Propriedades da areia

Propriedade	Resultado
Módulo de finura	1,61
Diâmetro máximo do agregado	0,6 mm
Massa específica do agregado miúdo	2,653 kg/dm ³
Massa unitária do agregado na condição seca e solta	1,460 kg/dm ³
Massa unitária do agregado na condição seca e compactada	1,598 kg/dm ³

Fonte: Autora (2015)

De acordo com Moreira (2007) a recomendação prática é que o diâmetro máximo do agregado seja inferior a 1/3 da espessura da junta. O diâmetro máximo do agregado utilizado atende essa característica.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão da argamassa podem ser visualizados na Tabela 23.

Tabela 23 - Dados de resistência à compressão da argamassa (MPa)

Corpo de prova	Resistência (MPa)
01	2,7
02	2,7
03	2,8
04	2,9
05	2,9
06	3,2
Média	2,9
Desvio Padrão	0,2
Coefficiente de variação (CV)	6%

Fonte: Autora (2015)

A resistência obtida ficou dentro das recomendações de Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) os quais indicam, de maneira geral, a utilização de argamassas com resistência à compressão dentro de uma faixa de 0,7 a 1,5 vezes o valor da resistência característica do bloco, visto que não há especificações destinadas ao uso em alvenaria de tijolos de solo-cimento.

4.5 TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC

No processo de produção não foram encontradas dificuldades para a fabricação dos tijolos nas misturas com 40% de RCC (SC₈R₄₀ e SC₆R₄₀). Porém, ao moldar os tijolos que continham 60% de resíduo, a moldagem não foi satisfatória com a mistura SC₆R₆₀, devido à grande quantidade de tijolos perdidos durante o processo. A mistura SC₈R₆₀ foi realizada, porém, com certa dificuldade. Optou-se por moldar tijolos com teor de 10% de cimento, pois mesmo com o aumento do teor de cimento o ganho em aproveitamento de RCC (60%) era significativo. Observou-se ainda que, durante o processo de moldagem, mesmo com o acréscimo de cimento, as perdas eram significativas ao produzir os tijolos com percentual de resíduo de 60%.

A análise dimensional realizada de acordo com a ABNT 8491 (2012) não apresentou resultados superiores ao limite estabelecido. As dimensões dos tijolos produzidos se encontram na Tabela 24.

Tabela 24 - Dimensões nominais do tijolo de solo-cimento-RCC

Comprimento	250 mm
Largura	125 mm
Altura	65 mm

Fonte: Autora (2015)

A área bruta nominal da face de assentamento é de 312,5 cm² e a área líquida igual a 82% da área bruta, ou seja, 256,0 cm², obtidas com as medidas geométricas diretas. O volume útil corresponde a 1.663,70 cm³.

Os resultados da resistência à compressão no rompimento dos tijolos são apresentados na Tabela 25, cujos gráficos de evolução da resistência encontram-se na Figura 38.

Tabela 25 - Resistência à compressão dos tijolos (MPa) – após imersão em água por 16 horas

Dosagem	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias
SC ₆ R ₄₀	1,3	1,6	1,5	1,7
SC ₈ R ₄₀	1,6	2,1	2,1	2,2
SC ₈ R ₆₀	1,8	2,2	2,3	2,5
SC ₁₀ R ₆₀	1,8	2,4	2,4	2,7

Fonte: Autora (2015)

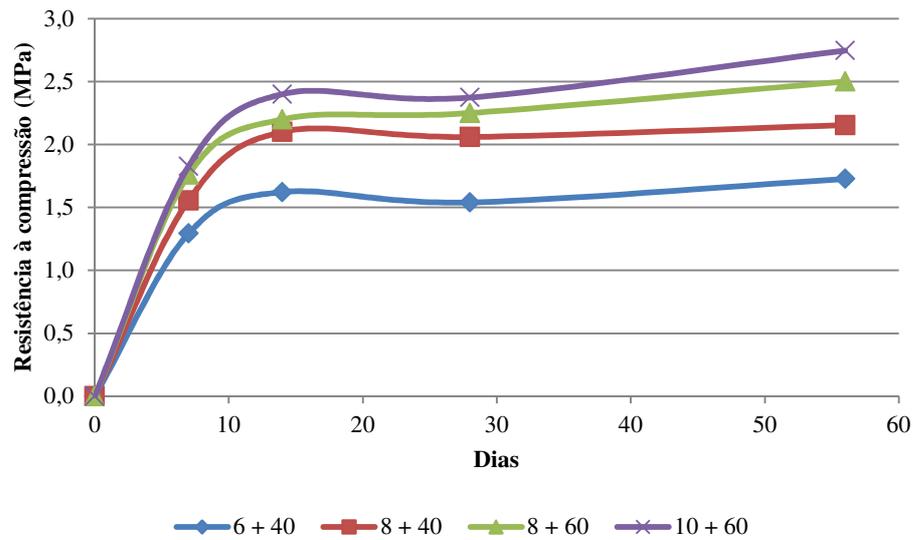


Figura 38 - Evolução da resistência para as diferentes combinações de solo-cimento-RCC

Fonte: Autora (2015)

Na Figura 38, se observa uma tendência de evolução da resistência semelhante ao obtido na avaliação dos corpos de prova cilíndricos, ou seja, a resistência obedece à mesma ordem de crescimento. Na Tabela 26 tal observação se torna mais evidente.

Tabela 26 - Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa) e em tijolos (MPa) – 7 dias

Dosagem	Corpos de prova cilíndricos	Tijolos
SC ₆ R ₄₀	3,0	1,3
SC ₈ R ₄₀	3,7	1,6
SC ₈ R ₆₀	4,2	1,8
SC ₁₀ R ₆₀	4,9	1,8

Fonte: Autora (2015)

Ao contrário do obtido por Souza (2006), os tijolos moldados com 7 dias não atenderam a resistência à compressão recomendada pela ABNT NBR 8491 (2012), pois o valor médio ficou abaixo de 2,0 MPa e alguns valores individuais ficaram abaixo de 1,7 MPa. Desta forma, sua utilização com essa idade não é viável. A realização do ensaio com 14 dias permitiu atender aos requisitos da norma e definir o traço a ser utilizado na fabricação dos tijolos para a confecção dos prismas. A realização do ensaio de resistência à compressão para os tijolos SC₆R₄₀ demonstraram a inviabilidade do material, visto que, mesmo aos 28 dias, seu valor não atendeu às recomendações da norma.

Conjuntamente ao ensaio de resistência à compressão foi realizado o ensaio de absorção de água dos tijolos, cujos valores encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios de absorção de água dos tijolos (%)

Dosagem	7 dias	14 dias
SC ₆ R ₄₀	16,6	16,4
SC ₈ R ₄₀	16,3	16,0
SC ₈ R ₆₀	17,5	17,1
SC ₁₀ R ₆₀	17,4	16,9

Fonte: Autora (2015)

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água foram satisfatórios e atenderam às recomendações da ABNT NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos, ou seja, a média dos resultados foi inferior a 20% e nenhum resultado foi superior a 22%.

Observa-se que a absorção diminui com o aumento da idade dos corpos de prova e que os valores de absorção para o mesmo percentual de RCC permanecem praticamente os mesmos, independentemente do teor de cimento.

Analisando os dados de resistência à compressão e de absorção de água aos 14 dias foi escolhida a dosagem SC₁₀R₆₀ para a fabricação dos tijolos a serem utilizados nos prismas e paredes.

Entretanto, no momento da fabricação dos tijolos SC₁₀R₆₀, a mistura apresentou grande dificuldade de confecção (elevada perda), como já relatado, na moldagem dos traços que definiriam a dosagem a ser fabricada para a construção dos prismas e pequenas paredes. Na tentativa de obter o máximo aproveitamento de RCC, optou-se por moldar uma mistura intermediária, ou seja, com 50% de resíduo, visto que as misturas com 40% e 60% de RCC mostraram-se satisfatórias.

