



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ERIVALDO MAIA LOURENÇO FILHO

**ANÁLISE NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE
VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS DE
CONECTORES**

FORTALEZA

2020

ERIVALDO MAIA LOURENÇO FILHO

ANÁLISE NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS
MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS DE CONECTORES

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Ms. Ésio Magalhães Feitosa Lima.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F478a Filho, Erivaldo Maia Lourenço.

ANÁLISE NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS DE CONECTORES / Erivaldo Maia Lourenço Filho. – 2020.

68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Me. Écio Magalhães Feitosa Lima.

1. Modelagem Numérica. 2. Vigas-Mistas. 3. Conectores de Cisalhamento. 4. Método dos Elementos Finitos. I. Título.

CDD 620

ERIVALDO MAIA LOURENÇO FILHO

ANÁLISE NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS
MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM DIFERENTES TIPOS DE CONECTORES

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Ésio Magalhães Feitosa Lima
Faculdade Ari de Sá (FAS)

Prof. Ms. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá (FAS)

Prof^a. Ms. Mariana Medeiros Ximenes
Faculdade Luciano Feijão (FLF)

Aos meus pais, Erivaldo e Iraci.
Ao meu irmão Weverton.
Ao meu primo Técio (*in memoriam*).
A toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Erivaldo Maia Lourenço e Iraci Moura Nunes Lourenço, por todo apoio, dedicação, motivação e inspiração para conquistar meus objetivos.

Ao meu irmão Weverton Nunes Lourenço, por apoio, incentivo e toda ajuda prestada no início do curso.

Ao Prof. Ms. Ésio Magalhães Feitosa Lima, pela excelente orientação, e todo apoio no desenvolvimento deste trabalho e de outros passados.

Ao Coordenador e Amigo, Prof. Ms. Leonardo Tavares de Souza, por total apoio e incentivo durando toda a graduação em Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá que fizeram parte desta graduação, pelos ensinamentos únicos, apoios, incentivo para chegarmos aqui na conclusão do curso.

A toda equipe administrativa, direção, coordenação, secretaria, zeladoria da Faculdade Ari de Sá.

Aos meus queridos amigos que fiz durante minha jornada de 6 anos de trabalho no Ministério Público Federal, pessoas que foram fundamentais para eu estar aqui hoje, por todo incentivo e apoio recebido.

À Adriana, Glória e Monica, por todo cuidado, carinho, incentivo e puxões de orelha.

À gestão 2017-2019 do MPF/CE, em nome do Procurador-Chefe, Dr. Romulo e Secretário Estadual, Erivelhon, no qual me deram espaço para crescimentos pessoal e profissional, além de ter sido um período decisivo para eu me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao meu amigo/irmão e colega de graduação João Paulo de Castro Fernandes, por todos os puxões de orelha, estudos juntos, motivação, momentos de alegrias e “aperreios” durante esses longos 5 anos da graduação em Engenharia Civil.

A toda minha família paterna e materna, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus colegas e amigos que fiz durante essa trajetória na graduação de Engenharia Civil.

Aos meus novos colegas e amigos de profissão que fiz na minha atual empresa, OK Empreendimentos.

A todos os meus amigos que tenho fora do meio profissional e acadêmico, em nome de Cristhyan, Edna e Hamanda, entre vários outros amigos, agradeço por todo apoio, dedicação, incentivo para eu concluir essa graduação.

Aos membros da Banca Examinadora pela disponibilidade e por ter aceitado o convite de fazer parte da avaliação do meu trabalho de conclusão de curso.

“Em geral quando termino um livro encontro-me numa confusão de sentimentos, um misto de alegria, alívio e vaga tristeza. Relendo a obra mais tarde, quase sempre penso “Não era bem isto o que queria dizer”.”

Érico Veríssimo

RESUMO

Uma viga mista é um elemento estrutural composto por uma viga de aço e uma laje de concreto, que são ligados através de conectores mecânicos, conhecidos como conectores de cisalhamento que tem o papel de garantir a interação entre as peças estruturais, desta forma, a laje passa a atuar no combate aos esforços de compressão e o perfil metálico aos esforços de tração. Assim, a variação do tipo de conector e suas medidas podem influenciar diretamente no comportamento estrutural do conjunto da viga mista, contribuindo, quando bem dimensionados, para o aumento da capacidade de carga da viga mista, bem como redução dos deslocamentos verticais. O objetivo geral deste trabalho, é executar a modelagem computacional através do software ©*Abaqus-CAE Research V.14*, de três vigas mistas de aço e concreto, com variação dos tipos de conectores. A análise das vigas será realizada pelo Método dos Elementos Finitos – MEF. Todas as vigas mistas modeladas, contarão com as mesmas medidas de perfil metálico e da laje de concreto, variando apenas os tipos de conectores de cisalhamento que estarão em análise, sendo eles: o *stud bolt*, o *perfobond* e o perfil U. Os objetivos específicos deste artigo são: a elaboração de gráficos entre a relação carga deslocamento de cada viga mista, com seus respectivos conectores, do deslizamento relativo de cada conector em relação à laje de concreto e análise das tensões máximas nos conectores de cisalhamento, ao final demonstrando qual o conjunto que apresenta os melhores resultados de capacidade de carga e menor deslocamento vertical.

Palavras-chave: Modelagem Numérica; Vigas-Mistas; Conectores de Cisalhamento; Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Composite beam is a structural element composed of a steel beam and a concrete slab, which are connected through mechanical connectors, known as shear connectors that have the role of ensuring the interaction between structural parts, in this way, the slab starts to act to combat the compression efforts and the metallic profile to the traction efforts. Thus, the variation in the type of connector and its measurements can directly influence the structural behavior of the combined beam assembly, contributing, when well dimensioned, to the increase in the load capacity of the mixed beam, as well as the reduction of vertical displacements. The general objective of this work, is to perform the computational modeling through the software © Abaqus-CAE Research V.14, of three mixed beams of steel and concrete, with variation of the types of connectors. The beam analysis will be carried out by the Finite Element Method - MEF. All modeled composite beams will have the same measures of metallic profile and concrete slab, varying only the types of shear connectors that will be under analysis, namely: stud bolt, perfobond and U profile. Specific objectives of this article are: the elaboration of graphs between the load-displacement relation of each mixed beam, with their respective connectors, of the relative slip of each connector in relation to the concrete slab and analysis of the maximum stresses in the shear connectors, at the end demonstrating what set that presents the best results of load capacity and less vertical displacement.

Keywords: Numerical Modeling; Composite Beams; Shear Connectors; Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Viga mista madeira e concreto com conectores laterais.....	16
Figura 2	– Corte transversal da viga mista de madeira colada e concreto.....	17
Figura 3	– Residence Hall.....	18
Figura 4	– Viaduto Av. Aguanambi, em Fortaleza-CE.....	20
Figura 5	– Modelo viga mista de aço e concreto.....	20
Figura 6	– Relação força-deslizamento nos conectores.....	22
Figura 7	– Função dos Conectores de Cisalhamento.....	22
Figura 8	– Diagramas de tensão deformação da seção mistas.....	23
Figura 9	– Viga mista com Stud Bolt (VM-1)	25
Figura 10	– Relação de tamanho e dimensionamento Stud Bolt.....	26
Figura 11	– Pinus virtuais formados pelo concreto passante nos furos do conector Perfobond.....	27
Figura 12	– Conector Perfobond contínuo e descontínuo.....	27
Figura 13	– Viga mista com Perfobond (VM-2)	28
Figura 14	– Viga mista com Perfil “U” (VM-3)	29
Figura 15	– Diferentes tipos de elementos finitos.....	30
Figura 16	– Dimensões da viga mista, conforme corte transversal.....	32
Figura 17	– Dimensões do conector de cisalhamento do tipo perfobond.....	33
Figura 18	– Dimensões do conector de cisalhamento do tipo Perfil U.....	34
Figura 19	– Viga mista com Stud Bolt.....	35
Figura 20	– Viga mista com Perfobond.....	35
Figura 21	– Viga mista com Perfil U.....	36
Figura 22	– Curva CEP-FIP.....	37
Figura 23	– Malha de elementos Finitos.....	39

Figura 24 – Concentração de tensões no conector Stud Bolt.....	44
Figura 25 – Concentração de tensão no ponto da laje em contato com o conector Stud Bolt.....	45
Figura 26 – Concentração de tensões no conector Perfobond.....	47
Figura 27 – Concentração de tensão no ponto da laje em contato com o conector Perfobond.....	48
Figura 28 – Concentração de tensões no conector Perfil U.....	51
Figura 29 – Concentração de tensão no ponto da laje em contato com o conector Perfil U	52
Figura 30 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-1.....	57
Figura 31 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-2.....	58
Figura 32 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-3.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Carga x Deslocamento VM-1.....	42
Gráfico 2	– Deslizamento Longitudinal VM-1.....	42
Gráfico 3	– Tensão máxima nos conectores VM-1.....	43
Gráfico 4	– Carga x Deslocamento VM-2.....	46
Gráfico 5	– Deslizamento Longitudinal VM-2.....	46
Gráfico 6	– Tensão máxima nos conectores VM-2.....	47
Gráfico 7	– Carga x Deslocamento VM-3.....	49
Gráfico 8	– Deslizamento Longitudinal VM-3.....	49
Gráfico 9	– Tensão máxima nos conectores VM-3.....	50
Gráfico 10	– Carga x Deslocamentos Verticais.....	53
Gráfico 11	– Deslizamento Longitudinais entre Conectores e Lajes de Concreto.....	54
Gráfico 12	– Tensões Máximas Principais nos Conectores de Cisalhamento.....	55
Gráfico 13	– Tensões Máximas Principais nos Perfis Metálicos.....	56
Gráfico 14	– Tensões Máximas Principais nas Lajes de Concreto.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson.....	37
Quadro 2	– Não Linearidade do Concreto.....	38
Quadro 3	– Não Linearidade do Aço.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PUCRIO	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
MEF	Método dos Elementos Finitos
PUC GOIÁS	Pontifícia Universidade Católica de Goiás

LISTA DE SÍMBOLOS

® Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	GERAL	15
2.2	ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	VIGAS MISTAS	16
3.1.1	Vigas Mistas de Aço e Concreto	18
3.2	CONECTORES DE CISALHAMENTO	21
3.2.1	Stud Bolt	25
3.2.2	Perfobond	26
3.2.3	Perfil “U”	28
3.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	29
3.4	ANÁLISE NUMÉRICA/MODELAGEM COMPUTACIONAL	31
4	METODOLOGIA	31
4.1	SOFTWARE ABAQUS	31
4.2	DIMENSÕES DAS VIGAS	32
4.3	MODELOS	34
4.4	INTERAÇÕES	38
4.5	MALHA	39
4.5.1	Malha da Viga Mista com Stud Bolt (VM-1)	40
4.5.2	Malha da Viga Mista com Perfonbond (VM-2)	40
4.5.3	Malha da Viga Mista com Perfil “U” (VM-3)	41
5	RESULTADOS	41
5.1	VIGAS	41
5.1.1	VM-1	41
5.1.2	VM-2	45
5.1.3	VM-3	48
5.2	CURVAS CARGAS-DESLOCAMENTOS E DESLIZAMENTOS LONGITUDINAIS NOS CONECTORES DE CISALHAMENTO	52
5.3	TENSÕES MÁXIMOS NOS CONECTORES, VIGAS E LAJES	54
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata-se da análise estrutural de conectores de cisalhamento do tipo Stud Bolt, Perfobond e Perfil “U” em vigas mistas de aço e concreto, os conectores têm por função a conexão mecânica entre o aço e concreto nesse modelo de estrutura.

Viga mistas nada mais é do que a combinação de um perfil metálico (Viga) associada a uma laje de concreto armado, e para garantir a conexão entre esses elementos há a necessidade da presença de conectores de cisalhamento, indo de acordo com a afirmação de Malite (1990), que o ganho de resistência de uma viga mista está diretamente relacionada interação entre as peças que a compõe, ou seja, os conectores de cisalhamento.

Segundo Pfeil (2009), a utilização das vigas mistas de aço e concreto foram potencializadas logo após a segunda guerra mundial, é importante informar que naquela época, assim que foi iniciado a utilização das vigas mistas, as vigas metálicas eram calculadas sem levar em consideração os esforços das lajes de concreto. Desde aí, com a expansão da utilização desse elemento estrutural composto, os engenheiros europeus iniciaram os estudos sobre a influência da laje de concreto nas vigas metálicas.

Já Griffis (1994), afirma que a utilização dos sistemas estruturais mistos se deu inicialmente nos Estados Unidos, no início do século XX, como podemos ver, por mais que hoje seja muito discutido sistemas mistos, e como eles podem ser vantajosos, não é um sistema recente, mundo à fora a utilização se deu há muitos anos. No entanto, no Brasil, a utilização de sistemas com essas características é mais recente, como datado por Malite (1990), esse sistema só foi inserido na construção civil brasileira por volta da década de 50/60.

Então, como já visto, por mais que seja um sistema estrutural antigo, a literatura sobre o assunto ainda é restrita, no sentido de que há poucas publicações, quando comparado com sistemas convencionais de concreto armado e protendido, principalmente quando se trata dos conectores de cisalhamento, onde a bibliografia fica mais restrita ainda.

Sendo que os conectores são elementos fundamentais para garantia da funcionalidade do sistema estrutural misto, sendo eles responsáveis pela interface de conexão entre o aço e o concreto, que tem a função de garantir a interação das peças, e a transmissão dos esforços da laje para a viga de aço.

Com o objetivo de entender melhor o funcionamento dos conectores de cisalhamento, bem como avaliar quais apresentam melhor desempenho e características mecânicas, que se busca a análise de diferentes tipos de conectores de cisalhamento com o

intuito de verificar aquele entre os analisados que apresentam melhor desempenho estrutural e viabilidade de execução.

Para viabilidade das análises, foi modelado através do software Abaqus® e a análise realizada através do Método dos Elementos Finitos – MEF. Dessa forma, a utilização do MEF proporcionou o estudo e análise prévia do desempenho de estruturas e como elas vão se comportar, o que traz consigo vantagens quanto ao desenvolvimento de projetos estruturais reais, pois a partir da análise numérica podemos verificar os possíveis entraves e pontos críticos nos projetos, e, já buscar uma solução adequada.

O objeto analisado nesta monografia, buscamos, ao fim deste trabalho, verificar e apresentar aqueles conectores de cisalhamentos que demonstram melhores desempenhos quanto a capacidade de carga, quanto as suas características mecânicas gerais, quanto a sua classificação em rígido ou flexível, bem como a verificação nas relações entre a viabilidade econômica e de execução, entre a utilização de cada um deles.

Além do contexto da engenharia, esse tipo de trabalho, quando exposto a sociedade, transmite segurança sobre as estruturas, pois, através dele, consegue-se apresentar para a sociedade o funcionamento das estruturas e qual o comportamento delas em caso da ocorrência de algum dano. Portanto, e de acordo com o exposto, analisamos três diferentes tipos de conectores de cisalhamento, apresentando suas características mecânicas e desempenho de cada um, de acordo com a situação proposta nesse trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar numericamente o desempenho e o comportamento estrutural de três vigas mistas, variando apenas os conectores de cisalhamento que as compõe, sendo uma única viga com cada respectivo conector, sendo eles: Stud Bolt, Perfobond e Perfil “U”.

