



Coordenação de Iniciação Científica, Monitoria e Extensão
Curso de Engenharia Civil

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ESTRUTURAS

ÉSIO MAGALHÃES FEITOSA LIMA

Fortaleza - CE

2019

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE ESTRUTURAS

ÉSIO MAGALHÃES FEITOSA LIMA

Projeto de Iniciação Científica do Curso de
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Fortaleza-CE

2019

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	X
2	JUSTIFICATIVA	<u>X</u>
3	OBJETIVOS	<u>X</u>
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	<u>X</u>
5	METODOLOGIA	<u>X</u>
6	CRONOGRAMA	<u>X</u>
	REFERÊNCIAS	<u>X</u>

RESUMO

A sofisticação dos problemas com que a humanidade tem se deparado nas últimas décadas, em áreas tão diversas como as megaestruturas, a mecânica do contínuo e criação de novos materiais, nos apresenta a necessidade de se obter respostas confiáveis em um curto período de tempo. Com o advento dos computadores, estes problemas se tornaram passíveis de solução e atendem a essas condições. Dentro do contexto da engenharia, diversas técnicas desenvolvidas a partir da utilização de ferramentas computacionais vêm possibilitando avaliar com mais confiabilidade o comportamento de estruturas bastante complexas. Dentre estas técnicas, pode-se destacar as modelagens computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF vem sendo bastante empregado atualmente devido às suas diversas vantagens, tais quais permitem ao usuário avaliar os comportamentos não lineares, físico e geométrico de estruturas, além da interação e deformabilidade entre materiais. Baseado no potencial deste tipo de análise, este projeto será desenvolvido de forma generalizada, e o seu principal objetivo é modelar computacionalmente estruturas em regime não linear. Estas modelagens serão realizadas em duas temáticas diferentes: modelagem computacional de vigas reforçadas com fibra de carbono e modelagem computacional de vigas mistas protendidas. A metodologia consiste na concepção de modelos numéricos através do programa ABAQUS, onde estes serão validados a partir de referências clássicas presentes na literatura técnica. Por fim, como resultados, espera-se avaliar diversos aspectos estruturais importantes, tais como deslocamentos, tensões e deformações.

Palavras-chave: modelagem computacional. método dos elementos finitos. análise não linear.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos fenômenos estudados em modelos computacionais, aerodinâmica de aviões, hidrodinâmica de turbinas, análise de estruturas não lineares etc. sempre partem de uma integração. Porém somente em modelos extremamente simples a integração direta é possível. Quando estas integrações se tornam complexas ou excessivas, alguns métodos são utilizados para solucionar o problema, podendo citar nesse contexto, as modelagens computacionais baseada no método dos elementos finitos.

Devido a sua versatilidade, o método dos elementos finitos permite a modelagem de diversos problemas de engenharia. Este método apresenta uma metodologia adequada para conduzir investigações e realizar análises de estruturas pré-definidas pelos usuários.

Atualmente a literatura dispõe de poucos trabalhos que abordem a utilização de procedimentos numéricos, através do software ABAQUS, capazes de simular o comportamento vigas mistas protendidas e de vigas reforçadas com fibra de carbono. Com base nisso, este projeto de pesquisa busca desenvolver análises computacionais que tratam do comportamento estrutural destas peças.

Esta proposta busca contribuir positivamente para as temáticas mostradas, e incentivar o desenvolvimento de novas investigações e pesquisas relacionadas a vigas mistas protendidas e vigas reforçadas com fibra de carbono. Espera-se também que os resultados desenvolvidos nesta pesquisa, possam auxiliar com destreza futuras investigações experimentais acerca dos temas.

2. JUSTIFICATIVA

Justificativa da primeira temática:

Diversas patologias podem ocorrer nas estruturas de concreto, oriundas do envelhecimento natural do material, ação de agentes externos agressivos ou baixo controle de qualidade. Uma das formas de reforçar vigas é através da inserção de fibras de carbono. Essa técnica tem como vantagens, o fácil manuseio e aplicação, além de as fibras de carbono possuírem baixo peso específico, elevada resistência à tração, alto módulo de elasticidade e boa resistência aos agentes químicos em geral.

