



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo

Willian Mayrink da Silva

***Plugin* no Revit para verificação de paredes de alvenaria  
estrutural de contraventamento.**

Campinas  
2021



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Willian Mayrink da Silva

***Plugin no Revit para verificação de paredes de alvenaria  
estrutural de contraventamento.***

Trabalho Final de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do  
título de **Bacharel em Engenharia Civil** à  
Faculdade de Engenharia Civil,  
Arquitetura e Urbanismo da Universidade  
Estadual de Campinas.

Orientador(a): Luiz Carlos de Almeida

Campinas  
2021



## ***Plugin* no Revit para verificação de paredes de alvenaria estrutural de contraventamento.**

Willian Mayrink da Silva

Banca Examinadora

.....  
Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida

.....  
Prof.Dr. Leonardo Henrique Borges de Oliveira

.....  
Mestre Marcos Alves da Silva

Aprovado em: \_\_\_\_\_



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Wilson e Maria Rosa que cederam todo apoio financeiro e emocional durante todos esses anos e sempre me fizeram acreditar que tudo é possível.

Aos meus irmãos e sobrinhos que mesmo longe sempre demonstraram amor e na medida do possível presentes.

Ao Programa de Formação Interdisciplinar Superior - ProFIS que foi o marco chave para que eu conseguisse estar hoje realizando essa graduação.

Ao professor Luiz Carlos de Almeida por ter sido meu orientador e ter compartilhado seu conhecimento tanto para este trabalho como durante a faculdade.

A todos meus amigos que compartilharam bons momentos e tornaram a caminhada mais fácil. Em especial ao meu amigo Gabriel de Paula, amigo de tantos anos e colega de faculdade que me acompanhou durante esses anos.

Aos meus amigos de trabalho Leandro, João Pedro e Matheus que compartilharam seu conhecimento que foi de grande importância.

A minha namorada Elisa pelo companheirismo e paciência nos momentos de estudos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que essa realização pudesse ser concretizada, em especial a todos os professores que me acompanharam durante essa trajetória.



## RESUMO

O uso da metodologia BIM tornou-se imprescindível nos dias atuais devido a facilidade de compatibilização dos projetos, o qual gera um ganho na produtividade além de facilitar a sua execução. Juntamente com a evolução do BIM, outra área que torna-se necessária é a utilização da programação que traz otimização dos processos e reduz o tempo de tarefas repetitivas, com isso a sua aplicação ao BIM é uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de projetos. O software Autodesk Revit é um dos mais utilizados atualmente que baseia-se na metodologia BIM e disponibiliza acesso a sua API para criação de *plugins*. Assim, o presente trabalho aborda a criação de um *plugin* dentro do software Revit, o qual realiza a verificação de paredes de alvenaria estrutural de contraventamento no estágio III. As análises realizadas para validação do algoritmo foram de acordo com a teoria aplicada, e quando comparado a exemplos de cálculo apresentou uma baixa diferenciação nos resultados. O *plugin* apresentou um desempenho computacional aceitável visto que o processamento necessário pelo Revit é relativamente alto. Com a utilização de forma correta pelo projetista, o *plugin* apresenta potencial para aplicação em projetos de metodologia BIM além de realizar análises sobre o comportamento de resistência de determinadas subestruturas dentro do projeto.

Palavras chaves: Alvenaria estrutural, BIM, Programação aplicada, Paredes de contraventamento.



## ABSTRACT

The use of BIM methodology has become essential today due to the facility of project compatibility, which generates increased productivity and ease execution. Along with the evolution of BIM, another area that becomes necessary is the use of programming that optimizes processes and reduces the time of repetitive tasks, therefore its application to BIM is a powerful tool for project development. The Autodesk Revit software is one of the most famous currently that uses the BIM methodology and provides access to API for creating plugins. Therefore, this paper discusses the creation of a plugin within the Revit software, which performs the verification of bracing masonry structural walls in stage III. The analyses performed to validate the algorithm were in accordance with the applied theory, and when compared to calculation examples presented a low differentiation in the results. The plugin provided an acceptable computational performance considering that the processing required by Revit is relatively high. The correct use by the designer, the plugin presents potential for application in BIM methodology projects and also to analyze the resistance behavior of certain substructures within the project.

**Keywords:** Structural Masonry, BIM, Application programming, Bracing walls.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	3
1.2	OBJETIVOS.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	HISTÓRIA DA ALVENARIA.....	3
2.2	ALVENARIA ESTRUTURAL.....	4
2.2.1	BLOCOS DE CONCRETO.....	5
2.2.2	ARGAMASSA.....	5
2.2.3	GRAUTE.....	6
2.2.4	AÇO.....	6
2.3	CONCEPÇÃO DE PROJETO .....	7
2.4	CONCEPÇÃO ESTRUTURAL .....	8
2.4.1	CARGAS VERTICAIS.....	9
2.4.2	CARGAS HORIZONTAIS.....	11
2.5	NORMAS BRASILEIRAS.....	14
2.6	BUILDING INFORMATION MODELING (BIM).....	16
2.6.1	AUTOMATIZAÇÃO BIM (REVIT).....	17
2.6.2	LINGUAGEM C# NO REVIT.....	19
3.	METODOLOGIA.....	22
3.1	COMPRESSÃO SIMPLES.....	22
3.2	FLEXOCOMPRESSÃO.....	25
3.3	ESPECIFICAÇÃO BLOCOS.....	29
4.	DESENVOLVIMENTO.....	32
4.1	CRIAÇÃO DE FAMÍLIAS REVIT.....	32
4.2	COMPRESSÃO SIMPLES.....	33
4.3	FLEXOCOMPRESSÃO.....;	35
4.3.1	CASO ARMADURA MÍNIMA.....	35
4.3.2	CASO ARMADURA MAIOR QUE A MÍNIMA.....	36
4.4	JANELA DADOS DE ENTRADA.....	39



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1 JANELA DADOS DE ENTRADA.....	42
5.2 COMPORTAMENTO DA SEÇÃO.....	43
5.3 COMPARAÇÃO EXEMPLO LIVRO.....	46
5.4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL.....	51
6. CONCLUSÃO.....	52
7. REFERÊNCIAS.....	53



## 1. INTRODUÇÃO

O BIM (Building Information Modeling) se tornou um conceito bastante aplicado atualmente na área da construção, como principal característica o modelo tem como base integralizar os projetos de diferentes disciplinas, como por exemplo Arquitetura, Hidráulica, Elétrica e Estrutural, a fim de manter relações de compatibilização entre elas de forma que o projeto fique mais acessível ao cliente. Uma das ferramentas mais utilizadas atualmente para implementação do BIM é o Autodesk Revit (Versão 2020), com grande capacidade de modelagem e compatibilização entre os projetos.

A fase do projeto que é realizado no revit é apenas na parte de modelagem, na qual o dimensionamento de toda estrutura já foi realizado utilizando os softwares TQS alvest e o SAP2000. Com isso, implementar formas de análises e dimensionamento dentro de softwares de modelagem como o Revit, seria um grande avanço tanto para produtividade como para qualidade do projeto.

No ponto de modelagem que é verificado a compatibilização, assim se faz a análise entre a estrutura e outras disciplinas do projeto, sendo que ambas foram feitas em um modelo BIM. Nessa compatibilização surgem alterações de projeto, os quais ocasionam mudanças que refletem na estrutura, sendo assim necessário mudanças de pontos de aço, ou pontos de grauteamento, que mudam assim a resistência da parede. Essas mudanças precisam ser passadas novamente à equipe de dimensionamento, a qual se torna um processo repetitivo e oneroso. Com isso, surgem ferramentas dentro do Revit que podem dar agilidade para os processos, mantendo sempre a segurança exigida por norma.

Um mecanismo que pode ser explorado do Revit é pela programação acessando sua API (Application Programming Interface). Esta API pode ser acessada através de códigos realizados em linguagem python, como também pela linguagem C#. A API é uma forma dos usuários conseguirem acessar algumas funções padrões da raiz do software, e assim implementar ferramentas de acordo com a sua necessidade, a fim de automatizar alguma tarefa. Com isso, através dessa programação é possível implementar ferramentas de cálculos dentro do próprio Revit, essas ferramentas na literatura recebem o nome de *plugins*.

No âmbito da alvenaria estrutural, as subestruturas presentes que sofrem ações de flexocompressão são aquelas que exercem função de contraventamento e recebem as ações verticais de peso próprio juntamente com ações horizontais do vento, e estas paredes são consideradas tanto no eixo X como no eixo Y do edifício.

Na alvenaria estrutural o dimensionamento é realizado considerando a edificação como um todo, mas também é analisada cada elemento individualmente, segundo a divisão de subestruturas feita na concepção de projeto, assim sabe-se a partir disso quais ações cada elemento resistirá. Há diversos modelos que podem ser adotados para separação das subestruturas, alguns mais conservadores que têm um custo de material mais elevado, outros modelos menos conservadores, entretanto com uma rotina de cálculo ainda maior, então, de acordo com cada empreendimento o projetista estrutural deve analisar qual melhor método adotar de forma que a estrutura seja segura conforme prescreve a normalização.

Após a concepção de projeto, é possível analisar quanto de carga cada subestrutura receberá, e assim realizar o dimensionamento de blocos, grautes e armaduras, e fazer as verificações necessárias em cada elemento estrutural. Essas cargas podem ser obtidas com a utilização de diversos softwares, os quais podemos citar o TQS AlvEst e o SAP2000.

O cálculo para dimensionamento dessas paredes estruturais de alvenaria normalmente é realizado considerando seção homogênea com a resistência ponderada de prismas ocos e cheios. Como forma de trazer resultados mais precisos e de acordo com a norma vigente de alvenaria estrutural ABNT NBR 16868-1/2020, o trabalho visa criar um algoritmo dentro do Revit que realiza a verificação de paredes à flexocompressão considerando bloco a bloco da subestrutura. Assim, cada parte da parede que contribui para os equilíbrios de tensões vai ter sua parcela de contribuição discretizada, sendo estas, resistência dos prismas de blocos, resistências dos grautes e resistências dos aços, considerando o centro de gravidade de ambos para equilíbrio.

Utilizando as equações de equilíbrio de forças e momentos é possível dimensionar para o domínio III. Com isso, a lógica do algoritmo visa discretizar uma seção em vários valores de linha neutra, começando do ponto  $x=0$ , percorrendo toda a seção e encontrando assim valores de resistência normal e momento para cada ponto.

Esse algoritmo de cálculo será realizado a partir da linguagem de programação C# utilizando o IDE Studio Microsoft Visual Studio Community 2019 (Versão 16.10.0), pois como se trata da utilização de algumas funções mais complexas, considerou-se esta ferramenta mais adequada para desenvolvimento do *plugin*, destaca-se isso pois há outras linguagens com grande capacidade, como por exemplo o Python que também tem acesso a API do revit.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O modelo de desenvolvimento de projetos em BIM vêm se tornando cada vez mais presente no mercado devido a facilidade que ele traz para realização de compatibilização entre diferentes disciplinas no projeto. Com isso, busca-se mecanismos que façam tanto automatização de tarefas repetitivas como também possíveis dimensionamentos ou verificações dentro do software Revit, destacado no trabalho como um dos softwares utilizados para o BIM, podendo ser algo diferencial que traga mais produtividade e avanços na área de Cálculo Estrutural.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente trabalho tem como finalidade desenvolver uma calculadora de verificação de flexocompressão de paredes estruturais de contraventamento no estágio III dentro do software Revit. As definições serão baseadas nas especificações da norma vigente para alvenaria estrutural ABNT NBR 16868-1/2020, e as normas complementares que a referenciam. O modelo numérico de cálculo será discretizando a seção de uma subestrutura de forma que cada parcela da seção em equilíbrio tenha sua parcela considerada, assim trazendo resultados mais precisos e também auxiliando no desenvolvimento de projetos que utilizam softwares com metodologia BIM.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 HISTÓRIA DA ALVENARIA**

A utilização do modelo de construção em alvenaria estrutural começou muito antigamente, e é datado por muitas construções históricas feitas para habitações e monumentos. Tais monumentos eram construídos com a utilização de milhões de blocos de pedra, e como exemplo podemos citar o farol de Alexandria, o Coliseu e a Grande Pirâmide de Gizé.

Apesar da utilização do método no início do século, a alvenaria estrutural se desenvolveu de forma lenta durante os anos, e passou a ser mais estudada no início do século XX, desta vez utilizando bases científicas e experimentais, a qual abriu caminho para progressão do estudo na área e tomou as proporções que se tem atualmente.

Por muito tempo o concreto armado ficou sendo o método preponderante de construção devido às suas boas características que beneficiam a construção de edifícios mais altos. Com os esforços voltados para a área do concreto armado, a alvenaria estrutural sempre caminhou de forma lenta sendo utilizada apenas para edificações de porte pequeno, de até 4 pavimentos.

No ano de 1950 iniciou-se a chamada “moderna alvenaria estrutural”, após experimentos mais avançados na área, alguns países da Europa passaram a construir edifícios maiores. Na Suíça, Paul Haller dimensionou um prédio de 13 pavimentos em alvenaria não armada, tais estudos foram motivados pela escassez de concreto e aço provocado pela Segunda Guerra Mundial. Durante sua carreira, Paul Haller testou mais de 1600 paredes de tijolos maciços, com os resultados obtidos foi possível realizar a construção de um edifício de 18 pavimentos com espessura variando de 30 a 38 cm. Depois destes estudos, a partir das análises experimentais realizadas foi possível a disseminação e uso da alvenaria estrutural com base em teoria e critérios, em consequência outros países como Inglaterra, Estados Unidos, Alemanha, aderiram também a estas construções (ACCETTI, 1998).

No Brasil a alvenaria estrutural surgiu como uma técnica apenas no final da década de 60, visto que antecipadamente as construções eram feitas com base em conhecimento empírico sem nenhuma regulamentação quanto a resistência dos elementos estruturais, levando em consideração edifícios que já tinham sido construídos. No ano de 1966, iniciou-se a construção do conjunto Habitacional Central Park Lapa, o primeiro a utilizar o sistema de alvenaria estrutural tendo como material blocos de concreto de 19mm e 4 pavimentos.

Com o avanço dos estudos tornou-se possível dimensionar prédios maiores com espessuras de paredes cada vez menores, e atualmente no Brasil, tem-se como maior edifício o Solar dos Alcântaras, com 21 pavimentos e blocos com espessura de 14 cm em todos os andares (MOHAMAD, 2020).

## **2.2 ALVENARIA ESTRUTURAL**

A alvenaria estrutural pode ser classificada em não armada e armada. A alvenaria não armada é normalmente utilizada para edificações de baixa altura, a qual tem como resistência predominante a compressão e uma pequena resistência à tração. Dimensionamentos empíricos eram aceitáveis visto que a espessura de paredes do passado eram espessas, a qual trazia grande rigidez aos elementos e resistia com segurança aos esforços. Com a diminuição cada

vez mais da espessura das paredes, consequentemente a diminuição da sua esbeltez, a estrutura passou a ter resistências menores, tornando-se assim necessária a utilização de armaduras para auxiliar em sua resistência.

A alvenaria armada começou a ser utilizada devido a notória necessidade após casos em que terremotos ruíram construções, com isso tornou-se comum em regiões com alta probabilidade de ações sísmicas. Com a adição das armaduras, o elemento estrutural se torna mais resistente às ações de tração e cisalhamento, além de trazer maior ductilidade à estrutura. A utilização de armadura trouxe grandes avanços para a área, sendo possível a construção de edifícios maiores com paredes menos espessas do que antigamente.

