

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS A. C. SIMÕES

CENTRO DE TECNOLOGIA

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

DIOGO PEREIRA SANTOS DE AMORIM

**ESTUDOS PRELIMINARES DE HOMOGENEIZAÇÃO DO REFORÇO
DE NFRCM E ALVENARIAS REFORÇADAS**

Maceió - AL

2024

DIOGO PEREIRA SANTOS DE AMORIM

**ESTUDOS PRELIMINARES DE HOMOGENEIZAÇÃO DO REFORÇO
DE NFRCM E ALVENARIAS REFORÇADAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Patrick Araujo
Almeida

Maceió - AL

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A524e Amorim, Diogo Pereira Santos de.

Estudos preliminares de homogeneização do reforço de NFRCM e alvenarias reforçadas / Diogo Pereira Santos de Amorim. - 2024.
50 f. : il.

Orientador: Francisco Patrick Araujo Almeida.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: 47-50.

1. Compósitos (Materiais). 2. Genoma - Mecânica das estruturas. 3. Reforço em alvenaria. 4. *Natural Fabric Reinforced Cementitious Matrix*. 5. Fibras Naturais. I. Título.

CDU: 693

AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus por todas as bênçãos em minha vida, pois reconheço que sem Ele nada seria possível. Agradeço também as três mulheres da minha vida: minha mãe, Clemilda, por todo amor e dedicação que teve em minha educação, minha esposa, Isabela, por seu amor e seu apoio incondicional; e minha filha, Amélia, o amor da minha vida. Saibam que sou eternamente grato a Deus por ter vocês em minha vida.

Não posso deixar de reconhecer o impacto positivo que alguns professores tiveram em minha jornada acadêmica. Ao Professor Patrick, expressei minha profunda gratidão por sua orientação e conselhos nos momentos finais de minha graduação. Ao Professor Wayne, minha admiração pelas suas excepcionais aulas de Mecânica dos Sólidos 1 e pela sua incomparável didática. Ao Professor Eduardo Setton, expressei minha admiração por sua capacidade de ir além do ensino convencional, estimulando o aprendizado para além da graduação. Por último, mas não menos importante, à Professora Aline Barboza, agradeço por todos os valiosos conselhos compartilhados no último dia de aula da disciplina de Pontes.

Cada um de vocês deixou uma marca indelével em minha trajetória, e por isso, sou eternamente grato.

Regozijai-vos sempre. Orai sem cessar. Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco. 1 Tessalonicenses 5:16-18.

RESUMO

A alvenaria é um material heterogêneo formado pelo arranjo manual e individual de unidades conectadas por juntas, sendo um dos primeiros materiais de construção, e que pode ter uma função de divisão ou estrutural. Apesar de aparentemente ser um material simples, a alvenaria é um material composto com uma caracterização complexa. Por várias razões, a alvenaria frequentemente necessita de algum tipo de reforço. Atualmente, um dos materiais mais utilizados como reforço são os compósitos conhecidos como FRP (polímero reforçado com fibras), que consistem em fibras (geralmente de carbono, vidro ou aramida) incorporadas em uma matriz polimérica (resina epóxi, por exemplo). Este tipo de reforço já está bem caracterizado na literatura. No entanto, os FRPs têm algumas desvantagens, como alto custo, uso de materiais sintéticos e, no caso da alvenaria, problemas de aderência entre o reforço e o substrato. Recentemente, a matriz cimentícia reforçada com tecido (FRCM) com fibras naturais (NFRCM) tem sido estudada como uma alternativa aos FRPs. Já existem trabalhos que mostram o potencial de uso do NFRCM como reforço estrutural, onde o Brasil aparece em posição de destaque como um dos maiores produtores de fibras naturais do mundo, como é o caso da fibra de sisal e da fibra de folha de abacaxi. Para a caracterização numérica desses e de outros materiais compostos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é comumente utilizado. No presente trabalho, uma técnica numérica alternativa é utilizada: a Mecânica do Genoma da Estrutura (MSG), que tem sido empregada com sucesso na homogeneização de alvenaria sem reforço e com reforço de FRP. Assim, este trabalho trata de um estudo numérico preliminar para a caracterização de NFRCMs e de alvenaria reforçada com este tipo de reforço.

Palavras chaves: Materiais Compósitos, Mecânica das estruturas Genoma, MSG, Reforço em Alvenaria, NFRCM, Fibras Naturais

ABSTRACT

Masonry is a heterogeneous material formed by the manual and individual arrangement of units connected by joints, being one of the first construction materials, and that can have a partition or structural function. Despite apparently being a simple material, masonry is a composite material with a complex characterization. For various reasons, masonry often needs some type of reinforcement. Currently, one of the most used materials as reinforcement are the composites known as FRP (fiber reinforced polymer), which consist of fibers (usually carbon, glass, or aramid) embedded in a polymer matrix (epoxy resin, for example). This type of reinforcement is already well characterized in the literature. However, FRPs have some disadvantages, such as high cost, use of synthetic materials, and in the case of masonry, adhesion problems between the reinforcement and the substrate. Recently, fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) with natural fibers (NFRCM) have been studied as an alternative to FRPs. There are already works that show the potential of using NFRCM as structural reinforcement, where Brazil appears in a prominent position as one of the largest producers of natural fibers in the world, as is the case of sisal and pineapple leaf fiber. For the numerical characterization of these and other composite materials, the Finite Element Method (FEM) is commonly used. In the present work, an alternative numerical technique is used: Mechanics of Structure Genome (MSG), which has been successfully employed in the homogenization of unreinforced and FRP-reinforced masonry. Thus, this work deals with a preliminary numerical study for the characterization of NFRCMs and masonry reinforced with this type of reinforcement.

Key words: Composite Materials, Mechanics of structures Genome , MSG, Reinforcement Masonry, NFRCM, Natural Fibers

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Monadnock Building.

Figura 02 - Distribuição visual de tipos de compósitos.

Figura 03 - Modelo simplificado de SG.

Figura 04 - Modelo de malha de fibras de sisal.

Figura 05 - Testes de compressão axial.

Figura 06 - Testes de compressão axial. Estado final após as solicitações axiais serem executadas.

Figura 07 - Tela inicial da aplicação *SwiftComp*TM.

Figura 08 - Adição de propriedades dos materiais no *SwiftComp*.

Figura 09 - Fração volumétrica de uma SG 2D no *SwiftComp*.

Figura 10 - Modelo computacional da fibra e matriz cimentícia.

Figura 11 - Módulo de Young em $E1$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 12 - Módulo de Young em $E2$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 13 - Módulo de Young em $E3$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 14 - Módulo de Young em $G12$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 15 - Módulo de Young em $G13$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 16 - Módulo de Young em $G23$ versus Variação da fração volumétrica da fibra.

Figura 17 - Discretização da estrutura gene 2D da alvenaria.

Figura 18 - Modelo virtual da alvenaria reforçada no NFRCM.

Figura 19 - Alvenaria com reforço assimétrico e simétrico, respectivamente.

Figura 20 - (A) modelo $0^\circ + 90^\circ$ e (B) modelo $90^\circ + 0^\circ$.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Desempenho mecânico das fibras.

Tabela 02 - Dados utilizados para homogeneização.

Tabela 03 - Resultados da homogeneização da SG 2D.

Tabela 04 - Alvenaria com reforço assimétrico, fibras de sisal distribuídas em 0° .

Tabela 05 - Alvenaria com reforço assimétrico, fibras de sisal distribuídas em 0° e 90° .

Tabela 06 - Alvenaria com reforço assimétrico, ângulo de 90° das fibras.

Tabela 07 - Alvenaria com reforço simétrico, ângulo de 0° das fibras.

Tabela 08 - Alvenaria com reforço simétrico, fibras de sisal distribuídas em 0° e 90° .

Tabela 09 - Alvenaria com reforço simétrico, ângulo de 90° das fibras.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. GERAL	12
1.2.2. ESPECÍFICO	12
1.3. JUSTIFICATIVA	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. ALVENARIA ESTRUTURAL	14
2.2. MATERIAIS EMPREGADOS EM ALVENARIAS ESTRUTURAS	16
2.2.1. UNIDADES EM CERÂMICA	17
2.2.2. ARGAMASSA	17
2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS	18
2.4. COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA	20
2.5. MÉTODOS COMPUTACIONAIS TRADICIONAIS	21
2.6. MECHANICS OF STRUCTURE GENOME	24
2.7. REFORÇO POR FIBRAS	27
2.7.1. FIBRAS DE SISAL	29
2.8. SWIFTCOMP	30
3. METODOLOGIA	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1. HOMOGENEIZAÇÃO DO NFRCM	33
4.2. HOMOGENEIZAÇÃO DA ALVENARIA REFORÇADA POR NFRCM	38
5. CONCLUSÕES	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

Esta seção possui o objetivo de realizar uma introdução acerca do tema proposto, bem como explicitar definições relevantes a respeito das pesquisas realizadas que embasam este documento.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A alvenaria é um elemento utilizado desde a antiguidade pela humanidade em suas habitações, templos religiosos e monumentos. Como exemplos únicos, podem ser citadas as catedrais góticas construídas durante a idade média que possuem arquitetura ímpar como o farol de Alexandria com altura próxima a 190 (cento e noventa) metros, PELETEIRO (2002). Mesmo com sua vasta aplicação, seus estudos com embasamentos científicos e experimentos laboratoriais se deram por volta da década de 20 do século passado, DICKY & SCHNEIDER (1994).

Desse momento em diante, edifícios cujas paredes possuíam mais de 180 centímetros de espessura (como exemplo, tem-se o Monadnock Building, construído no final do século XIX), deram espaços à construções cujas alvenarias eram mais delgadas. Um dos principais estudos se deu após a segunda guerra mundial devido à escassez de material. Paul Haller construiu e dimensionou um edifício localizado na Suíça com 13 pavimentos, com alvenarias internas de 15 centímetros de espessura e alvenarias externas de aproximadamente 38 centímetros, AMRHEIN (1978).

Esses estudos realizados por Haller revelaram de fato que as alvenarias poderiam, e deveriam possuir espessuras menores, visto seu elevado consumo de material na época. Comparando as alvenarias externas do edifício concebido por Haller e o Monadnock Building, teremos uma redução de cerca de aproximadamente 80% na dimensão desses elementos.

Devido a esse histórico tradicional à sociedade, é comum pressupor que a mesma seja um material de construção bem definido computacionalmente nos dias atuais. Todavia, com o progresso dos estudos teóricos e práticos, a alvenaria tem-se mostrado de difícil caracterização numérica e experimental. Essa dificuldade se dá devido ao comportamento físico, promovendo falhas locais com maior facilidade,

ALMEIDA E LOURENÇO (2019). Essa dificuldade na caracterização se deve a diversos fatores: anisotropia, dimensão dos blocos, espessura da argamassa (bem como sua composição), variação nos arranjos e a qualidade da mão de obra.

A alvenaria estrutural vem se apresentando como uma tecnologia de construção bastante eficiente, seja pela redução de custos, seja pela redução no tempo de execução de obras de grande volume de materiais (como conjuntos habitacionais, por exemplo). Obras de alvenaria estrutural não armadas podem chegar a ter até pouco mais de 18% de redução em seu valor da estrutura se comparados com alvenaria convencional, FERREIRA (2023).