Vargas (1977) define grau de compactação como a relação entre a massa específica aparente seca no campo e aquela obtida em ensaio de laboratório.

Para o cálculo do grau de compactação dos tijolos de solo-cimento-RCC foi realizada a pesagem de cada tijolo utilizado no ensaio de absorção após secagem e utilizada a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação, obtendo-se os valores encontrados na Tabela 28.

Tabela 28 - Grau de compactação dos tijolos de solo-cimento-RCC

Dosagem	Massa seca do tijolo (g)	Massa específica aparente seca do tijolo (g/cm ³)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Grau de compactação (%)
6 + 40	2.770,04	1,660	1,858	90%
8 + 40	2.776,25	1,670	1,859	90%
8 + 60	2.703,83	1,630	1,770	92%
10 + 60	2.660,12	1,600	1,790	89%

Fonte: Autora (2015)

4.5.1 Estudo estatístico dos resultados obtidos com tijolos de solo-cimento-RCC

De acordo com Costa Neto (1998), a variabilidade dos dados obtidos em uma amostra pode ser analisada preliminarmente pelo coeficiente de variação (CV). Este coeficiente fornece o percentual de variação nos dados de uma amostra. Desta forma, a amostra é considerada aceitável, quando o valor de CV é menor que 25%. Valores superiores a este limite podem tornar a qualidade da amostra duvidosa.

Para as dosagens estudadas foi avaliado o coeficiente de variação dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, onde se observa que todas as séries avaliadas apresentaram pequenos valores para este coeficiente, demonstrando que a amostra pode ser considerada aceitável. Os resultados estão apresentados na Tabela 29 até a Tabela 32, conforme a idade dos corpos de prova.

Tabela 29 - Estudo estatístico para a resistência à compressão dos tijolos com 7 dias

Dosagem	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	Menor valor individual (MPa)
SC ₆ R ₄₀	1,3	0,1	4,6	1,2
SC ₈ R ₄₀	1,6	0,1	8,7	1,4
SC ₈ R ₆₀	1,8	0,2	13,1	1,5
SC ₁₀ R ₆₀	1,8	0,1	5,0	1,7

Fonte: Autora (2015)

Tabela 30 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 14 dias

Dosagem	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	Menor valor individual (MPa)
SC ₆ R ₄₀	1,6	0,0	3,0	1,6
SC ₈ R ₄₀	2,1	0,1	2,9	2,0
SC ₈ R ₆₀	2,2	0,2	8,4	1,9
SC ₁₀ R ₆₀	2,4	0,1	2,6	2,4

Fonte: Autora (2015)

Tabela 31 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 28 dias

Dosagem	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Menor valor individual (MPa)
SC ₆ R ₄₀	1,5	0,1	5,3	1,4
SC ₈ R ₄₀	2,1	0,1	5,8	1,9
SC ₈ R ₆₀	2,4	0,2	6,2	2,3
SC ₁₀ R ₆₀	2,4	0,2	7,3	2,2

Fonte: Autora (2015)

Tabela 32 - Estudo estatístico para resistência à compressão dos tijolos com 56 dias

Dosagem	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Menor valor individual (MPa)
SC ₆ R ₄₀	1,7	0,3	18,3	1,4
SC ₈ R ₄₀	2,2	0,1	2,6	2,1
SC ₈ R ₆₀	2,2	0,2	8,7	1,9
SC ₁₀ R ₆₀	2,7	0,1	4,0	2,6

Fonte: Autora (2015)

4.6 O TIJOLO DE SOLO-CIMENTO-RCC (SC₁₀R₅₀)

Este capítulo trata do estudo da dosagem SC₁₀R₅₀ utilizada para confecção dos tijolos utilizados na montagem dos prismas, os quais serviram para definir a resistência característica da alvenaria e seu módulo de deformação.

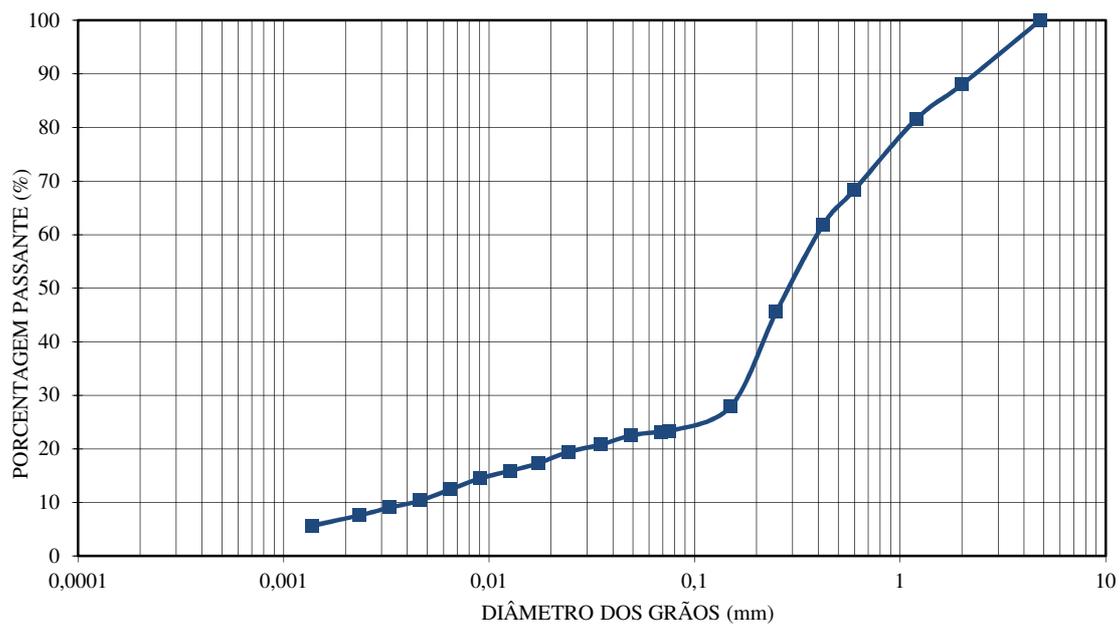
Conforme já apresentado, devido à dificuldade de moldagem durante a fabricação da dosagem inicialmente definida, foi escolhida esta nova combinação para confecção dos tijolos de solo-cimento-RCC, visando o máximo aproveitamento do resíduo.

Na Tabela 33 tem-se um resumo das características desta mistura. Na Figura 39 encontra-se a curva granulométrica obtida e, na Figura 40, a curva de compactação.

Tabela 33 - Caracterização da dosagem SC₁₀R₅₀

Distribuição granulométrica	Material < 4,8 mm – (%)	100
	Material < 0,075 mm – (%)	18
	Pedregulho (>2,0 mm) – (%)	8
	Areia (0,06 – 2,0 mm) – (%)	75
	Silte (0,002 – 0,06 mm) – (%)	11
	Argila (< 0,002 mm) – (%)	6
Limites de consistência		NP
Massa específica dos grãos	ρ_s (g/cm ³)	2,73
Ensaio de Compactação (Energia = 600 kJ/m ³)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,838
	$w_{\acute{o}t}$ (%)	13,4

Fonte: Autora (2015)

Figura 39 - Curva granulométrica da dosagem SC₁₀R₅₀

Fonte: Autora (2015)

Os parâmetros: massa específica aparente seca máxima de $1,838 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo de $13,4\%$ foram obtidos da curva de compactação da mistura apresentada na Figura 40.