### **2.2.1 BLOCOS DE CONCRETO**

O bloco de concreto é o tipo mais utilizado atualmente tanto como função de parede estrutural como também alvenaria de vedação. Com o principal componente sendo o concreto tem alta capacidade de resistência à compressão.

Esses elementos são aqueles que exercem a importante função de resistência à compressão, além de serem analisados quanto à modulação para compatibilização do projeto com a arquitetura.

As características destes blocos são determinadas pela norma vigente ABNT NBR 6136/2016.

### **2.2.2 ARGAMASSA**

A argamassa é o componente que de ligação entre os blocos assentados. A sua resistência mecânica é de grande importância, visto que a alvenaria estrutural trabalha como um painel homogêneo, portanto sua resistência tem influência na resistência final da alvenaria, então estas características devem ser consideradas para o bom funcionamento do conjunto (PARSEKIAN, 2014).

Outra característica relevante a se destacar é a espessura mínima da argamassa, visto que não pode ser fina, pois interfere na ligação entre os blocos, trazendo muita rigidez, normalmente um valor aceitável é 1 cm. Ela também deve apresentar boa trabalhabilidade para manuseio em obra, índices de materiais e processos de produção que são especificados em norma ABNT NBR 13279, ou também pela ABNT NBR 16868-2/2020.

Para evitar fissuras é recomendado que a resistência à compressão da argamassa seja limitada a 1,5 a resistência característica do bloco.

### **2.2.3 GRAUTE**

Graute é uma mistura de cimento, agregado e água, e sua principal diferença em relação ao concreto comum é um alto valor de abatimento. Ele é normalmente utilizado para preenchimento dos vazados dos blocos de alvenaria, e tem como função aumentar a resistência da parede e aderir a armadura ao bloco, como também em alguns casos pode ser utilizado para aumento do isolamento acústico de determinada parede. O valor de abatimento alto é necessário visto que o espaço de preenchimento de vazios dos blocos é pequeno.

Outra característica importante do graute é sua relação água/cimento maior que em concretos comuns. Este ponto se torna relevante visto que quando aplicado o graute, os blocos têm uma rápida absorção de água, reduzindo assim a relação água/cimento (PARSEKIAN, 2014).

Para utilização do graute é necessário ensaios em obra que comprovem a resistência à compressão. Por norma o valor mínimo deve ser de 15 MPa e a resistência deve ser determinada de acordo com as normas ABNT NBR 5738/2015 e ABNT NBR 5739/2018.

### **2.2.4 AÇO**

Assim como no concreto armado, na alvenaria estrutural as barras de aço tem a função de resistir a esforços de tração e cisalhamento, e também fornecer ductilidade para a estrutura, como no caso de ações sísmicas. Como não se utilizam estribos para travamento das armaduras verticais, estas não contribuem para resistência à compressão, sendo essa resistência desconsiderada.

O tipo de barras mais utilizadas são CA50, com sua tensão de escoamento característica de 500 MPa. O alongamento máximo permitido no aço é de 1%. e as especificações são regulamentadas pela ABNT NBR 7480/2007, e em casos de falta de ensaio pode ser adotado um módulo de elasticidade de 210 GPa.

## **2.3 CONCEPÇÃO DE PROJETO**

Nos projetos de alvenaria estrutural as paredes funcionam como elementos estruturais e tem a função de resistir às ações e carregamentos do edifício, além também de em alguns casos serem utilizadas como parede de vedação.

A execução de projeto deve ter uma colaboração intensiva entre o arquiteto e o engenheiro na fase de concepção e construção da obra, visando minimizar erros de projeto de forma que as diferentes disciplinas sejam alinhadas para fácil execução e entendimento pela equipe de construção.

Para elaboração do projeto é realizada diversas análises de necessidades apresentadas pelo cliente como por exemplo, características estéticas, funcionalidade e também de custo da obra. Com isso, é realizada a criação de diferentes layouts para apresentação e aprovação pelo cliente. Dentro dessas análises é realizado pelos projetistas estruturais um dimensionamento inicial de forma que analise as condições de estabilidade da edificação e obtenha-se um custo estimado. Esse processo geralmente é interativo, a fim de procurar qual a melhor solução, abordando todos os requisitos necessários.

Quanto à estabilidade do edifício é necessário que como um todo seja estável estruturalmente (estabilidade global) e isso também deve acontecer com cada elemento presente na estrutura, que no caso dos projetos em alvenaria estrutural esses esforços são resistidos pelas paredes estruturais. Ele deve ter resistência suficiente para que a transferência de esforços ao longo de todos os pavimentos tipo seja mantidas integralmente até a fundação para absorção desses esforços, sem que haja perda ou ruptura dos materiais de forma que cause ruptura e ruína da edificação.

As solicitações utilizadas no dimensionamento são provenientes da combinação de ações que agem na estrutura. Com isso, o processo de dimensionamento leva em consideração que tais danos tenham efeito localizado, evitando assim uma ruptura em cadeia que propague para todo o edifício. Este processo é dimensionado de forma que o edifício seja robusto e possua rotas alternativas para as forças atuarem, até que seja absorvida pela fundação.

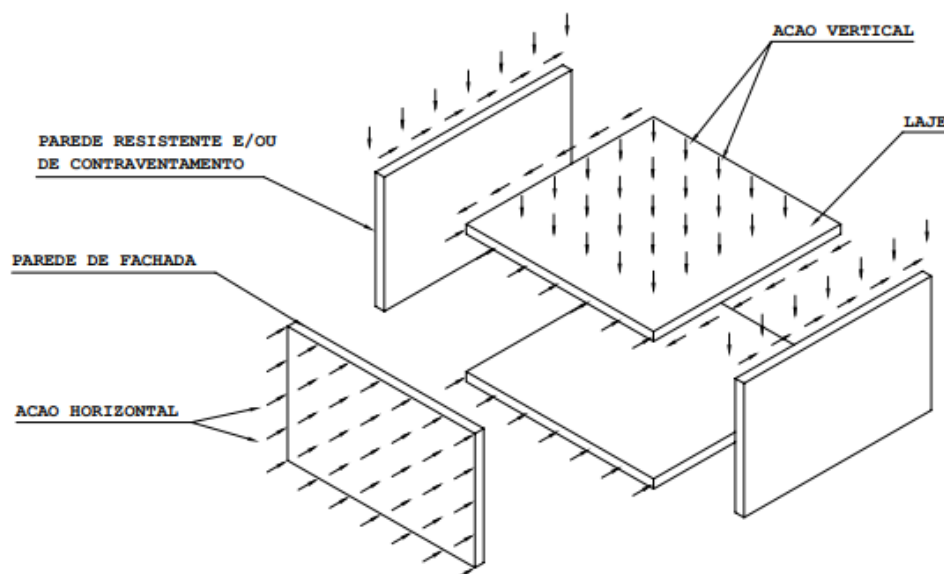
Outra característica importante que a estrutura deve apresentar é rigidez suficiente, na qual a estrutura como um todo e também todos os seus elementos não percam o equilíbrio quando provocados por uma ação horizontal, como por exemplo, esforços provenientes do vento.

## 2.4 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

A concepção estrutural é a etapa do projeto que decide quais as paredes de um determinado tipo de edificação vão ser responsáveis por resistir os esforços, paredes estas ditas paredes estruturais. Alguns fatores como utilização, e também a sua simetria pode evidenciar a escolha por um determinado tipo de disposição.

As paredes estruturais trabalham de forma combinada com a laje num sistema monolítico, as quais são resistentes às ações verticais e horizontais. As ações verticais são transmitidas pelas paredes ou então pelas lajes que trabalham no formato de placa e assim tais ações são encaminhadas para a fundação. Para as ações horizontais, sendo exercidas ao longo da fachada de uma edificação, são transmitidas para as lajes, as quais trabalham como diafragmas rígidos e transmitem tais esforços para as paredes que são paralelas a essas ações horizontais, tais paredes são ditas de paredes de contraventamento. Com isso, para integridade da estrutura é necessário que a ligação laje e parede seja capaz de suportar o esforço cortante, chamado de cisalhamento (CAMACHO, 2006).

Figura 1: Ações atuantes no sistema de alvenaria estrutural.



Fonte: (CAMACHO, 2006).



As ações horizontais são distribuídas para as paredes de forma proporcional a sua rigidez, considerando que todas terão os mesmos deslocamentos horizontais. Tal afirmação é válida para edifícios que apresentam simetria da estrutura, pois edificações assimétricas estão sujeitas a esforços de torção as quais devem ser consideradas para distribuição das forças horizontais.

#### **2.4.1 CARGAS VERTICAIS**

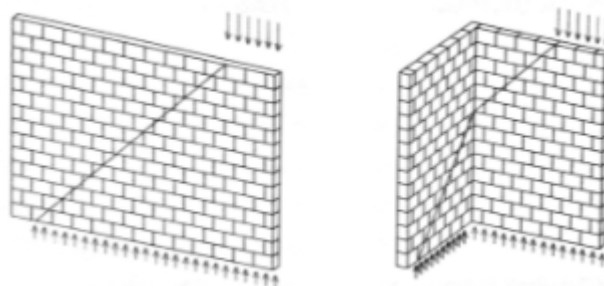
As cargas verticais que são consideradas em projeto podem ser de diferentes tipos variando conforme a utilização. Atualmente a norma vigente que regulamenta a especificação dessas ações é a ABNT NBR 6120/2019 “Cargas para o cálculo de estruturas de edificações”. Para o nosso escopo da alvenaria estrutural as cargas principais que atuam são de ações das lajes e peso próprio das paredes.

Podemos dividir as ações das lajes em permanentes e variáveis. As permanentes são provenientes do peso próprio, revestimentos e pisos e paredes não-estruturais, e as variáveis de cargas acidentais.

Portanto, encontrado o valor do carregamento das lajes, é possível realizar a distribuição dessas forças pelas paredes estruturais às quais elas estão apoiadas, transmitindo esses esforços. O método adotado para distribuição das forças varia conforme a tipologia da laje adotado em projeto, como por exemplo lajes pré-moldadas em uma direção ou maciças armadas em duas direções.

Uma abordagem da alvenaria estrutural que deve ser bem entendida é como acontece o espalhamento das cargas verticais entre as paredes. Quando uma ação é aplicada em um comprimento de parede esse espalhamento se dá ao longo de sua altura segundo um ângulo de 45° (figura 2). Esse espalhamento ocorre também em paredes perpendiculares, entretanto é necessário que a ligação entre paredes seja amarração direta. Por isso é de suma importância que as paredes sejam amarradas corretamente, visto que havendo essa ligação os esforços se propagam para uma região maior gerando uniformização das cargas.

Figura 2: Distribuição de cargas 45°.



Fonte: (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

A uniformização das cargas tem grande importância visto que torna-se muito custoso e também perigoso dimensionar diferentes resistências de blocos para o mesmo pavimento. Como exemplo, têm-se paredes internas menos carregadas e paredes externas mais carregadas, é extremamente fácil na execução a troca de blocos visto que não identificação explícita, com isso é adotado em projeto, resistência de blocos iguais para o mesmo pavimento, sempre para uma característica que resista ao limite da parede com maior tensão. Outro ponto a se destacar é a utilização de grauteamento, com ele é possível aumentar a resistência da parede à compressão em pontos determinados, sendo de grande utilidade quando pensando com cuidado para ver se a relação entre o custo do graute ou mudança de resistência de bloco de todo o pavimento, qual seria a melhor opção a ser tomada (RAMALHO E CORRÊA, 2003)

#### **2.4.1.1 PAREDES ISOLADAS**

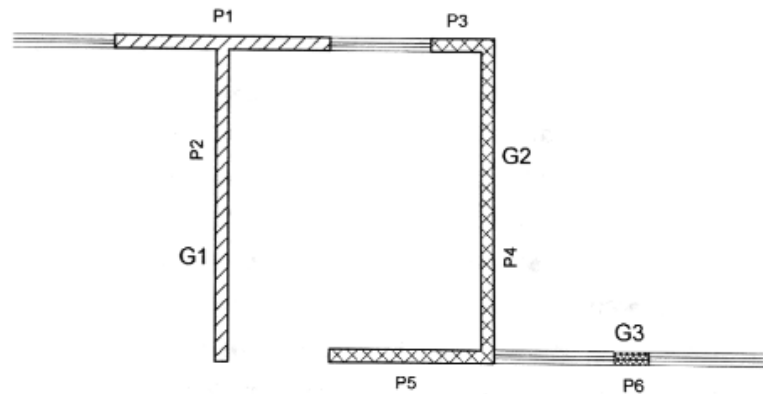
Este procedimento considera todas as paredes de forma isolada e independente. Para encontrar a ação vertical em uma parede naquele determinado pavimento é realizada a soma das ações nos pavimentos acima para a determinada parede. O ponto positivo é a consideração de resistências elevadas acima das cargas de uniformização que serão aplicadas. Por outro lado, esse modelo se torna bastante oneroso, sendo bastante inviável em alguns tipos de construções, com isso é recomendado a sua utilização para edifícios de pequeno porte.

#### **2.4.1.2 GRUPO DE PAREDES ISOLADAS**

Nesse método as delimitações dos grupos de paredes é dado pela ocorrência de aberturas, como por exemplo portas e janelas. Cada grupo de parede trabalha de forma

independente, não sendo considerado interação com os demais grupos nos pontos em que tem as aberturas. Como já dito anteriormente, essa consideração de grupos de paredes é validado quando em obra é realizada a amarração direta entre as paredes, garantido a integralidade da transferência e uniformização dos esforços.

Figura 3: Exemplo grupo isolado de paredes.



Fonte: (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

### 2.4.2 CARGAS HORIZONTAIS

Definidas as paredes que vão suportar os esforços horizontais, ditas paredes de contraventamento, é possível estimar qual será os esforços resultantes atuando em cada elemento estrutural. Conhecido estes valores é possível fazer o dimensionamento dos elementos e analisar se todas as verificações de resistência são atendidas.

As principais ações horizontais são os esforços de vento e desaprumo da edificação, em regiões que há grande possibilidade de ocorrência de abalos sísmicos é necessário a consideração destes esforços, no Brasil em específico não se realiza esse procedimento pela baixa ocorrência.

Conforme mencionado, o esforço do vento atua na fachada da edificação no qual as lajes são os elementos responsáveis por passarem tais esforços para as paredes que vão atuar como contraventamento na edificação. Essa consideração de cálculo, trata as lajes como elementos rígidos, com isso é suma importância que o processo construtivo replique de forma concisa as adoções feitas em projeto. Destaca-se nesse caso que o uso de lajes pré-moldadas devem ser usadas de maneira adequada, ainda mais em casos com pavimentos acima de cinco

ou seis pisos, ainda assim, em pavimentos menores é indicado a realização de uma capa de concreto moldado *in loco* para garantir a ligação. Entretanto, lajes maciças moldadas *in loco* é o método mais adequado para garantir a existência de um diafragma rígido no sistema estrutural.

Essas paredes são chamadas de painéis de contraventamento, e para assegurar o cálculo da sua rigidez é necessário a consideração de trechos perpendiculares a elas. O tamanho desses trechos são regulamentados pela norma ABNT NBR 16868-1/2020, visto que há um limite na qual é possível a resistência de esforços, tais trechos são chamados de flanges ou abas, e tem papel importante na consideração da rigidez dos painéis. As abas ou flanges só podem ser consideradas quando as paredes forem realizadas por amarração direta. A consideração destas abas são de grande importância visto que afetam diretamente a inércia a flexão dos painéis, e diminuem consideravelmente a tensão nas paredes e a diminuição de deslocamentos da laje, desconsiderar as flanges podem superestimar o projeto e levar uma distribuição incorreta das forças.