A alvenaria é definida como um material compósito, ou seja, é formada pela união de dois ou mais materiais que quando unidos, promovem uma relação que busca um melhor resultado entre o custo benefício e outras características, como as propriedades mecânicas, por exemplo. Apresenta comportamento mecânico e térmico desigual em diferentes direções, sendo assim, caracterizado também como um material anisotrópico, ALMEIDA E LOURENÇO (2020).

Testes em alvenarias em escala real são demasiadamente caros e necessitam de maquinário específico que dê suporte e qualidade para os ensaios. PAGE (1981) realizou um conjunto de experimentos cujo objetivo era desenvolver um critério de falha sob compressão biaxial, levando em consideração diversos ângulos de tensões principais de compressão.

Em alguns casos, é necessário realizar algum tipo de reforço nas alvenarias. Os materiais mais empregados nesse tipo de situação são os FRPs (*Fiber Reinforced Polymer*), que são materiais formados principalmente por fibras de vidro, carbono ou aramida, imersas em uma matriz polimérica. Esse tipo de reforço já está bem estruturado na literatura, entretanto, entende-se que os FRPs apresentam diversas desvantagens em sua utilização, tais como: material não renovável, alto custo econômico e no caso das alvenarias, problemas de aderência entre o reforço e o substrato. Entende-se dessa forma que haja a necessidade de estudos com outros tipos de materiais. Diante disso, diversas pesquisas estão sendo realizadas com os FRCMs (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix*) e também com os NFRCMs (*Natural Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) como possíveis alternativas aos FRPs, DE CARVALHO BELLO et al. (2021).

A caracterização numérica das alvenarias se tornou bastante difundida com o avanço tecnológico, tendo assim a possibilidade de realizar análises mais aprofundadas, promovendo debates entre resultados computacionais e experimentais. Existem diversos métodos computacionais para se fazer tais análises, os mais comuns são: Método dos Elementos Finitos (MEF), Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Discretos (MED). Essas análises podem ser feitas com o material original ou com um material homogeneizado, sendo a homogeneização uma técnica na modelagem computacional que busca encontrar as propriedades de um material homogêneo que apresente o mesmo comportamento efetivo/macrosscópico do material compósito inicial. Um outro método computacional que vem se mostrando bastante eficaz para este tipo de aplicação é o *Mechanics of Structure Genome (MSG)*, ou em português, Mecânica das Estruturas Genoma (MEG), que consiste em uma técnica para modelagem constitutiva multi-escala com princípios da micromecânica que pode ser aplicada a todos os tipos de estruturas de compósitos, ALMEIDA E LOURENÇO (2020).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. GERAL

Este trabalho se delimita a um estudo preliminar do reforço de fibras naturais utilizando o método computacional MSG (*Mechanics of Structure Genome*).

1.2.2. ESPECÍFICO

O objetivo específico deste trabalho consiste em apresentar os resultados preliminares das homogeneizações bidimensional para matriz cimentícia e fibra de sisal e unidimensional para a alvenaria reforçada por NFRCM obtidas a partir da utilização do método computacional MSG (*Mechanics of Structure Genome*), apresentando os benefícios desse novo método.

1.3. JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento econômico a partir da aplicação de materiais sustentáveis nos últimos anos vem se mostrando essencial. A substituição de insumos não renováveis por renováveis se apresenta como uma alternativa bastante interessante para a indústria da construção civil, visto que a mesma é uma das que mais extrai recursos do planeta. O Brasil é um dos maiores exportadores de fibras naturais do mundo, tendo posições relevantes na produção de fibras de sisal, abacaxi e coco.

Em regiões que possuem acervo histórico de elementos em alvenaria estrutural ou em regiões com propensão a terremotos ou movimentação de solos, faz-se necessário estudos e implementações de reforço estrutural que visam a manutenção da vida útil da construção.

O MSG em relação aos métodos computacionais tradicionais vem se mostrando uma boa alternativa, possuindo diversos benefícios em relação aos métodos usuais, tais como: desenvolvimento de *SG* (*structure gene*, que inicialmente pode ser definida como sendo a menor entidade matemática que detém todas as propriedades constitutivas do material) 2D que geram propriedades 3D, a estabilidade da *SG* que independe do tipo de esquema gerado e suas discretizações. O tempo de processamento computacional também é inferior, pois o MSG é um processo semi-analítico.

Diante dos fatos supracitados, entende-se que é de suma importância outros estudos com a aplicação do MSG no âmbito de materiais compósitos, aprofundando resultados e discutindo novas perspectivas de utilização desse método computacional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

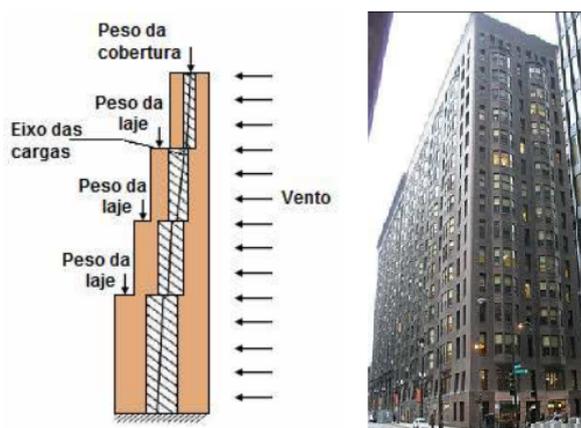
A seção atual tem o propósito de apresentar o estudo desenvolvido da revisão bibliográfica de alvenaria estrutural, bem como do método computacional utilizado no estudo (MSG).

2.1. ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural teve início com a utilização do conhecimento empírico, e existe há milhares de anos, baseado na experiência dos construtores, em que a forma garantia a rigidez e a estabilidade estrutural. Por meio dessa técnica construtiva, o homem tem desenvolvido a construção de edifícios há muito tempo. Essa modalidade é muito conhecida e usada desde os primórdios da história humana, e muitas das construções feitas há milênios ainda se mantêm firmes e estáveis, MOHAMAD et al. (2021).

Diversas construções se mostraram marcantes devido a espessura de suas alvenarias, um desses exemplos que pode ser apresentado é o edifício Monadnock Building, apresentado na figura 01. Construído entre os anos 1889 e 1891, possui 16 andares e uma parede de espessura média no pavimento térreo de 180 centímetros, JÚNIOR (2013).

Figura 01 - Monadnock Building.



Fonte: Júnior (2013)

Percebe-se a partir desse empreendimento que até então, as estruturas são projetadas de forma empírica, cujas técnicas são passadas de geração em geração, com avanços oriundos de experiências passadas, em outras palavras, as construções se assemelham às oficinas de artesãos, isso se reflete até os dias de hoje. Em meados do

século XIX, a produção de concreto de forma industrializada foi aderida e, no início do século XX, deu-se início ao concreto armado, bem como houve uma evolução da siderurgia, provendo assim, estruturas metálicas, os estudos científicos foram direcionados para esses novos materiais. Diante disso, houve uma redução nas construções com técnicas em alvenaria estrutural, JÚNIOR (2013).

Devido aos fatos ocorridos na segunda guerra mundial, houve um déficit de materiais, sendo necessário a busca por outros métodos construtivos que não utilizassem metal e concreto. Diante desses fatos, pesquisadores promoveram outros estudos de análise de construção em alvenaria, AMRHEIN (1978).

Os estudos aplicados que se sucederam no fim da década de 50 e início da década de 60, possibilitaram um progresso tanto nas técnicas de execução quanto no processo de fabricação de materiais. Pesquisadores como Sinha, Maurenbrecher e Hendry (1970), realizaram estudos com outros tipos de solicitações. O objetivo desses estudos era analisar ensaios com ações horizontais, JÚNIOR (2013).

No Brasil, a introdução da alvenaria estrutural em vários pavimentos se deu entre as décadas de 50 e 60, com a construção do edifício “Central Parque da Lapa”, um conjunto de quatro edifícios com doze andares cada um. No início dos anos 70, deu-se início à fabricação de blocos de alvenaria no Brasil e a maior utilização dessa técnica conseqüentemente; na década de 80 a alvenaria estrutural foi disseminada em grande escala em conjuntos habitacionais de baixa renda, sendo reconhecida como um processo construtivo eficiente e racional, JÚNIOR (2013).

O uso da alvenaria estrutural cresceu significativamente como método construtivo entre as décadas de 90 e início dos anos 2000; com o cenário econômico mais estável, intensificou-se a concorrência entre as empresas, fazendo com que estas busquem reduzir custos e acelerar a pesquisa e adoção de materiais inovadores. Seu processo construtivo é caracterizado pelo uso das alvenarias como sendo o principal elemento estrutural de suporte das edificações. Logo, nesse sistema construtivo, a alvenaria apresenta uma função dupla: vedação e estrutural, não podendo haver dessa forma, modificações corriqueiras como reformas, sem uma análise prévia da modificação. Atualmente, na construção civil, a evolução do conhecimento técnico-científico sobre o comportamento global das construções e do elemento parede proporcionou um progresso efetivo na fabricação dos materiais, do comportamento da

interação entre os componentes e equipamentos para a sua execução, surgindo unidades que tornam a alvenaria estrutural eficiente em termos de rapidez de produção e capacidade de suporte a cargas, PELETEIRO (2002).

Por natureza, a alvenaria possui uma resistência à compressão elevada oriunda principalmente da resistência presente nas unidades (blocos). Todavia, sua resistência à tração é baixa, pois essa característica é definida principalmente pela adesão das unidades e argamassa, GALLEGOS (1991).

A resistência mecânica da alvenaria é determinada principalmente por diversos fatores relacionados aos blocos, tais como sua geometria, absorção, resistência à compressão e tração. Além disso, a resistência da argamassa, sua capacidade de retenção de água, resiliência, espessura e disposição das juntas também são fatores importantes. Por fim, a proporção da rigidez entre a argamassa e os blocos como um conjunto também desempenha um papel fundamental na determinação da resistência mecânica da alvenaria, PELETEIRO (2002)

Por ser um elemento heterogêneo, diversos fatores influenciam suas propriedades, a exemplo disso, pode-se citar: dimensão das unidades, espessura das juntas horizontais, espessura das juntas verticais, bem como a qualidade da mão de obra empregada na execução. Devido a essa pluralidade de fatores, simulações numéricas se tornam bastante trabalhosas, ALMEIDA e LOURENÇO (2020).

2.2. MATERIAIS EMPREGADOS EM ALVENARIAS ESTRUTURAIS

Existem diversos materiais que são empregados na execução de alvenarias estruturais, todavia, existem materiais que são tidos como componentes principais desse modelo estrutural. Seguindo esse conceito de material predominante, podemos citar os blocos e a argamassa de assentamento. Entende-se também que a alvenaria estrutural não é executada somente com os materiais citados anteriormente, outros materiais assumem o papel complementar de promover a composição da técnica construtiva, tais como: armaduras passivas ou ativas, graute e elementos pré-fabricados, (BASTOS, 2021).

2.2.1. UNIDADES EM CERÂMICA

Os blocos cerâmicos estruturais fazem parte da categoria de elementos usados na construção de alvenaria estrutural. De acordo com a NBR 15270 de 2017, eles são caracterizados por apresentar orifícios prismáticos que se estendem perpendicularmente à face que os contém. Esses blocos são projetados para serem assentados de forma que os furos fiquem na posição vertical. Podemos classificá-los em quatro categorias distintas:

- Blocos cerâmicos estruturais com paredes vazadas;
- Blocos cerâmicos com paredes sólidas;
- Blocos cerâmicos estruturais com paredes sólidas que também apresentam áreas vazadas (por exemplo, para encaixe de janelas e portas); e
- Blocos cerâmicos perfurados, que em vez de terem grandes furos, possuem múltiplos furos pequenos na posição vertical.