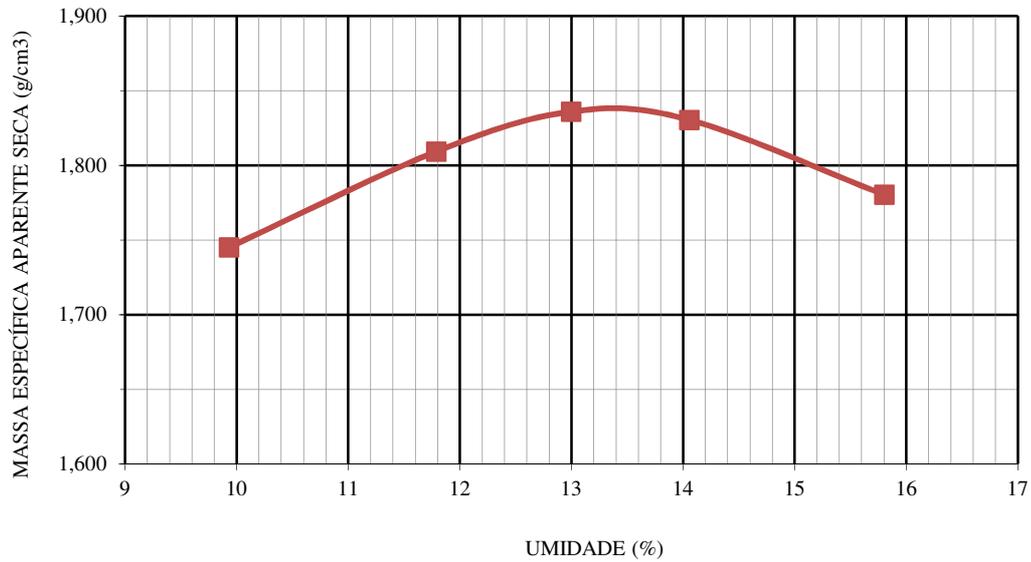


Figura 40 - Curva de compactação da dosagem SC₁₀R₅₀

Fonte: Autora (2015)

Foi realizado o ensaio de absorção, cujo valor encontrado foi de $17,7\%$ e o estudo da evolução da resistência à compressão dos tijolos nas idades de 14, 28 e 56 dias, conforme Figura 41.

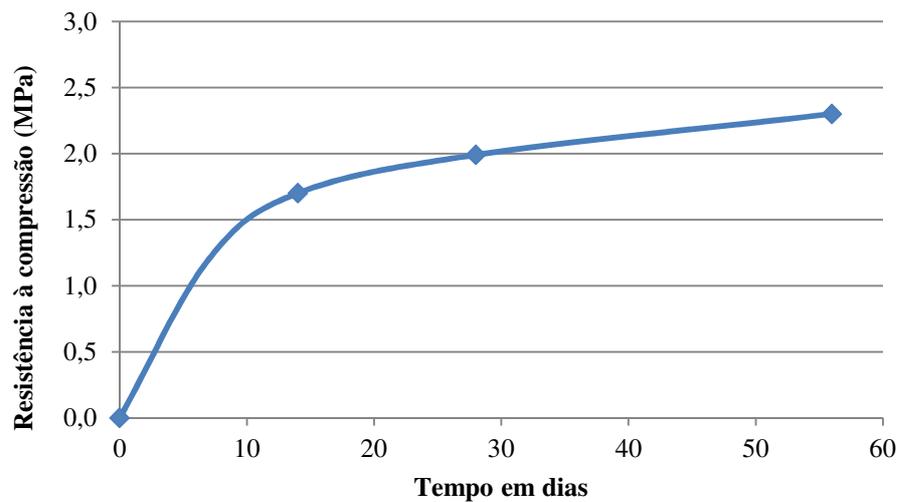


Figura 41 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC₁₀R₅₀)

Fonte: Autora (2015)

Na Figura 42 é possível comparar a evolução com as demais dosagens inicialmente estudadas. O grau de compactação obtido na moldagem dos tijolos na dosagem $SC_{10}R_{50}$ foi de 88%.

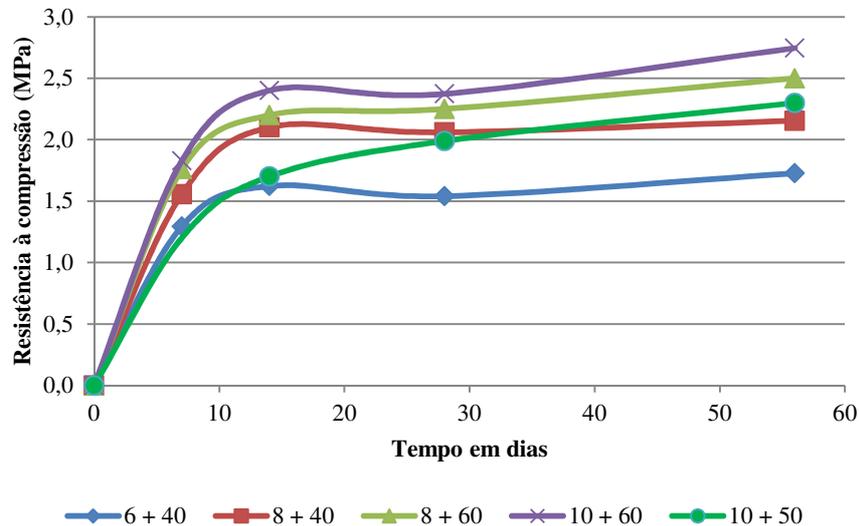


Figura 42 - Comparativo da evolução da resistência à compressão da dosagem $SC_{10}R_{50}$ com as demais dosagens utilizadas

Fonte: Autora (2015)

O peso das unidades após 60 dias de fabricação correspondeu a 2.830,00 gramas, cuja massa específica, relativa ao volume aparente total, é de aproximadamente 1700 kg/m^3 .

Os dados encontrados comprovam a viabilidade da utilização desses tijolos na confecção de elementos em alvenaria, pois foi atingida a resistência mínima de 2 MPa e a absorção média foi menor que 20%, conforme especificado pela ABNT NBR 8491 (2012).

4.7 PRISMAS COM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO-RCC ($SC_{10}R_{50}$)

Os prismas foram instrumentados e rompidos aos 28 dias após o assentamento. O primeiro rompimento não foi instrumentado, visto que seu resultado foi utilizado para estimar o carregamento último e as faixas de carga e descarga utilizadas.

Para o cálculo da resistência à compressão característica e média da alvenaria, bem como seu módulo de deformação foram utilizados os resultados de seis prismas.

4.7.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão podem ser observados na Tabela 34. Conforme recomendação da ABNT NBR 15961:1 (2011) foi utilizada a área bruta do tijolo nos cálculos.

Tabela 34 - Resistência à compressão individual e carga de ruptura nos prismas aos 28 dias

Prisma	Resistência à compressão individual (MPa)	Carga de ruptura (N)
01	2,3	70240
02	2,2	68290
03	2,3	71020
04	2,7	81750
05	2,2	68490
06	2,2	67900
Média (MPa)	2,3	71282
Desvio padrão (MPa)	0,2	5271
CV (%)	8,4	7,4

Fonte: Autora (2015)

Com os resultados obtidos foram analisadas as equações propostas por autores em diferentes literaturas conforme Tabela 35. Percebe-se que há coerência entre os resultados, apesar de serem formulações não definidas para aplicação em tijolos de solo-cimento.

Tabela 35 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão da alvenaria segundo diferentes autores

Fonte	Resistência à compressão da alvenaria (MPa)
Priestley e Yuk	1,40
Hamid e Drysdale	1,96
ABNT NBR 15961:2	1,40
Eurocode 6	0,90

Fonte: Autora (2015)

4.7.2 Módulo de deformação

Os resultados obtidos para o módulo de deformação podem ser observados na Tabela 36. Para a determinação do módulo de deformação foi considerada a reta secante entre os pontos de 5% e 30% da tensão de ruptura, conforme recomendação da ABNT NBR 15961:2 (2011). No cálculo da tensão de ruptura foi utilizada a área bruta do tijolo.