2.2 ESPECÍFICOS

- Construir as curvas carga-deslocamentos das vigas em análise, cada uma com seu respectivo conector;
- Apresentar e justificar tecnicamente o melhor desempenho apresentado, e as vantagens em utilizar o conector de cisalhamento que apresentou melhor desempenho;

- Ilustrar a curva tensão x deformação na região mais solicitada das peças;
- Comparar os deslizamentos relativos entre os materiais em função do conector utilizado;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

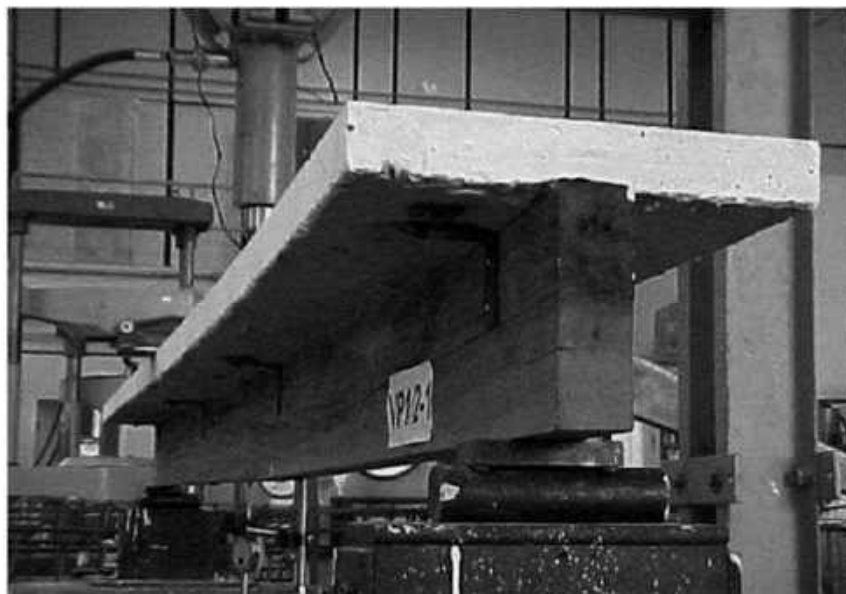
3.1 VIGAS MISTAS

Quando falamos de vigas-mistas no âmbito da engenharia, normalmente associamos as estruturas mistas como sendo sempre de aço e concreto, porém, existem diversos sistemas mistos com associação de outros materiais, como: sistemas estruturais mistos de concreto e madeira, de madeira e aço, ou até mesmo com a associação dos três materiais juntos.

A tese de Miotto (2009) traz a avaliação de vigas mistas de madeira laminada colada com fibras de vidro, associada a uma laje de concreto, na qual é interligada também por fibra de vidro, sendo a fibra o elemento no qual faz a conexão mecânica entre os elementos, e a partir daí a transmissão das cargas da laje de concreto para viga de madeira.

Já o trabalho de Mascia et al (2007), apresentou a análise estrutural de uma viga mista de madeira e concreto, sendo a laje apoiada na viga de madeira, e engastada apenas em pontos nas laterais, engastes tipo mão francesas parafusadas com parafuso 3/8”(9,5mm), conforme podemos ver na imagem abaixo.

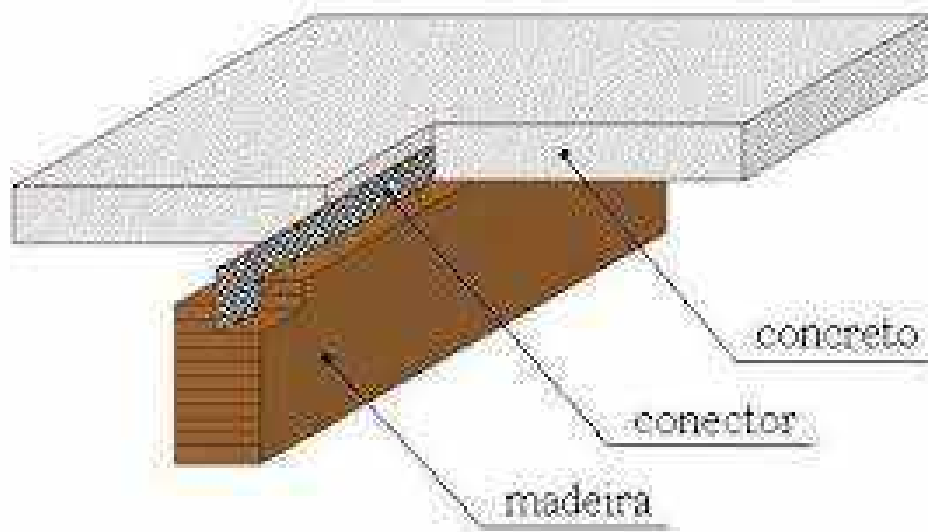
Figura 1 – Viga mista madeira e concreto com conectores laterais



Fonte: Mascia et al (2007).

Oliveira (2002), assim como Miotto (2009), apresentou contribuições para a análise de vigas mistas de madeira laminada colada e concreto, o interessante é a formação da viga que compõe esse sistema, pois a viga é composta por diversas peças de madeira coladas, e no caso do Miotto (2009), há a presença de fibra de vidro nessas junções, já no trabalho da autora Oliveira (2002) não. Podemos ver na figura abaixo como é a composição desse sistema misto.

Figura 2 – Corte transversal da viga mista de madeira colada e concreto



Fonte: Adaptado de HBV – Systeme (2006).

Silva (2008), realiza uma indagação sobre os sistemas estruturais mistos, ele traz um exemplo da combinação de um sistema estrutural de madeira e aço, sendo uma edificação de 6 pavimentos, que teve todo sistema de vigamentos e pilares metálicos e lajes de madeira. Mas ele pondera acerca das limitações estruturais, principalmente quando se trata da madeira, pois, por exemplo, o aço é um material isotrópico, ou seja, possui propriedades homogêneas em toda peça. Já a madeira, pode apresentar diversas variáveis em diversos pontos diferentes. O mesmo autor salienta a importância da continuidade nos estudos sobre a combinação da madeira e do aço em sistemas estruturais, pois somente com base teórica e comprovações práticas teremos garantia quanto a eficácia na utilização desse sistema.

Abaixo segue imagem do edifício Residence Hall, construído no sistema estrutural aço-madeira.

Figura 3 – Residence Hall.



Fonte: Silva, PUC-Goiás.

Como observado, os sistemas estruturais mistos é muito mais amplo, e vai além do sistema aço-concreto, porém, esses outros sistemas são pouco estudados. Isso deve-se também a cultura brasileira em construir edificações com predominância de aço e concreto na composição das estruturas.

3.1.1 Vigas Mistas de Aço e Concreto

Por definição, as vigas mistas de aço e concreto é a união mecânica de uma viga de aço com uma laje de concreto através de conectores de cisalhamento, a junção desses elementos, torna uma única seção que resiste a grades momentos fletores (SILVA, 2009).

Ainda segundo Silva (2009), é importante salientar que para que o sistema de vigas mistas funcione adequadamente, é necessário que a conexão entre os elementos que a compõem seja perfeita, para que assim a estrutura trabalhe como um único elemento.

Pfeil (2009) afirma que, para uma viga, só pode ser considerada mista quando o perfil metálico mais a laje de concreto trabalham como um único elemento, compartilhando esforços entre si.

Já Silva e Pannoni (2010), fazem uma condicionante e explicando um pouco como do porquê o sistema apresentar bons resultados, veja abaixo:

A flexão de uma viga isostática causa compressão na mesa superior do perfil. A laje de concreto pode ser colaborante, ou seja, contribuir na capacidade resistente à compressão, reduzindo, assim as dimensões do perfil. Além disso, há redução da flecha.

Silva e Pannoni (2010), ainda completam a citação anterior afirmando:

Para que a laje seja colaborante, deve garantir-se que os esforços da viga passem para a laje. O que se consegue usando conectores de cisalhamento soldados na mesa superior da viga e embutidos na laje [...].

No trabalho de Corrêa e Dauzacker (2015), eles realizam um comparativo de viabilidade financeira da construção de uma edificação de mesmas características, ao fim do trabalho eles concluem que o custo com a estrutura mista é maior, mas é salientado que na estrutura convencional há muito gasto com formas, um item que de forma geral não agrega valor à construção, lembrando ainda que na análise realizada não foi levado em conta o custo com mão de obra, fator que pode inverter ou não o cenário.

A combinação desses materiais, bem como a partir do conhecimento e da bibliografia existente, percebe-se que existe uma grande vantagem na utilização do sistema estrutural misto, principalmente quando se trata de estrutura de grande porte, como viadutos e pontes (SÁ E SANTOS, 2014).

Na figura abaixo podemos ver a imagem de um viaduto, construída com base no sistema de vigas mistas.

Figura 4 – Viaduto Av. Aguanambi, em Fortaleza-CE.

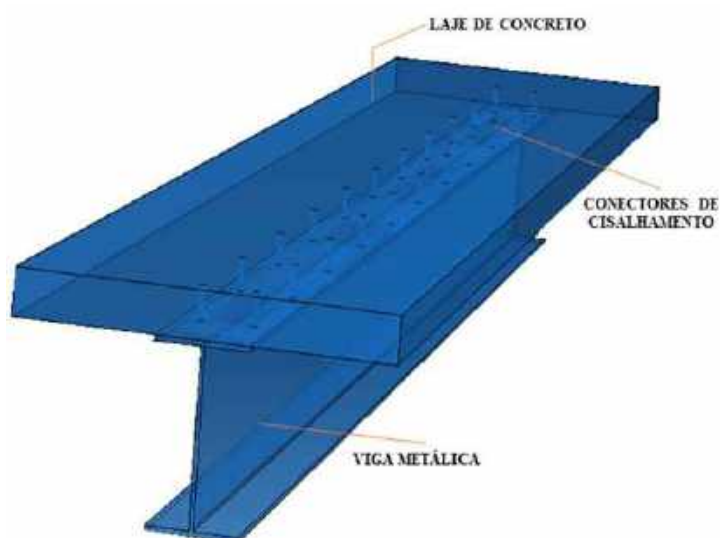


Fonte: Jornal Diário do Nordeste (2018).

Lorenc e Kubica (2006), publicaram um trabalho acerca de vigas-mistas protendidas, no trabalho em referência eles analisaram 6 vigas mistas, sendo 5 protendidas e 1 sem protensão. No artigo, há comparativos entre uma viga mista simples, denominada B2, vigas mistas com protensão reta, denominadas B4 e B6, e outras vigas mistas protendidas, só que com desviadores, ou seja, pontos de deslocamento para alteração no traçado dos cabos de protensão, denominadas B1, B3 e B5.

Abaixo vemos uma adaptação do modelo proposto por Lorenc e Kubica (2006).

Figura 5 – Modelo viga mista de aço e concreto



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Os conectores de cisalhamento são elementos necessários para o funcionamento adequado de uma viga mista, pois são eles que garantem a união dos dois elementos, viga de aço e laje de concreto.

De acordo com Lemes (2007), no ano de 1933, os estudos acerca dos conectores de cisalhamento tiveram início. Os estudos foram realizados na Federal Institute for testing Materials na Suíça. A partir daí, nas décadas seguintes os estudos se alavancaram por toda Europa, até que no ano de 1954 foram realizados os primeiros estudos sobre o conector tipo pino com cabeça (Stud Bolt).

Segundo Silva (2018), os conectores de cisalhamento são utilizados como dispositivos mecânicos capazes de transmitir e resistir os esforços de cisalhamento atuantes na interface aço-concreto, pois a aderência natural entre os dois elementos da viga mista, não é suficiente para garantir o trabalho conjunto das peças.

Acerca dos conectores de cisalhamento e sua função na interface viga e laje, Pfeil (2009; p. 265), afirma:

O conector absorve os esforços de cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço e ainda impede a separação física desses componentes (PFEIL, 2009, p. 265).

Vale ressaltar a classificação dos conectores de cisalhamento, pois, inclusive, fizeram parte das discussões das análises desse trabalho. Desta forma, a classificação mais comum dos conectores são entre flexíveis e rígidos, essa classificação é dada pela relação entre a força aplicada e o deslocamento obtido nos conectores, e com o resultado dessa relação existe outra classificação cabível que é sobre a relação de ductibilidade do material, pois, se um conector tem grande deformação e não rompe, significa dizer que ele é um conector dúctil, mas já se o mesmo romper logo após a aplicação da carga, ele é um conector não-dúctil (LEMES, 2007).

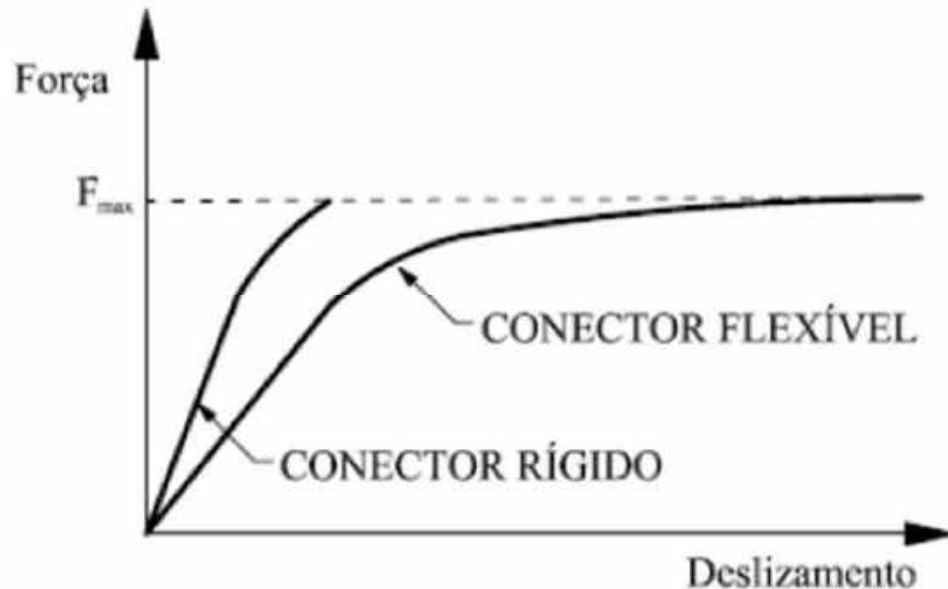
Em complemento, Alva e Malite (2005, p.52) afirmam que, “o conceito de rigidez, neste caso, está relacionado com a capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação viga de aço/laje de concreto.”

Alva e Malite (2005, p. 53) ainda afirmam que:

A característica estrutural mais importante dos conectores de cisalhamento é a relação existe entre a força F transmitida pelo conector e o escorregamento relativos na interface aço-concreto, determinando seu comportamento dúctil (ALVA E MALITE, 2005, p. 53).

Para melhor visualização acerca da classificação dos conectores de cisalhamento, vejamos na Figura 1 a curva tensão deslocamento elaborada por (ALVA, 2000):

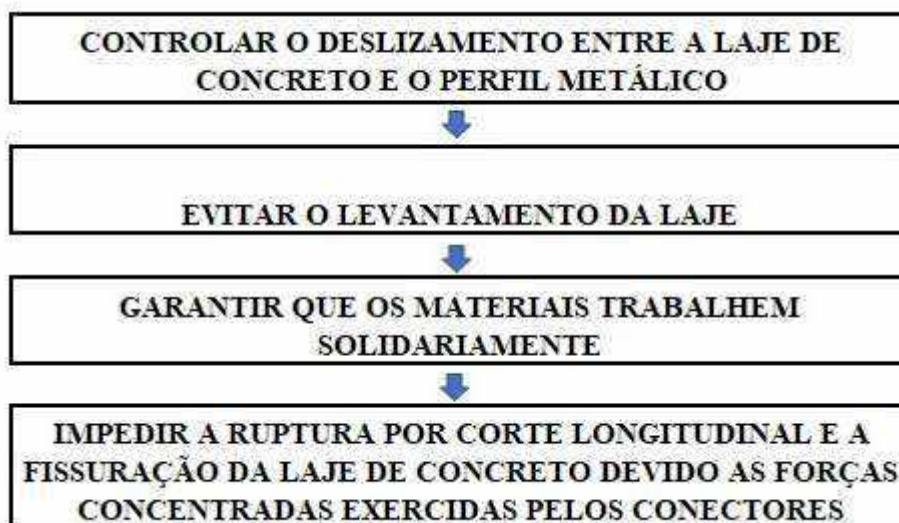
Figura 6 – Relação força-deslizamento nos conectores.



