



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**CAIO CÉSAR DE SANTANA MÜLLER**

**REFORÇO DE ALVENARIAS ANTIGAS COM A**  
**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE SISAL**

Salvador  
2020

**CAIO CÉSAR DE SANTANA MÜLLER**

**REFORÇO DE ALVENARIAS ANTIGAS COM A  
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE SISAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PPEE), da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Estruturas.

Orientadora: Prof. Dra. Rosana Muñoz

Salvador  
2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Santana Müller, Caio César

Reforço de alvenarias antigas com a utilização de  
fibra de sisal / Caio César de Santana Müller. --  
Salvador, 2020.

145 f. : il

Orientadora: Rosana Muñoz.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Estrutural) -- Universidade Federal da  
Bahia, Escola Politécnica, 2020.

1. Alvenaria de tijolos maciços. 2. Estruturas  
antigas. 3. Fibras de sisal. 4. Reabilitação  
estrutural. 5. Reforço de alvenarias. I. Muñoz,  
Rosana. II. Título.



Universidade Federal da Bahia  
Escola Politécnica  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

### Ata de Defesa de Dissertação

Aos nove dias do mês de janeiro de 2020, às 09:00 horas, na Sala 7.1.01 da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia - UFBA, reuniram-se os professores Rosana Muñoz (orientadora), Alberto Borges Vieira Júnior, ambos do Mestrado em Engenharia de Estruturas e Mário Mendonça de Oliveira, do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFBA, para a avaliação da Dissertação do mestrando CAIO CÉSAR DE SANTANA MÜLLER, intitulada **REFORÇO DE ALVENARIAS ANTIGAS COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE SISAL**. A Prof<sup>a</sup> Rosana Muñoz presidiu a banca. Após a apresentação, a banca reuniu-se e considerou, por unanimidade, que o candidato foi **APROVADO**.

Salvador, 09 de janeiro de 2020

---

**Rosana Muñoz**  
Faculdade de Arquitetura  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

---

**Alberto Borges Vieira Júnior**  
Departamento de Construção e Estruturas  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

---

**Mário Mendonça de Oliveira**  
Faculdade de Arquitetura  
Universidade Federal da Bahia - UFBA

---

Data da homologação pelo Colegiado: \_\_\_\_\_

---

**Alberto Borges Vieira Júnior**  
Coordenador

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me sustentado do início ao fim desta jornada.

A minha esposa Lorena, por todo amor, ajuda, paciência, cumplicidade e companheirismo. Com você compartilhei todas as notícias boas e ruins. Você sempre esteve ao meu lado me apoiando em tudo.

A minha filhinha Ana Cecília, que chegou no meio disso tudo e se tornou a razão para eu persistir até o fim.

Aos meus pais César e Isabel, por ter me ensinado e educado. Com vocês aprendi a importância de estudar. Tudo que sou hoje devo a vocês dois.

Ao meu irmão Augusto no qual sei que posso contar em todos os momentos.

A minha orientadora Dra. Rosana Muñoz por todo ensinamento durante esses longos anos juntos.

Aos colegas do NTPR, Allard, Alice, Betina, Jana, Letícia e Uine pela ajuda voluntária e pelos momentos de descontração.

A Adilson pela ajuda e disponibilidade mesmo que para isso tivesse que interromper algumas das suas atividades.

A UNIME por ter disponibilizado seus laboratórios e equipamentos para finalização desta pesquisa.

Aos meus alunos e estagiários que arregaçaram as mangas junto comigo para realização dos ensaios.

Ao IFBA, e principalmente ao Dr. Adriano Fortes por ter aberto as portas do instituto e ter dedicado tanto do seu tempo.

A Universidade Estadual de Feira de Santana e ao Dr. Paulo Lima por disponibilizar o laboratório e o maquinário para realização dos ensaios.

Ao Prof. Daniel V´eras pela concessão do laborat´orio para realizaç˜ao de ensaios.

A Associaç˜ao de Pequenos Agricultores do Munic´ipio de Valente (APAEB) pelo fornecimento das fibras de sisal.

A Fundaç˜ao de Amparo `a Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB pela ajuda financeira.

MÜLLER, Caio César de Santana, Reforço de alvenarias antigas com a utilização de fibras de sisal. 145f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

## RESUMO

Este trabalho consiste no estudo do comportamento mecânico de alvenarias de tijolo maciço reforçadas com fibras de sisal. A utilização de fibras naturais como reforço estrutural propõe um positivo apelo ecológico, por se tratar de um material natural, sustentável, renovável e de baixo impacto ambiental, além de ter grande importância socioeconômica, pois é cultivado com sucesso no semiárido nordestino. Estudam-se ainda os efeitos da utilização de fibras naturais nas alvenarias como alternativa à aplicação de outras fibras mais usuais, como por exemplo, fibra de vidro e fibra de carbono, estas que apresentam altos custos de emprego. Foram utilizados como reforço fibras curtas de sisal com 2,5 cm e foi desenvolvido um tecido artesanal de sisal composto por feixes nas duas direções, estes compostos por 10 fibras longas. As fibras foram incorporadas na argamassa de revestimento produzidas com cal e areia aplicada em protótipos de alvenaria com dimensões 40x40x20 cm. Para obtenção e análise de resultados foram feitos ensaios laboratoriais, como a resistência à tração e resistência à compressão para avaliação da influência da incorporação das fibras nas propriedades mecânicas do conjunto alvenaria mais argamassa de revestimento. Para os dois tipos de reforço utilizados, fibras curtas e tecido de sisal, ambos apresentaram incrementos na resistência mecânica da argamassa, comparado aos protótipos sem aplicação de fibras, sendo que o tecido de sisal apresentou melhores resultados do que as fibras curtas uma vez que a o comprimento das fibras possibilitou uma melhor aderência à argamassa melhorando assim a distribuição de tensão pelo revestimento.

**Palavras-chave:** alvenarias de tijolos maciços; estruturas antigas; fibras de sisal; reabilitação estrutural; reforço de alvenarias.

MÜLLER, Caio César de Santana, Reinforced of old masonry using sisal fibers. 145f. 2020. Dissertation (Master in Structural Engineering) – Polytechnic School, Federal University of Bahia, Salvador, 2020.

### ABSTRACT

This research consists in the study of mechanical behavior of sisal fiber reinforced solid brick masonry. The use of natural fibers as structural reinforcement proposes a positive ecological appeal, as it is a natural, sustainable, renewable and low environmental impact material, as well as having great socioeconomic importance, as it is successfully cultivated in the northeast semi-arid of Brazil. Furthermore, the effects of natural fibers in masonry as an alternative to application of more common fibers, such as glass fiber and carbon fiber, which have expensive applications, are also studied. Short 2.5 cm sisal fibers were used as reinforcement and a handmade sisal fabric composed of bundles in both directions was developed, these composed of 10 long fibers. The fibers were incorporated into the coating mortar produced with lime and sand applied in masonry prototypes with dimensions 40x40x20 cm. In order to obtain and analyze the results, laboratory tests were carried out, such as tensile strength and compressive strength to assess the influence of the incorporation of fibers on the mechanical properties of the masonry set plus coating mortar. For the two types of reinforcement used, short fibers and sisal fabric, both showed increases in the mechanical strength of the mortar, compared to prototypes without application of fibers, and the sisal fabric showed better results than the short fibers since fiber length allowed for better adherence to mortar, thus improving the stress distribution throughout the coating.

**Key-words:** solid bricks masonry; Old structures; Sisal fiber; structural rehab; masonry reinforce.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais regiões brasileiras produtoras de sisal. ....	4
Figura 2 - Síntese da metodologia aplicada. ....	9
Figura 3 - Zigurate de Ur.....	11
Figura 4 - A Torre de Jericó - Considerada a mais antiga construção urbana do mundo. ....	11
Figura 5 - Pirâmides de Gizé: Uma das sete maravilhas do mundo antigo.....	12
Figura 6 - O Partenon de Athenas. ....	13
Figura 7 - O Panteão. a) Vista externa do Panteão. b) Corte esquemático do modelo tridimensional virtual do Panteão.....	13
Figura 8 - Vista aérea da Ponte do Gard. ....	14
Figura 9 - Edifício Monadnock Building. ....	15
Figura 10 - Hospício de Pedro II em 1861. ....	16
Figura 11 - Vista atual da entrada do Palácio Universitário - UFRJ.....	17
Figura 12 - Síntese das ocorrências de anomalias não estruturais. ....	19
Figura 13 - Resumo dos principais agentes/mecanismos de deterioração de uma edificação. ....	20
Figura 14 - Capela de Nossa Senhora do Vencimento: a) Muro da fachada posterior; b)Base do muro da fachada posterior. ....	20
Figura 15 - Vistas (A e B) e Seção (C) do fenômeno de esmagamento.....	21
Figura 16 - Fendilhamentos e rachaduras provenientes de movimentação do terreno. ....	21
Figura 17 - Lesões parabólicas nas alvenarias sem aberturas sobre fundações corridas devido ao recalque do plano de assentamento. ....	25
Figura 18 - Lesões parabólicas nas alvenarias com aberturas sobre fundações corridas, devido ao recalque do plano de assentamento. ....	25
Figura 19 - Lesões parabólicas nas alvenarias com aberturas sobre fundações corridas devido ao recalque do plano de assentamento. ....	26
Figura 20 - Lesões em edificações com aberturas por recalque terminais e intermediários. ....	26
Figura 21 - Lesões por esmagamento em alvenarias.....	28
Figura 22 - Movimento do plano de assentamento por corte de camadas no terreno. ....	29
Figura 23 - Ilustração de deslizamento por empuxo de aterros.....	29
Figura 24 - Deslizamento por execução de valas. ....	30
Figura 25 - Procedimentos para avaliação da adequabilidade da injeção. ....	36
Figura 26 - Injeção de alvenarias: a) selagem de fissuras; b) consolidação do material.....	37

Figura 27 - Preparação de uma parede de alvenaria para injeção. Selagem de juntas e fissuras e colocação de tubos de injeção. ....	38
Figura 28 - Exemplos de substituição e reconstrução: a) com os mesmos materiais; b) com materiais diferentes; c) aspecto de uma estrutura de alvenaria reparada. ....	39
Figura 29 - Reparação de fissura localizada com reboco armado com malha de aço eletrosoldada.....	41
Figura 30 - Aplicação de tela metálica em alvenaria para realização de ensaio laboratorial.....	41
Figura 31 - Aspectos construtivos do encamisamento armado com malha de aço eletrosoldada. ....	42
Figura 32 - Esquema da aplicação da técnica de encamisamento.....	43
Figura 33 - Aplicação de encamisamento com concreto armado em um túnel: a) Aspecto da execução com projeção da argamassa; b) Disposição e fixação das armaduras de reforço; c) Aspecto final da intervenção. ....	44
Figura 34 - Exemplos da aplicação de pregagens em elementos estruturais: a) arco de uma ponte; b) e c) reforço em paredes (seção transversal). ....	45
Figura 35 - Exemplos da ligação entre paredes com pregagens em direções cruzadas. ....	46
Figura 36 - Distribuição localizada de tirantes transversais à seção da parede.....	46
Figura 37 - Operação de substituição da argamassa das juntas em uma parede de alvenaria de blocos. ....	47
Figura 38 – Profundidade das ranhuras abertas nas juntas quando se atua de um ou de ambos os lados da parede. ....	48
Figura 39 - Exemplos de aplicação da substituição de juntas com armadura, combinado com pregagens transversais, em diferentes tipologias de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico: a) Parede de paramento simples; b) Parede composta com paramentos exteriores resistentes; c) Paredes composta com paramento resistente exterior.....	49
Figura 40 - Esquema da substituição de juntas com armadura e diferentes materiais de enchimento: a) Argamassa de cal hidráulica; b) argamassa sintética com selagem exterior. ....	49
Figura 41 - Diferentes disposições de fitas de FRP em intervenções de reforço: a) Em grelha ortogonal; b) Em diagonal.....	51
Figura 42 - Sistema de aplicação das folhas flexíveis de CFRP. ....	54
Figura 43 - Esquema de reforço tipo de um edifício existente com soluções de pré-esforço: 1) Tirantes com efeito de compressão axial nas paredes com melhorias para a flexão global; 2) Utilização da técnica entre paredes ortogonais com efeito de confinamento no nível dos pavimentos; 3) Procedimento de intervenção no vão entre paredes opostas, com efeito de confinamento no nível dos pavimentos.....	56
Figura 44 - Ação do pré-esforço interno na compensação das forças de arcos e seus efeitos sobre as paredes. ....	57
Figura 45 - Tirantes exteriores pré-esforçados.....	57
Figura 46 - A planta <i>Agave Sisalana</i> .....	59

Figura 47 - Representação esquemática do processo produtivo do sisal. ....	60
Figura 48 - A folha da planta de sisal: a) Vista da seção transversal. b) Microscopia ótica da região selecionada. ....	62
Figura 49 - Morfologia da fibra de sisal: a) Micrografia da fibra de sisal; b) Desenho esquemático de uma fibrila ou fibra elementar; c) Estrutura interna da parede da fibra. ....	64
Figura 50 - Arranjos de tecidos: a) Tecido urdido; b) Tecido trançado; c) Tecido tricotado. ....	66
Figura 51 - Desenho esquemático de um tecido tramado. ....	67
Figura 52 - Tipos de arranjos de tecidos urdidos. ....	68
Figura 53 - Tecido tricotado. ....	68
Figura 54 - Aderência de argamassa de revestimento a elementos de alvenaria com diferentes coeficientes de absorção. ....	72
Figura 55 - Ciclos de umedecimento e secagem em paredes rebocadas. ....	73
Figura 56 - Fibras de sisal durante o ciclo de molhagem. ....	76
Figura 57 - Fibras de sisal levadas à estufa para secagem. ....	76
Figura 58 - Máquina de ensaio universal - <i>Shimadzu</i> . ....	77
Figura 59 - Esquema do corpo de prova com filamento de fibra de sisal. ....	78
Figura 60 - Corpo de prova com filamento de fibra de sisal. ....	78
Figura 61 - Ensaio de tração nos filamentos das fibras de sisal. ....	79
Figura 62 - Esquema do corpo de prova com feixe de fibra de sisal. ....	80
Figura 63 - Corpo de prova com feixe de fibra de sisal. ....	80
Figura 64 - Ensaio de tração no feixe de fibras de sisal. ....	80
Figura 65 - Tear de pregos no momento da retirada das amostras de tecido. ....	81
Figura 66 - Esquema do corpo de prova com tecido de sisal. ....	81
Figura 67 - Amostra de tecido de sisal. ....	82
Figura 68 - Ensaio de tração no tecido de sisal. ....	82
Figura 69 - Aplicação da argamassa de cal com fibras curtas de sisal no protótipo de alvenaria. ....	83
Figura 70 - Tear de pregos utilizado para produção dos tecidos de sisal. ....	84
Figura 71 - Aspecto final do tecido de sisal. ....	84
Figura 72 - Etapas da aplicação do tecido de sisal como reforço. ....	84
Figura 73 - Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da NBR 7211 (ABNT 2019). ....	88
Figura 74 - Ensaio de módulo de elasticidade por meio de ultrassom. ....	90

Figura 75 - Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão.....	92
Figura 76 - Ensaio de resistência de aderência à tração.....	94
Figura 77 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência.....	94
Figura 78 – Representação do ensaio de compressão normal em prismas.....	95
Figura 79 - Curva tensão-deformação de um material frágil: propriedades elásticas do material obtidas no ensaio com controle da velocidade de carga.....	96
Figura 80 - Diagramas tensão-deformação com controle de velocidade de cargas e deformações.....	97
Figura 81 - Representação do ensaio de compressão diagonal segundo a ASTM E 519 (ASTM, 2015).....	98
Figura 82 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração direta nas fibras de sisal.....	99
Figura 83 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração nos feixes de sisal.....	101
Figura 84 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova FE09.....	102
Figura 85 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração nos tecidos de sisal.....	103
Figura 86 - Fases do comportamento do tecido de sisal submetido à tração.....	104
Figura 87 - Valores do módulo de elasticidade de todos os corpos de prova analisados.....	105
Figura 88 - Valores médios da resistência à tração e à compressão para as argamassas com fibras curtas e sem adição de fibras.....	106
Figura 89 - Argamassas com e sem adição de fibras curtas após a realização do ensaio de flexão.....	107
Figura 90 - Formas de ruptura da argamassa com fibras.....	108
Figura 91 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos de referência no ensaio de compressão normal.....	109
Figura 92 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com fibra curta no ensaio de compressão normal.....	110
Figura 93 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com tecido no ensaio de compressão normal.....	110
Figura 94 - Detalhe do descolamento da argamassa de revestimento nos protótipos: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo revestido com argamassa com fibras curtas; (c) Protótipo revestido com argamassa com tecido de sisal.....	111
Figura 95 - Padrão de fissuração das composições: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo revestido com argamassa com fibras curtas; (c) Protótipo revestido com argamassa com tecido de sisal.....	111
Figura 96 - Fissuração nas argamassas de revestimento após ensaio de compressão normal: (a) Argamassa com fibras curtas; (b) Argamassa com tecido de sisal.....	113
Figura 97 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos de referência no ensaio de compressão diagonal.....	114

Figura 98 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com fibras curtas no ensaio de compressão diagonal. ....	114
Figura 99 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com tecido no ensaio de compressão diagonal. ....	115
Figura 100 - Detalhe das fissuras nas juntas dos protótipos após o ensaio de compressão diagonal. ....	116
Figura 101 - Detalhe das fissuras na argamassa de revestimento dos protótipos após o ensaio de compressão diagonal. ....	116
Figura 102 - Corpo de prova revestido com argamassa sem adição de fibras após a realização do ensaio de compressão diagonal. ....	116

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resumo das propriedades das fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar.....	3
Tabela 2 - Propriedades típicas de algumas fibras. ....	52
Tabela 3 - Propriedades das fibras mais usadas nos compósitos FRP. ....	53
Tabela 4 - Composição química de fibras vegetais.....	64
Tabela 5 - Análise granulométrica da areia utilizada na produção da argamassa.....	88
Tabela 6 - Caracterização da base utilizada. ....	93
Tabela 7 - Resumo do ensaio de tração direta nas fibras. ....	100
Tabela 8 - Resumo do ensaio de tração direta nos feixes de sisal.....	102
Tabela 9 - Resumo do ensaio de tração direta nos tecidos de sisal.....	103
Tabela 10 - Resumo dos valores obtidos no ensaio do Módulo de Elasticidade das argamassas. .....	105
Tabela 11 - Resultados obtidos no ensaio de aderência. ....	107
Tabela 12 - Resultados experimentais do ensaio de compressão normal. ....	109
Tabela 13 - Resultados experimentais do ensaio de compressão diagonal. ....	114
Tabela 14 - Comparativo de desempenho entre a aplicação da fibra curta e do tecido de sisal.	117

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Síntese dos ensaios realizados. ....	8
Quadro 2 - Classificação dos danos em edificações. ....	24
Quadro 3 - Massa unitária da areia e cal, materiais utilizados no programa experimental.....	86
Quadro 4 - Massa específica da areia e cal. ....	86
Quadro 5 - Classificação do agregado em função do módulo de finura, segundo a ABNT NBR 7211:2019.....	89

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT.....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE QUADROS.....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA .....	5
1.2. OBJETIVOS.....	7
1.3. METODOLOGIA.....	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1. ALVENARIAS TRADICIONAIS .....	10
2.2. DANOS ESTRUTURAIS .....	16
2.2.1. DANOS ESTRUTURAIS COM IMPACTOS DIRETOS NAS PAREDES DE ALVENARIA .....	18
2.2.1.1. LESÕES DE ACOMODAÇÃO OU ADAPTAÇÃO .....	22
2.2.1.2. LESÕES POR RECALQUE OU ASSENTAMENTO.....	22
2.2.1.3. LESÕES POR ESMAGAMENTO .....	27
2.2.1.4. LESÕES POR ROTAÇÃO.....	28
2.2.1.5. LESÕES POR ESCORREGAMENTO .....	28
2.3. TÉCNICAS DE REFORÇO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL.....	30
2.3.1. CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIA POR INJEÇÃO .....	35
2.3.2. SUBSTITUIÇÃO DE ELEMENTOS DEGRADADOS .....	38
2.3.3. REBOCO ARMADO .....	40
2.3.4. ENCAMISAMENTO ( <i>JACKETING</i> ).....	41
2.3.5. PREGAGENS .....	44
2.3.6. SUBSTITUIÇÃO DAS JUNTAS .....	47
2.3.7. REFORÇO COM MATERIAIS COMPÓSITOS FRP ( <i>FIBER REINFORCED POLYMER</i> ).....	50
2.3.8. PRÉ-ESFORÇO .....	55

2.3.9.	REFORÇO COM FIBRAS NATURAIS .....	58
2.4.	A FIBRA DE SISAL .....	59
2.4.1.	HORNIFICAÇÃO COMO TRATAMENTO NAS FIBRAS .....	65
2.4.2.	TECIDOS DE SISAL.....	66
2.5.	ARGAMASSAS DE CAL .....	69
2.5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	71
2.5.2.	TRAÇO RECOMENDADO .....	73
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	75
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL.....	75
3.1.1.	HORNIFICAÇÃO – CICLOS MOLHAGEM/SECAGEM.....	75
3.1.2.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NAS FIBRAS .....	77
3.1.3.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NOS FEIXES .....	79
3.1.4.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NOS TECIDOS .....	80
3.2.	A FIBRA DE SISAL COMO REFORÇO NA ARGAMASSA.....	82
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE CAL.....	85
3.3.1.	MASSA UNITÁRIA DA CAL E AREIA .....	85
3.3.2.	MASSA ESPECÍFICA DA CAL E AREIA .....	86
3.3.3.	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA .....	86
3.3.4.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA POR MEIO DE ULTRASSOM .....	89
3.3.5.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO 90	
3.3.6.	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO .....	92
3.3.7.	COMPRESSÃO NORMAL E COMPRESSÃO DIAGONAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA.....	94
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
4.1.	TRAÇÃO NAS FIBRAS UNIFILARES .....	99
4.2.	TRAÇÃO NOS FEIXES .....	100
4.3.	TRAÇÃO NOS TECIDOS.....	103
4.4.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA DE CAL .....	104
4.5.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS.....	106
4.6.	TENSÃO DE ADERÊNCIA DA ARGAMASSA .....	107
4.7.	COMPRESSÃO NORMAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA .....	108

4.8. COMPRESSÃO DIAGONAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA .....	113
5. CONCLUSÕES.....	117
5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	119
REFERÊNCIAS .....	120

## 1. INTRODUÇÃO

As construções antigas compõem uma importante parte do patrimônio histórico e arquitetônico e cultural da humanidade. São ícones carregados de tradição que permitem a interação do passado com o presente, transmitindo dessa forma conhecimento e valores culturais. Preservar estas riquezas da engenharia não significa somente prevenir problemas contra a segurança, mas também conservar toda a memória histórica presente nelas, fator de relevante importância para toda sociedade.

A construção civil encontra-se em constante evolução, desde tempos remotos em termos de materiais utilizados no desenvolvimento de diferentes obras e edificações. Apesar do corrente avanço na utilização dos insumos, técnicas e métodos de execução, ainda existem limitações tecnológicas, as quais, em conjunto com falhas involuntárias, acidentes ou deterioração das edificações, levam algumas estruturas a apresentar desempenho insatisfatório.

As edificações mais antigas formam um conjunto que apresenta um grande problema em comum, a degradação de suas estruturas, quer pela ação do tempo, quer pela falta de manutenção. É muito comum encontrar elementos de alvenaria em estruturas de construções antigas, que apresentam algum tipo de patologia nas quais são necessárias intervenções para sua correção. Os efeitos de tais problemas nas edificações podem ser variados, como resultados estéticos desagradáveis, afetando a aparência e a arquitetura das edificações, desconforto para os usuários, devido a deformações excessivas ou disfunções mais sérias, que podem resultar no comprometimento da estabilidade da estrutura.

As alvenarias antigas estão sujeitas ao aparecimento de diversas formas de danos sendo necessário o seu diagnóstico e reparo. A partir da análise e identificação das anomalias presentes procede-se com a intervenção estrutural mais adequada. A escolha da técnica de recuperação e dos materiais utilizados tem fundamental importância para o sucesso do procedimento, seja ele de restauração da capacidade portante original (recuperação), ou de ampliação da capacidade (reforço). A concretização da estratégia ideal a ser adotada na reabilitação de uma alvenaria antiga precisa conciliar o mínimo de intervenção a fim de valorizar a arquitetura original e a utilização de materiais que não onerem o custo total da obra.

No que tange ao reforço, a partir da década de 1970, em quase todos os países do mundo, a utilização do asbesto (amianto) para produção de laminados fibrosos a base de cimento era uma prática comum, no entanto, desde a década de 1930 pesquisas já revelavam que a exposição ao amianto era prejudicial à saúde. Segundo Brum (2014), somente na

França, estima-se que 100 mil pessoas irão a óbito devido a doenças relacionadas com o asbesto até 2025. Devido à sua potencial característica prejudicial e aos casos de patologias decorrentes de exposição prolongada a este tipo de material, os primeiros países europeus a vetar o uso dessa fibra foram a Islândia e a Noruega, em 1983 e 1984, respectivamente. Progressivamente, outros países aderiram à proibição, chegando à totalidade na União Europeia em 2005. Atualmente o amianto está banido em mais de 66 países sendo que no Brasil, a proibição da produção, venda e uso de materiais com amianto só se deu no dia 29/11/2017.

Com a rejeição gradativa do uso do amianto nos países desenvolvidos, foi necessário encontrar uma alternativa para a nova lacuna deixada no mercado da construção civil, o que incentivou o início de pesquisas para substituição deste material. Alternativas como a utilização de fibras de vidro, polipropileno, poliéster, rayon e carbono têm sido testadas como reforço de matrizes a base de cimento, mas nenhuma delas conseguiu resultados tão satisfatórios quanto o emprego do asbesto. Os principais pontos onde houve baixo desempenho foram: a baixa durabilidade das fibras, com perda de tenacidade e de resistência, devido à alta alcalinidade da matriz, a baixa adesão ao cimento e a instabilidade química (STUDINKA, 1989).

Além das pesquisas com fibras manufaturadas, estudos com fibras naturais também foram desenvolvidos. Fibras a base de celulose, fibras de coco, juta e sisal têm apresentado resultados satisfatórios desde então. Lima (2004) destaca que na década de 1980 indústrias do Reino Unido criaram alguns produtos laminados a base de cimento substituindo o amianto por fibras a base de celulose, resultando em produtos com desempenho promissor quanto o seu uso na construção civil. Posteriormente, estes produtos foram utilizados para confecção de paredes estruturais, forros e telhas, fachadas, cercas, *decks* de pontes e tubos de baixa pressão para irrigação e comercializado em países como a Austrália, Nova Zelândia e Malásia.

No Brasil, os primeiros estudos com a aplicação de fibras naturais em matrizes de base cimentícia foram desenvolvidos pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CEPED, utilizando fibras de coco, sisal, bambu, piaçava e bagaço de cana-de-açúcar. A partir dos estudos e, posteriormente, da produção de vigas e de placas de concreto-fibra e fibrocimento, perceberam-se melhores características da fibra de sisal em relação às outras fibras naturais estudadas. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades das fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar estudada por Motta (2010).

Tabela 1 - Resumo das propriedades das fibras de coco, sisal e cana-de-açúcar.

<b>Fibras</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Deformação máxima (%)</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Diâmetro (µm)*</b>
<b>Coco</b>	1,9 (0,5)	105,97 (33,53)	32 (11)	1,289 (0,024)	333,2 (72,6)
<b>Sisal</b>	13,4 (2,3)	467,04 (125,99)	04 (01)	1,511 (0,097)	174,2 (31,1)
<b>Cana-de-açúcar</b>	3,6 (1,3)	212,27 (86,23)	09 (03)	1,375 (0,029)	235,2 (56,7)

Os valores entre parênteses são os desvios padrão.

\*Diâmetro equivalente (diâmetro equivalente é o diâmetro da área circular numericamente igual à área real, uma vez que as seções dessas fibras não são circulares).

Fonte: Adaptado de Motta (2007, p. 11).

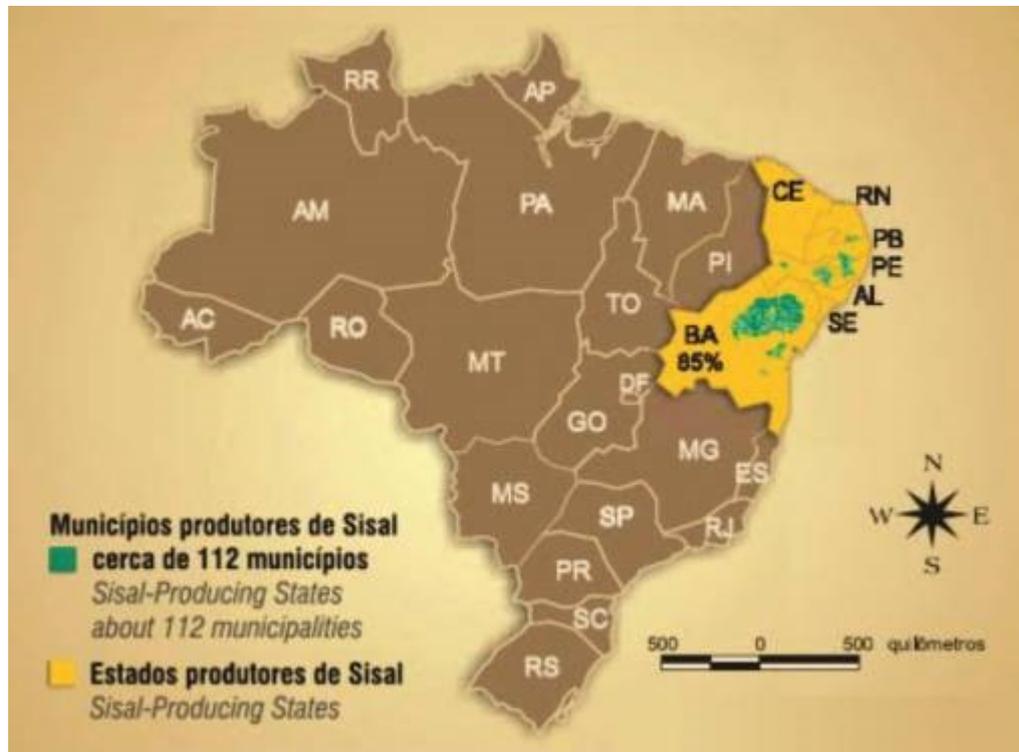
Diante deste fato, a utilização de fibras naturais, como alternativa aos materiais usualmente aplicados nos reforços estruturais, é bastante relevante para o desenvolvimento de novas técnicas construtivas. Para isso, universidades e instituições em diferentes países cooperam, através de novas pesquisas com o intuito de produzir materiais com bom potencial de desempenho para as funções as quais serão destinadas.

A utilização de materiais compósitos como reforço estrutural não é novidade na área de restauração estrutural. *Fiber Reinforced Polymer* – FRP – como fibras de carbono, de vidro, de aramida e de asbesto (amianto) apresentam bom desempenho como materiais de reforço estrutural sendo ainda possível o emprego de fibras manufaturadas ou vegetais como fonte alternativa. A utilização de fibras naturais apresenta grande vantagem econômica em comparação aos outros tipos existentes, pois é um produto de baixo custo de aquisição e grande disponibilidade, além de agregar valor a um item muitas vezes considerado como resíduo de outros processos produtivos.

De acordo com Angrizani *et al.* (2006), o sisal pode ter seu valor agregado multiplicado se utilizado como reforço em compósitos. A fibra ligno-celulósica, extraída da *Agave Sisalana*, é leve, atóxica, apresenta alta resistência específica, além de ter custo aproximadamente, dez vezes menor que a fibra de vidro e, ao contrário desta fibra inorgânica, causa menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes.

No Brasil, a produção do sisal está concentrada na região semi-árida do país. Esta possui um papel de destaque no desenvolvimento nacional, uma vez que o país é o maior produtor e exportador desta fibra, sendo a Bahia, Paraíba e Pernambuco os Estados responsáveis pela maior parte do seu cultivo (Figura 1).

Figura 1 - Principais regiões brasileiras produtoras de sisal.



Fonte: Blog APAEB. (<http://apaeb.blogspot.com/2009/10/na-regiao-sisaleira-planta-do-sisal.html>.)

Desta forma, o plantio e a manufatura dos seus derivados desempenham importante papel no desenvolvimento nacional, seja pela valorização da região semi-árida, com a geração de empregos e renda, seja pelo comércio internacional com a exportação do produto.

Considerando as vantagens da utilização da fibra de sisal - facilidade de cultivo e o baixo custo de produção - poucos produtos são comercializados no Brasil, estes concentrados, em sua maior parte, na produção de cordas, barbante, tapetes, sacos, bolsas, chapéus, vassouras e na confecção de artesanatos. Além destas, tem utilização industrial na fabricação de pasta celulósica, dando origem ao papel *Kraft*, de alta resistência, e a outros tipos de papel fino, tais como para cigarros, filtro, absorvente higiênico, fralda, entre outros. (MARTINS, 2001), revelando que a utilização deste tipo de fibras para fabricação de produtos é uma área com grande potencial a ser explorado. Entretanto, algumas características precisam ser mais bem definidas e analisadas como o comportamento de deterioração ao longo do tempo, com o intuito de caracterizar a vida útil dos produtos a serem desenvolvidos e, no caso da construção civil, analisar o comportamento mecânico de resposta à deformação e o desenvolvimento de tensões na interação matriz cimentícias e fibra.

A utilização de fibras naturais como reforço estrutural de alvenarias apresenta alguns desafios. De acordo com Lima *et al.* (2007), por se tratar de um material natural, o

envelhecimento precoce é um dos limitadores do seu uso. Como solução para este problema, no desenvolvimento de telhas cimentícias com fibras de sisal, Berhane (1994) adicionou materiais pozolânicos em substituição de 40% do cimento com o intuito de reduzir o pH proveniente da hidratação do cimento. Realizada a comparação entre placas cimentícias com fibra sisal com e sem adição pozolânicas, foi observado que as placas sem adição perderam quase toda a ductilidade após seis meses de produção, enquanto as placas com adição pozolânica não apresentaram sinais de degradação em dois anos. Isso se deu ao fato de que, a partir da adição pozolânica, foram gerados produtos de hidratação cimentícias com menores valores de pH, estes, menos agressivos às fibras de sisal, aumentando assim a vida útil do produto. Outra possibilidade para aumentar a durabilidade é modificando a superfície das fibras com tratamentos físicos ou químicos, incrementando assim, a estabilidade diante de matrizes cimentícias. No entanto, alguns desses tratamentos implica no uso de reagentes químicos, encarecendo todo o processo.

Por se tratar de uma fibra promissora, levando em consideração suas características mecânicas, apelo econômico e social, esta pesquisa tem o propósito de contribuir com a comunidade científica avaliando a utilização da fibra de sisal como possível material a ser empregado na área de reabilitação e reforço estrutural. A utilização de fibras naturais na construção civil ainda é um campo com muito potencial de exploração.

## **1.1. JUSTIFICATIVA**

O Brasil possui diversas áreas tombadas pela UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, como patrimônio da humanidade das quais trazem grande herança arquitetônica, histórica e cultural. Dentre estes constam diversos centros históricos, construídos nos primórdios da história brasileira, como a Cidade Histórica de Ouro Preto (MG), Centro Histórico de Olinda (PE), Centro Histórico de Salvador (BA), Centro Histórico de São Luís (MA), Centro Histórico de Diamantina (MG), Centro Histórico de Goiás (GO), entre tantas outras cidades da era colonial.

Patrimônio histórico é todo lugar que carrega importância social, cultural, econômica e científica. Essas características estão presentes em milhares de edificações antigas existentes no país. Entretanto, existe outra característica que a maioria destas edificações também compartilham: muitas passaram (ou estão) várias décadas sem qualquer manutenção, ficando sujeitas à degradação. Diante do estado de conservação destas antigas construções, anualmente são empregados milhões de reais na manutenção ou intervenção para reparos. De acordo com o IPHAN- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (2009), no ano de 2008 foram gastos mais de R\$ 14,6 milhões de reais na recuperação de 300 imóveis

localizados em 20 das 25 cidades participantes do Programa Monumenta, plano de preservação urbana criado em conjunto pelo Governo Federal e o Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, no ano 2000.

O ato de intervir nestes imóveis antigos traz grande importância para toda a sociedade, pois ao preservar-se o patrimônio histórico, além de garantir a segurança da estrutura física, resgata-se a memória de toda a carga histórica, artística e cultural podendo então ser transmitida de geração para geração.

Com o intuito de garantir a conservação dos elementos nas edificações antigas, os procedimentos de manutenção e/ou recuperações devem, preferencialmente, intervir o mínimo possível nas características originais. Para isso é fundamental uma boa avaliação das estruturas, conduzindo assim para a escolha das melhores técnicas e materiais que sejam compatíveis com os elementos existentes.

Dentre as diversas técnicas de intervenção e possíveis materiais utilizados, vem crescendo a utilização de fibras naturais como uma opção a outros tipos de fibras sintéticas comumente utilizadas. Diversas pesquisas foram realizadas com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico de fibras naturais utilizadas como reforço, como por exemplo, fibras de coco, sisal, bagaço de cana-de-açúcar, juta, piaçava, entre outros.

Das pesquisas realizadas utilizando-se fibras naturais, pode-se encontrar na literatura que, dentre as fibras naturais, a de sisal apresenta melhores propriedades mecânicas como a resistência a tração e maior módulo de elasticidade (MOTTA, 2010). Além disso, o sisal possui grande apelo econômico, uma vez que sua produção é majoritariamente realizada na região semi-árida do país, sendo o estado da Bahia seu principal produtor com cerca de 85% da produção brasileira, e possui baixo custo de aquisição, sendo preço relativo da fibra de sisal aproximadamente 11% do preço das fibras de vidro e 0,07% do valor das fibras de carbono, tornando-se uma opção menos onerosa quando comparada com as fibras sintéticas.

Outra característica encontrada na literatura é que o maior benefício obtido por reforçar uma matriz frágil (argamassas, concretos, cal, gesso) com fibras de sisal é alterar o seu comportamento após a fissuração (AGOPYAN, 1993).

Com base nas informações supracitadas sobre as características socioeconômicas do sisal e suas especificações mecânicas, obtidas através de outras pesquisas presentes na literatura, pode-se perceber que a utilização desta fibra natural na área de reabilitação estrutural de edifícios antigos possibilitaria conciliar dois fatores muito desejáveis na construção civil: baixo custo econômico e eficiência na atividade que foi proposta. Desta maneira, torna-se importante a análise da adição de fibras naturais no reforço de paredes com o intuito de avaliar sua possível utilização e sua influência no comportamento mecânico da estrutura. Além disso, essa pesquisa pode trazer grande contribuição para o avanço da

Ciência da Conservação e do Restauro agregando também conhecimento sobre o sisal.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânicos de protótipos de alvenaria, executados com argamassa de cal hidratada e tijolos maciços, em laboratório, reforçados com fibras de sisal, por meio de ensaios laboratoriais. A configuração e materiais adotados para confecção dos modelos têm como principal intenção simular uma alvenaria antiga, objeto de estudo desta pesquisa.