A determinação da concepção estrutural de como as ações e carregamentos vão ser distribuídos ao longo da estrutura podem ser realizadas por diversos métodos, os mais usuais são os métodos de paredes isoladas e de paredes com aberturas. (RAMALHO E CORRÊA, 2003)

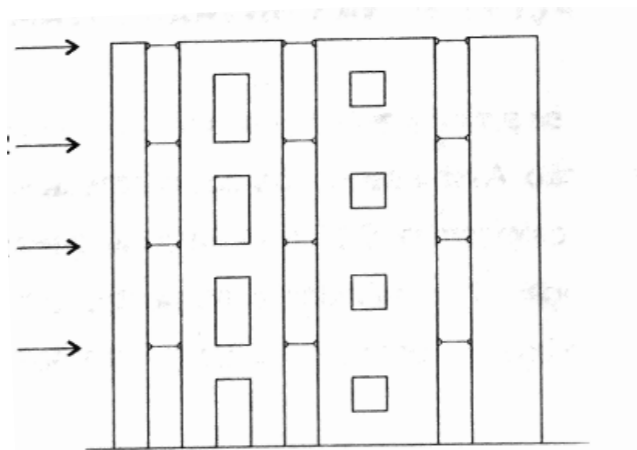
#### **2.4.2.1 PAREDES ISOLADAS**

Este método é bastante usual, entretanto a sua utilização leva a resultados de tensão altos. Nesse caso, considera que toda abertura de parede é uma separação de elementos, as quais considera cada parede de forma isolada, e num contexto de projeto como se fossem vigas engastadas na sua extremidade inferior e livre na outra borda. Com essa abordagem é necessário que os deslocamentos entre todas as paredes sejam iguais, pela consideração da laje ser um diafragma rígido. Nesse método a determinação das distribuições das ações é simples, e consiste na soma dos momentos de inércia de todas as paredes de um determinado pavimento, e assim é possível encontrar a rigidez equivalente de cada parede proporcionalmente à inércia do todo.

#### **2.4.2.2 Paredes com abertura**

Este método considera as aberturas entre as alvenarias de modo que as paredes representam pilares, e os lintéis, se existirem no determinado modelo, são representados como vigas, em uma associação de pórticos planos (figura 4). Da mesma forma que no caso das paredes isoladas, nesse procedimento os painéis vão receber um esforço proporcional a sua rigidez.

Figura 4: Painéis de contraventamento associados.



Fonte: (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

Quando adotado esse procedimento, é necessário a utilização de alguma ferramenta para auxiliar no dimensionamento do modelo. Há detalhes que devem ser levados em consideração para que as medidas adotadas em projeto sejam representadas da melhor forma possível com a realidade da edificação, portanto a barra que faz a ligação dos pórticos deve ser rígida o suficiente para garantir que os deslocamentos em um mesmo nível sejam iguais. Por outro lado, a rigidez da barra não pode ter valores elevados, pois pode interferir na matriz de rigidez global gerando valores incoerentes, assim considera-se como um valor aceitável comprimentos até 1,0m, largura de 2 a 3m e espessura igual a da laje adotado naquele pavimento.

Para a aplicação das forças provenientes do vento, é considerado sua ação sendo realizada apenas no primeiro pórtico do conjunto de painéis de pórticos, com isso a distribuição de esforços ocorrerá de forma direta com a compatibilidade dos deslocamentos.

Esse método gera esforços de tensões menores quando comparado aos método das paredes isoladas, entretanto deve ser feito com cuidado para que o modelo idealizado seja coerente com a realidade, nota-se que nesse caso as paredes que são representadas pelos pilares recebem esforços flexão composta com uma força normal de compressão.

## 2.5 NORMAS BRASILEIRAS

A primeira norma brasileira de alvenaria estrutural foi a ABNT NBR 10837/1989 - “Cálculo de alvenaria estrutural com blocos vazados de concreto” (norma em desuso). Esta norma tinha especificações quanto ao cálculo de alvenaria armada e não armada, tendo como base para dimensionamento o método das tensões admissíveis. Neste método as cargas de projetos são determinadas como aqueles valores máximos que irão atuar ao longo da vida útil da edificação. Com isso, tais tensões que atuam sobre a estrutura não poderão ter valores maiores que a tensão de ruptura ou de escoamento dos materiais dividido por um coeficiente de segurança. Portanto, nas zonas críticas da peça as resistências dos materiais divididos por um coeficiente de segurança não sejam assim ultrapassados pelas tensões máximas provenientes do carregamento.

Como abordado por ATAÍDE (2005), esse método apresentou aspectos com falhas consideráveis: *“a principal é a distância que o método introduz entre uma situação de uso da estrutura e aquela que corresponderia ao colapso, devido às relações estarem em tensões”*. Outro ponto destacado é em relação a não verificação da situação de serviço, as quais podem apresentar altos valores de deformação, inviabilizando assim o projeto para o seu devido uso (ATAÍDE, 2005).

Este método de dimensionamento com o coeficiente de segurança, leva-se em consideração que a estrutura ao longo da sua vida útil irá atuar apresentando comportamento linear tendo proporção entre o carregamento e as tensões. Entretanto, o comportamento linear só ocorre quando existe linearidade física e geométrica, e sabe-se que as estruturas deixam de apresentar tais características lineares quando estão próximas da ruptura.

Por fim, devido a notória ineficácia que o método trazia tornou-se necessária a atualização da norma, de forma que abordasse aspectos relacionados a deformações, fissuras entre outros importantíssimos para o projeto estrutural.

Em 2010 a norma passou por revisões, a qual trouxe como principal alteração a introdução de dimensionamento considerando o método dos estados limites, trazendo uma abordagem mais realista para a alvenaria estrutural. Essa alteração ocasionou na criação de duas outras normas, sendo elas: ABNT NBR 15812/2010 - “Alvenaria estrutural - Blocos Cerâmicos, Parte 1: Projeto e Parte 2: Execução e Controle de obras” e a ABNT NBR 15961/2011 - “Alvenaria estrutural - Blocos de concreto, Parte 1: Projeto e Parte 2: Execução

e Controle de Obras” (ambas normas em desuso). Essa dissolução dos diferentes blocos de concreto e cerâmicos, tornou necessária visto as diferentes características que apresentam e que interferem significativamente no projeto estrutural. (ATAÍDE, 2005)

Neste novo procedimento de dimensionamento considera-se a segurança da estrutura como sendo capaz de suportar as diferentes ações ao longo da vida útil da edificação sem que seja ultrapassado o estado limite último ou estado limite de serviço.

Os estados limites últimos estão relacionados com a capacidade resistente da estrutura ao colapso, e podem ter origem por perda de estabilidade de parte ou conjunto da estrutura, ruptura da seção crítica da estrutura, deformações e fissuras que modifiquem as propriedades geométricas de um elemento, entre outras. O estado limite de serviço está relacionado quanto a utilização da edificação de forma que seja acessível ao usuário. Dentre as origens podemos citar deformações excessivas que causem desconforto ao usuário, fissuras e corrosão que afetem a aparência, vibrações excessivas, entre outras.

Através da implementação dos métodos dos estados limites é possível fazer um dimensionamento mais racional da estrutura de forma que envolva a segurança relacionado aos modos de colapso, além de simplificar o modo de dimensionamento e permitir a atualização das normas vigentes de forma racional.

Visto a necessidade de uma norma específica para alvenaria estrutural no Brasil, no ano de 2020 entrou em vigor a ABNT NBR 16868-1/2020, a qual trata-se da alvenaria estrutural tanto para blocos de concreto como para blocos cerâmicos, e assim unificou normas anteriores.

Essa norma surgiu com o interesse de englobar a alvenaria estrutural nos quesitos de projeto, execução e controle de alvenarias. Com isso apresenta 3 partes que são divididas em Parte 1: Projeto, Parte 2: Execução e controle de obras e Parte 3: Métodos de ensaio. Conforme estudos está prevista ainda a Parte 4: Estrutura em situação de incêndio e Parte 5: Projeto para ações sísmicas.

Com isso a norma ABNT NBR 16868-1/2020 passa a ser uma referência única para o campo da alvenaria estrutural abordando blocos de concreto e cerâmicos, relaciona padrões não somente para o projetista, como também para execução em obra, aos produtos e componentes empregados e também critérios de aceitação da alvenaria.

## **2.6 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)**

O BIM pode ser compreendido como uma teoria que aborda a integração de informações e gerenciamento na área da Arquitetura e Construção Civil. Atualmente com o avanço da tecnologia e implementação deste modo em diversas áreas a automatização de processos se tornou um utensílio importante para a área visto a praticidade que pode ser conquistada para realização de projetos, além de reduzir erros humanos e também reduzir trabalhos e consequentemente tempo.

A utilização do conceito BIM agrega qualidade aos projetos visto que as informações são armazenadas de forma integrada, além de tornar a visualização do projeto melhor e ter uma capacidade de gerar documentação necessária para uma boa execução e entendimento em obra. As informações são colocadas no modelo BIM por meio de elementos construtivos como portas, janelas, paredes, vigas, pilares, tubulações, entre diversos outros. Tais elementos têm suas propriedades físicas determinadas pelo software utilizado, de forma que cada elemento preencha o espaço físico em que se situa, simulando virtualmente a representação de uma edificação real. Com isso, os elementos inseridos podem ter suas propriedades e parâmetros manipulados pelo usuário de acordo com o contexto em que se busca um melhor entendimento e facilidade para elaboração do projeto.

Um dos atrativos importantes do BIM é a sua implementação da visualização 3D que deixa o projeto mais claro e explícito, trazendo assim a visualização das informações que foram inseridas no projeto sendo possível analisar as condições formais e funcionais do projeto e verificar a conformidade com a realidade e alterar com facilidade caso for necessário.

O uso da teoria BIM para a integralização entre as diferentes disciplinas presentes em um projeto é uma das características chave que se destaca no avanço deste conceito. Com essa implementação, é possível realizar a junção em um mesmo modelo com diferentes projetos, como por exemplo, arquitetura, estrutural, hidráulico e elétrico. Este conceito traz rapidez no desenvolvimento do projeto e uma qualidade maior do produto final quando entregue ao cliente. Com ele é possível fazer a detecção de interferências entre as diferentes disciplinas de forma que tais incompatibilidades podem ser identificadas em um fase de projeto não tão avançada, podendo ser alteradas com facilidade e poupando retrabalhos, atrasos e custos para o projeto (SENA, 2019).

### **2.6.1 AUTOMATIZAÇÃO BIM (REVIT)**



É notável como a tecnologia está mudando a perspectiva em relação ao modo de trabalhar, o qual interfere diretamente nos aspectos da vida humana. Com o avanço do desenvolvimento computacional, informação e comunicação, muitas empresas surgiram de forma repentina, como o Uber, Netflix, Whatsapp, entre outras. Portanto há quem diga que empresas que não utilizam da inovação tem pouco tempo restante no mercado e que usar a tecnologia ao seu favor pode gerar benefícios gigantescos.

A automação consiste na reprodução de rotinas ou determinados comandos configurados de acordo com o contexto, a fim de realizar tarefas repetitivas de forma a ganhar tempo e poupar esforços. Este processo surgiu a muito tempo atrás datado na primeira revolução industrial a qual Joseph Marie Jacquard inventou uma máquina de tear com um sistema mecânico que fazia operações automáticas repetitivas.

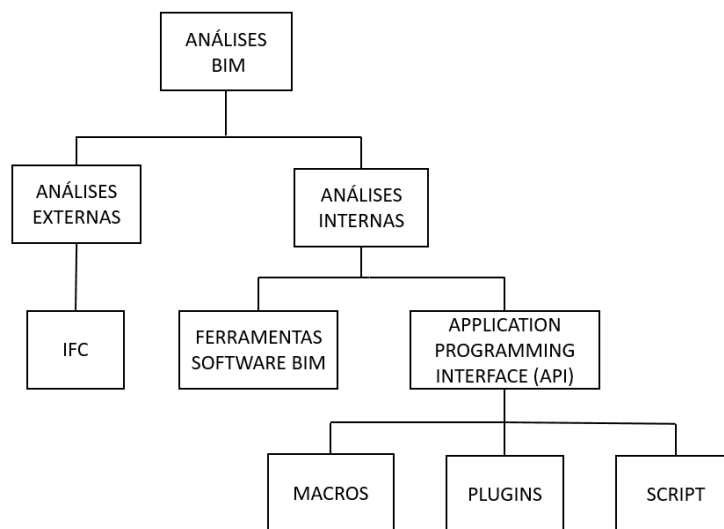
Nos dias atuais estamos vivendo uma revolução chamada de Indústria 4.0, e neste contexto de grande competitividade é evidente o desenvolvimento de tecnologias e processos para o BIM, na qual a integralização entre tecnologia e informação se tornam necessárias para criação de ferramentas com valor e produtividade.

É neste meio que se analisa a importância da automatização para as ferramentas BIM utilizadas atualmente, visto que muitos projetos necessitam de rapidez mas ao mesmo tempo qualidade e excelência, assim podendo otimizar processos que demorariam dias é possível a sua realização em questão de horas, sempre pensando de forma a manter a segurança da edificação conforme as normas vigentes.

No modelo BIM os elementos construtivos como porta, janela, bloco, pilar, viga, tubos, entre outros, são inseridos no projeto e apresentam aspectos físicos, materiais e espaciais aos quais são relacionados com parâmetros controláveis por alguma regra ou até mesmo padronizado pelo usuário. De uma maneira mais fácil são características que cada elemento possui dentro daquele projeto, como por exemplo dimensões, coordenadas de localização espacial (x,y,z), entre outras características específicas daquele elemento.

Esses parâmetros dos elementos ficam registrados no banco de dados do projeto, ao qual pode ser acessado e manipulado da forma que desejar. Esses dados podem ser acessados de 3 formas, utilizando a API (Application Programming Interface), através de aplicativos do próprio software disponível para criação de rotinas, a qual podemos citar o Dynamo presente no Revit AutoDesk, ou de forma externa por arquivo padrão.

Figura 5: Diagrama de análises em BIM.



Fonte: (SENA, 2019)

A API é uma parte do software ao qual os usuários externos podem ter acesso e assim implementar funções próprias que desejam com as funcionalidades nativas que aquele determinado aplicativo disponibiliza. Assim, utilizando a linguagem de programação aceita pela API é possível a criação de comandos e rotinas para manipular os elementos contidos dentro de um modelo em BIM. Esta é considerada uma forma eficaz, visto que as limitações para determinadas aplicações se tornam menores, sendo possível acessar as configurações nativas do software em questão. Portanto é nesse contexto que são criados os macros, *plugins* e scripts dentro do programa, possibilitando uma manipulação das informações paramétricas dos elementos presentes no projeto.

O procedimento realizado por ferramentas do software, como por exemplo o Dynamo dentro do Revit, é uma boa alternativa para manipulação dos elementos, mas encontra muitas limitações visto que o aplicativo é criado com funções genéricas sendo menor a gama de oportunidades para explorar as rotinas, entretanto esse aplicativo tem um grande poder de automatização e suprimindo muito dos problemas que surgem, exceto em casos com rotinas complexas.

O acesso por análises externas é feito através da exportação do modelo em um extensão de arquivo padrão, no qual em modelos BIM é o .IFC, os quais são importados em outros aplicativos que disponibilizam a modificação destes arquivos, e como exemplo podemos citar a modificação na WEB utilizando a linguagem JavaScript para implementação de animações, entre outras funcionalidades (SENA, 2019).

### 2.6.2 LINGUAGEM C# NO REVIT

Dentre as linguagens de programação que têm-se disponíveis para acesso ao API do revit, o C# se destaca por algumas características que o torna eficaz para processamentos de algoritmos extensos.