Fonte: Alva (2000).

Segundo a Norma Europeia EN 1994-1-1:2011, os conectores de cisalhamento tem as seguintes funções, veja a figura 2.

Figura 7 – Função dos Conectores de Cisalhamento



Fonte: Adaptado EM 1994-1-1,6.6 (2011).

Outro fator determinante na relação dos conectores de cisalhamento nas vigas mistas, é o grau de interação na qual está inserida. Basicamente os graus de interações estão divididos em três: interação parcial, interação total e interação nula, como os próprios nomes já sugerem, na interação parcial, existe uma parcialidade de interação entre os elementos mecânicos da viga mista, na interação total a viga funciona totalmente como um único elemento, com transmissão total de cargas entre si e seus elemento, e, na interação nula, não existe interação.

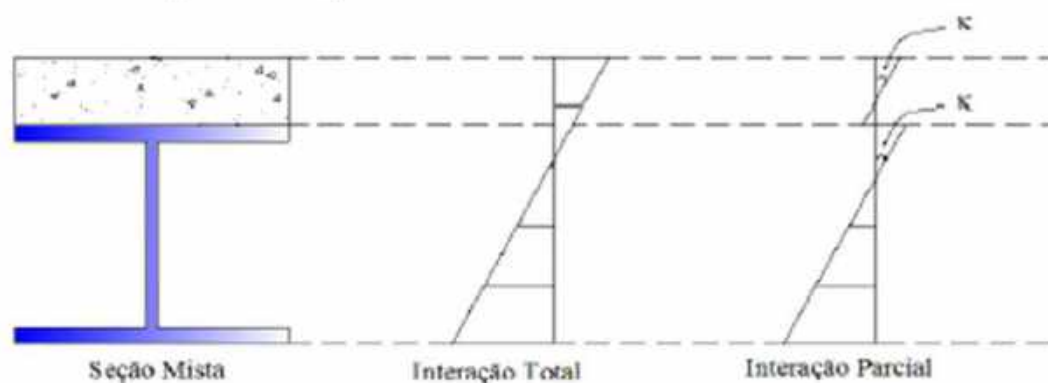
Dentre as interações, a parcial tem maior destaque, pois ela representa melhor as situações reais de um sistema estrutural misto, onde existe trabalho, esforços e deformações diferentes entre os materiais.

O grau de interação esta diretamente relacionado a quantidade e ao tipo de conector de cisalhamento

A interação parcial vai ocorrer quando as forças resistentes longitudinais da interface não são suficientes para vencer a força cortante atuante entre a interface da laje de concreto e o perfil metálico, assim ocorrendo a deformação dos conectores de cisalhamento e produzindo uma descontinuidade no diagrama de deformação da viga (LIMA, 2018).

Abaixo vemos uma figura que mostra a descontinuidade da deformação de uma seção mista com interação parcial.

Figura 8 – Diagrama de tensão deformação da seção mista.



Fonte: Lima (2018).

Sabe-se que existe diversos tipos de conectores e diversos estudos realizados acerca da utilização e otimização de vários conectores, mas a NBR 8800:2008, apresenta e dá parâmetros para desenvolvimentos de projetos de apenas dois conectores, que são eles o

conector de pino com cabeça (Stud Bolt) e o conector do Perfil tipo “U”, que são formado de chapas menos espeças.

Os estudos acerca dos conectores de cisalhamento estão sempre em desenvolvimento, e como podemos perceber, muitos objetivos já foram alcançados. Por exemplo, a NBR 8800:2008 só prevê a utilização de dois conectores de cisalhamento em estruturas mistas, que são eles stud bolt, e o perfil “u”.

Mas não significa que outros conectores não apresentem bons resultados, na verdade, as instituições de pesquisas hoje, estudam cada vez mais novos conectores, novos materiais, novos formatos, como podemos ver abaixo:

Maia et al (2017) desenvolveu trabalho acerca do atrito da interface aço-concreto e da flexibilidade dos conectores de cisalhamento, sendo o conector analisados um rebite com rosca com parafuso sextavado;

Já no trabalho de Silva (2009), ela aborda a flexibilidade e a ductibilidade dos conectores de cisalhamento, os conectores analisados foram, Stud Bolt, perfil U e rebite com rosca e parafuso sextavado;

Os autores Dutra et al (2014) desenvolveram trabalho com o objetivo de analisar o comportamento estrutural de conectores de cisalhamento do tipo Crestbond contínuo e descontínuo, e, na análise, ele realizou um comparativo com os conectores Stud Bolt, Perfil U e Perfobond contínuo.

Vianna (2009) defendeu tese de doutorado acerca da avaliação estrutural de vigas mistas de conectores do tipo Perfobond e T-Perfobond.

Silva (2013) que estudou o desempenho estrutural de conectores tipo Crestbond, que segundo o autor apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu desempenho estrutural e validação do modelo computacional. (explicar e apresentar resultados).

Já a autora Sousa (2019), estudou o desempenho de conectores de cisalhamento do tipo treliçados, no estudo dela ela utilizou vergalhões de CA-50 de 10 mm e 12,5mm respectivamente para as análises. Chegando à conclusão de que os conectores que foram formados com vergalhões de 10mm absorvem bem mais tensões, apresentando grande deformações, enquanto na utilização de vergalhão de maior diâmetro as tensões são mais bem distribuídas entre a viga e os conectores de cisalhamento.

Ou seja, quando vamos em busca de bibliografia acerca dos conectores, percebemos que ela é vasta, abordando diferentes tipos de conectores e diferentes formas de análises a cada trabalho específico.

3.2.1 Stud Bolt

O conector do tipo Stud Bolt foi desenvolvido na Inglaterra na década de 1940 pela Nelson Stud Welding (SILVA, 2016).

O conector de cisalhamento Stud Bolt, também conhecido como pino com cabeça, podemos dizer que é um dos mais utilizados, ou até mesmo o de maior utilização, pois além dele ser um conector normativo, no qual a NBR 8800:2008, norma parâmetro para o desenvolvimento de projetos de estrutura mistas, esse conector pode ser facilmente encontrado no mercado.

Abaixo na figura 9 vemos uma viga com conectores do tipo Stud Bolt.

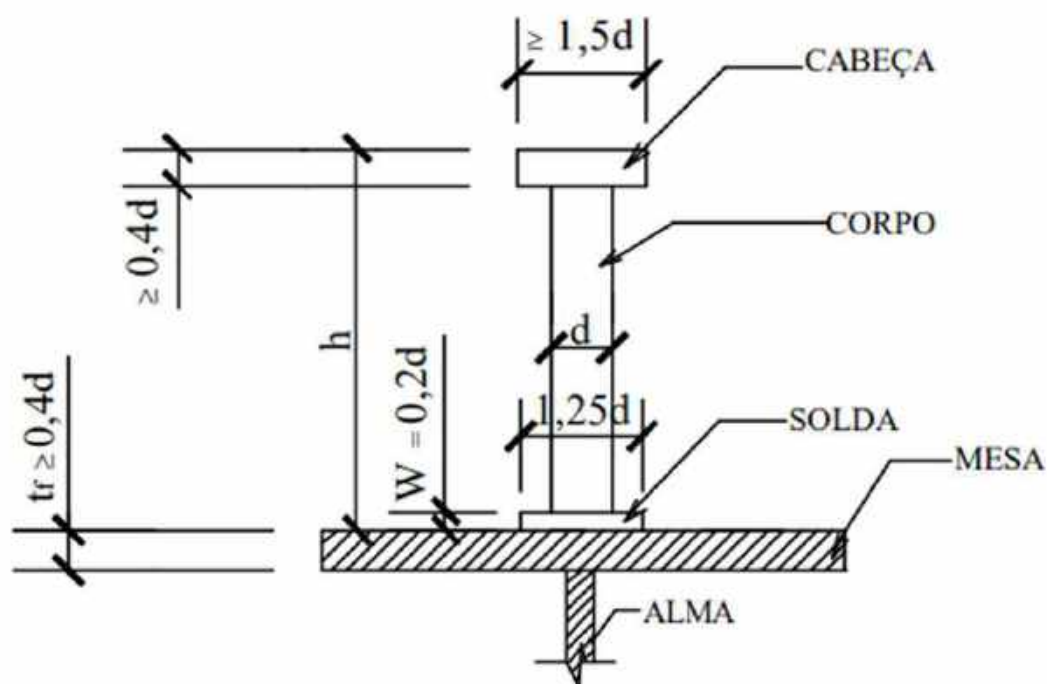
Figura 9 – Viga mista com Stud Bolt (VM-1).



Fonte: Engeduca (2020).

De acordo com EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK (1993), os conectores do tipo Stud Bolt, devem seguir uma padronização nas suas dimensões, como podemos ver na figura abaixo.

Figura 10 – Relação de tamanho e dimensionamento Stud Bolt.



Fonte: TRISTÃO (2002).

Por fim, Tristão (2002) afirma que, devido a velocidade na execução e a equivalência na resistência do Stud Bolt em relação a todas as direções normais ao eixo do conector, o Stud Bolt, pino com cabeça se torna o conector flexível mais utilizado na maioria dos países.

3.2.2 Perfobond

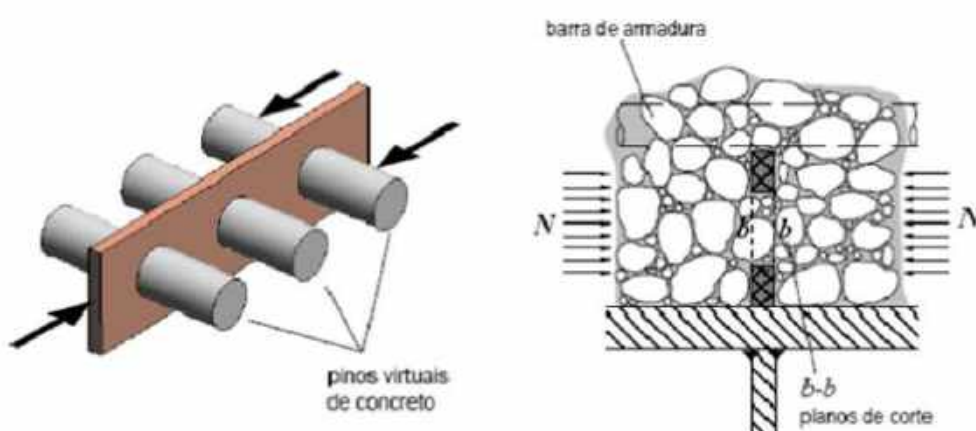
Não existe, na norma brasileira, parâmetros para utilização do conector Perfobond, mas, após pesquisas bibliográficas, e autores supracitados anteriormente, esse conector de cisalhamento já tem utilização em projetos reais, e como defendido por Vianna (2009), o Perfobond apresenta ótimos resultados quando se fala de desempenho estrutural.

Segundo Verissimo (2007), o Perfobond foi originalmente desenvolvido para aplicação em pontes, pois os estudos sobre ele demonstraram que esse conector tinha uma rigidez altíssima, o que favorecia nos projetos estruturais de pontes. Mas, logo depois foram direcionados diversos estudos para aplicação desse conector de cisalhamento em estrutura de edifícios.

De acordo com Fortes (2018), o conector Perfobond, foi desenvolvido pela empresa de engenharia alemã Leonhardt, Andrä and Partners para aumentar a resistência a fadiga em uma ponte mista de concreto e aço na Venezuela.

Vianna (2009) afirma que o conector Perfobond apresenta bom resultado estrutural devido a formação de pinos virtuais de concreto nos furos do Perfobond, e ainda afirma que o desempenho pode ser ainda melhorado se for inserido armadura passando pelos furos. Veja na figura abaixo a configuração dos pinos virtuais de concreto.

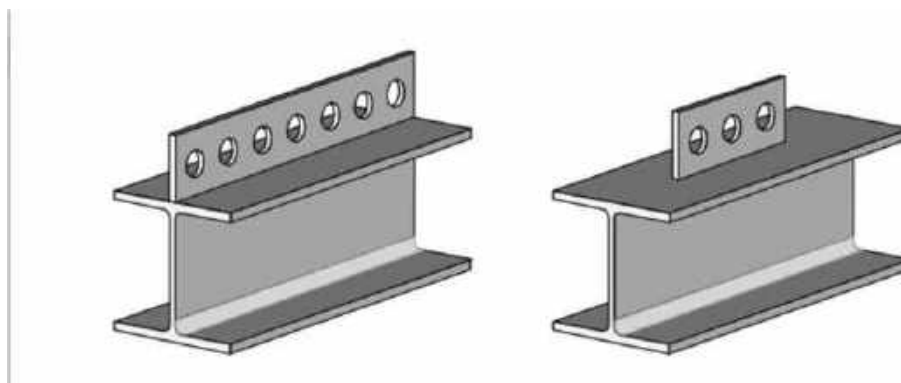
Figura 11 – Pinos virtuais formados pelo concreto passante nos furos do conector Perfobond.



Fonte: Verissimo (2007).

Outro ponto interessante, é que os conectores Perfobond tem duas formações, conectores contínuos e descontínuos, vejamos na figura abaixo:

Figura 12 – Conector Perfobond contínuo e descontínuo.



Fonte: Verissimo (2007).

Abaixo temos uma figura como exemplo de aplicação prática do conector de cisalhamento Perfobond descontinuo:

Figura 13 – Viga mista com Perfobond (VM-2).



Fonte: Adaptado Souza (2014).

Fortes (2018), também afirma que a resistência da conexão e a redução da ductibilidade do conector Perfobond está diretamente proporcional a espessura do conector utilizado.

3.2.3 Perfil “U”

Pode-se afirmar que conforme Tristão e Neto (2005), o conector de cisalhamento do tipo Perfil U, é um conector flexível. Quando se fala de flexibilidade, entende-se que está diretamente ligado ao comportamento dúctil do material, pois como já afirmado que o conector Perfil U é flexível, significa dizer que ele tem uma ductibilidade alta, ou seja, à medida que o carregamento vai aumentando a deformação do conector também.

Vale salientar que a NBR 8800:2008, traz consigo parâmetros, recomendações e restrições para o desenvolvimento de projetos de estruturas mistas de aço e concreto com o conector de cisalhamento tipo Perfil U.

Na figura abaixo pode-se ver uma viga mista com conector do tipo Perfil U, e como é sua disposição na peça:

Figura 14 – Viga mista com Perfil “U” (VM-3).



Fonte: Adaptado Souza (2014).

Os conectores do tipo Perfil U, também podem ter duas formações na sua confecção, sendo eles os laminados e os formados a frio.

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O MEF – Método dos Elementos Finitos, comumente conhecido pela comunidade acadêmica, tem sido disseminado em várias áreas de estudos, é sabido que não só nas engenharias, mas em áreas como a de medicina essa metodologia já é utilizada para avaliar e simular a utilização de novas tecnologias.

Pode-se dizer que de forma simples, o MEF é um modelo 3D, que é submetido a esforços e restrições conforme as condições do modelo, e após isso é subdividido em pequenas partes chamadas de elementos, desta forma, entende-se que com esses pequenos elementos permite-se resolver problemas complexos, dividindo assim os problemas maiores em menores e mais simples (MICRORIO, 2020).