Os objetivos específicos são:

- Caracterização dos materiais componentes utilizados nos protótipos (cal, areia, tijolos e fibra de sisal);
- Execução de alvenarias;
- Confecção de tramas de fibras de sisal;
- Realização de ensaios laboratoriais em argamassa com fibras;
- Realização de ensaios mecânicos de protótipos de alvenarias, reforçados com fibra de sisal, utilizando argamassas de cal hidratada e areia, além de tijolos maciços de resistências compatíveis com aquelas das alvenarias antigas;

## 1.3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa compreenderam as etapas descritas a seguir. Primeiramente, foi realizado levantamento de referencial teórico sobre os principais assuntos pertinentes ao trabalho, em diversos livros, artigos, normas nacionais e internacionais, dissertações e teses que retratam sobre as temáticas relacionadas com esta pesquisa, destacados no capítulo seguinte: alvenarias tradicionais, danos estruturais, técnicas de reforço e reabilitação estrutural, a fibra de sisal e argamassas de cal.

Na segunda etapa foi realizado programa experimental, para avaliação do comportamento mecânico, com realização de ensaio laboratorial de compressão axial e compressão diagonal nos modelos desenvolvidos. Para isto, foram definidos o tipo de fibra, tamanho, quantidade e as formas de aplicação como reforço, e executados ensaios de caracterização dos materiais e das argamassas. O Quadro 1.1 apresenta a síntese dos ensaios realizados nesta pesquisa.

A terceira etapa consistiu na sistematização e análise dos resultados por meio da comparação dos dados obtidos nos modelos com aplicação do reforço estrutural utilizando fibras de sisal com os obtidos em alvenarias sem nenhum reforço para servirem de referência quanto à

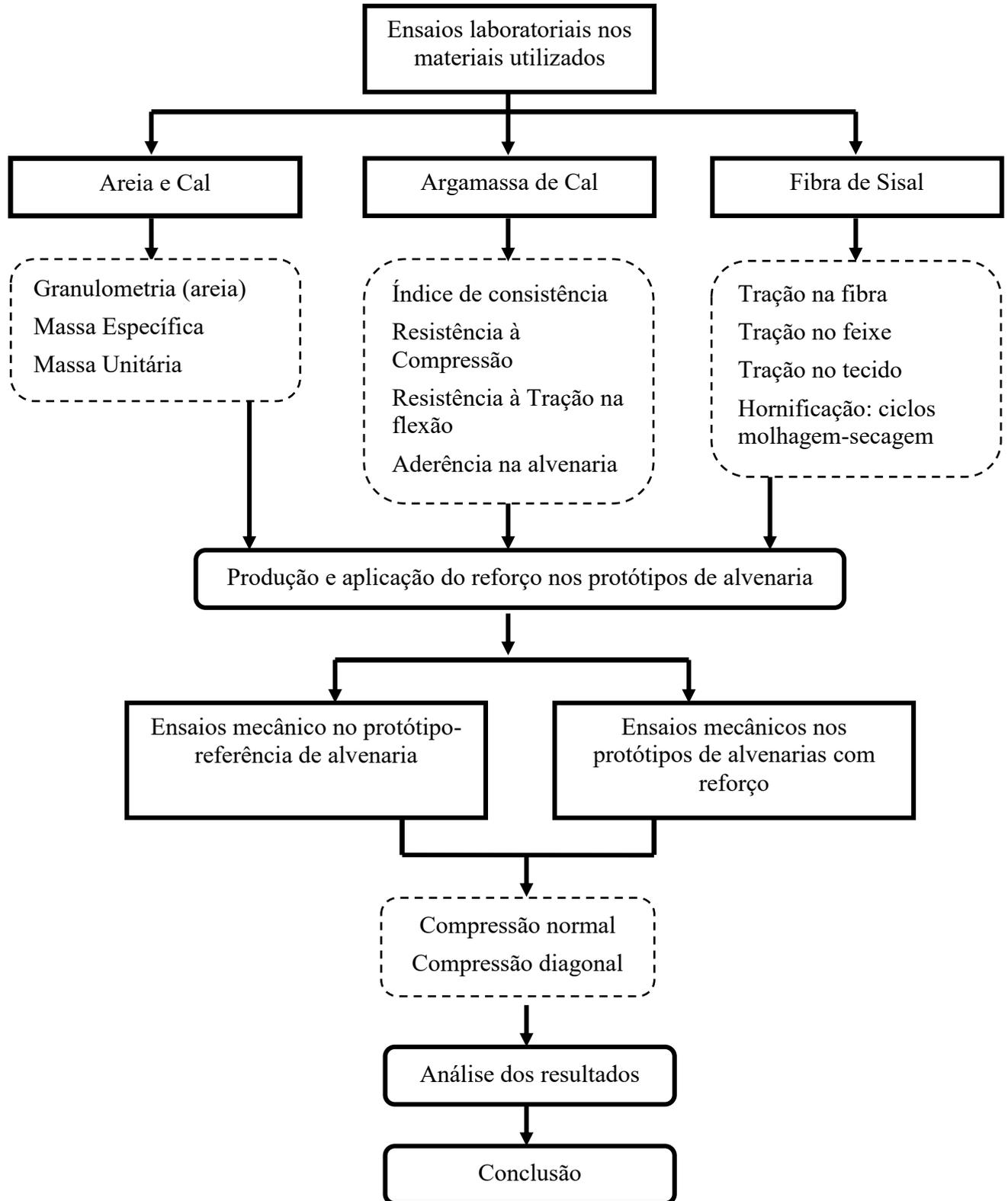
avaliação da eficiência do método.

Quadro 1 - Síntese dos ensaios realizados.

<b>Material</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Número de corpos de prova</b>	<b>Norma de referência</b>
Areia	Granulometria	-	ABNT NBR 7181, 2018
	Massa específica	-	ABNT NBR NM 52, 2009
	Massa Unitária	-	ABNT NBR NM 45, 2006
Cal	Massa Específica	-	ABNT NBR 16605, 2017
	Massa Unitária	-	ABNT NBR 12127, 2019
Fibra de sisal	Tração direta	25	ASTM D3822-07
Feixe de fibra de sisal	Tração direta	20	ASTM D2256-10
Tecido de sisal	Tração direta	20	ASTM D5035
Argamassa	Índice de consistência	-	ABNT NBR 13276, 2016
	Resistência à compressão	6	ABNT NBR 13279, 2005
	Resistência à tração na flexão	7	
	Módulo de Elasticidade	13	ABNT NBR 15630, 2009
	Aderência na alvenaria	12	ABNT NBR 13528-3, 2019
Protótipo de alvenaria (40x40x20 cm)	Compressão Normal	12	ABNT NBR 15961-2, 2011
	Compressão Diagonal	6	ASTM E 519-02

Fonte: O autor (2019).

Figura 2 - Síntese da metodologia aplicada.



Fonte: O autor (2019).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. ALVENARIAS TRADICIONAIS**

O emprego de alvenarias nas edificações antigas é uma prática que foi adotada desde a longínqua Antiguidade. Para melhor entendimento dos assuntos aqui explanados, dois conceitos precisam estar claros, a definição de alvenaria e edificações antigas. Entende-se por “alvenaria”, a associação de um conjunto de unidades de alvenaria (tijolos, blocos, pedras) e, geralmente, argamassa, que possui propriedades mecânicas intrínsecas capazes de constituir elementos estruturais (ROQUE, 2002). Consideram-se como edifícios antigos aqueles que foram concebidos utilizando-se as tecnologias tradicionais, estas que se mantiveram sem grandes alterações até o surgimento do concreto armado, o que remonta a meados do século XIX e, de forma generalizada, na segunda metade do século XX (SOUSA, 2003).

Nas construções antigas, as alvenarias exerciam não só função estrutural, mas também outras exigências funcionais como vedação das edificações e aplicação como elemento de proteção contra possíveis invasores. As primeiras alvenarias, nas quais comumente eram utilizados pedras e/ou tijolos cerâmicos, apresentavam grandes espessuras nas obras mais imponentes, devido ao desconhecimento das características dos materiais utilizados, o que, de maneira geral, agregava bastante resistência às construções, fato que pode ser comprovado pela existência de muitas dessas edificações até os dias atuais.

Jericó, situada na Palestina, e Ur, localizada no sudeste do Iraque, são consideradas as cidades mais antigas do mundo ainda habitadas com idade estimada de 10.000 e 6.000 anos de existência, respectivamente. Cidades com sólidas muralhas de proteção e edificações construídas com paredes de adobe e tijolo cozido ao sol. Parte do sucesso dessa duradoura existência está associada aos assírios. Estes descobriram que o processo de queima das argilas depois de expostas ao sol as tornava mais duras e fortes, fazendo com que não se dissolvessem na presença de água. As Figuras 3 e 4 mostram o Zigurate de Ur e a Muralha de Jericó.

Figura 3 - Zigurate de Ur.



Fonte: Newhouse, E. L., ed., *The Builders*, The National Geographic Society, Washington, D.C., 1992  
(<http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/ur.htm>.)

Figura 4 - A Torre de Jericó - Considerada a mais antiga construção urbana do mundo.



Fonte: Avraham Dovid (2016). ([http://www.thirdtemple.com/jerico/wall\\_jerico1.htm](http://www.thirdtemple.com/jerico/wall_jerico1.htm))

Com o desenvolvimento de novas ferramentas, mais fortes e resistentes, foi possível o trabalho refinado em pedras. Utilizadas para a construção de templos, muralhas, habitações, estradas e pontes, a pedra era o material mais abundante para a utilização das edificações nas civilizações antigas. As pirâmides de Gizé, Figura 5, são exemplos de trabalho realizado em pedras erguidas pela antiga civilização egípcia, idealizadas para servirem como tumbas reais para os reis Quéops, Quéfren e Mekaure. A pirâmide de Quéops, maior entre as três, com altura original de 146,30 metros (480 pés) e medindo atualmente 137,16 metros de altura (a altura original foi reduzida devido à erosão e ao vandalismo), é o único monumento integrante da lista das sete maravilhas do mundo antigo que permanece até os dias atuais (QUIBELL, 1910).

Figura 5 - Pirâmides de Gizé: Uma das sete maravilhas do mundo antigo.



Fonte: Tobias Helbig (2013). ([https://www.hdwallpapers.in/egypt\\_pyramids-wallpapers.html](https://www.hdwallpapers.in/egypt_pyramids-wallpapers.html))

Ao longo da história da antiguidade clássica, duas civilizações merecem destaque na construção de edificações e monumentos: a grega e a romana. Os gregos foram responsáveis pelo desenvolvimento de edificações com arquitetura surpreendente, repleta de detalhes e elevado grau de perfeição. O Partenon, Figura 6, construído na Acrópole de Atenas (447-432 A.C. na Grécia Antiga), foi projetado para ser arquitetonicamente atraente e é um dos marcos da arquitetura grega (SOUSA, 2003).

A contribuição dos romanos está ligada, primeiramente, à influência dos etruscos sobre a sua cultura. Civilização que viveu na Etrúria, na península Itálica, os etruscos influenciaram a engenharia romana através da transmissão de conhecimento na arte de construir abóbadas e arcos, fazendo com que o uso de alvenarias se tornasse variado, resultando em grandes progressos na civilização romana. Consequentemente, a expansão do império romano ao longo da história marcou significativamente a cultura ocidental. Como tal, os conhecimentos de engenharia e arquitetura romana foram sendo passados para as colônias, como os portugueses, que em cadeia foram passando-os para as colônias, assim como o modo de edificar das ordens religiosas e dos engenheiros militares (CAFEZEIRO, 2016). O Panteão, Figura 7, é uma das mais bem preservadas estruturas da antiga civilização romana. É composto por um pórtico retangular com oito colunas frontais e dois grupos de quatro colunas em seguida que se conectam a um prédio circular com uma cúpula de concreto não reforçado com 43,30 metros de diâmetro, tornando-se assim um monumento singular em muitos aspectos como, por exemplo, um espaço interior disponível (WILSON-JONES, 2003).

Figura 6 - O Partenon de Athenas.



Fonte: Savvas Savvaidis (2015). (<https://sothebysrealty.gr/parthenon-on-acropolis-in-athens-greece/>)

Figura 7 - O Panteão. a) Vista externa do Panteão. b) Corte esquemático do modelo tridimensional virtual do Panteão.



(a)



(b)

Fonte: (a): Michael Vadon (2017). (<https://www.archdaily.com.br/br/802972/classicos-da-arquitetura-panteao-romano-imperador-adriano/585d48e4e58ece5079000039-ad-classics-roman-pantheon-emperor-hadrian-image>)

(b): Mark Wilson Jones (2003, p.28).

Sousa (2003) destaca que os arcos e as cúpulas em alvenaria foram, provavelmente, uma das mais importantes evoluções da arquitetura. Com a utilização do arco foi possível ultrapassar as limitações de vãos resultantes das dimensões dos blocos de pedras ou até mesmo dos troncos de madeiras. As técnicas de utilização de arcos nas construções tiveram grande desenvolvimento principalmente pelo povo romano, fazendo-se quase que uma regra a sua utilização para vencer grandes vãos, para transferência de carga para os pilares ou, simplesmente, para composição da arquitetura.

Outra grande contribuição dos romanos foi o desenvolvimento das técnicas de construção de pontes utilizando arcos, como alternativa às usualmente utilizadas estruturas de madeira. Como exemplo desta evolução construtiva, têm-se as pontes rodoviárias e aquedutos

com destaque para a Ponte do Gard (*Pont du Gard*, século I a.C.), Figura 8. Localizada no sul da França, trata-se de uma ponte-aqueduto com 49 metros de altura e 275 metros de comprimento, ganhando assim a posição de ponte antiga mais alta do mundo. Constituída por três camadas de arcos sobrepostos (6 arcos no nível inferior, 11 arcos no nível intermediário e 47 arcos menores do nível superior), sendo que o nível inferior era utilizado como estrada e o nível superior como aqueduto, este com dimensões de 1,8 metros de altura por 1,2 metros de largura (PONT DU GARD, [2000]).

Figura 8 - Vista aérea da Ponte do Gard.



Fonte: Anna Preiss (2000). (<http://pontdugard.com/pt/pont-du-gard/historia-de-uma-ponte-notavel>)

Os militares também são responsáveis por grande parcela do desenvolvimento da utilização das alvenarias. Diante da história da engenharia, as instituições militares eram detentoras das escolas de formação que abrangiam muitas das funções dos engenheiros de construção (SOUSA, 2003), atualmente chamados de engenheiros civis. Para a proteção contra ataques e guerras, as mais remotas construções militares, as muralhas e as torres, tiveram que tornar-se resistentes às investidas dos adversários com poder bélico mais forte.

Com o decorrer da história, os materiais e as técnicas construtivas permaneceram praticamente inalterados apesar das mudanças arquitetônicas características de cada período histórico e da cultura de diferentes povos. Com a Revolução Industrial, ocorreu a produção de materiais mais resistentes em escala industrial, como ferro, aço e o cimento Portland, que passaram a competir com as alvenarias. Os novos materiais apresentavam vantagens construtivas sobre as alvenarias, substituindo assim as paredes espessas dos edifícios mais altos por soluções mais esbeltas, agregando economia e funcionalidade (ganho de espaço, custo e tempo de execução) (BRUNA, 2000; SOUSA, 2003).

Entre os séculos XIX e XX, obras de maior porte foram construídas em alvenaria com base em modelos racionais. Segundo Sousa (2003), naturalmente as estruturas em alvenaria, dimensionadas por regras empíricas intuitivas, com paredes muito espessas em edifícios altos, quando comparadas às soluções que acarretavam em mais esbeltez na base (estruturas metálicas e concreto armado), tornaram-se desinteressantes. O edifício *Monadnock Building* (Figura 9), construído em Chicago no ano de 1891 com 16 pavimentos e paredes de 1,80 m na base, é referido como o último exemplo de uma grande construção em alvenaria segundo a tradição antiga.

Figura 9 - Edifício Monadnock Building.



Fonte: David K. Staub (2005). (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Monadnock.jpg>)

Por volta de meados do século XX, nos países mais desenvolvidos, as estruturas de alvenaria voltam a despertar o interesse, numa perspectiva mais moderna, associada a novas formas de dimensionamento e ao interesse econômico (SOUSA, 2003). Entre as décadas de 20 e 50 houveram diversas pesquisas e estudos com o intuito de melhor conhecer as características estruturais das alvenarias. Suíça, Canadá, USA, Austrália e Reino Unido foram grandes cooperadores no desenvolvimento de recomendações práticas modernas, relativas à concepção de estruturas de alvenaria. A partir da década de 50, os estudos teóricos e experimentais aprofundaram-se permitindo o desenvolvimento de métodos de cálculos semelhantes aos usados para outros materiais como as estruturas metálicas.

## 2.2. DANOS ESTRUTURAIS

A necessidade de reabilitação ocorre devido ao surgimento de danos que afetam as construções desde os primórdios das civilizações e que dependem, principalmente, da qualidade da edificação construída. Ao longo da história existem diversos registros de estruturas que acabam por ter desempenho insatisfatório, se confrontadas com as finalidades a que se propõem. As causas desses comportamentos podem ser variadas, desde falhas involuntárias à deterioração natural das estruturas devido ao tempo. Pode-se tomar como exemplo o antigo Hospício de Pedro II (Figura 10), construído em 1852, na cidade do Rio de Janeiro, que no ano de 1944 encerrou suas atividades e foi cedido, em 1948, para a extinta Universidade do Brasil (atual UFRJ) para instalação da Reitoria e das Universidades de Arquitetura, Farmácia e Educação Física. Para isto, foram necessárias obras de reparos na estrutura do antigo prédio, onde atualmente funciona o Palácio Universitário da UFRJ (Figura 11).

Figura 10 - Hospício de Pedro II em 1861.



Fonte: UFRJ (2019). ([http://www.etu.ufrj.br/imoveis\\_tombados/7](http://www.etu.ufrj.br/imoveis_tombados/7))

Figura 11 - Vista atual da entrada do Palácio Universitário - UFRJ.



Fonte: UFRJ (2019) ([http://www.etu.ufrj.br/imoveis\\_tombados/7](http://www.etu.ufrj.br/imoveis_tombados/7))

Os danos que surgem em uma construção devem ser sempre encarados como um passo – indesejado, mas praticamente inevitável – rumo à qualidade (SILVA e ABRANTES, 2007). O surgimento de alterações em uma estrutura indica, de maneira geral, a existência de uma ou mais falhas que podem gerar desde desconforto aos usuários, até o colapso total da edificação. Dessa maneira, as estruturas devem ser vistas como produtos com elevado grau de complexidade, apresentando enorme quantidade de variedades de características, das quais influi sua capacidade de funcionalidade.

Além do conceito técnico de patologia Souza e Ripper (1998) destacam também que, genericamente, designa-se por **patologia das estruturas** um novo campo da engenharia das construções que estuda as origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e do sistema de degradação dos componentes estruturais de uma edificação. Este ramo da engenharia exerce grande importância para o estudo das patologias, não só pelo aspecto de encontrar soluções para diferentes problemas, mas também referente à concepção dos projetos, e de maneira geral, à própria formação do engenheiro civil.

Esta área da engenharia encontra-se em constante crescimento, entretanto, apesar de toda evolução e desenvolvimento, os profissionais que atuam neste ramo baseiam-se principalmente em experiências acumuladas, fato este que se dá devido aos processos de reabilitação apresentarem, na sua maioria, um carácter artesanal e particular, conseqüente dos desafios próprios de cada problema (OLIVEIRA, 2001).

De maneira geral, o termo dano refere-se aos problemas ou defeitos que podem surgir nos elementos de uma edificação, como deformações, deslocamentos, manchas, entre outros, enquanto patologia das estruturas está associada a ciência que identifica estas manifestações patológicas, diagnosticando suas causas, indicando soluções e apontando possíveis formas de prevenção, contribuindo, desta forma, para um processo de evolução e disseminação de

conhecimentos.

### **2.2.1. DANOS ESTRUTURAIS COM IMPACTOS DIRETOS NAS PAREDES DE ALVENARIA**

Os problemas que se manifestam nas alvenarias são, de modo geral, bastante visíveis pela própria natureza dos materiais e do comportamento dos seus componentes. Vitorio (2003) destaca que as disfunções encontradas em alvenarias estruturais possuem maior gravidade devido à influência na estabilidade da edificação, no entanto, mesmo as alvenarias de vedação, precisam apresentar desempenho satisfatório de modo a resistir aos fatores externos e internos, como variações de temperatura, movimentações das estruturas onde estão apoiadas, umidade relativa do ar, infiltrações, entre outros.

No âmbito dos danos em paredes de alvenaria, é necessário salientar e distinguir as lesões provenientes das respostas estruturais devido aos esforços aos quais estão sujeitas e os oriundos do comportamento ou características dos materiais. Apesar desta divisão a definição do real causador de uma manifestação anormal é um diagnóstico difícil devido ao fato de serem raras as situações inerentes a um único elemento construtivo, sendo mais comuns casos onde há um conjunto de fatores associados à funcionalidade global da edificação.

Entende-se como dano, problema ou anomalia estrutural, toda manifestação atípica não planejada na fase de projeto, interferindo diretamente na estabilidade de outros elementos construtivos e/ou acarretando lesões na edificação. Tais problemas são oriundos de desempenho deficiente ou interação anormal dos elementos estruturais, devido a ações mecânicas externas ou internas, interferindo na estabilidade ou configuração inicial da estrutura. Anomalias deste tipo afetam tanto a alvenaria em si (blocos) quanto o revestimento (reboco) sendo seus principais efeitos deformações excessivas e surgimento de fissuras.

Nas literaturas relacionadas ao assunto, existem diversos autores que fazem a classificação quanto aos danos nas estruturas em diversas categorias. Quanto à distinção entre anomalias estruturais e não estruturais. Silva (2002) destaca que a separação entre tais conceitos varia conforme os autores, baseando-se no fato de que são raras as situações de patologias confinadas a um único elemento construtivo e sem qualquer dependência do funcionamento global do edifício. O mesmo autor faz referência às patologias de caráter não estrutural e faz a divisão em quatro grupos principais de acordo com sua origem e/ou forma de manifestação, que são basicamente:

- Ação da umidade;
- Fissuração;
- Envelhecimento dos materiais;

- Desajustamento diante de determinadas exigências funcionais.

A Figura 12 apresenta uma síntese das ocorrências de anomalias não estruturais de acordo com Silva (2002).

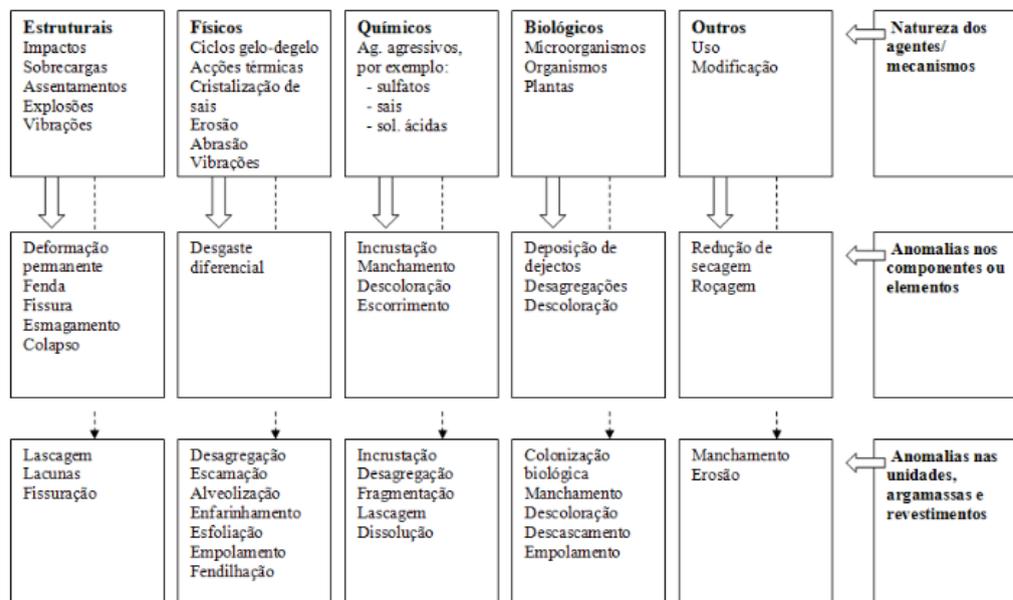
Figura 12 - Síntese das ocorrências de anomalias não estruturais.

ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO		ANOMALIAS NÃO-ESTRUTURAIS									
		Anomalias devidas à humidade		Fissurações		Envelhecimento e degradação dos materiais		Desajustamentos face a exigências			
		Humidificação dos materiais	Humidificação dos materiais	Alteração das propriedades físicas	Degradações dos materiais			Exigências de segurança	Exigências de conforto	Exigências de economia	
		Humidade de construção	Humidade do terreno	Humidade de precipitação	Humidade de condensação	Higroscopicidade dos materiais	Causas fortuitas				
Elementos primários	Paredes exteriores	1	2	3							
	Paredes interiores										
	Pavimentos										
Elementos secundários	Coberturas										
	Janelas										
	Cerramentos de vãos exteriores										
	Portas exteriores										
	Portas interiores										
Acabamentos	Guardas										
	Lanternins										
	Acabamentos exteriores em paredes										
	Acabamentos interiores em paredes										
	Acabamentos em tectos										
	Acabamentos em pisos										
	Acabamentos em coberturas										

Fonte: Silva (2002, p.5)

Cóias (2006) dividiu as possíveis anomalias nos edificios em dois grandes grupos: aquelas que influenciam o aspecto estético do componente ou elemento e as que afetam o comportamento estrutural, estas últimas objeto de estudo deste trabalho. A Figura 13 apresenta um resumo dos principais agentes/mecanismos de deterioração de uma edificação destacando a natureza dos agentes e os possíveis danos nos elementos e nas paredes.

Figura 13 - Resumo dos principais agentes/mecanismos de deterioração de uma edificação.



Fonte: Adaptado de Cóias (2006, p.81)

Cafezeiro (2016) agrupou as anomalias em três segmentos básicos, considerando que os danos mais frequentes, em alvenarias antigas, são aqueles relacionados à: diminuição da seção do muro; esmagamento; e movimentos de fundações e muros.

O primeiro grupo destacado por Cafezeiro (2016), relacionado à diminuição da seção do muro, diz respeito a lesões superficiais que, no decorrer do tempo, podem diminuir a seção do elemento estrutural causando a debilidade do muro (Figura 14). Os dois outros segmentos referem-se aos danos que podem ocasionar, diretamente, o colapso da estrutura de alvenaria (Figuras 15 e 16).

Figura 14 - Capela de Nossa Senhora do Vencimento: a) Muro da fachada posterior; b) Base do muro da fachada posterior.

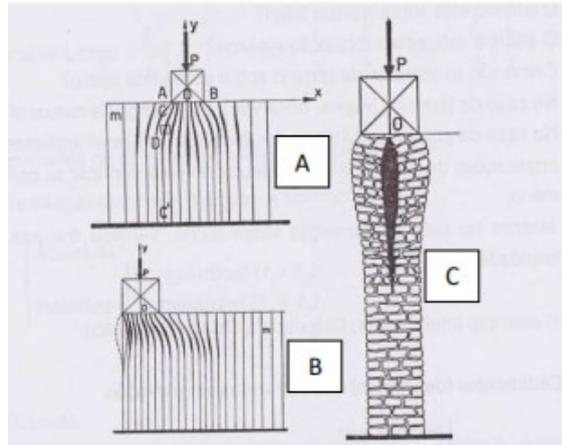


(a)

(b)

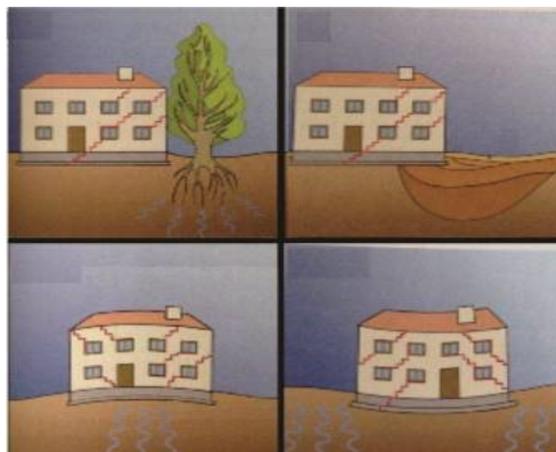
Fonte: Cafezeiro (2016, p.88)

Figura 15 - Vistas (A e B) e Seção (C) do fenômeno de esmagamento.



Fonte: Oliveira (2006, p.170).

Figura 16 - Fendilhamentos e rachaduras provenientes de movimentação do terreno.



Fonte: Adaptado de Cafezeiro (2016, p.92).

Já Muñoz (2009), com base no trabalho de Russo (1934), também dividiu as lesões nas edificações em seis grupos, estes de acordo com as causas dos danos:

- Lesões de acomodação ou adaptação;
- Lesões por recalque ou assentamento;
- Lesões por esmagamento;
- Lesões por rotação;
- Lesões por escorregamento;
- Lesões por fatores endógenos.

As estruturas de alvenaria caracterizam-se por apresentar elevada resistência aos esforços de compressão, em função da natureza e forma dos materiais empregados (pedras, blocos, tijolos, entre outros), disposição desses materiais e características da argamassa de

ligação (MUÑOZ, 2009). Independente das divisões realizadas pelos autores supracitados, todas as anomalias alteram, em algum grau, características responsáveis pela resistência à compressão das alvenarias, estas que podem ter efeitos apenas estéticos, a exemplo o aparecimento de manchas, ou levar a estrutura ao colapso, devido à perda significativa de resistência.

Com base na divisão realizada por Muñoz (2009), a seguir são descritos brevemente, os seis grupos destacados pela autora.

#### **2.2.1.1. LESÕES DE ACOMODAÇÃO OU ADAPTAÇÃO**

Este fenômeno ocorre quando uma alvenaria estrutural, durante a construção, sofre uma translação vertical. De acordo com Muñoz (2009), podem ocorrer acomodações das argamassas devido ao efeito da retração e recalques das fundações devido à compressão do terreno sob a atuação de cargas.

#### **2.2.1.2. LESÕES POR RECALQUE OU ASSENTAMENTO**

As lesões provocadas por recalque ou assentamento das fundações de uma edificação variam, a depender da carga total atuante no terreno e do tipo de solo que o compõe, este que conseqüentemente influencia na característica de resistência à compressão. De acordo com Oliveira (2006), solicitações como empuxo, forças de arcos, abóbodas, e esforços decorrentes nas coberturas dos edifícios são os principais responsáveis por movimentos de fundação, deslocamento do terreno e/ou rotação dos muros, que, por sua vez, respondem pelo aparecimento de lesões nas estruturas.

Muñoz (2009), a partir de Russo (1934) e Croci (2001), atribui as causas da deformação do terreno aos seguintes fatores:

- Escolha inadequada do terreno de fundação;
- Defeitos na consolidação do plano de sustentação ou na construção das fundações;
- Mudanças nas condições hidráulicas do solo;
- Infiltrações no plano de assentamento;
- Consideráveis aumentos de cargas eventuais;
- Modificação da pressão em área adjacente ao edifício;
- Efeito dinâmico, proveniente do efeito de vibração devido à utilização de máquinas vibratórias.

O Quadro 2 apresenta dados segundo Cafezeiro (2016), baseado em Muñoz (2009), no qual relaciona a dimensão das trincas com o tipo de lesão que pode acontecer em uma parede de alvenaria.

Quadro 2 - Classificação dos danos em edificações.

<b>Classe do dano</b>	<b>Descrição do dano</b>	<b>Espessura da trinca (mm)</b>	<b>Denominação</b>
Desprezível	Trincas capilares.	< 0,1	Craquelê
Muito pequeno	Trincas na alvenaria externa de fácil reparo.	< 0,1	Craquelê e fissuras
Pequeno	Trincas externas visíveis e sujeitas à infiltração.	< 5,0	Trincas e rachaduras
Moderado	O fechamento das trincas requer significativo preenchimento. Pode ser necessária a substituição de pequenas áreas de alvenaria.	5,0 a 15,0	Trincas e rachaduras
Severo	Necessidade de reparos envolvendo remoção de trechos de parede, principalmente sobre portas e janelas. Paredes fora do prumo e utilidades interrompidas.	15,0 a 25,0	Fissuras e rachaduras
Muito severo	Reparos significativos envolvendo reconstrução parcial ou total. Paredes requerem escoramento. Perigo de instabilidade	> 25,0	Brechas e fissuras

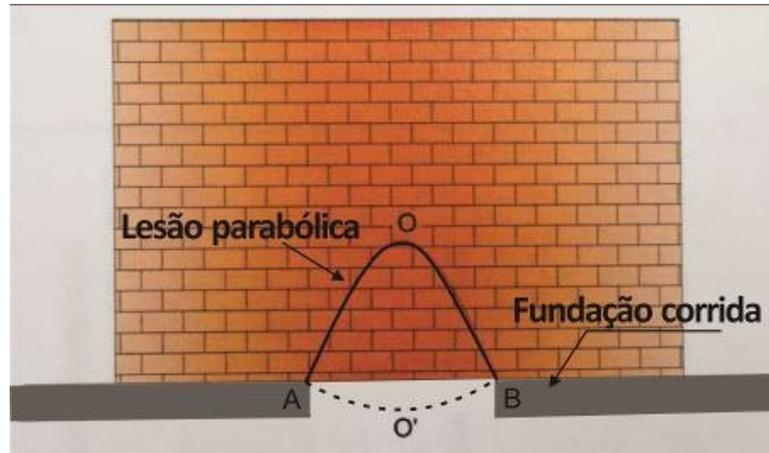
Fonte: Cafezeiro (2016, p.91)

As menores lesões existentes são aquelas superficiais, as quais apresentam dimensões menores que 0,1 mm. Essa deterioração que é conhecida como “craquelê”, afeta, em grande parte, os revestimentos (CAFEZEIRO, 2016). Como já apresentado no quadro anterior, a fim de simplificação e melhor entendimento, neste trabalho se utilizará a expressão fissura de forma genérica para representar este tipo de lesão.

As lesões por recalque do plano de assentamento das fundações dependem da configuração da alvenaria e do tipo de fundação. Quanto à forma de apresentação, as fissuras podem ser:

- a) Parabólicas: verificam-se nos recalques das alvenarias sem aberturas sobre fundações corridas. A Figura 17 mostra o plano de assentamento da alvenaria representado pelo trecho AB e a fratura AOB devido ao recalque AO'B.

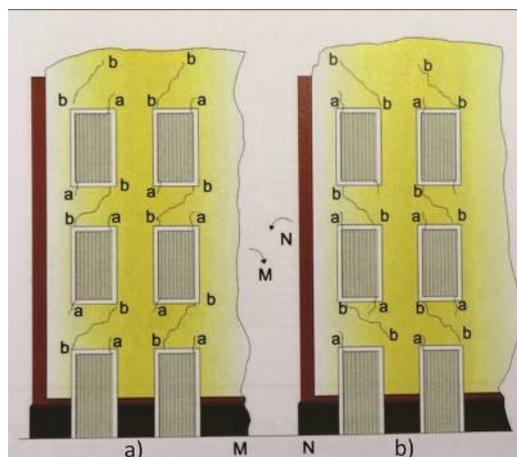
Figura 17 - Lesões parabólicas nas alvenarias sem aberturas sobre fundações corridas devido ao recalque do plano de assentamento.



Fonte: Adaptado de Munõz (2009, p.116)

- b) Parabólicas achatadas, muito alargadas e deformadas: Ocorre nos muros com aberturas sobre fundações contínuas. A parábola pode apresentar formas variadas como achatada, podendo confundir-se com uma fissura horizontal; muito alargada, aparentemente formada por duas retas sensivelmente verticais; e deformada, devido a fatores como superposição de recalques, heterogeneidade da estrutura da alvenaria, presença de aberturas que interrompem a continuidade e, espessura variada na alvenaria (Figura 18 (a) e (b)).

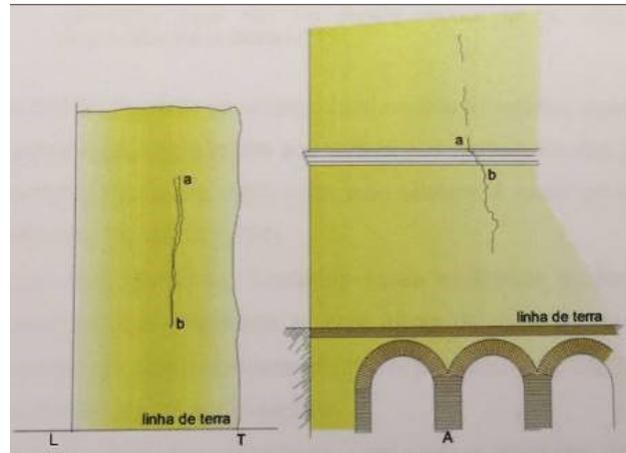
Figura 18 - Lesões parabólicas nas alvenarias com aberturas sobre fundações corridas, devido ao recalque do plano de assentamento.



Fonte: Munõz (2009, p.117)

- c) Quase verticais; ocorrem nos recalques de alvenarias sem aberturas, cujas fundações são abóbodas ou pilares. A forma das lesões caracteriza-se por uma linha sinuosa, sensivelmente vertical, mais larga na parte superior, capilar na parte inferior e inexistente na linha da terra (Figura 19).

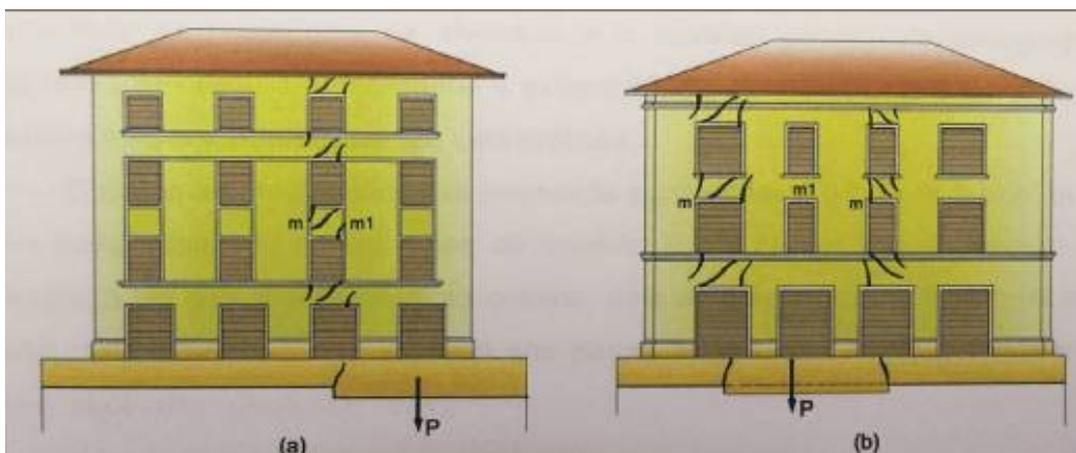
Figura 19 - Lesões parabólicas nas alvenarias com aberturas sobre fundações corridas devido ao recalque do plano de assentamento.



Fonte: Munõz (2009, p.119)

- d) Inclínadas na direção da zona em que cedeu: observadas nos recalques de alvenarias com aberturas, fundadas sobre abóbadas e pilares. Segundo Muñoz (2009), as fissuras iniciam-se e ficam mais acentuadas na parte superior do edifício, transpassando os pisos e vãos abertos, vão diminuindo até não apresentarem mais espaçamentos a certa distância do pavimento térreo que varia com a magnitude do fenômeno, a natureza do muro, a altura do edifício, entre outros;
- e) Inclínadas e por curvas parabólicas: ocorrem em recalques acentuados nos pilares intermediários em edificações com fundações de abóbadas e pilares. A Figura 20 traz uma representação de lesões em edificações com aberturas devido a recalques terminais intermediários.

Figura 20 - Lesões em edificações com aberturas por recalque terminais e intermediários.