Considerada uma linguagem compilada o C# é utilizado para criação de diversas aplicações como, jogos, softwares, sites e entre outros. Dita uma linguagem compilada, ela contém recursos importantes como o ambiente *Common language Runtime* (CLR), o qual executa o algoritmo em linguagem de máquina, após ele ter sido compilada, através dessa ferramenta torna-se possível a utilização para diversas plataformas, como desktop, celular, páginas web e até em equipamentos com IoT ( tecnologia das coisas). Diferentemente de algumas linguagens de programação o C# é de exclusividade da Microsoft não tendo o código aberto para desenvolvimento da comunidade. A tipologia da linguagem é orientada a objetos e considerada de alto nível, visto a proximidade do usuário com a máquina e também os recursos extensos que são compreendidos pela ferramenta, podendo assim ser executado praticamente qualquer aplicação para diferentes tipos de equipamentos e funcionalidades.

A programação orientada a objetos, do inglês OOP (*Object Oriented Program*), é uma tipologia que vem sendo bastante utilizada atualmente pela facilidade que ela realiza quando se trabalha com algoritmos complexos os quais tem a presença de muitas variáveis. Ao contrário de outras linguagens que faz o procedimento de algoritmo procedural, o qual segue linha a linha do código como se fosse tarefas, a programação orientada ao objeto interpreta todos os elementos como os objetos, os quais podem ser acessados diretamente no local que está sendo armazenado na memória do seu computador e assim atribuir valores, mudar atributos ou executar uma tarefa.

Dentro da programação em C# é comumente utilizada classes, as quais são um método de agrupamento que consiste em juntar diferentes objetos que apresentem uma mesma característica em comum, e assim torna-se mais fácil a manipulação. Um exemplo que podemos citar seria a criação de uma classe chamada *Bloco* e outra *Graute*, e dentro dessa classe teríamos subdivisões de atributos de acordo com a sua família de elemento. Ainda assim é possível dividir atributos para esses elementos, e como representação poderíamos adotar como por exemplo para o bloco, resistência característica e dimensões e para o graute quantidade e bitola do aço.

Figura 6 : Exemplo de classes C#.

```
class Bloco
{
    public int Espessura;
    public int Altura;
    public int Largura;
    public int Resistencia;
}

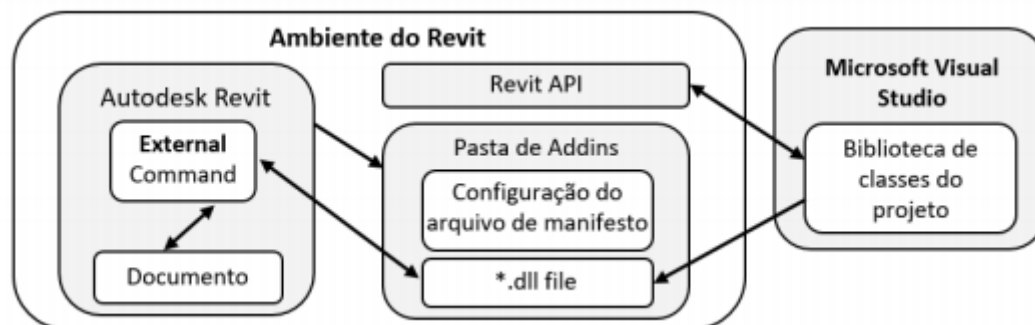
//referências
class Graute
{
    public int QtdeFerro;
    public int BitolaFerro;
}
```

Fonte: Autor.

A programação em C# é desenvolvida em um ambiente de desenvolvimento integrado, em inglês Integrated Development Environment (IDE), a qual tem ferramentas que facilita para criação do código como também com recursos computacionais junto ao sistema operacional que torna o tempo de processamento mais rápido quando comparado a outras linguagens de programação, e atualmente a principal IDE utilizada tanto para programação em C# como também para criação de *plugins* dentro do revit é o Visual Studio, o qual será também utilizado neste trabalho.

A ligação entre a linguagem de programação e o Revit é dada pela API do REVIT. Uma API é um conjunto de funções nas quais o programa, no caso o Revit, disponibiliza para que outro código consiga manipular essas funcionalidades. Tendo acesso a essas funções da raiz do revit é possível a criação de rotinas conforme a necessidade do usuário, e assim criar ferramentas poderosas que juntamente com as funcionalidades disponíveis no próprio Revit podem ser de grande utilidade. Uma imagem destacada por SENA, demonstra em um diagrama como ocorre o processamento do *plugin* realizado e como é a comunicação entre o Revit e o código realizado.

Figura 7 : Diagrama Interação Revit e Visual Studio.



Fonte: (SENA, 2019)

Com isso, nota-se que os dois arquivos importantes que fazem a ligação entre o código e o revit são os arquivos de manifesto e o .dll. Ambos arquivos são gerados quando o código é compilado, e ficam dentro da pasta na qual está instalado o Revit no seu computador, com isso toda vez que o Revit é inicializado ele procura por esse arquivo de manifesto o qual tem a relação de qual .dll deve ser executada, e esse .dll é responsável por toda a rotina que foi desenvolvida pelo algoritmo no Visual Studio.

Portanto, através da utilização de programação juntamente com API do revit é possível a manipulação dos objetos que estão presentes no projeto em Revit, podendo ser alterados atributos, fazer operações matemáticas, obter dados dos materiais, e com isso desenvolver ferramentas para aumentar a produtividade no desenvolvimento de projetos na área de Arquitetura e Engenharia Civil (SENA, 2019).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia para criação da calculadora de verificação de flexocompressão para paredes em Alvenaria Estrutural com blocos de concreto vai ter como base a norma em vigência, ABNT NBR 16868-1/2020, levando em consideração as 3 partes, sendo Parte 1: Projeto, Parte 2: Execução e controle de obras e Parte 3: Métodos de ensaio.

Admita-se para o caso de Alvenaria Armada no estádio III, ao qual faz parte do escopo deste trabalho, as seguintes considerações retiradas da ABNT NBR 16868-1/2020:

- a) as seções transversais se mantêm planas após as deformações.
- b) as armaduras aderentes têm a mesma deformação que o groute ao seu redor.

- c) a resistência à tração da alvenaria é considerada nula.
- d) as máximas tensões de compressão devem ser menores ou iguais à resistência à compressão da alvenaria.
- e) a distribuição de tensões de compressão em elementos submetidos a flexão pode ser considerada como um diagrama retangular
- f) Para flexão ou flexocompressão, o máximo encurtamento da alvenaria se limita a 0,3%.
- g) o máximo alongamento do aço se limita a 1%.

Para as verificações de dimensionamento para o Estado Limite Último (ELU), deve-se ter as ações solicitantes de cálculo  $S_d$  sendo menores ou iguais às ações resistentes de cálculo  $R_d$ .

$$S_d \leq R_d$$

### 3.1 COMPRESSÃO SIMPLES

A alvenaria estrutural trabalha preponderantemente com a resistência à compressão, com isso é de suma importância a verificação das paredes para estes tipos de esforços.

Os coeficientes de ponderação da resistência para o Estado Limite Último (ELU), são apresentados a seguir. Para verificações em Estado Limite de Serviço (ELS) o coeficiente  $\gamma_m = 1,0$ .

Tabela 1: Coeficientes de ponderação de resistência.

Combinações	Alvenaria	Graute	Aço
Normais	2	2	1,15
Especiais ou de construção	1,5	1,5	1,15
Excepcionais	1,5	1,5	1

Fonte: ABNT NBR 16868-1/2020.

Com isso para paredes com blocos de 19mm de altura e junta de argamassa de 10mm pode-se considerar o valor da compressão como sendo 70% da resistência característica de compressão simples de prisma  $f_{pk}$  ou 85% da resistência de pequenas paredes  $f_{ppk}$ . As

resistências características de paredes ou prismas devem ser obtidas de acordo com a ABNT NBR 16868-3/2020.

Como complemento a espessura efetiva das paredes não devem ser menores que 14 cm para edificações com mais de 2 pavimentos, e com um limite de esbeltez de 30, para valores acima deste é necessário o dimensionamento pelo Anexo C da norma. O índice de esbeltez é dado como a divisão entre altura efetiva e espessura efetiva do elemento estrutural, portanto:

$$\lambda = h_e / t_e$$

$h_e$  : altura efetiva

$t_e$  : espessura efetiva

Para determinação da altura efetiva ( $h_e$ ) a norma exemplifica diferentes casos que leva em consideração os travamentos horizontais e verticais que há na subestrutura. Neste trabalho em específico as paredes serão consideradas como sendo travadas tanto horizontalmente na parte superior e inferior e também nas duas laterais pois considera-se esse caso o qual ocorre com maior frequência. Os casos que não há travamento superior ou inferior acontecem em casos especiais como por exemplo podemos citar as paredes do último pavimento e também em muros de divisas que não contém travamento superior. Assim, de acordo com o item 9.4.1 da norma ABNT NBR 16868-1/2020 a altura efetiva para casos em que haja travamento lateral da parede deve ser:

$$h_e \leq \alpha_v * h$$

e

$$h_e \leq 0.7 * \sqrt{\alpha_v * h * \alpha_h * l}$$

Considerando sempre o menor valor de  $h_e$ .

$\alpha_v$ : coeficiente de esbeltez vertical (igual a 1,0 para travamento das duas extremidades superior e inferior)

$\alpha_h$ : coeficiente de esbeltez horizontal (igual a 1,0 para travamento das duas extremidades esquerda e direita)

$h$ : altura do painel

$l$ : largura do painel

Para determinação da espessura  $t_e$  no casos em que não há enrijecedores, o seu valor é igual a espessura  $t$  do bloco adotado.

Com isso, têm-se através da tabela 2, os limites de esbeltez máximo.

Tabela 2: Valores máximos de esbeltez.

Não Armados	24
Armados	30

Fonte: ABNT NBR 16868-1/2020.

Para compressão simples, o esforço resistente de cálculo em paredes de alvenaria estrutural é dado por:

$$N_{rd} = f_d * A * R$$

Onde,

$N_{rd}$ : força normal resistente.

$f_d$ : resistência de cálculo à compressão.

$A$ : área de seção.

$R$ : coeficiente redutor devido à esbeltez.

Temos que o coeficiente redutor é dado por:

$$R = [1 - (\frac{\lambda}{40})^3]$$

Deve-se salientar que o esforço resistente de compressão exercido pelo aço só pode ser considerado quando este estiver contraventado por estribos. Visto que tal técnica é de difícil aplicação construtivamente, será considerada armação sem estribos e portanto não será contabilizada a parcela de contribuição de resistência do aço à compressão.



A compressão simples é abordada pois como consta no item 11.5.1 da norma NBR 16868-1/2020, todo elemento submetido à flexocompressão deve ser também verificado quanto a compressão simples.

### 3.2 FLEXOCOMPRESSÃO

Para dimensionamento à flexocompressão todo elemento de alvenaria estrutural deve resistir a força de compressão de cálculo, como abordado no item anterior. E para o caso de alvenaria estrutural armada, que é o escopo do trabalho, pode-se simplificar considerando tensões de compressão como um diagrama retangular, a tração como a integral da área das tensões de tração exercidas pelo aço e tensão limitada a  $f_{yd}$  nos casos de plastificação, como abordado na norma NBR 16868-1/2020.

Quando a força normal de cálculo atuante sobre a parede de alvenaria não for maior que a força normal resistente, nesse caso têm-se a necessidade apenas da adição de armadura mínima. Conforme norma a aproximação de força normal resistente de cálculo pode ser adotada como:

$$N_{rd} = f_d * b * (h - 2 e_x)$$

Onde,

$N_{rd}$ : normal resistente de cálculo

$f_d$ : resistência de cálculo a compressão da parede

$b$ : espessura da parede

$h$ : comprimento da parede

$e_x$ : excentricidade no plano de flexão.

$$e_x = Md/Nd$$

Essa aproximação só pode ser realizada se o valor da excentricidade não ultrapassar  $0,5 h$ .

Para os casos em que o valor da força normal exceder a resistência normal de cálculo, é necessário a adoção de armadura maior que a mínima e assim, realizar o equilíbrio das forças na seção transversal da parede para que a verificação seja satisfeita.

Para que esta verificação seja satisfeita, é necessário que a normal resistente e o momento resistente da seção sejam simultaneamente satisfeitos. Sabe-se que a resistência da seção pode ser estimada por:

$$N_{Rd} = f_d * b * y + f_{s1} * A_{s1} - f_{s2} * A_{s2}$$

$$M_{Rd} = f_d * b * y * (h/2 - y/2) + f_{s1} * A_{s1} * (h/2 - d_1) + f_{s2} * A_{s2} * (h/2 - d_2)$$

Onde,

$N_{rd}$ : normal resistente de cálculo

$f_d$ : resistência de cálculo a compressão da parede

$f_s$ : tensão na armadura

$b$ : espessura da parede

$y$ : região de compressão uniforme ( $y = 0.8x$ )

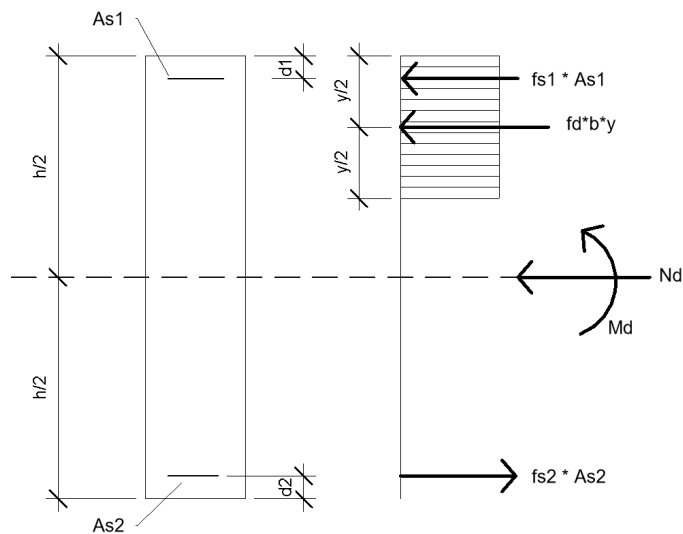
$A_{s1}$ : área de aço superior

$A_{s2}$ : área de aço inferior

$h$ : dimensão da seção

$d$ : distância da armadura até a borda.

Figura 8: Equilíbrio de ações da seção.



Fonte: ABNT NBR 16868-1/2020.

Outra exemplificação que pode ajudar no entendimento do equacionamento para flexocompressão das paredes de alvenaria estrutural é retirada de PARSEKIAN (2014) e pode ser visualizada na Figura 9. As mesmas considerações realizadas no parágrafo anterior é abordada aqui, que no caso a normal resistente ( $P_{Rd}$ ) e o momento ( $M_{Rd}$ ) devem ser resistidos em conjunto. No qual, essas ações resistentes podem ser obtidas seguinte as equações:

$$P_{Rd} \geq P_d$$

$$M_{Rd} \geq M_d$$

$$P_{Rd} = C - \sum T_i$$

$$M_{Rd} = C * \left( \frac{l}{2} - \frac{0,8x}{2} \right) + \sum [T_i * (d_i - \frac{l}{2})]$$

$$C = 0,8 * b * x * k * f_d$$

$$f_d = (0,7 * f_{pk}) / \lambda_m$$

Sendo  $K$  um coeficiente redutor, que para casos em que a tensão é normal à fiada com seções grauteadas  $K = 1,0$ , portanto não interfere nos resultados.