De acordo com a norma citada anteriormente, para determinar a adequação dos blocos cerâmicos na construção de alvenaria estrutural, é essencial avaliar várias características que envolvem aspectos visuais, geométricos, físicos e mecânicos. No que diz respeito às características geométricas, é necessário levar em consideração medidas como as dimensões das faces (ou seja, as dimensões efetivas dos blocos), a espessura dos septos internos e das paredes externas, bem como quaisquer desvios em relação ao alinhamento correto.

2.2.2. ARGAMASSA

De acordo com a NBR 13281 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos), a argamassa pode ser definida como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, pode contar ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento.

Além das unidades, é essencial destacar o papel crucial da argamassa de assentamento, pois é por meio dela que se assegura o monolitismo e a solidez necessária da parede. A função primordial da argamassa é transferir todas as cargas verticais e horizontais para solidificar as unidades, criando assim uma estrutura coesa. Além disso, deve absorver deformações e compensar irregularidades causadas pelas variações

dimensionais das unidades. Dessa forma, as argamassas desempenham um papel fundamental na construção de alvenaria, MOHAMAD (2021).

2.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Um compósito é uma combinação de dois ou mais componentes ou fases distintas. Além disso, há três critérios fundamentais que devem ser atendidos antes de classificarmos um material como compósito. Primeiramente, ambos os componentes devem estar presentes em proporções razoáveis. Em segundo lugar, as fases componentes devem ter propriedades notavelmente diferentes, de forma que as propriedades do compósito sejam claramente distintas das propriedades dos componentes individuais. É importante reconhecer que os compósitos consistem em duas ou mais fases quimicamente distintas em uma escala microscópica, separadas por uma interface definida. A fase que é contínua e frequentemente, embora não sempre, presente em maior quantidade no compósito é denominada matriz. A figura 02 apresenta os tipos de compósitos de acordo com seus materiais.

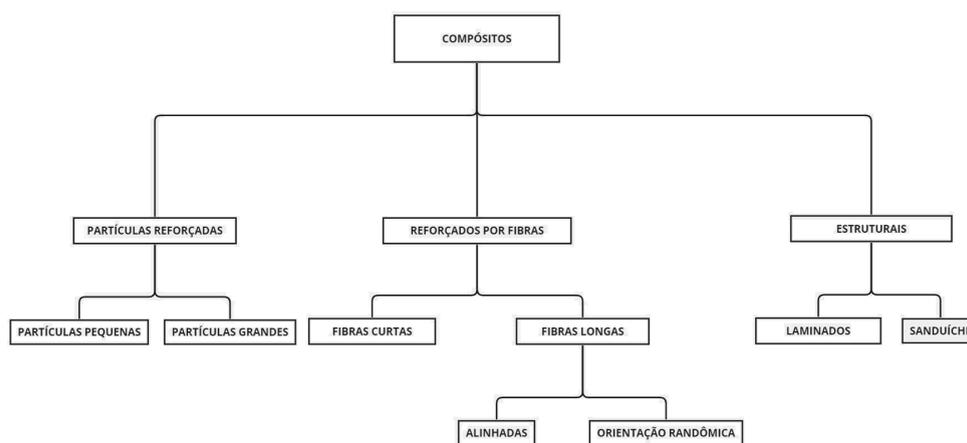
A visão predominante é que as propriedades da matriz são aprimoradas ao incorporar outro componente para criar um compósito. Esses compósitos podem ter matrizes de cerâmica, cimentícia, metal ou polímero, e as propriedades mecânicas variam significativamente entre essas quatro categorias de materiais. O segundo componente é conhecido como fase de reforço ou reforçador, pois aprimora ou reforça as propriedades mecânicas da matriz. Na maioria dos casos, o reforçador é mais duro, mais resistente e mais rígido do que a matriz, embora haja algumas exceções, como o reforço de metal dúctil em uma matriz cerâmica ou o reforço de borracha em uma matriz polimérica frágil. A maioria dos compósitos é projetada para tirar vantagem de melhorias em suas propriedades mecânicas. Mesmo em compósitos originalmente desenvolvidos por suas características físicas, as propriedades mecânicas desempenham um papel crucial durante a fabricação e o desempenho dos componentes. As fibras, em particular, apresentam resistências significativamente maiores do que seus equivalentes monolíticos devido à ausência de defeitos nestes últimos (NEMAT-NASSER, Sia; HORI, M.; BIELSKI, W., 1995).

Contudo, ao escolher um reforço para um compósito, é importante considerar uma variedade de propriedades além da resistência. No caso das fibras, a flexibilidade é

uma característica relevante, pois ela determina se as fibras podem ser facilmente entrelaçadas e influencia a seleção do método de fabricação do compósito. A flexibilidade de uma fibra é influenciada pelo módulo de Young e pelo diâmetro da fibra, geralmente diminuindo à medida que o diâmetro aumenta. É evidente que fibras individuais, devido às suas pequenas dimensões transversais, não podem ser diretamente utilizadas em aplicações estruturais. Para superar esse desafio, é necessário incorporar as fibras em um material que as mantenha separadas, proteja suas superfícies e facilite a fabricação de componentes. Esse material de incorporação é chamado de matriz. A quantidade de reforço que pode ser incorporada em uma matriz específica é limitada por diversos fatores. Por exemplo, em metais reforçados com partículas, o teor de reforço geralmente é mantido abaixo de 40% em volume (fração de volume de 0,4) devido a dificuldades no processo de fabricação e ao aumento da fragilidade em concentrações mais elevadas. Por outro lado, os métodos de processamento para polímeros reforçados com fibras são capazes de produzir compósitos com uma alta proporção de fibras, sendo que o limite superior, em torno de 70% em volume (fração de volume de 0,7), é determinado pela necessidade de evitar o contato direto entre as fibras, o que poderia resultar em danos às fibras (NEMAT-NASSER, Sia; HORI, M.; BIELSKI, W., 1995).

Por fim, vale destacar que o fato de o reforço estar firmemente ligado à matriz significa que qualquer carga aplicada a um compósito é distribuída entre ambos os constituintes. Em muitos casos, o reforço é o componente mais rígido e resistente, assumindo o papel principal na sustentação da carga. A matriz, nesse contexto, é responsável por transmitir a carga para o reforço.

Figura 02 - Distribuição visual de tipos de compósitos



(CALLISTER, 2000)

2.4. COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA

A matriz cimentícia é amplamente utilizada na indústria da construção para criar uma variedade de materiais, incluindo concreto, argamassa e compósitos de matriz cimentícia. Ela desempenha um papel fundamental na determinação das propriedades do material final, como resistência, durabilidade, capacidade de carga e resistência ao desgaste, tornando-a um componente essencial em muitas aplicações de engenharia civil e construção, COSTA (2014).

A alvenaria estrutural pode ser caracterizada como um material compósito, embora sua composição seja diferente da maioria dos compósitos tradicionais, como compósitos de matriz polimérica. A alvenaria é uma estrutura composta por unidades individuais (como tijolos ou blocos) que são unidas por uma matriz de argamassa ou cimento. Essas unidades, geralmente tijolos ou blocos, são os principais elementos que compõem a alvenaria. Elas podem ser feitas de diversos materiais, incluindo cerâmica ou concreto. As unidades individuais têm características próprias, como resistência à compressão, absorção de água e isolamento térmico. A matriz de ligação é a substância que mantém as unidades de alvenaria juntas. Pode ser uma argamassa à base de cimento, argamassa de cal ou qualquer outro material adesivo adequado. A matriz é aplicada entre as unidades para unir e distribuir as cargas, COSTA (2014).

2.5. MÉTODOS COMPUTACIONAIS TRADICIONAIS

PAGE (1978) divulgou um estudo focalizando a análise de paredes construídas com tijolos cerâmicos quando submetidas a um carregamento em seu próprio plano, um desafio típico em projetos de estruturas de alvenaria. Ele apresentou um método que levava em consideração o comportamento não-linear dessa alvenaria. Até então, a abordagem mais convencional para estudar alvenaria era tratar o material como elástico linear isotrópico, ignorando a influência das juntas de argamassa como "planos de fraqueza". De acordo com este estudo, tais suposições funcionam bem quando a estrutura está sob baixos níveis de tensão, porém, não são apropriadas para situações em que as tensões aplicadas são elevadas, exigindo uma análise da redistribuição dessas tensões.

A redistribuição ocorre devido ao comportamento não-linear, especialmente na argamassa, e a ruptura localizada nas áreas onde ocorre o descolamento entre a unidade de alvenaria e a argamassa. PAGE (1978) empregou uma abordagem de modelagem discreta, tratando a alvenaria como um material bifásico, composto de unidades elásticas imersas em uma matriz inelástica, que é a argamassa. A ruptura ocorre nas juntas quando os critérios de resistência à tração ou ao cisalhamento são ultrapassados. Essas características foram incorporadas em um programa de elementos finitos incremental, que modela a propriedade não-linear das juntas e considera sua ruptura progressiva. As propriedades do material necessárias para definir o modelo foram obtidas experimentalmente por meio de testes em painéis de alvenaria e em unidades individuais. As juntas são representadas por elementos de ligação que limitam a tensão de tração, altas tensões de compressão (com comportamento de deformação não-linear) e a resistência ao cisalhamento, cujo valor depende da tensão de compressão presente.

ALI e PAGE (1987) desenvolveram um programa baseado em elementos finitos para analisar o comportamento não-linear de paredes de alvenaria construídas com unidades sólidas de concreto quando submetidas a cargas concentradas. Nesse programa, as juntas e as unidades de alvenaria são modeladas separadamente, incorporando características não-lineares. Em seguida, em 1988, os mesmos autores expandiram seu modelo de elementos finitos para a análise de painéis de alvenaria compostos por unidades sólidas de concreto e sujeitos a cargas concentradas atuando

em seu próprio plano. No estudo, a alvenaria é considerada no estado plano de tensões, uma suposição geralmente razoável para a maioria dos cenários de carregamento.

O modelo proposto tem a capacidade de replicar as características não-lineares da alvenaria, que surgem devido à não linearidade dos materiais e à falha progressiva localizada. As unidades e a argamassa são tratadas como entidades separadas no modelo, levando em consideração as características de deformação não-linear de ambos os materiais, bem como a possibilidade de ruptura das unidades, argamassa ou das juntas entre elas. Graças à capacidade do modelo de capturar efeitos locais, ele é eficaz em reproduzir o comportamento de paredes de alvenaria sujeitas a elevadas tensões locais e gradientes de tensão acentuados.

As propriedades dos materiais utilizados no modelo são derivadas de testes realizados em painéis de alvenaria em escala reduzida e em seus materiais constituintes. Os resultados teóricos obtidos pelo modelo foram comparados com experimentos envolvendo cargas concentradas aplicadas em paredes de alvenaria, e observou-se uma boa concordância entre os valores teóricos e experimentais.