Fonte: Munõz (2009, p.122)

### 2.2.1.3. LESÕES POR ESMAGAMENTO

As lesões em estruturas antigas proveniente de esmagamento são muito perigosas, uma vez que a sua simples ocorrência pode causar o colapso de toda a estrutura. Este fenômeno se dá quando a capacidade de resistência à compressão das alvenarias é superada pelas tensões de compressão às quais está submetida, resultando na “quebra” da alvenaria, com consequente desagregação de material. Esse fenômeno pode estar relacionado, também, à fadiga ou deterioração das argamassas que compõem a estrutura. À medida que esse fenômeno vai se desenvolvendo, é possível verificar o aparecimento de fissuras na mesma direção da solicitação e, usualmente, distribuídas uniformemente na base da parede (CAFEZEIRO, 2016).

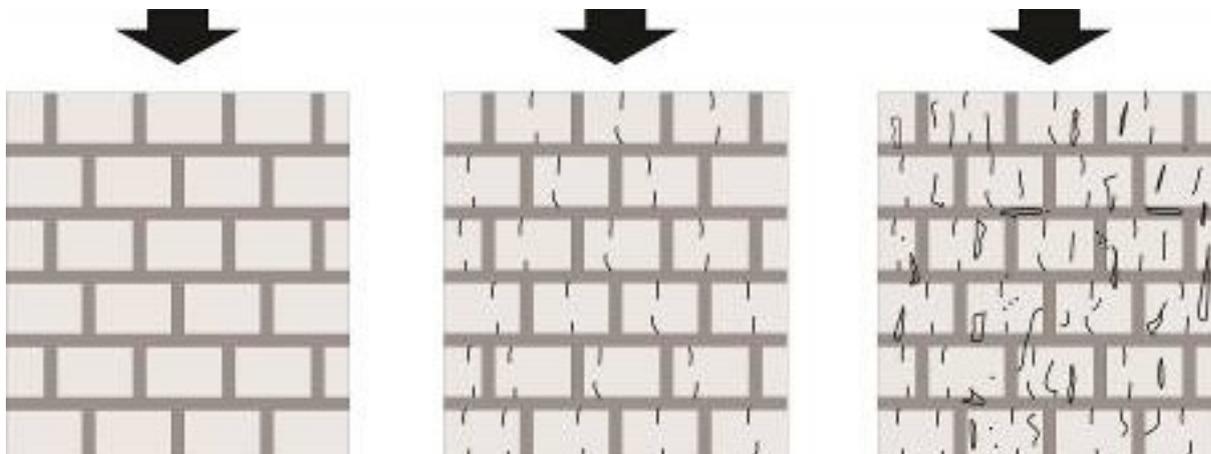
Muñoz (2009) realça que é característico das alvenarias esmagadas o som de “vazio” obtido através do impacto de um martelo nas paredes. Além disso, a autora destaca que, em 90% dos casos, percebe-se a desagregação das argamassas ao contato, pois estas se pulverizam facilmente entre os dedos.

Dentre as causas das lesões por esmagamento, Muñoz (2009) separou:

- Sobrecarga adicional;
- Pequena espessura dos muros;
- Vida útil da estrutura, pois quanto mais antiga menor é a coesão das argamassas;
- Defeitos de construção devido ao uso de materiais com baixa qualidade ou que apresentam falhas no processo produtivo;
- Fatores climáticos, pois temperaturas extremas interferem nas características das argamassas como aderência as paredes, para temperaturas baixas e perda de água da composição provocando sua pulverização no caso de temperaturas altas;
- Sobrelevações dos edifícios.

A Figura 21 apresenta a forma como as lesões apresentam-se nas alvenarias. As principais características são: direção vertical (típico de rupturas à compressão), espaçadas, em grande quantidade (uma vez que as tensões atuam em todo o topo dos muros) e onduladas.

Figura 21 - Lesões por esmagamento em alvenarias.



Fonte: Adaptado de Muñoz (2009, p.125)

Conforme Muñoz (2009), o processo de esmagamento das alvenarias compreende três fases: i) desagregação das argamassas; ii) ruptura do material – que pode ocorrer simultaneamente a fase de desagregação da argamassa ou ainda ocorrer sem desagregação; iii) esmagamento propriamente dito – o que é caracterizado por uma fratura de grande extensão, fissuras unificadas e ruína da estrutura em questão.

#### 2.2.1.4. LESÕES POR ROTAÇÃO

As lesões por rotação são provenientes do giro no plano vertical em que foi levantada a alvenaria. As principais fontes originadoras dessas rotações são os esforços provenientes de empuxos laterais.

Muñoz (2009), a partir de Russo (1934), identifica a rotação, ao observar principalmente:

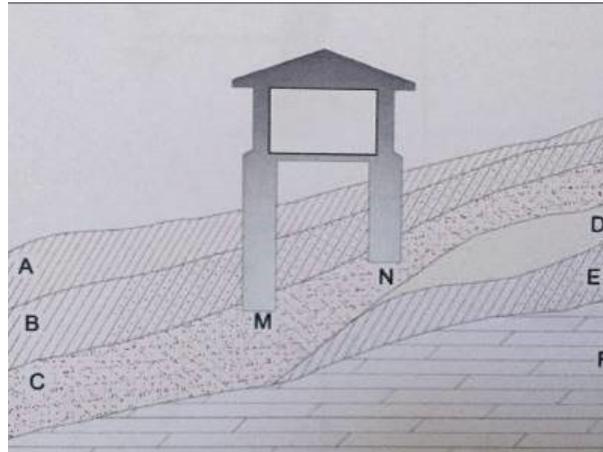
- a) Desaprumo da alvenaria, mais acentuada na parte superior do que na inferior;
- b) Lesões nos pavimentos e nas abóbodas paralelas ao eixo de rotação;
- c) Ruptura na chave e, às vezes, nos rins dos arcos e abóbodas que produziram a rotação.

#### 2.2.1.5. LESÕES POR ESCORREGAMENTO

As lesões por escorregamento são geradas devido o deslizamento do plano onde se situa a fundação, sobre o terreno em que se apoia. Segundo Muñoz (2009), as movimentações dos planos de assentamento das fundações, em terrenos inclinados, compreendem:

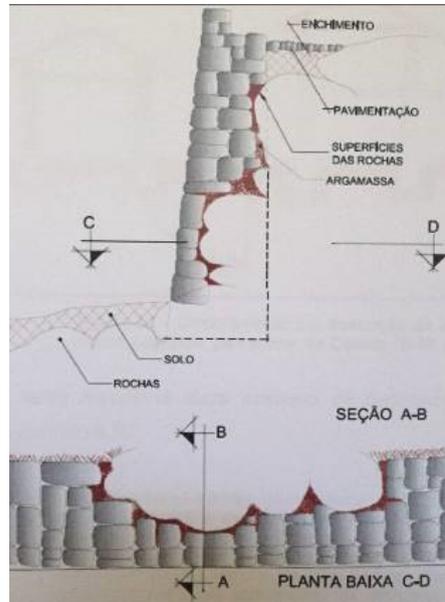
- a) Deslizamento por corte de camadas no terreno (Figura 22);
- b) Deslizamento por empuxos de aterros (Figura 23);
- c) Deslizamento por execução de valas e pavimentações (Figura 24);

Figura 22 - Movimento do plano de assentamento por corte de camadas no terreno.



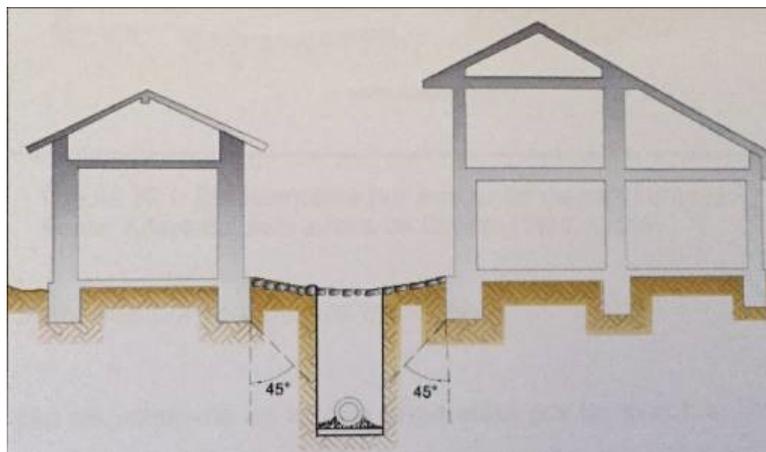
Fonte: Adaptado de Munõz (2009, p.134)

Figura 23 - Ilustração de deslizamento por empuxo de aterros.



Fonte: Adaptado de Munõz (2009, p.135)

Figura 24 - Deslizamento por execução de valas.



Fonte: Adaptado de Munõz (2009, p.136)

Entender as causas e os tipos de lesões supracitadas pode ser uma tarefa complexa para o engenheiro ou restaurador, entretanto de grande importância para o procedimento seguinte, que contempla a escolha da melhor intervenção com base nas características e particularidades de cada edificação. Com o avanço das pesquisas e aplicações práticas na área do restauro e recuperações estruturais diversas técnicas foram desenvolvidas a fim de se obter as melhores soluções às causas dos danos. A seguir são apresentadas algumas metodologias utilizadas.

### 2.3. TÉCNICAS DE REFORÇO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL

A iniciativa de intervir em uma estrutura deve partir após a análise cuidadosa das anomalias, avaliando o estado de degradação e/ou conjunto de alterações existentes, estas que, consequentemente, implicam em cargas ou condições desfavoráveis para a estrutura, diferente daquelas que foram consideradas originalmente. Deste modo, é possível a aplicação de técnicas de reforço a fim de aumentar a capacidade de carga ou a limitação da deformação da estrutura, objetivando maior segurança global para a edificação.

Ao se tratar de estruturas com precioso valor histórico, faz-se necessário adotar procedimentos que incluam etapas desde uma leitura geral da edificação, com informações de carácter qualitativo, até análises detalhadas, identificando as características dos materiais e da estrutura, assim como à origem dos danos existentes. Roque (2002) afirma que as peculiaridades das estruturas de alvenaria antigas parece adequar-se a uma abordagem metodológica que compreende as seguintes etapas:

- Avaliação histórica: etapa que consiste no estudo da evolução histórica do edifício e coleta de dados e informações importantes;
- Diagnóstico: identificação das causas das anomalias e da degradação e

avaliação da segurança estrutural da edificação;

- Tratamento: escolha e aplicação da(s) técnica(s) de intervenção;
- Controle: acompanhamento e controle da eficiência da intervenção estrutural.

A etapa de avaliação histórica corresponde à fase preliminar do estudo da edificação e é responsável, como já é presumido diante da própria denominação, pela obtenção de informações gerais sobre a história do edifício ou, até mesmo, sobre edificações da mesma época de construção. Tais informações podem ser adquiridas por meio de pesquisa em documentos e registros (históricos e, eventualmente arqueológicos), com o objetivo de encontrar informações sobre as diferentes fases de construção, as técnicas empregadas, materiais utilizados e possíveis intervenções pela qual passou.

No que se refere à fase do diagnóstico, Roque (2002) destaca ser a mais importante do estudo, pois esta precede a decisão de intervenção. A fim de enriquecer as informações para definição das intervenções necessárias é louvável que esta fase inclua: levantamento geométrico e estrutural, utilizando técnicas tradicionais ou fotogramétricas (levantamentos com equipamentos modernos, entre outros), para identificação de eventuais irregularidades, como por exemplo, desaprumo das alvenarias; levantamento das características construtivas, com a caracterização da tipologia das paredes e os seus materiais (auxiliada pela realização de ensaios tanto *in situ* e laboratoriais); avaliação preliminar das condições de segurança da estrutura, levando em consideração o estado dos materiais e dos elementos estruturais, registrando a presença de anomalias visíveis, deformações, esmagamentos, trincas e fissuras, deterioração dos materiais e, das ligações entre os elementos estruturais, entre outras características que destoem da originalidade da edificação em questão; estudo analítico complementar para estimar o estado de tensão da estrutura (ROQUE, 2002).

Com os dados obtidos do diagnóstico e identificados os danos (preferencialmente apontando as suas origens), pode-se escolher as técnicas que mais se adequam às características da edificação. Para este processo de intervenção, vale salientar que, nem sempre, intervir em uma estrutura significa corrigir anomalias existentes. Existe, simplesmente, a possibilidade de interferência com o intuito de melhorar seu comportamento estrutural como forma de prevenção a futuros problemas. De qualquer forma, tratando-se de edificações antigas, a ação da aplicação de qualquer técnica de reforço não deve basear-se apenas nas considerações físicas e estruturais, mas também considerar o contexto maior no qual estas construções estão inseridas, como por exemplo: aspectos artísticos, culturais, econômicos, históricos, turísticos, entre outros.

Finalizada a intervenção, é necessária a implantação de uma rotina periódica de manutenção, além de planejamento para o caso de surgirem futuras necessidades de reforço.

Vale ressaltar que, ao tratar de construções antigas, toda e qualquer intervenção realizada utilizará materiais diferentes dos originais, contudo, há três características destacadas por Roque (2002) que devem ser asseguradas: compatibilidade, durabilidade e reversibilidade.

A compatibilidade dos materiais pode ser dividida em duas classes: compatibilidade mecânico-estrutural e compatibilidade físico-química. A primeira deve garantir reduzida alteração das características da rigidez da construção e do funcionamento estrutural original. Na compatibilidade físico-química, os materiais utilizados não devem ser a causa do aparecimento de novas anomalias devido aos diferentes comportamentos físicos e/ou químicos.

Quanto às exigências de durabilidade, o principal fator de atenção é garantir a preservação das estruturas antigas, especialmente as que possuem cunho histórico, por um período ainda maior, requerendo dessa forma a utilização de materiais com exigências de durabilidade mais rigorosas do que aqueles utilizados em novas estruturas. O emprego de materiais modernos acarreta ações de manutenção e reparação periódicas, principalmente com a interação com os materiais antigos, uma vez que não se pode garantir a capacidade de manter suas propriedades durante séculos, diferentemente dos materiais antigos que resistiram à ação do tempo.

A reversibilidade da intervenção tem como principal intenção proporcionar a possibilidade de remoção dos materiais de reforço utilizados sem provocar danos aos elementos originais da edificação. Este atributo surge como solução para substituição dos materiais no fim da sua vida útil ou no caso de não compatibilidade com a estrutura original. É uma característica a que se tem dado muita importância em intervenções com insumos modernos. Do ponto de vista prático, na maioria dos casos, esta condição é difícil de se garantir, devendo ser considerada como um requisito estrito a monumentos de excepcional importância (ROQUE, 2002).

Esta última característica é controversa, uma vez que diversos especialistas na área de restauração, como o Dr. Mário Mendonça, do Núcleo de Tecnologia da Preservação e do Restauo - NTPR, da Universidade Federal da Bahia, afirma que é impossível garantir a reversibilidade de uma intervenção, já que a introdução de um novo material dificilmente será removido sem causar danos aos elementos originais.

Além dos aspectos já citados, outros pontos que impactam diretamente no processo de reforço são importantes considerar:

- Acréscimo do peso total da estrutura;
- Estética final pós-reforço;
- Custo (imediato e de manutenção);
- Tempo total da interdição da edificação.

Segundo a citação de Roque (2002), existe uma variedade de técnicas de intervenção, que podem ser divididas em grupos:

- i. Relativo aos materiais utilizados:
  - Técnicas tradicionais – utilizam processos construtivos idênticos aos utilizados originalmente;
  - Técnicas inovadoras – utilizam materiais e processos construtivos modernos com o intuito de encontrar soluções mais eficientes do que as tradicionais;
- ii. Relativo aos efeitos:
  - Técnicas de reforço ativo – pressupõem uma alteração das condições de carga e, conseqüentemente, do estado de equilíbrio e de deformabilidade. Como exemplo, têm-se as soluções de pré-esforço;
  - Técnicas de reforço passivo – os reforços apenas funcionam para cargas superiores às correspondentes ao estado de equilíbrio em que a estrutura se encontra ou para deformações posteriores.

De forma geral, a escolha entre adotar uma solução tradicional ou inovadora é controversa, entretanto se for possível obter soluções satisfatórias do ponto de vista estrutural, econômico e construtivo deve-se dar preferência ao uso das técnicas tradicionais por trazer diversas vantagens ao resultado final como estética, aspecto cultural e compatibilidade entre os novos elementos e os originais. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o processo do restauro fique nítido e perceptível a fim de se evitar a criação de um falso histórico. A Carta de Veneza, fruto do II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos de Monumentos Históricos, realizado em Veneza de 25 a 31 de maio de 1964, traz a seguinte declaração sobre o assunto:

[...] **Art. 12** – Os elementos destinados a substituírem as partes que faltam devem integrar-se harmoniosamente no conjunto e, simultaneamente, serem distinguíveis do original por forma a que o restauro não falsifique o documento artístico ou histórico (Carta de Veneza, IPHAN, 1964, p.2).

Quando a edificação necessita de um aumento significativo de resistência é mais frequente recorrer às técnicas modernas ou inovadoras, estas que utilizam materiais muito mais eficientes que os originais. Com relação a esta temática a Carta de Veneza (1964) cita:

[...] **Art. 10** – Quando as técnicas tradicionais se revelarem inadequadas, a consolidação de um monumento pode ser efetuada através do recurso a outras técnicas

modernas de conservação ou de construção, cuja eficácia tenha sido demonstrada cientificamente e garantida através da experiência de uso (Carta de Veneza, IPHAN, 1964, p.2).

As anomalias construtivas podem ter origem no comportamento do material ou podem ser decorrentes da concepção. Da mesma forma, existem técnicas de reforço que são mais indicadas para a consolidação do material, e outras para melhorar o funcionamento global da estrutura, muito embora reforços realizados na consolidação dos materiais possam ter impacto positivo na melhoria do funcionamento estrutural (AZEVEDO, 2010).

Para danos inerentes aos materiais (entende-se materiais como pedras, blocos, argamassa ou alvenaria no seu conjunto) como, por exemplo, degradação ou pouca resistência a esforços de compressão, em parte associada à porcentagem de vazios na argamassa e à fraca capacidade de agregar-se aos elementos construtivos, deve-se adotar técnicas que atuem na melhoria das suas propriedades. Como exemplo, pode-se ser empregada a técnica de injeção (de caldas) ou a substituição de elementos.

Em falhas inerentes ao comportamento estrutural, provenientes de uma má concepção, como por exemplo, a microfissuração associada à dilatação transversal por excesso de carga, podem ser adotadas técnicas que reduzam as tensões e exerçam simultaneamente efeito de confinamento, proporcionando melhor comportamento em serviço.

Dentre as técnicas mais comuns na área de reabilitação e reforço estrutural de paredes antigas de alvenaria, tema deste trabalho, Roque (2002) destaca:

- Injeção;
- Substituição dos elementos degradados;
- Rebocos armados;
- Encamisamento (*jacketing*);
- Pregagens;
- Substituição das juntas;
- Reforço com materiais compósitos FRP (*Fiber Reinforced Polymer*);
- Pré-esforço.

Diversas pesquisas sobre técnicas de reforço têm sido realizadas para enriquecimento da área de reabilitação. Como exemplo, Oliveira (2001) pesquisou sobre o uso de revestimentos resistentes de argamassa de cimento e areia na reabilitação de paredes de alvenaria, quando solicitados à compressão axial, compressão axial e flexão de painéis. Campos (2006) apresentou seu trabalho sobre técnicas de recuperação e reforço estrutural com estruturas de aço, com a finalidade de apresentar as diversas possibilidades e vantagens do uso das

estruturas de aço em reformas, restaurações e reforço de estruturas existentes construídas, inicialmente, com diversos tipos de materiais.

Como objetivo maior, as pesquisas desenvolvidas nesta área procuram, principalmente, testar novos materiais, quantificando suas características no que diz respeito à compatibilidade, viabilidade econômica, atendimento as exigências mecânicas e durabilidade.

### 2.3.1. CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIA POR INJEÇÃO

A técnica de consolidação de alvenarias por injeção consiste na introdução de caldas (cimentícia, hidráulica ou de resinas orgânicas), através de furos previamente realizados nas paredes. Sua principal funcionalidade é o preenchimento de vazios interiores e/ou selagem de fissuras, alterando as características físicas e mecânicas do material da alvenaria.

De acordo com Roque (2002), esta técnica apresenta maior sucesso em alvenarias com um índice de vazios compreendido entre os 2% e 15%. Para alvenarias fora deste limite à injeção não é aplicável ou é pouco eficaz, havendo a necessidade de recorrer a técnicas combinadas ou alternativas.

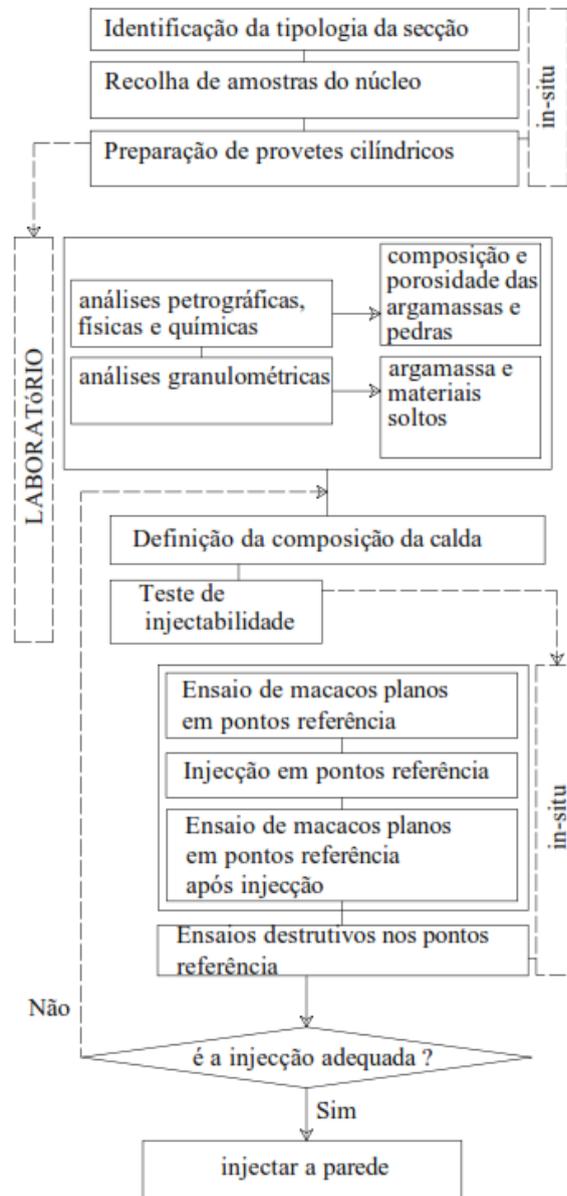
Dentre as características desejáveis para as técnicas de reforço, a injeção não contempla o item reversibilidade uma vez que aplicada a calda nos furos torna-se inviável a retirada do material. Entretanto, esta solução preserva o aspecto original das paredes sendo comumente adotada em edifícios com reconhecido valor artístico e/ou arquitetônico.

Existem diferentes tipos de injeção, classificados de acordo com o processo utilizado para injeção da calda. Assim, podem-se utilizar os seguintes métodos:

- Injeção sob pressão – utilizada em alvenarias, degradadas ou não, desde que suporte a pressão necessária para injeção da calda;
- Injeção por gravidade – usada em paredes fortemente degradadas;
- Injeção sob vácuo – indicada para o reforço de pequenos elementos arquitetônicos com requisitos de caldas muito fluídas.

O processo de injeção é escolhido a partir das condições e tipo de dano da parede. É recomendável que, antes da decisão de intervir com a técnica de injeção, seja realizado um conjunto de procedimentos experimentais, *in situ* e em laboratórios para averiguar a adequabilidade à alvenaria, quer em termos de eficácia, quer em exequibilidade (ROQUE, 2002; AZEVEDO, 2010). A Figura 25 apresenta um esquema de avaliação da adequabilidade da técnica de injeção com a alvenaria.

Figura 25 - Procedimentos para avaliação da adequabilidade da injeção.



Fonte: Laefer *et al apud* Roque (2002, p.55)

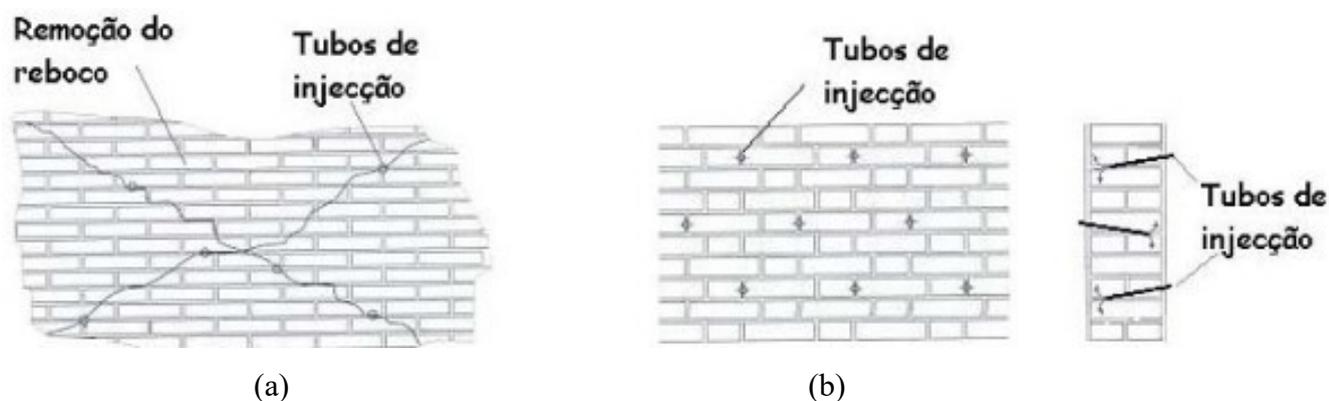
A execução desta técnica compreende as seguintes fases:

- Remoção do reboco ou revestimentos existentes para análise do estado da alvenaria (Figura 26-a);
- Limpeza da parede com água, de forma a eliminar eventuais substâncias solúveis ou outras substâncias insolúveis. A lavagem pode ser efetuada com jato de água de baixa ou alta pressão ou com vapor d'água com temperaturas entre 150°C a 200°C e pressão de 5 a 10 atm;
- Substituição de juntas e selagem de fissuras com um selante ou calda compatível com a posterior aplicada na injeção.

O processo de injeção compreende as seguintes fases:

- Posicionamento e execução dos furos de injeção;
- Realização dos furos nas juntas de argamassa com uma profundidade adequada entre  $2/3$  e  $3/4$  da espessura e ligeira inclinação para baixo (Figura 26 b). A norma italiana *Circolare 30 Luglio* (1981) recomenda executar 2 a 3 furos por metro quadrado, com distância entre furos de 25 cm. Em paredes de grande espessura (70 a 80 cm), deve-se considerar a possibilidade de intervenção nos dois lados da parede;
- Colocação dos tubos de injeção nos respectivos furos e procede-se à sua fixação com ligantes de presa rápida para evitar a fuga da calda durante a operação de injeção (Figura 27). Os tubos devem ser de plástico ou alumínio com diâmetros da ordem de 15 a 20 mm. A profundidade dos tubos é, em geral, de 15 a 20 cm (depende da finalidade da intervenção) e o comprimento exterior ao paramento, deve ser de, pelo menos, 10 cm.
- Lavar ou molhar o interior dos vazios introduzindo água pelos tubos de adução;
- Injetar a calda com pressões baixas entre 0,15 e 0,3 MPa (limite máximo cerca de 3 atm). Quando a parede aparentar que não comporta mais calda, a pressão poderá ser aumentada para 4 atm, com o objetivo de promover a drenagem da água existente.

Figura 26 - Injeção de alvenarias: a) selagem de fissuras; b) consolidação do material.



Fonte: Roque (2002, p.56)

Figura 27 - Preparação de uma parede de alvenaria para injeção. Selagem de juntas e fissuras e colocação de tubos de injeção.



Fonte: Hill *et al apud* Roque (2002, p.58)

Quanto ao material de preenchimento, a calda, este depende do tamanho das fissuras ou das aberturas existentes. Os requisitos para a calda de injeção são:

- Reológicos – refere-se a capacidade de penetração, fluidez, ausência de segregações e exsudação mínima;
- Químicos – estabilidade de características químicas, resistência aos sais de sulfato e baixo teor de álcalis;
- Físicos – garantia de tempo para execução, baixa retração e propriedades higroscópicas (estabilidade dimensional em presença de humidade, insolubilidade em água e conservação das características de absorção da parede);
- Mecânicos – resistência à rigidez idênticas às da argamassa original;
- Térmicos – baixo calor de hidratação para evitar desenvolvimento de gradientes térmicos.

### 2.3.2. SUBSTITUIÇÃO DE ELEMENTOS DEGRADADOS

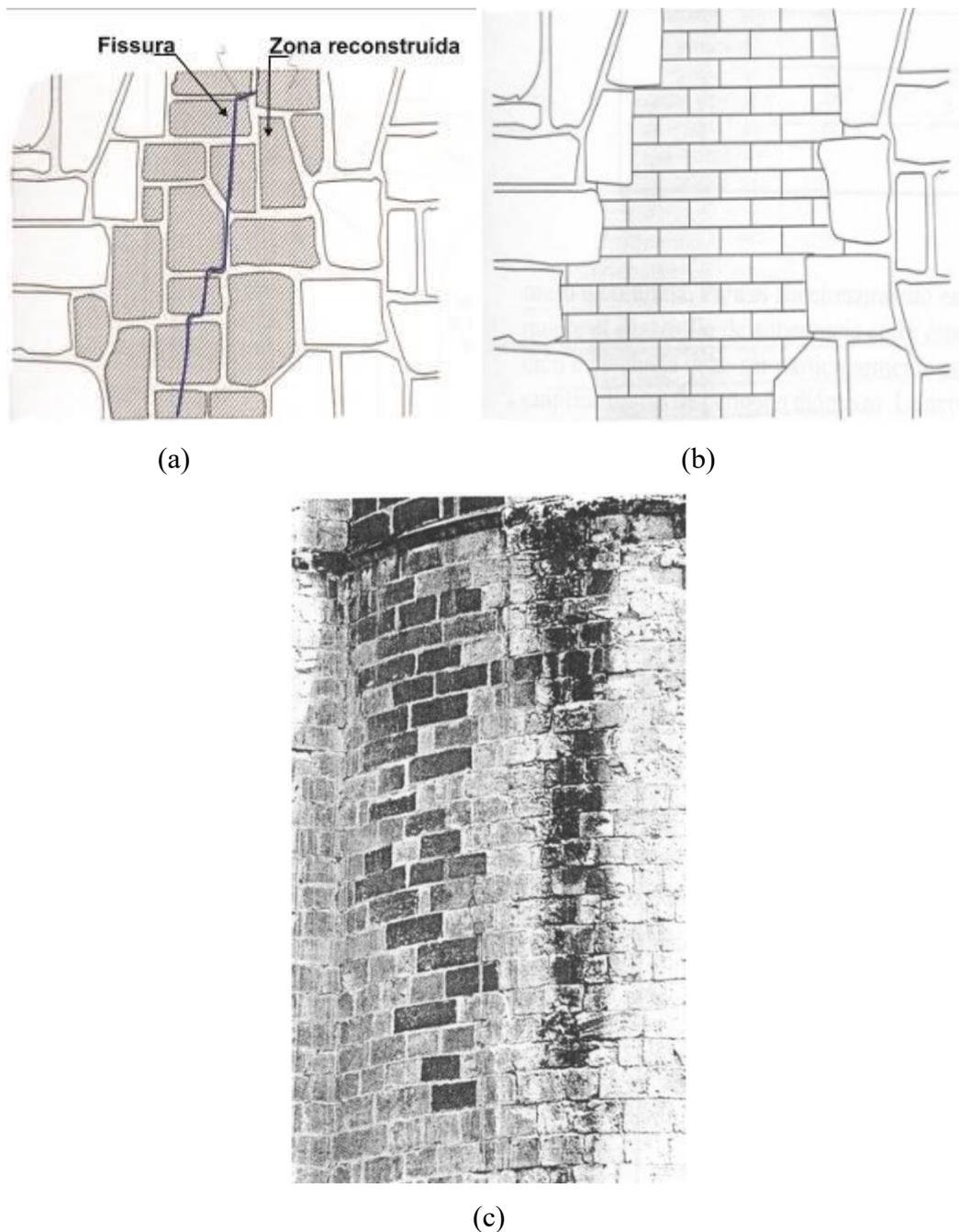
A substituição de parte da parede é efetuada mediante cuidadosa ação de desmontagem e montagem, utilizando os materiais originais, com melhor qualidade construtiva e ligada por argamassas pouco retráteis como, por exemplo, as de cal e areia ou de cimento, cal e areia (APPLETON *apud* ROQUE, 2002). É uma técnica aplicada na reparação de degradação localizada, a exemplificar, uma superfície adjacente a uma fissura (Figura 28).

Do ponto de vista estrutural, estas operações não agregam grandes problemas, mas requerem cautela na operação de construção no âmbito de numerar as peças e reposicioná-las exatamente no local de origem (ROQUE, 2002).

A execução desta técnica engloba os seguintes procedimentos:

- Escoramento da estrutura em volta da zona que envolve o elemento em reconstrução até o término dos trabalhos e a estrutura esteja apta a suportar novamente os carregamentos impostos;
- Numeração das peças para posterior colocação no mesmo lugar.

Figura 28 - Exemplos de substituição e reconstrução: a) com os mesmos materiais; b) com materiais diferentes; c) aspecto de uma estrutura de alvenaria reparada.



Fonte: Adaptado de Meli *apud* Roque (2002, p.84)

### 2.3.3. REBOCO ARMADO

Os rebocos armados consistem-se na colocação de armadura de reforço, podendo ser utilizada malha eletrosoldada, rede de fibra de vidro, rede de metal, entre outros, fixada à parede, revestidas por argamassa de revestimento à base de ligantes aéreos e hidráulicos. Pode ser aplicado em um ou em ambos os lados da parede, com a armadura ligada, ou não, transversalmente.

O efeito dos rebocos armados reflete-se no aumento da resistência superficial à tração e ao corte das paredes, bem como no controle da expansão de trincas e, em alguns casos, na melhoria da continuidade da ligação entre elementos (ROQUE, 2002).

Oliveira (2001) destaca que um dos problemas mais questionáveis do uso da argamassa armada com telas de metal é a sua pequena espessura podendo, com isso, propiciar corrosão nas armaduras. Tal fato deve-se à falta de cobrimento adequado quando se compara a argamassa armada com o concreto.

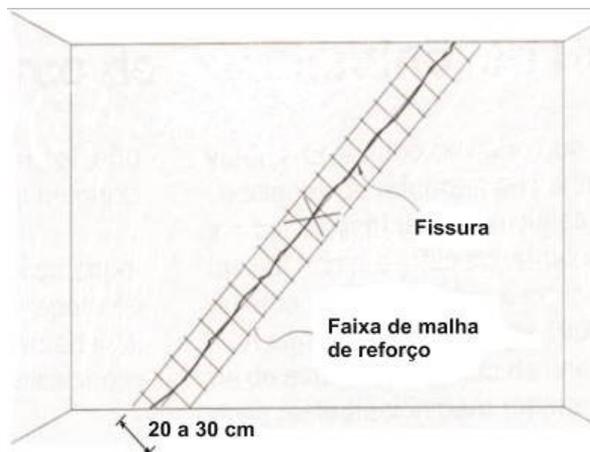
Para a execução desta técnica, procede-se com as seguintes atividades:

- Remoção do reboco antigo até às juntas de argamassa, deixando a parede livre de materiais soltos, pois estes impediriam a ligação do novo reboco à parede;
- Lavagem da superfície com água sob baixa pressão;
- Fixação da armadura na alvenaria mediante a utilização de grampos;
- Recobrimento com nova argamassa.

A fixação da malha é feita por pequenos grampos (diâmetros de 1,5 a 2,5 mm) espaçados, de tal maneira a formar uma malha de triângulos equiláteros, com 20 a 40 cm de lado. As argamassas usadas podem ser de natureza inorgânica (cimentícias tradicionais), sintéticas ou mistas. Por razões relacionadas à compatibilidade e à reversibilidade, o uso de argamassas cimentícias e sintéticas deve ser evitado (ROQUE, 2002; AZEVEDO, 2010).

A Figura 29 apresenta um esquema de reparação de trinca localizada com a utilização de reboco armado com malha de aço e a Figura 30 mostra parte dos ensaios realizados por Oliveira (2001) no desenvolvimento da sua pesquisa na reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada.

Figura 29 - Reparação de fissura localizada com reboco armado com malha de aço eletrosoldada.



Fonte: Adaptado de Meli *apud* Roque (2002, p.108)

Figura 30 - Aplicação de tela metálica em alvenaria para realização de ensaio laboratorial.



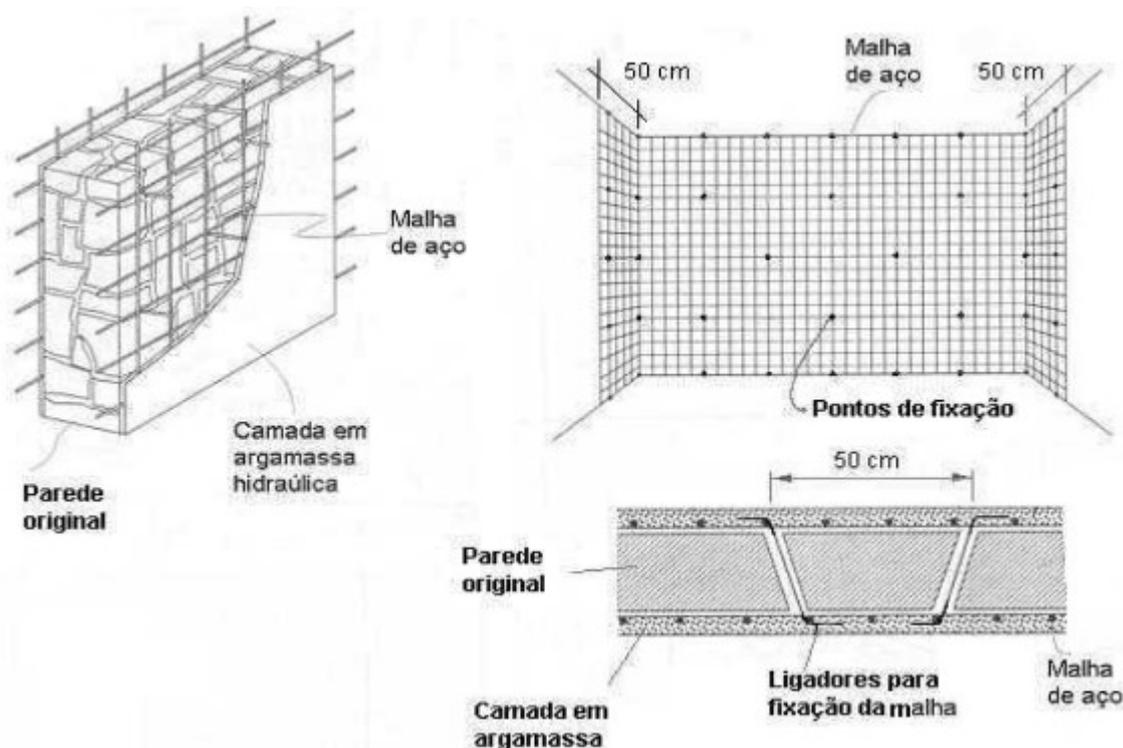
Fonte: Oliveira (2001, p.48)

### 2.3.4. ENCAMISAMENTO (*JACKETING*)

A técnica de encamisamento, também conhecido por *jacketing* (referente à designação inglesa para a ação de recobrir), consiste na aplicação em um ou em ambos os lados da parede,

de uma camada de concreto com espessura variando entre 5 e 10 cm, reforçado com malha de aço e fixada à parede através de grampos. Este procedimento possui processo de execução semelhante ao do reboco armado com principal diferença no tipo de material que é utilizado no reboco (Figura 31). Consegue-se, assim, um revestimento de maior espessura, comparado ao reboco tradicional e, sobretudo, com melhores características mecânicas, apresentando resistência ao cisalhamento superior aos rebocos armados (ROQUE, 2002; AZEVEDO, 2010).