E para as tensões das barras temos as seguintes resistências, sempre levando em consideração que o  $\lambda_s = 1,15$  para aço.

$$T_i = (A_{si} * f_{yk}) / \lambda_s \quad (\text{se a barra atinge a deformação de escoamento})$$

$$T_i = (A_{si} / \lambda_s) * [\varepsilon_s * \left( \frac{d_i - x}{x} \right) * E_s] \quad (\text{barra não escoou})$$

Nota-se que diferente do equacionamento retirado da norma ABNT NBR 16868-1/2020., este último não leva em consideração a contribuição de compressão do aço, visto que já é considerado que o modelo construtivo não será feito com a presença de estribos para contraventamento, portanto tal resistência não é considerada. Como abordado por PARSEKIAN (2014), “*Essas aproximações podem eventualmente levar a considerações com pequeno grau de não conservadorismo. Uma solução precisa seria a consideração em separado de cada área efetiva da parede*”, com isso a discretização da contribuição de cada elemento seria mais preciso.

Domínio 2:

- $\varepsilon c < \varepsilon cu$  ( $\varepsilon cu = 0.003$ )
- $\varepsilon s = 1\%$
- $0 < \beta x \leq \beta x,lim$

Domínio 3:

- $\varepsilon c = \varepsilon cu = 0.003$
- $\varepsilon s \geq \varepsilon yd$
- $\beta x,lim < \beta x \leq \beta xy$

Domínio 4:

- $\varepsilon c = \varepsilon cu = 0.003$
- $\varepsilon s < \varepsilon yd$
- $\beta xy < \beta x < 1$

Domínio 4.a:

- $\varepsilon c = \varepsilon c2 = 0.003$
- $d \leq x < h$

Domínio 5:

- $\varepsilon c = \varepsilon c2 \Rightarrow \kappa h = \frac{\varepsilon cu - \varepsilon c2}{\varepsilon cu} h$
- $h \leq x < +\infty$

Tendo:

$$\beta x,lim = \frac{\varepsilon cu}{\varepsilon cu + \varepsilon su}$$

$$\beta xy = \frac{\varepsilon cu}{\varepsilon cu + \varepsilon yd}$$

### 3.3 ESPECIFICAÇÃO BLOCOS

Sabe-se que é comercializado diversos tipos de blocos, sendo de concreto ou cerâmico, com tamanhos que variam de acordo com a modulação da edificação que está sendo construída. Para efeito deste trabalho, será adotado as famílias de modulação 15x40 (cm), de blocos de concreto vazados, e a especificação das dimensões de cada bloco pode ser encontrada na tabela 3, retirada da norma ABNT NBR 6136/2016.

Tabela 3 : Dimensões nominais blocos de concreto.

Família		20 x 40	15 x 40	15 x 30	12,5 x 40	12,5 x 25	12,5 x 37,5	10 x 40	10 x 30	7,5 x 40
Medida Nominal (mm)	Largura	190	140		115			90		65
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90
		Amarração "L"	-	340	-	-	-	-	-	-
		Amarração "T"	-	540	440	-	365	-	-	290
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-
		Canaleta Inteira	390	390	290	240	240	365	390	290
		Meia Canaleta	190	190	140	115	115	-	190	140

Fonte: ABNT NBR 6136/2016.

Para criação das famílias de blocos no Revit é necessário seguir as dimensões comerciais e abordadas em norma ABNT NBR 6136/2016, pois é a partir destes parâmetros que o algoritmo será computado. Com isso, seguindo a ABNT NBR 6136/2016, têm-se medidas específicas mínimas para as paredes dos blocos, lembrando que as classes adotadas para uso em paredes estruturais são A e B, portanto esses padrões devem ser seguidos.

Tabela 4: Dimensões mínimas blocos.

Classe	Largura nominal mm	Paredes longitudinais <sup>a</sup> mm	Paredes transversais	
			Paredes <sup>a</sup> mm	Espessura equivalente <sup>b</sup> mm/m
<b>A</b>	190	32	25	188
	140	25	25	188
<b>B</b>	190	32	25	188
	140	25	25	188
<b>C</b>	190	18	18	135
	140	18	18	135

Fonte: ABNT NBR 6136/2016.

É possível também a obtenção das referências de eficiência prisma/bloco e prisma cheio/prisma oco, assim como características mínimas de resistência de graute e da argamassa, para um determinado tipo de resistência de bloco utilizado. Esses valores são sugeridos para dimensionamento, e devem ser confirmados em controle de obra, conforme as especificações apresentadas na ABNT NBR 16868-2/2020 para testes de corpos de prova. Para os cálculos de verificação será utilizado esses valores normativos ou também pela inserção de valores obtidos em obra pelo usuário.

Tabela 5: Relações de resistência  $f_{bk}$  e demais elementos.

TIPO DE BLOCO	fbk	fa	fgk	fpk/fbk	fpk*/fpk	fpk	fpk*	Espessura mínima de parede do bloco mm
	MPa					MPa		
Bloco vazado de concreto, conforme a ABNT NBR 6136 (ref. 14 x 39 cm)	3	4	15	0,8	2	2,4	4,8	25
	4	4	15	0,8	2	3,2	6,4	25
	6	6	15	0,75	1,75	4,5	7,5	25
	8.0	6.0	20.0	0,75	1,75	6	10.5	25
	10	8	20	0,7	1,75	7.0	12,3	25
	12	8	25	0,7	1,6	8,4	13,4	25
	14	12	25	0,7	1,6	0,8	15,7	25
	16	12	30	0,65	1,6	10,4	16,6	25
	18	14.0	30	0,65	1,6	11,7	18,7	25
	20	14	35	0,6	1,6	12	19,2	25
	22	18	35	0,55	1,6	12.1	10.4	25
24	18	40.0	0,65	1,6	13.2	21,1	25	
Bloco cerâmico de parede vazada, conforme a ABNT 15270-1 (ref. 14x29 cm)	4	4	15	0,5	1,6	2	3,2	8
	6	6	15	0,5	1	3	4,8	8
	8	6	20	0,5	1,6	4	6,4	8
	10	8	25.0	0,45	1,6	4,5	7,2	8
	12	8	25	0,45	1,6	5,4	8.6	8
Bloco cerâmico de parede maciça, conforme a ABNT 15270-1 (ref. 14x29 cm)	10	8	20	0,6	1,6	6	9.6	22
	14	12.0	25.0	0,8	1,6	8,4	13,4	25
	18	15	30	0,6	1,6	10,8	17,3	30

fpk\* = resistência do prisma cheio.

fpk\* = resistência do prisma cheio.

Fonte: ABNT NBR 16868-1.

#### 4. DESENVOLVIMENTO

A linguagem de programação escolhida para desenvolvimento do *plugin* levou em consideração não somente os fatores de funcionalidade referentes ao software Revit, como também a facilidade para se trabalhar com os dados e a complexidade das rotinas que seriam realizadas, portanto, após análise detalhada e discutida nos tópicos 2.6.1 e 2.6.2 optou-se pela utilização da linguagem C#.



O desenvolvimento foi realizado dentro do IDE Microsoft Visual Studio 2019, ao qual, após a compilação do código, o mesmo gera um arquivo no formato .DLL traduzindo as rotinas para linguagem da máquina. Sempre quando o software Revit é iniciado no seu computador, ele procura em um local determinado da sua instalação, arquivos externos que foram feitos pelo próprio usuário, a fim de implementar novas funcionalidades. É dessa maneira que o software compreende o arquivo .DLL com as rotinas criadas e executa conforme as orientações passadas.

Normalmente uma das formas utilizadas para encontrar o dimensionamento de elementos estruturais é a partir de tentativas e iterações, de tal forma que o problema atinja convergência. Em problemas que são necessários diversos cálculos sem ajuda computacional levam muito tempo e um trabalho excessivo pelo projetista, portanto é de suma importância a utilização da tecnologia de forma consciente para ajudar no desenvolvimento de projetos. Com isso, o algoritmo tem como princípio realizar a varredura da linha neutra da seção do ponto  $x=0$  até o ponto no qual  $0,8x$  for igual ao comprimento da parede, tendo assim uma compressão uniforme.

No presente trabalho, o problema abordado visa encontrar formas de avaliar a resistência de paredes de alvenaria estrutural armada realizadas com blocos em concreto quanto a flexocompressão, esforço que ocorre quando há uma força normal e momento simultaneamente.

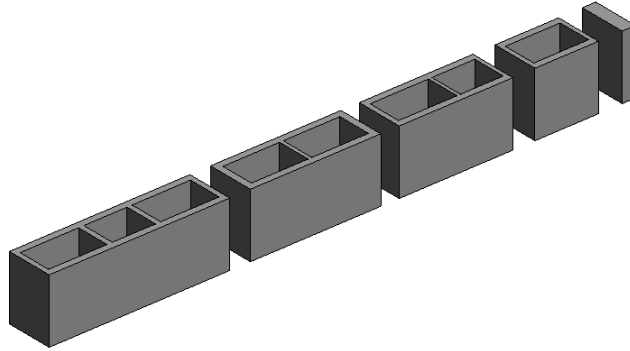
#### **4.1 CRIAÇÃO DE FAMÍLIAS REVIT**

Dentro do software Revit foram criadas as famílias de blocos e aços que serão utilizados no projeto. Os parâmetros das famílias foram adotados conforme as dimensões dados em norma e também disponíveis no mercado para utilização.

Para os blocos os parâmetros utilizados foram comprimento, espessura, tipo do elemento e grauteado, e para os aços os parâmetros tipo do elemento e bitola.

O parâmetro tipo do elemento foi necessário visto que quando é realizado a inserção dos elementos no algoritmo as famílias criadas são todas consideradas como modelo genérico, portanto é necessário essa adaptação para que seja detectado pelo algoritmo essa diferenciação dos elementos e o modo como eles serão tratados no cálculo.

Figura 10 : Família de blocos no Revit.



Fonte: Autor.

## 4.2 COMPRESSÃO SIMPLES

Como abordado em norma ABNT NBR 16868-1/2020., todo elemento submetido à flexo compressão deve também atender os requisitos quanto a compressão simples, portanto essa verificação é dada por:

$$N_{rd} = f_d * A * R$$

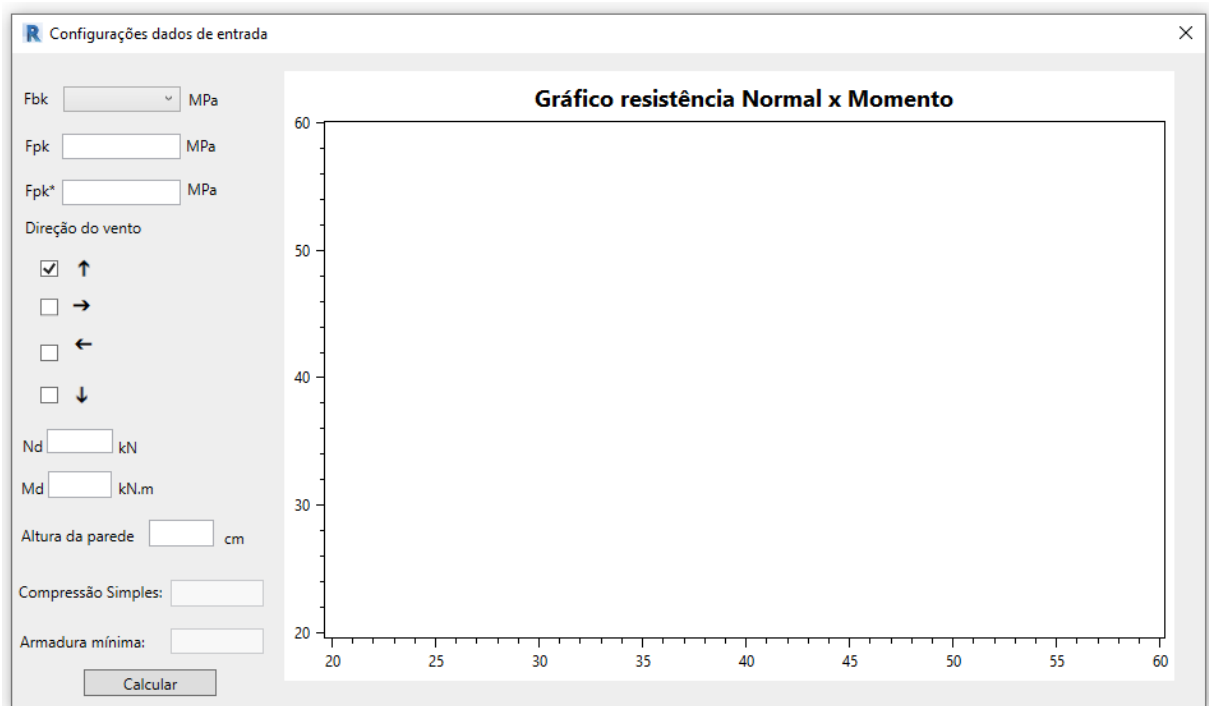
$$N_{rd} = f_d * A * [1 - (\frac{\lambda}{40})^3]$$

$$f_d = (0,7 * f_{pk}) / \lambda_m$$

$$\lambda = h e / t e$$

Os dados de entrada devem ser inseridos no *plugin* através da janela de Configurações de Dados de Entrada (Figura 11). Essa janela foi criada com a tecnologia WPF (Windows Presentation Form), estrutura que faz parte do recursos .NET e é amplamente utilizada para desenvolvimento de aplicações, controles gráficos entre outras ferramentas de forma a estabelecer interação com o usuário.

Figura 11: Janela de configuração de dados.



Fonte: Autor.

A verificação quanto à compressão simples será realizada se o usuário optar por entrar com os dados de normal e momento de cálculo atuantes na subestrutura, caso contrário, somente o gráfico de normal e momento resistente para o estágio III será plotado.

Inserido os dados de entrada, o algoritmo realiza os cálculos conforme o equacionamento acima e caso a normal resistente for maior que a normal atuante a verificação quanto à compressão simples está satisfeita, com isso na parte de Compressão simples haverá uma indicação com “PASSA”, caso contrário “NÃO PASSA”.

### 4.3 FLEXOCOMPRESSÃO

Para uma parede ser considerada verificada quanto à flexocompressão é necessário que os esforços normal e momento sejam resistidos simultaneamente pela seção transversal de maiores esforços da parede. Para encontrar quanto de esforço a parede resiste é necessário encontrar sempre a linha neutra, ponto no qual as tensões são nulas e assim é possível saber quanto da seção está resistindo à compressão e quanto resiste à tração.

A ideia principal do algoritmo é realizar discretização de valores de linha neutra, de forma que percorra toda a seção da parede de alvenaria estrutural em questão, e a partir de cada valor de linha neutra encontrar os valores de momento e normal resistidos pela seção, desta forma se torna possível traçar o gráfico de resistência normal x momento.

#### 4.3.1 CASO ARMADURA MÍNIMA

Para o cálculo das resistências foram seguidos o equacionamento apresentado em norma ABNT NBR 16868-1/2020, levando inicialmente em consideração a verificação quanto à necessidade apenas de armadura mínima, que é uma aproximação dada por:

$$N_{rd} = f_d * b * (h - 2 e_x)$$

$$N_{rd} = f_d * b * (h - 2 * (Md/Nd))$$

Com isso, através dos valores de entrada inseridos pelo usuário é realizada uma comparação para analisar se a parede em questão tem uma força normal resistente maior que a força normal aplicada, sendo verificada tal equação é necessário somente armadura mínima para a seção resistir à flexocompressão. O valor de  $f_d$  representa a resistência da parede como um todo, e tal variável é diretamente relacionada ao valor de resistência do prisma. A resistência do prisma é obtida através da tabela 5 comparando-se os valores de entrada dado pelo usuário como resistência do bloco, caso contrário têm-se também a opção de entrada direta dos valores de prisma. Com isso para chegar ao valor de resistência da parede, têm-se:

$$f_d = (0,7 * f_{pk}) / \lambda_m$$

$$f_d = (0,7 * f_{pk}) / 2$$

Portanto o valor de resistência de prisma ( $f_{pk}$ ) será considerado como cheio caso toda a parede seja grauteada, caso contrário o valor de prisma será considerado referente ao prisma oco.