PAGE e SHRIVE (1990) publicaram um artigo que investigou os efeitos da aplicação de cargas concentradas em paredes de alvenaria, bem como os processos de ruptura envolvidos. Os autores destacaram que quando uma carga concentrada é aplicada a uma parede de alvenaria, ocorrem altas tensões locais na área imediatamente abaixo dela. Nessa região, um estado de compressão triaxial é formado, enquanto um pouco mais abaixo, a configuração das tensões se transforma em compressão vertical e tração biaxial. Como a alvenaria possui uma resistência limitada à tração, essa região se torna crítica, e fissuras tendem a se desenvolver se a carga aplicada ultrapassar um limite crítico. Testes experimentais confirmaram que, na área logo abaixo do ponto de aplicação da carga, devido ao estado de compressão triaxial, a resistência da parede de alvenaria aumenta.

Os autores conduziram uma série de experimentos nos quais aplicaram cargas concentradas em paredes construídas com blocos vazados de concreto e tijolos cerâmicos maciços, com o objetivo de comparar o comportamento desses materiais. Concluíram que, no caso dos tijolos maciços, a consideração do aumento da resistência da parede devido ao estado triaxial de tensões é bastante consistente e pode ser levada em conta. No entanto, no caso dos blocos vazados, o comportamento é notavelmente

distinto, requerendo uma investigação mais aprofundada para uma compreensão completa do mecanismo envolvido antes de ser considerado de forma conclusiva.

ROTS (1991) apresentou uma breve análise sobre abordagens para a pesquisa em mecânica computacional aplicada à alvenaria estrutural. O autor enfatizou que, dependendo da precisão requerida e da simplicidade desejada, diferentes modelos podem ser adotados para a análise da alvenaria. Em uma primeira abordagem, as juntas da alvenaria podem ser representadas por elementos contínuos, com ou sem a consideração de comportamento não-linear. Alternativamente, as juntas podem ser representadas por elementos descontínuos, permitindo tratar a alvenaria como um conjunto de unidades com comportamento elástico linear, conectadas por potenciais de fratura nas juntas. No entanto, essa abordagem sacrifica um pouco de precisão, uma vez que o efeito Poisson nas juntas é negligenciado. Em um terceiro cenário, as juntas são consideradas distribuídas por toda a alvenaria, sem distinção entre unidades e argamassa. Nessa abordagem, a alvenaria é tratada como um meio compósito anisotrópico.

RIDDINGTON & NAOM (1994) desenvolveram um programa de elementos finitos com o objetivo de determinar a resistência última à compressão da alvenaria. Este programa incorpora critérios de ruptura local, levando em consideração a resistência à tração das unidades, a resistência à tração da argamassa, bem como a resistência à tração e ao cisalhamento na junta entre as unidades e a argamassa. Além disso, o programa considera o comportamento elástico não-linear da argamassa. A estrutura do programa é tal que todos esses critérios de ruptura e a não-linearidade da argamassa são avaliados em cada iteração. O programa demonstrou ser capaz de determinar com precisão a capacidade última de compressão da alvenaria, quando comparado com resultados de ensaios experimentais em paredes de alvenaria. Notavelmente, quando a não-linearidade física da argamassa não foi incorporada na análise, houve uma superestimação da resistência última à compressão da alvenaria. Os resultados também indicaram que a capacidade de carga da alvenaria diminui com o aumento da espessura da argamassa e que um aumento na resistência à tração das unidades resulta em um aumento na resistência à compressão da parede.

FUSCHI, GIAMBANCO e RIZZO (1995) apresentaram uma abordagem numérica para analisar paredes de alvenaria estrutural sujeitas a um estado plano de

tensões. Eles adotaram um modelo constitutivo considerando que o material não possui resistência à tração. As equações foram formuladas de forma incremental, utilizando uma lei de fluxo associativa para materiais elastoplásticos. O modelo foi testado e validado por meio de uma análise precisa. No entanto, vale ressaltar que uma desvantagem do modelo é que ele assume que a alvenaria é indefinidamente linear na compressão, o que pode levar a deslocamentos maiores no colapso iminente em comparação com o comportamento real da estrutura. Isso pode violar a hipótese de pequenas deformações. Para superar essa limitação, foram sugeridos limites apropriados para a tensão de compressão máxima, de maneira consistente com o modelo apresentado.

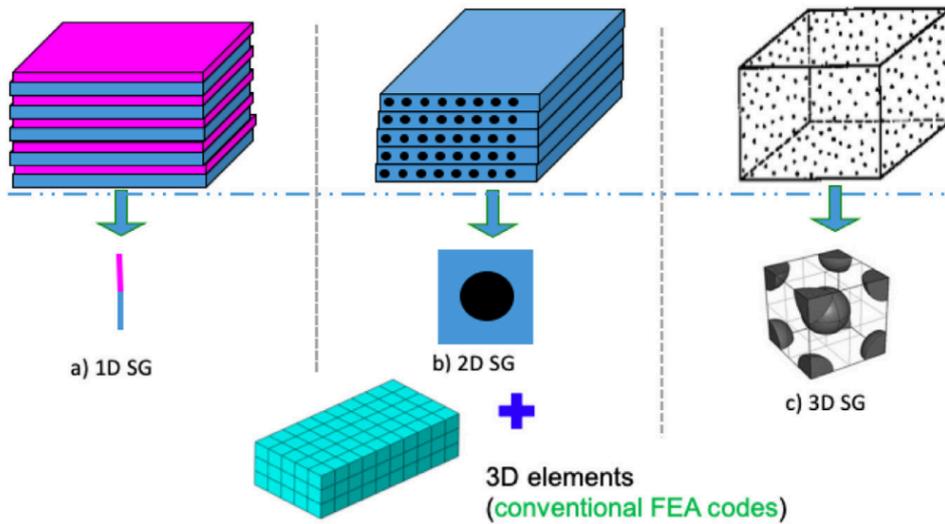
LOURENÇO, ROTS e BLAAUWENDRAAD (1998) publicaram um artigo que destaca várias aplicações potenciais de modelos numéricos na análise de estruturas de alvenaria. Os exemplos fornecidos abordaram questões relacionadas a normas de projeto, a análise de estruturas complexas já existentes sob novas condições de carregamento e a avaliação da segurança de edifícios antigos.

2.6. MECHANICS OF STRUCTURE GENOME

Mechanics of Structure Genome (MSG) é uma técnica recém apresentada para modelagem constitutiva multi-escala que pode ser aplicada a todos os tipos de estruturas de compósitos incluindo vigas, placas e cascas e estruturas tridimensionais (3D). Uma vez que se trata de uma técnica semi-analítica, MSG reduz consideravelmente o custo computacional e mantém a mesma precisão de análises 3D, por exemplo, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), que tem sua origem no início dos anos 1960.

O passo inicial da técnica MSG consiste na determinação de uma Estrutura Gene (EG), que pode ser definida como a menor porção matemática da estrutura no sentido de conter toda a informação constitutiva necessária para sua caracterização, da mesma forma que, em biologia, o genoma é um conjunto de informações codificadas no DNA que servem como base para o crescimento e desenvolvimento de um organismo, a figura 03 apresenta um modelo simplificado de SG.

Figura 03 - Modelo simplificado de SG.



(Yu, 2016)

Observa-se que para uma estrutura de compósito com heterogeneidade unidimensional (1D) – por exemplo, compósitos binários feitos com duas camadas alternantes, a EG será uma linha com dois segmentos, que poderá ser matematicamente repetida no plano da seção transversal e depois fora desse plano para gerar a estrutura inteira. No caso de um compósito apresentando heterogeneidade bidimensional (2D) – por exemplo, compósitos reforçados por fibras contínuas –, a EG será 2D, e para compósitos com heterogeneidade 3D – por exemplo, compósitos reforçados por partículas –, a EG será 3D. Apesar da EG para corpos 3D poder apresentar diferentes dimensões, a depender de sua heterogeneidade, as propriedades efetivas para a análise estrutural 3D continuarão sendo 3D. Por exemplo, para uma análise elástica linear, pode-se obter a matriz constitutiva completa a partir da análise de uma EG 1D de um compósito binário.

O método MSG foi estruturado na ideia de redução mínima de perdas de informação, ou seja, existe uma ideia base de que o erro gerado na homogeneização seja o mínimo possível (por exemplo, a energia de deformação do modelo homogeneizado e do modelo inicial), ALMEIDA E LOURENÇO (2020).

Os resultados comparativos entre o MSG e os demais métodos se mostraram bastante promissores, visto que todos os resultados numéricos foram semelhantes aos resultados dos métodos tradicionais, sem suas limitações (como por exemplo, a aplicação de condições de contorno no Método dos Elementos Finitos (MEF), a própria

formulação do MSG aplica condições de contorno iniciais. O software *SwiftComp*TM tem a opção de desabilitar a entrada padrão e adicionar as condições de contorno de forma manual) e com um custo computacional menor, promovendo maior celeridade no processo YU (2016).

A estrutura gene se diferencia de um Elemento de Volume Representativo (EVR), pois o mesmo pode ser caracterizado como sendo o menor volume que define o corpo do material como um todo. Possuindo assim uma caracterização estatística, ocorrendo variação de dimensões, por exemplo, HILL (1963).

O Elemento de Volume Representativo (EVR) é uma porção representativa de um material que é utilizado para modelar o seu comportamento mecânico em diferentes escalas. O EVR é uma unidade geométrica que pode ser construída a partir de dados estatísticos da microestrutura do material, tais como tamanho e distribuição dos grãos, orientação das fibras, entre outros. Ele é projetado para capturar as características essenciais do material, e sua geometria pode variar de acordo com o material em questão e a escala de análise desejada (NEMAT-NASSER, Sia; HORI, M.; BIELSKI, W., 1995).

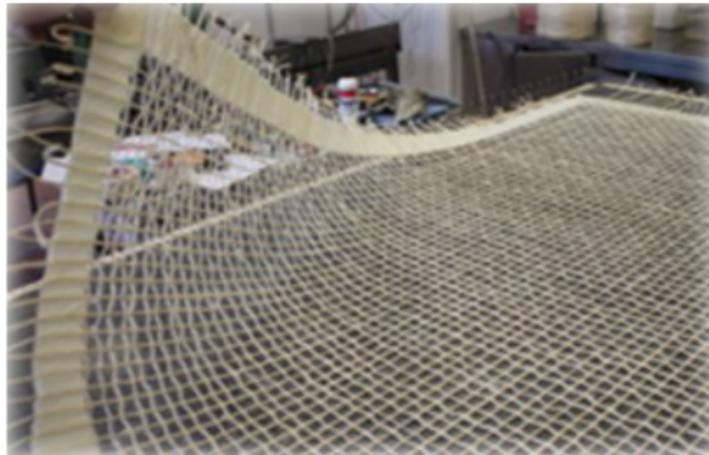
O objetivo principal do EVR é permitir a análise do comportamento mecânico do material em diferentes escalas, considerando sua heterogeneidade em termos de microestrutura e propriedades. Dessa forma, o EVR é uma ferramenta importante para a compreensão do comportamento mecânico dos materiais, e é amplamente utilizado em áreas como a engenharia de materiais e a mecânica dos sólidos. Neste sentido, a principal diferença entre um EVR e a SG é que o EVR se utiliza de um princípio probabilístico, enquanto que a SG se utiliza de um princípio semi-analítico, Yu (2016).

As abordagens mais tradicionais dos estudos da micromecânica partem de uma abordagem em dois momentos, o primeiro é uma análise micromecânica seguida de uma análise estrutural, Yu (2016). Essa caracterização pode acarretar em algumas situações não desejadas, por exemplo: relação de microescala em comparação com o EVR, descontinuidades virtuais criadas em método e por fim, erros iniciais nos processos de separação do material heterogêneo e o material virtual podem ser propagados para o todo, PAGANO e RYBICKI (1974). O MSG possui a ideia inicial de mitigar esses problemas e, em alguns casos, solucioná-los de forma completa.