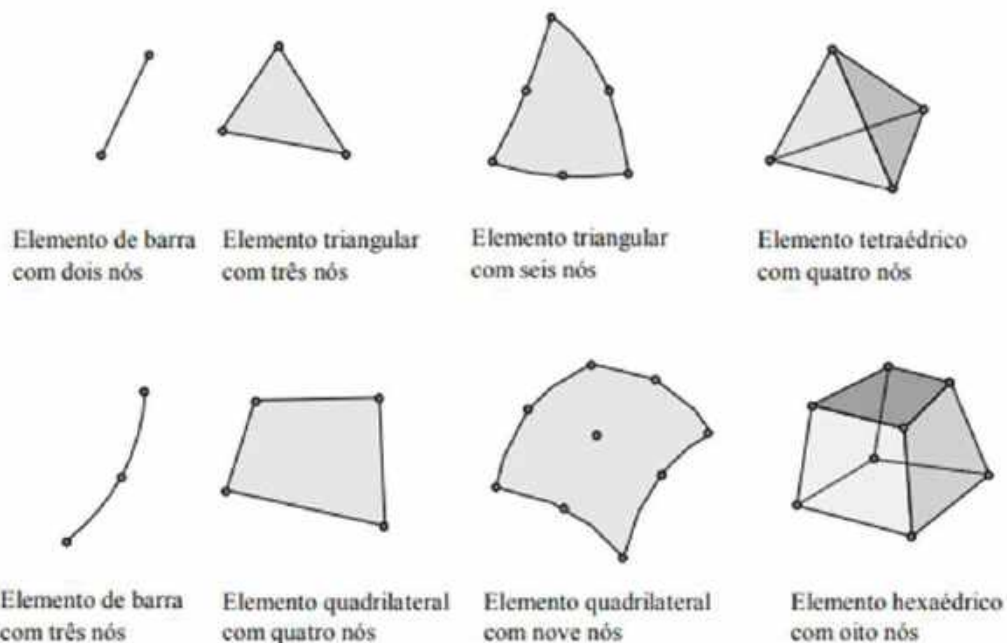
Portanto, devido a tipologia da pesquisa em tela, bem como a necessidade de uma análise criteriosa de estruturas quando se trata de estruturas compostas de vigas mistas, abordaremos sobre o método de elementos finitos (MEF), que no âmbito da Engenharia Estrutural, o MEF tem como objetivo a determinação dos estados de tensão e deformação de um elemento sólido de geometria arbitrária sujeita a ações exteriores (AZEVEDO, 2003).

Ainda segundo Azevedo (2003), a publicação mais antiga acerca do “elemento finito” como frisa o autor, foi na década de 60. Mas, o desenvolvimento do MEF como

conhecemos hoje só foi inicialmente apresentado no início da década de 70, porém, ainda com pouca aplicabilidade em análises estruturais, sendo que apenas no fim do século XX, na década de 90 o Método dos Elementos Finitos chegou aos projetistas de estruturas.

Depois de anos de estudos e pesquisas, foram desenvolvidos diversos tipos de elementos finitos, no qual apresentam formas geométricas diferentes, sendo cada forma aplicada individualmente ou em conjunto durante a definição de uma malha de um modelo numérico. Abaixo vemos uma figura com alguns modelos geométricos de elementos finitos:

Figura 15 – Diferentes tipos de elementos finitos.



Fonte: SOUZA, 2003.

Souza (2003) afirma que um dos aspectos mais importante do MEF está na convergência dos elementos de uma malha, explicando que, por mais que o MEF trata-se de um método aproximado, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, a consequência é que o número de nós tendam ao infinito e, a solução obtida, irá convergir para a solução exata do problema.

Vale lembrar que, quando se trata de Método dos Elementos Finitos aplicado a análises estruturais, existem classificações de análises, sendo elas divididas entre análises estáticas e dinâmicas, e análises não lineares e lineares.

3.4 ANÁLISE NUMÉRICA/MODELAGEM COMPUTACIONAL

A análise numérica vem com o principal objetivo de analisar e resolver problemas estruturais, de forma que, quando o modelo é inserido no software de análise juntamente com os parâmetros necessários para desenvolvimento do modelo, o software se encarrega de simular as solicitações aplicada a estrutura.

Franssen (2005), salienta a importância da modelagem computacional, enfatizando principalmente em possibilitar a análise de estruturas complexas que por muitas vezes não tem como ser ensaiadas experimentalmente, bem como a possibilidade de realizar estudos paramétricos sobre estruturas.

Azevedo (2003) apresenta diretrizes para as análises de estrutura e como deve ser o passo inicial, afirmando que:

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material e ações constituintes e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema.

Medeiros et al (2014), definem um modelo computacional como uma técnica ou ferramenta, que dentro de uma pesquisa ocorre por meio da concepção de modelos baseados em sistemas reais, e que tem por objetivo analisar os resultados em diferentes situações e cenários.

Por fim, Sousa et al (2019), apresenta uma abordagem conceitual acerca das análises numéricas e modelagens computacionais, desde sua aplicabilidade no mercado e como pode ajudar no desenvolvimento de projetos e análises de problemas de engenharia, bem como na universidade, e como o ensino dessas metodologias ainda na graduação pode contribuir para a formação de um profissional diferenciado na engenharia.

4 METODOLOGIA

4.1 SOFTWARE ABAQUS

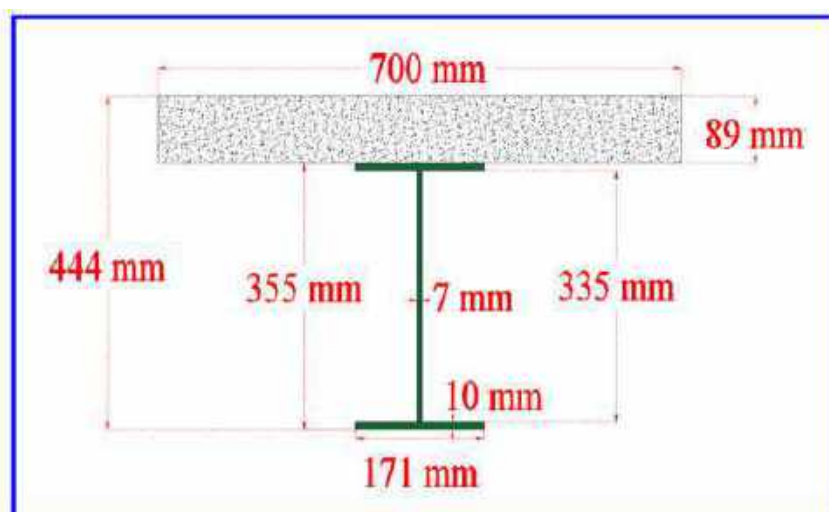
A modelagem computacional da viga mista foi realizada na interface do software Abaqus®, o modelo foi composto por três elementos, a viga de aço, os conectores de cisalhamento e a laje de concreto.

A Metodologia utilizada nas análises foi o Método dos Elementos Finitos - MEF. O Software Abaqus® é um software de análise, inteligência e simulação de modelos 3D diversos, ele utiliza o MEF como meio para processamento e análise de seus modelos.

4.2 DIMENSÕES DAS VIGAS

Com base na bibliografia existente e o conhecimento adquirido acerca de vigas-mistas, foi determinado qual as dimensões das vigas-mistas que serão analisada, na figura abaixo pode-se ver um corte transversal das dimensões adotadas, e essas dimensões foram as mesmas nos três modelos, e todos os modelos têm comprimento de 3,00 m.

Figura 16 – Dimensões da viga mista, conforme corte transversal



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

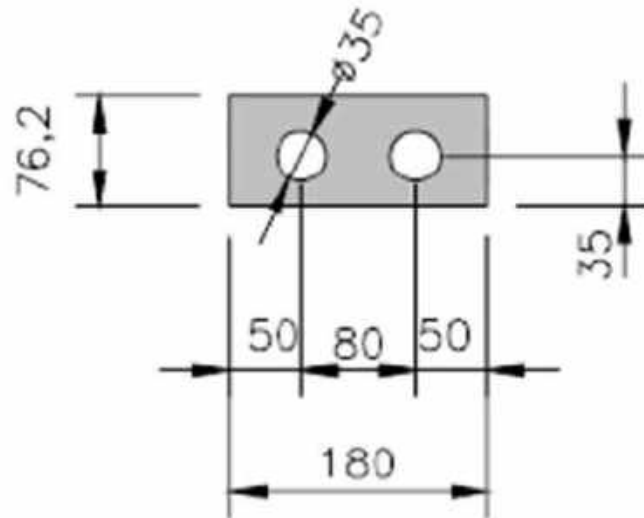
O conector de cisalhamento utilizado tem dimensões de 13 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, conforme o utilizado por Ayyub (1990), ainda de acordo com Ayyub (1990), o concreto que será utilizado no modelo é o com FCK de 30Mpa.

Para definição dos demais conectores, foi pesquisado bibliografias acerca da utilização do perfobond e perfil “U”, e a partir dessas bibliografias foi definido as dimensões que os demais conectores iriam possuir.

De acordo com Fortes (2018), as dimensões dos conectores tem que ser estabelecidas em função da laje adotado no projeto ou modelo, então ele apresenta em seu trabalho três modelos de conectores do tipo perfobond com variações diversas de tamanho e

furos, então de acordo com o visto, as dimensões que mais se associam a este modelo proposto é o conector da figura abaixo, com suas respectivas dimensões.

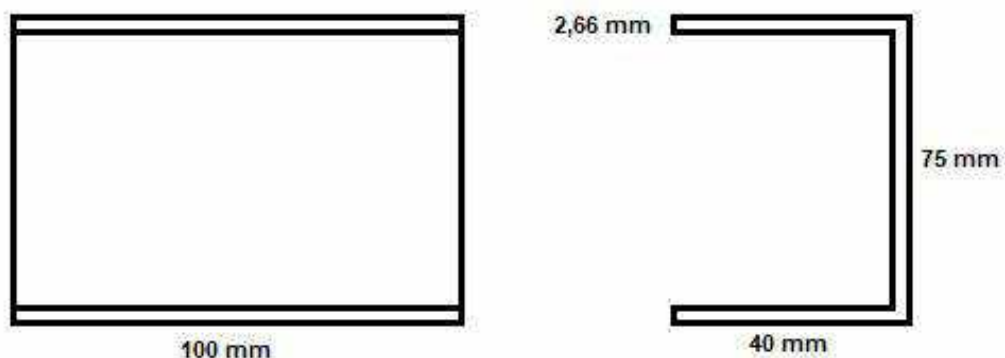
Figura 17 – Dimensões do conector de cisalhamento do tipo perfobond



Fonte: Adaptado Fortes (2018).

O outro conector utilizado nesse trabalho, foi o conector do tipo Perfil “U”, conector normativo, assim como o stud bolt, e, devido a isto, a quantidade de trabalhos acadêmicos e profissionais, bem como tabelas que trazem dimensões para esse conector é bem maior, então, com base neste material e analisando qual a melhor solução para adotar a estas análises, as dimensões do conector de cisalhamento do tipo Perfil “U” adotado é um perfil U simples de 3” e parede de 2.65 mm. Que também foi utilizado por Tristão (2002), conforme podemos ver na figura abaixo.

Figura 18 – Dimensões do conector de cisalhamento do tipo Perfil “U”



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Portanto, para fins de referências do estudo em questão, esses foram os parâmetros adotados para construção dos modelos analisados.

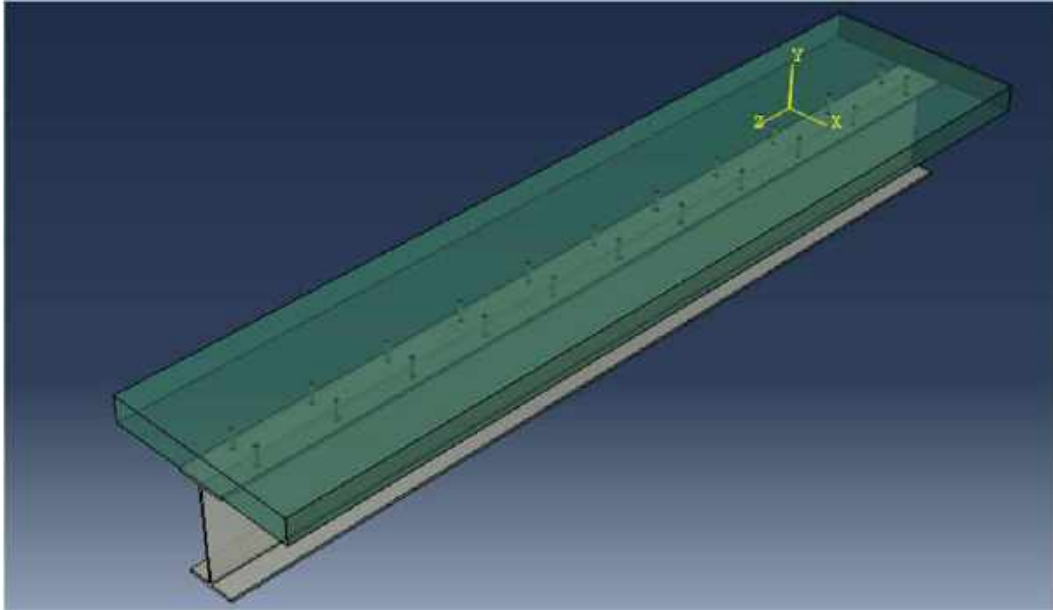
4.3 MODELOS

Foi modelado três vigas mista de aço e concreto. Variando apenas os conectores de cisalhamento que serão utilizados em cada uma. Os conectores utilizados foram: (Stud Bolt (pino com cabeça), Perfobond e Perfil “U”). As vigas com seus respectivamente conectores forma nomeadas como: Viga Mista com Stud Bolt (VM-1); Viga Mista com Perfobond (VM-2); Viga Mista com Perfil “U” (VM-3).

A VM-1 viga mista com conectores de cisalhamento do tipo stud bolt, foi modelada com duas fileiras de 11 (onze) conectores cada, totalizando 22 (vinte e dois) conectores de cisalhamento, espaçado longitudinalmente a cada 270 mm, de eixo a eixo.

Abaixo temos imagem do modelo com stud bolt.

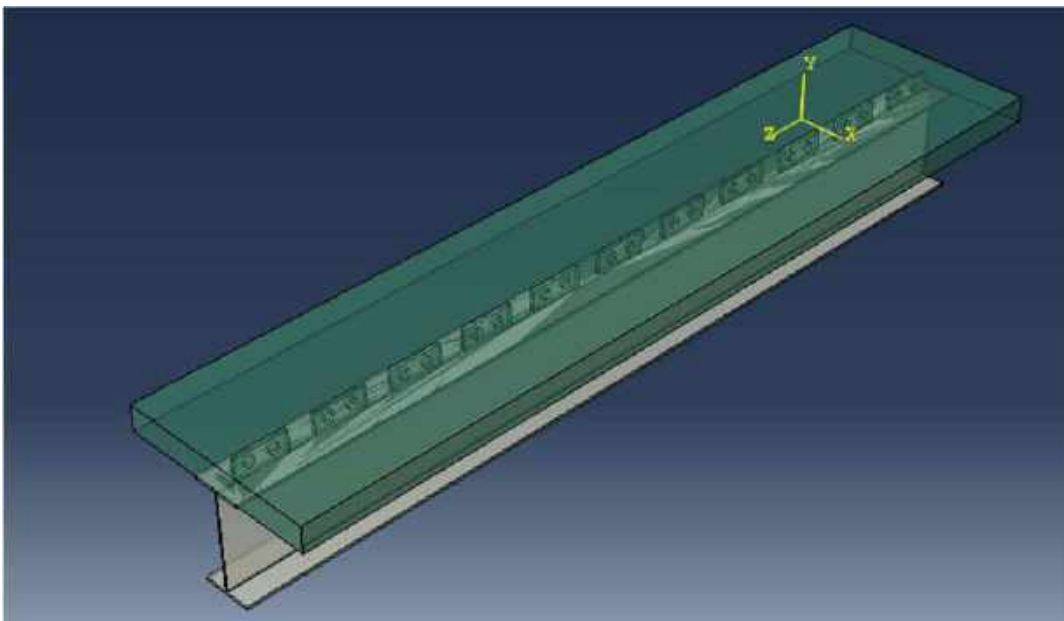
Figura 19 – Viga mista com Stud Bolt



Fonte: Elabora pelo Autor (2020).