Os gráficos tensão/deformação dos prismas são apresentados no APÊNDICE B, onde foi utilizada a ABNT NBR 9895 (1987) para correção do trecho inicial da curva.

Tabela 36 - Módulo de deformação da alvenaria de tijolos de solo-cimento-RCC

Prisma	Módulo de deformação (MPa)
01	1181
02	1201
03	1218
04	1231
05	1312
06	1318
Média (MPa)	1244
Desvio padrão (MPa)	58
CV (%)	4,7

Fonte: Autora (2015)

4.7.3 Fator de eficiência

O valor encontrado para a resistência à compressão do tijolo aos 28 dias foi de 2,0 MPa e o valor obtido para o prisma foi de 2,3 MPa, resultando um fator de eficiência de 115%. Observa-se que o ensaio de resistência do tijolo foi realizado aos 28 dias e que, no rompimento dos prismas, os tijolos apresentavam idade de 50 dias. Acredita-se que este resultado é influenciado pelo ganho de resistência do componente tijolo solo-cimento-RCC, pois as reações internas, devido ao cimento, continuaram ocorrendo.

4.7.4 Tipo de ruptura dos prismas

A maioria dos prismas apresentou propagação de fissuras verticais ao longo dos cantos da unidade, com ruptura característica por tração na região próxima da junta de argamassa. Na Figura 43 pode ser observada a propagação das fissuras para diferentes carregamentos.

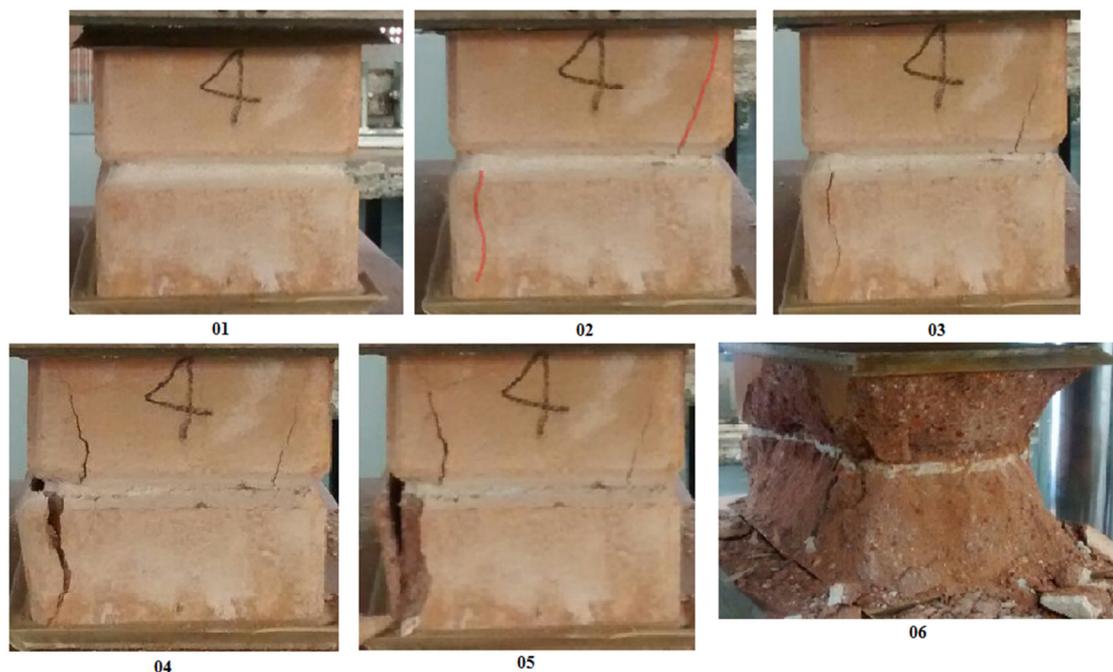


Figura 43 - Padrão de ruptura observado nos prismas

Fonte: Autora (2015)

Na série estudada, as fissuras ficaram evidentes a partir de aproximadamente 80% da carga de ruptura.

5 CONCLUSÃO

O estudo dos materiais (solo e RCC) permitiu avaliar as suas propriedades e verificar a compatibilidade existente entre esses materiais, tornando viável a sua mistura em diferentes combinações, visando à fabricação de tijolos de solo-cimento-RCC.

A adição de RCC na confecção de tijolos de solo-cimento-RCC contribuiu para elevar sua resistência, porém é possível observar um limite para a utilização deste resíduo, visto que sua granulometria, formada por elementos inertes, não propicia a coesão inicial necessária ao processo de produção dos tijolos. À medida que o percentual de resíduo aumenta, a fração argila do solo natural diminui, dificultando a desmoldagem e o manuseio dos tijolos após

prensagem. Os resultados sugerem, para os materiais estudados, que esse percentual de argila necessária está em torno de 9%.

O peso do tijolo produzido diminuiu com o acréscimo de resíduo, pois as curvas de compactação das misturas evidenciaram uma redução nos valores da massa específica aparente seca com o aumento do percentual de resíduo utilizado. A mistura por se tornar mais granular com a adição do resíduo, possivelmente, resultou em vazios maiores que não puderam ser preenchidos pelas frações menores sob o efeito da energia de compactação aplicada.

Além de influenciar no peso do tijolo fabricado, o aumento da quantidade e/ou do tamanho dos vazios refletiu diretamente em maior absorção de água, pois se constata que a absorção de água aumentou com o acréscimo de resíduo dentro de um mesmo teor de cimento.

No ensaio de granulometria, o uso de dispersão provocou alterações significativas na curva granulométrica, o que demonstra certa fragilidade dos grãos de RCC. Esta fragilidade pode ser atribuída ao processo de produção, visto que o RCC é obtido por trituração e alguns grãos podem apresentar linhas de fraturas internas sem completa desagregação.

O acréscimo no percentual de resíduo da construção civil na mistura provocou o deslocamento da curva de compactação, aumentando o valor da umidade ótima e diminuindo a massa específica aparente seca máxima. Tal fato pode ser atribuído ao aumento de partículas finas proveniente do processo de beneficiamento do resíduo, o que provoca a necessidade de aumento na quantidade de água para lubrificar a superfície das partículas. Aumentando a quantidade de água, parte da energia é despendida por esta, prejudicando a aproximação dos grãos/partículas, justificando a redução da massa específica aparente seca.

Assim como outros pesquisadores, durante a produção, constatou-se que a umidade ótima não garantia a produção de tijolos com qualidade, provocando rachaduras e quebras de componentes, sendo necessária a redução no seu teor em três pontos percentuais (3%). Esse comportamento pode ser justificado pelas diferenças existentes entre os processos de compactação empregados em corpos de prova no laboratório e na fabricação dos tijolos por prensagem (uso de prensa), principalmente quanto ao tipo de energia aplicada e sua magnitude.

A resistência à compressão dos tijolos apresenta a mesma tendência do resultado obtido no rompimento de corpos de prova cilíndricos. A resistência média do tijolo de solo-cimento-RCC (SC₁₀R₅₀) foi de 2,0 MPa aos 28 dias.

A falta de normalização para avaliação de alvenaria constituída por tijolos de solo-cimento levou a utilização de normas aplicadas a blocos cerâmicos e blocos de concreto para a realização de ensaios de resistência à compressão e determinação do módulo de deformação.

O fator de eficiência (resistência do prisma/resistência do tijolo) obtido foi superior a 1, diferente do obtido em pesquisas com outros materiais para blocos. Tal fato pode ser atribuído ao método utilizado para determinar a resistência do tijolo, pois para tijolos de solo-cimento eles são cortados e sobrepostos, ligados por uma camada de pasta de cimento. Além disso, antes do rompimento, devem ser imersos em água.