2.7. REFORÇO POR FIBRAS

Nos últimos anos houve uma crescente busca por materiais ecológicos que gerassem menos impactos ambientais. Diante disso, diversos pesquisadores se propuseram a estudar a aplicação de reforço em alvenarias através das fibras naturais, DE CARVALHO BELLO et al. (2021). Diversas fibras naturais podem ser consideradas com o objetivo de utilizá-las em algum tipo de reforço, tais como: fibras de coco, fibras da folha do abacaxi e fibras de sisal.

Figura 04 - Modelo de malha de fibras de sisal.



Fonte: DE CARVALHO BELLO et al. (2021)

Pesquisadores da Universidade de Veneza (IUAV) estão trabalhando com análises numéricas em MEF, mas principalmente experimentos físicos, realizando debates entre alvenarias reforçadas por fibras naturais e alvenarias não reforçadas. Na figura 04, pode-se observar uma malha de fibras de sisal antes da aplicação como reforço.

Figura 05 - Testes de compressão axial.



Fonte: DE CARVALHO BELLO et al. (2021)

Figura 06 - Testes de compressão axial. Estado final após as solicitações axiais serem executadas.



Fonte: DE CARVALHO BELLO et al. (2021)

Nota-se a partir das figuras 05 e 06 que após a aplicação das solicitações axiais, a alvenaria não reforçada (a), sofreu uma maior deformação; observa-se que, caso o maquinário que foi responsável pelos testes fosse retirado, haveria o colapso total do corpo de prova; já na alvenaria reforçada por fibras, percebe-se que houve uma menor deformação, bem como não houve colapso total do corpo de prova.

No presente estudo, o objetivo é realizar a homogeneização das alvenarias reforçadas utilizando o método MSG. Desenvolveu-se inicialmente, modelos computacionais da alvenaria, da fibra de sisal e da matriz cimentícia. A aplicação do reforço se dá a partir da junção do bloco de assentamento acrescido do reforço a partir das fibras de sisal embebidas na matriz cimentícia.

2.7.1. FIBRAS DE SISAL

O sisal (*agave sp*) é um tipo de fibra originária do México, com folhas estreitas e compridas, medindo de 10cm a 15cm de largura e 120cm a 160cm de comprimento, de cor verde e terminando por um espinho escuro. No campo, o processamento de sisal consiste no corte, o desfibramento, a lavagem/secagem e o batimento. O corte é feito rente ao tronco com uma faca ou foice, deixando cerca de sete folhas na planta. Em seguida, as folhas cortadas são transportadas em ganchos de madeira até o local do desfibramento. A retirada das fibras têxteis da folha do sisal é feita por uma máquina rudimentar a “Paraibana” sendo que, essa máquina possui um rotor que, quando em movimento, aciona um mecanismo, provocando o esmagamento da folha. A lavagem da fibra é feita no final do dia em tanques com água, onde é imersa durante a noite. Pela manhã as fibras são colocadas em varais para secarem expostas ao sol.

O sisal apresenta um elevado teor de celulose, características relacionadas ao desempenho mecânico. Assim como na madeira, as fibras naturais são compostas principalmente de celulose, lignina e hemicelulose que, quando combinadas, são frequentemente descritas como compósito natural no qual cada componente desempenha uma função.

Tabela 01 - Desempenho mecânico das fibras.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Deformação específica na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
<i>Sisal</i>	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Vidro	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Aramida	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0

fonte: Bledzki e Gassan (1999)

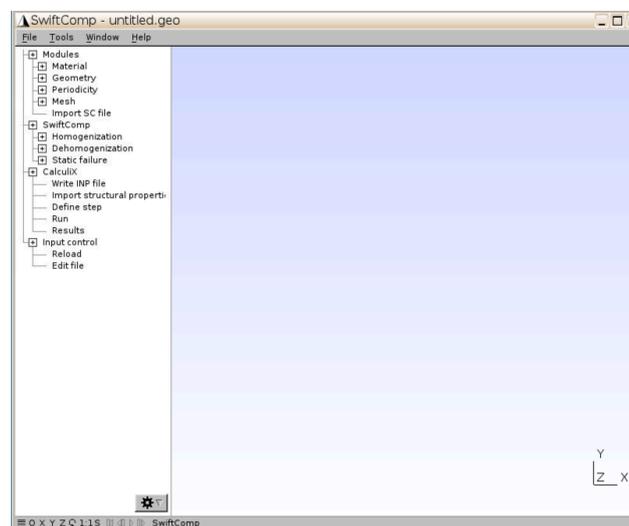
A tabela 01 apresenta o desempenho mecânico e densidade de diversos tipos de fibras naturais.

2.8. SWIFTCOMP

Com base na recém-desenvolvida Mecânica da Estrutura do Genoma (MSG), o SwiftComp™ oferece uma abordagem eficiente e precisa para modelar materiais e

estruturas compostas. Pode ser utilizado de forma independente como uma ferramenta para testes virtuais de compósitos ou como um plugin para melhorar os códigos FEA (Finite Element Analysis) convencionais com modelagem multiescala de alta fidelidade para compósitos. O SwiftComp™ emprega uma teoria multiescala genuína, garantindo os melhores modelos com eficiência para capturar a anisotropia e a heterogeneidade dos constituintes compostos em nível microscópico. Além disso, permite que os engenheiros modelem compósitos como alumínio preto, capturando os detalhes necessários e acessíveis. Isso resulta em economia significativa de tempo e recursos de computação, mantendo a precisão e possibilitando a resolução eficaz de problemas complexos. A figura 07 apresenta a tela inicial da aplicação SwiftComp.

Figura 07 - Tela inicial da aplicação *SwiftComp*™.



(Autor, 2024)

O menu principal da aplicação é dividido em três seções principais: Módulos, SwiftComp e Controle de Entrada (*Input Control*). Na seção Módulos, os usuários podem definir propriedades de materiais e criar modelos geométricos, utilizando o Common SG ou entidades elementares como ponto, linha, superfície e volume. A seção também inclui a geração de malhas. Na seção SwiftComp, os usuários podem realizar a homogeneização e desomogeneização para diferentes tipos de modelos estruturais. Na seção CalculiX, há opções para gravar arquivos INP, importar propriedades estruturais, definir etapas, executar análises de elementos finitos e visualizar resultados. A seção Controle de Entrada permite aos usuários editar e recarregar arquivos de texto contendo informações dos módulos. A aplicação oferece uma forma prática de criar modelos SG comuns.

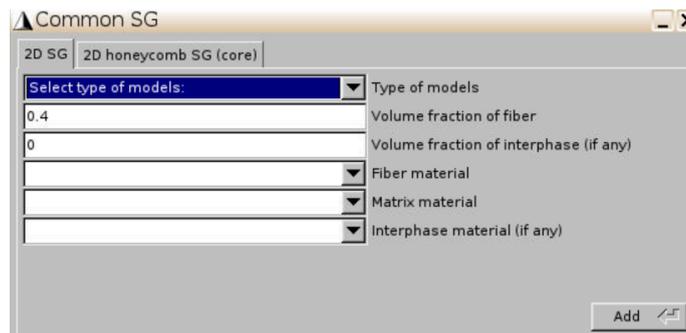
Para a execução dos resultados apresentados neste trabalho, utilizou-se as seções de módulo, para adição de propriedades dos materiais (matriz e reforço), apresentado na figura 08, posteriormente, empregou-se a adição da SG 2D, figura 09. Por fim, foi gerado a malha da SG 2D e 1D.

Figura 08 - Adição de propriedades dos materiais no *SwiftComp*



(Autor, 2024)

Figura 09 - Fração volumétrica de uma SG 2D no *SwiftComp*.



(Autor, 2024)

3. METODOLOGIA

A metodologia para este trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica sobre a história da utilização das alvenarias com funções estruturais, um estudo inicial de materiais compósitos e suas aplicações, bem como o estudo inicial de homogeneização de alvenarias não reforçadas e reforçadas e a revisão bibliográfica de reforço de matriz cimentícia reforçada com malha de fibras naturais.

Após estas etapas concluídas, deu-se início aos estudos do *SwiftComp*TM, software responsável pela implementação do Método das Estruturas Genoma, que foi desenvolvido pelo professor Dr. Wenbin Yu e seus colaboradores, implementando as aplicações do MSG na homogeneização do reforço de NFRCM e também em alvenarias reforçadas por NFRCM, comparando por fim, os resultados obtidos com os presentes na literatura.

Posteriormente, tratou-se da obtenção das constantes elásticas do reforço de matriz cimentícia reforçada com tecido de fibras naturais (NFRCM) por meio do processo de homogeneização utilizando a técnica Mechanics of Structure Genome (MSG). Para tal, considerou-se uma Estrutura Gene (SG) bidimensional (2D) formada pela matriz cimentícia com uma inclusão (contínua) de um fio de sisal. Para as constantes de engenharia, utilizou-se os dados obtidos por ALMEIDA E LOURENÇO (2020), diante disso, passou-se para a última etapa de homogeneização, que consiste na caracterização numérica da alvenaria reforçada, onde se considerou um reforço com espessura de 10 mm, segundo CAROZZI e POGGI (2015) e DE CARVALHO BELLO et al. (2019), com a fração volumétrica de 2% de fibras, valor mais próximo ao utilizado por OLIVITO et al, (2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os principais resultados extraídos deste texto, obtidos a partir da análise numérica na utilização do MSG (*Mechanics of Structure Genome*) na homogeneização dos elementos bidimensionais (2D) e unidimensionais (1D).

4.1. HOMOGENEIZAÇÃO DO NFRCM

Inicialmente, para uma averiguação dos resultados, realizou-se a homogeneização bidimensional e unidimensional que SANTOS, et al. (2020) realizou, onde chegou-se aos mesmos resultados obtidos. Diante disso, avaliou-se os estudos realizados por DE CARVALHO BELLO (2021), DE CARVALHO BELLO E CECCHI (2017), onde coletou-se os dados do Módulo de *Young* para a matriz cimentícia, bem como para as fibras de sisal e o coeficiente de *Poisson* dos mesmos. A tabela 02 apresenta os dados.

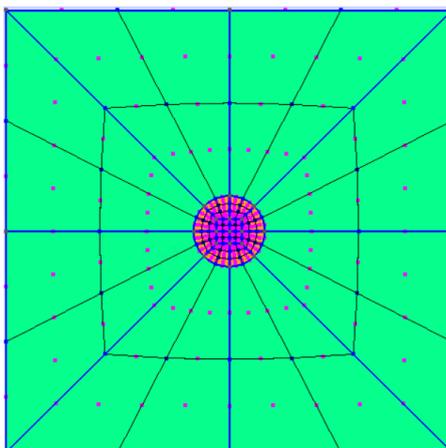
Tabela 02 - Dados utilizados para homogeneização.

Módulo de Young Matriz (GPa)	Módulo de Young do Sisal (GPa)	Coefficiente de Poisson
14,429	7,142	0,20

Fonte: Autor, (2023).

Utilizou-se nesta etapa a variação entre baixa fração volumétrica (inferior a 1%) e fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%) que METHA & MONTEIRO (2008) apresentaram, sendo visto também em OLIVITO (2014), visto que superior a esta porcentagem apresentada, poderia haver dificuldades de trabalhabilidade do compósito matriz/fibra. A discretização do modelo computacional 2D é apresentada na figura 10.