O segundo modelo é o nomeado VM-2, que é o modelo com conectores de cisalhamento do tipo perfobond, assim como no modelo anterior foi adicionado 11 conectores do tipo perfobond espaçados entre eixos a cada 270 mm, abaixo temos imagem da viga mista com perfobonds.

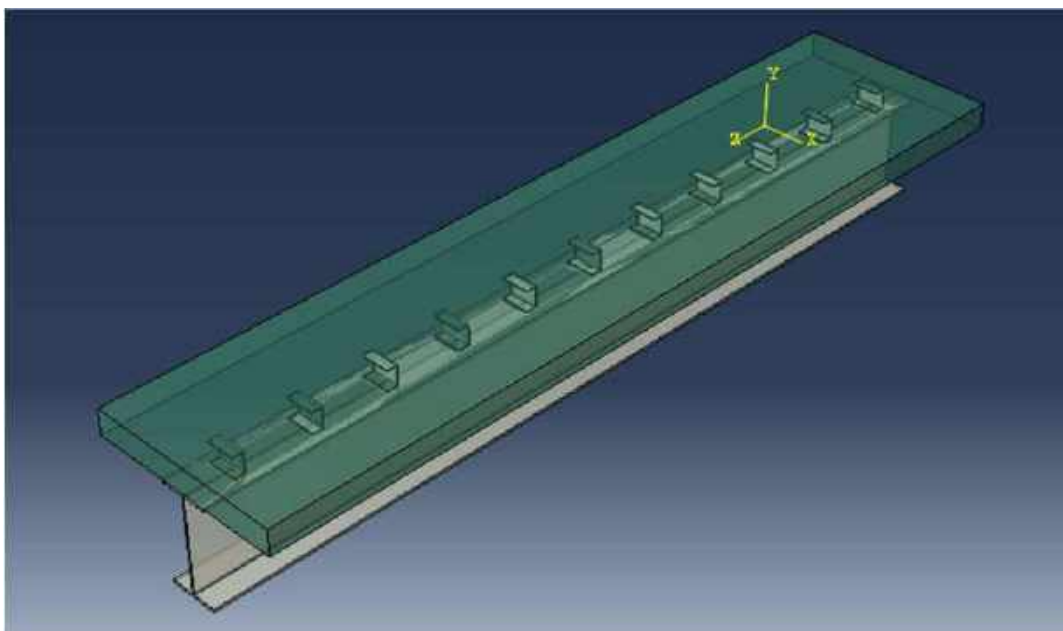
Figura 20 – Viga mista com Perfobond



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O último modelo, nomeado VM-3, com conectores do tipo perfil U, assim como os demais tem 11 conectores de cisalhamentos, espaçados longitudinalmente a cada 270 mm entre eixos, abaixo segue imagem do modelo VM-3.

Figura 21 – Viga mista com Perfil U



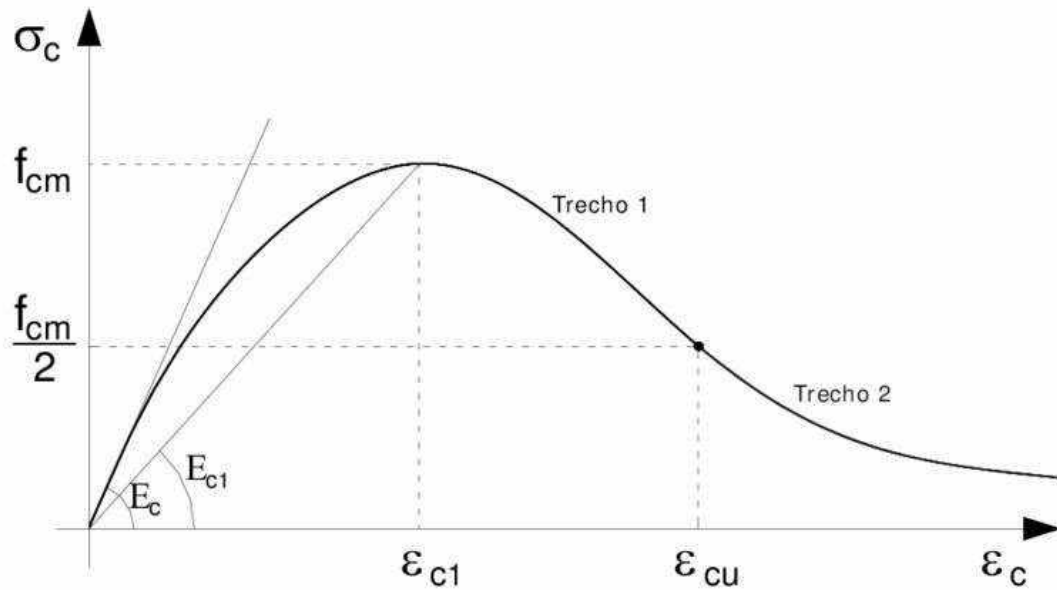
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Após a definição dos modelos, foi definida as características mecânicas que serão adotadas nos modelos, porque vale mencionar que a rigidez fornecida pelos conectores de cada viga mista, por mais que sejam diferente os conectores, existe equivalência em relação a rigidez deles.

Para definição da não-linearidade física dos materiais, foi utilizada diversas curvas tensão deformação, tomando como base para representação do concreto à compressão e a tração, a curva da norma europeia CEB-FIP. Já para definição da curva do aço, foi considerado um comportamento elastoplástico perfeito.

Abaixo temos a imagem da curva CEB-FIP para concreto à compressão.

Figura 22 – Curva CEB-FIP



Fonte: CEB-FIP.

Abaixo temos o quadro com as informações referente ao modelo de elasticidade e coeficiente de Poisson que foram adotados para o concreto e o aço.

Quadro 01 – Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

Aço	E (Gpa)	200
	v	0,33
Concreto	E (Gpa)	30
	v	0,33

Fonte: Autor (2020).

Para definição da não linearidade do concreto no software Abaqus® é configurado a característica *Concrete Damaged Plasticity* – CDP, nesta etapa são adicionados os dados acerca da plasticidade, os pontos de não linearidades do comportamento do concreto à compressão e as características de tração do material.

Após o cálculo para definição dos pontos de não linearidade do concreto, encontramos os pontos de tensão x deformação, conforme o quadro abaixo.

Quadro 02 – Pontos de não linearidade do concreto

	TENSÃO (Mpa)	DEFORMAÇÃO
1	11,25	0,000
2	17,27	0,000074
3	22,60	0,00015
4	27,10	0,00026
5	30,50	0,00042
6	32,56	0,00063
7	29,54	0,00146
8	27,82	0,00161
9	2,30	0,00203

Fonte: Autor (2020).

Considerando que foi considerado para o aço um comportamento elastoplástico perfeito, abaixo vemos o quadro com os dados referente a esta definição.

Quadro 03 – Não Linearidade do Aço

	TENSÃO (Mpa)	DEFORMAÇÃO
1	250,00	0,00
2	251,00	0,01

Fonte: Autor (2020).

4.4 INTERAÇÕES

Considerando a tipologia dos modelos de estrutura mista, que utiliza diferentes tipos de materiais, é importante sempre garantir qual será as interações entre os materiais, e como eles vão se comportar ao trabalharem como um único elemento que está recebendo esforços.

Com base nisso, determinamos as interações entre os materiais no software que está sendo construído o modelo computacional.

No software *Abaqus*© as propriedades de interações foram definidas na aba *Interaction Manager*, e a interação utilizada é a do tipo *Surface-to-surface* com propriedade *Contact*. Na definição do contato, tem que definir o Coeficiente de Atrito, que neste estudo foi definido o valor de 0,3.

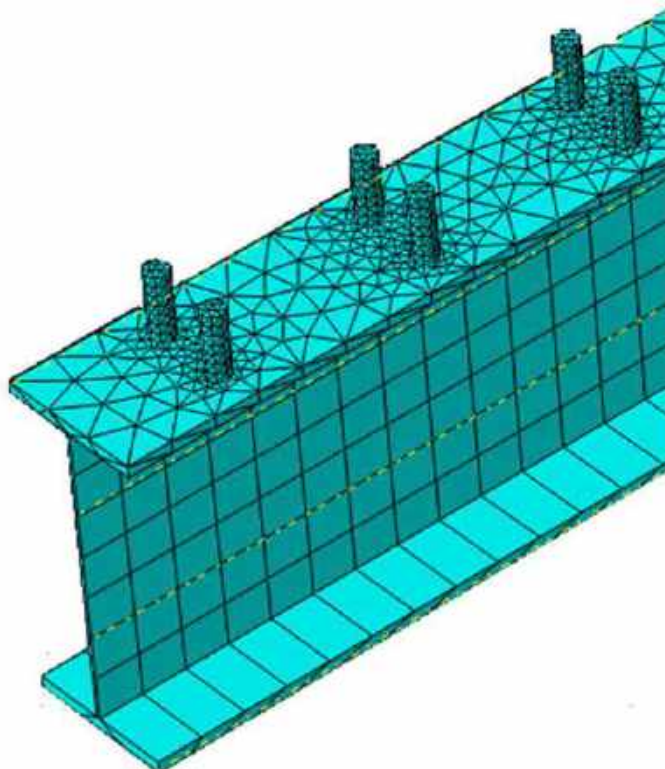
Essa definição de interação foi a mesma adotada para todos os modelos, assim, parametrizando as condições dos três modelos computacionais em análise.

4.5 MALHA

A malha de um modelo computacional que será analisado pelo MEF – Método dos Elementos Finitos é peça fundamental, pois é na malha que os elementos finitos são literalmente definidos, pois cada elemento é um elemento finito, e a situação como eles estão dispostos, o tamanho, a quantidade de nós, a convergência dos nós de um elemento com outros elementos, são fatores que determinaram a qualidade da análise, bem como possibilitou uma análise concreta, confiável, e com bons resultados.

Abaixo, segue imagem de um exemplo de um modelo no qual a malha foi definida com dois diferentes tipos de elementos finitos.

Figura 23 – Malha de elementos finitos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Com base na imagem anterior, já se observa a possibilidade de utilização mista de diferentes tipos de elementos em uma única malha de um modelo, por exemplo, na figura

anterior foi utilizado dois tipos de elementos, o elemento tetraedro, no qual o software Abaqus® nomeia de elemento C3D10, e elemento do tipo hexagonal, que tem a nomenclatura de C3D8R.

Basicamente esses dois serão os dois tipos de elementos que serão utilizados para definição da malha de elementos finitos de todos os modelos computacional em análise. Vale lembrar, que estes dois elementos no qual foram exemplificados e que foram utilizados nos modelos em desenvolvimento, são elementos de malha 3D, e que além desses elementos 3D, existem outros diversos outros tipos de elementos, como já abordado anteriormente.

4.5.1 Malha da Viga Mista com Stud Bolt (VM-1)

Na viga mista modelada com os conectores do tipo Stud Bolt, foi utilizado dois tipos de elementos, o hexagonal (C3D8R) e o Tetraédrico (C3D10), sendo suas aplicações da seguinte forma: 1) na laje, utilizando apenas o elemento do tipo C3D10, que é o elemento tetraédrico, sua utilização se dá devido as perfurações na laje, onde é o espaço ocupado pelo conectores em formato circulares, e devido ao formato circular, o melhor elemento para construção da malha é o tetraédrico; 2) no perfil metálico com os conectores foi utilizado os dois tipos de elementos, tanto o C3D8R que é o hexagonal, quanto o C3D10 que é o elemento tetraédrico, para ser possível a utilização destes dois elementos, foi necessário realizar a repartição virtual da peça, no qual ficou dividida entre, plataforma inferior, alma e plataforma superior com studs bolts, então, a plataforma inferior e na alma foi adotado o elemento do tipo hexagonal C3D8R, e na plataforma superior com stud, o elemento do tipo C3D10, elemento tetraédrico, assim formando a malha do perfil metálico com os conectores de cisalhamento.

4.5.2 Malha da Viga Mista com Perfonbond (VM-2)

No modelo com Perfobond, a configuração da malha de elementos será idêntica ao do Stud Bolt, pois assim como o Stud Bolt, o Perfobond tem duas perfurações circulares em sua peça. Portanto, devido a estas perfurações circulares, os elementos que compõe a região onde está localizada as perfurações, o elemento de malha tem que ser do tipo C3D10, ou seja, elemento tetraedro. E o restante na mesma configuração da malha do Stud Bolt.

4.5.3 Malha da Viga Mista com Perfil “U” (VM-3)

Assim como nos demais modelos, a viga mista com perfil “U”, seguiu a mesma configuração das demais, pois assim além de seguir uma padronização, como também, o modelo com essas configurações tem um bom resultado quanto desrespeito aos elementos gerados na viga. Então, laje com elementos do tipo C3D10, bem como a mesa superior e conectores, e a mesa inferior da viga e a alma, com elementos do tipo C3D8R, que são elementos do tipo hexagonal.

5 RESULTADOS

Após o processamento dos modelos, foi iniciado a análise dos resultados e o comparativo dos dados obtidos, para a partir daí podermos apresentar o melhor desempenho e justificar o mesmo, conforme os resultados obtidos, abaixo teremos os resultados individuais de cada viga mista e como foi seu desempenho estrutural, e logo após, a combinação dos resultados entre as vigas.

5.1 VIGAS

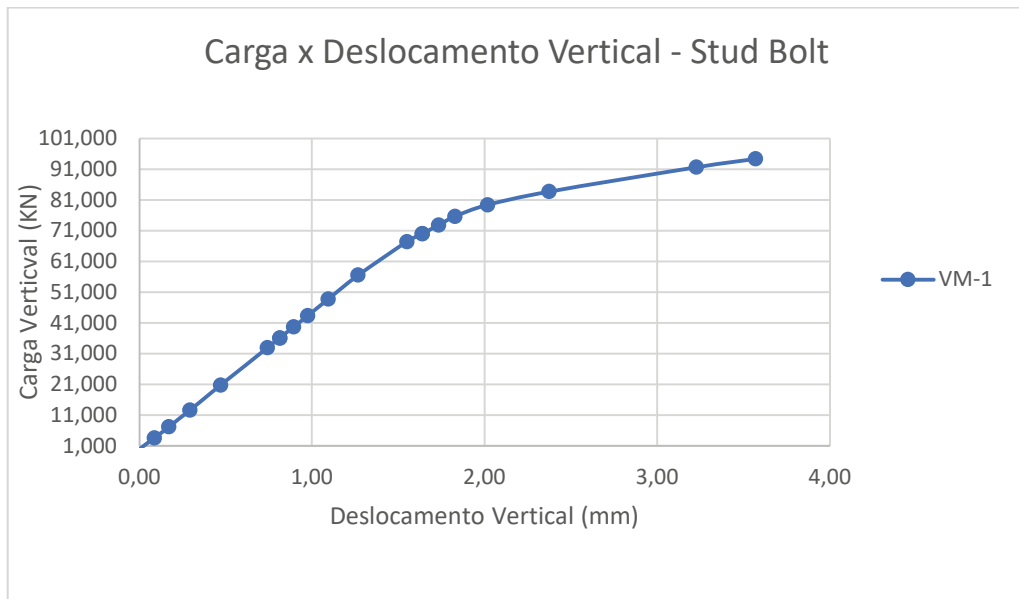
Os três modelos computacionais foram processados, seguindo à risca todas as configurações de dimensões, características dos materiais, interações, e demais propriedade que foram necessários, a padronização das configurações, inclusive da malha dá confiabilidade aos resultados gerados, e, assim, a apresentação dos dados comparativos bem como as análises de dados consistentes e confiáveis.