#### 4.3.2 CASO ARMADURA MAIOR QUE A MÍNIMA

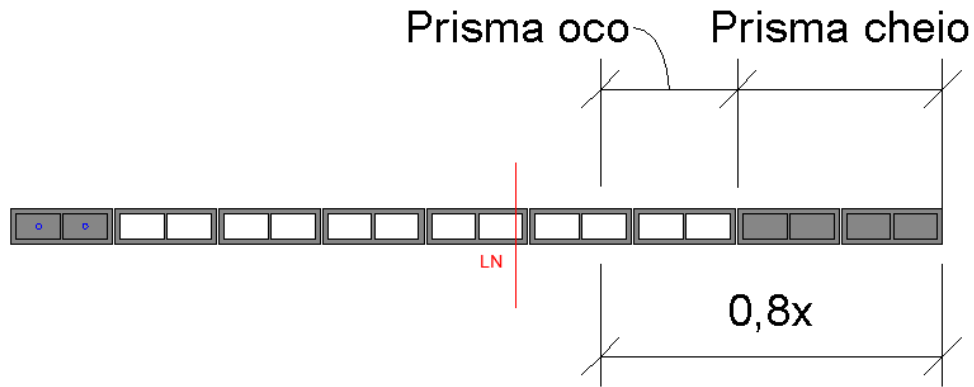
Quando o valor de normal atuante exceder a normal resistente, é necessário o equacionamento para armadura maior que a mínima, dado por:

$$N_{Rd} = f_d * b * y + f_{s1} * A_{s1} - f_{s2} * A_{s2}$$

$$M_{Rd} = f_d * b * y * (h/2 - y/2) + f_{s1} * A_{s1} * (h/2 - d_1) + f_{s2} * A_{s2} * (h/2 - d_2)$$

Para este equacionamento, o algoritmo levou em consideração a discretização das parcelas de contribuição da seção, que como abordado ao longo do trabalho, é um método mais eficiente de determinação da resistência da parede. Portanto a resistência relacionada a compressão da parede foi dada pela soma das resistências, levando em consideração a parcela de cada área atuante, sendo esta considerada oco ou grauteada e suas respectivas resistências de prisma, para chegar a um valor de resistência de parede. O mesmo processo de discretização foi realizado para as armações, considerando a contribuição de cada ponto de armação para o equacionamento.

Figura 12: Exemplo de uma seção de parede.



Fonte: Autor.

Para resistência normal, têm-se:

$$N_{Rd} = \left( \sum_{i=1}^n f_{di} * b_i * y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^m f_{si} * A_{si} \right)$$

$$f_{di} = (0,7 * f_{pk}) / \lambda_m$$

$$f_{di} = (0,7 * f_{pk}) / 2$$

Onde:

$f_{di}$  = resistência de parede

$b_i$  = espessura do bloco

$y_i$  = comprimento do bloco

$f_s$  : tensão na armadura

$A_s$  : área de aço tracionado

Para resistência de momento, têm-se:

$$M_{Rd} = \left( \sum_{i=1}^n f_{di} * b_i * y_i \right) + \left( \sum_{i=1}^m f_{si} * A_{si} * (h/2 - d_i) \right)$$

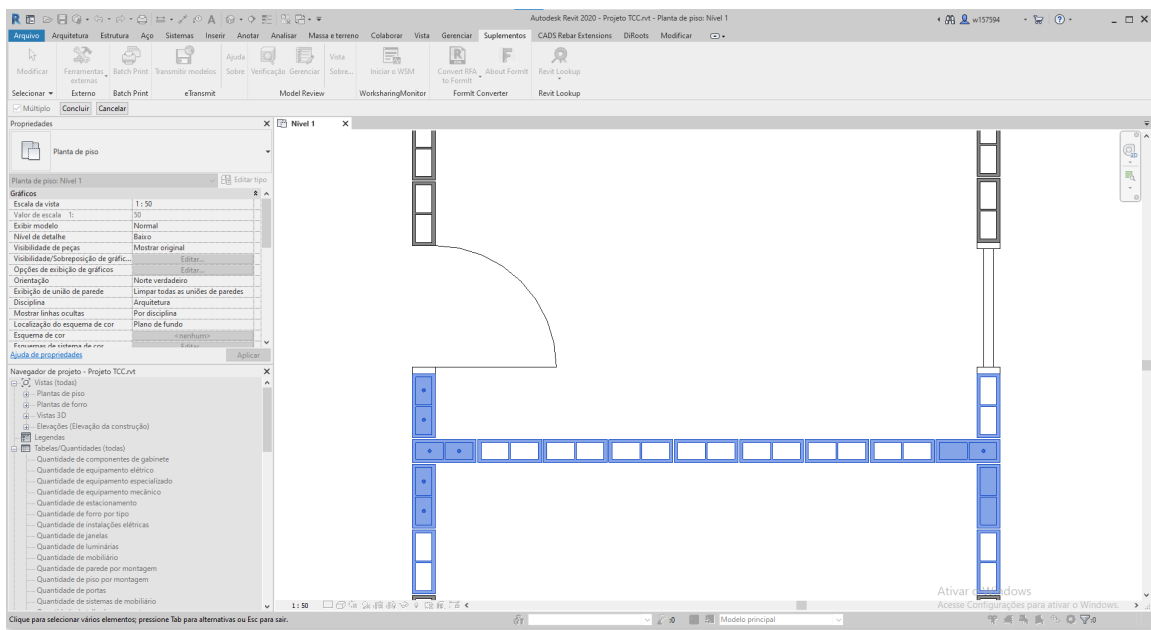
O ponto de equilíbrio considerado para a equação é o centro geométrico da seção, ao qual é obtido através do algoritmo utilizando a fórmula:

$$X_{cg} = \frac{\sum(x * A)}{\sum A}$$

#### 4.4 SELEÇÃO DA SUBESTRUTURA

A entrada de dados no algoritmo é dado através da seleção de uma subestrutura ao qual o usuário deseja obter as relações de resistência de momento e normal, conforme a Figura 13:

Figura 13: Seleção da subestrutura pelo usuário.



Fonte: autor.

O tratamento dos dados contidos nessa subestrutura foi dividido no algoritmo em 3 grupos, sendo eles: aços, blocos de alma e blocos de flange. Juntamente com cada instância de elemento criada foi vinculado os parâmetros contidos naquele elemento que seriam de interesse para o cálculo, no caso dos aços foram armazenados os dados de bitola,  $X_{cg}$  e  $Y_{cg}$ . Os blocos foram diferenciados pela flange e alma de acordo com a sua rotação, além também de ser armazenados em cada instância de bloco os parâmetros de comprimento, espessura,  $X_{cg}$ ,  $Y_{cg}$  e o grauteado, tendo esse último parâmetro um valor booleano, indicando se aquele bloco recebe graute ou não.

Com esses dados armazenados o algoritmo passa a realizar a rotina de cálculo percorrendo valores de linha neutra por toda a seção, e para cada iteração de linha neutra retornar um valor de Momento e Normal resistente de acordo com as parcelas de contribuição da parte tracionada e parte comprimida. Sempre levando em consideração que o limite máximo para flange foi considerado  $6.t$ , sendo  $t$  a espessura do bloco, esforços de armadura de compressão desconsiderados e tração da alvenaria nula.

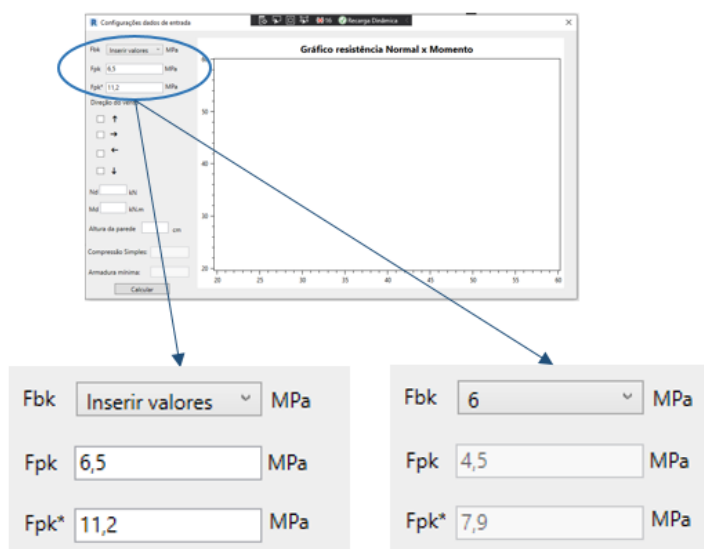
O alongamento na barra foi limitado a 1% e encurtamento máximo da alvenaria de 0,30% e através das equações de compatibilização de acordo com cada domínio era realizado o cálculo da deformação no aço e assim verificando se o mesmo estava no patamar de escoamento ou trabalhando no trecho elástico para consideração da sua tensão.

Assim de acordo com o alongamento de cada barra é somada nas equações de equilíbrios a parcela exercida por aquele aço. Deve-se lembrar que o equilíbrio das tensões foi realizado no CG da seção da subestrutura.

#### 4.5 JANELA DADOS DE ENTRADA

Na janela de dados de entrada têm-se a opção do usuário entrar com o valor de resistência de bloco utilizado em projeto e assim de acordo com a tabela de referência é automaticamente calculado o valor de resistência de prisma oco e cheio daquela subestrutura. Entretanto também optou-se pela inserção direta dos valores de resistência de prisma oco e cheio pelo usuário (ver Figura 14), valores esses que podem ser obtidos em obra com testes adequados de corpos de prova conforme a NBR 16868-3/2020.

Figura 14: Trecho 1 janela de dados.

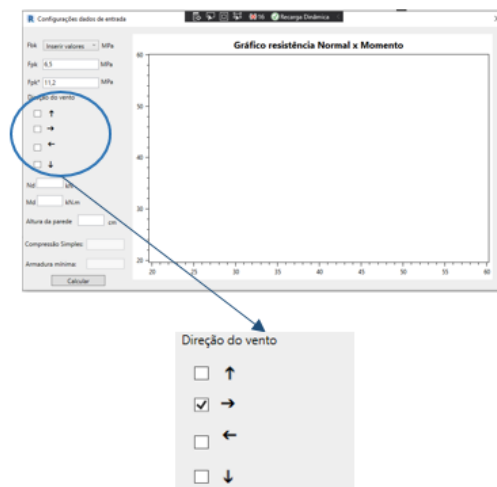


Fonte: autor.

Outra funcionalidade adicionada a janela é a inserção do usuário sobre a direção do vento. Este fator foi necessário para que o algoritmo reconheça qual parte da subestrutura estará tracionando e assim determinar por qual lado iniciar a iteração de chutes da linha neutra.



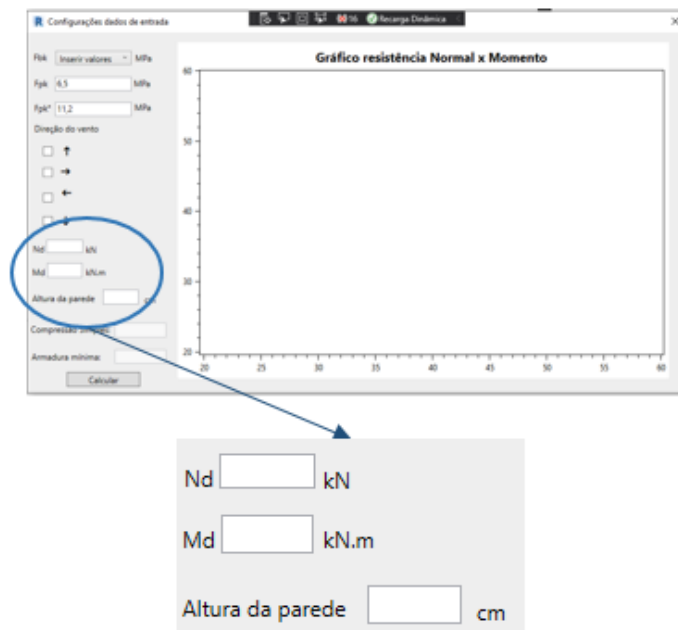
Figura 15: Trecho 2 janela de dados.



Fonte: autor.

A outra subseção da janela apresenta a entrada para dados de normal e momentos de cálculo atuantes na subestrutura e altura da parede. Essas informações são necessárias para a verificação dos casos de compressão simples que levam em consideração a altura da parede para cálculo do coeficiente redutor, e os valores de momento e normal para o caso de verificação somente da armadura mínima na flexo compressão.

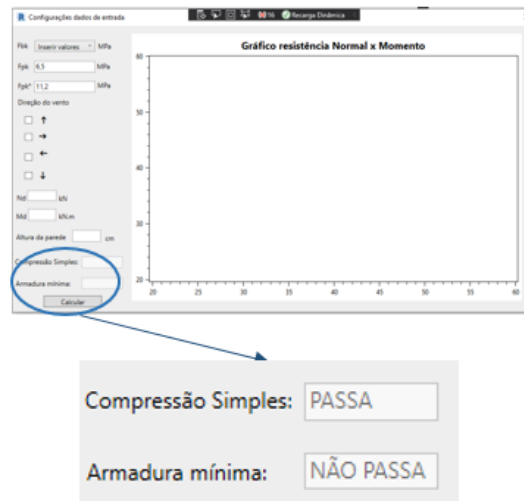
Figura 16: Trecho 3 janela de dados.



Fonte: autor.

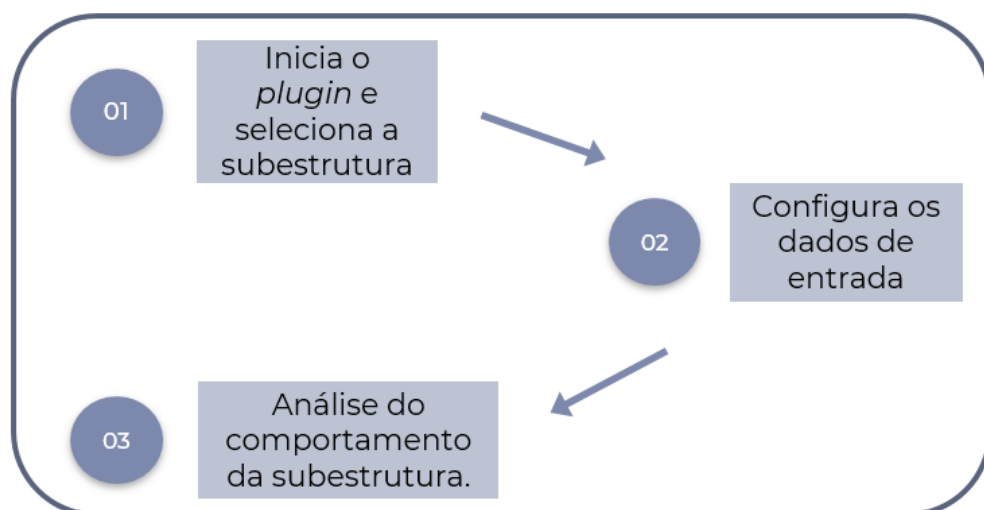
Por fim, os últimos dados apresentados na janela são referentes a saída de dados do algoritmo, os quais representam as verificações feitas em relação à compressão simples e armadura mínima que são apresentadas em formato de texto caso verificado “PASSA” e caso contrário, “NÃO PASSA”.

Figura 17: Trecho 4 janela de dados.



Fonte: autor.

Com isso têm-se o fluxograma de como a aplicação deve ser utilizada pelo usuário.