A resistência média do prisma de solo-cimento-RCC foi de 2,30 MPa

A resistência característica da alvenaria foi de 1,4 MPa (método proposto pela ABNT NBR 15961:2 e 15812:2). Formulações propostas por outros autores apresentaram valores próximos a este.

O módulo de deformação obtido em ensaios realizados em prismas foi de 1244 MPa. Grande (2003) ao realizar ensaios em paredes executadas com tijolos de solo-cimento obteve módulo de elasticidade correspondente a 6,2 GPa, enquanto que, a ABCP (1999), ao ensaiar painéis de solo-cimento obteve valores entre 200 e 450 MPa.

Apresenta-se abaixo sugestão para futuros trabalhos que podem incrementar os resultados obtidos nesta pesquisa:

- Estudar a influência da espessura da junta de argamassa em alvenaria de tijolos de solo-cimento-RCC
- Estudar a influência de diferentes traços de argamassa em alvenaria de tijolos de solo-cimento-RCC
- Comparar os resultados das deformações obtidas em prismas com LVDT's e outros métodos.
- Estudo da resistência da alvenaria e do módulo de deformação em pequenas paredes de alvenaria confeccionadas em tijolos de solo-cimento-RCC

REFERENCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2013. 114 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com a utilização de prensas hidráulicas**. Boletim técnico, São Paulo, bt. 112, 1989, 8 p.

_____. **Solo-cimento na habitação popular**. Boletim técnico, São Paulo, 1998, bt. 129, 16 p.

_____. **Dosagem das misturas de solo-cimento – Normas de dosagem e métodos de ensaio**. Estudo técnico, São Paulo, 1983, v. 35, 63 p.

_____. **Manual de construção com solo-cimento**. Manual técnico, São Paulo, 1999, mt. 5, 114 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **ABNT NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **ABNT NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **ABNT NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **ABNT NBR 9895**: Solo – Índice de suporte califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **ABNT NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 15812-1**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos. 535 p.

CALÇADA, L. M. L. **Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 187 p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – vol. 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2008a.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – vol. 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2008b.

CONAMA – Conselho Nacional de meio ambiente. **Resolução n° 307**. Ministério do Meio Ambiente. 2002.

_____. **Resolução n° 431**. Ministério do Meio Ambiente. 2011.

_____. **Resolução n° 448**. Ministério do Meio Ambiente. 2012.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

CUNHA, E. C. **Placas Recicladas de Embalagens Longa Vida: caracterização, design e propostas projetuais**. 2011. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Carlos. 261 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2013.

FONSECA, F. B. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos. 167 p.

GOMES, N. S. **A resistência das paredes de alvenaria**. 1974. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade de São Paulo, São Paulo. 106 p.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Universidade de São Paulo, São Carlos. 180 p.

GROHMANN, L. Z. **Análise do comportamento de prismas grauteados de alvenaria estrutural cerâmica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 160 p.

HILSDORF, H. K. **An investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression**. Designing, Engineering and construction with masonry products. 1969. pg. 34-41.

JUSTE, A. E. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos. 255 p.

KARPINSK, A. E. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. EDIPUCRS, Porto Alegre, 2009.

LA ROVERE, H. L; SOLIZ, V. H. V. **Efeito da altura na resistência de prismas de alvenaria de blocos cerâmicos vazados**. Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. Argentina, 1995.

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

MOHAMAD, G. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. 134 p.

MOHAMAD, G. **Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade do Minho, Portugal. 307 p.

MOLITERNO, A. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1995.

MOREIRA, E. M. S. **Análise experimental em escala reduzida de ligações entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos submetidas a ações verticais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo, São Carlos. 146 p.

PARSEKIAN, G.A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R.G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2ª ed. São Carlos: EdUFSCAR, 2013.

PASQUALI, I. **Influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão de pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 140 p.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. **Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento**. Cerâmica Industrial, São Carlos, v. 15, n. 5-6, 2010, p. 30-36.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PRUDÊNCIO JR, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C. A. **Alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Florianópolis: Editora Palloti, 2002.

RAMALHO, M. A; CORREA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: ABCP, 2008.

RIZZATTI, E. **Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 170 p.

RODRIGUES, M. L. A. **Adição de resíduo de argamassas mistas na produção de tijolos modulares de solo-cimento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 106 p.

ROMAGNA, R. H. **Resistência à compressão de prismas de blocos de concreto grauteados e não grauteados**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 217 p.

SANCHEZ, E. **Nova normalização para alvenaria estrutural**. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, K. ; OLIVIERA, F. K. G.; MARQUES, S. K. J. **Avaliação das Propriedades Mecânicas dos Tijolos Ecológicos Formulados com Resíduos Cerâmicos**. In: VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 2012. ISBN 978-85-62830-10-5, 7 p;

SANTOS, M. J. F. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 136 p.

SOUZA, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo-cimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira. 116 p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: MCgraw-Hill do Brasil, 1977.

VASCONCELOS, S.E.; GIAMUSSO, S. E. O misterioso módulo de elasticidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., Rio de Janeiro. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1998.

APÊNDICE A – Evolução da resistência à compressão dos tijolos

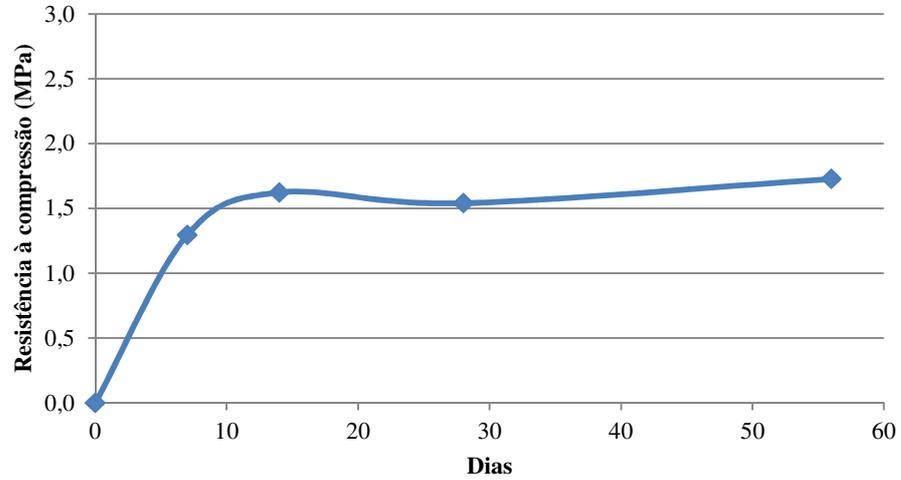


Figura 44 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC₆R₄₀)

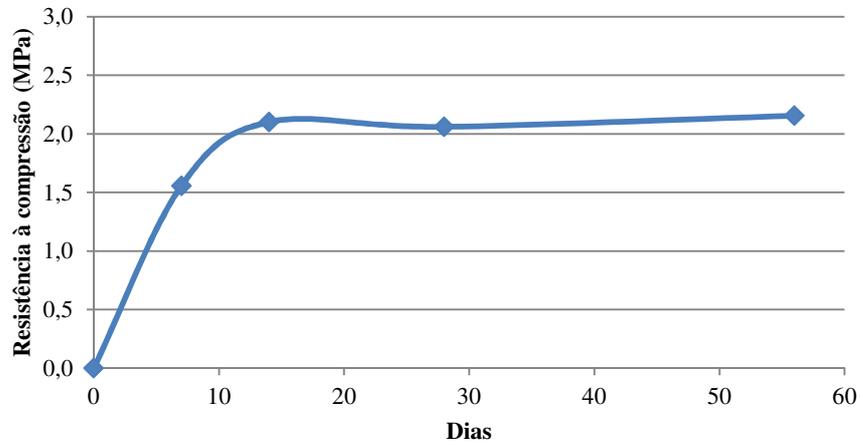


Figura 45 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC₈R₄₀)