Figura 10 - Modelo computacional da fibra e matriz cimentícia.



Fonte: Autor (2023).

Partiu-se da premissa de que os materiais possuíam o comportamento isotrópico, onde no *input* inicial para a realização da homogeneização se colocou os valores do módulo de Young e do coeficiente de Poisson. Como *output*, obteve-se seis variáveis que são apresentadas na tabela 03, em que as constantes de engenharia são apresentadas onde E1 seria o módulo de Young no sentido vertical da fibra .

Tabela 03 - Resultados da homogeneização da SG 2D.

Fração Volumétrica	$E1$	$E2$	$E3$	$G12$	$G13$	$G23$	$\nu12$	$\nu13$	$\nu23$
0,00%	14,4290	14,429	14,4290	6,012083	6,012083	6,012083	0.20	0.20	0.20
0,50%	14,3925	14,37782	14,37782	5,99236	5,99236	5,990093	0.20	0.20	0.20
1,00%	14,3561	14,32548	14,32548	5,972319	5,972319	5,967518	0.20	0.20	0.20
1,50%	14,3197	14,27301	14,27301	5,952244	5,952244	5,944764	0.20	0.20	0.20
2,00%	14,2832	14,22065	14,22065	5,93219	5,93219	5,921925	0.20	0.20	0.20

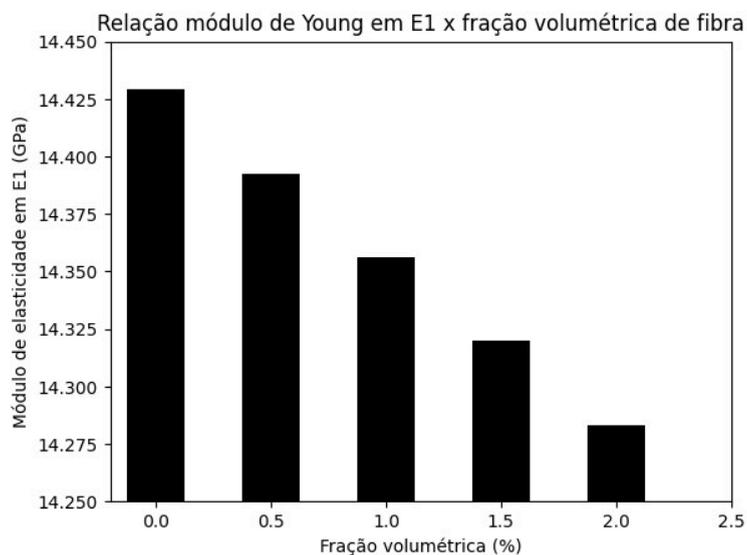
Fonte: Autor (2023).

A tabela 03 apresenta as constantes elásticas do NFRCM para diferentes valores de fração volumétrica do fio de sisal. Observa-se que a direção 1 corresponde à direção longitudinal dos fios de sisal e as direções 2 e 3 definem a SG, sendo a direção 2 na horizontal e a 3 na vertical. Uma vez que o módulo de Young do fio de sisal é menor que o da matriz cimentícia – menos da metade –, a respectiva constante elástica do composto diminui com o aumento da fração volumétrica de sisal, porém a maior redução é de 1,45% nas constantes E2 e E3, que se apresentam no sentido perpendicular à fibra, para uma fração volumétrica de sisal de 2%. Conforme esperado, o módulo de Young na direção longitudinal dos fios (E1) é maior que nas direções perpendiculares

(E2 e E3), chegando a 0,44% maior para fração volumétrica de 2%. Observa-se também que, no processo de homogeneização, foram consideradas condições de contorno periódicas nas 3 direções. Porém, considerando-se periodicidade apenas nas direções 1 e 2, a diferença máxima é menor que 0,03%.

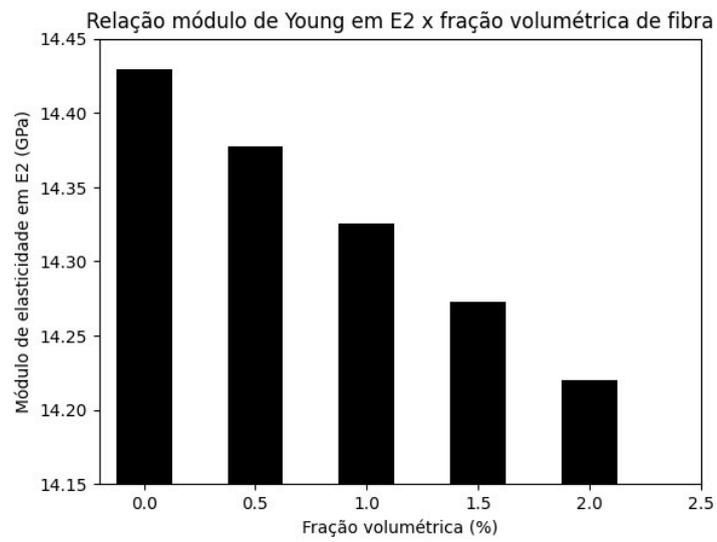
Observa-se diante dos dados obtidos que a homogeneização ocorreu de forma prevista, visto que houve um decréscimo dos valores das constantes de engenharia pois a fração volumétrica da fibra de sisal (que possui um módulo de Young inferior ao da matriz), variou em um sentido positivo, sendo acrescido 0,50% no intervalo entre 0% a 2%. Os valores ficam mais nítidos quando são apresentados nos gráficos a seguir.

Figura 11 - Módulo de Young em E1 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



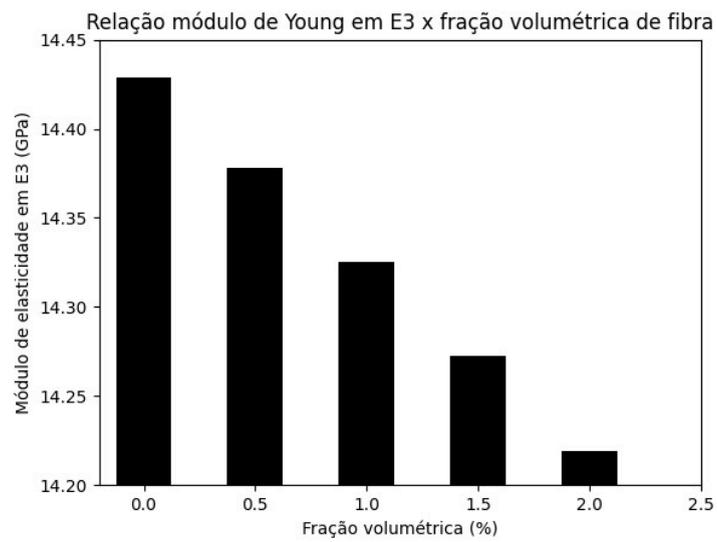
Fonte: Autor (2023).

Figura 12 - Módulo de Young em E2 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



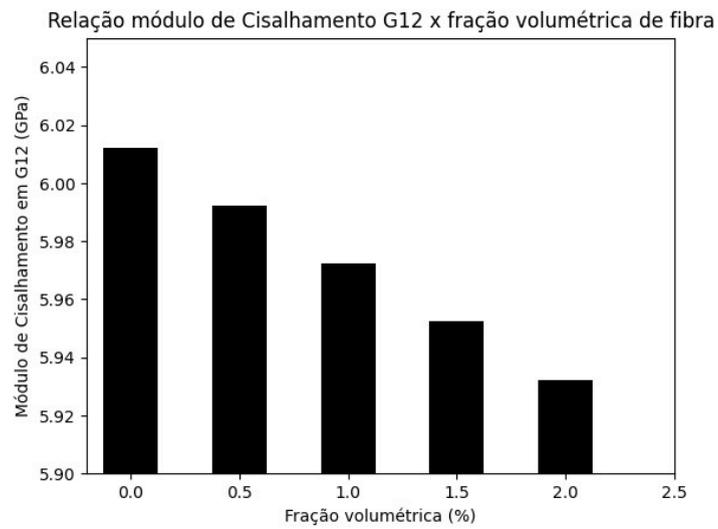
Fonte: Autor (2023).

Figura 13 - Módulo de Young em E3 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



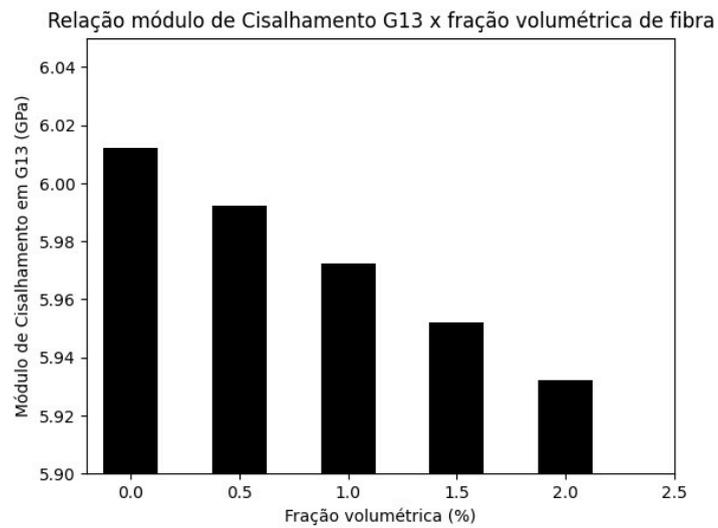
Fonte: Autor (2023).

Figura 14 - Módulo de Young em G12 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



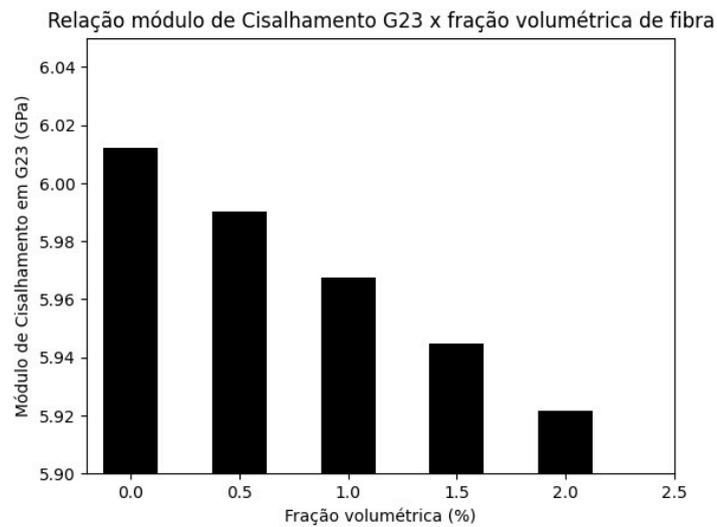
Fonte: Autor (2023).

Figura 15 - Módulo de Young em G13 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 - Módulo de Young em G23 *versus* Variação da fração volumétrica da fibra.