5.1.1 VM-1

O modelo computacional da viga mista com conectores de cisalhamento do tipo Stud Bolt, foi a primeira a ser processada, e após o processamento, apresentou resultados de deslocamentos verticais conforme o quadro abaixo.

Com base nas informações acima, foi elabora o gráfico tensão x deslocamento vertical máximo do perfil com os studs, no qual observou um deslocamento máximo de 3,57 mm.

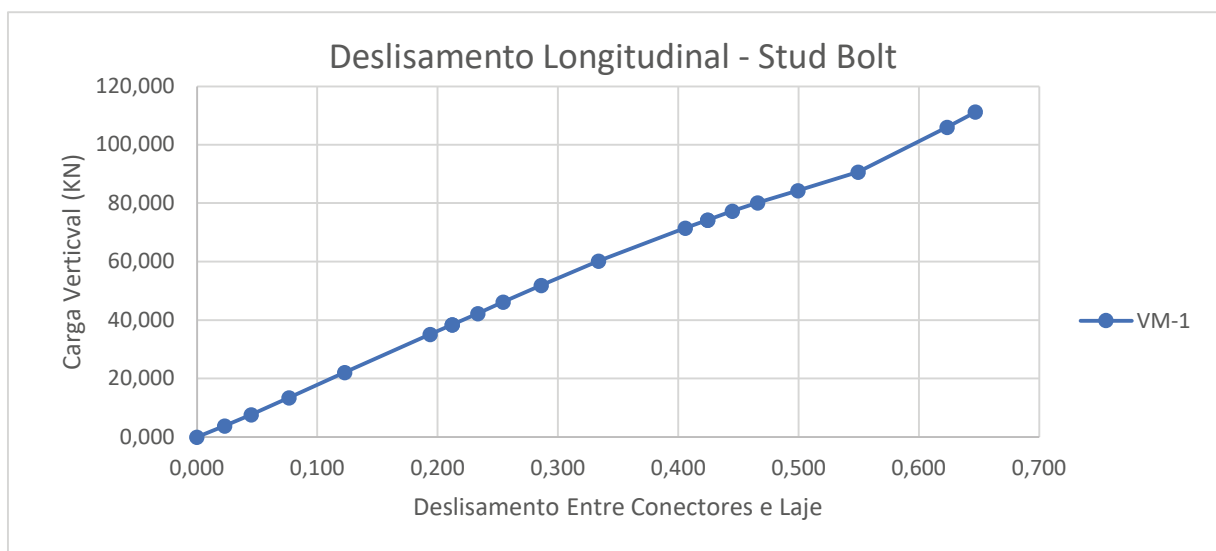
Gráfico 01 – Carga x Deslocamento – VM-1



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Outro fato de grande relevância quando falamos de vigas mistas, é o deslizamento relativo dos conectores de cisalhamento em relação a laje de concreto, no gráfico abaixo podemos ver a evolução do deslizamento de acordo com a carga aplicada no modelo.

Gráfico 02 – Deslizamento Longitudinal VM-1

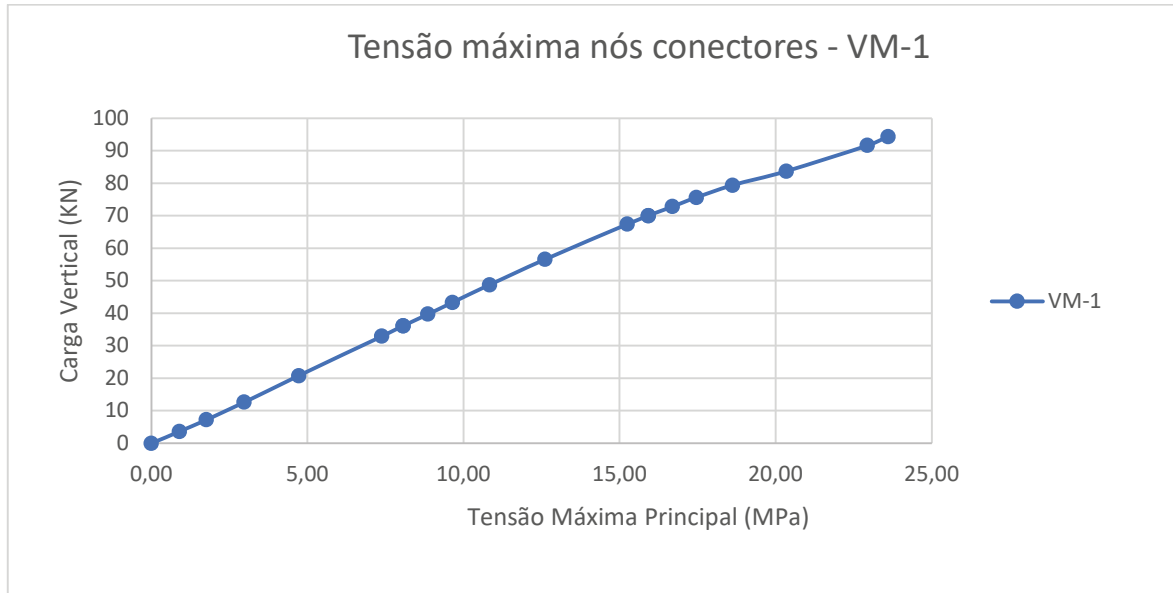


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Devido ao deslizamento, e a conseqüente movimentação dos conectores no intuito de resistir a carga que está sendo aplicada, a concentração de tensão nos conectores vão ter

características relevante, no gráfico abaixo vemos a evolução da concentração de tensão nos conectores do modelo VM-1.

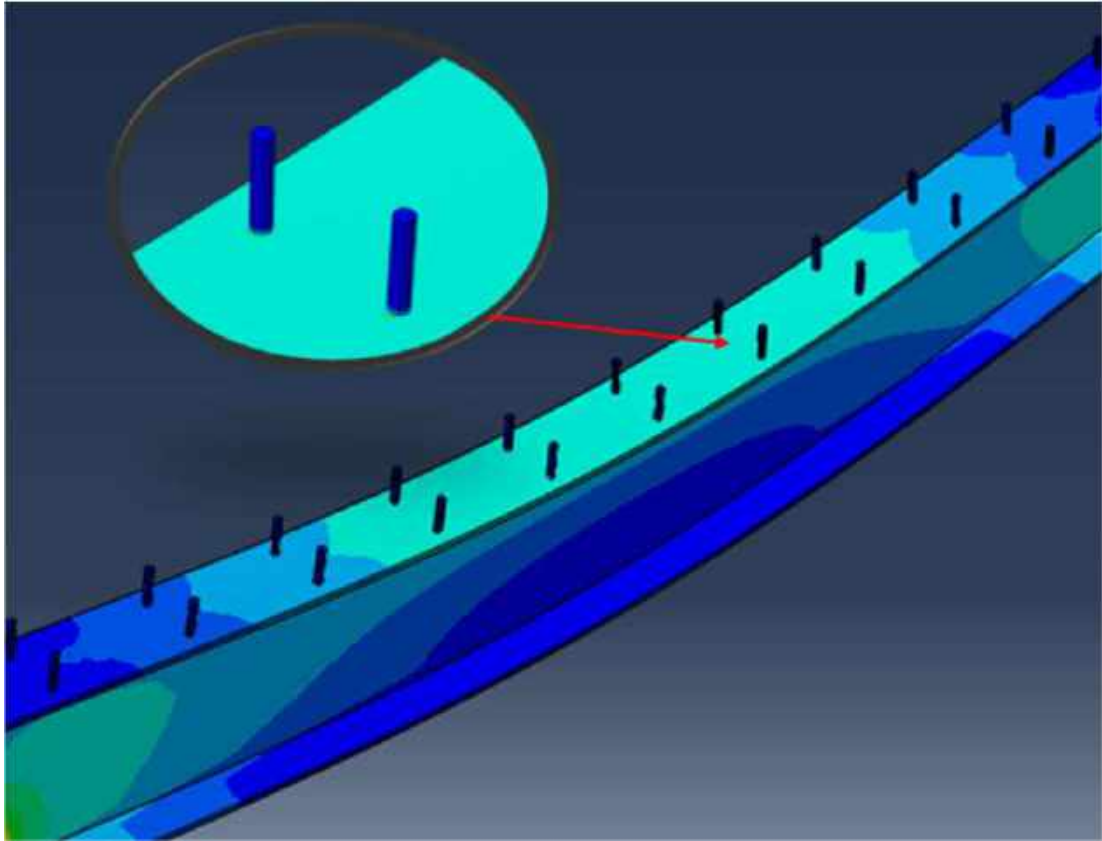
Gráfico 03 – Tensão máxima nos conectores VM-1



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Para melhor visualização de como essa concentração de tensão é representada no modelo numérico, abaixo temos imagem com a viga e trecho de maior concentração de tensão.

Imagem 24 – Concentração de tensões no conector Stud Bolt

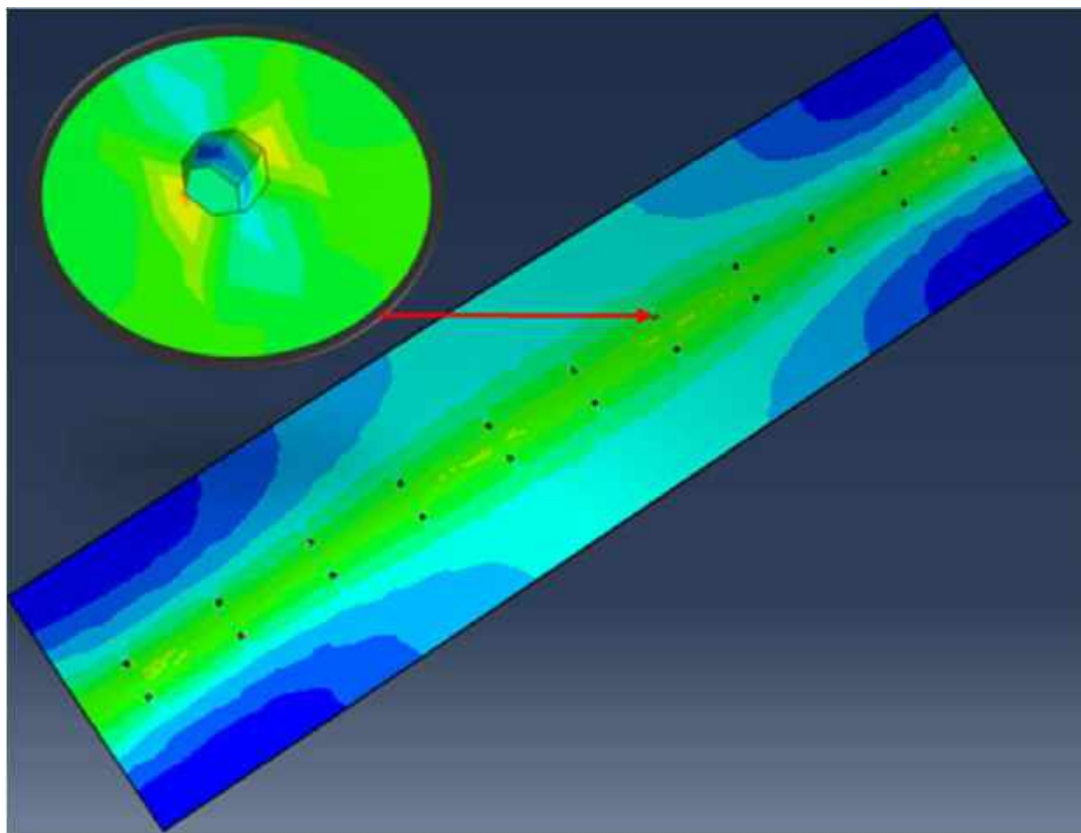


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Ao observar esta imagem, verifica-se que ao longo do conector existe uma conformidade de concentração de tensão, com exceção no local do engaste com o perfil metálico, onde vê-se um tom de cor diferente, ou seja naquele local há um ponto de concentração máximo.

A imagem abaixo demonstra as tensões da laje no encontro com o conector de cisalhamento do tipo stud bolt. Observa-se que dentro do local onde estaria conectado o stud bolt, tem a presença de várias escalas de cores que demonstra a variação de tensão em cada ponto de conexão.

Imagem 25 – Concentração de tensão no ponto da laje e contato com o conector Stud Bolt



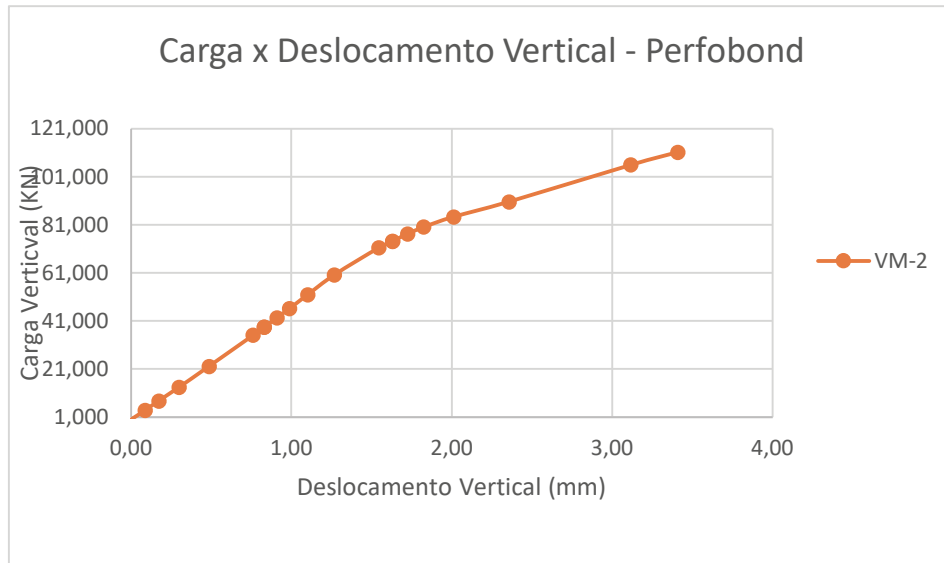
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

5.1.2 VM-2

O modelo VM-2, é o modelo numérico com conectores do tipo perfobond, após processamento do modelo foi gerado o quadro abaixo com as informações referente aos deslocamentos verticais máximos em relação à carga máxima aplicada.

Logo após, foi gerado o gráfico tensão x deslocamento máximo vertical do modelo VM-2, que é o modelo com os conectores do tipo perfobond, no qual foi possível observar que o deslocamento máximo foi de 3,41 mm.