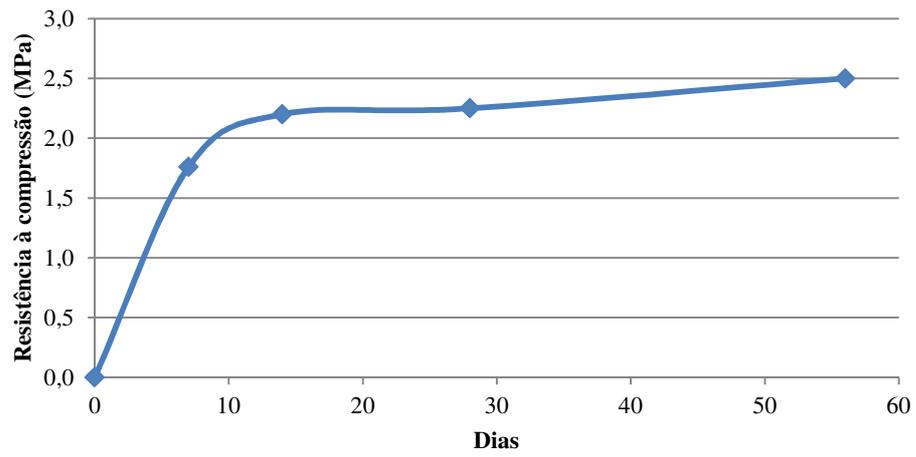


Figura 46 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC₈R₆₀)

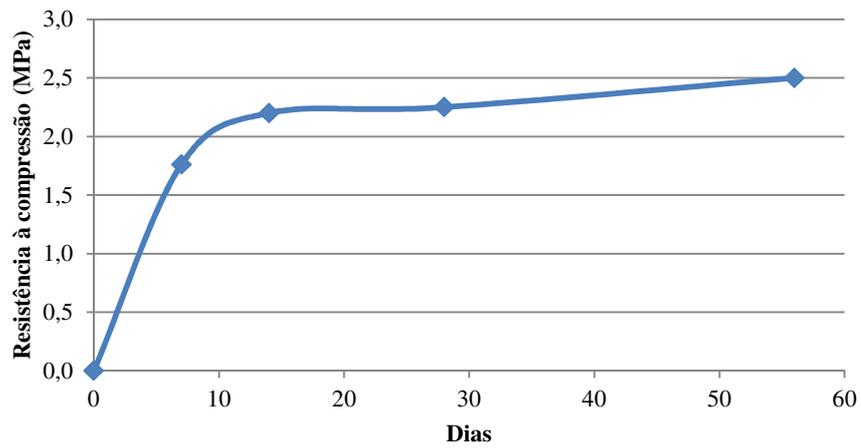
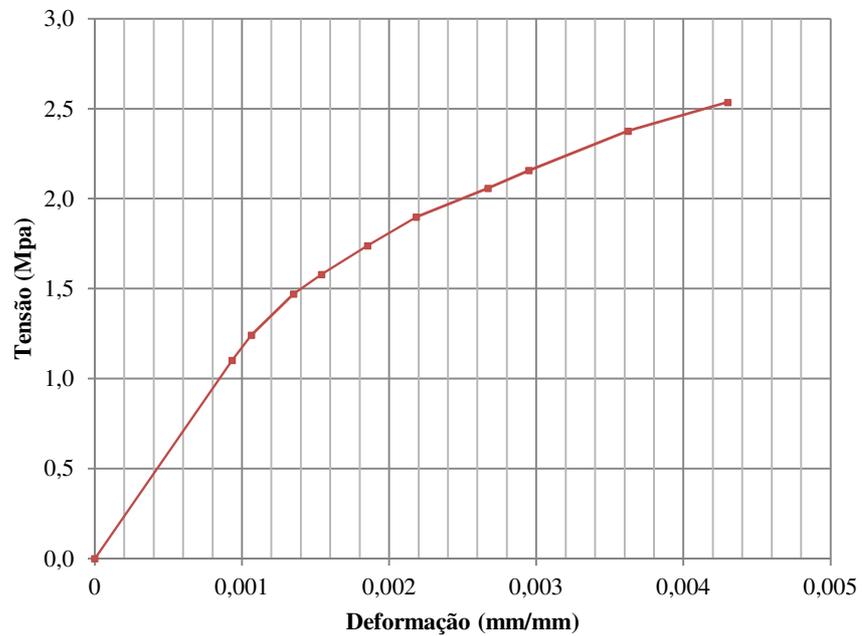
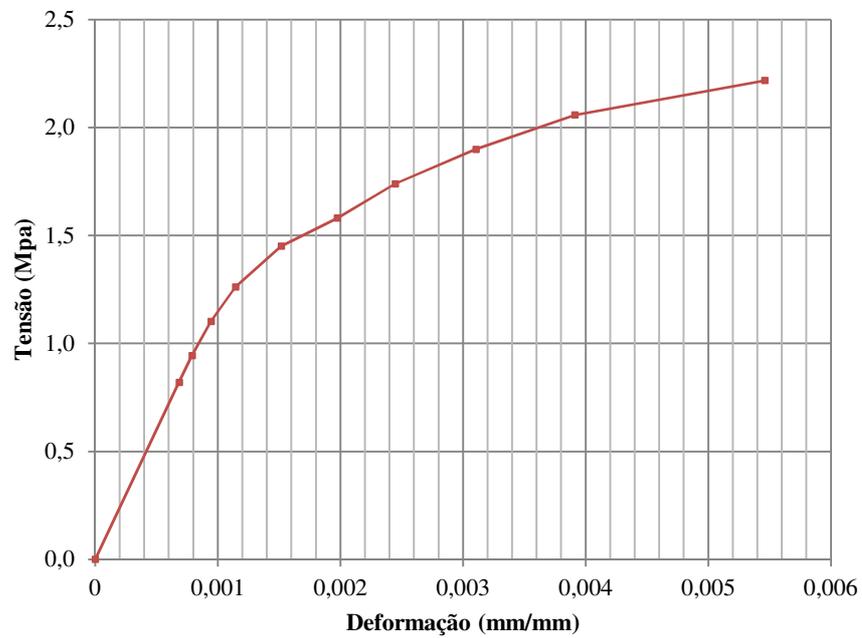


Figura 47 - Evolução da resistência à compressão de tijolos de solo-cimento-RCC (SC₁₀R₆₀)

APÊNDICE B – Curvas tensão x deformação – Prismas**Figura 48 - Curva tensão deformação - Prisma 01****Figura 49 - Curva tensão deformação - Prisma 02**