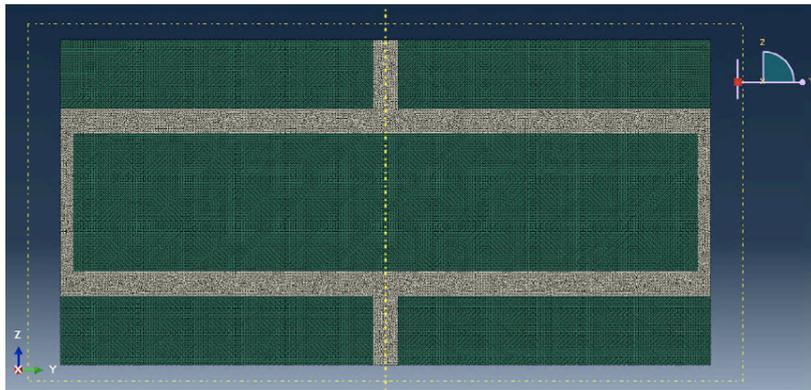
Fonte: Autor (2023).

Por fim, observou-se também que o coeficiente de *Poisson* não apresentou variação, isso também era esperado, pois aqui, tomou-se como iguais para ambos os materiais. Ressalta-se que, diante dos resultados obtidos, percebeu-se uma perda na resistência da matriz cimentícia.

4.2. HOMOGENEIZAÇÃO DA ALVENARIA REFORÇADA POR NFRCM

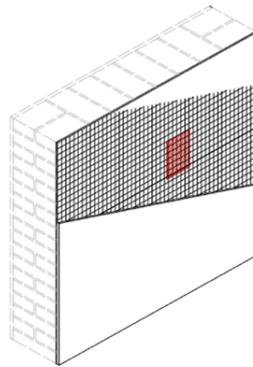
A alvenaria estudada aqui é a mesma usada por Almeida e Lourenço (2020), chamada de padrão running bond. Ela é feita com blocos de argila padrão italiano (UNI 5628/65), medindo 250 mm × 120 mm × 55 mm, com uma resistência de 11.000 MPa e uma taxa de Poisson de 0,20. A espessura da argamassa tem 10 mm, Carozzi et al (2015), com uma resistência de 2.200 MPa e uma taxa de Poisson de 0,25. A parede tem uma espessura total de 120 mm. Esse tipo de alvenaria já foi usado por muitos outros autores, como Anthoine (1995), Milani et al. (2008), Milani (2011) e Bertolesi et al. (2016). Para tornar a análise da alvenaria mais simples, utilizamos um método chamado SG 2D, representado na Figura 17, que foi dividido em 34.823 elementos (com 35.140 nós). A figura 18 representa o Modelo virtual da alvenaria reforçada no NFRCM.

Figura 17 - Discretização da estrutura gene 2D da alvenaria.



(ALMEIDA E LOURENÇO, 2020).

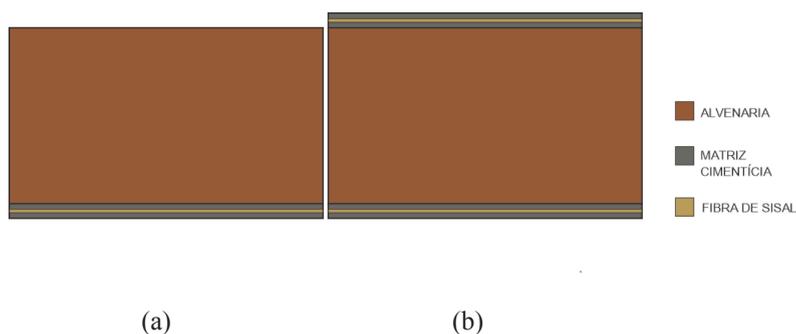
Figura 18 - Modelo virtual da alvenaria reforçada no NFRCM.



DE CARVALHO BELLO et al. (2019)

Nesta etapa, desenvolveu-se o modelo de homogeneização da alvenaria acrescida do reforço (matriz cimentícia e fibra de sisal) com SG 1D, apresentado na figura 19(a) e (b). A figura 19(a) representa uma homogeneização com camada única de reforço, enquanto que a figura 19(b) representa uma homogeneização com dupla camada. Na figura 19 (a), mostra-se o modelo de homogeneização assimétrica, ou seja, apenas um dos lados da alvenaria recebeu o reforço, na figura 19(b), mostra-se o modelo simétrico, sendo a alvenaria reforçada em ambos os lados.

Figura 19 - Alvenaria com reforço assimétrico e simétrico, respectivamente.



Fonte: Autor (2023).

Realizou-se também uma avaliação dos resultados em que houve variação angular entre as camadas do reforço, admitindo-se a espessura de 5mm para cada camada (uma paralela ao eixo vertical e outra paralela ao eixo horizontal).

Dos resultados numéricos obtidos apresentados nas tabelas 04, 05 e 06 para os modelos de camada única com fibras em paralelo à alvenaria, constatou-se um aumento relevante no módulo de Young da direção vertical E1 que variou entre 7,98% para alvenaria reforçada de forma assimétrica com fração volumétrica de 2,00% e 8,14% para fração volumétrica de 0,50% (desconsiderou-se a fração volumétrica como sendo de 0%, visto que não haveria a utilização da fibra de sisal no modelo). Para os modelos simétricos que são apresentados nas tabelas 07, 08 e 09, a variação do módulo de Young na direção vertical E1 se deu entre 14,76% e 15,11%. Houve um crescimento nos demais módulos de elasticidades E2 (direção horizontal) e E3 (direção perpendicular à alvenaria), que variaram entre 9,16% e 9,38% para E2 e 5,39% e 5,52%. Todos os resultados apresentados aqui são com relação à alvenaria estrutural não reforçada denominada aqui de *Unreinforced Masonry* ou URM.

Não obstante, observou-se também um crescimento no módulo de cisalhamento G12 de que variou entre 9,74% e 9,92% para os modelos assimétricos e 18,10% e 18,43% para os modelos simétricos. Estes valores se tornam relevantes, pois aumentam a resistência a esforços cisalhantes, vistos em eventos sísmicos, por exemplo.

Para os modelos numéricos de camada única com fibras na perpendicular à alvenaria, observou-se um aumento de E1 variando entre 8,12% e 7,95%. Notou-se também que, quando o reforço utilizado foi o de duas camadas com 5 mm de espessura cada (uma camada sendo com fibras paralelas ao eixo horizontal e outro paralelo ao

eixo vertical), seus valores de ganho permaneceram entre o intervalo das fibras totalmente alinhadas à horizontal e à vertical, como observado na tabela 05.

Tabela 04 - Alvenaria com reforço assimétrico, fibras de sisal distribuídas em 0°.

0° (ALVENARIA) + 0° (REFORÇO)								
	URM	FV = 0,00%	FV = 0,50%	FV = 1,00%	FV = 1,50%	FV = 2,00%	% para FV = = 0,50%	% para FV = = 2%
E1	7001,29	7573,89	7571,08	7568,27	7565,47	7562,66	8,14%	8,02%
E2	8681,08	9123,25	9119,32	9115,28	9111,23	9107,19	5,05%	4,91%
E3	9360,80	9635,89	9633,93	9631,89	9629,84	9627,77	2,92%	2,85%
G12	2617,00	2878,16	2876,64	2875,10	2873,55	2872,01	9,92%	9,74%
G13	2721,07	2840,69	2840,35	2840,00	2839,65	2839,30	4,38%	4,34%
G23	3597,23	3711,92	3711,27	3710,60	3709,92	3709,23	3,17%	3,11%
v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	2,58%	2,55%
v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	1,90%	1,90%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,47%	0,49%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 05 - Alvenaria com reforço assimétrico, fibras de sisal distribuídas em 0° e 90°.

0° (ALVENARIA) + 0° + 90° (REFORÇO)								
	URM	FV = 0.00%	FV = 0.50%	FV = 1.00%	FV = 1.50%	FV = 2.00%	% para FV = = 0,50%	% para FV = = 2%
E1	7001,29	7573,89	7570,50	7567,07	7563,64	7560,20	8,13%	7,98%
E2	8681,08	9123,25	9119,88	9116,47	9113,04	9109,62	5,05%	4,94%
E3	9360,80	9635,89	9633,92	9631,89	9629,83	9627,76	2,92%	2,85%
G12	2617,00	2878,16	2876,64	2875,10	2873,55	2872,01	9,92%	9,74%
G13	2721,07	2840,69	2840,33	2839,96	2839,58	2839,20	4,38%	4,34%
G23	3597,23	3711,92	3711,31	3710,67	3710,03	3709,39	3,17%	3,12%
v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	2,57%	2,52%
v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	1,90%	1,91%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,47%	0,48%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 06 - Alvenaria com reforço assimétrico, ângulo de 90° das fibras.

0° (ALVENARIA) + 90° (REFORÇO)							
	URM	FV = 0.50%	FV = 1.00%	FV = 1.50%	FV = 2.00%	% para FV = 0,50%	% para FV = 2%
E1	7001,29	7569,93	7565,88	7561,81	7557,74	8,12%	7,95%
E2	8681,08	9120,45	9117,65	9114,85	9112,04	5,06%	4,96%
E3	9360,80	9633,92	9631,89	9629,83	9627,76	2,92%	2,85%
G12	2617,00	2876,64	2875,10	2873,55	2872,01	9,92%	9,74%
G13	2721,07	2840,31	2839,92	2839,52	2839,11	4,38%	4,34%
G23	3597,23	3711,34	3711,07	3710,15	3709,55	3,17%	3,12%
v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	2,56%	2,50%

v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	1,90%	1,93%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,47%	0,47%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 07 - Alvenaria com reforço simétrico, ângulo de 0° das fibras.

0°(REFORÇO) + 0°(ALVENARIA) + 0°(REFORÇO)								
	URM	FV = 0.00%	FV = 0.50%	FV = 1.00%	FV = 1.50%	FV = 2.00%	% para FV = 0,50%	% para FV = 2%
E1	7001,29	8064,43	8059,22	8054,01	8048,80	8043,59	15,11%	14,89%
E2	8681,08	9502,25	9494,94	9487,45	9479,93	9472,41	9,38%	9,12%
E3	9360,80	9881,32	9877,53	9873,62	9869,66	9865,68	5,52%	5,39%
G12	2617,00	3102,01	3099,19	3096,33	3093,46	3090,59	18,43%	18,10%
G13	2721,07	2951,91	2951,23	2950,53	2949,83	2949,13	8,46%	8,38%
G23	3597,23	3816,21	3814,94	3813,62	3812,28	3810,93	6,05%	5,94%
v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	4,59%	4,55%
v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	3,56%	3,57%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,87%	0,90%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 08 - Alvenaria com reforço simétrico, fibras de sisal distribuídas em 0° e 90°.

90°(REFORÇO) + 0°(REFORÇO) + 0°(ALVENARIA) + 0° (REFORÇO) + 90° (REFORÇO)								
	URM	FV = 0.00%	FV = 0.50%	FV = 1.00%	FV = 1.50%	FV = 2.00%	% para FV = 0,50%	% para FV = 2%
E1	7001,29	8064,43	8058,16	8051,79	8045,41	8039,03	15,10%	14,82%
E2	8681,08	9502,25	9495,99	9489,64	9483,28	9476,92	9,39%	9,17%
E3	9360,80	9881,32	9877,53	9873,62	9869,66	9865,68	5,52%	5,39%
G12	2617,00	3102,01	3099,19	3096,33	3093,46	3090,59	18,43%	18,10%
G13	2721,07	2951,91	2951,19	2950,45	2949,70	2948,94	8,46%	8,37%
G23	3597,23	3816,21	3815,00	3813,76	3812,51	3811,24	6,05%	5,95%
v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	4,58%	4,50%
v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	3,57%	3,59%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,87%	0,88%

Fonte: Autor (2023).