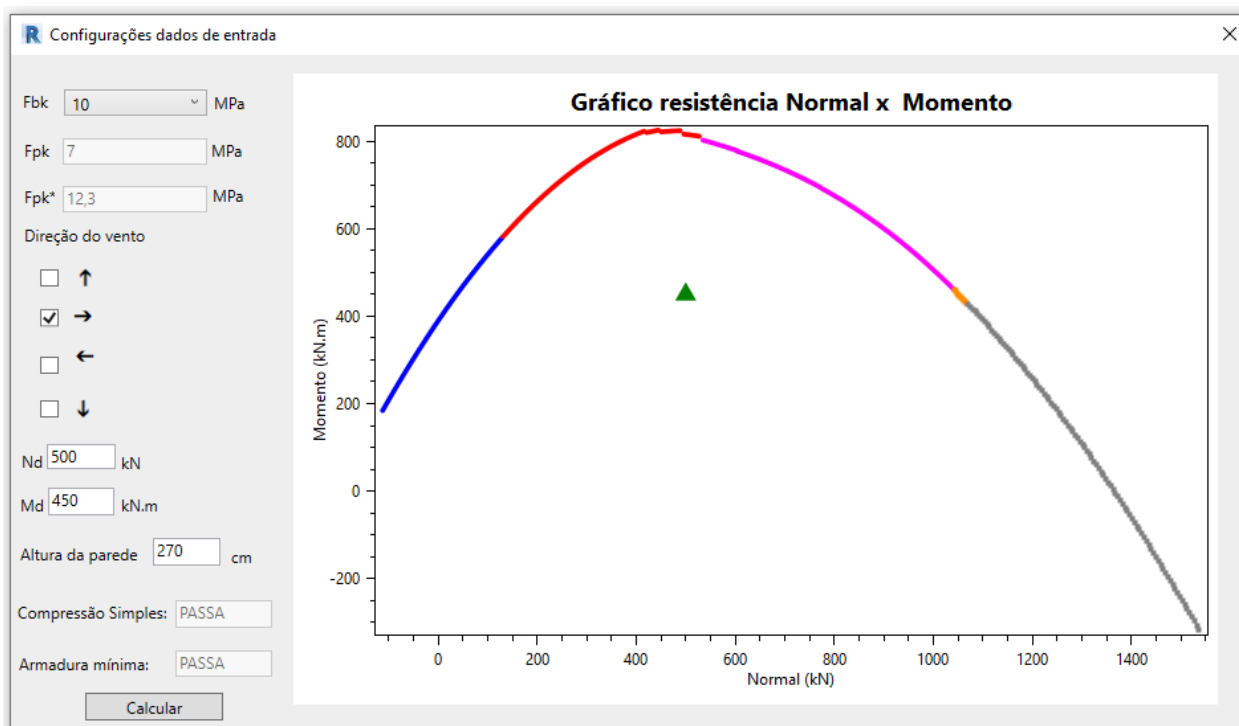
Fonte: autor.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 JANELA DADOS DE ENTRADA

Como resultado final, após o usuário iniciar o *plugin* e selecionar a subestrutura desejada é aberta a janela para configuração dos dados de entrada. A janela gera o gráfico de normal e momento resistente ao qual tem seus trechos discretizados de acordo com o domínio a fim de facilitar possíveis interpretações pelo usuário. Pela figura 18 é possível visualizar os trechos em azul, vermelho, magenta, laranja e cinza que representam respectivamente os domínios 2, 3, 4, 4a e 5, e o triângulo em verde representa o valor atuante de cálculo inserido pelo usuário para análise.

Figura 18: Exemplo padrão janela de dados.



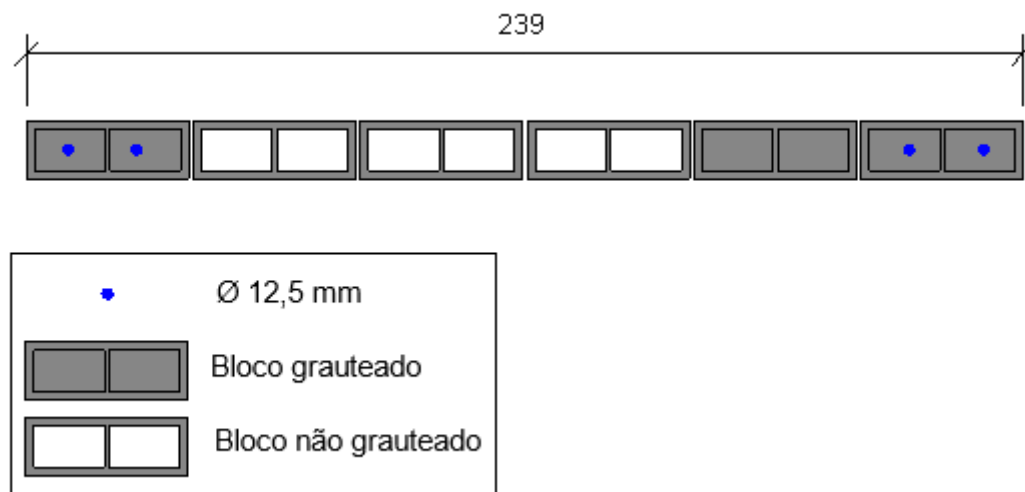
Fonte: autor.

Para a parte de entrada de resistência do bloco é utilizado os dados da tabela 5 como referência, caso contrário o usuário pode inserir os valores de prisma obtidos por testes em obra. Os valores de normal e momento atuante na subestrutura também ficam a cargo do projetista de realizar as combinações das ações e assim entrar com os dados de cálculo no *plugin*.

## 5.2 COMPORTAMENTO DA SEÇÃO

Como forma de verificar os dados obtidos pelo *plugin* foi criado um arquivo com extensão em .txt que inclui a saída dos dados para cada iteração de linha neutra e transferido assim para uma tabela no formato do software excel. Para este primeiro exemplo foram obtidos os valores de tensão e deformação dos aços, a fim de avaliar o seu comportamento. O exemplo apresentado contém blocos de concreto com resistência de bloco 6 MPa e aços com bitola de 12,5 mm.

Figura 19: Seção de uma parede de alvenaria.



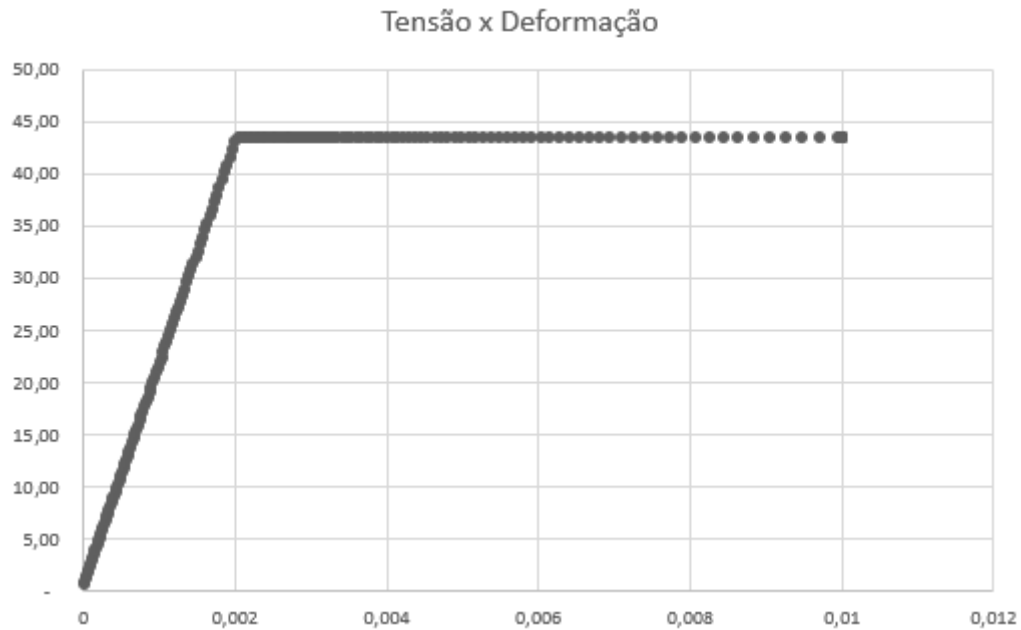
Fonte: autor.

Quando traçado o gráfico de tensão deformação no aço (gráfico 1) obteve-se o comportamento esperado contendo um trecho linear elástico até chegar em um ponto máximo de escoamento e assim ser limitado a  $f_{yd}$  e alongamento máximo de 1%. A tabela de dados gerados contém um volume excessivo, portanto será apresentado apenas um trecho das iterações de forma que seja possível sua análise. O trecho escolhido foi aquele no qual as barras passam do estado de escoamento para o estado elástico, com o intuito de notar o comportamento do aço nesses pontos. Assim é possível analisar na tabela 6 que o aço 1 deixa de escoar em uma distância de linha neutra de 136 cm e o aço 2 para uma linha neutra de 127 cm.

Tabela 6: Comportamento dos aços.

Dist. LN x (cm)	$\sigma_1$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_1$	$\sigma_2$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_2$
120	43,48	0,00274	43,48	0,00232
121	43,48	0,00269	43,48	0,00228
122	43,48	0,00264	43,48	0,00224
123	43,48	0,00260	43,48	0,00220
124	43,48	0,00255	43,48	0,00215
125	43,48	0,00251	43,48	0,00211
126	43,48	0,00246	43,48	0,00207
127	43,48	0,00242	42,66	0,00203
128	43,48	0,00238	41,83	0,00199
129	43,48	0,00234	41,02	0,00195
130	43,48	0,00230	40,22	0,00192
131	43,48	0,00226	39,43	0,00188
132	43,48	0,00222	38,66	0,00184
133	43,48	0,00218	37,89	0,00180
134	43,48	0,00214	37,14	0,00177
135	43,48	0,00210	36,40	0,00173
136	43,31	0,00206	35,67	0,00170
137	42,53	0,00203	34,95	0,00166
138	41,77	0,00199	34,24	0,00163
139	41,02	0,00195	33,54	0,00160
140	40,27	0,00192	32,85	0,00156
141	39,54	0,00188	32,17	0,00153
142	38,82	0,00185	31,50	0,00150
143	38,11	0,00181	30,84	0,00147
144	37,40	0,00178	30,19	0,00144
145	36,71	0,00175	29,54	0,00141
146	36,03	0,00172	28,91	0,00138
147	35,36	0,00168	28,28	0,00135
148	34,69	0,00165	27,67	0,00132
149	34,04	0,00162	27,06	0,00129
150	33,39	0,00159	26,46	0,00126

Gráfico 1: Análise do comportamento do aço.



Fonte: autor.

Para verificação das áreas de compressão foi gerado também uma tabela anexando os dados de todas as iterações geradas para o exemplo a seguir. Nesta tabela 7, adicionou-se os valores das áreas comprimidas, diferenciando quanto ao preenchimento com graute ou não. Para apresentação da tabela foi selecionado apenas um trecho pois há um número excessivo de dados para todas as iterações.

Através da tabela 7 pode-se notar que os valores retornados de área comprimida que o plugin utiliza para calcular tanto a normal resistente como o momento é de acordo com o esperado. Destaca-se o ponto ao qual a linha neutra representa 100 cm e têm-se 80 cm de parte comprimida, com isso é a parte de transição entre a parte comprimida grauteada e a parte comprimida não grauteada da parede.

Tabela 07: Comportamento áreas comprimidas.

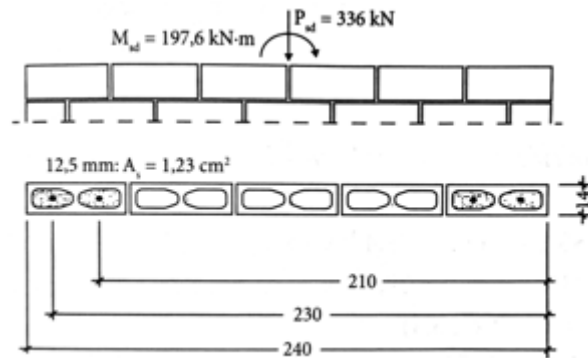
Dist. LN x (cm)	Dist. 0,8x (cm)	Área comprimida não grauteada (cm <sup>2</sup> )	Área comprimida grauteada (cm <sup>2</sup> )
90	72	0	1008
91	72,8	0	1019,2
92	73,6	0	1030,4
93	74,4	0	1041,6
94	75,2	0	1052,8
95	76	0	1064
96	76,8	0	1075,2
97	77,6	0	1086,4
98	78,4	0	1097,6
99	79,2	0	1108,8
100	80	0	1120
101	80,8	11,2	1120
102	81,6	22,4	1120
103	82,4	33,6	1120
104	83,2	44,8	1120
105	84	56	1120
106	84,8	67,2	1120
107	85,6	78,4	1120
108	86,4	89,6	1120
109	87,2	100,8	1120
110	88	112	1120
111	88,8	123,2	1120
112	89,6	134,4	1120
113	90,4	145,6	1120
114	91,2	156,8	1120
115	92	168	1120
116	92,8	179,2	1120
117	93,6	190,4	1120
118	94,4	201,6	1120
119	95,2	212,8	1120
120	96	224	1120

Essas verificações tem como objetivo avaliar a funcionalidade do algoritmo para análise se o mesmo retorna os valores esperados de acordo com cada iteração.

### 5.3 COMPARAÇÃO EXEMPLO LIVRO.

Outra análise realizada com o *plugin* foi a comparação dos valores obtidos de uma subestrutura detalhada por Parsekian em seu livro “Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto” 2ª edição com as atualizações da norma 16868-1/2020 publicado em 2021.

Figura 20: Exemplo livro.

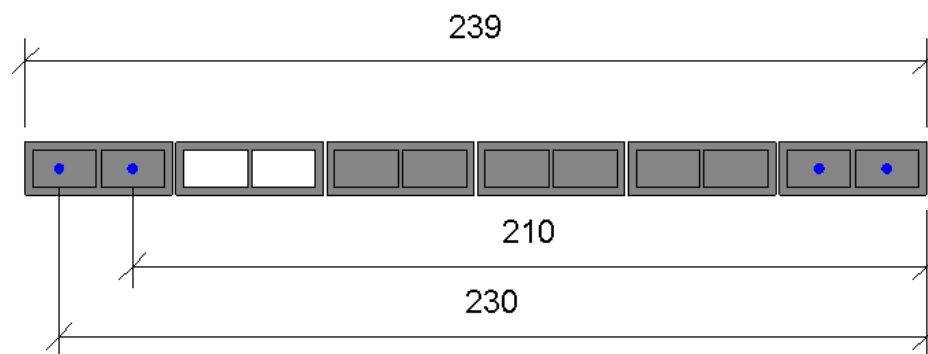


Fonte: Parsekian, 2021.

Para o exemplo abordado no livro foi utilizado bloco com resistência de 6 MPa, portanto têm-se uma resistência de prisma oco de 4,5 MPa e resistência de prisma cheio de 7,9 MPa. Os resultados obtidos pelo exemplo evidenciou barra 1 escoando e barra 2 não escoando, tendo uma normal resistente de 336 kN e momento resistente de 370,6 kN.m e distância da linha neutra de 1,38 m.