Figura 31 - Aspectos construtivos do encamisamento armado com malha de aço eletrosoldada.



Fonte: Meli *apud* Roque (2002, p.110)

O encamisamento é indicado para reforço de alvenarias muito irregulares, com mistura de diferentes materiais ou restos de materiais, argamassas muito deterioradas e fraca ligação dos materiais, que não possam ou que dificilmente possam ser reforçadas com técnicas menos intrusivas.

A aplicação deste tipo de reforço nas paredes é dificultada pela execução das ligações transversais, uma vez que perfurar as alvenarias é uma atividade complexa, perdendo-se, assim alguma eficiência do método (AZEVEDO, 2010). A eficiência depende da ação de confinamento induzida pelas novas camadas de concreto na parede antiga, responsável pela fixação da armadura, papel muito importante no desempenho global da solução (ROQUE, 2002).

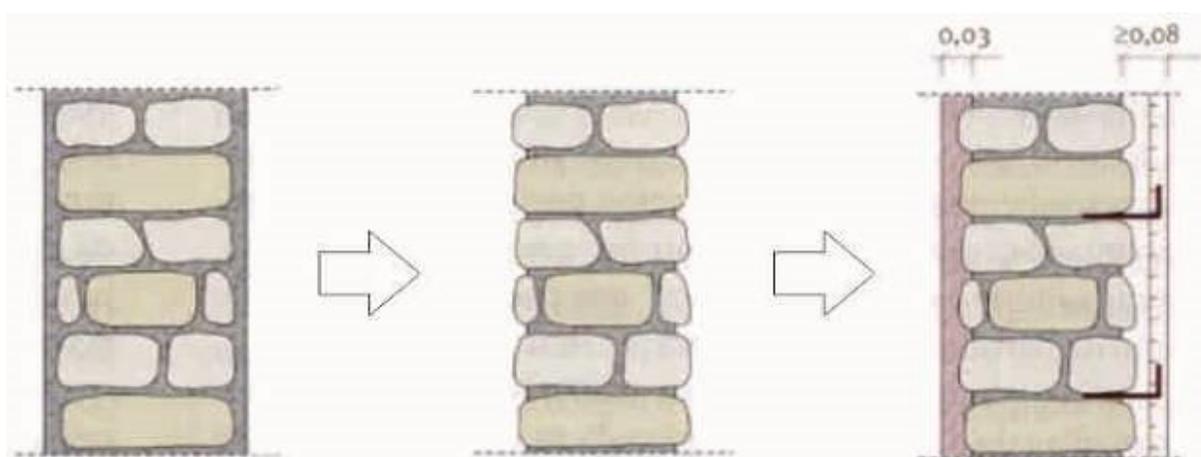
Do ponto de vista mecânico, o encamisamento não só melhora a ligação entre as paredes, como também conduz a um acréscimo da rigidez axial e transversal da parede original e da

sua resistência à compressão.

A execução desta técnica envolve os seguintes procedimentos (Figura 32):

- Retirada total dos rebocos velhos até a exposição das juntas de argamassa, de modo a permitir que a parede esteja isenta de pedaços soltos de argamassa ou de pequenas pedras soltas;
- Selagem de fissuras e vazios com injeção de caldas de cimento ou resinas;
- Realização de furos uniformemente distribuídos e com dimensões adequadas, para fixação dos grampos;
- Lavagem da superfície com água sob baixa pressão;
- Colocação de malha de reforço;
- Aplicação de camada de concreto para revestimento com espessura adequada (entre 5 e 10 cm).

Figura 32 - Esquema da aplicação da técnica de encamisamento.



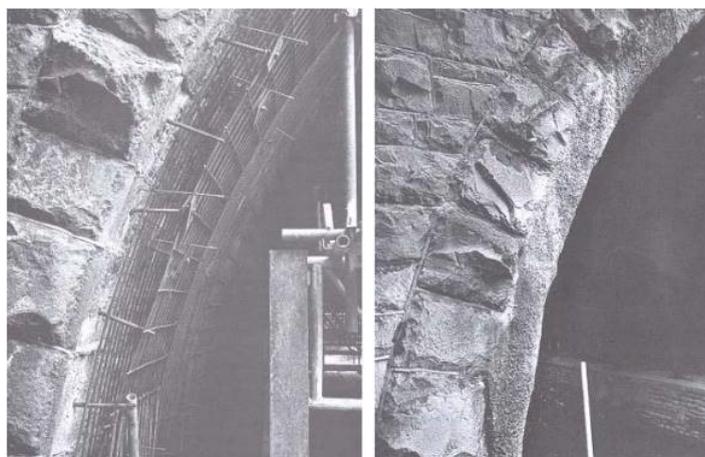
Fonte: Adaptado de Azevedo (2010, p.47)

Gomes e Appleton (1997) destacam que os materiais para a execução do encamisamento devem possuir as seguintes características: elevada resistência à compressão, boa aderência, boa trabalhabilidade associada à facilidade de colocação em espaços de difícil acesso, pequena retração e compatibilidade em termos de deformabilidade com o material original. A seguir, apresentam-se figuras da aplicação de encamisamento em concreto armado no reforço do interior de um túnel em alvenaria de pedra (Figura 33).

Figura 33 - Aplicação de encamisamento com concreto armado em um túnel: a) Aspecto da execução com projeção da argamassa; b) Disposição e fixação das armaduras de reforço; c) Aspecto final da intervenção.



(a)



(b)

(c)

Fonte: Hill *et al apud* Roque (2002, p.114)

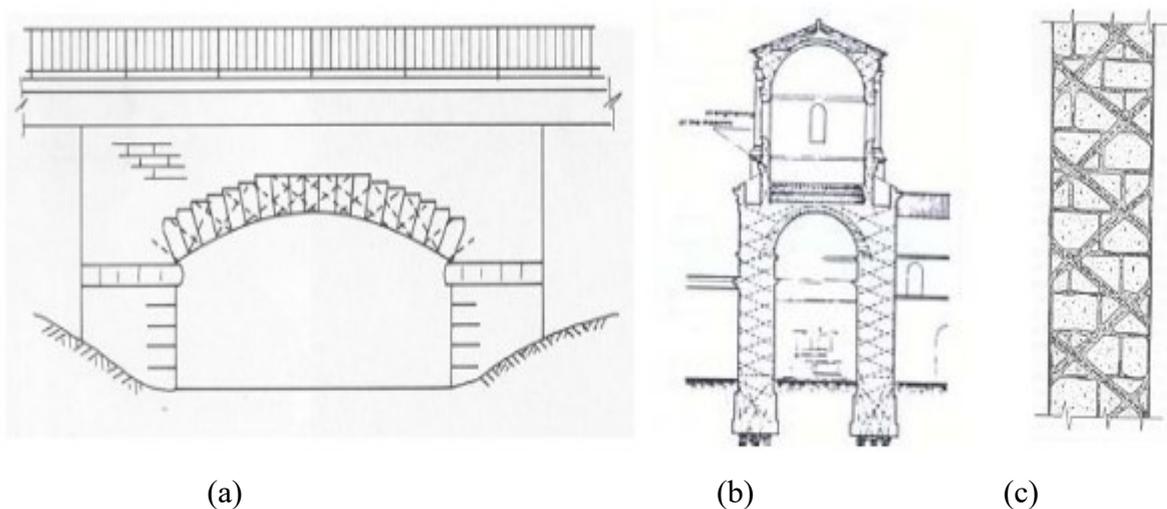
### 2.3.5. PREGAGENS

Entende-se como pregagens a utilização de uma solução mecânica para reforçar ou promover a ligação entre elementos cooperantes. Esta técnica foi desenvolvida na Itália, após a II Guerra Mundial, com o intuito de reforçar e reabilitar estruturas antigas de alvenaria. Consiste na colocação de barras de aço inoxidável em furos de pequeno diâmetro, previamente abertos, que atravessem os elementos a serem reforçados. Após o posicionamento dos reforços, os furos são selados com caldas de injeção. Existem pregagens com características distintas, a saber, descritas a seguir:

- Pregagens generalizadas;

De acordo com Roque (2002), a utilização deste procedimento pode modificar substancialmente as propriedades mecânicas da alvenaria tornando-a um material semelhante ao concreto armado, capaz de resistir a esforços de tração e esforços cisalhantes. Além disso, há um aumento significativo da resistência à compressão. Os reforços são, geralmente, barras de aço dispostas em direções cruzadas, formando uma malha tridimensional interior à alvenaria. A Figura 34 traz exemplos da aplicação de pregagens generalizadas em elementos estruturais.

Figura 34 - Exemplos da aplicação de pregagens em elementos estruturais: a) arco de uma ponte; b) e c) reforço em paredes (seção transversal).



Fonte: Roque (2002, p. 65)

- Pregagens “costura”;

Utilizadas para assegurar a resistência à tração em zonas críticas ou para a ligação de paredes perpendiculares entre si (Figura 35), funcionando, tal como o nome indica, como uma autêntica “costura” (AZEVEDO, 2010).

Figura 35 - Exemplos da ligação entre paredes com pregagens em direções cruzadas.

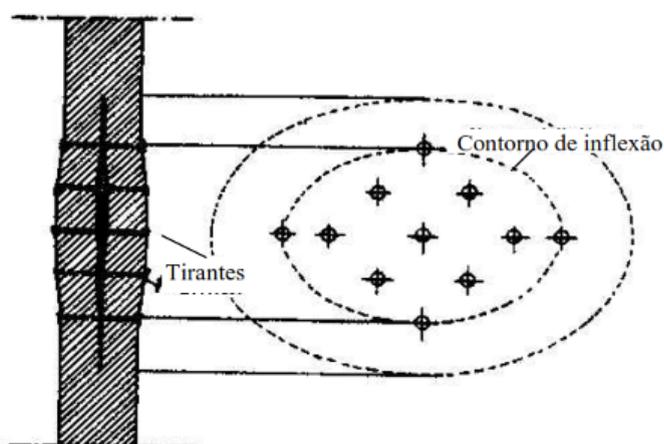


Fonte: Roque (2002, p.66)

- Pregagens transversais;

A sua finalidade é confinar a seção transversal das paredes, especialmente paredes compostas, promovendo a sua integridade estrutural através da ligação entre os paramentos. A sua aplicação reduz as possibilidades de situação instável e controla a dilatação transversal da parede, sob ação de cargas verticais (Figura 36). Como procedimento são distribuídos tirantes em aço transversais à parede, com tratamento anticorrosivo e dotados, nas extremidades, de dispositivos que permitem a amarração nas faces exteriores do paramento.

Figura 36 - Distribuição localizada de tirantes transversais à seção da parede.



Fonte: Roque (2002, p.68)

Para a execução desta técnica, seguem-se os seguintes procedimentos:

- Remoção do reboco ou do revestimento antigo com o objetivo de analisar o estado da alvenaria;
- Limpeza da parede com água, a fim de eliminar eventuais substâncias solúveis ou insolúveis. A lavagem pode ser realizada com jato de água, de baixa ou alta

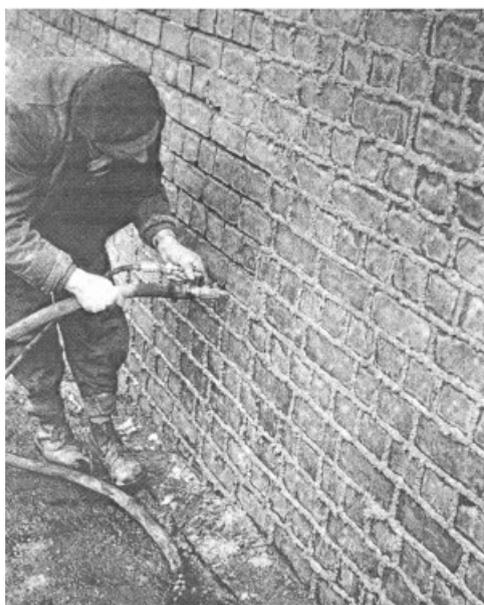
pressão (tomando-se as devidas precauções) ou com jato de vapor d'água a temperatura de 150°C a 200°C;

- Selagem das fissuras com selante compatível com a calda de cimento utilizada no último passo desta execução;
- Posicionamento e execução dos furos de injeção, que deve ser realizados nas juntas de argamassa de modo a atravessar toda a espessura da parede com inclinação aproximada de 45° (Figura 2.32 c);
- Inserção das barras de reforço e injeção da calda de cimento para fixação das barras.

### 2.3.6. SUBSTITUIÇÃO DAS JUNTAS

A técnica de substituição de juntas tem como objetivo restaurar as condições de integridade de argamassas degradadas nas juntas e assim melhorar as características mecânicas e de proteção da parede (Figura 37). Uma de suas variantes é o substituição de juntas por substituição da argamassa com armadura.

Figura 37 - Operação de substituição da argamassa das juntas em uma parede de alvenaria de blocos.



Fonte: Roque (2002, p. 86)

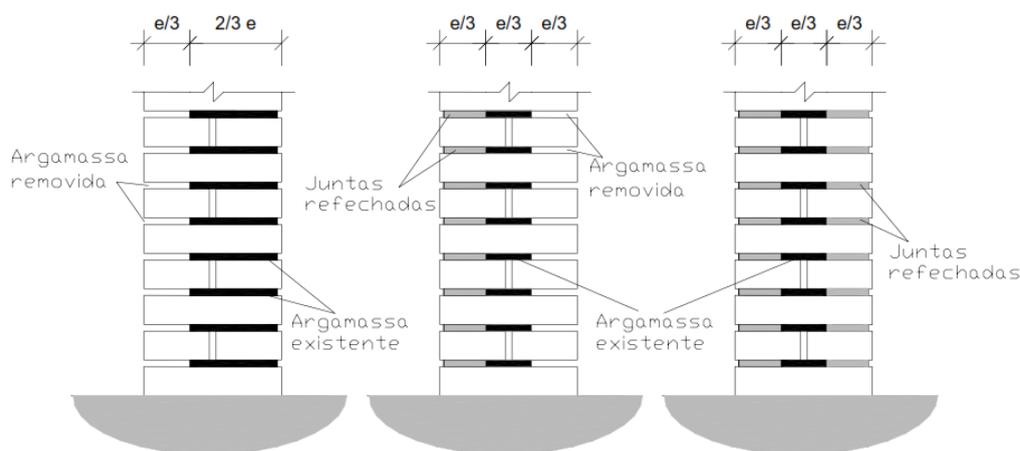
Para execução deste procedimento são necessárias as seguintes operações:

- Remoção parcial e limpeza da argamassa das juntas em profundidade de 5 a 7 cm. Se a intervenção é planejada para acontecer em ambas as faces da parede, a profundidade máxima de argamassa a ser removida deve ser cerca de 1/3 da

espessura total. Nestes casos, a favor da segurança, as juntas com argamassa removida devem ser preenchidas antes de se iniciar a remoção da face oposta (Figura 38);

- Lavagem das juntas com água sob baixa pressão;
- Reposição das juntas mediante cuidadoso preenchimento, com várias camadas de argamassa, desde a zona mais profunda das ranhuras abertas. A eficácia desta intervenção depende da compactação das camadas de argamassa.

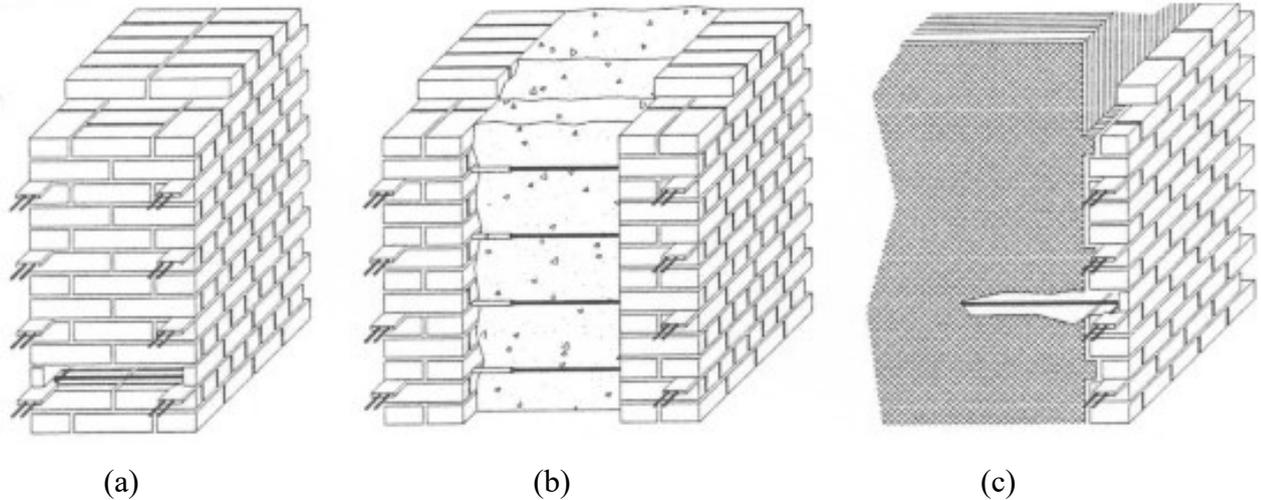
Figura 38 – Profundidade das ranhuras abertas nas juntas quando se atua de um ou de ambos os lados da parede.



Fonte: Tomazevic *apud* Roque (2002, p. 87)

A variante, citada anteriormente, é a substituição das juntas combinado com uma armadura. Esta técnica consiste na remoção parcial da argamassa das juntas e na colocação de reforço. Em paredes de grande espessura, a eficácia desta solução pode ser melhorada aplicando-a em ambos os lados, com ligação por pregagens transversais, como mostrado anteriormente. Pelas suas particularidades é, essencialmente, adequada para alvenarias de juntas regulares como é o caso das paredes de tijolos cerâmicos (ROQUE, 2002). A Figura 39 apresenta exemplos da aplicação da substituição de juntas com armadura.

Figura 39 - Exemplos de aplicação da substituição de juntas com armadura, combinado com pregagens transversais, em diferentes tipologias de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico: a) Parede de paramento simples; b) Parede composta com paramentos exteriores resistentes; c) Paredes composta com paramento resistente exterior.

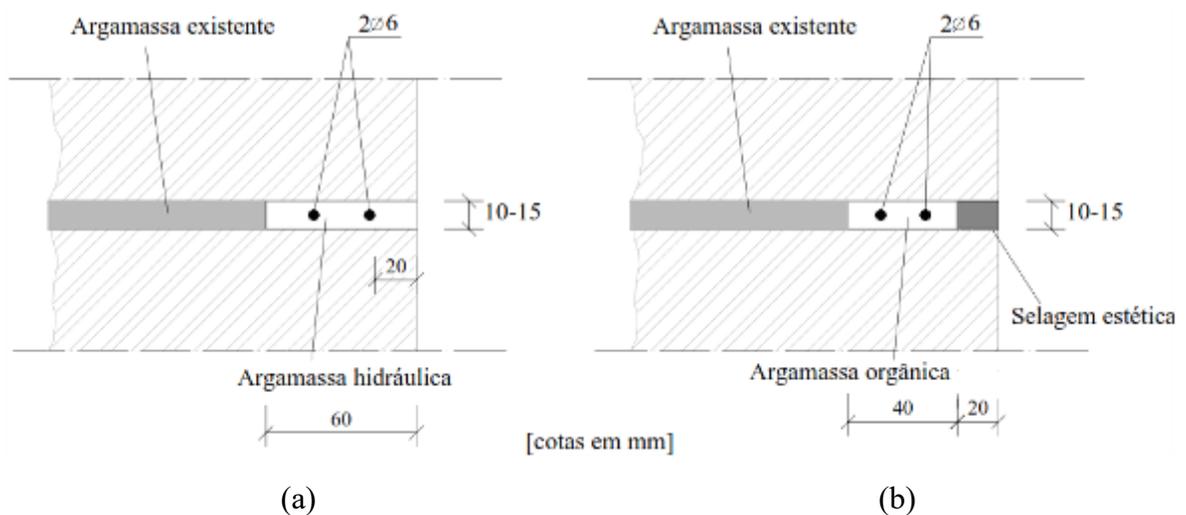


Fonte: Binda *apud* Roque (2002, p. 88)

Segundo Roque (2002), os materiais mais utilizados, conforme as suas funções são:

- Materiais para reforço: barras de aço (preferencialmente aquelas com propriedades inoxidáveis, para garantir durabilidade do material) ou materiais compósitos de matriz polimérica (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), em laminados ou em barras;
- Materiais para enchimento das juntas removidas: argamassa de cal hidráulica, argamassa hidráulica aditivada ou, ocasionalmente, resinas orgânicas para selagem ou acabamento estético (Figura 40).

Figura 40 - Esquema da substituição de juntas com armadura e diferentes materiais de enchimento: a) Argamassa de cal hidráulica; b) argamassa sintética com selagem exterior.



Fonte: Binda *apud* Roque (2002, p. 90)

### 2.3.7. REFORÇO COM MATERIAIS COMPÓSITOS FRP (*FIBER REINFORCED POLYMER*)

Com suas primeiras aplicações datando o início da década de 1940 em indústrias de ponta como na aviação, militar e espacial, logo se tornou uma técnica promissora, com potencial aplicação em inúmeras indústrias, inclusive a da construção civil.

Na engenharia civil, os compósitos FRP começaram a ser utilizados, com grande sucesso, no reforço de estruturas de concreto armado, incentivando dessa maneira pesquisas sobre a sua potencial aplicação também em estruturas de alvenaria. Como exemplo da eficácia da sua utilização, Beber (2003) analisou o comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono onde, através de ensaios, constatou a elevação na resistência das vigas com ganhos de até 78,9% em relação às vigas de controle.

Os FRP são constituídos por dois componentes:

- Matriz: elemento responsável pela transmissão da resistência das fibras para o suporte. Os materiais mais utilizados para tal finalidade incluem resinas epóxis, poliéster e acrílicas.
- Fibras de reforço: Responsáveis pela resistência e rigidez axial do reforço.

Segundo Taylor (1994), a razão principal para reforçar com compósitos de fibras e polímeros é aumentar a sua rigidez do elemento estrutural, embora ao empregar-se estes elementos, aumenta-se, também, a resistência à tração, à compressão e ao impacto, além de melhorar a resistência aos ciclos repetidos de tensão ou deformação ao qual as estruturas estão sujeitas.

Devido às opções de materiais que podem ser aplicados como reforço, os compósitos FRP recebem designações próprias conforme a fibra utilizada. Os compósitos mais comuns são com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), fibras de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) e fibras de aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*).

As propriedades dos compósitos dependem diretamente da fibra, da matriz, da proporção de cada uma delas e da orientação das fibras. Uma das mais importantes características do reforço, atrelado ao processo de fabricação, é a orientação das fibras, que têm grande influência nas propriedades mecânicas, altamente anisotrópicas, dos compósitos FRP (ROQUE, 2002). As fibras podem ser orientadas em qualquer direção para melhorar a resistência e rigidez. Dessa forma, a orientação nas direções em que ocorrem os esforços (ou a necessidade de reabilitação) é crucial para o melhor aproveitamento da técnica. Conforme Hollaway e Leeming (1999) existe grande variedade de configurações para a orientação das

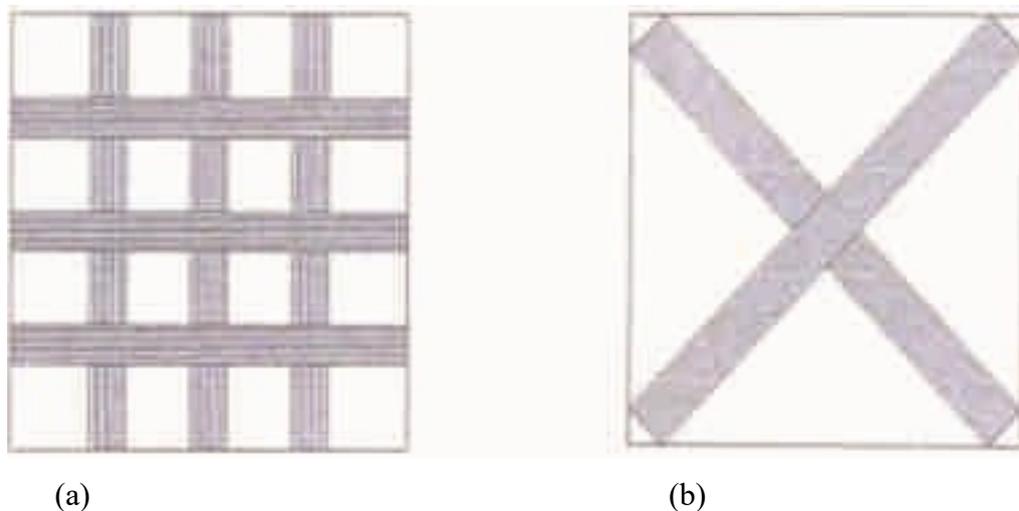
fibras, que podem ser separadas em três grandes grupos:

- 1) Unidirecional: todas as fibras alinhadas em uma única direção;
- 2) Bidirecional: as fibras estão alinhadas perpendicularmente em duas direções;
- 3) Aleatória: distribuídas aleatoriamente nas várias direções em um mesmo plano.

Para a aplicação desta técnica, podem ser utilizadas fibras em forma de mantas ou telas, em laminados, em barras e, para algumas utilizações, em fibras soltas. As **mantas** ou **telas** são resultados da associação de fibras orientadas e entrelaçadas em duas direções ortogonais. As primeiras podem ser aplicadas no recobrimento completo da superfície da parede, tipo generalizado, ou aplicado localmente nas zonas mais susceptíveis a danos (ROQUE, 2002).

As tiras são o resultado da associação de fibras dispostas unidirecionalmente, com a vantagem de serem posicionadas de tal forma a se ajustar às características específicas de cada intervenção. Podem ser dispostas em grelhas, entre outros arranjos distintos (Figura 41). Para o arranjo em grelha, as tiras podem ser posicionadas paralelamente, ou não, aos lados da parede.

Figura 41 - Diferentes disposições de fitas de FRP em intervenções de reforço: a) Em grelha ortogonal; b) Em diagonal.



Fonte: Roque (2002, p. 95)

Os laminados são tiras pré-impregnadas com resinas epoxídicas. A sua aplicação restringe-se a superfícies planas ou com pequenas curvaturas, e elementos sem arestas, já que a pré-impregnação lhes proporciona menor flexibilidade.

As barras são resultantes de fibras pré-impregnadas (normalmente CFRP). São aplicadas num processo análogo ao substituição de juntas com armadura, em que as barras são inseridas em ranhuras, previamente efetuadas nas juntas de argamassa da alvenaria, e depois revestidas por argamassa de substituição.

A escolha do tipo de fibra a ser utilizado depende dos objetivos que o reforço deve

atender, bem como, de aspectos relacionados com a durabilidade. Desta forma, o comportamento tensão-deformação do compósito influencia diretamente na seleção das fibras. As Tabelas 2 e 3 resumem as principais propriedades das fibras mais utilizadas em compósitos FRP.

Tabela 2 - Propriedades típicas de algumas fibras.

<b>Propriedade</b>	<b>Vidro- E</b>	<b>Aramida (A) Kevlar 49™</b>	<b>Carbono de elevada resistência (HS)</b>	<b>Carbono de elevado módulo (HM)</b>	<b>Aço CA-50</b>
Resistência à Tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação na ruptura (%)	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento) 6 (ruptura)
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	25,6	14,4	18	19	78,5
Coeficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5,0	-2 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	+12 (longitudinal)
		+59 (transversal)	+17 (transversal)		
Custo da fibra (US\$/kg)	2	22	15 - 22	90	1

Fonte: Kendall *apud* Beber (2003, p. 27)

Tabela 3 - Propriedades das fibras mais usadas nos compósitos FRP.

Fibras		Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Carbono	Elevada resistência	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
	Elevado módulo	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
	Módulo muito elevado	2600 - 4020	540 - 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Vidro		2400 – 3500	70 – 85	3,5 – 4,7	2,6
Aramida		3200 - 3600	124 – 130	2,4	1,44

Fonte: Gettu *et al* *apud* Roque (2002, p. 96)

Roque (2002) afirma que as principais vantagens dos materiais compósitos FRP são:

- Elevada resistência: à tração, flexão e compressão, por volta de 20 vezes superiores ao aço convencional;
- Leveza: mais leve que o aço e o alumínio, com taxa de 20% e 50%, respectivamente, implicando assim menores custos de transporte e instalação;
- Elevada resistência à corrosão;
- Bom comportamento à fadiga: importante para o reforço sísmico;
- Facilidade de aplicação.

Quanto às desvantagens, o mesmo autor destaca:

- Elevado custo em comparação com o aço;
- Comportamento frágil;
- Fraca resistência aos raios ultravioleta;
- Durabilidade;
- Problemas de aderência;
- Pouca resistência ao fogo.

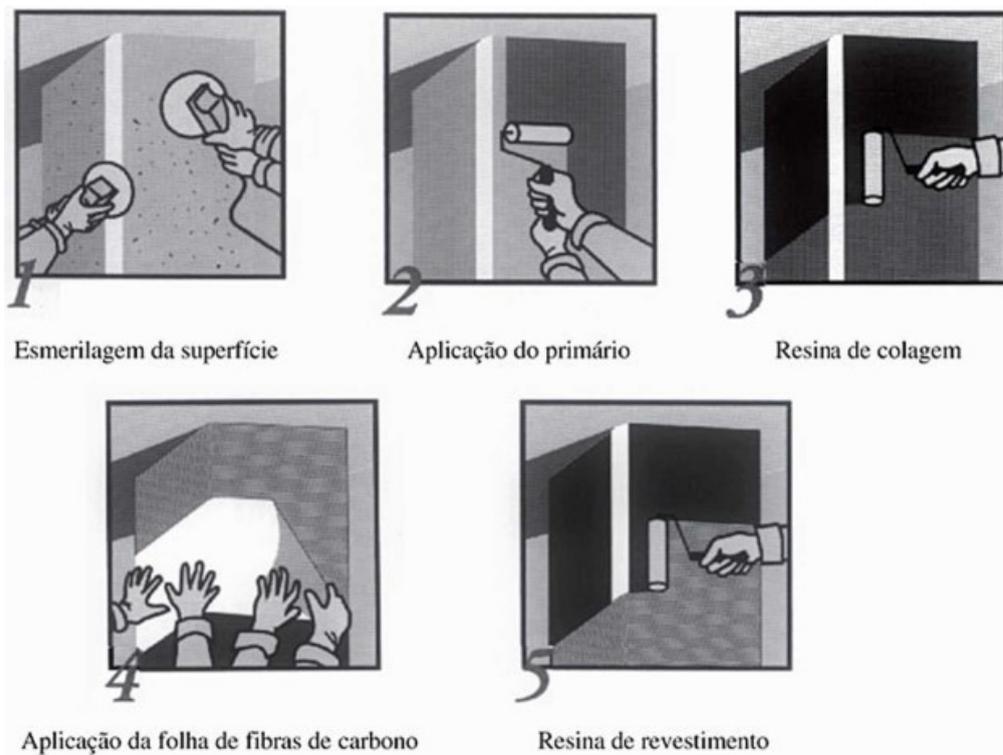
Pode-se dividir o processo de aplicação em duas etapas distintas: a de preparação da superfície receptora e a de aplicação do compósito propriamente dito. Para execução desta técnica devem ser realizados os seguintes procedimentos:

- Remover o reboco;

- Remover os materiais desagregados aparentes e efetuar a substituição destes elementos;
- Arredondar as arestas das paredes com raio de curvatura aproximadamente de 3 cm de modo a evitar a concentração de tensões e, conseqüentemente, uma ruptura da manta;
- Limpar superficialmente a alvenaria;
- Aplicar uma resina epoxídica (*primer* ou primário) para assegurar uma superfície regular que promova uma boa adesão;
- Colocar a manta FRP sobre a superfície com a resina epóxi;
- Impregnar a superfície da manta com uma nova camada de cola epoxídica (garantia total da impregnação da manta);
- Aplicar uma última camada de resina que poderá ser polvilhada com areia, melhorando as características de aderência para eventuais revestimentos ou rebocos.

A Figura 42 mostra um esquema simplificado da aplicação de folhas flexíveis de fibras de carbono.

Figura 42 - Sistema de aplicação das folhas flexíveis de CFRP.



Fonte: Souza e Ripper (1998, p. 155)

### 2.3.8. PRÉ-ESFORÇO

A técnica de pré-esforço consiste na colocação de cabos de aço de alta resistência, aplicando um esforço de tração, de forma a introduzir na estrutura novo sistema de forças. A aplicação pode ser realizada tanto pelo interior como pelo exterior da edificação.

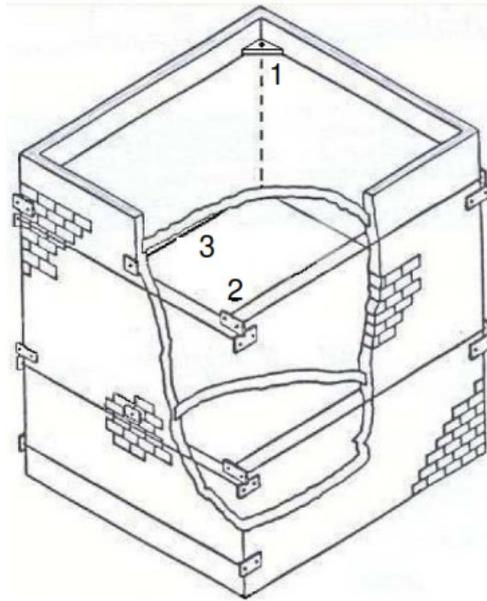
Este tipo de reforço pode ser utilizado para melhorar o comportamento das paredes, tanto para ações sob o próprio plano, mediante a compressão axial, elevando a resistência à tração e ao cisalhamento, quanto para ações fora do plano da parede, na ligação entre paredes melhorando o confinamento global da estrutura (AZEVEDO, 2010).

A compressão axial, induzida pela ação do pré-esforço, incrementa a resistência à tração das paredes. Conseqüentemente, o funcionamento estrutural, para cargas atuantes no próprio plano passa a apresentar condições para a mobilização de mecanismos de resistência e deformabilidade por cisalhamento. Além disso, há também aumento da resistência ao corte (Teoria de Coulomb). Para cargas fora do plano, os seus efeitos manifestam-se no melhoramento do comportamento à flexão, com o incremento do momento necessário para tracionar a seção (ROQUE, 2002).

Relativo ao comportamento em serviço percebe-se mudança no nível de controle da deformação e da fissuração, contribuindo, assim, para maior durabilidade das alvenarias. A melhoria do comportamento mecânico das paredes, isolada e integradas, reflete-se na consolidação global da estrutura, com funcionamento monolítico, maior ductilidade e resistência.

A aplicação desta técnica nos pavimentos e/ou coberturas, associada à realização de cintas exteriores e tirantes de ligação entre paredes, pode aprimorar consideravelmente o confinamento estrutural (Figura 43). Esta mudança no comportamento mecânico das paredes reflete-se na consolidação global da estrutura, melhorando as respectivas resistência e ductilidade (AZEVEDO, 2010).

Figura 43 - Esquema de reforço tipo de um edifício existente com soluções de pré-esforço: 1) Tirantes com efeito de compressão axial nas paredes com melhorias para a flexão global; 2) Utilização da técnica entre paredes ortogonais com efeito de confinamento no nível dos pavimentos; 3) Procedimento de intervenção no vão entre paredes opostas, com efeito de confinamento no nível dos pavimentos.



Fonte: Azevedo (2010, p. 42)

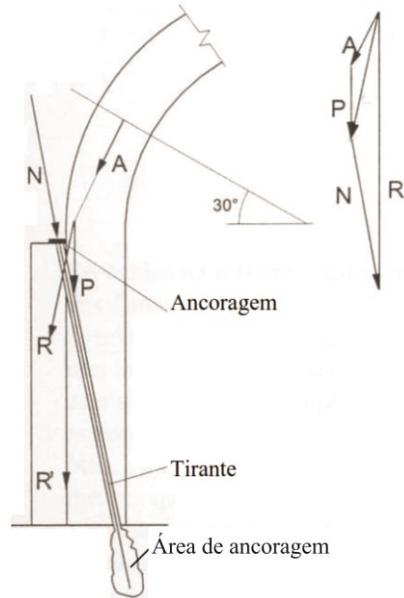
O pré-esforço é uma técnica reversível e, especialmente, importante para zonas sísmicas e que não introduz uma carga significativa de massa a estrutura. Dessa forma, constitui-se então, uma versátil técnica de reforço, com caráter provisório ou definitivo, com aplicação tanto a partes da estrutura como à sua globalidade (ROQUE, 2002).

A utilização desta técnica, perpendicular ao plano das paredes, como é o caso dos tirantes representado na Figura 43-(3), é condicionada pela resistência a punção das alvenarias, que de maneira geral é baixa.

Para aplicação de tirantes internos (Figura 44) é necessário executar os furos com maquinário de coroa diamantada, resfriada com água, coroa diamantada a seco ou a rotação por percussão. Os furos devem ter o dobro do diâmetro dos elementos de reforço e serem ajustados para reduzir a tensão de aderência no perímetro da calda. Feito isso, segue-se com as seguintes etapas:

- Insere-se o sistema de cabos de aço;
- Aplica-se a calda de injeção aguardando o tempo necessário para a completa cura;
- Efetua o pré-esforço.

Figura 44 - Ação do pré-esforço interno na compensação das forças de arcos e seus efeitos sobre as paredes.

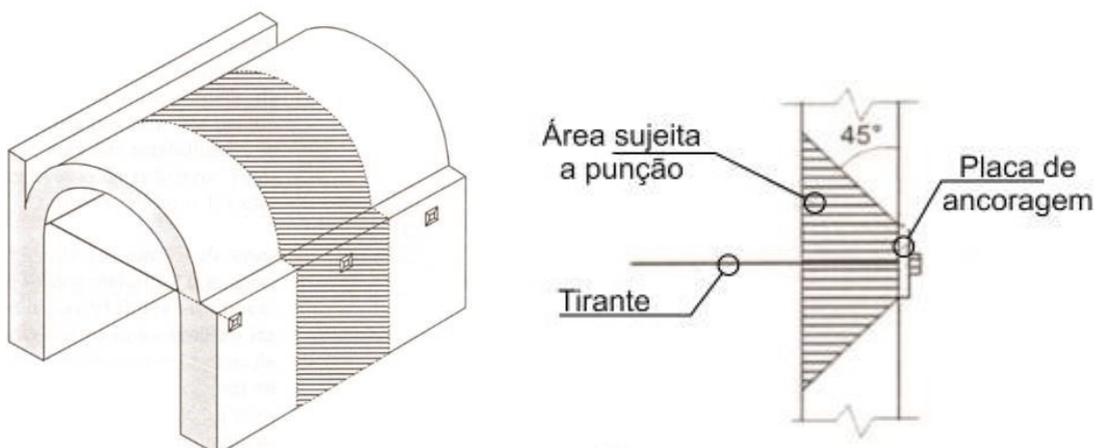


Fonte: Meli *apud* Roque (2002, p. 79)

A figura anterior mostra a ação do pré-esforço sobre as paredes. A incorporação do tirante na estrutura contribui no sistema de esforços atuantes, aumentando dessa forma, a intensidade da força resultante, esta última que, antes da presença do tirante, era resultado da soma vetorial entre a parcela fornecida pela compressão do arco mais o peso próprio da parede.