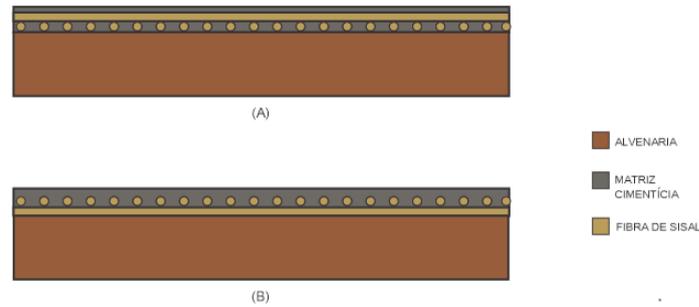
Tabela 09 - Alvenaria com reforço simétrico, ângulo de 90° das fibras.

90°(REFORÇO)+ 0°(ALVENARIA) + 90°(REFORÇO)								
	URM	FV = 0.00%	FV = 0.50%	FV = 1.00%	FV = 1.50%	FV = 2.00%	% para FV = 0,50%	% para FV = 2%
E1	7001,29	8064,43	8057,09	8049,57	8042,01	8034,46	15,08%	14,76%
E2	8681,08	9502,25	9497,05	9491,84	9486,64	9481,43	9,40%	9,22%
E3	9360,80	9881,32	9877,53	9873,61	9869,66	9865,67	5,52%	5,39%
G12	2617,00	3102,01	3099,19	3096,33	3093,46	3090,59	18,43%	18,10%
G13	2721,07	2951,91	2951,15	2950,36	2949,56	2948,75	8,46%	8,37%
G23	3597,23	3816,21	3815,07	3813,91	3812,73	3811,55	6,06%	5,96%

v12	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	4,57%	4,45%
v13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	3,57%	3,61%
v23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,86%	0,86%

Fonte: Autor (2023).

Figura 20 - (A) modelo 0° + 90° e (B) modelo 90° + 0°.



Fonte: Autor (2023).

Por fim, observou-se também que a variação entre as camadas 0° (reforço) + 90° (reforço) não houve mudança nos valores numéricos entre o reforço do tipo 90° (reforço) + 0° (reforço). Essa visualização pode ser vista na figura 20 em um modelo assimétrico de reforço.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo aborda a análise preliminar da homogeneização de um novo tipo de reforço estrutural composto por uma matriz cimentícia reforçada internamente por um tecido de fibras naturais, conhecido como NFRCM, bem como a homogeneização de alvenarias reforçadas por esse tipo de reforço. Para tal análise, empregou-se uma técnica inovadora de modelagem multi-escala desenvolvida por Yu (2016), denominada Mecânica das Estruturas Genoma (MSG).

As constantes elásticas tridimensionais (3D) do reforço NFRCM foram determinadas a partir da solução de um problema bidimensional (2D). Notavelmente, a obtenção dessas constantes pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) exigiria uma abordagem 3D, acarretando em custos computacionais substanciais e na necessidade de impor condições de contorno periódicas, o que poderia dificultar a análise.

Por outro lado, a técnica MSG incorpora implicitamente essas condições de contorno em sua formulação. Da mesma forma, a homogeneização da alvenaria utilizando a técnica MSG também é tratada como um problema 2D, com resultados consistentes com estudos anteriores conduzidos por ALMEIDA E LOURENÇO (2020) e ALMEIDA E CECCHI (2021).

A homogeneização da alvenaria reforçada por NFRCM é realizada considerando um problema unidimensional (1D), onde o reforço pode ser aplicado de forma assimétrica (em apenas uma face) ou simétrica (em ambas as faces). O reforço NFRCM é analisado com os fios de sisal dispostos verticalmente, horizontalmente e em camada dupla (uma na vertical e outra na horizontal).

Verifica-se que os maiores aumentos nos módulos de Young nas direções vertical e horizontal ocorrem quando as fibras são posicionadas nessas direções, com valores de 8,14% e 5,05% para alvenaria reforçada assimétrica e 15,11% e 9,40% para alvenaria reforçada simétrica. Os módulos de Young obtidos com o reforço em camada dupla coincidem com o valor médio das configurações vertical e horizontal. Ao avaliarmos de forma holística, após a alvenaria receber o reforço de NFRCM, ocorre um aumento na resistência e a esforços de tração.

A continuação do presente estudo segue em duas frentes: uma no desenvolvimento de uma melhor estratégia para a consideração do tecido de fibras

naturais que reforça a matriz cimentícia do NFRCM, semelhante ao que foi feito por LIU et al. (2017); outra na aplicação de outra técnica de homogeneização também recente, finite-volume direct averaging micromechanics (FVDAM), utilizada por ESCARPINI FILHO E ALMEIDA (2023) na homogeneização de alvenarias não reforçadas e reforçadas por FRP (fiber reinforced polymer).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, S.; PAGE, A.W. (1987). **Non-linear finite element analysis of masonry subjected to concentrated load**. Proc. Instn. Civil Engrs. v.83, p.815-832, Dec.

ALI, Sk Sekender; PAGE, Adrian W. **Finite element model for masonry subjected to concentrated loads**. Journal of structural engineering, v. 114, n. 8, p. 1761-1784, 1988.

ALMEIDA, Francisco PA; CECCHI, Antonella. Mechanics of structure genome applied in the homogenization of masonry reinforced by FRP repointing technique. **Computers & Structures**, v. 253, p. 106576, 2021.

ALMEIDA, Francisco PA; LOURENÇO, Paulo B. HOMOGENEIZAÇÃO ELÁSTICA DE ALVENARIA UTILIZANDO MECÂNICA DAS ESTRUTURAS GENE. **XL CILAMCE - Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. 2019.

ALMEIDA, Francisco PA; LOURENÇO, Paulo B. Three-dimensional elastic properties of masonry by mechanics of structure gene. **International Journal of Solids and Structures**, v. 191, p. 202-211, 2020.

AMRHEIN, J.E. (1978) **Reinforced masonry engineering handbook**. Masonry Institute of America.

ANTHOINE, Armelle. Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory. **International journal of solids and structures**, v. 32, n. 2, p. 137-163, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, [2005].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1: **Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural - Parte 1: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, [2017].

BASTOS, P. S. Alvenaria Estrutural. **Apostila**. UNESP, Bauru, 2021.

BERTOLESI, Elisa; MILANI, Gabriele; LOURENÇO, Paulo B. Implementation and validation of a total displacement non-linear homogenization approach for in-plane loaded masonry. **Computers & Structures**, v. 176, p. 13-33, 2016.

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J.;(1999). **Composites reinforced with cellulose based fibers**. Progress in Polymer Science, v.24, p.221-274.

CALLISTER, William D. et al. **Fundamentals of materials science and engineering**. London: Wiley, 2000.

COSTA, Eliane Betânia Carvalho. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DE CARVALHO BELLO, Claudia Brito et al. **Experimental and numerical investigations on the behaviour of masonry walls reinforced with an innovative sisal FRCM system**. *Key Engineering Materials*, v. 747, p. 190-195, 2017.

DE CARVALHO BELLO, Claudia Brito et al. Experimental Characterization of Masonry Panels Strengthened with NFRCM. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2021. p. 43-48.

DE CARVALHO BELLO, Claudia Brito et al. **Numerical and theoretical models for NFRCM-strengthened masonry**. *Key Engineering Materials*, v. 817, p. 44-49, 2019.

DICKEY, W.L.; SCHNEIDER, R.R. (1994). **Reinforced masonry design**. Englewood Cliffs, Prentice Hall.

ESCARPINI FILHO, Romildo S.; ALMEIDA, Francisco PA. Reinforced masonry homogenization by the finite-volume direct averaging micromechanics—FVDAM. **Composite Structures**, v. 320, p. 117185, 2023.

FERREIRA, Ludmila. **Análise comparativa entre uma construção em alvenaria estrutural e convencional**. 2023.

FUSCHI, P.; GIAMBANCO, G.; RIZZO, S. (1995). **Nonlinear finite element analysis of no-tension masonry structures**. *Meccanica*, v.30, p.233-249.

GALLEGOS, H. (1991). **Albañilería estructural**. Peru, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Segunda edición.

HILL, Rodney. Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 11, n. 5, p. 357-372, 1963.

JÚNIOR, José de Almeida Freitas. Alvenaria Estrutural—Construção Civil II. 2013 Apostila de Construção Civil. **Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba**, 2013.

LOURENÇO, P.B.; ROTS, J.G.; BLAAUWENDRAAD, J. (1998). **Continuum model for masonry: parameter estimation and validation**. *Journal of Structural Engineering*, v.124, n.6, p.642-652, Jun.

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

MILANI, Enrico; MILANI, Gabriele; TRALLI, Antonio. Limit analysis of masonry vaults by means of curved shell finite elements and homogenization. **International Journal of Solids and Structures**, v. 45, n. 20, p. 5258-5288, 2008.

- MILANI, Gabriele. Kinematic FE limit analysis homogenization model for masonry walls reinforced with continuous FRP grids. **International journal of solids and structures**, v. 48, n. 2, p. 326-345, 2011.
- MOHAMAD, Gihad; MACHADO, Diego Willian Nascimento; JANTSCH, Ana Cláudia Akele. **Alvenaria estrutural: construindo o conhecimento**. Editora Blucher, 2021.
- NEMAT-NASSER, Sia; HORI, M.; BIELSKI, W. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials. **Pure and Applied Geophysics**, v. 145, n. 2, p. 376-377, 1995.
- OLIVITO, Renato Sante; CEVALLOS, O. A.; CARROZZINI, A. Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. **Materials & Design**, v. 57, p. 258-268, 2014.
- PAGANO, N. J.; RYBICKI, E. F. On the significance of effective modulus solutions for fibrous composites. **Journal of Composite Materials**, v. 8, n. 3, p. 214-228, 1974.
- PAGE, A.W. (1978). **Finite element model for masonry**. Journal of the Structural Division, v.104, n.ST8, p.1267-1285, Aug.
- PAGE, A.W. (1981). **The biaxial compressive strength of brick masonry**. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, vol. 71, n. 3, pp. 893–906.
- PAGE, A.W.; SHRIVE, N.G. (1990). **Concentrated loads on masonry**. **British Masonry Society Proceedings**, n.4, p.74-77.
- PELETEIRO, Suzana Campana. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural**. São Carlos, 2002.
- RIDDINGTON, J.R.; NAOM, N.F. (1994). **Finite element prediction of masonry compressive strength**. **Computers and Structures**, v.52, n.1, p.113-119.
- ROTS, J.G. (1991). **Smearred and discrete representations of localized fracture**. International Journal of Fracture, v.51, p.45-59.
- SANTOS, William T.O.; SILVA, Alícia C.L.; AZEVEDO, Gabriela S. **Application of Mechanics of Structure Genome in the homogenization of masonry reinforced by CFRP**. Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2020.
- SINHA, B.P.; MAURENBRECHER, A.H.P., HENDRY, A.W. (1970). **Model and full scale tests on a five-story cross-wall structure under lateral loading**. In: IBMaC, 2, Stoke-on-Trent, apr. 1970, p. 201-208.

X. Liu, K. Rouf, B. Peng, and W. Yu. **Two-step homogenization of textile composites using mechanics of structure genome**. *Composite Structures*, vol. 171, pp. 252–262, 2017.

YU, Wenbin. A unified theory for constitutive modeling of composites. **Journal of Mechanics of Materials and Structures**, v. 11, n. 4, p. 379-411, 2016.