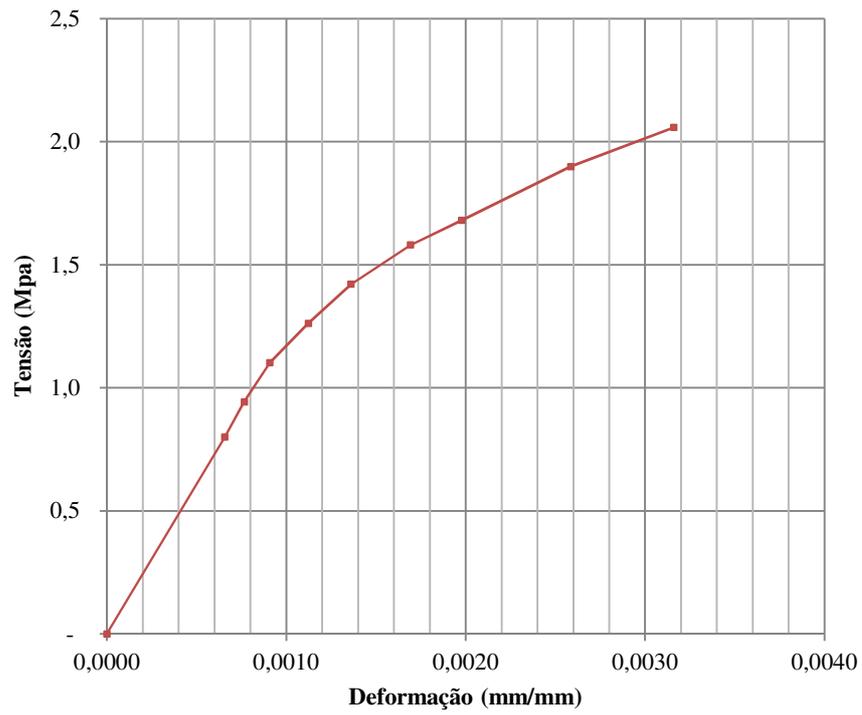


Figura 50 - Curva tensão x deformação - Prisma 03

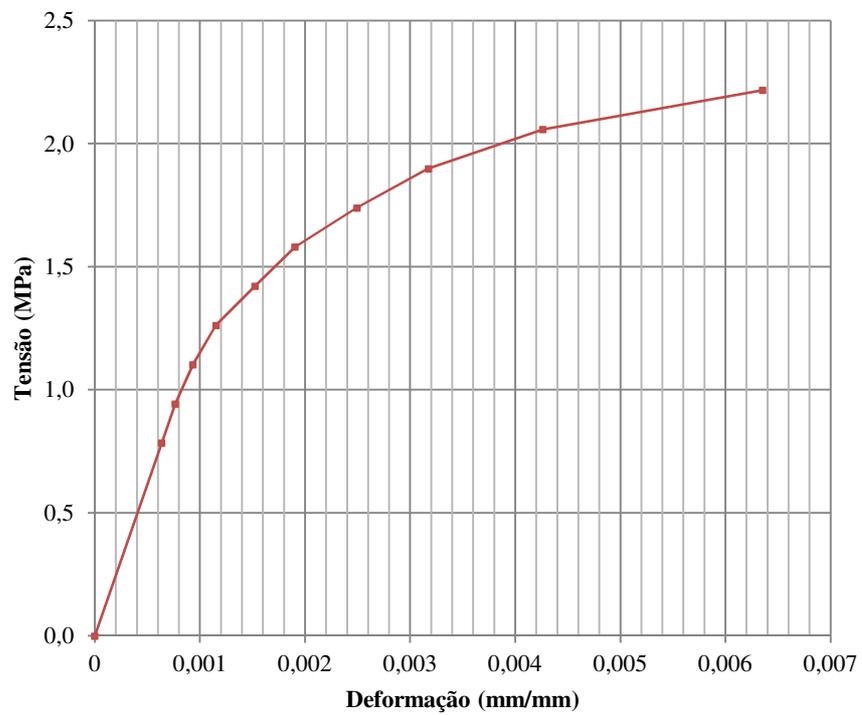


Figura 51 - Curva tensão x deformação - Prisma 04

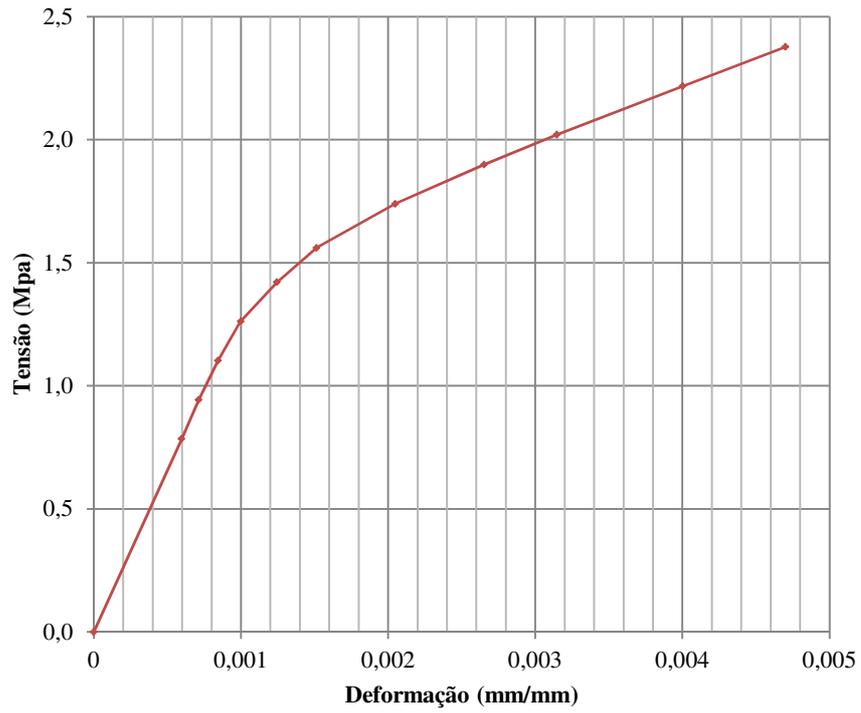


Figura 52 - Curva tensão x deformação - Prisma 05

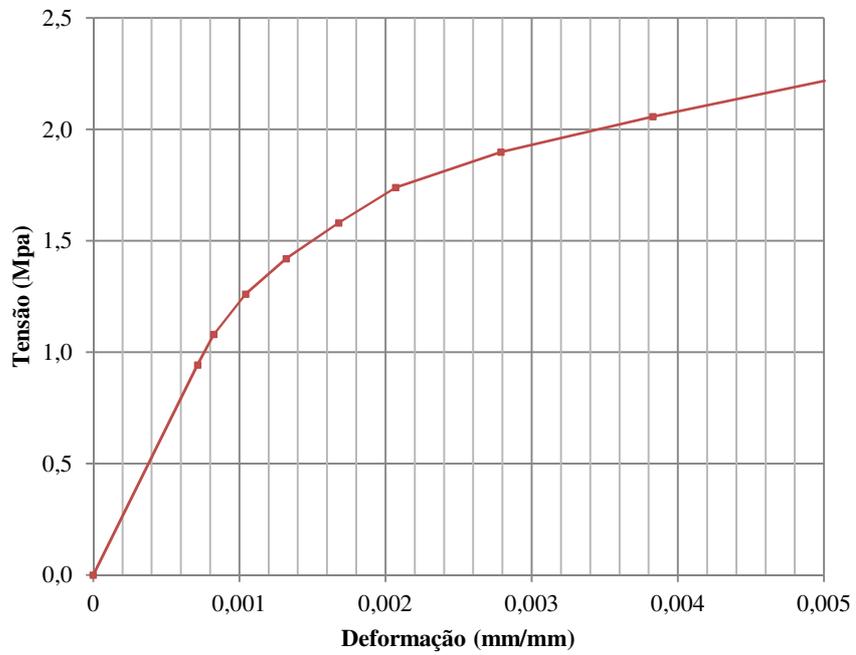


Figura 53 - Curva tensão x deformação - Prisma 06