Para aplicação de tirantes externos (Figura 45), deve-se fazer com tirantes pares, instalados simetricamente em relação ao eixo da parede, com controle de forças, de modo a evitar compressões excêntricas não aceitáveis. Diferentemente da execução dos tirantes internos, os tirantes externos evitam o uso de equipamentos complexos de perfuração.

Figura 45 - Tirantes exteriores pré-esforçados.



Fonte: Meli *apud* Roque (2002, p. 80)

### 2.3.9. REFORÇO COM FIBRAS NATURAIS

Diante da extensiva utilização das fibras sintéticas, e a busca constante pela utilização de novos materiais na construção civil, as fibras naturais configuram uma excelente alternativa para aplicação em obras de reforço estrutural. As fibras provenientes da natureza possuem um apelo econômico interessante uma vez que muitas possuem um baixo custo de aquisição o que alinhado com suas propriedades mecânicas passaram a despertar a atenção de muitos pesquisadores.

Os estudos sobre a utilização de fibras de sisal como reforço de matrizes à base de cimento iniciaram na Suécia em 1971. Em 1978, pesquisadores produziram telhas corrugadas, sugerindo que compósitos com fibra de sisal poderiam ser utilizados na construção de casas de baixo custo (LIMA, 2004). Já no Brasil, as primeiras tentativas de uso de fibras naturais no concreto foram desenvolvidas pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, na Bahia, utilizando fibras de coco, sisal, bambu, piaçava e bagaço de cana-de-açúcar. Foram produzidas vigas e placas de concreto-fibra e fibrocimento, sendo observado que, dentre as fibras utilizadas, o sisal apresentou melhor desempenho (CEPED, 1982). Lima (2004) afirma que a partir da iniciação científica do CEPED, vários outros centros e pesquisadores deram partida nos seus estudos sobre o aproveitamento dos materiais vegetais na construção civil, como bambu, fibra de sisal e coco, e fibras e resíduos vegetais.

Silva (2011) estudou o comportamento mecânico de compósitos, obtidos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal e fibras de bananeira. Para isso, foram investigados a influência do tipo de fibra, a fração volumétrica (30% e 50%), a fração mássica de micropartículas de sílica (0%, 20% e 33%) e a fração mássica de anidrido maléico (0% e 2%). Os compósitos fabricados com fibras de sisal apresentaram maior resistência mecânica, enquanto os fabricados com fibras de bananeira exibiram maior rigidez, principalmente os compósitos fabricados com 30% de fibras.

Silva (2002) avaliou o comportamento de compósitos produzidos com cimento de escória de alto-forno reforçados com fibras de celulose, moldados através de adaptações dos processos industriais usados em todo mundo pelas empresas de fibrocimento. A análise dos resultados confirmou a eficiência da incorporação da celulose nas propriedades mecânicas do compósito.

Duro (2013) estudou e analisou as propriedades mecânicas de diversos compósitos de matriz termoendurecível tradicional (poliéster e epóxi) e bioresina reforçados com fibras vegetais de sisal e linho, na forma de manta e de tecido bidirecional, respectivamente. Verificou-se que o reforço das diferentes resinas com fibras diversas produz efeitos distintos. No que diz respeito às fibras de sisal, elas não apresentaram tão boas propriedades como as

fibras de linho, que também variaram consoante a sua orientação.

Lima (2004) estudou o comportamento mecânico em tração, compressão e flexão de compósitos a base de cimento reforçados com fibras curtas de sisal e de laminados reforçados com fibras longas de sisal. Nos compósitos com fibras curtas investigou-se a influência do volume de fibras (1-3%), do volume do misturador, do tamanho da amostra e da idade dos compósitos sobre o comportamento do material. Nos laminados foram realizados ensaios de tração e flexão, antes e após envelhecimento acelerado. Foi investigado a influência do tipo de matriz (com e sem adição de metacaolinita ou tijolo moído), do volume de fibras (3% e 6%) e do número de camadas (2 e 3) de reforço no comportamento dos laminados. Os resultados indicam que a adição de fibras curtas aumenta a tenacidade da matriz de cimento. Compósitos laminados duráveis, tenazes e com elevada resistência à tração e flexão podem ser obtidos com a adição de fibras longas de sisal e com a substituição parcial do cimento por metacaolinita.

#### 2.4. A FIBRA DE SISAL

O sisal, cujo nome científico é *Agave Sisalana* (Figura 46), pertence à família Agavaceae e é uma planta originária da América Central, utilizada como matéria-prima na produção de fibras. Proveniente, mais precisamente, da península de Yucatan, no México, recebeu este nome de uma erva nativa chamada *zizal-xiu* (MARTIN *et al*, 2009). Por ser uma planta resistente à aridez e ao sol intenso, desenvolveu-se com facilidade pelas regiões tropicais/semiáridas do planeta.

Figura 46 - A planta *Agave Sisalana*.



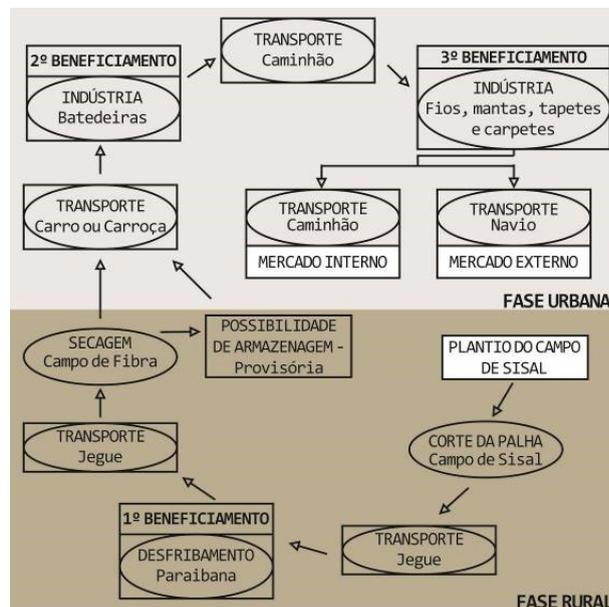
Fonte: Sisall (2018) (<http://www.sisall.com.br/o-sisal/>)

A *Agave Sisalana* apresenta folhas verdes escuras, rígidas, eretas e de comprimento

que pode atingir até 2,20 metros, com largura média na parte central de 9,0 centímetros. De maneira geral, as folhas são lisas com espinho terminal, de cor marrom, com cerca de 3,0 centímetros de comprimento, podendo apresentar também pequenos espinhos curvados para baixo ao longo do comprimento das folhas (CENTRO NORDESTINO DE INFORMAÇÕES SOBRE PLANTAS – CNIP, 2015).

O ciclo de transformação da folha de sisal em fibras dá-se aos três anos de vida da planta, ou quando suas folhas atingem cerca de 1,40 metros de comprimento, o que pode resultar em fibras de 90 a 120 centímetros (COMPANHIA SISAL DO BRASIL – COSIBRA, 2015). No primeiro corte realizado na planta são colhidas em torno de 50 a 70 folhas. Nos cortes subsequentes, executados anualmente, podem ser retiradas cerca de 30 folhas e, usualmente, são deixadas de 7 a 9 folhas na planta (MARTINS, 2001). Da folha se obtém de 3 a 5% do seu peso em fibra. Os 95 a 97% restantes constituem os chamados resíduos do beneficiamento, que são utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica. O beneficiamento das fibras de sisal envolve as etapas de desfibramento, lavagem, secagem, batimento e enfardamento. A Figura 47 apresenta um esquema do processo produtivo das fibras de sisal.

Figura 47 - Representação esquemática do processo produtivo do sisal.



Fonte: Santos e Silva (2017, p.3)

O transporte das folhas cortadas, para o local de desfibramento, geralmente é feito por asininos (jumentos). Em todo o processo do beneficiamento o desfibramento da folha do sisal é a operação mais complexa. Este processo deve ser realizado dentro de 24 horas, pois, passado esse tempo, às folhas começar a murchar. A máquina utilizada no desfibramento das folhas é conhecida popularmente como “motor de agave” ou “maquina paraibana”, sendo este

maquinário a principal desfibradora dos sisais no Brasil, embora apresente baixa capacidade operacional (em torno de 150 a 200 kg de fibra seca em um turno de 10 horas/dia), produza grande desperdício de fibras (em média 20 a 30% da fibra contida na folha), além de necessitar de grande número de pessoas. Finalizada a separação das fibras, estas são transportadas por meio de padiolas, ou no dorso de animais, para tanques com água limpa, onde é imersa por um período de 8 a 12 horas (geralmente no período noturno), para limpeza dos resíduos da mucilagem péctica e da seiva clorofílica, agregados à fibra. Finalizada a limpeza, as fibras são expostas ao sol para secagem e clareamento por um período de 8 a 10 horas (EMBRAPA, 2001 *apud* MARTINS, 2001).

A etapa de batimento é realizada em máquinas denominadas “batedeiras” e, geralmente, perde-se de 8 a 10% do peso original da fibra pela eliminação dos resíduos parenquimatosos, em forma de pó e fibras curtas (buchas). O pó pode ser aproveitado como adubo orgânico e ração animal, já a bucha pode ser utilizada para celulose, estofados e na indústria automobilística. Depois do batimento das fibras, elas são escovadas, enfardadas e transportadas até a indústria onde são produzidos fios, mantas, tapetes e carpetes.

Em 16 de março de 1983, o então Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (1983), no uso de suas atribuições, aprovou as *Normas de Identidade, Qualidade, Apresentação e Embalagem da Fibra Beneficiada de Sisal ou Agave e seus Resíduos de Valor Econômico*, documento no qual classifica a fibra de sisal em classes e tipos conforme os seguintes critérios:

- Quanto à classe: longa, média e curta;
- Em função da qualidade: tipo superior, tipo 1, tipo 2, tipo 3 e refugo.

A empresa Hamilton Rios Indústria Comércio e Exportação LTDA, produtores de fibras de sisal, fazem as seguintes observações quanto aos tipos de fibras produzidas e comercializadas:

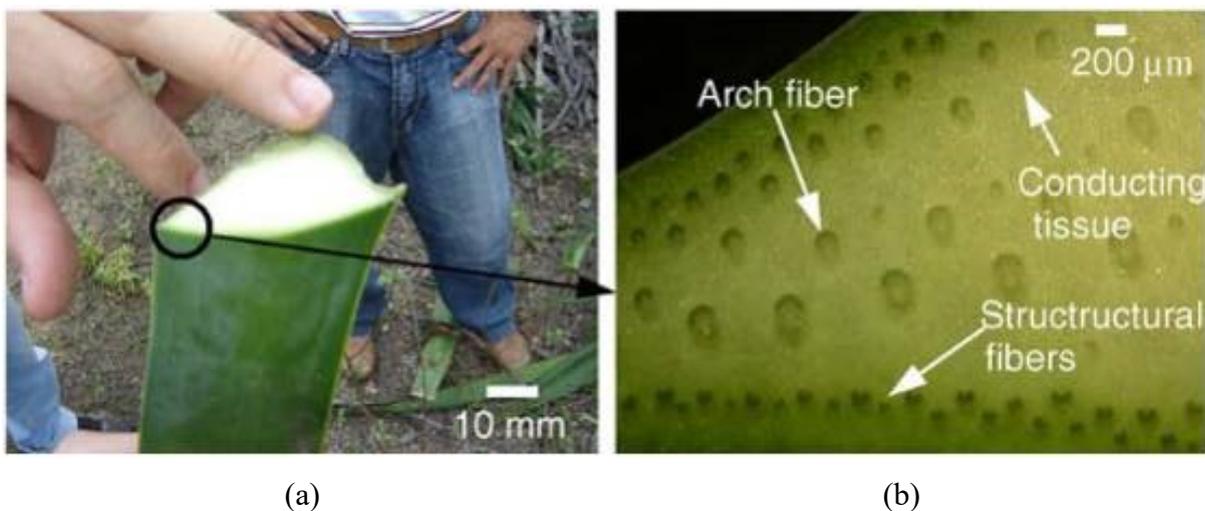
- Fibras Tipo 1: Embora as normas do Ministério da Agricultura não prevejam qualquer percentual de impureza, o mercado internacional aceita e tolera até 1% de impurezas, tendo em vista a grande dificuldade em conseguir produzir esse tipo de sisal, em função das condições de extração no campo.
- Fibras Tipo 2: Normalmente essa fibra apresenta um percentual de impurezas não superior a 2%. É tolerável até 10% de fibras médias (71 – 90 cm).
- Fibras Tipo 3: Normalmente essa fibra apresenta um percentual de impurezas em torno de 3,5% e variação de cor muito mais acentuada que o sisal tipo 2. É tolerável até 20% de fibras médias (71 – 90 cm).

Além das particularidades que envolvem todo o processo de produção e separação dos diversos tipos de fibras de sisal a empresa Hamilton Rios Indústria Comércio e Exportação LTDA, também destaca a existência de dois tipos adicionais de fibra de sisal que não existem segundo o Ministério da Agricultura, mas são classificações e conceitos aceitos comercialmente:

- Fibras Tipo 4: Consiste em um sisal que não pode ser classificado como Tipo 3, pois possui uma variação muito acentuada de cor, tamanho e grau de impureza, mas, ao mesmo tempo, como possui muita fibra acima de 60 cm, não pode ser classificado como refugo.
- Refugo Selecionado: Consiste em um sisal com as mesmas características do Tipo 4, entretanto, com um índice de impureza superior e variação de cor e tamanho mais acentuada.

Três tipos básicos de fibras são encontradas ao longo da folha da *Agave Sisalana*: a fibra mecânica (*Structural Fiber*), a fibra arco (*Arch Fiber*) e a fibra xilema (*Xylem Fiber*) (Figura 48). A fibra mecânica, que confere resistência à folha, é encontrada na periferia da mesma. Raramente apresenta seção transversal circular e seu diâmetro equivalente encontra-se em torno de 200  $\mu\text{m}$  (SILVA, 2011). As fibras arcos crescem em associação com os tecidos da planta e são usualmente encontrados no meio da folha. Estas se estendem desde a base até o topo da planta, possuindo boa resistência mecânica. As fibras xilema crescem opostas às fibras de arco e são conectadas a elas pelo tecido condutor (SILVA *et al.*, 2008).

Figura 48 - A folha da planta de sisal: a) Vista da seção transversal. b) Microscopia ótica da região selecionada.



Fonte: Silva *et al.* (2008, p.2)

Fisicamente, as fibras vegetais são compostas por diversas fibrilas ou fibras elementares que têm de 1 a 8 mm de comprimento, diâmetro de 6 a 10  $\mu\text{m}$ , e a espessura da

parede celular variando entre 6 e 9  $\mu\text{m}$ . As fibrilas, por sua vez, são divididas em quatro partes, chamadas parede primária, parede secundária espessa (S1 e S2), parede terciária e lúmen, Figura 49 b). As fibras vegetais são unidas por um material ligante, constituídas por uma quantidade de células que contém um tubo de polígonos irregulares com uma cavidade central oca, preenchido pelo lúmen, um protoplasma celular (FONSECA, 2002; LIMA, 2004; MARTIN *et al*, 2009). As principais substâncias que compõe a fibra de sisal são:

- Celulose: Polímero de cadeia longa composto por um único monômero. Componente estrutural primário das plantas, sua estrutura elementar é a anidro-d-glicose. Em combinação com a lignina, hemicelulose e a pectina, é um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas, cerca de 33% da massa da planta, garantindo assim rigidez devido a formação de um grande sistema de fibras entrelaçadas;
- Hemicelulose: Polissacarídeos ramificados que podem ser formados por um único tipo de monossacarídeo (homopolissacarídeos) ou por dois ou mais tipos diferentes (heteropolissacarídeos). De acordo com Mendes Neto (2008), são polímeros de glicose, maltose, xilose, galactose e outras hexoses e pentoses, cujo grau de polimerização é inferior ao da celulose.
- Pectina: Polissacarídeo formado por monômeros de ácido galacturônico unidos entre si por ligações glicosídicas. Desempenham a função de cimentação intercelular atuando de forma conjunta com a celulose e Hemicelulose. É encontrado em todos os vegetais superiores, caracterizado pelo alto conteúdo de ácido úrico e presença de grupo éster-mentil (MENDES NETO, 2008).
- Lignina: Molécula tridimensional amorfa observada nas plantas terrestres. Em associação com a celulose, confere rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques biológicos aos tecidos vegetais.

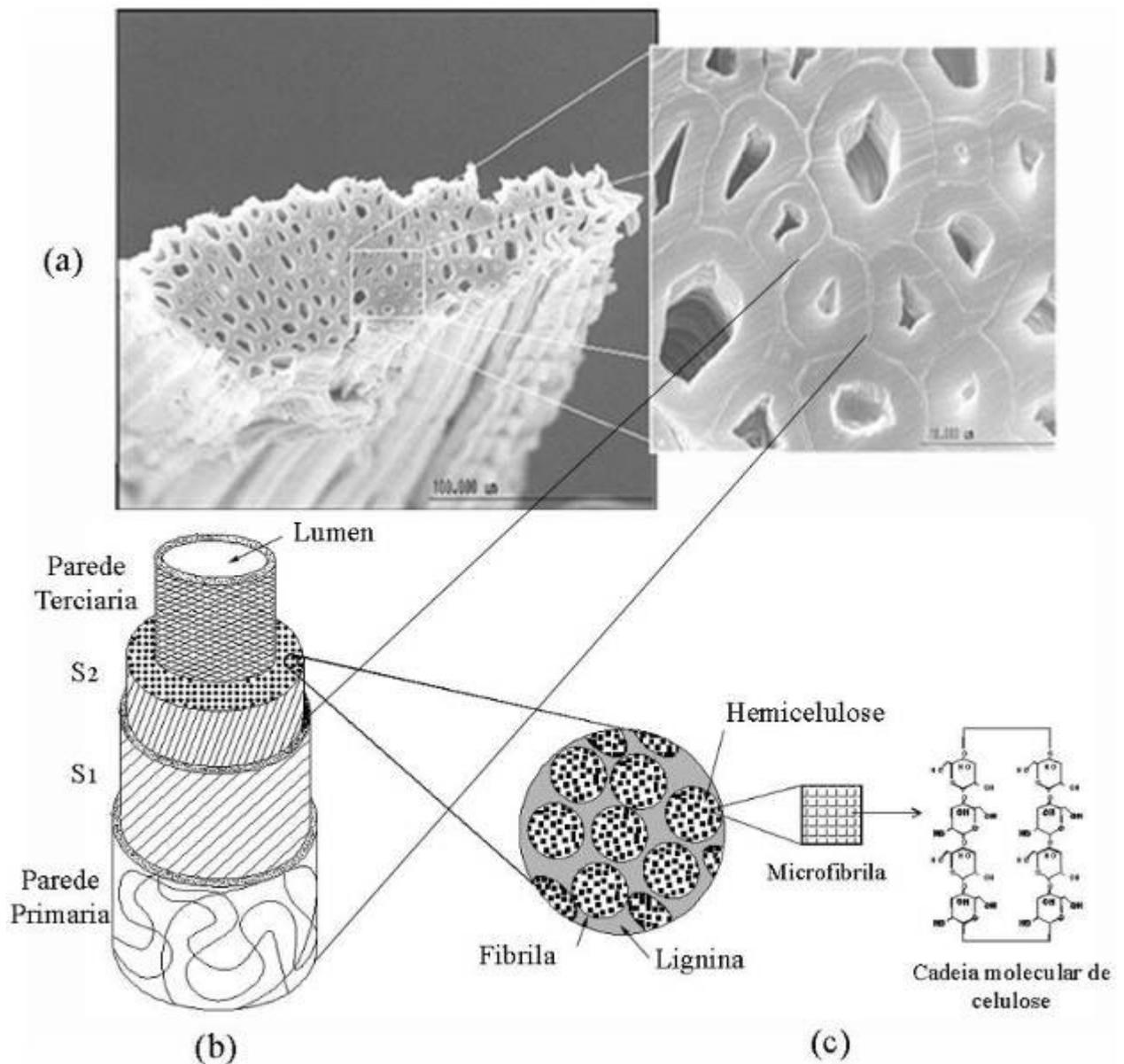
De acordo com Lima (2004), as porcentagens de composição das principais substâncias que compõem a fibra de sisal são: 70% de celulose, 12% de hemicelulose, 10% de lignina e uma pequena quantidade de pectina e 2% de graxas e gorduras. Com base nos estudos apresentados por Mendes Neto (2008), a Tabela 4 apresenta as composições de algumas fibras de origem vegetal.

Tabela 4 - Composição química de fibras vegetais.

Fibras	Celulose %	Hemicelulose %	Pectina %	Lignina %	Extrativos %	Graxas %	Outros %
<b>Sisal</b>	<b>73,10</b>	<b>13,30</b>	<b>0,9</b>	<b>11,00</b>	<b>1,30</b>	<b>0,30</b>	<b>0,10</b>
<b>Linho</b>	71,20	18,50	2,00	2,20	4,30	1,60	0,20
<b>Juta</b>	71,50	13,30	0,20	13,10	1,20	0,60	0,10
<b>Algodão</b>	91,80	6,30	-	-	1,10	0,70	0,10

Fonte: Adaptado de Mendes Neto (2008, p. 51)

Figura 49 - Morfologia da fibra de sisal: a) Micrografia da fibra de sisal; b) Desenho esquemático de uma fibrila ou fibra elementar; c) Estrutura interna da parede da fibra.



Fonte: Lima (2004, p.192)

### 2.4.1. HORNIFICAÇÃO COMO TRATAMENTO NAS FIBRAS

Como já citado anteriormente, o uso de fibras vegetais como opção de reforço em matrizes frágeis consiste em uma interessante possibilidade que oferece diversas vantagens. De acordo com Balaguru e Shah (1992), devido às suas propriedades mecânicas, a utilização de fibras vegetais pode promover o aumento de ductilidade, flexibilidade, entre outros benefícios. Apesar de haver vantagens na utilização de fibras orgânicas como opção de reforço estrutural, sua utilização apresenta limitações devido à falta de durabilidade. Neste sentido, na última década, a comunidade científica têm empregado esforços na busca de solução para diminuir a fragilidade de fibras naturais em compósitos (CLARAMUNT *et al*, 2011).

Mohr *et al* (2005) estabeleceram a seguinte sequência de danos que ocorre nas fibras vegetais quando os compósitos reforçados são sujeitos a vários ciclos de molhagem e secagem:

- a) Perda de aderência entre a fibra e a matriz após o segundo ciclo de molhagem/secagem devido à redução da seção transversal após a saída da água;
- b) Precipitação dos compostos hidratados dentro dos espaços vazios formados na interface da fibra com a matriz durante os dez primeiros ciclos de molhagem/secagem;
- c) Completa mineralização, e conseqüentemente, fragilização da fibras após os dez primeiros ciclos de molhagem/secagem.

Claramunt *et al* (2009), utilizando a técnica de difração de raios-X e a análise termogravimétrica, demonstraram o processo de migração de componentes hidratados em matrizes cimentícias para as fibras:

- a) No primeiro ciclo de secagem, a seção transversal das fibras vegetais é reduzida devido à perda de água;
- b) No ciclo subsequente de molhagem, a água dissolve os componentes hidratados do cimento (hidróxido de cálcio). As fibras absorvem a dissolução de hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, incham-se;
- c) No segundo ciclo de secagem, a água é perdida por evaporação, proporcionando a precipitação do hidróxido de cálcio na superfície e no lúmen das fibras. Durante os próximos ciclos de molhagem/secagem as etapas anteriores se repetem, resultando no aumento da densidade da superfície e do lúmen das fibras, resultando em um material com alta alcalinidade.

Como solução para os problemas supracitados, existem basicamente duas opções de melhoria da durabilidade das fibras naturais em compósitos. A primeira é modificando a

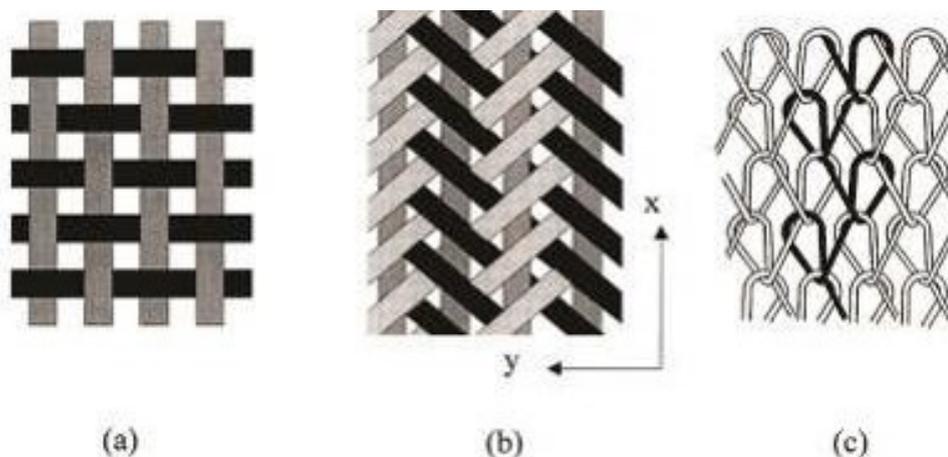
composição da matriz com o intuito de remover os componentes alcalinos existentes. Lima (2004), para comprovar a redução do teor de hidróxido de cálcio livre nas matrizes cimentícias, realizou ensaios termogravimétricos em pasta de cimento e pastas com substituição de 40% de cimento por metacaolinita. A segunda opção para aumento da durabilidade é modificando a superfície das fibras com tratamento físico ou químico.

A hornificação é um efeito irreversível que ocorre em fibras celulósicas quando são submetidas a ciclos de molhagem e secagem. Este efeito, quantificado a partir da porcentagem de redução de retenção de água, provoca, principalmente, o encolhimento das fibras devido à formação de pontes de hidrogênio na celulose, no entanto, não afeta a resistência mecânica.

#### 2.4.2. TECIDOS DE SISAL

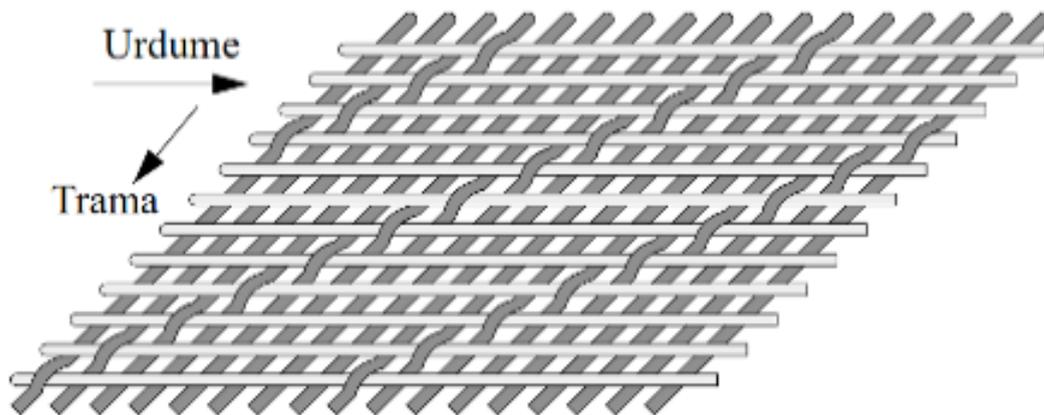
O processo de tecelagem é uma das mais antigas técnicas de processamento de materiais conhecidas. A forma mais simples e comum, de reforço têxtil, são os tecidos que consistem de estruturas clássicas bidirecionais (PARDINI, 2000). Os tecidos são arranjos de fios unidos por forças de contato e pelo intertravamento obtido nos diversos métodos de confecção, com destaque para três arranjos: urdidos ou tramados – formados pela intercalação de fios em duas direções, Figura 50-a); trançados – formados a partir do cruzamento de fios em duas ou três direções, como exemplificado na Figura 50-b); e os tecidos tricotados, obtidos pelo interlaçamento dos fios, como mostrado na Figura 50-c) (GOMMERS *et al.*, 1998; CARVALHO, 2005). De acordo com Carvalho, Cavalcanti e Cavalcante (2000), os tecido tramados são os mais comuns utilizados como reforço, principalmente em compósitos de alta *performance* sendo as fibras de vidro, de carbono e de aramida as mais utilizadas.

Figura 50 - Arranjos de tecidos: a) Tecido urdido; b) Tecido trançado; c) Tecido tricotado.



Os tecidos tramados são produzidos principalmente pela tecelagem automática ou manual de fios intercalando-os em duas direções: o urdume, que são os fios longitudinais, e a trama composta de fios transversais (Figura 51).

Figura 51 - Desenho esquemático de um tecido tramado.

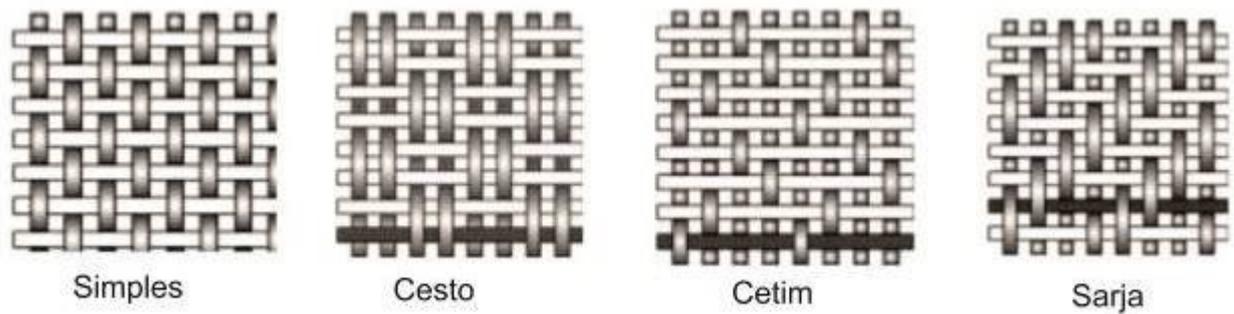


Fonte: Pardini (2000, p.3)

Os fios são dispostos alinhados verticalmente no urdume e, através de laços, são divididos em dois grupos e elevados ou baixados para a passagem dos fios da trama (horizontais). Os fios da trama são lançados entre os fios do urdume, podendo ser compactados pela batida de um pente (quando utilizado tear de pente) ou sem a compactação (quando utilizado tear de pregos). As propriedades mecânicas do tecido tramado são controladas principalmente por parâmetros tais como a arquitetura do tecido, a natureza, as dimensões e a torção do fio e espaçamento entre os fios ou densidade do tecido (CARVALHO, CAVALCANTI e CAVALCANTE, 2000).

Existem quatro tipos principais de tecidos tramados sendo os mais utilizados os do tipo simples e do tipo sarja. O tipo simples é obtido pelo cruzamento alternado de fios perpendiculares e o tipo sarja é obtido pelo cruzamento alternado de dois ou mais fios (CARVALHO, 2005; ARRUDA FILHO, 2015). A Figura 52 ilustra algumas tramas encontradas em tecidos urdidos.

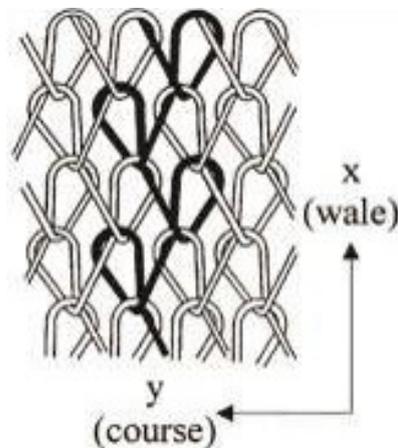
Figura 52 - Tipos de arranjos de tecidos urdidos.



Fonte: Arruda Filho (2015, p.11)

Segundo Carvalho, Cavalcanti e Cavalcante (2000), os tecidos tricotados são caracterizados pela interligação de um fio em laçadas, também conhecido como *loops*, utilizando-se agulhas de tricô. Numa estrutura tricotada, ao longo da largura do tecido, na direção horizontal, têm-se as carreiras (*courses*) de pontos e, na direção vertical, têm-se as colunas ou cordões (*wale*), Figura 53. As laçadas nas carreiras e nos cordões são interconectadas formando o tecido.

Figura 53 - Tecido tricotado.



Fonte: Adaptado de Gommers *et al* (1998, p.2)

Quando tecidos são utilizados como reforço, deve-se também levar em conta suas características, tais como: a) a sua arquitetura; b) os pontos empregados; c) as propriedades mecânicas dos tecidos na direção da trama e da urdidura para os tecidos tramados ou das carreiras e dos cordões para os tecidos tricotados (CARVALHO, CAVALCANTI e CAVALCANTE, 2000). Cerchiaro (2010) destaca que a orientação das fibras nos compósitos os torna anisotrópicos, e o máximo desempenho é alcançado quando o material é solicitado na direção da orientação das fibras. Na direção perpendicular ao alinhamento, o reforço praticamente não existe, desta forma, o material falha a tensões muito baixas.

Desta forma, fica claro que, além das características já citadas que causam influência no desempenho dos tecidos como reforço estrutural, a orientação das fibras é fundamental para o desempenho mecânico dos compósitos.

## 2.5. ARGAMASSAS DE CAL

As argamassas, assim como outros materiais utilizados no ato de construir pelos humanos, passaram por mudanças, ao longo do tempo, tanto na sua composição em relação aos materiais componentes da sua mistura, como na sua função nas edificações. Do ponto de vista dos antigos profissionais da área da construção e de autores que dedicaram o seu tempo para escrever sobre o assunto, a definição utilizada há tempos atrás não é a mesma considerada nos dias atuais. Santiago (2007) afirma que a definição adotada atualmente é restritiva, incompleta, uma vez que afirma que argamassa consiste em uma mistura de agregado miúdo, aglomerante e água, composição esta que nem sempre foi adotada no decorrer da história.

Rodrigues (2004) destaca que as argamassas originalmente aplicadas em edifícios antigos eram comumente geradas do resultado da mistura de água com cal aérea e com agregados finos (areias) e/ou outros materiais tais como fragmentos de material cerâmico. No entanto, Santiago (2007) traz em seu trabalho alguns depoimentos de profissionais antigos com referência à composição e utilização das argamassas empregadas nos séculos passados, que mesmo entre eles pode-se perceber certa discordância conceitual.

No texto do escritor e moralista português, nascido em São Paulo, Mathias Ayres Ramos da Sylva de Eça (1705- 1763), era recriminado o uso de qualquer material diferente de areia e cal nas argamassas (SANTIAGO, 2007). A autora comenta sobre a afirmação do escritor português destacando a radicalidade da definição, esta que entrava em contradição com muitas opiniões da época, uma vez que nem sempre as argamassas eram assim constituídas.

Em estudos realizados em finais do século XIX, o português J. da P. Castanheiras das Neves indicou que, além da argamassa simplesmente feitas com cal e areia, entravam outros componentes nas misturas, tais como borra de ferro, pó de tijolo, *massapez*, cinza de carvão (SANTIAGO, 2007).

Outra definição restritiva quanto a sua utilização, trazida por um engenheiro militar catalão, Benard Forest de Belidor (1697 ou 1698-1791), no seu *Dictionnaire portatif de l'ingénieur*, concordou com o arquiteto e historiógrafo francês André Félibien des Avaux (1619-1695) no que se refere à argamassa da seguinte forma: “Argamassa. É um composto de cal e areia, ou de cal e pó de material cerâmico, para unir as pedras. Dizemos que a argamassa é gorda quando tem muita cal”. De acordo com Santiago (2007), a restrição de tal definição se dá

ao fato de caracterizar o material composto por areia, cal ou material cerâmico pulverizado com a função única de unir pedras não integrando outros materiais como tijolos e adobes.

Por último, Santiago (2007) traz a declaração de Francisco de Assis Rodrigues, retirada de um dicionário técnico do final do século XIX, que diz o seguinte:

[...] quando são ordinárias, preparam-se com a cal grossa, misturando-lhe mais ou menos areia. Chama-se “argamassa” gorda quando a cal é em muito mais quantidade do que a areia, e “argamassa” magra quando a cal não é suficiente para bem ligar (RODRIGUES, F.A. *Diccionario tecnico e histórico de pintura, esculptura, architectura e gravura*, Lisboa, Imprensa Nacional, 1875, p.56).

Do ponto de vista de Santiago (2007), para o autor do referido trecho, a argamassa era uma mistura unicamente de cal e areia, no entanto, foi deixada uma possibilidade de inclusão de outros tipos de ingredientes, apesar de não citar qual poderia ser a sua composição. Magalhães (2013) afirma que as argamassas antigas são, em geral, constituídas por material ligante e agregados miúdos, sendo que, para o primeiro, o gesso, terra (solo) e a cal destacavam-se como os materiais usualmente utilizados.

Nos dias atuais, a argamassa é genericamente considerada como uma pedra artificial. Tal consideração é feita devido às características que apresenta após o endurecimento, que de certo modo, são similares às rochas, assim como desempenhar algumas das suas funções.

No tocante aos documentos antigos relacionados ao tema das argamassas históricas e seus componentes, a obra *Os dez livros de Arquitetura*, de Vitruvius (séc. I a. C.) é uma fonte rica sobre este material (além de tratar de vários outros insumos de construção comumente utilizados na sua época). Dentre as diversas informações sobre o assunto, Santiago (2007) destacou as seguintes indicações dadas por Vitruvius (1914), no que diz respeito à constituição, finalidade e proporção entre os diversos ingredientes das argamassas:

- Usar mistura de cal, areia, pó de tijolo e britas, ao invés de lajes de pedra, para revestir pisos de cisternas, piscinas e outros depósitos de água;
- Adotar os traços 1:3 (cal, areia de jazida) e 1:2 (cal, areia de rio ou mar);
- Usar argamassa de tijolo moído para revestir as paredes, até uma altura de cerca de um metro, ao invés do emprego, unicamente, de uma mistura cal e areia, no intuito de impedir a penetração da água.

Em geral, a vasta bibliografia que trata das argamassas de revestimento relata aspectos do saber dos povos da antiguidade, no que se refere à seleção das matérias primas, à mistura, aplicação e às propriedades dos materiais (MAGALHÃES, 2013). Nossos antepassados costumavam usar a intuição e a experimentação dos materiais de construção, desenvolvendo assim conhecimento empírico, que era o norte para aproveitar as propriedades e o desempenho

dos mesmos para a solução dos problemas construtivos da época.

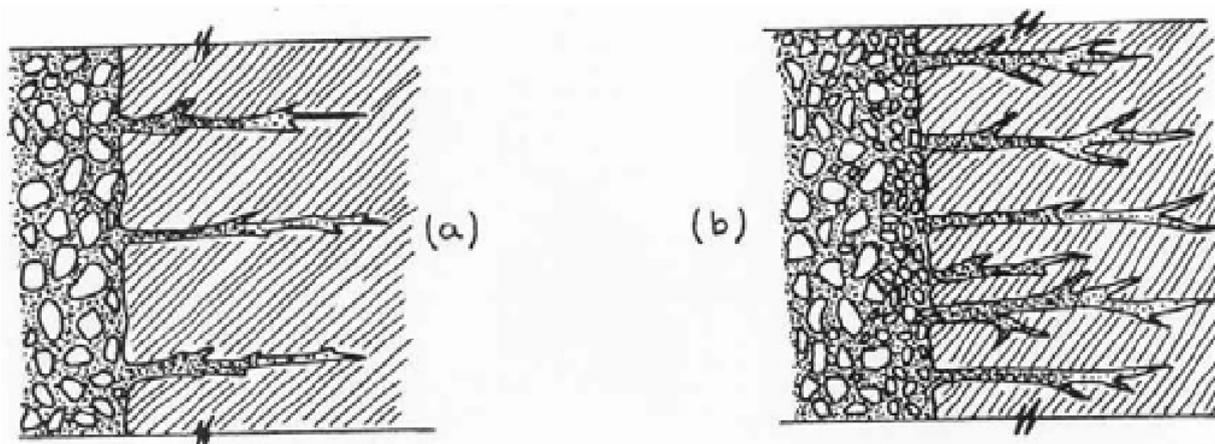
### **2.5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS**

As características das argamassas dependem da utilização para a qual as mesmas são preparadas: se para assentamento ou para revestimento. As principais propriedades que a argamassa para aplicação em edifícios antigos devem apresentar (especialmente aquelas para aplicação no revestimento de paredes) podem ser agrupadas em função das especificações que lhe são requeridas que, por sua vez, condicionam a aptidão do revestimento para satisfazer as exigências funcionais.