Utilizando o *plugin* para a mesma estrutura, considerando toda a parte comprimida como sendo grauteada, conforme abordado também pelo exemplo, obtém-se a seguinte disposição:

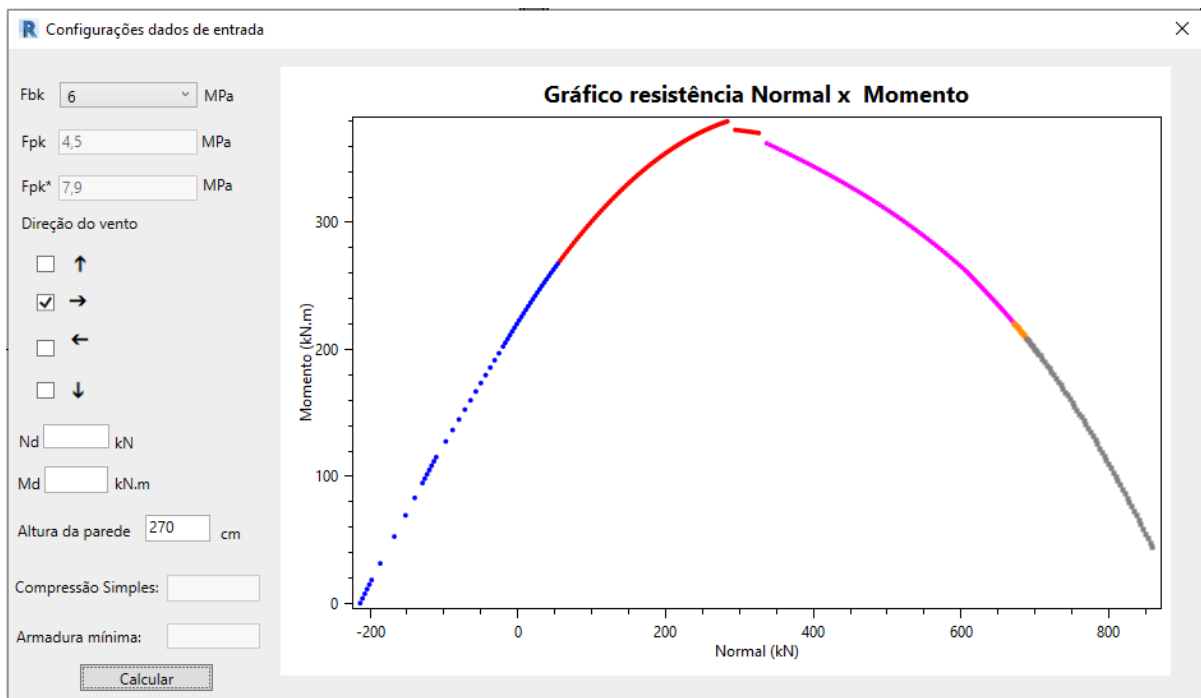
Figura 21: Exemplo aplicado ao *plugin*.



Fonte: autor.



Figura 22: Janela de dados do exemplo.



Fonte: autor.

Juntamente a estes dados foi criado novamente um arquivo em formato .txt ao qual era adicionado os valores para cada iteração de linha neutra para obtenção de uma tabela para análise. Como exemplo, será apresentado somente um trecho da tabela visto que para todas as iterações têm-se um grande volume de dados. O trecho analisado abrange o valor resultante do exemplo para possíveis comparações.

Tabela 8: Dados de saída.

Normal (kN)	Momento (kN.m)	Dist. LN x (cm)	$\sigma_1$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_1$	$\sigma_2$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_2$
247,87	367,61	117	43,48	0,002910	43,48	0,002449
250,97	368,40	118	43,48	0,002860	43,48	0,002402
254,07	369,16	119	43,48	0,002811	43,48	0,002357
257,16	369,90	120	43,48	0,002762	43,48	0,002312
260,26	370,62	121	43,48	0,002715	43,48	0,002268
263,36	371,31	122	43,48	0,002668	43,48	0,002225
266,45	371,97	123	43,48	0,002622	43,48	0,002183
269,55	372,61	124	43,48	0,002577	43,48	0,002141
272,65	373,23	125	43,48	0,002532	43,48	0,002100
282,95	367,12	126	43,48	0,002488	43,25	0,002059
286,94	366,86	127	43,48	0,002445	42,41	0,002020
290,91	366,58	128	43,48	0,002402	41,59	0,001980
294,88	366,30	129	43,48	0,002360	40,78	0,001942
298,82	366,00	130	43,48	0,002319	39,98	0,001904
302,76	365,68	131	43,48	0,002279	39,19	0,001866
306,68	365,36	132	43,48	0,002239	38,42	0,001829
310,59	365,02	133	43,48	0,002199	37,66	0,001793
314,49	364,67	134	43,48	0,002160	36,90	0,001757
318,38	364,30	135	43,48	0,002122	36,16	0,001722
322,25	363,92	136	43,48	0,002084	35,44	0,001687
333,59	355,23	137	42,99	0,002047	34,72	0,001653
338,26	353,91	138	42,23	0,002011	34,01	0,001619
342,91	352,59	139	41,47	0,001975	33,31	0,001586
347,54	351,27	140	40,72	0,001939	32,62	0,001553
352,15	349,94	141	39,99	0,001904	31,94	0,001521
356,73	348,62	142	39,26	0,001870	31,28	0,001489
361,29	347,29	143	38,55	0,001836	30,62	0,001458
365,84	345,95	144	37,84	0,001802	29,97	0,001427
370,36	344,61	145	37,15	0,001769	29,33	0,001396
374,86	343,27	146	36,46	0,001736	28,69	0,001366
379,35	341,92	147	35,78	0,001704	28,07	0,001337

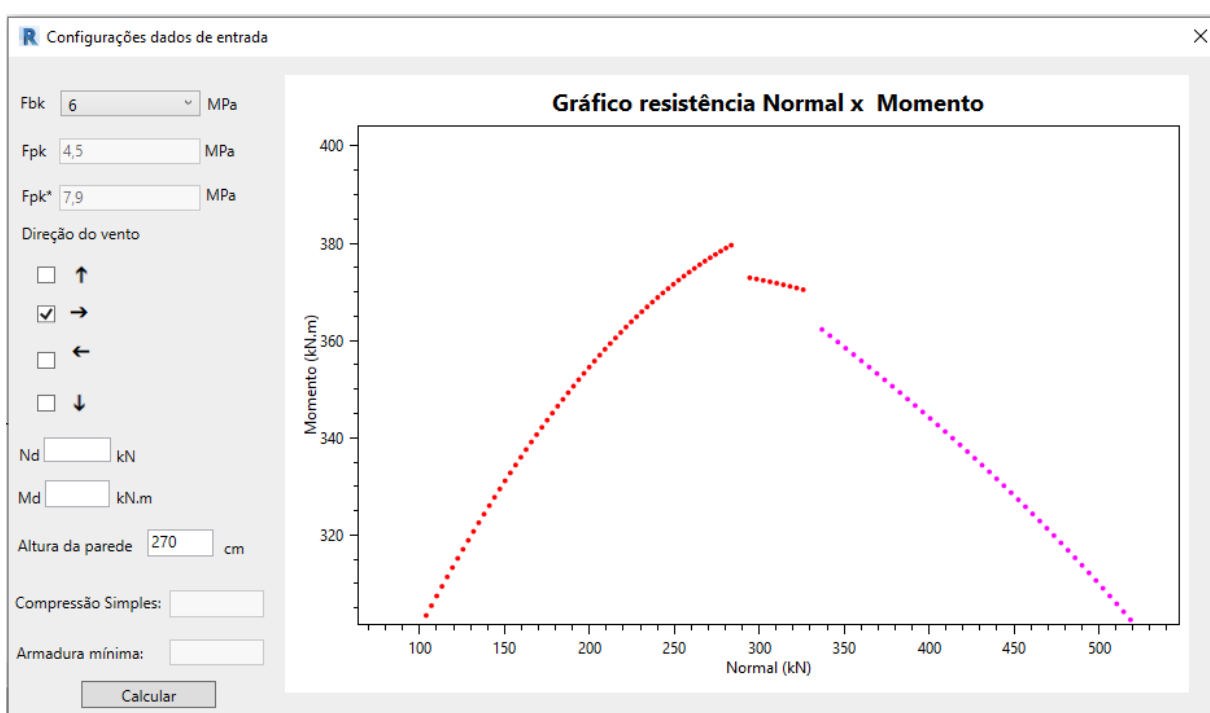
Através desta tabela é possível analisar cuidadosamente qual o comportamento da subestrutura de acordo com a varredura da linha neutra sobre a seção. Observa-se que para linha neutra igual a 138 cm, ponto solução encontrado no exemplo, obtém-se deformação da barra 1 de 0,001619 e para a barra 2 uma deformação de 0,001722, ambos os valores abaixo a deformação de escoamento de 0,00207 portanto as barras não escoam. Quando comparado os valores resistentes têm-se pelo *plugin* 338,26 kN para a normal e 353,91 kN.m para o momento.

Nota-se que ambos os valores encontrados aproximam-se dos valores realizados por iteração no exemplo do livro. As diferenças obtidas são relativamente baixas e deve-se ao posicionamento das barras pelo usuário no software Revit.

É possível fazer a comparação dos dados com o gráfico, um ponto importante a se analisar é o momento de transição do domínio 3 para o domínio 4, que é dado pelo ponto ao qual as barras deixam de escoar e entram no patamar elástico apresentando tensão conforme a Lei de Hooke, tal ponto é evidenciado entre distância de linha neutra 136 e 137 cm e no gráfico entre as cores vermelho e magenta.

Essa geração de dados para cada iteração de linha neutra foi importante para analisar por qual motivo ocorrem as quebras no gráfico. Diferentemente do concreto armado, na alvenaria estrutural as barras podem apresentar distâncias diferentes até a borda e como foi realizado no trabalho a discretização de tais armações nota-se que as deformações apresentadas pelas barras variam de acordo com essa distância, portanto a contribuição de cada uma é diferente. Com isso, nota-se que as 2 descontinuidades que ocorrem no gráfico evidenciam primeiramente o momento que a barra 2 deixa de escoar e entra no patamar elástico, enquanto a outra barra ainda está trabalhando com uma tensão de escoamento, ponto este a uma distância de linha neutra de 126 cm. A segunda descontinuidade ocorre quando a barra 1 deixa de escoar e também passa a trabalhar de acordo com a Lei de Hooke, ponto ao qual também representa a transição do domínio 3 para o domínio 4, ao qual todas as barras passam a trabalhar com  $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$ . A Figura 23 apresenta uma aproximação da figura 22 a fim de facilitar o entendimento pelo leitor.

Figura 23:



Fonte: autor.

Como ideia principal o *plugin* tem como objetivo realizar a verificação de paredes de alvenaria já dimensionadas que tiveram possíveis alterações de posição de aço para compatibilização com outras disciplinas no projeto. Entretanto é possível também pelo projetista, através do auxílio do *plugin*, dimensionar quantidade e posição dos aços, porém esse método seria por tentativa e erro, e dependendo da análise do gráfico e de qual o valor de esforços de momento e normal aplicados compatibilizar uma disposição de aço ao qual atenda esses esforços além de levar em consideração a viabilidade econômica, fator de grande importância no ramo das construções.

#### 5.4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Sabe-se que o software Revit é um programa de modelagem que utiliza um elevado consumo computacional e dependendo das tarefas realizadas é necessário um bom hardware para que estas sejam feitas de maneira produtiva. Como o *plugin* visa trabalhar com projetos em alvenaria estrutural é necessário analisar a viabilidade do processamento, pois tais projetos apresentam arquivos com elevado número de dados.

Com isso foi feita uma análise simples do tempo de duração da execução do *plugin* para diferentes chutes de linha neutra, sendo os valores 1 cm, 0,5 cm, 0,1 cm e 0,01 cm. Juntamente com esses valores, utilizou em testes com subestrutura de 3m, 5m e 7m. Os resultados de tempos de execução foram os seguintes:

Tabela 9: Tempo de execução do algoritmo.

Tempo execução (s)					
		Intervalos linha neutra (cm)			
		1	0,5	0,1	0,01
Comprimento parede	3m	0.007	0.010	0.079	0.457
	5m	0.012	0.023	0.103	0.942
	7m	0.021	0.038	0.182	1.804

Através destes dados nota-se que é viável a aplicação, pois considerando um intervalo de discretização muito baixo, ainda assim o tempo de processamento é adequado para uso do *plugin*. Um dos motivos do baixo tempo de processamento deve-se ao modo como os

elementos são tratados dentro do algoritmo, no primeiro instante do código os elementos do revit são processados e capturadas as informações necessárias, as quais são transformadas apenas em números e deixam de ser elementos vinculados ao revit, portanto o algoritmo trabalha somente a maior parte do tempo somente com números, eliminando a parte de trabalho com elementos do revit que poderia levar um tempo de processamento maior.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos sobre o comportamento da seção ocorreram de acordo com a teoria aplicada, portanto verifica-se que a lógica do algoritmo atendeu ao esperado. Entretanto, por tratar-se de um plugin um tanto complexo o adequado seria uma verificação em massa ao qual muitos usuários contribuem para geração de dados e assim encontrar possíveis erros. Em relação à análise computacional o *plugin* apresentou resultados de tempo de processamento plausíveis e executáveis com baixos valores de discretização de linha neutra.

Quando realizado da maneira correta é possível criar algoritmos poderosos que realizem dentro do software de modelagem calculadoras que façam verificações e até mesmo dimensionamentos para a área de projetos, diminuindo retrabalho e tendo ganho na produtividade.

Futuras melhorias do *plugin* podem ser realizadas ampliando a verificação para paredes não armadas considerando estágio 1, e para paredes armadas considerando estágio II sem plastificação da seção.

Com a utilização de forma correta pelo projetista, o *plugin* apresenta potencial para aplicação em projetos de metodologia BIM, com isso conclui-se que a programação é uma grande aliada para ganho de produtividade e também para entendimento e análise do comportamento de estruturas dentro de softwares de modelagem.

## REFERÊNCIAS

- ACCETTI, Kristiane Mattar. **Contribuições ao projeto estrutural de edifícios de alvenaria**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas). Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1**: Alvenaria Estrutural Parte 1 : Projeto. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-2**: Alvenaria Estrutural Parte 2 : Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-3**: Alvenaria Estrutural Parte 3 : Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- ATAÍDE, César Alexandre Varella. **Estudo comparativo entre o método das tensões admissíveis e o dos estados limites para alvenaria estrutural**. Dissertação ( Mestre em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 2005.
- CAMACHO, Jefferson Sidney. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2006. 48 p.
- LAVANDOSCKI, Fábio Ioveni. **Contribuição ao estudo das normas para o dimensionamento de paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v.1, n.2, 2016.
- MOHAMAD, Gihad. **Construções em alvenaria estrutural: Materiais, projeto e desempenho**. 2ª ed. São Paulo, Blucher, 2020. 422 p.
- PARSEKIAN, G. A., HAMID, A. A., DRYSDALE, R. G.. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 625 p.
- PARSEKIAN, G. A., MEDEIROS, W.A. **Parâmetros de projeto de alvenaria estrutural com blocos de concreto**. 2ª ed. São Carlos, EdUFSCar, 2021. 147p.
- PEREIRA, José Luiz. **Alvenaria estrutural: Cálculo, detalhamento e comportamento**. PINI, 2015. 149 p.
- RAMALHO, Márcio A., CORRÊA, Márcio R, S.. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1ª ed. São Paulo, PINI, 2003. 169 p.

SANTOS, P.V.S.; ARAGÃO, H.G.. **Avaliação das Implicações Técnicas Promovidas pela Introdução de Estados Limites no Cálculo de Alvenaria Estrutural**. VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2014.

SENA, Paulo César Peixoto. **Automação de processos de projeto e programação em BIM: Dynamo, Python e C#**. Dissertação (Mestre em Arquitetura e Urbanismo). Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2019.

STEINMETZ, Ismael. **Alvenaria Estrutural: Dimensionamento de um edifício de quatro pavimentos utilizando blocos de concreto vazado**. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.