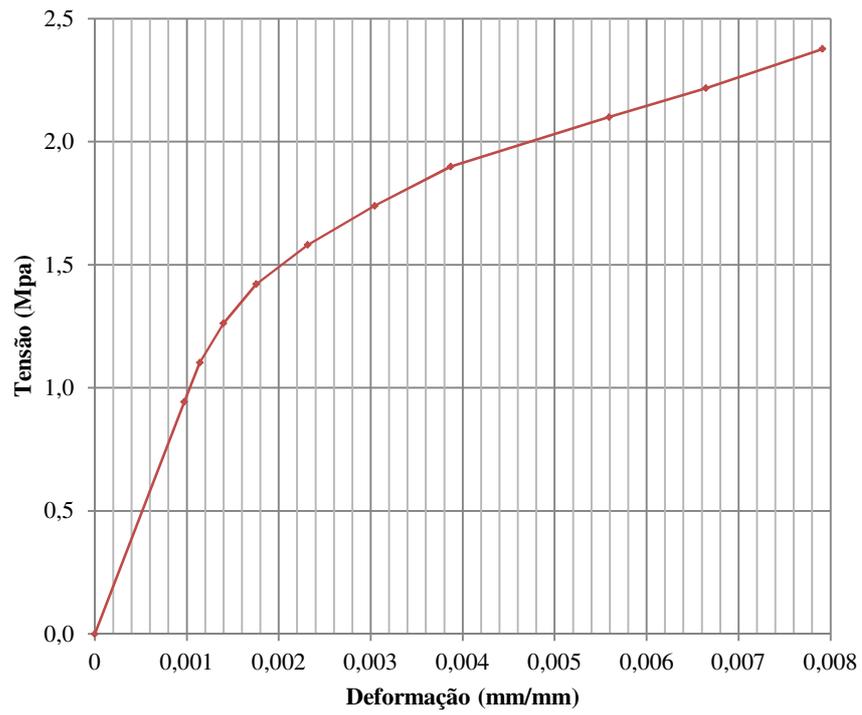


Figura 54 - Curva tensão x deformação - Prisma 07

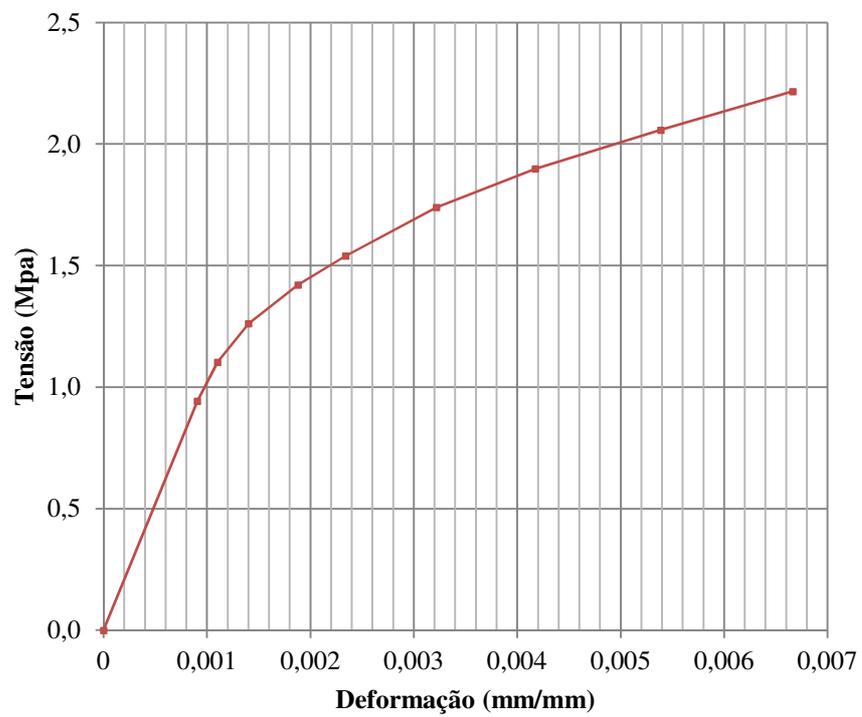


Figura 55 - Curva tensão x deformação - Prisma 08

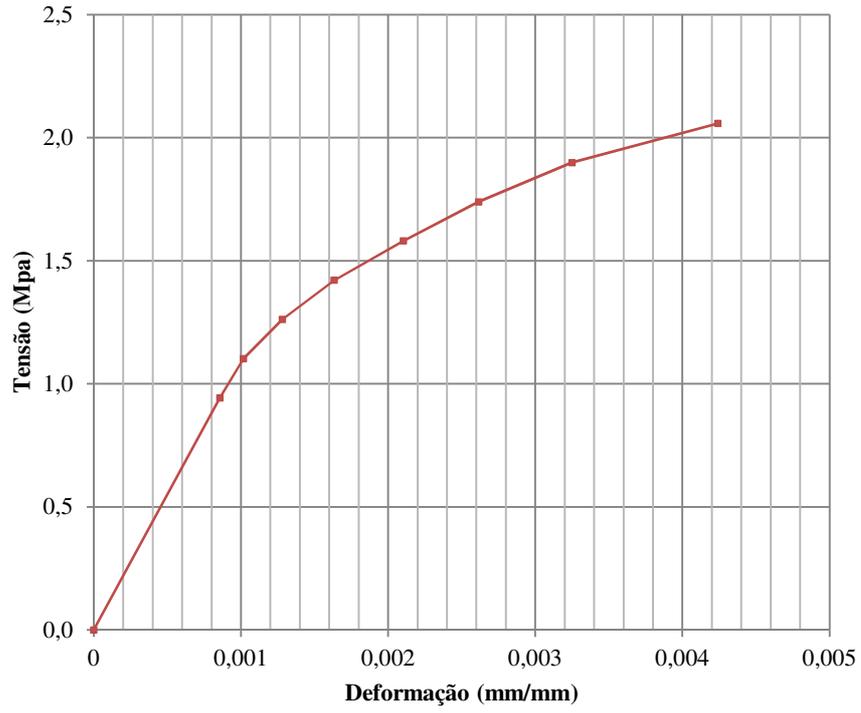


Figura 56 - Curva tensão x deformação - Prisma 09

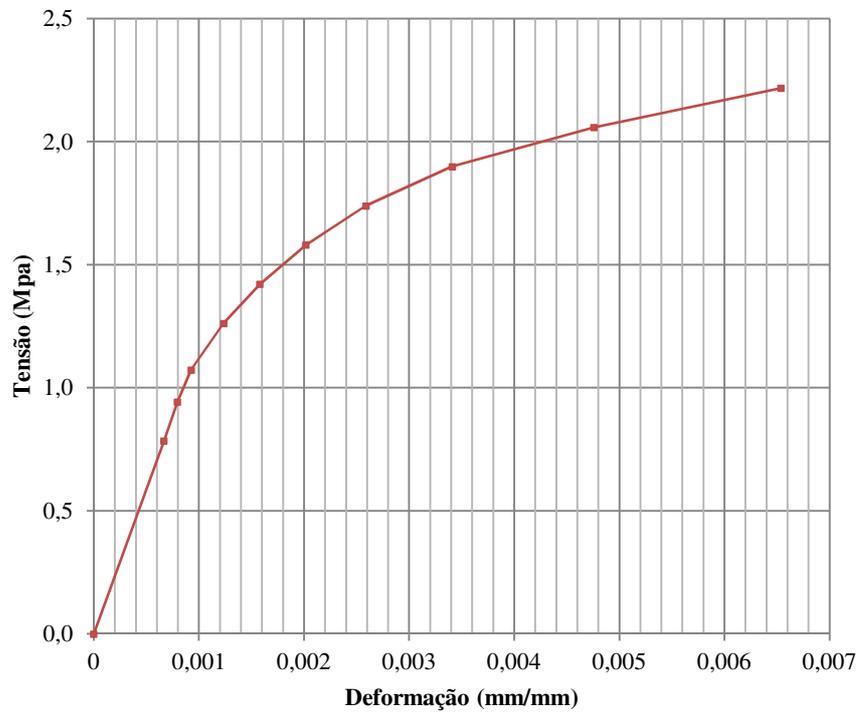


Figura 57 - Curva tensão x deformação - Prisma 10