No caso de aplicações em construções antigas, na visão de Rodrigues (2004), as características fundamentais estão relacionadas com a aderência, impermeabilização, retração, capilaridade, permeabilidade ao vapor, resistência à ação de sais solúveis e o aspecto visual. De forma análoga ao autor supracitado, Santiago (2007) afirma que para garantir uma das funções básicas das argamassas, que é a proteção aos vários elementos construtivos da edificação, as seguintes condições devem ser atendidas: compacidade, impermeabilidade, aderência e constância de volume, estas que propiciam qualidades como resistência mecânica adequada e durabilidades.

A aderência da argamassa aos elementos da alvenaria é de grande importância, tanto do ponto de vista estrutural, como de durabilidade da parede. O processo ocorre a partir da penetração da água e partículas finas dos materiais ligantes nos interstícios do suporte (tijolos ou blocos em geral), que, ao cristalizar no interior dos seus poros, asseguram a colagem (RODRIGUES, 2004). A Figura 54 ilustra este fenômeno em elementos de absorções distintas. A aplicação nas alvenarias deverá estar aderente ao suporte de modo a não se descolar sob os efeitos de tração e compressão desenvolvidos por variações dimensionais entre os elementos e choques mecânicos, além de não conduzir a concentrações de tensões em pontos localizados.

Figura 54 - Aderência de argamassa de revestimento a elementos de alvenaria com diferentes coeficientes de absorção.



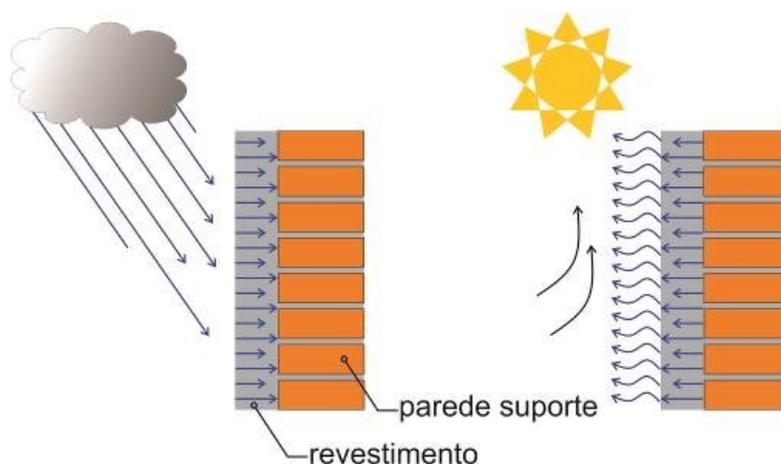
Fonte: Rodrigues (2004, p.13)

A exigência de impermeabilização implica que o revestimento seja suficientemente espesso para constituir, de algum modo, uma barreira à penetração da água, que seja pouco susceptível a fissuras e que apresente capilaridade tão baixa quanto possível. Trata-se de uma característica fundamental, pois a penetração da água é um dos mais danosos agentes de degradação nos edifícios (RODRIGUES, 2004; SANTIAGO, 2007).

A capilaridade traduz a capacidade de o material saturar-se em água por forças de sucção. A velocidade de ascensão está diretamente relacionada com o calibre dos poros, quanto mais finos forem os capilares da argamassa maior será este progresso.

Em períodos de chuva, o revestimento absorve certa quantidade de água por capilaridade, que tende deixar a argamassa sob a forma de vapor na ocasião seguinte de estiagem. Rodrigues (2004) alega que a argamassa deve ser suficientemente permeável ao vapor d'água, de forma a evitar a condensação no seu interior, permitindo assim que a parede seque, eliminando por evaporação a porção que adentrou ao material por capilaridade. A Figura 55 apresenta esquematicamente os ciclos de umedecimento e de secagem em paredes rebocadas.

Figura 55 - Ciclos de umedecimento e secagem em paredes rebocadas.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2004, p.15)

O surgimento de fissuras na argamassa depende de vários fatores, estes difíceis de quantificar. De forma geral, pode considerar-se essencialmente relacionado com três características - retração, módulo de elasticidade e resistência à tração -, cuja influência deverá ser vista em conjunto (RODRIGUES, 2004). Dessa forma, o revestimento deve apresentar boa capacidade de deformação para que possa absorver, sem o surgimento de fissuras, os movimentos e as tensões aos quais é susceptível.

De acordo com Rodrigues (2004), a argamassa para edifícios antigos não deve contribuir por si mesma para a liberação de sais solúveis, sendo necessário que apresente boa resistência aos sais solúveis. O autor afirma que essa exigência se dá porque geralmente as paredes antigas possuem teores elevados destes minerais (principalmente devido aos materiais que as constituem terem estado sujeitos ao longo do tempo à sua deposição por transporte por capilaridade a partir do terreno ou efeitos do ambiente externo, como exemplo, o efeito da poluição atmosférica).

As características citadas anteriormente dependem basicamente do tipo, da quantidade e da qualidade das matérias-primas utilizadas. Os materiais devem ser isentos de impurezas e apresentar os requisitos mínimos para atingir, satisfatoriamente, os fins aos quais se destinam (SANTIAGO, 2007).

### 2.5.2. TRAÇO RECOMENDADO

Com relação ao traço mais indicado para as argamassas, Vitruvius (1914) fez menção ao tipo de areia utilizada na composição, se areia proveniente de jazida ou de origem do rio ou de mar. Segundo o autor deve-se adotar o traço 1:3 (cal, areia) para o primeiro e 1:2 para o segundo. Entretanto, o Núcleo de Tecnologia da Preservação e do Restauro – NTPR da

Universidade Federal da Bahia, realizou pesquisas sobre o comportamento mecânico de argamassas destinadas a intervenções restaurativas que indicaram baixa resistência mecânica de argamassas com o traço 1:3 (considerando os materiais disponíveis no contexto atual).

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais pertinentes à avaliação da fibra natural do *Agave Sisalana* como possível material de utilização para reforço estrutural de alvenarias.

Esta etapa contemplou a caracterização mecânica da fibra de sisal, quanto à resistência à tração da fibra unifilar, do feixe composto por dez fibras, do tecido de sisal confeccionado, e do processo de hornificação. Além destes, foram realizados ensaios de caracterização com a areia e a cal.

Para a realização dos ensaios mecânicos nas paredes foram produzidos protótipos com dimensões de 40x40x20 cm. O assentamento dos tijolos foi realizado com argamassa de cimento e areia, com traço 1:2 e adotado uma espessura de junta de 1,0 cm. A escolha da dimensão se deu de acordo com o espaço disponível para encaixe dos corpos de prova na máquina de ensaio universal. Os materiais utilizados para confecção das argamassas, tanto a de cimento quanto a de cal, foram adquiridas no comércio local. O cimento utilizado foi do tipo CP II, areia de mina, cal hidratada e água de torneira. Foram produzidos 18 unidades do protótipo de alvenaria dos quais, 12 foram utilizados no ensaio de compressão normal (4 unidades revestidas com argamassa de cal sem fibra, 4 unidade revestidas com argamassa de cal com fibras curtas e 4 unidades revestidas com argamassa de cal com tecido de sisal) e 6 foram utilizados no ensaio de compressão diagonal (2 unidades revestidas com argamassa de cal sem fibra, 2 unidades revestidas com argamassa de cal com fibras curtas e 2 unidades revestidas com argamassa de cal com tecido de sisal).

#### **3.1. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL**

A etapa de caracterização das fibras utilizadas é importante para a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas. Neste trabalho foi utilizada a fibra de sisal proveniente da Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira – APAEB, situada na cidade de Valente/Bahia. Optou-se por utilizar fibras do Tipo I por apresentar isenção de impurezas, substâncias pécticas, entrançamentos e nós, fragmentos de folhas e cascas, bem como quaisquer outros defeitos.

##### **3.1.1. HORNIFICAÇÃO – CICLOS MOLHAGEM/SECAGEM**

As fibras de sisal utilizadas foram submetidas a dez ciclos de molhagem/secagem. Os

ciclos foram conduzidos da seguinte forma:

- a) Submersão das fibras em água durante 16 horas (normalmente as fibras eram colocadas nas bacias sempre as 16:00 h) (Figura 56);
- b) Secagem em estufa com temperatura constante de 80 °C por 7 horas (geralmente iniciava-se a secagem as 08:00 h) (Figura 57).

Figura 56 - Fibras de sisal durante o ciclo de molhagem.



Fonte: O autor (2019).

Figura 57 - Fibras de sisal levadas à estufa para secagem.



Fonte: O autor (2019).

Além dos procedimentos supracitados, duas medidas foram adotadas para melhor condução dos ciclos:

- 1) Antes das fibras serem levadas à estufa, após serem retiradas da bacia, esperava-se o excesso de água escorrer das fibras;
- 2) Após a retirada da estufa as fibras permaneciam aproximadamente uma hora a temperatura ambiente antes de serem colocadas na água para um novo ciclo.

### 3.1.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NAS FIBRAS

Para caracterização das fibras de sisal efetuaram-se ensaios monofilamentares em um equipamento de ensaios de tração universal de acordo com a Norma ASTM D3822-07, esta relacionada às fibras têxteis.

O ensaio foi realizado em um equipamento universal de ensaios mecânicos, da marca *Shimadzu* (Figura 58) a uma velocidade de 0,2 mm/min utilizando uma célula de carga de 1,0 kN. Estes procedimentos foram executados no Laboratório de Estruturas e Compósitos do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Figura 58 - Máquina de ensaio universal - *Shimadzu*.



Fonte: O autor (2019).

As fibras foram cortadas com o comprimento de 60 mm, sendo que o comprimento real para a realização do ensaio era de 30 mm. Para determinação da área da seção transversal, as fibras foram colocadas em estufa por 24 horas a uma temperatura de 80° C com o intuito de eliminar a umidade. Após a retirada da estufa, foram transportadas rapidamente para uma balança a fim de que a massa seca pudesse ser obtida. O procedimento de pesagem das fibras após a retirada da estufa foi realizado individualmente, uma vez que a imediata exposição da fibra com o ambiente externo já é suficiente para a umidade do ar aderir aos filamentos. A partir da medição da massa e utilizando o valor da densidade do sisal,  $\rho = 1,591 \text{ g/cm}^3$ , extraído

de Carvalho (2005), foi calculada a área da seção transversal a partir da expressão [3], derivada do conceito de densidade:

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{\Delta v} \quad [1]$$

$$\Delta v = A_f \cdot L \quad [2]$$

$$A_f = \frac{m}{\rho \cdot L} \quad [3]$$

Onde:

$\Delta v$  representa o volume total da fibra ( $\text{cm}^3$ );

$A_f$  corresponde à área da seção transversal da fibra ( $\text{cm}^2$ );

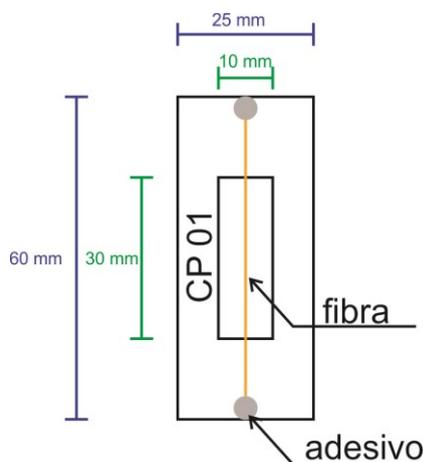
$L$  é o comprimento da fibra (cm);

$m$  é a massa seca da fibra (g);

$\rho$  é a densidade real da fibra ( $\text{g/cm}^3$ ).

A área calculada desta forma utiliza apenas a seção preenchida com sólidos, descartando os vazios. Determinada a área da seção transversal, cada fibra foi fixada em um suporte de papel vazado, colado nas pontas com adesivo instantâneo de cianoacrilato, conforme a Figura 59. Além da utilização do adesivo, cada extremidade do molde foi envolvida com fita crepe com o intuito de evitar o escorregamento e a concentração de tensão nas garras da máquina de ensaio (Figura 60). Em seguida, fixou-se o conjunto às garras e cortou-se o centro do suporte de papel, para que dessa maneira fosse possível isolar a fibra impedindo que houvesse interferência do papel utilizado (Figura 61).

Figura 59 - Esquema do corpo de prova com filamento de fibra de sisal.



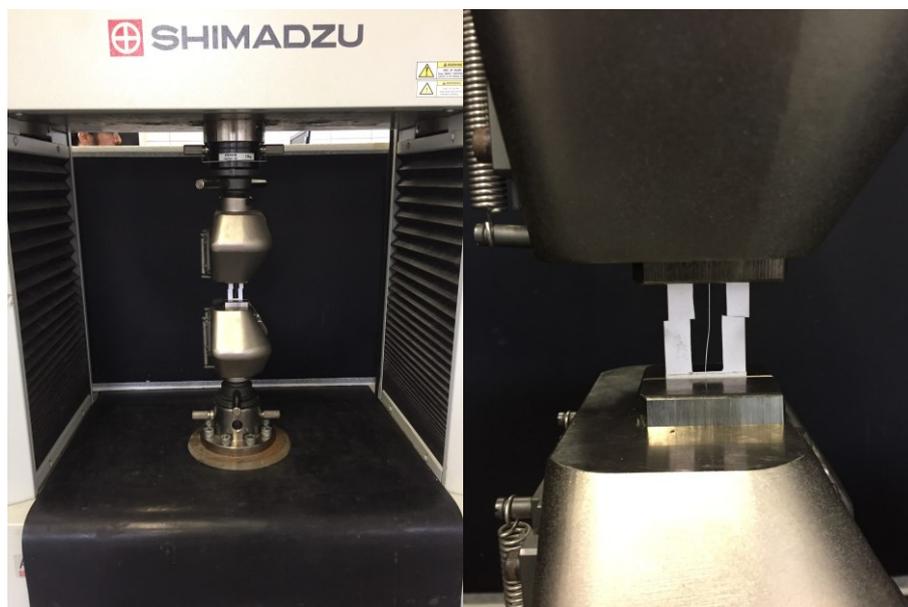
Fonte: O autor (2019).

Figura 60 - Corpo de prova com filamento de fibra de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 61 - Ensaio de tração nos filamentos das fibras de sisal.



Fonte: O autor (2019).

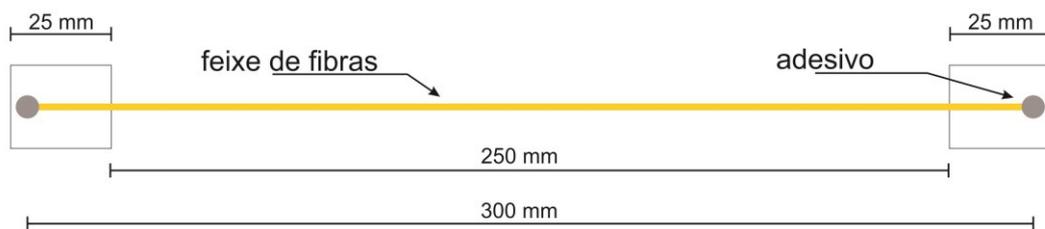
### 3.1.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NOS FEIXES

Para o ensaio de tração nos feixes, utilizou-se como referência a Norma ASTM D2256-10 (ASTM, 2015). A metodologia consistiu na seleção aleatória de duzentas fibras do montante após o tratamento da hornificação, separadas em 20 feixes, cada um composto por dez fibras.

Os feixes foram preparados com comprimento de 300 mm, sendo o comprimento real para a realização do ensaio de 250 mm. De maneira análoga às fibras monofilamentares, os feixes foram colocadas em estufa por 24 horas a uma temperatura de 80° C com o intuito de eliminar a umidade. Após a retirada da estufa foram pesadas em uma balança de precisão, com quatro casas decimais, a fim de que a massa seca pudesse ser obtida. O procedimento para determinação da área da seção transversal foi idêntico ao descrito em 3.1.2, utilizando o mesmo valor da densidade do sisal, extraído dos trabalhos de Carvalho (2005).

Na preparação dos corpos de prova, cada feixe foi fixado nas extremidades com lixas nº 100 com adesivo instantâneo, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra, de acordo com as Figura 62 e Figura 63. A Figura 64 mostra o corpo de prova posicionado nas garras durante o ensaio de tração.

Figura 62 - Esquema do corpo de prova com feixe de fibra de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 63 - Corpo de prova com feixe de fibra de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 64 - Ensaio de tração no feixe de fibras de sisal.



Fonte: O autor (2019).

### 3.1.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NOS TECIDOS

Para o ensaio de tração nos tecidos, utilizou-se como referência a Norma ASTM D5035 (ASTM, 2019). A metodologia consistiu na seleção aleatória de vinte amostras de tecido, retiradas do tear de pregos (Figura 65).

Figura 65 - Tear de pregos no momento da retirada das amostras de tecido.

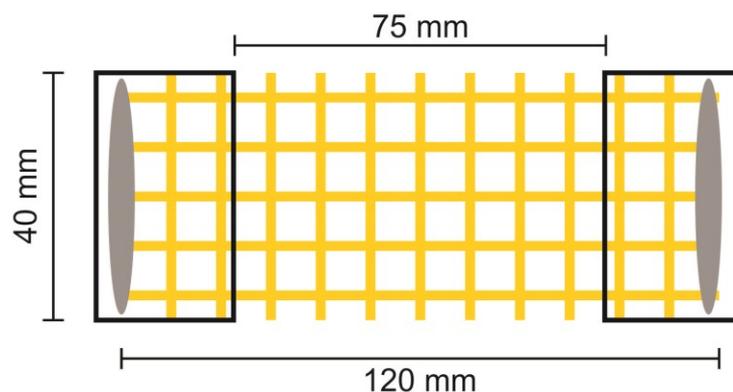


Fonte: O autor (2019).

Os tecidos foram preparados com comprimento de 120 mm, sendo o comprimento base para a realização dos ensaios 75 mm e 40 mm de largura. As amostras de tecido foram levadas à estufa por 24 horas a uma temperatura de 80° C com o intuito de eliminar a umidade. Após a retirada da estufa, foram pesadas em uma balança de precisão, com quatro casas decimais, a fim de que a massa seca pudesse ser obtida. O procedimento para determinação da área equivalente, aproximada, da seção transversal foi idêntico ao descrito em 3.1.2, utilizando o mesmo valor da densidade do sisal, extraído dos trabalhos de Carvalho (2005).

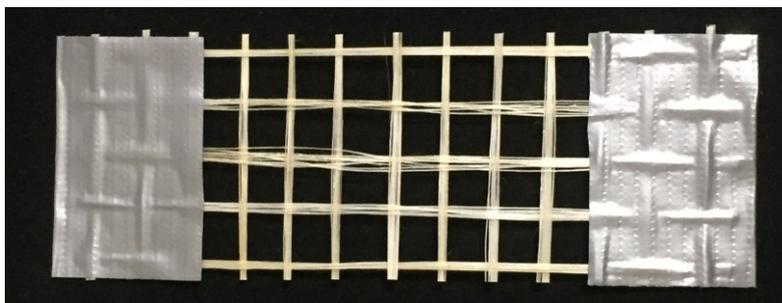
Na preparação dos corpos de prova, nas extremidades de cada amostra de tecido foi fixado um pedaço de fita adesiva de polietileno, com trama de tecido e adesivo à base de resina e borracha, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra (Figura 66 e Figura 67). A Figura 68 mostra o corpo de prova posicionado nas garras da máquina de tração durante o ensaio.

Figura 66 - Esquema do corpo de prova com tecido de sisal



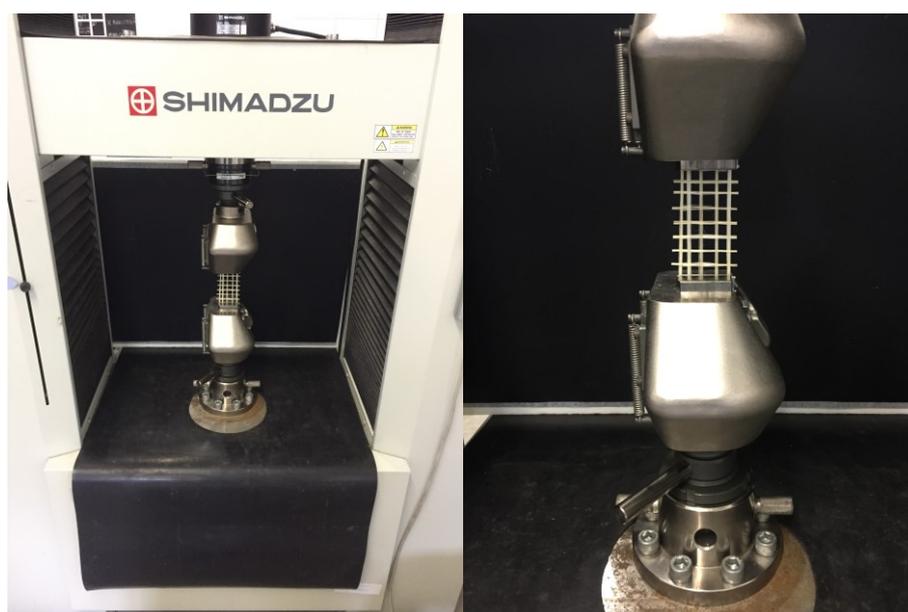
Fonte: O autor (2019).

Figura 67 - Amostra de tecido de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 68 - Ensaio de tração no tecido de sisal.



Fonte: O autor (2019).

### 3.2. A FIBRA DE SISAL COMO REFORÇO NA ARGAMASSA

Neste trabalho, a análise da eficiência da fibra de sisal como reforço estrutural se deu por utilizar a técnica do reboco armado. Para avaliação da influência das fibras de sisal sobre o comportamento na argamassa foram utilizados dois tipos de reforço: fibras curtas e tecido de sisal.

Com base nos trabalhos de Lima (2004), utilizaram-se fibras curtas com comprimento de 25 mm, inseridas aleatoriamente na argamassa de cal. O volume de reforço, com relação à matriz foi de 1%, sendo que o cálculo da quantidade de fibras se deu utilizando a densidade aparente do sisal,  $0,95 \text{ g/cm}^3$ . O traço final adotado para a argamassa, 1:2:0,82 (cal, areia e água), se deu através do ensaio de consistência no qual, a quantidade de água inserida na composição foi medida considerando que a mistura da argamassa com as fibras curtas apresentasse boa trabalhabilidade. Convertendo seus respectivos valores em massa, para um

volume de 1083 cm<sup>3</sup> de argamassa produzida foram necessários 99,66 g de cal, 583,34 g de areia e 400 mL de água e aproximadamente 10,29 g de fibra curta.

Para preparação da mistura, primeiramente as fibras de sisal foram cortadas no tamanho desejado e pesadas em uma balança de precisão. As misturas foram produzidas em argamassadeira, inicialmente misturando a areia, cal e parte da água. Após os primeiros ingredientes terem sido misturados, as fibras curtas foram incorporadas aos poucos, junto com o restante da água. O processo de mistura na argamassadeira deu-se por encerrado após inspeção visual na argamassa, atentando para que o mesmo apresentasse um aspecto homogêneo; no entanto, a argamassadeira esteve em operação por pelo menos 5 minutos. Finalizado esta etapa partiu-se para aplicação da argamassa com fibras curtas nos protótipos (Figura 69). A aplicação da argamassa de revestimento ocorreu diretamente nas paredes, ou seja, não foi utilizado chapisco para a aplicação.

Figura 69 - Aplicação da argamassa de cal com fibras curtas de sisal no protótipo de alvenaria.



Fonte: O autor (2019).

Com referência ao tecido de sisal, inicialmente foram produzidos tecidos suficientes a partir de tear de pregos (Figura 70), confeccionados artesanalmente para este trabalho. Os tecidos foram desenvolvidos com espaçamento de 10 mm tanto na trama quanto no urdume, apresentando aspecto final semelhante a uma tela (Figura 71). A aplicação do reforço se deu na preparação da argamassa utilizando o mesmo traço da argamassa com fibras curtas. Após a mistura, aplicou-se uma camada inicial de argamassa no protótipo de alvenaria, em seguida posicionou-se o tecido, ainda preso ao tear, na parede e então aplicou-se mais uma camada de argamassa, cobrindo dessa forma todo o tecido. Finalizado a aplicação da argamassa nas alvenarias, partiu-se para a retirada do tecido do tear, feito através do simples corte com uma tesoura e/ou estilete nas extremidades de cada trama/urdume. Por fim, realizou-se o acabamento com argamassa nas bordas do protótipo. A Figura 72 mostra o processo de do posicionamento do tecido na argamassa.

Figura 70 - Tear de pregos utilizado para produção dos tecidos de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 71 - Aspecto final do tecido de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 72 - Etapas da aplicação do tecido de sisal como reforço.



Fonte: O autor (2019).

Realizada a aplicação dos dois reforços, os protótipos permaneceram em laboratório em processo de cura de 90 dias, até serem submetidos aos ensaios de compressão normal e compressão diagonal.

### **3.3. CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE CAL**

Nesta seção, descrevem-se os ensaios realizados para caracterização da argamassa produzida, tanto no estado endurecido quanto na determinação de parâmetros relacionados à cal e a areia.

No que tange a caracterização dos materiais que compõem a argamassa, foram realizados ensaios na areia e na cal para obtenção de índices relativos à medição do traço. A cal foi caracterizada quanto à massa unitária e a massa específica, enquanto a areia, além destes foi realizado também a distribuição granulométrica.

Quanto à caracterização no estado endurecido, foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

#### **3.3.1. MASSA UNITÁRIA DA CAL E AREIA**

A determinação da massa unitária de um agregado é feita através da relação entre sua massa e seu volume não compacto, fornecendo assim indicações sobre o volume que o material ocupa quando disposto em determinado recipiente. É a partir dele que é possível a conversão de traços em volume para traços em massa (e vice-versa).

Para a areia, a determinação da massa unitária foi efetuada seguindo a NBR NM 45 (ABNT, 2006), sendo utilizado recipiente cilíndrico de volume conhecido de  $7,91 \text{ cm}^3$ . A amostra foi exposta a secagem ao ar durante 15 dias antes de realizar o ensaio. Passado esse período, foi coletada uma quantidade de areia suficiente (no mínimo o dobro do valor do recipiente cilíndrico) e lançada de uma altura de cerca de 10 a 12 cm da borda, até que o mesmo transbordasse. Registraram-se as massas do recipiente antes e depois do lançamento do material. A massa unitária foi determinada pela relação entre a diferença de massas do recipiente e o volume deste, expressa em  $\text{g/cm}^3$ .

A obtenção da massa unitária da cal foi baseada na NBR 12127 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó (ABNT, 1991). O procedimento consiste na colocação da amostra do pó em estudo em um funil tronco-cônico, com a função de direcionar e preencher outro recipiente cilíndrico até que o mesmo transborde. Após o completo preenchimento, a superfície do cilindro é nivelada e levada à balança para ser pesada. A massa unitária, em  $\text{g/cm}^3$ , é dada pela relação entre a diferença de massas (recipiente cheio e

vazio) e o volume do recipiente.

Os valores obtidos da massa unitária para a areia e a cal são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Massa unitária da areia e cal, materiais utilizados no programa experimental.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia	1,57
Cal	0,48

Fonte: O autor (2019).

### 3.3.2. MASSA ESPECÍFICA DA CAL E AREIA

A massa específica da areia foi determinada através do procedimento descrito na NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009). A definição do parâmetro se dá através do quociente entre a massa da amostra de areia (esta que precisa se encontrar na condição saturada com superfície seca) e a massa de água destilada deslocada, sendo o resultado expresso em g/cm<sup>3</sup>.

Para a cal, a massa específica foi determinada através da NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017). O valor é obtido através da média de dias determinações, sendo a massa específica da cal calculada pela relação entre a sua respectiva massa e o volume do líquido por ele deslocado. A massa específica da cal foi expressa em g/cm<sup>3</sup>.

Os valores obtidos da massa específica para a areia e a cal de estudo são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Massa específica da areia e cal.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia	2,63
Cal	2,36

Fonte: O autor (2019).

### 3.3.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA

A composição granulométrica de um agregado se refere à porcentagem que cada partícula de determinado tamanho compõe uma amostra. A areia utilizada na produção da argamassa foi analisada através de peneiramento, organizadas de forma crescente de abertura de malha. O ensaio se baseou na NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica (ABNT, 2017),

sendo adota as peneiras da série normal: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 600 $\mu$ m; 300  $\mu$ m; 0,15  $\mu$ m. As porcentagens retidas e a acumuladas, em cada peneira, foram calculadas, e representada graficamente à curva granulométrica do agregado.

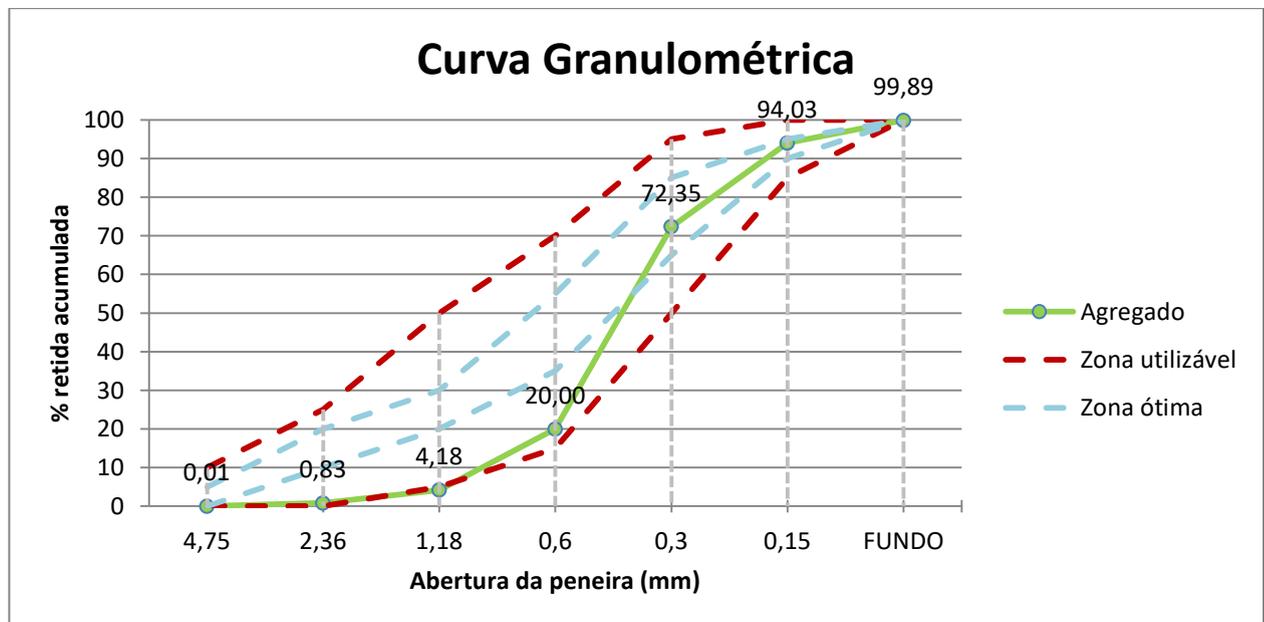
Além da curva granulométrica, foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica a partir do ensaio de distribuição granulométrica. O primeiro foi obtido pela soma das porcentagens retidas acumuladas de cada peneira da série normal dividida por 100. A dimensão máxima característica, corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. A Tabela 5 e a Figura 73 apresentam os resultados obtidos na determinação da composição granulométrica.

Tabela 5 - Análise granulométrica da areia utilizada na produção da argamassa.

Abertura da peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
4,75	0,01	0,01
2,36	0,83	0,83
1,18	3,35	4,18
0,6	15,81	20,00
0,3	52,35	72,35
0,15	21,68	94,03
Fundo	5,86	99,89
Módulo de Finura	2,90	
Dimensão Máxima Característica	1,18 mm	

Fonte: O autor (2019).

Figura 73 - Gráfico da curva granulométrica da areia e faixas de classificação da NBR 7211 (ABNT 2019).



Fonte: O autor (2019).

O valor do módulo de finura obtido para a areia utilizada na produção das argamassas encontra-se classificada no limite da zona ótima de acordo com a classificação da ABNT NBR 7211:2019 – Agregados para concreto – Especificações (Quadro 5).

Quadro 5 - Classificação do agregado em função do módulo de finura, segundo a ABNT NBR 7211:2019.

<b>Módulo de finura</b>	
Zona utilizável inferior	1,55 – 2,20
Zona ótima	2,20 – 2,90
Zona utilizável superior	2,90 – 3,50

Fonte: O autor (2019).

### **3.3.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA POR MEIO DE ULTRASSOM**

É necessário que a argamassa de revestimento apresente capacidade de deformar-se sob a ação de tensões resultantes de carregamento, de variações térmicas ou da retração. Quando há o impedimento da deformação na argamassa endurecida, surgem tensões de tração no revestimento, já a partir das primeiras idades, que podem levar à fissuração (BASTOS *et al*, 2010). Dessa maneira, é importante a avaliação desse parâmetro que está relacionado diretamente com o comportamento elástico, fornecendo assim informações a respeito da deformabilidade e da rigidez da argamassa em estudo.

O módulo de elasticidade foi determinado em corpos de prova prismáticos de dimensões 40x40x160 mm por ensaio de emissão de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica conforme descrito na NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de ondas ultrassônica (ABNT, 2009). Durante o ensaio utilizou-se o aparelho de ultrassom da marca CONTROLS, modelo UPVE48, com transdutores de 54 kHz.

O ensaio se configura acoplando os transdutores nas extremidades do corpo de prova no qual são emitidos pulsos elétricos de baixa frequência ultrassônica, e através dessas emissões, são realizadas leituras do tempo de propagação das ondas que atravessam o material, exibida no painel do aparelho (Figura 74).

Figura 74 - Ensaio de módulo de elasticidade por meio de ultrassom.



Fonte: O autor (2019).

Para este ensaio, foram utilizados corpos de prova com idade de 90 dias com duas composições denominadas de ASF – Argamassa sem fibra (cal + areia) e ACF – Argamassa com fibra (cal + areia + fibras curtas), 6 unidades para a primeira e 7 unidade para segunda composição. A partir do registro de valores de tempo e conhecendo o comprimento do corpo de prova, calculou-se a velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos. O módulo de elasticidade  $E_d$  é calculado pela expressão [4] apresentada pela NBR 15630 (ABNT, 2009), esta última que adotou o mesmo critério da norma britânica BS 1881 – *British Standart Institution Testing concrete – Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*:

$$E_d = \rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad [4]$$

Onde:

$E_d$  – Módulo de elasticidade (MPa);

$\rho$  – Densidade do corpo de prova (kg/m<sup>3</sup>);

$V$  – Velocidade do pulso (km/s);

$\nu$  – Coeficiente de Poisson – adotado igual a 0,2 na norma brasileira.

### 3.3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A avaliação das características mecânicas das argamassas aqui estudadas é de fundamental importância, pois pode-se quantificar a influência direta que a introdução das fibras proporciona para o produto final. Diversos são os fatores que podem interferir, de forma positiva ou não, nos parâmetros mecânicos das argamassas com adição de fibras, tais como, o

tipo, a geometria (tamanho e seção transversal) e o módulo de elasticidade da fibra.

Já para Lima (2004), o tipo de ruptura dos elementos compósitos fletidos é influenciado pelo tipo, teor e comprimento das fibras. Para fibras curtas e aleatoriamente orientadas, **após a fissuração da matriz**, na região tracionada do elemento, há uma redução imediata da capacidade portante, mas sem ruptura: o compósito continua a resistir a cargas aplicadas até que as fibras sejam arrancadas da matriz.

O ensaio de tração na flexão consistiu em avaliar a máxima tensão suportada por um corpo de prova prismático 40x40x160 mm, simplesmente apoiado, com aplicação de carga concentrada no centro do eixo longitudinal da peça, com incremento de carga de  $50 \pm 10$  N/s. A força de ruptura no corpo de prova, na flexão, corresponde à máxima carga registrada pela máquina durante o ensaio. A resistência à tração por flexão, de cada corpo de prova, foi obtida pela expressão [5]:

$$R_T = 1,5(F_T \cdot L) / 40^3 \quad [5]$$

Onde:

$R_T$  – Resistência à tração na flexão (MPa);

$F_T$  – Carga máxima aplicada verticalmente no centro do corpo de prova (N);

$L$  – Distância entre os apoios do corpo de prova (mm).

No ensaio de resistência à compressão aproveitaram-se os corpos de prova provenientes do ensaio de tração na flexão. Ao posicionar os prismas nas peças de adaptação da máquina ao ensaio de compressão, este garante área de contato de 1600 mm<sup>2</sup>, de seção quadrada, onde foi aplicado incremento de carga de  $500 \pm 50$  N/s. A resistência à compressão se dá fazendo a simples relação entre a carga máxima registrada na máquina pela área da seção transversal do prisma, conforme a expressão [6]:

$$R_C = F_C / A \quad [6]$$

Em que:

$R_C$  – Resistência à compressão (MPa);

$F_C$  – Carga máxima aplicada ao corpo de prova (N);

$A$  – Área da seção quadrada do dispositivo, 40x40 mm (mm<sup>2</sup>).

Os ensaios foram executados no Laboratório de Ensaio Mecânicos –LEM da UFBA em prensa hidráulica servo controlada, da marca PAVTEST, com leitura digital, com célula de carga com capacidade de 5000 kgf e resolução de 1kgf (Figura 75).

Figura 75 - Ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à compressão.



Fonte: O autor (2019).

### 3.3.6. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A NBR 13528-3 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas (ABNT, 2019) define revestimento em argamassa como “o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final” formando, junto com a decoração, um sistema que deve ser compatível com: a natureza da base, as condições de exposição, o acabamento final e o desempenho previsto em projeto (GOLÇALVES e BAUER, 2005).

Dessa maneira, dentre as principais propriedades de uma argamassa no estado endurecido a aderência ao substrato representa a propriedade mecânica com maior relevância ao se avaliar um sistema de revestimento, além disso, seu desempenho estrutural depende do desenvolvimento adequado da aderência, e da interação de vários fatores que influenciam diretamente essa propriedade (CINCOTTO *et al*, 1995).

A resistência de aderência à tração decorre de um fenômeno mecânico, resultante da ancoragem da argamassa nas reentrâncias e saliências macroscópicas da parede, onde é influenciada diretamente pelo processo de execução, pelas características da argamassa e do substrato, e pelas trocas de umidade. Quando a argamassa entra em contato com o substrato, parte da água de amassamento que contém em dissolução os componentes do aglomerante

penetra nos poros e cavidades da base. Durante o processo de cura, o material precipitado, irá proporcionar a ancoragem da argamassa ao suporte. A intensidade desse fenômeno, decorrente da sucção capilar, irá depender das características e propriedades da base, tais como a matéria-prima, a porosidade, a capacidade de absorção de água e a textura superficial (CARASEK *et al*, 2001).

A aderência é fortemente influenciada pela distribuição de poros da base sobre a qual a argamassa é aplicada, em função de sua grande influência na capacidade de absorção de água do substrato. A quantidade de poros com diâmetro superior a 50  $\mu\text{m}$  (denominados macroporos) exerce grande influência na capacidade de absorção de água, uma vez que esses são os principais responsáveis pela permeabilidade da base. As características do tijolo utilizado na confecção dos protótipos de alvenaria são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização da base utilizada.