A justificativa da escolha da primeira temática deste projeto parte da ausência de normatização oficial no Brasil, muitos profissionais não utilizam a técnica por falta de conhecimento ou insegurança. Geralmente, o reforço é dimensionado apenas através da experiência do profissional ou uso de manuais de fabricantes, logo análises computacionais confiáveis podem direcionar profissionais em seus projetos.

Justificativa da segunda temática:

Tradicionalmente, a técnica de protensão está associada às estruturas de concreto, e tem como procedimento adicionar cabos de aço tracionados no interior da peça. O traçado do cabo de aço é definido de tal maneira que surjam cargas de reação opostas às cargas oriundas dos carregamentos externos, a fim de reduzir os deslocamentos verticais e prevenir o surgimento precoce de fissuras.

Esta técnica é utilizada para melhorar o comportamento estrutural, e vem sendo difundida amplamente em estruturas de concreto, porém seu uso pode ser atrelado a vários tipos de materiais.

A protensão pode ser utilizada inclusive para reforçar vigas metálicas já existentes, em que a probabilidade de ocorrer problemas relacionados à deterioração é mais alta, podem-se citar nesse contexto as pontes e passarelas. A técnica de protensão pode ser utilizada para reforçar estruturas sujeitas a um aumento de sobrecarga.

Os benefícios da protensão aliados ao grande potencial das estruturas mistas resultam em uma alternativa viável e bastante útil para projetos estruturais que necessitam atender a imposições arquitetônicas e construtivas. Sendo assim, é justificável a elaboração de estudos mais aprofundados sobre o tema.

3. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral verificar a eficácia da modelagem computacional de dois tipos de estruturas: vigas de concreto reforçadas com fibra de carbono e vigas mistas protendidas.

Objetivos da primeira temática:

- Avaliar o caminho de equilíbrio de vigas reforçadas com fibras de carbono;
- Comparar o comportamento estrutural de vigas reforçadas com fibras de carbono e vigas não reforçadas;
- Avaliar a influência das fibras no comportamento estrutural das vigas;
- Avaliar a distribuição das tensões no interior das vigas;

Objetivos da segunda temática:

- Avaliar o caminho de equilíbrio de vigas mistas protendidas;
- Comparar o comportamento estrutural de vigas mistas protendidas e vigas não protendidas;
- Calcular os deslizamentos relativos entre os materiais;
- Avaliar as tensões no cabo de protensão;
- Gerar a configuração deformada das vigas;

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Fundamentação teórica da primeira temática:

No Brasil, vários centros de pesquisas têm se interessado pelo tema, alguns já tendo iniciado trabalhos referentes ao reforço de vigas de concreto armado ao esforço de cisalhamento, através de colagem de fitas de PRFC nas faces laterais da alma de vigas retangulares, utilizando o mesmo material adotado no estudo experimental objeto desse trabalho. Outros centros optaram pela utilização de mantas de PRFC e estudos variando a quantidade de reforço. A vantagem do reforço com fitas sob as mantas de PRFC é a facilidade de controlar a qualidade do produto durante a execução.

Beber (1999) desenvolveu seus estudos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul ensaiando dez vigas retangulares de concreto armado reforçadas por aplicação de lâminas de PRFC, via úmida, na face inferior das vigas. As dez vigas foram divididas em cinco grupos de duas vigas cada, sendo o primeiro composto por vigas de referência e os demais por vigas reforçadas, com variação na quantidade de reforço aplicado.

Shehata (1998) elaborou um programa experimental para estudar a viabilidade de reforçar com PRFC as peças de concreto da cobertura de uma indústria localizada em Winnipeg, no Canadá. A escolha pelo material de reforço foi baseada nas suas características de elevada resistência, pequena espessura, facilidade de aplicação, resistência aos álcalis do cimento e menor custo comparado a outras técnicas de reforço. Segundo o autor, o reforço mostrou-se eficiente, principalmente, por atuar na redução de deslocamentos, na diminuição da fissuração da peça e no aumento da carga de ruína.