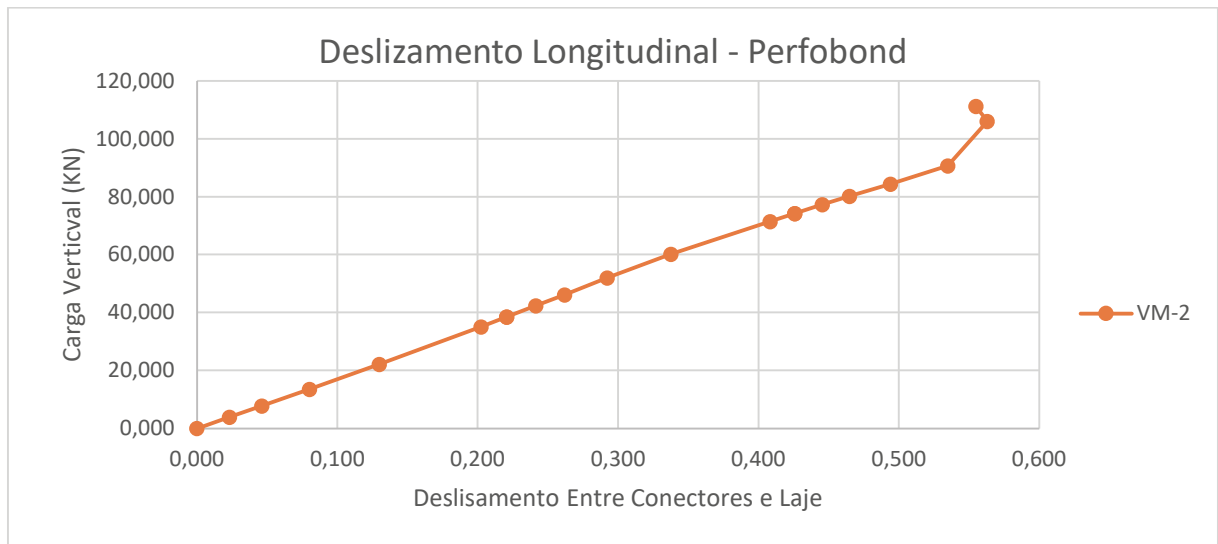
Gráfico 04 – Carga x Deslocamento - VM-2



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O deslizamento longitudinal máximo apresentado neste modelo foi o menor, abaixo pode-se verificar o gráfico individual da evolução do deslizamento de acordo com a carga aplicada no modelo, o deslizamento máximo foi de 0,55 mm.

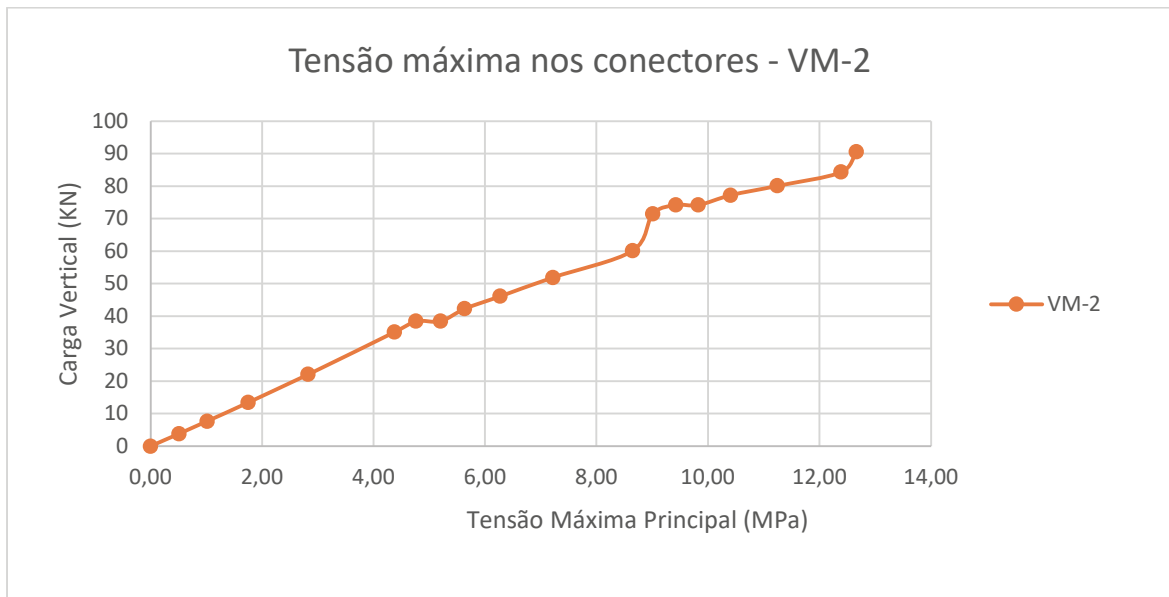
Gráfico 05 – Deslizamento Longitudinal - VM-2



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Logo, vemos o gráfico que apresenta as concentrações de tensões máximas nos conectores do tipo Perfobond.

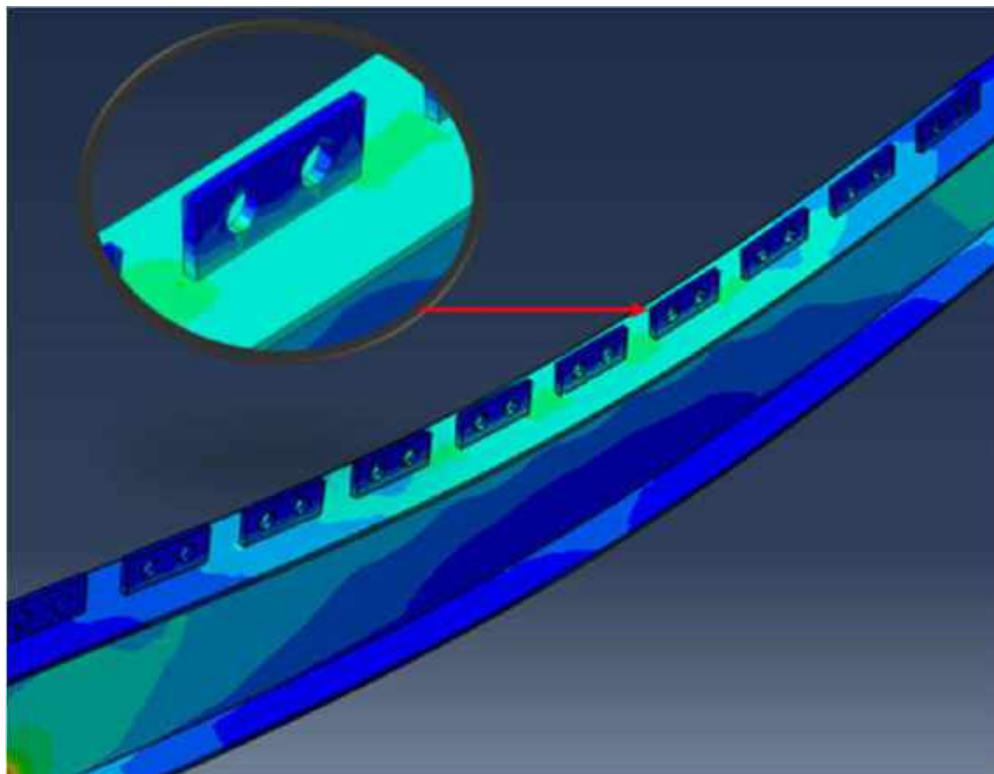
Gráfico 06 – Tensão máxima nos Conectores - VM-2



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Para melhor visualização, abaixo segue imagem em escalas de cores, que apresentam os pontos de concentração de tensões, para esse modelo o valor máximo de tensão nos conectores foi de 12,66 Mpa.

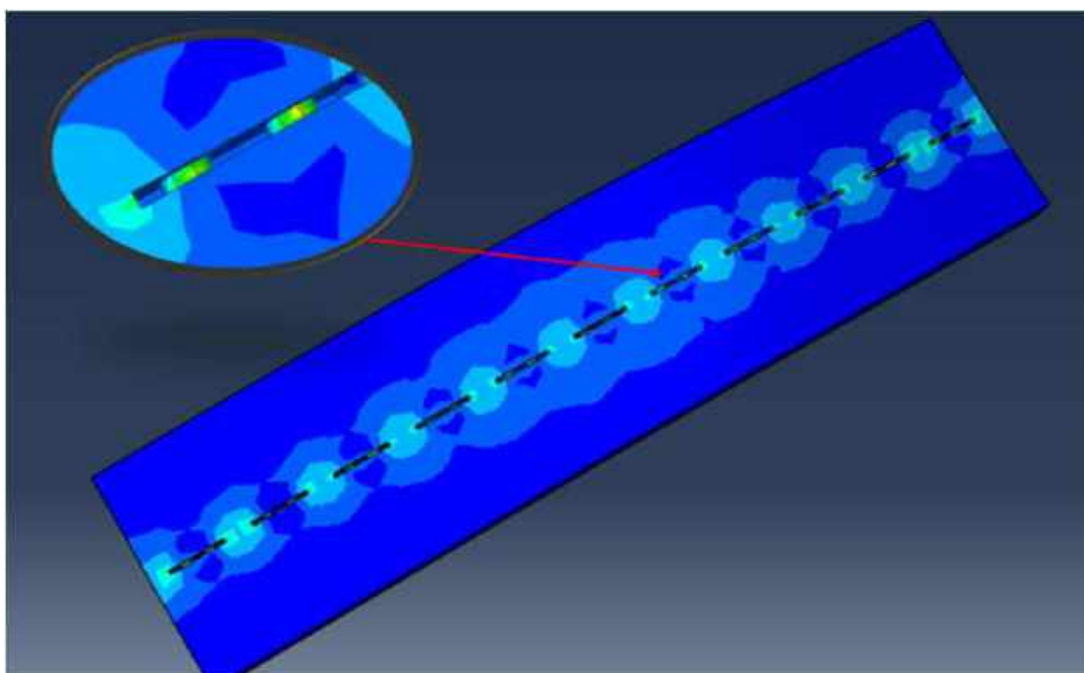
Imagem 26 – Concentração de tensões no conector Perfobond



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na figura abaixo será demonstrado como é a concentração de tensão dentro da laje nos locais onde o conector do tipo perfobond fica em contato. Observa-se que os locais onde apresenta maior concentração de tensão é na parte onde o concreto passa dentro do orifício existente no conector perfobond.

Imagem 27 – Concentração de tensão no ponto da laje em contato com o conector Perfobond



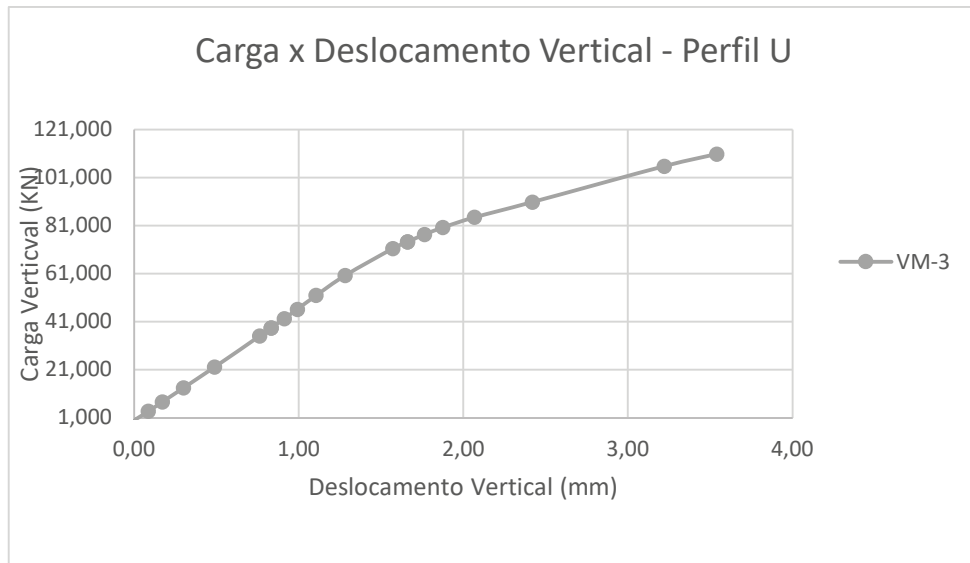
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

5.1.3 VM-3

O modelo VM-3, terceiro e último modelo processado, é o modelo da viga mista com conectores de cisalhamento do tipo Perfil U, após processamento do modelo foi obtido os dados dos deslocamentos verticais abaixo.

Com base nos dados acima, foi construído o gráfico abaixo, que apresenta a curva tensão x deslocamento vertical máximo deste modelo, podemos já observar que o deslocamento vertical máximo foi de 3,54mm.

Gráfico 07 – Carga x Deslocamento – VM-3

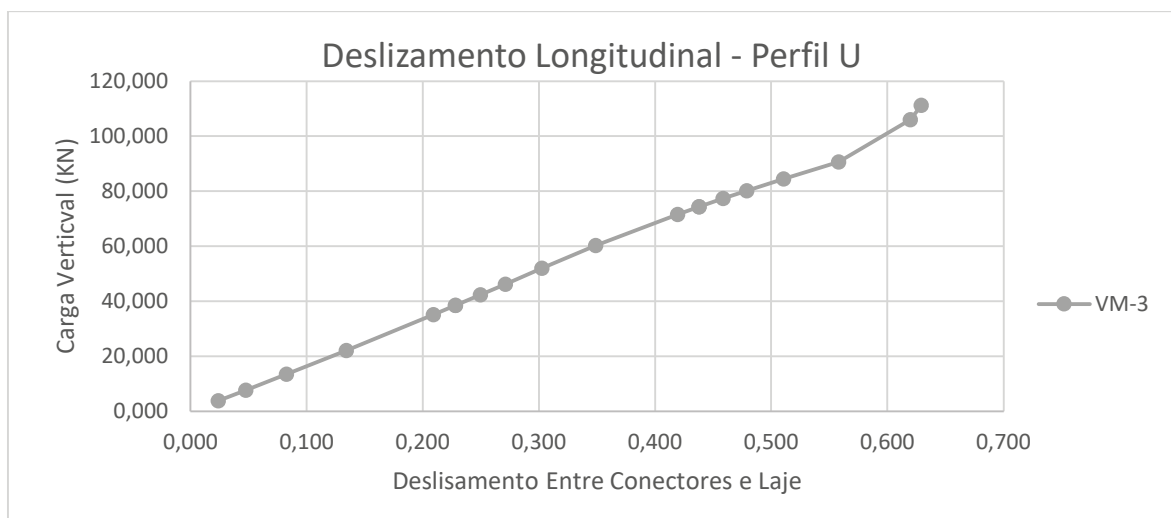


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O deslizamento longitudinal dos conectores do modelo VM-3, ficou entre os dois outros modelos, apresentando resultado mediando entre os dois, sendo o deslizamento máximo apresentado por esse modelo, cerca de 0,62 mm.

Abaixo podemos ver o gráfico do deslizamento longitudinal máximo dos conectores do tipo Perfil U.

Gráfico 08 – Deslizamentos Longitudinais - VM-3

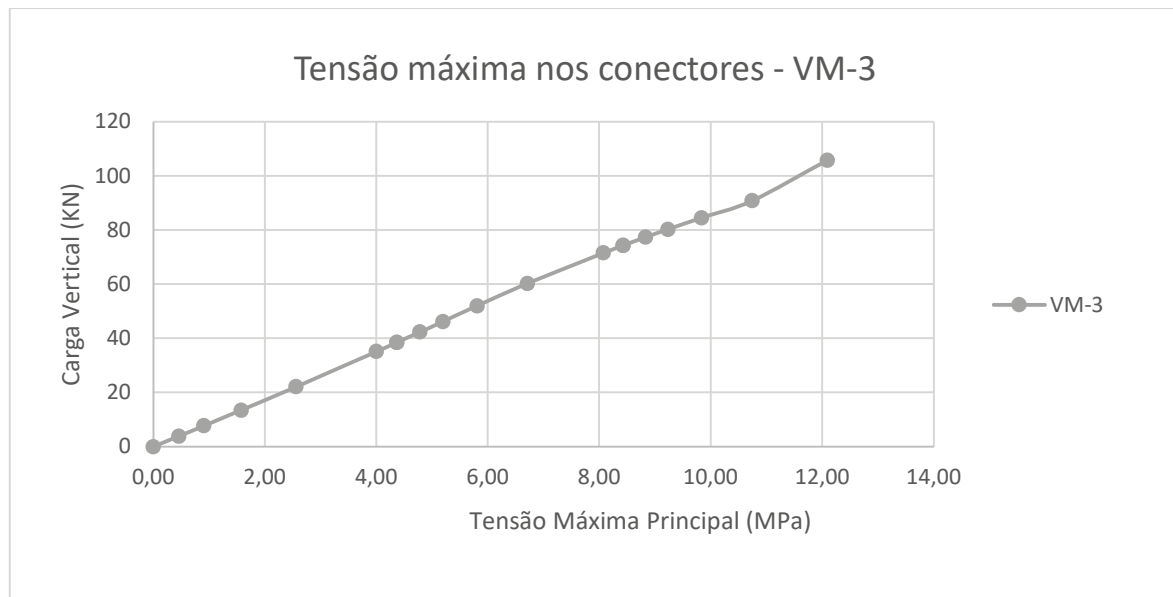


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O modelo VM-3, que é o modelo com conectores de cisalhamento do tipo Perfil U, foi o modelo no qual apresentou menor concentração de tensão nos conectores, sendo a concentração máxima de 12,08 Mpa.