<b>Tipo de base</b>	<b>Dimensões (cm)</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Coef. de Variação (%)</b>	<b>Índice de absorção de água (%)</b>
<b>Tijolo maciço</b>	19x9x9	0,62	6,12	34,57

Fonte: O autor (2019).

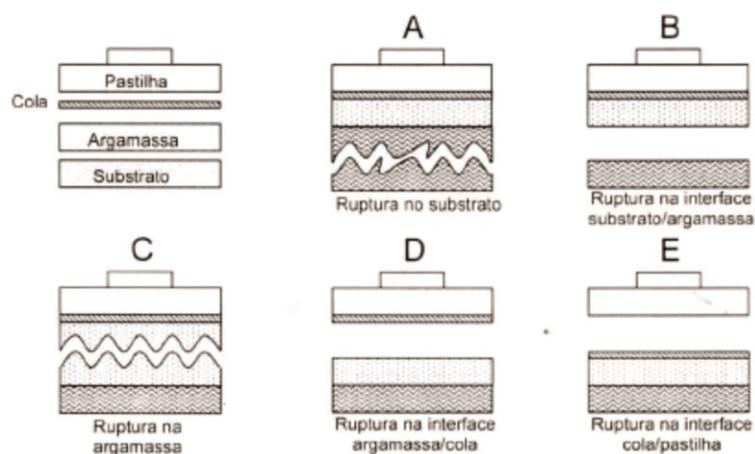
O procedimento adotado foi o descrito na NBR 13528-3 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas (ABNT, 2019), utilizando-se corpos de prova de seção circular, com 50 mm de diâmetro. Primeiramente procedeu-se com o corte dos corpos de prova nos protótipos de paredes utilizando uma serra copo, em seguida, foram coladas com cola epóxi em pastilhas metálicas. Os corpos de prova ficaram 48 horas em processo de cura do adesivo. Após esse período o ensaio se deu utilizando equipamento específico para o procedimento, que permite a leitura do esforço de tração máximo necessário à ruptura da área limitada do corpo de prova (Figura 76). Utilizou-se dinamômetro de tração analógico, de 5,0 kN de força máxima e precisão de 0,05 kN, marca FRITSCHI GMBH, modelo D90459, do NTPR. Feita a leitura da força necessária para o arrancamento da argamassa prosseguiu-se com a avaliação do tipo de ruptura obtida, com base nas referências da NBR 13528-3 (ABNT, 2019) (Figura 77).

Figura 76 - Ensaio de resistência de aderência à tração.



Fonte: O autor (2019).

Figura 77 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência.

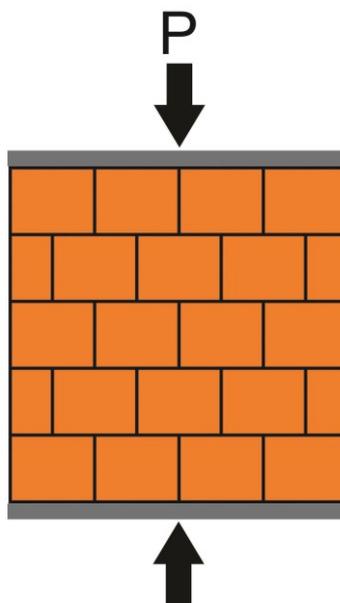


Fonte: NBR 13528-3 (ABNT, 2019, p. 9)

### 3.3.7. COMPRESSÃO NORMAL E COMPRESSÃO DIAGONAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA

O ensaio de compressão normal de prismas (Figura 78) é considerado universalmente como a forma mais econômica e confiável de avaliar indiretamente a resistência à compressão da alvenaria. Trata-se de um ensaio de pouco custo e relativamente simples, sendo especialmente útil para estudar os diversos fatores que influenciam a resistência à compressão da alvenaria, como a geometria da unidade, a espessura da junta, a composição da argamassa, o tipo de assentamento, entre outros parâmetros.

Figura 78 – Representação do ensaio de compressão normal em prismas.



Fonte: O autor (2019).

Diversos são os fatores que influenciam diretamente a resistência à compressão de alvenarias:

- Resistência da unidade, da argamassa;
- Geometria da unidade e espessura da junta;
- Coeficientes de Poisson da argamassa e da cerâmica das unidades;
- Propriedades de deformação dos componentes da alvenaria;
- Taxa de absorção de água da unidade;
- Retentividade de água da argamassa;
- Qualidade da mão de obra;
- Condições de cura.

Após a preparação, os protótipos são submetidos à compressão normal até a ruptura final. O principal dado extraído do ensaio é a curva tensão-deformação (Figura 79). As tensões normais são obtidas dividindo-se a carga de compressão  $P$ , aplicada pela máquina de ensaio, pela área da seção transversal  $A$  do protótipo, de forma que:

$$\sigma = P/A \quad [7]$$

Onde:

$\sigma$  – Tensão de compressão (MPa);

$P$  – Carga aplicada (N);

$A$  – Área da seção transversal (mm<sup>2</sup>);

Já as deformações específicas longitudinais  $\varepsilon$  podem ser lidas diretamente por meio dos “*strain-gauges*” ou ainda, obtidas através da relação [8], válida somente no regime de pequenas deformações:

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad [8]$$

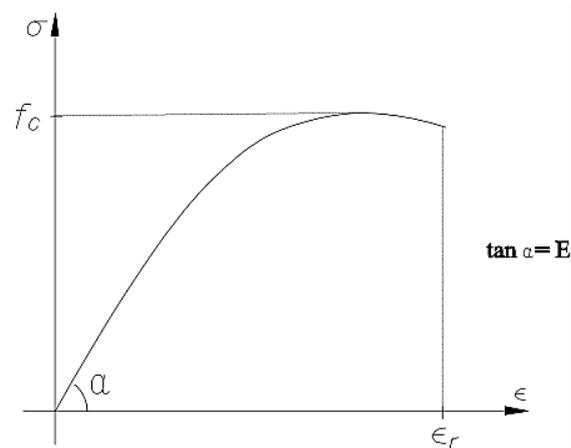
Onde:

$\varepsilon$  - Deformação específica (mm/mm);

$\Delta L$  - Variação de comprimento do corpo de prova (mm);

L - Comprimento inicial do corpo de prova (mm);

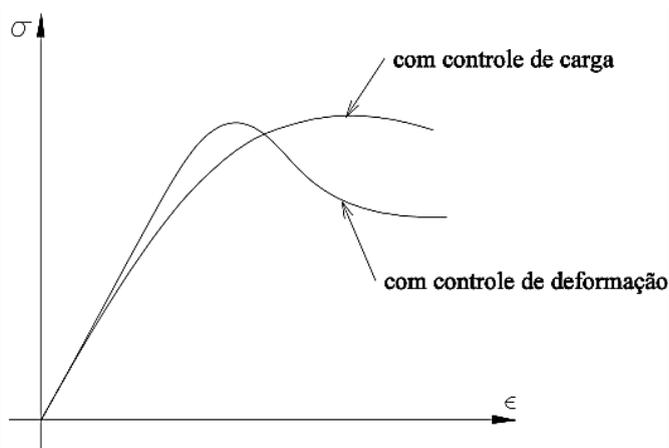
Figura 79 - Curva tensão-deformação de um material frágil: propriedades elásticas do material obtidas no ensaio com controle da velocidade de carga.



Fonte: Gomes (2001, p. 21)

De acordo com Gomes (2001), há dois aspectos importantes que merecem destaque: durante o ensaio não é estabelecido um estado de tensão uniaxial em todo o corpo, isso se dá devido ao atrito entre a prensa e o corpo de prova. Outro aspecto é relativo à maneira como o ensaio é conduzido: se com o controle da velocidade de aplicação da carga de compressão ou com o controle da velocidade de deformação. Quando se realiza o ensaio com controle de velocidade de carga, opção mais comum, o diagrama obtido não fornece todos os trechos da curva. Quando se faz com o controle da velocidade de deformação a mesma curva passa a apresentar um trecho descendente (Figura 80). Esta forma de conduzir o ensaio é mais precisa pois consegue captar toda a história de tensões no material, entretanto, é mais difícil encontrar na literatura um ensaio realizado com controle de deformação, uma vez que este exige um equipamento mais sofisticado.

Figura 80 - Diagramas tensão-deformação com controle de velocidade de cargas e deformações.



Fonte: Gomes (2001, p. 22)

A resistência à tração das alvenarias é uma característica fundamental utilizada na previsão de formação de fissuras, e, de maneira geral, é expressa em função da resistência à compressão dos materiais. Dentre os possíveis testes, o ensaio mais utilizado para determinar a resistência ao cisalhamento é provavelmente o ensaio de compressão diagonal. A popularização deste ensaio pode estar ligada pela semelhança da forma de ruptura do corpo de prova no ensaio com a ruptura de paredes de edifícios sujeitos a ações de esforços laterais. O mecanismo de ruptura depende da orientação das juntas em relação à direção da força aplicada. A ruptura da parede pode se dar pela falha individual das juntas ou se dá de forma mista, envolvendo a argamassa de assentamento e as unidades de alvenaria.

Para a determinação da resistência ao cisalhamento, os ensaios basearam-se no método descrito na norma ASTM E 519 – *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages* (ASTM 2015). O ensaio consiste na aplicação de força vertical ao longo de uma das diagonais da parede. A força de cisalhamento é medida dividindo os componentes da força paralela às arestas do corpo de prova pela área da seção obtida pela multiplicação do comprimento e da espessura da parede, como indicado nas expressões [9] e [10], e representado na Figura 81:

$$S_s = 0,707P/A_n \quad [9]$$

Onde:

$S_s$  – Tensão de cisalhamento (MPa);

$P$  – Carga máxima aplicada ao corpo de prova (N);

$A_n$  – Área bruta ou líquida das duas faces contíguas ao carregamento ( $\text{mm}^2$ ), calculada por:

$$A_n = \left( (L + D)/2 \right) t \quad [10]$$

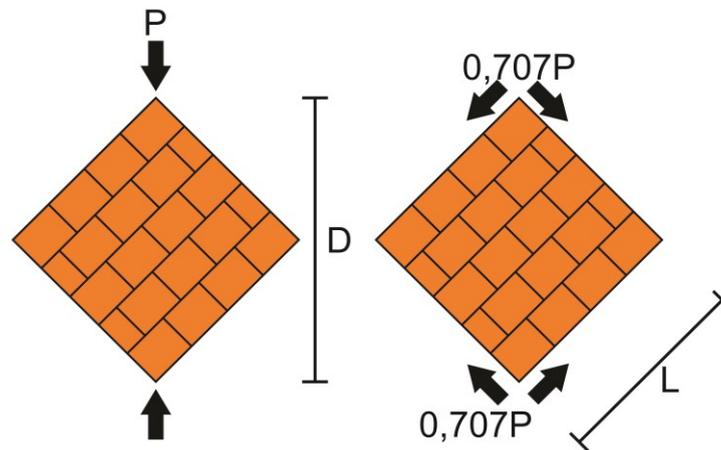
Em que:

L - Largura da parede (mm);

D - Altura da parede (mm);

t - Espessura da parede (mm);

Figura 81 - Representação do ensaio de compressão diagonal segundo a ASTM E 519 (ASTM, 2015).



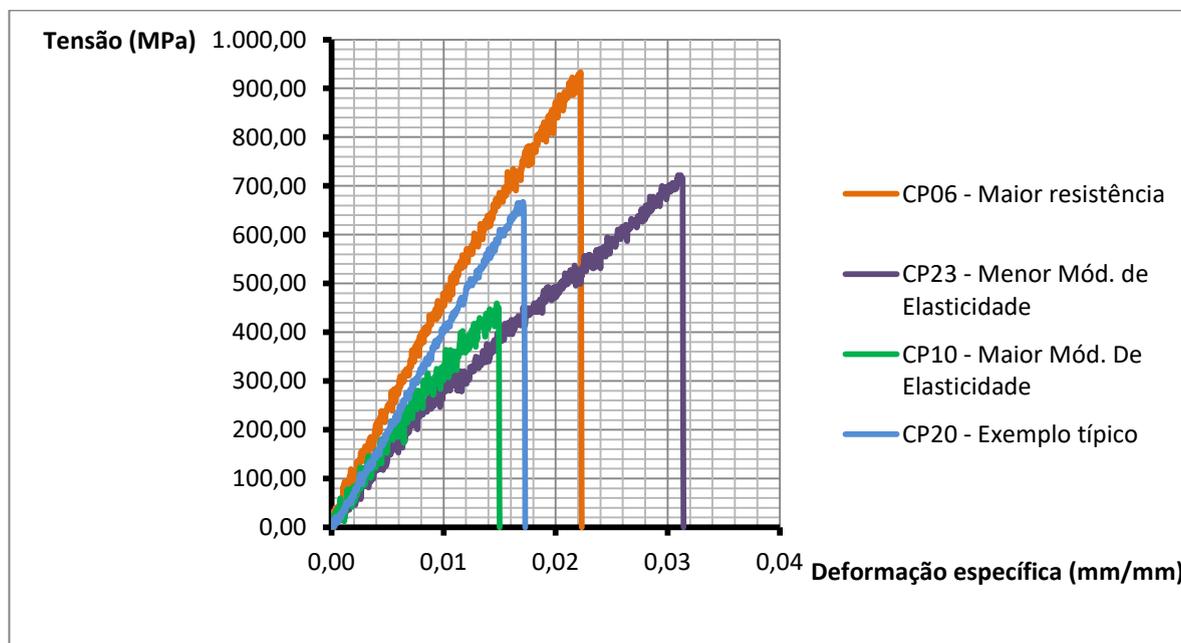
Fonte: Adaptado de Tanner, Parker e Varela (2019, p. 63).

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. TRAÇÃO NAS FIBRAS UNIFILARES

Foram submetidas ao ensaio de tração direta vinte e cinco fibras escolhidas aleatoriamente do montante hornificado. Para o cálculo do módulo de elasticidade utilizou-se a faixa de valores situados entre 20% e 80% da tensão máxima, obtidos através da análise do diagrama Tensão x Deformação Específica, onde o diagrama apresentou comportamento linear. Ao final do ensaio foram obtidos, através das leituras do equipamento, os dados do deslocamento da garra e conseqüentemente da força empregada, sendo possível então o cálculo da tensão e da deformação. A Figura 82 traz uma comparação entre quatro fibras ensaiadas, estas que dentre toda a amostragem apresentaram maior resistência, maior e menor módulo de elasticidade e a fibra mais próxima da resistência média. De acordo com Caldas (2014), o comportamento da fibra de sisal no ensaio de tração direta revela-se primeiramente com deformação elástica, alcançando um aumento da tensão e da deformação até atingir o ponto de ruptura, comportamento típico das fibras vegetais.

Figura 82 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração direta nas fibras de sisal.



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 7 apresenta os resultados médios, desvios padrões e coeficientes de variação dos seguintes parâmetros: área, deformação específica na ruptura, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tabela 7 - Resumo do ensaio de tração direta nas fibras.

<b>N=25</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformação Específica na ruptura (mm/mm)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
<b>Média</b>	18,38 x 10 <sup>-3</sup>	0,0210	673,14	25,73
<b>Desvio Padrão</b>	4,65 x 10 <sup>-5</sup>	4,01 x 10 <sup>-3</sup>	158,37	6,00
<b>Coef. Variação (%)</b>	25,33	19,11	23,53	23,33

Fonte: O autor (2019).

As fibras ensaiadas apresentaram comportamento variado tanto nos parâmetros analisados quanto na geometria das curvas dos diagramas tensão x deformação. Desvios semelhantes das propriedades, quando submetidas à tensão axial, foram constatados por outros autores como Carvalho (2005), Cerchiaro (2010), Caldas (2014) e Arruda Filho (2015), onde se considera a hipótese da heterogeneidade química e física da fibra natural, além das variações de seção ao longo do comprimento, uma vez que a parte da folha que se encontra mais próxima ao caule apresenta uma seção maior, mais antiga e com paredes celulares mais robustas. Outros fatores como variações climáticas (temperatura, índice pluviométrico da região, umidade, exposição ao sol, entre outros) e o processo de desfibramento, que causa pré-estiramentos diferentes no produto final, também podem interferir no desempenho da fibra.

Em comparação com outros autores, a resistência à tração média foi de 673,14 MPa, valores próximos encontrados por Caldas (2014), 606,4 MPa, e Arruda Filho (2015), 722,11 MPa, entretanto distante do resultado divulgado por Cerchiaro (2010) que foi de 301 MPa e por Duro (2013), 412 MPa.

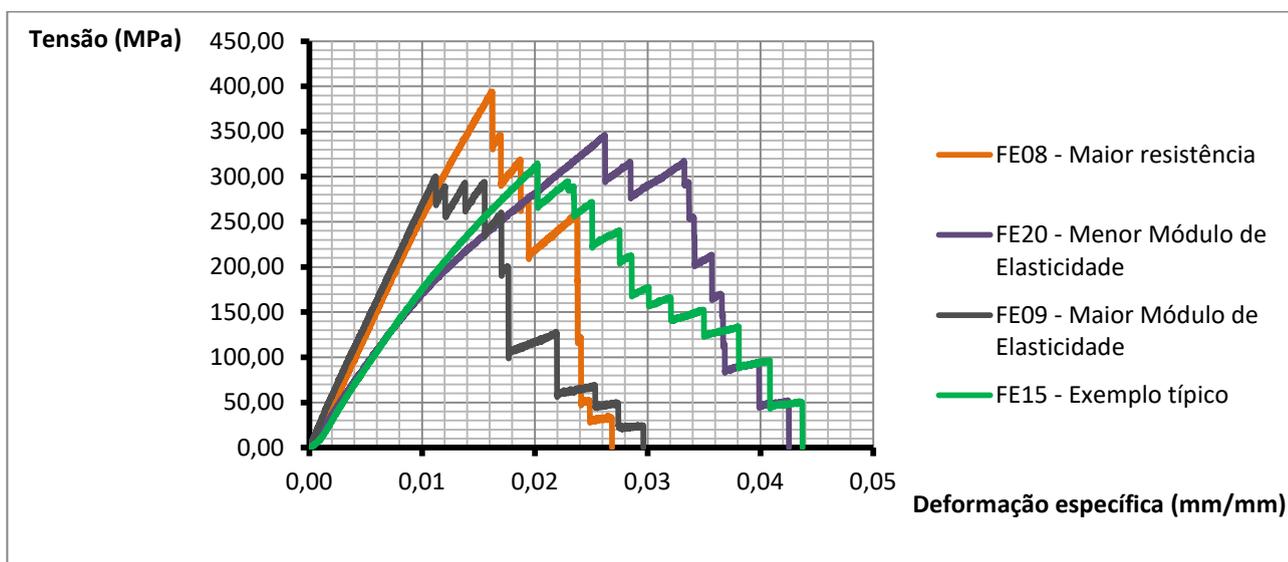
#### 4.2. TRAÇÃO NOS FEIXES

Na realização do ensaio de tração nos feixes de fibras de sisal foram utilizados vinte amostras aleatórias.

Para o cálculo do módulo de elasticidade utilizou-se a faixa de valores situados entre 20% e 80% da tensão máxima, adquirido através da análise do diagrama Tensão x Deformação Específica, onde o gráfico apresentou comportamento linear. Ao final do ensaio foram obtidos, através das leituras do equipamento, os dados do deslocamento da garra e conseqüentemente da força empregada, sendo possível então o cálculo da tensão e da deformação. A Figura 83 apresenta uma comparação entre quatro fibras ensaiadas, dentre toda a amostragem, que apresentaram maior resistência, maior e menor módulo de elasticidade e a fibra mais próxima

da resistência média. De acordo com Arruda Filho (2015), o comportamento do feixe de sisal pode ser dividido em duas fases distintas: na primeira há uma acomodação das fibras com consequente ganho crescente de rigidez até a primeira ruptura; a segunda fase inicia-se após a ruptura da primeira fibra com consequente ruptura dos outros componentes do feixe.

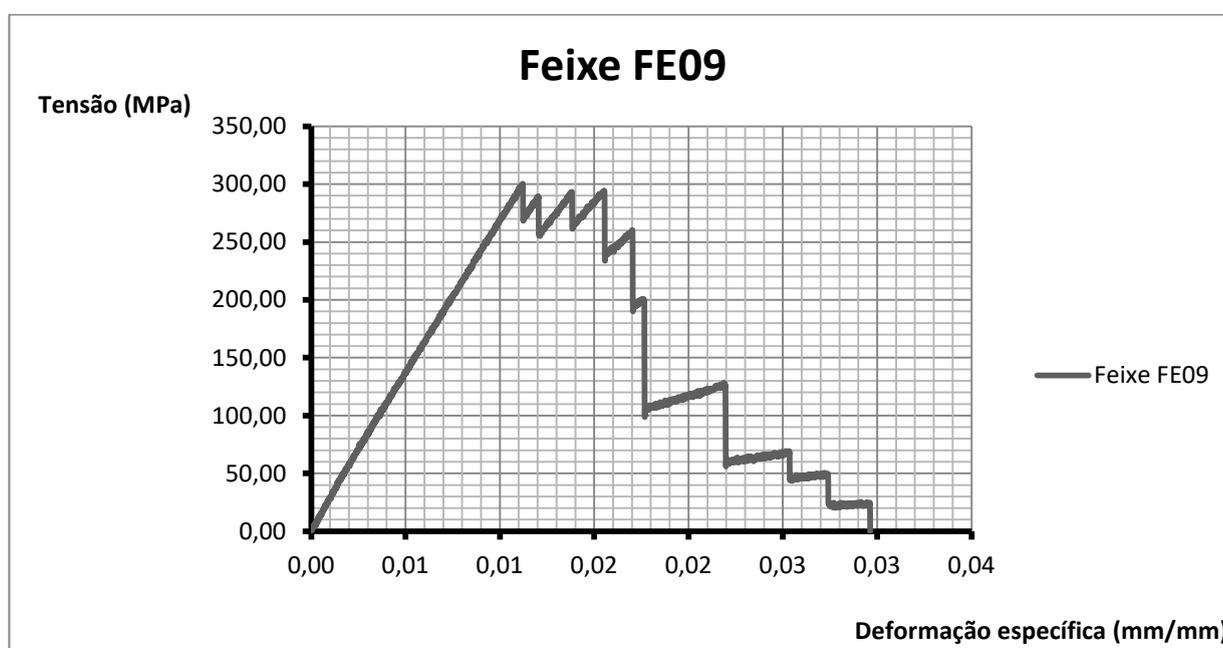
Figura 83 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração nos feixes de sisal.



Fonte: O autor (2019).

A partir da análise do gráfico gerado observa-se que após o rompimento da primeira fibra ocorre um aumento da resistência, devido às fibras que permaneceram íntegras, entretanto com um decréscimo posterior à medida que mais fibras são rompidas. A Figura 84 mostra a curva tensão x deformação do corpo de prova FE09 que demonstra o que foi supracitado, com destaque para as dez descontinuidades no gráfico que representam o rompimento de cada fibra do feixe.

Figura 84 - Curva Tensão x Deformação do corpo de prova FE09.



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 8 apresenta os resultados médios, desvios padrões e coeficientes de variação dos seguintes parâmetros: área, deformação específica na ruptura, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tabela 8 - Resumo do ensaio de tração direta nos feixes de sisal.

N=20	Área (mm <sup>2</sup> )	Deformação Específica na ruptura (mm/mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
<b>Média</b>	$182,32 \times 10^{-3}$	0,0180	318,37	19,52
<b>Desvio Padrão</b>	$3,53 \times 10^{-4}$	$4,62 \times 10^{-3}$	41,80	4,72
<b>Coef. Variação (%)</b>	19,40	25,68	13,13	24,16

Fonte: O autor (2019).

Comparando os resultados encontrados no ensaio de tração das fibras, observa-se que estes apresentam redução nos valores médios do desempenho mecânico. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato dos feixes serem compostos por múltiplas fibras, dessa forma, quando ocorre a ruptura de uma fibra e, conseqüentemente, redução na área da seção transversal, este novo valor não é atualizado.

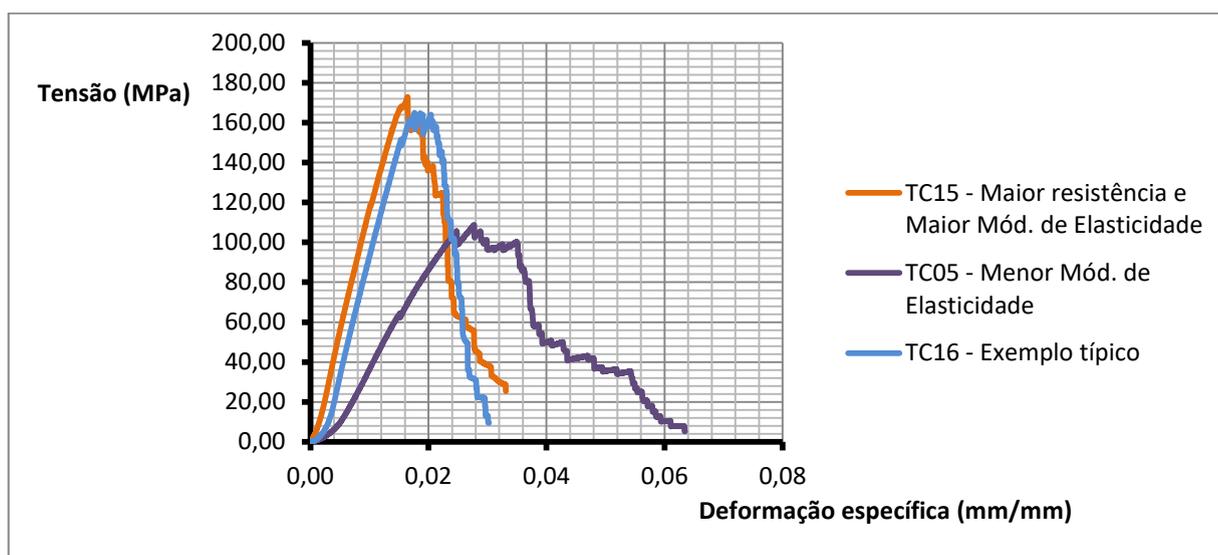
A resistência média obtida no ensaio de tração foi de 318,37 MPa, valor intermediário encontrados por Caldas (2014), que obteve valor médio de 361,8 MPa, e Arruda Filho (2015), que obteve valor médio de 276,50 MPa.

### 4.3. TRAÇÃO NOS TECIDOS

Na realização do ensaio de tração nos tecidos de fibras de sisal foram utilizados vinte amostras aleatórias.

A Figura 85 traz uma comparação entre três corpos de prova ensaiados, dentre toda a amostragem que apresentaram maior resistência, maior e menor módulo de elasticidade e o tecido mais próximo da resistência média.

Figura 85 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração nos tecidos de sisal.



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 9 apresenta os resultados médios, desvios padrões e coeficientes de variação dos seguintes parâmetros: área, deformação específica na ruptura, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tabela 9 - Resumo do ensaio de tração direta nos tecidos de sisal.

N=20	Área (mm <sup>2</sup> )	Deformação Específica na ruptura (mm/mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
<b>Média</b>	258,46 x 10 <sup>-2</sup>	0,020	136,33	9,37
<b>Desvio Padrão</b>	2,30 x 10 <sup>-3</sup>	3,45 x 10 <sup>-3</sup>	20,59	2,01
<b>Coef. Variação (%)</b>	8,92	17,01	15,10	21,41

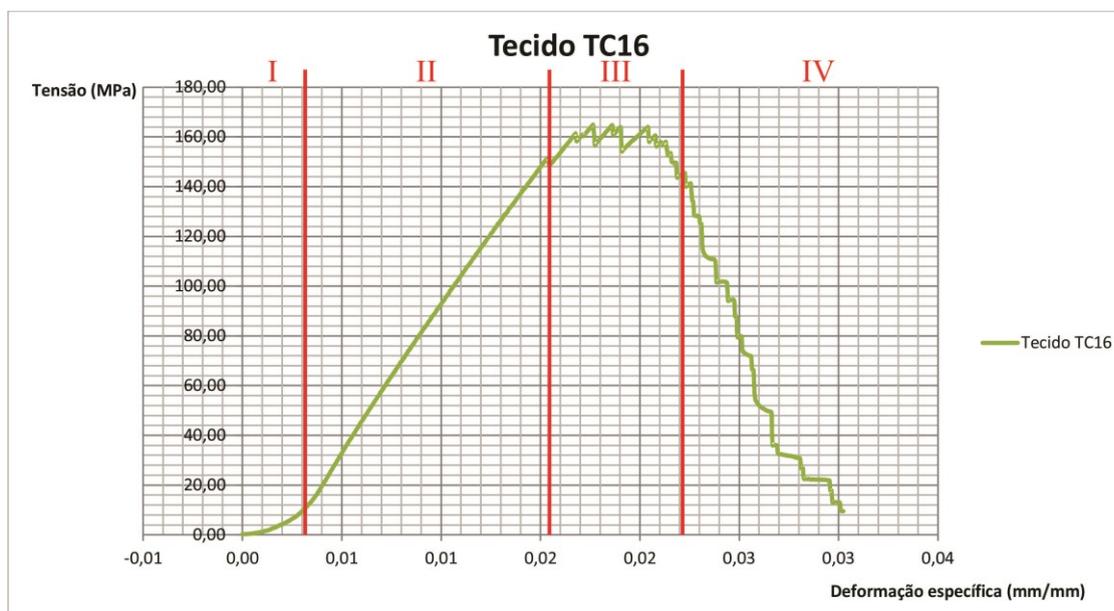
Fonte: O autor (2019).

Analisando o comportamento do tecido submetido ao ensaio de tração, a partir do

diagrama tensão x deformação, observa-se quatro fases distintas, ilustrada na Figura 86:

- Na fase I, ocorre uma acomodação das fibras, em outras palavras, o tecido se ajusta às garras fazendo com que todas as fibras apresentem alguma tensão de tração;
- Na fase II, acontece o aumento da tensão, da deformação e da rigidez, até imediatamente antes da ruptura das fibras;
- Na fase III inicia-se a ruptura gradual das fibras que compõem o tecido;
- Na fase IV, caracteriza-se pelo escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, uma vez que, a maior parte delas já rompeu.

Figura 86 - Fases do comportamento do tecido de sisal submetido à tração.



Fonte: O autor (2019).

O “escorregamento” entre as fibras, citado anteriormente, apresenta característica interessante dos tecidos. No início do esforço mecânico de tração, as fibras de um mesmo feixe estão íntegras, contribuindo dessa forma, individualmente, para a resistência à solicitação das garras da máquina. Após a ruptura, observa-se no diagrama uma pequena parcela de resistência à tração, parcela essa proveniente do atrito lateral entre fibras adjacentes e das fibras que compõem o urdume (direção perpendicular).

#### 4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DA ARGAMASSA DE CAL

A Tabela 10 apresenta os valores resultantes do ensaio de módulo de elasticidade realizados nos dois tipos de corpos de prova.

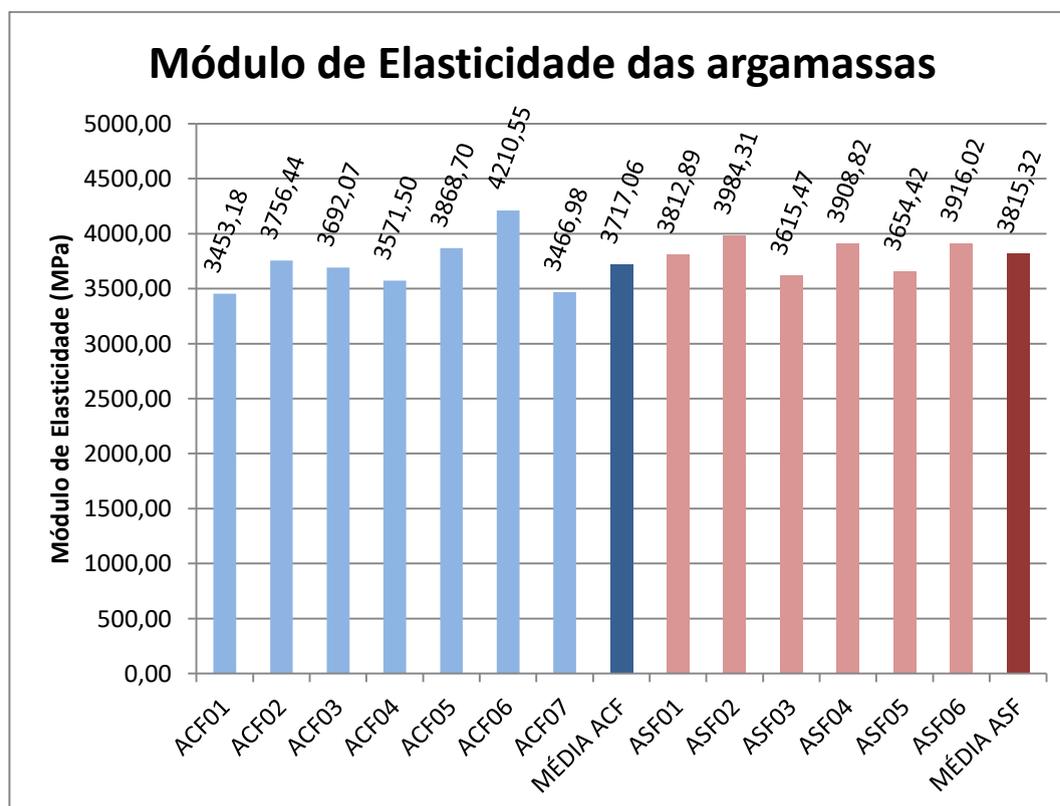
Tabela 10 - Resumo dos valores obtidos no ensaio do Módulo de Elasticidade das argamassas.

Composição	Módulo de Elasticidade (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação %
ASF - Argamassa sem fibra	3815,32	150,51	3,95
ACF - Argamassa com fibra curta	3717,06	265,22	7,13

Fonte: O autor (2019).

Analisando os dados obtidos, observa-se que o módulo de elasticidade não sofreu grande variação ao se comparar as duas composições ensaiadas, sendo que, agrupando todos os corpos de prova os valores do módulo de elasticidade situam-se dentro do intervalo 3453,18 MPa e 4210,55 MPa, correspondente aos corpos de prova ACF01e ACF06, respectivamente. A Figura 87 apresenta os valores correspondentes a cada corpo de prova ensaiado.

Figura 87 - Valores do módulo de elasticidade de todos os corpos de prova analisados.

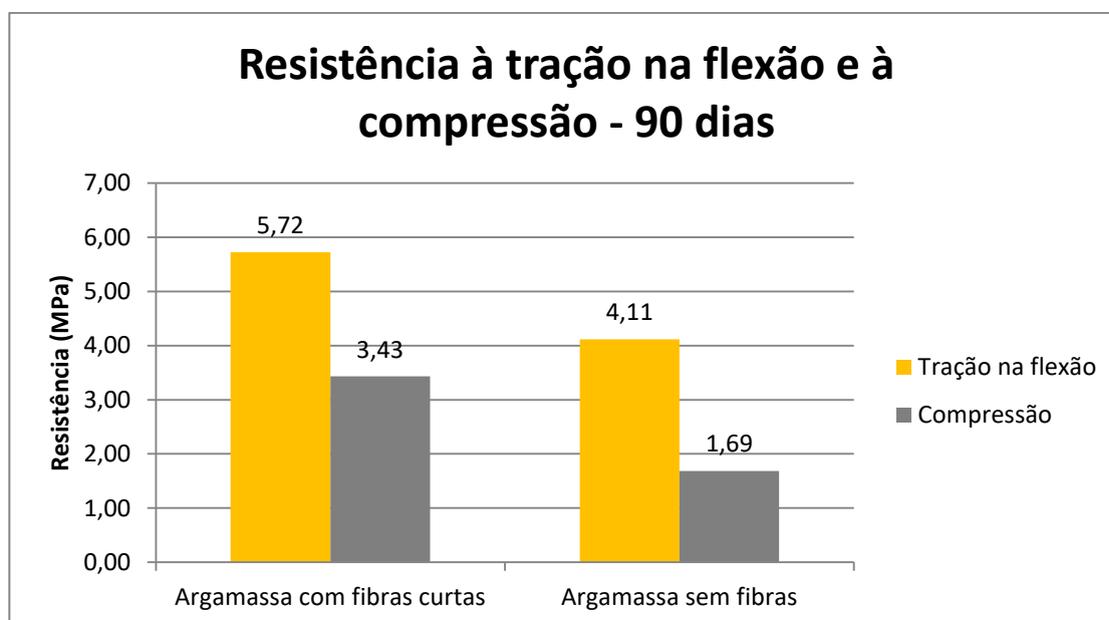


Fonte: O autor (2019).

#### 4.5. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

Os valores médios, de resistência à tração e à compressão, obtidos ao ensaiar os corpos de prova com idade de 90 dias são apresentados na Figura 88.

Figura 88 - Valores médios da resistência à tração e à compressão para as argamassas com fibras curtas e sem adição de fibras.



Fonte: O autor (2019).

A partir da análise dos resultados obtidos no ensaio, constata-se que houve aumento de resistência à tração e resistência à compressão nas argamassas com adição de fibras curtas em relação às argamassas sem fibras. Após a fissuração, os corpos de prova com adição de fibras curtas apresentaram uma carga residual que não foi observada nas argamassas sem fibras, sendo que, enquanto as últimas apresentaram ruptura frágil à presença das fibras proporcionou a matriz ruptura com propriedade dúctil, caracterizando um ganho significativo de tenacidade. A Figura 89 apresenta dois corpos de prova (argamassa com e sem adição de fibras) após a realização do ensaio de flexão, onde se demonstra o modo de ruptura das peças. Mesmo após a ruptura, as partes da matriz com adição de fibras permaneceram ligadas devido às forças de aderência entre as fibras e a argamassa.

Figura 89 - Argamassas com e sem adição de fibras curtas após a realização do ensaio de flexão.



Fonte: O autor (2019).

#### 4.6. TENSÃO DE ADERÊNCIA DA ARGAMASSA

A tensão de aderência, em MPa, foi obtida através do quociente entre a carga de ruptura registrada, em kN, e a área de contato da pastilha em mm<sup>2</sup>. Para o ensaio, foram utilizados dois protótipos de alvenaria com revestimento aplicado nas composições: argamassa com fibras curtas e argamassa sem fibras, com idade de  $90 \pm 2$  dias. A espessura de cada revestimento foi cerca de 25 mm. O valor final da tensão de aderência ( $R_a$ ) se deu pela média das determinações, onde foi obtido valor médio de 0,025 MPa para a composição com fibras curtas e 0,060 MPa para a argamassa sem fibra. A Tabela 11 apresenta os valores médios da resistência, desvio padrão e coeficiente de variação obtido.

Tabela 11 - Resultados obtidos no ensaio de aderência.

<b>Composição</b>	<b>Tensão de Aderência média (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coeficiente de variação %</b>
<b>ASF - Argamassa sem fibra</b>	0,060	0,00156	25,36
<b>ACF - Argamassa com fibra curta</b>	0,025	0,009	45,89

Fonte: O autor (2019).

Conforme foi possível verificar, os valores de resistência de aderência obtidos, para a argamassa com adição de fibra curta foi muito baixo. Uma possível explicação para tal resultado é devido à condução e preparação do ensaio. As vibrações e esforços gerados durante o corte do corpo de prova e o ajuste do equipamento para a execução do ensaio de

arrancamento, são fatores que podem induzir tensões laterais ao corpo de prova. Foi constatado que após o arrancamento das pastilhas metálicas, as fibras presentes na argamassa apresentaram orientação no mesmo sentido de giro da serra copo, o que induz a concluir que tensões devido a esforço torçor podem ter reduzido a aderência da argamassa à base. Os corpos de prova apresentaram, em toda sua totalidade, ruptura na argamassa, conforme apresentado na Figura 90. Devido à predominância da ruptura coesiva, ou seja, no interior da argamassa, pode-se concluir que a aderência entre a base e a argamassa foi maior do que às forças de coesão entre as partículas componentes da massa.