Outro estudo experimental interessante foi realizado por Heffeman e Erki (1996), no Royal Military College, no Canadá, ensaiando três vigas retangulares de 2 m e duas de 5 m de comprimento, reforçadas por colagem de lâminas de PRFC no banzo tracionado das peças. Foram realizados ensaios para determinar o módulo de elasticidade do reforço, que depende da quantidade de epóxi utilizada na aplicação do PRFC. Os autores sugerem que os projetistas utilizem o valor de módulo de elasticidade recomendado pelos fabricantes. Com as observações feitas durante o programa experimental, os autores puderam concluir que:

- A rigidez das vigas é influenciada pelo módulo de elasticidade do PRFC x' e por sua posição em relação à linha neutra da viga;
- As hipóteses da teoria da flexão, aparentemente, não são afetadas pela escala das vigas;
- A eficiência do reforço é maior se comparado com uma mesma área de armadura convencional;
- Em vigas de seção subarmada o reforço pode ser baseado em compatibilidade de deformações específicas, podendo-se considerar o diagrama retangular para as tensões de compressão no concreto.

Fundamentação teórica da segunda temática:

Para dar embasamento teórico a temática proposta, a seguir serão mostradas algumas pesquisas desenvolvidas ao longo de anos que abordam a técnica da protensão em vigas mistas. Os trabalhos apresentados aqui datam do final da década de 80 até os dias atuais. Estes estudos fortificam a viabilidade desta técnica, além de impulsionar o surgimento de novos trabalhos, sendo experimentais ou numéricos, com o objetivo de se obter informações cada vez mais precisas sobre o comportamento estrutural destas peças.

Ayyub, Saadatmanesh e Sohn (1990) estudaram em seu trabalho o comportamento de três vigas mistas com protensão externa submetidas a momento positivo. A metodologia consistiu em testar experimentalmente todas as vigas até a ruptura, além da utilização de modelos analíticos para determinação das tensões nos cabos. Os cabos de protensão em duas das vigas tinham o traçado reto, porém em uma delas foram utilizadas barras protendidas e na outra, cordoalhas. A terceira viga utilizava cabos protendidos, porém o seu traçado era no formato poligonal.

Os autores supracitados, concluíram que: O modelo analítico desenvolvido no trabalho representou bem o comportamento experimental da peça; A protensão pode aumentar significativamente a carga de escoamento e a carga última da peça; A hipótese de interação total não pôde ser justificada, pois houve deslizamentos relativos entre os materiais, resultando em deflexões maiores do que as previstas; Uma maior distância do cabo ao eixo neutro da peça resulta em uma maior carga final, se possível os cabos devem ser locados abaixo da mesa inferior; Um cabo com área da seção transversal maior reduz as

deflexões e aumentam a carga última; O uso de cordoalhas ao invés de barras é preferível, já que sua relação força/peso é maior; Cabos com traçado poligonal induzem um comportamento mais dúctil à estrutura em relação aos cabos com o traçado reto, porém estes apresentam uma maior facilidade de execução e menor custo.

Dall'Asta e Dezi (1998) propuseram um modelo analítico em seu trabalho considerando o comportamento não linear físico dos materiais. A hipótese cinemática adotada foi a de Euler-Bernoulli, em que as seções planas permanecem planas e perpendiculares a um eixo de referência após a deformação. Os autores realizaram a solução numérica e expuseram as estratégias adotadas na resolução de equações não lineares, e relatam ainda sobre as tensões, e os deslocamentos relativos à carga aplicada, além disso, estes desenvolvem algumas comparações entre diferentes sequências construtivas, e investigam a influência de alguns parâmetros de projeto diante a capacidade final da estrutura.

Chen (2005) estudou o comportamento estrutural de vigas mistas protendidas submetidas a momentos negativos. A metodologia adotada consistia em avaliar o comportamento até a ruptura de quatro grupos de vigas, classificados pelo EUROCODE 4 como, seções plásticas (Classe 1), seções compactas (Classe 2), seções não compactas (Classe 3) e seções esbeltas (Classe 4). Foram estudadas duas vigas mistas com protensão externa, a fim de investigar o comportamento de flambagem e para a determinação das tensões na região elástica, considerou-se uma distribuição de tensão linear em toda a espessura da seção mista.