Figura 90 - Formas de ruptura da argamassa com fibras.



Fonte: O autor (2019).

#### **4.7. COMPRESSÃO NORMAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA**

Para a avaliação da influência da fibra de sisal sobre o comportamento à compressão das alvenarias revestidas com argamassa foram produzidos protótipos com as seguintes composições: alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia (CN-R); alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia com adição de fibra curta a 1% de volume (CN-FC); alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia com adição de tecido de sisal (CN-TC). Todos os protótipos respeitaram o tempo mínimo de 90 dias para cura da argamassa. Os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Materiais Tecnológicos do Instituto Federal da Bahia – IFBA.

Os resultados do ensaio de compressão normal nas paredes estão apresentados na Tabela 12. Os valores experimentais foram obtidos através da média de cada configuração de protótipo. Este experimento foi realizado em corpos de prova com dimensão 40x40x20 cm, com taxa de incremento de força de 4,0 kN/s. Nas Figuras 91 a 93 são apresentadas as curvas típicas tensão-deformação para as alvenarias estudadas.

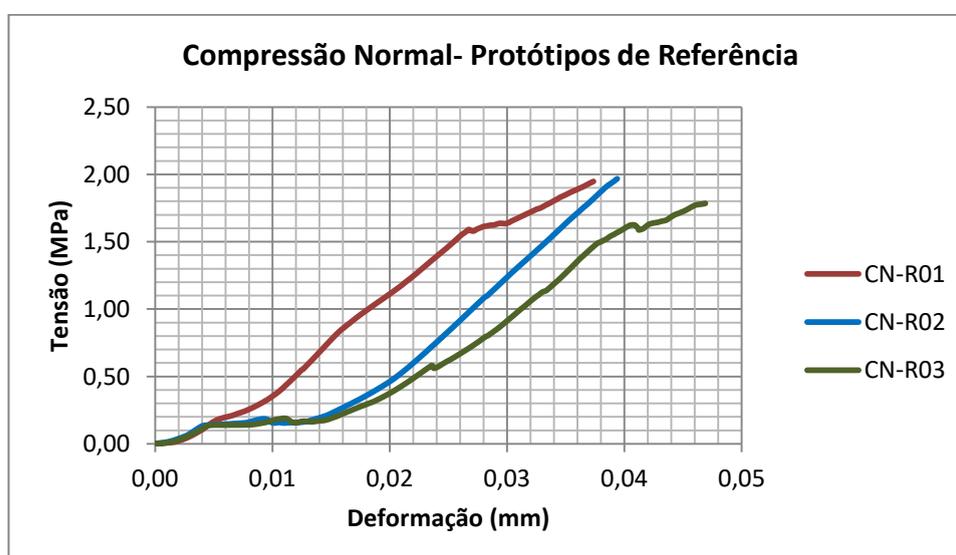
Tabela 12 - Resultados experimentais do ensaio de compressão normal.

Composição	Carga Máxima de Ruptura (kN)	Resistência à Compressão (MPa)	Deformação de Pico (mm)
CN-R	152,73	1,91 (4,66)	0,0413 (9,73)
CN-FC	212,41	2,66 (10,87)	0,1760 (3,28)
CN-TC	208,96	2,61 (11,40)	0,1832 (12,63)

\*Os valores entre parênteses representam o coeficiente de variação em porcentagem.

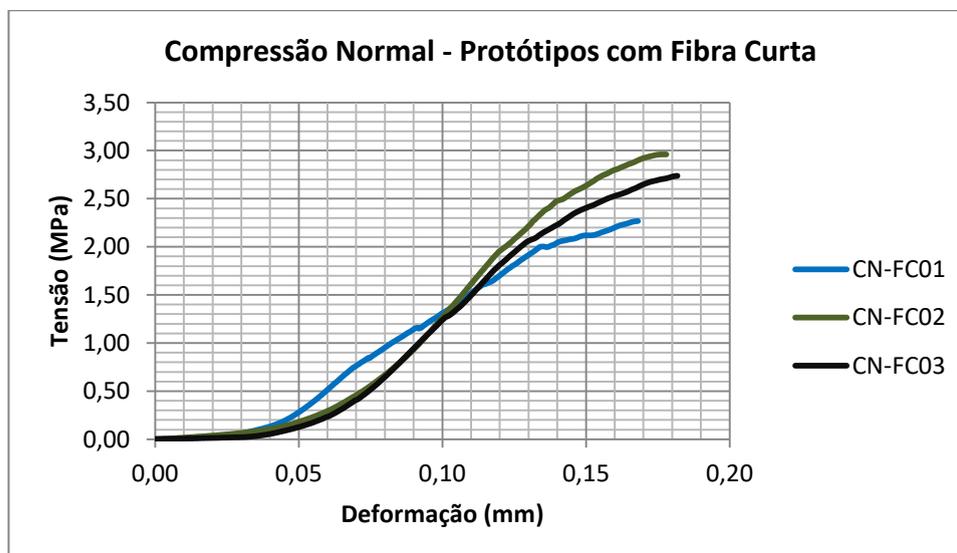
Fonte: O autor (2019).

Figura 91 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos de referência no ensaio de compressão normal.



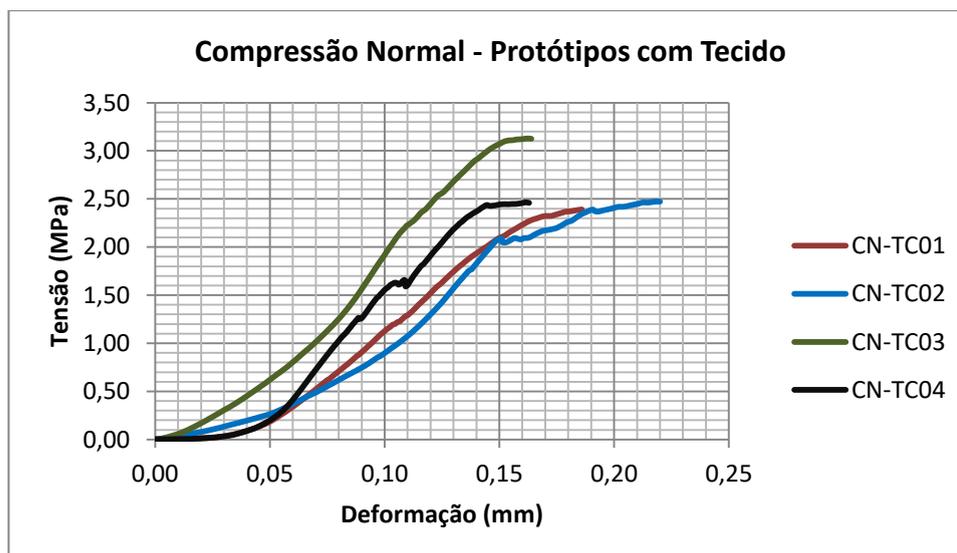
Fonte: O autor (2019).

Figura 92 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com fibra curta no ensaio de compressão normal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 93 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com tecido no ensaio de compressão normal.



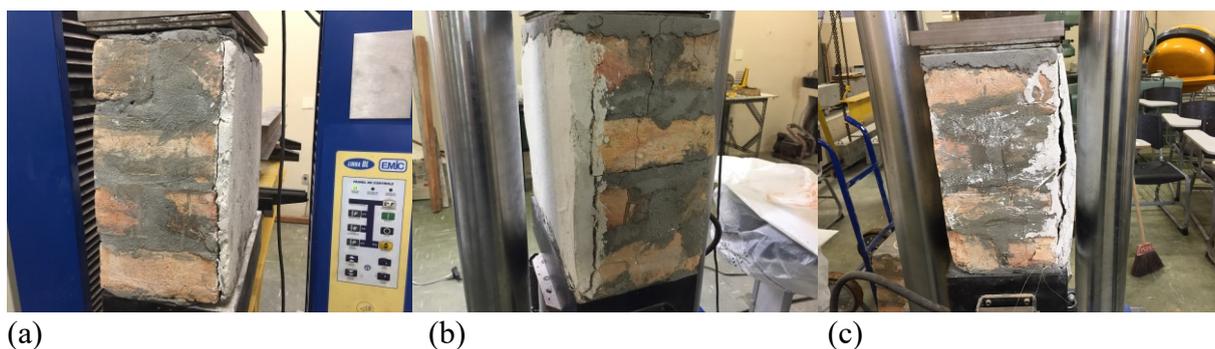
Fonte: O autor (2019).

Avaliando os resultados da Tabela 12 e as curvas tensão-deformação apresentadas verifica-se que houve incremento tanto na resistência à compressão como para a deformação máxima para as adições de fibras curtas e tecidos de sisal na argamassa. A resistência à compressão aumentou 39,27% para a adição de fibras curtas e 36,65% para a incorporação do tecido de sisal.

Com relação aos modos de ruptura das alvenarias, observou-se comportamento semelhante para todas as composições. Constatou-se que as primeiras fissuras no protótipo apareceram na interface entre a argamassa e a base do protótipo (Figuras 94), atestando dessa

forma o baixo valor da resistência de aderência anteriormente calculado. Para os protótipos ensaiados, os primeiros indícios de descolamento da argamassa apareceram quando a carga de compressão atingia um valor na faixa entre 60 e 100 kN. Com o incremento de carga no ensaio, novas fissuras subsequentes foram surgindo no protótipo onde se constatou uma predominância de fissuras verticais em todas as faces, atingindo tanto os tijolos como as argamassas de assentamento e revestimento (Figura 95).

Figura 94 - Detalhe do descolamento da argamassa de revestimento nos protótipos: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo revestido com argamassa com fibras curtas; (c) Protótipo revestido com argamassa com tecido de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 95 - Padrão de fissuração das composições: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo revestido com argamassa com fibras curtas; (c) Protótipo revestido com argamassa com tecido de sisal.



(a)



(b)

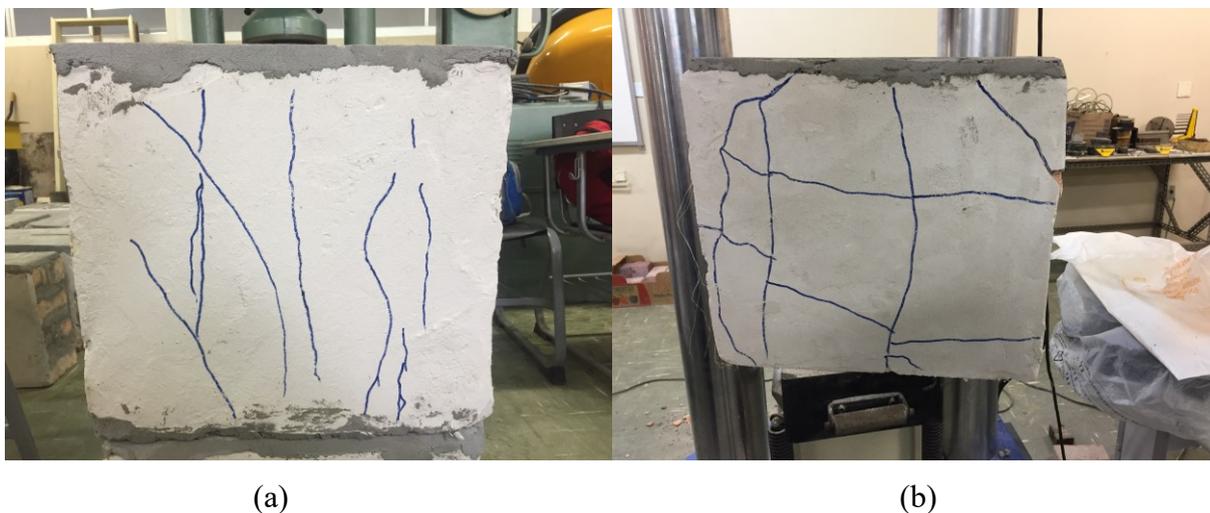


(c)

Fonte: O autor (2019).

Ao comparar o padrão de fissuração nas argamassas com adição de fibras curtas e a argamassa com adição de tecido observa-se que as primeiras apresentaram, majoritariamente, fissuras na direção vertical enquanto a segunda apresentou fissuras tanto na direção vertical quanto na direção horizontal (Figura 96).

Figura 96 - Fissuração nas argamassas de revestimento após ensaio de compressão normal: (a) Argamassa com fibras curtas; (b) Argamassa com tecido de sisal.



Fonte: O autor (2019).

Desta forma, é possível que a utilização de tecido incorporado à argamassa melhore a distribuição de tensões quando a alvenaria é submetida a cargas, em comparação com as fibras curtas. Percebe-se que ao se utilizar reforço com fibras mais longas desenvolvem-se maiores forças de aderência, contribuindo assim para uma zona de transferência de tensão mais “eficaz”. Além disso, o cruzamento da trama e do urdume no tecido faz com que uma parcela do esforço seja transferida para os feixes na direção perpendicular devido às forças de atrito entre as fibras componentes do tecido, explicando assim o surgimento de fissuras nas direções horizontais e verticais.

#### 4.8. COMPRESSÃO DIAGONAL NOS PROTÓTIPOS DE ALVENARIA

Para o ensaio de compressão diagonal as diferentes composições da argamassa de revestimento nos protótipos foram denominadas de: alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia (CD-R): alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia com adição de fibra curta a 1% de volume (CD-FC): alvenaria revestida em uma face com argamassa de cal e areia com adição de tecido de sisal (CD-TC). Todos os protótipos respeitaram o tempo mínimo de 90 dias para cura da argamassa.

Os resultados do ensaio de compressão diagonal nas paredes estão apresentados na Tabela 13. Os valores experimentais foram obtidos através da média de cada configuração de protótipo. Este experimento foi realizado em corpos de prova com dimensão 40x40x20 cm. Nas Figuras 97 a 99 são apresentadas as curvas típicas tensão-deformação para as alvenarias estudadas.

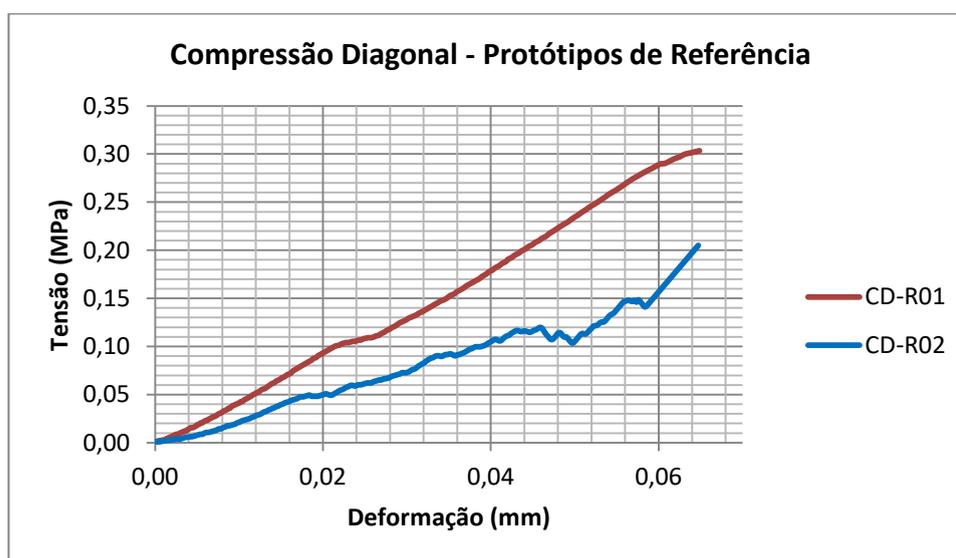
Tabela 13 - Resultados experimentais do ensaio de compressão diagonal.

Composição	Carga Máxima de Ruptura (kN)	Tensão de Cisalhamento (MPa)	Deformação de Pico (mm)
CD-R	28,77	0,25 (19,35)	0,065 (0,11)
CD-FC	42,11	0,37 (1,77)	0,122 (9,07)
CD-TC	46,00	0,41 (5,16)	0,110 (8,86)

\*Os valores entre parênteses representam o coeficiente de variação em porcentagem.

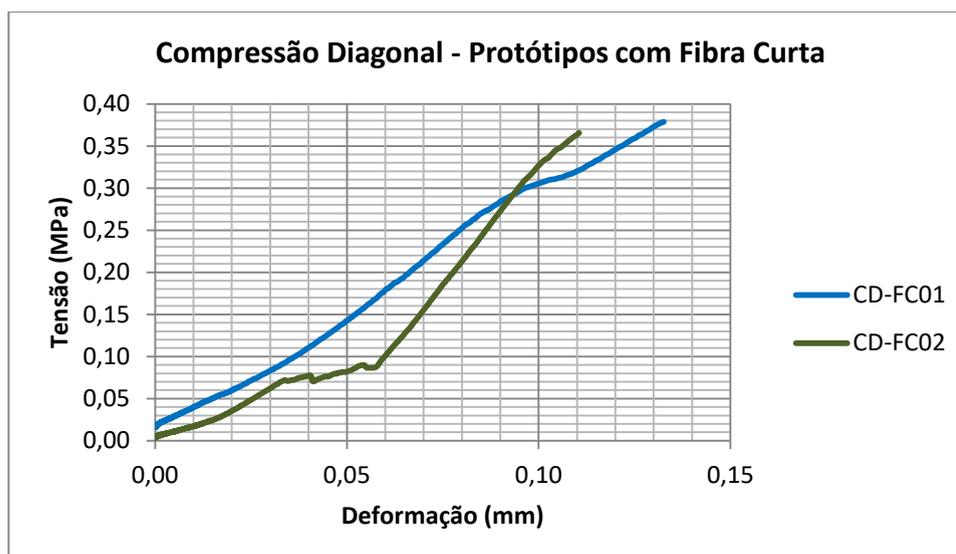
Fonte: O autor (2019).

Figura 97 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos de referência no ensaio de compressão diagonal.



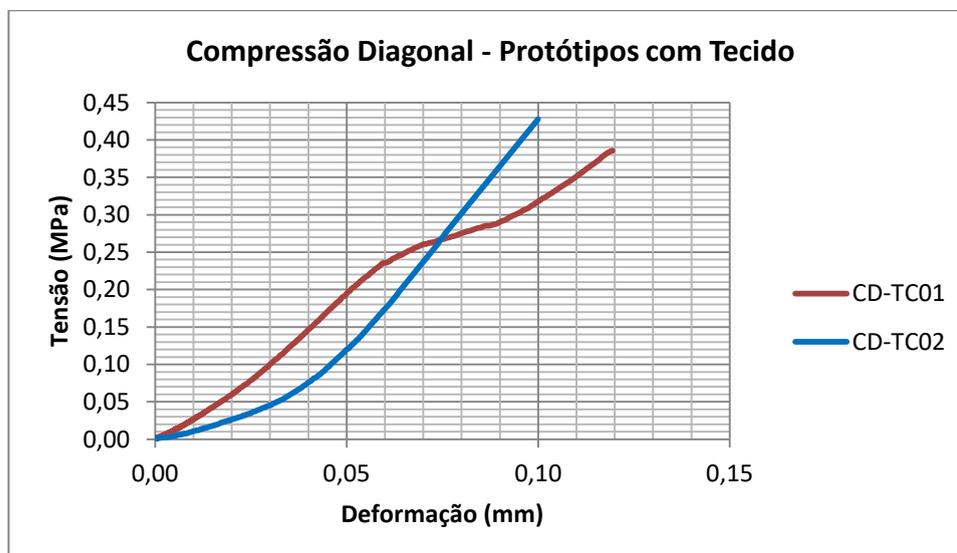
Fonte: O autor (2019).

Figura 98 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com fibras curtas no ensaio de compressão diagonal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 99 - Curva Tensão-Deformação para os protótipos com tecido no ensaio de compressão diagonal.



Fonte: O autor (2019).

Avaliando os resultados da Tabela 13 e as curvas tensão-deformação apresentadas, verifica-se que houve incremento tanto na tensão de cisalhamento máxima como para a deformação máxima para as adições de fibras curtas e tecidas de sisal na argamassa. O incremento na resistência ao cisalhamento foi na ordem de 48,0% para a adição de fibras curtas e 64,0% para a incorporação do tecido de sisal, enquanto a deformação máxima aumentou em 87,69% para a primeira e 69,23% para o segundo tipo de aplicação do sisal como reforço.

Com relação à falha das alvenarias durante o ensaio, identificou-se uma predominância de ruptura nas juntas de assentamento para as três composições testadas (Figura 100). Fissuras semelhantes às que ocorreram nas paredes foram observadas nas argamassas. Em todos os casos surgiram fissuras na direção vertical, sobretudo no eixo de aplicação das cargas (Figura 101). Semelhante ao comportamento observado nos ensaios de resistência à flexão das argamassas (Ver item 4.5), após a fissuração e paralisação do ensaio, houve total separação das partes dos protótipos revestidos com argamassa sem adição de fibras (Figura 102), enquanto os outros corpos de provas com adição de fibras permaneceram coesos mesmo após a falha dos materiais.

Figura 100 - Detalhe das fissuras nas juntas dos protótipos após o ensaio de compressão diagonal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 101 - Detalhe das fissuras na argamassa de revestimento dos protótipos após o ensaio de compressão diagonal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 102 - Corpo de prova revestido com argamassa sem adição de fibras após a realização do ensaio de compressão diagonal.



Fonte: O autor (2019).

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a influência no comportamento mecânico da fibra de sisal incorporada nas argamassas utilizadas em obras de restauração de edificações antigas. A motivação para tal estudo se dá diante da importância socioeconômica do cultivo do sisal no Brasil. Além disso, a utilização desta fibra natural na construção civil agrega valor a um produto que tem como principal produtor o Brasil.

Os estudos foram direcionados no sentido de avaliar o comportamento mecânico de paredes com dimensões 40x40x20 cm, revestidas com argamassa com fibras curtas de sisal com comprimento de 25 mm e com tecido de sisal confeccionado artesanalmente com distância entre trama e urdume de 10 mm, submetidos aos ensaios de compressão normal e compressão diagonal. Além disso, foi estudado também o comportamento da argamassa quanto à resistência à compressão e à resistência à tração na flexão. A Tabela 14 apresenta um comparativo entre as opções de reforço estudadas destacando qual apresentou melhor desempenho.

Tabela 14 - Comparativo de desempenho entre a aplicação da fibra curta e do tecido de sisal.

Ensaio	Fibras Curtas	Tecido de Sisal
Compressão Normal	X	-
Compressão Diagonal	-	X

Fonte: O autor (2020).

Nos ensaios de resistência à compressão, observou-se que a incorporação de fibras curtas tem efeito direto no comportamento do conjunto. A tensão de compressão máxima na ruptura passou de 1,69 MPa, para a argamassa sem fibras, para 3,43 MPa para a mistura da argamassa com fibras curtas. No ensaio de resistência à tração o incremento na tensão máxima foi da ordem de 39,17%, passando de 4,11 MPa para a argamassa na composição cal + areia, para 5,72 MPa na composição cal + areia+ fibras curtas. Em relação à fissuração e forma de ruptura dos protótipos, a utilização de fibras acrescentou maior deformabilidade aos compósitos aumentando a capacidade da flecha máxima devido à aderência entre a fibra e a argamassa. Este parâmetro é responsável pela distribuição de tensões entre os componentes, o que permite que a argamassa, mesmo fissurada, possa resistir às cargas aplicadas. De forma geral, baseado nos dados obtidos em laboratório, as argamassas sem fibras apresentaram ruptura brusca enquanto as com fibras romperam de forma dúctil.

Nos experimentos realizados nos protótipos de alvenaria o comportamento mecânico também foi influenciado pela presença das fibras. O valor médio da carga máxima de ruptura

nos protótipos submetidos à compressão normal foi de 152,73 kN para as paredes revestidas com argamassa sem adição de fibras. A taxa de aumento foi da ordem de 39,08% e 36,81% para a utilização de fibras curtas e tecido de sisal, respectivamente, chegando aos valores de 212,41 kN e 208,96 kN. Com relação à deformação de pico, houve incremento da composição da argamassa sem fibras para as que utilizaram fibras passando do valor médio de 0,0413 mm para 0,1760 mm e 0,1832 mm, para fibras curtas e tecidas, respectivamente.

Na avaliação do comportamento das alvenarias na compressão diagonal o valor médio da tensão de cisalhamento foi 0,25 MPa para as argamassas sem fibras, 0,37 MPa para a composição com fibra curta e 0,41 MPa para a adição de tecido. Analisando a deformação de pico, o incremento da composição da argamassa sem fibras para as que utilizaram fibras foi de 87,69 % e 69,23%, para as fibras curtas e o tecido de sisal, respectivamente.

Foi observado que a adição de tecido nas argamassas melhorou a distribuição de tensão nos corpos de prova testados. Isso se deu em função de dois fatores predominantes: o primeiro é o fato do tecido possuir um maior comprimento, comparando com as fibras curtas com 25 mm, o que contribuiu para o aumento das forças de aderência da fibra na argamassa, e o segundo é que o entrelaçamento entre as tramas e o urdume do tecido agrega maior resistência na argamassa devido às forças de atrito que surgem no contato entre as fibras.

Com relação à aplicação prática, o uso das fibras curtas se torna mais vantajosa, pois é menos trabalhosa sua preparação, quando comparado com a aplicação do tecido de sisal. A produção do tecido de forma artesanal torna-se inviável uma vez que o processo de produção é demasiado lento, sendo necessária uma grande quantidade de pessoas caso se optasse por revestir uma parede inteira em um caso real. No tocante de análise mecânica, a utilização do tecido é mais vantajosa do que a utilização das fibras, pois a trama possibilita uma maior aderência entre as fibras e a argamassa e conseqüentemente uma melhor distribuição de tensões ao longo do revestimento.

Diante do exposto, considera-se que foram atingidos os objetivos intencionados no início deste projeto que era, entre outros e sobre todos, avaliar o comportamento mecânico de argamassas de cal e areia com adição de fibra de sisal através de métodos empíricos. Após os estudos experimentais, conclui-se que, as propriedades mecânicas das argamassas produzidas e reforçadas com fibras de sisal, seja ela fibras curtas dispostas randomicamente ou tecido de sisal, são afetadas diretamente e possuem um potencial para serem utilizadas como reforço estrutural em argamassas de revestimento.

## 5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuidade da pesquisa aqui iniciada, os seguintes direcionamentos são propostos:

- Análise do comportamento da argamassa com idade superior a 90 dias;
- Utilização e outros comprimentos de fibras curtas, fazendo referência entre o comportamento mecânico e o tamanho utilizado;
- Utilização de outros volumes de reforço para as fibras curtas (2%, 3%, 4%...);
- Avaliação do comportamento mecânico utilizando outros arranjos de tecidos, sobretudo os de fácil obtenção, como por exemplo, produzido por tear de pente ou utilização de tecidos produzidos industrialmente.

## REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991. Tese (livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 1991.
- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais**. Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras na Construção Civil, p. 29-38, São Paulo, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C78. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D2256. **Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method**. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D3822. **Standard test method for tensile properties of single textile fibers**. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D5035. **Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E519. **Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages**. 2015.
- ANGRIZANI, C. A.; VIEIRA, C. A. B.; ZATTERA, A. J.; FREIRE, E.; SANTANA, R. M. C.; AMICO, S. C. **Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster**. Anais do 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, 2006.
- ARRUDA FIHO, A. B. **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Norma Mercosul, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR NM 52. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Norma Mercosul, Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 7181. **Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 9575. **Impermeabilização – Seleção e projeto.** Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 12127. **Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 13528-3. **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração Parte 3: Aderência superficial.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 15630. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 15961-2. **Alvenaria estrutural – Blocos de concreto Parte 2: Execução e controle de obras.** Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 16605. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.
- AZEVEDO, H. D. **Reforço de estruturas de alvenaria de pedra, taipa e adobe com elementos de madeira maciça.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2010.
- BALAGURU, P.N.; SHAH S.P. *Fiber-reinforced cement composites.* 1992. New York: McGraw Hill, 1992.
- BASTOS, P.K.X; LEMONGE, A. C. C.; SIGLIANO, V. S. S.; RESENDE, S. C. **Estudo do módulo de elasticidade de argamassa de revestimento sujeitas à sucção de água pela base.** 2010. Congresso Português de Argamassa de Construção, Lisboa, 2010.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.** 2003. Tese (Doutorado Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BERHANE, Z. **Performance of natural fibre Reinforced mortar roofing tiles.** *Materials*

*and Structures*, V.27, p.347-352, 1994.

- BRASIL – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Portaria 71/1983, de 16 de março de 1983. **Normas de identidade, qualidade, apresentação e embalagem da fibra beneficiada de sisal ou agave e seus resíduos de valor econômico.** Brasília, 1983.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). *BS 1881: British Standard Institution Testing concrete – Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.* England, 1986.
- BRUM, E. **A maldição do amianto.** Revista *El País*. 6 de Janeiro de 2014. Disponível em: [https://brasil.elpais.com/brasil/2014/01/06/opinion/1389007120\\_928954.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2014/01/06/opinion/1389007120_928954.html). Acesso em: 26 de dezembro de 2017.
- BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, Industrialização e desenvolvimento.** Ed. Perspectiva, 1ª Edição, 2000.
- CAFEZEIRO, Y. G. D. **Os muros antigos e as contribuições dos métodos de diagnóstico pouco ou não destrutivo para avaliação física e mecânica.** 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2016.
- CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2014.
- CAMPOS, L. E. T. **Técnicas de recuperação e reforço estrutural com estruturas de aço.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4, 2001, Brasília. Brasília: PECC/ANTAC, 2001. p.43-67.
- CARVALHO, E. A.; DUARTE, E. T. V. **Ensaio de flexão: Uma revisão dos modelos matemáticos empregados na sua análise.** Anais do 14º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro, São Paulo, 2000.
- CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos – USP de São Carlos, São Carlos, 2005.
- CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S.; CAVALCANTE, J. M. F. **Influência da arquitetura da arquitetura do tecido nas propriedades de compósitos poliéster/tecido de juta.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro, 2000.

- CEPED. **Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra.** BNH-DEPEA, Rio de Janeiro, 1982.
- CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2010.
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Publicação IPT 2378, Boletim Técnico 68 IPT, São Paulo, 1995.
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY M.; GÁRCIA-HORTAL, J.A. ***Migration of calcium hydroxide particles from the matrix to the cellulosic fibres in cement mortar based composites.*** Pôster apresentado no *Natural Fibers '09, "Material for a low carbono future"*. Londres, 2009.
- CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; ARDANUY, M.; GÁRCIA-HORTAL, J.A. ***The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites.*** *Cement & Concrete Composites*, 2011.
- CÓIAS, V. **Inspeções e ensaios na reabilitação de edifícios.** 2.ed. Lisboa, IST PRESS, 2006.
- DURO, A. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal.** 2013. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, 2013.
- FONSECA, V. M. **Desenvolvimento de sistema antichama aplicado a compósitos de poliéster insaturado reforçados com fibras de sisal.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2002.
- GHAVAMI, K. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- GOMEERS, B.; VERPOEST, I.; HOUTTE, P. **The Mori-Tanaka method applied to textile composite materials.** *Acta Materialia*, v46, n. 6, p. 2223-2235, 1998.
- GOMES, A.; APPLETON, J. **Reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das secções.** 1997. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, n. 42, 1997.
- GOMES, I. R. **Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Santa Catarina, 2001.
- GONÇALVES, S. R. C.; BAUER, E. **Estudo de caso da variação da resistência de aderência à tração em uma parede.** 2005. *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas*, Florianópolis, 2005.
- HOLLAWAY, L.C.; LEEMING, M. B. 1999. ***Strengthening of reinforced concrete***

- structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering*. Woodhead Publishing Limited, 1 ed, Cambridge, 1999.
- IPHAN. **Recuperação de imóveis privados em centros históricos**. Brasília, 2009.
- LAEFER, D. *et al.* **Measure of grout injection efficacy for stone masonry wall**. *Seventh North American Masonry Conference*, Vol I, University of Notre Dame, Indiana, 1996.
- LIMA, PAULO R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - PEC/COPPEDEC/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J.; FAIRBAIRN, E. M. 2007. **Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 6, p. 644-651, 2007.
- MAGALHÃES, A. C. A. **Degradação de revestimentos de paredes de edifícios antigos: metodologia de diagnóstico**. 2013. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2013.
- MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. **Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave Sisalana**. *Polímeros*, São Carlos, v.19, n1, p. 40-46, 2009.
- MARTINS, M. A. **Fibra de Sisal: Mercerização, acetilação, e aplicação em compósitos de borracha de pneu triturado**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- MENDES NETO, A. O. **Placas de sinalização em matriz polimérica com reforço de fibras de sisal**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.
- MOHR B.J.; NANKO, H.; KURTIS K.E. 2005. **Durability of kraft pulp Fiber-cement composites to wet/dry cycling**. *Cement & Concrete Composites*, 2005.
- MOTTA, L. A. C. **Caracterização de fibras curtas empregadas na construção civil**. 2007. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/450. São Paulo, 2007.
- MUÑOZ, R. **Acidentes e desastres em um trecho da falha de Salvador> um estudo na busca da preservação dos edifícios de interesse cultural**. 2009. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.
- OLIVEIRA, F. L. **Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, 2001.
- OLIVEIRA, M. M. de. **Tecnologia da Conservação e Restauração**. 3. Ed. Salvador: EDUFBA, 2006.

- PARDINI, L. C. **Preformas para compósitos estruturais**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. Vol 10, nº 2, p 100 – 109, 2000.
- QUIBELL, A. A. **The Pyramids of Giza**. Cairo. C.M.S. Bookshop, 1910.
- RODRIGUES, M. P. S. F.de F. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.
- ROQUE, J. A. **Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho, Braga, 2002.
- RUSSO, C. **Lesiones de los edificios**. 1934. Barcelona: Salvat Editore, 1934.
- SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.
- SANTOS, E. M. C.; SILVA, O. A. DA. **Sisal na Bahia – Brasil**. Mercator, v. 16, e16029, 2017.
- SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. **Brazilian waste fibers as reinforced for cement based composites**. *Cement and Concrete Composites*. 2000. England, v.22, n.5, 2000.
- SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibra de celulose**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; FILHO, R. D. T. **Tensile behavior of high performance natural (Sisal) fibers**. 2008. *Composites Science and Technology*, Vol. 68, p 3438-3443, 2008
- SILVA, L. J. DA. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del Rei. São João Del Rei, 2011.
- SILVA, J. M.. **Alvenarias não estruturais patologias e estratégias de reabilitação**. 2002.
- SILVA, J. M.; ABRANTES, V. **Patologias em paredes de alvenaria: causas e soluções**. 2007.
- SOUSA, H. **Construções em alvenaria**. Universidade do Porto, Notas de Aulas, 2003.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. 1998. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Pini, 1998.
- STUDINKA, J. B. **Asbestos substitution in the fibre cement industry**. 1989. *The international journal of cement and lightweight concrete*. V.11, N.2, Maio 1989.
- TAGUCHI, M. K.. **Avaliação e qualificação das patologias das alvenarias de vedação nas edificações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- TANNER, J.; PARKER, C. K.; VARELA, J. L. **Evaluation of ASTM methods to determine splitting tensile strength in concrete, masonry, and autoclave aerated concrete**

- intoduction and background on ASTM tests to evaluate splitting tensile strenght.*  
Journal of ASTM International, Vol 4, nº 2, 2019.
- TAYLOR, G. *Materials in construction*. 2.ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.
- THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas prevenção e recuperação**. 1989. São Paulo: Pini. 1989
- TOLEDO FILHO, R.D. *Natural fiber reinforced mortar composites: experimental characterisation*. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – DEC/PUC RIO - Imperial College, 1997. Rio de Janeiro, 1997.
- TOLEDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K; ENGLAND, G. L. *Development of vegetable fiber-mortar omposites of improved durability*. *Cement and Concrete Composites*, v.25, n.2, 2003.
- TRUONG, M.; ZHONG, W.; BOYKO, S; ALCOCK, M. *A comparative study on natural fiber density measurement*. *Journal of the textile institue*, v.100, ed.6, p.525-529, 2009.
- VARUM, H.; COSTA, A.; VELOSA, A.; MARTINS, T., PEREIRA, H.; ALMEIDA, J. **Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação**. 2005. Universidade de Aveiro, Aveiro. 2005.
- VITÓRIO, A. **Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia**. 2003. Instituto Pernambucano de Avaliações e Perícias de Engenharia, Recife. 2003.
- VITRUVIUS, P. *The ten books on Architecture*. Cambridge: Havard University Press. London: Humphrey milford. Oxford University Press, 1914.
- WILSON-JONES, MARK. *Principles of Roman Architecture*. New Haven, Yalen University, 2003.
- ASSOCIAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SOLIDÁRIO DA REGIÃO SISALEIRA– APAEB**. Disponível em: <http://apaeb.blogspot.com/2009/10/na-regiao-sisaleira-planta-do-sisal.html>. Acesso em: 15 de maio de 2019.
- CARTA DE VENEZA – 1964**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Carta%20de%20Veneza%201964.pdf>. Acesso em: 16 de junho de 2019.
- CENTRO NORDESTINO DE INFORMAÇÕES SOBRE PLANTAS – CNIP - 2015**. Disponível em: <http://www.cnip.org.br/bdpm/fotosdb/Agave.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2017.
- COMPANHIA SISAL DO BRASIL – COSIBRA - 2015**. Disponível em:

- [http://www.cosibra.com.br/materia\\_prima.php](http://www.cosibra.com.br/materia_prima.php). Acesso em: 13 de outubro de 2017.
- STAUB, D. K. - 2005.** Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Monadnock.jpg>
- DOVID, A. - 2000.** Disponível em: [http://www.thirdtemple.com/jerico/wall\\_jerico1.htm](http://www.thirdtemple.com/jerico/wall_jerico1.htm) , 2016. Acesso em: 29 de setembro de 2017.
- HAMILTON RIOS INDUSTRIA COMÉRCIO E EXPORTAÇÃO LTDA. - 2018.** Disponível em: <http://www.hamiltonrios.com.br/index.php>. Acesso em: 27 de outubro de 2017.
- HELBIG, T. - 2013.** Disponível em: [https://www.hdwallpapers.in/egypt\\_pyramids-wallpapers.html](https://www.hdwallpapers.in/egypt_pyramids-wallpapers.html), 2013. Acesso em: 29 de setembro de 2017.
- NEWHOUSE, E. L., ed.,** *The Builders, The National Geographic Society*, Washington, D.C., 1992. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/hlinde/estruturas/ur.htm>. Acesso em: 29 de setembro de 2017
- PONT DU GARD – THE OFFICIEL DU PONT DU GARD – 2015.** Disponível em: <http://www.pontdugard.fr/fr>. Acesso em: 28 de outubro de 2017.
- PREISS, A. - 2000.** Disponível em: <http://pontdugard.com/pt/pont-du-gard/historia-de-uma-ponte-notavel>. Acesso em: 28 de outubro de 2017.
- SAVVAIDIS, S. - 2015.** Disponível em: <https://sothebysrealty.gr/parthenon-on-acropolis-in-athens-greece/>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.
- SISALL. - 2015.** Disponível em: <http://www.sisall.com.br/o-sisal/>. Acesso em 25 de junho de 2018.
- UFRJ - 2018.** Estrutura da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: [http://www.etu.ufrj.br/imoveis\\_tombados/7](http://www.etu.ufrj.br/imoveis_tombados/7). Acesso em: 04 de fevereiro de 2019.
- VADON, M. - 2017.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/802972/classicos-da-arquitetura-panteao-romano-imperador-adriano/585d48e4e58ece5079000039-ad-classics-roman-pantheon-emperor-hadrian-image>. Acesso em: 24 de outubro de 2017.