O autor concluiu que o incremento de forças internas no cabo de protensão na região de momentos negativos é bastante pequeno, a ponto de ser negligenciáveis no valor da resistência final da viga; Em regiões de momentos negativos, a carga última da viga é influenciada pelo efeito da flambagem local ou pelo efeito da flambagem lateral distorcional, ou uma combinação modal de ambos; Para as vigas com seção compacta, o momento último pode chegar ao momento de plastificação quando perfil de aço está totalmente plastificado; Para uma seção não compacta, o momento último pode ser limitado pelo início do escoamento da mesa comprimida.

Lorenc e Kubica (2006) avaliaram o comportamento de vigas mistas com protensão externa sujeita a momento positivo. Foram estudadas seis vigas mistas protendidas com cabos no traçado reto e poligonal e uma viga mista sem protensão. A análise das vigas foi feita através de experimentos e consistiu em analisar as vigas até a ruptura, com o objetivo de se obter o comportamento estrutural das vigas mistas

protendidas e da viga mista não protendida, a curva força - deslizamento na interface dos materiais e por fim a comparação dos resultados entre as peças.

Os autores concluíram que: Não existiu diferença significativa entre o comportamento das vigas com cabos de traçado reto e das vigas com cabos de traçado poligonal; Vigas com o concreto mais resistente apresentaram maior ductilidade do que as vigas com o concreto menos resistente; A laje de concreto falhou localmente nas extremidades das vigas, mas não teve efeito significativo sobre o comportamento da peça inteira; A capacidade de carga das vigas mistas protendidas foi 25% maior do que em vigas mistas sem protensão; O mecanismo de falha das vigas consistiu no escoamento do perfil na região tracionada, seguido pelo esmagamento do concreto da laje; Os cabos de protensão não romperam em nenhuma das situações; A interação na interface dos materiais tem efeitos significativos no comportamento da peça; Após a ruptura da laje, o perfil metálico sofre flambagem devido à carga de protensão aplicada nos cabos.

Dall'Asta, Ragni e Zona (2006) avaliaram os efeitos das não linearidades física e geométrica de vigas mistas com protensão externa através do método dos elementos finitos. O modelo analítico proposto foi baseado na hipótese de pequenas deformações e rotações moderadas obtidas da teoria não linear exata, como também foi considerado o deslocamento longitudinal relativo (interação parcial). Nesse estudo, uma viga mista contínua protendida externamente foi analisada. O código em elementos finitos implementado pelos autores foi comparado com dados experimentais da literatura.

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho é bastante simples. Primeiro as peças, tanto as vigas mistas protendidas quanto as vigas reforçadas com fibra de carbono, serão modeladas no software ABAQUS tendo como referência exemplos experimentais da literatura técnica.

A partir do término das modelagens, estas passarão por um processo de validação. Esta etapa consiste na comparação dos resultados obtidos através do software com os resultados obtidos de forma experimental. A partir do momento em que os resultados da modelagem forem validados, estes poderão ser publicados.

É importante mencionar que as validações poderão ser realizadas também a partir da comparação de dados analíticos obtidos através de equações.

As análises computacionais sempre levarão em consideração o comportamento não linear dos materiais. Esta consideração é necessária para que a resposta obtida pelo programa, chegue mais próximo da realidade possível.

RECURSOS

A composição necessária para executar as tarefas deste projeto de iniciação científica é de no máximo cinco alunos, não necessariamente terão que ser bolsistas.

A carga horária para encontros é de no mínimo duas horas semanais, para auxiliá-los nos assuntos que estão relacionados a pesquisa, sendo na parte computacional ou teórica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. G. M. Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08). Farmington Hills: Michigan, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro, 2014.
- BEER, F.P. e JOHNSTON JR., E.R. Resistência dos Materiais, 3.ed., Makron Books, 1995.
- CEB-FIB. Model Code: First Complete Draft. v. 1. International Federation for Structural Concrete: Lausanne, Switzerland, 224 p., 1999.
- REIS, A. P. A. (1998). Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- SANTOS, Daniel dos. Análise de vigas de concreto utilizando modelos de bielas e tirantes. 2006. 195 f. Dissertação de Mestrado (mestre em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- TENG, J.G.; CHEN, J.S.; SMITH, S.T.; LAN, L. FRP Strengthened RC Structures. 1. ed. West Sussex - England: John Wiley and Sons, 2001.