Abaixo segue gráfico com a evolução da concentração de tensão de acordo com a carga aplicada no modelo.

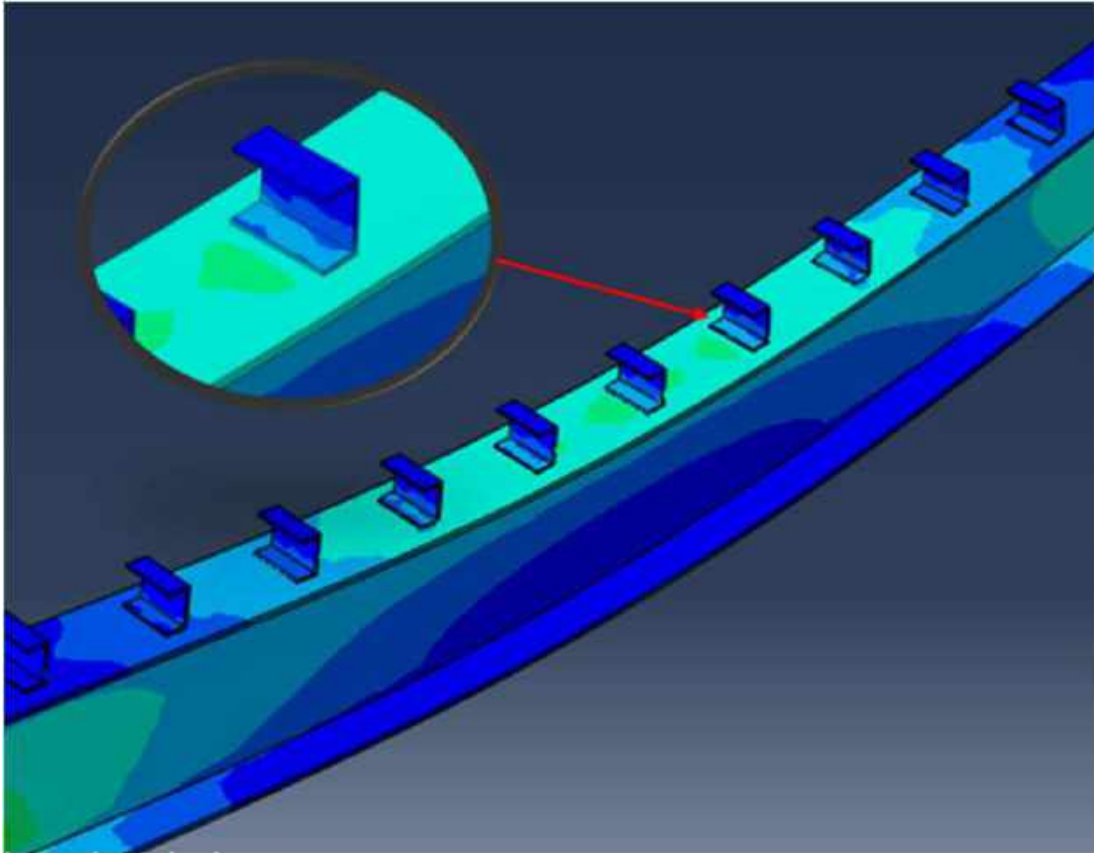
Gráfico 09 – Tensão máxima nos conectores - VM-3



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Abaixo segue a imagem para melhor visualização da concentração de tensões no perfil U, pode-se observar que o local com maior concentração é no ponto de contato com a mesa do perfil metálico, pois como naquele ponto o conector estar engastado, quando ocorre o deslizamento longitudinal do conector, ali gera um ponto de concentração de tensão máxima.

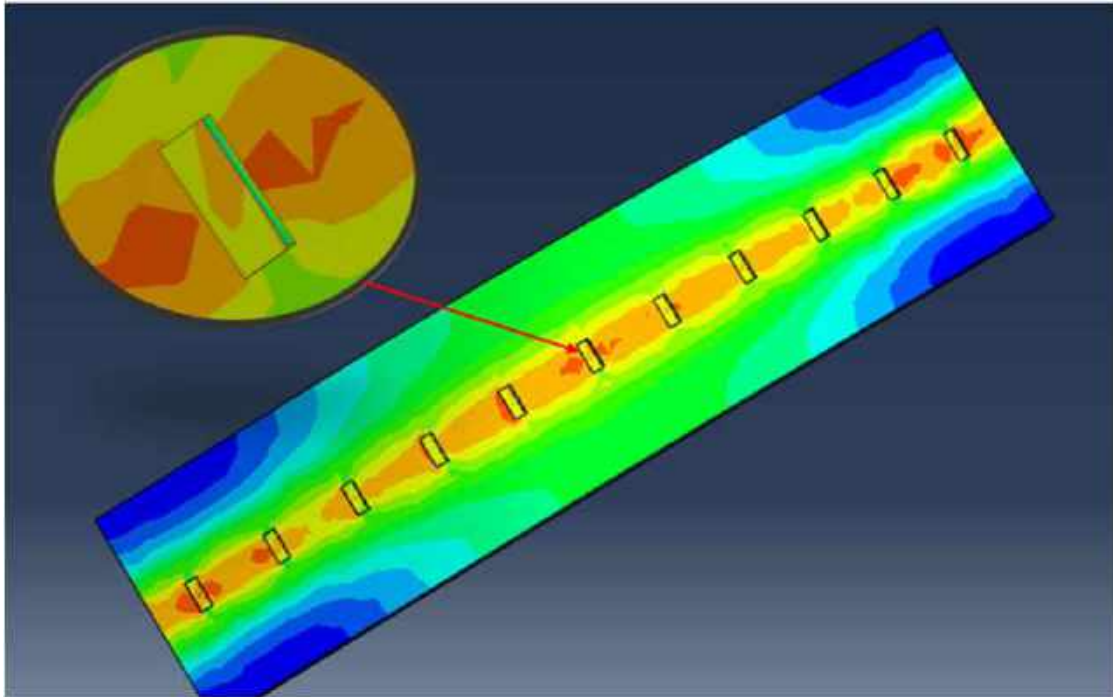
Imagem 28 – Concentração de tensões no conector Perfil U



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Em complemento a imagem anterior, segue imagem abaixo que apresenta as tensões geradas dentro da laje no perímetro onde existe o contato entre conector e laje.

Imagem 29 – Concentração de tensão no ponto da laje em contato com o conector Perfil U



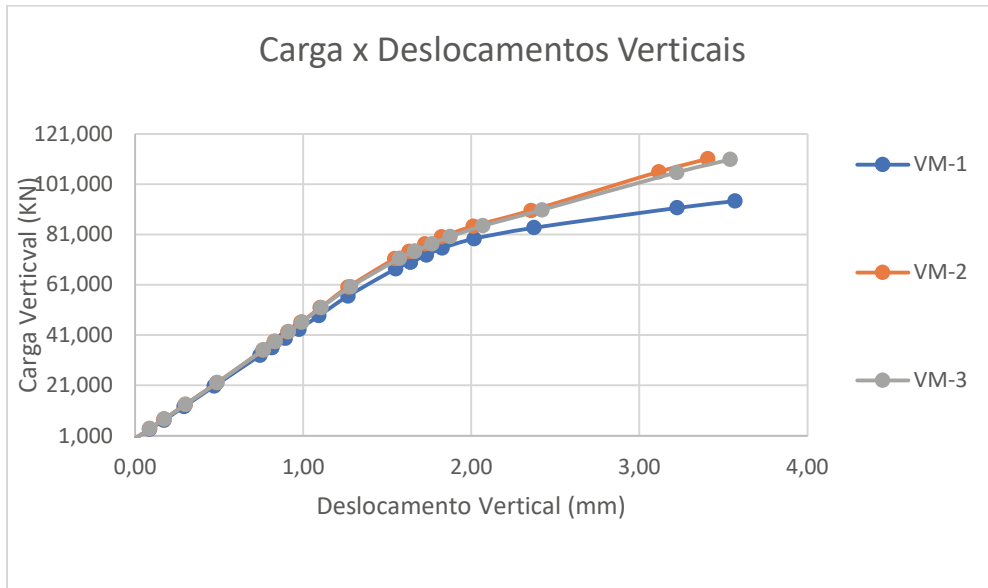
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

5.2 CURVAS CARGAS-DESLOCAMENTOS E DESLIZAMENTOS LONGITUDINAIS NOS CONECTORES DE CISALHAMENTO

A seguir veremos o gráfico carga x deslocamentos verticais máximos dos modelos plotados em um único gráfico, para assim ficar melhor a análise dos resultados. O eixo vertical do gráfico representa a carga aplicada, e o eixo horizontal represente a evolução dos deslocamentos, de acordo com o aumento da carga aplicada. Visualmente conseguimos inferir que o modelo que teve menor deslocamento vertical é o VM-2, que é o modelo com conectores do tipo perfobond, seguido do modelo VM-3, e por último o modelo VM-1, que apresenta a maior deformação vertical. As deformações máximas são respectivamente 3,40 mm, 3,54 mm e 3,56 mm.

É importante observar também que os três modelos tiveram resultados próximos, pode-se inclusive observar no gráfico abaixo que até cerca de 80 kN, o deslocamento vertical máximo era praticamente igual para todos os modelos.

Gráfico 10 – Carga x Deslocamentos Verticais



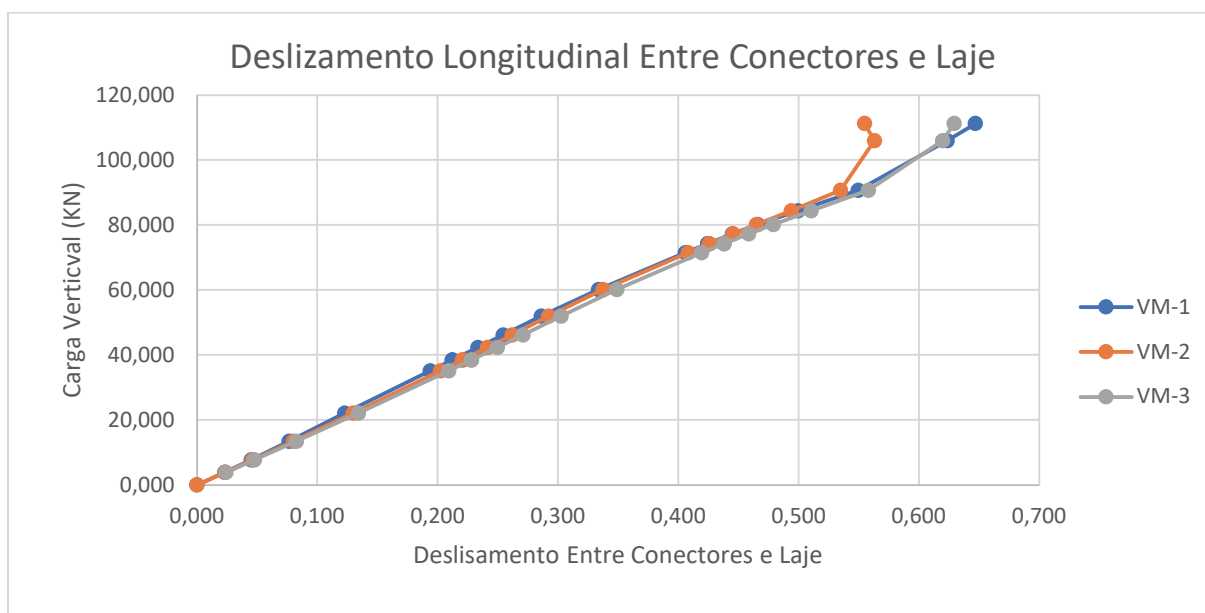
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Outro fator relacionado e de alta relevância neste tipo de análise são os deslizamentos longitudinais dos conectores em relação à laje, o modelo com conector do tipo stud bolt foi o modelo que apresentou maior deslizamento longitudinal, como poderemos ver no gráfico mais abaixo. O que confirma os resultados anteriores, pois, como o modelo VM-1, foi o que teve maior deslocamento vertical, significa que os esforços nos conectores foram maior, e que conseqüentemente ele deve apresentar maior deslizamento relativo entre os conectores e a laje de concreto.

Abaixo pode-se ver o gráfico com as linhas de evolução do deslizamento dos três modelos em análise, sendo o modelo VM-2, modelo com conectores do tipo perfobond com menor deslizamento, seguido pelo VM-3 e por fim o VM-1.

Vale salientar que os deslizamentos em discussão são nas extremidades das vigas, na interface entre o perfil metálico e a laje de concreto.

Gráfico 11 – Deslizamento Longitudinais entre Conectores e Laje de Concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Após analisarmos os gráficos acima, infere-se que até o momento o conector que está apresentando o melhor desempenho é o modelo VM-2, com conectores do tipo Perfobond, seguido dos outros dois modelos, que tem apresentado resultados muito similares.

5.3 TENSÕES MÁXIMOS NOS CONECTORES, VIGAS E LAJES

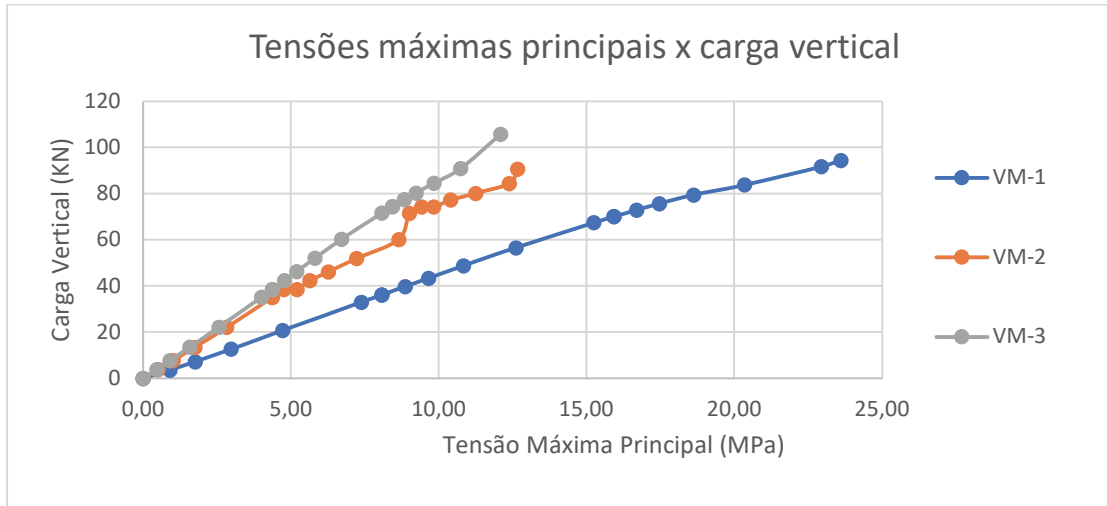
Uma estrutura, qual ela é ensaiada numericamente, trás consigo diversas vantagens, uma delas é que podemos avaliar as concentrações de tensões e todos os pontos críticos de uma estrutura a partir do resultado.

Com base nisso, agora será apresentado as tensões máximas e sua evolução com a aplicação de carga nos modelos. Será abordado as tensões máximas nos três elementos que compõe cada modela, que são os conectores, vigas metálicas e lajes de concreto

A concentração de tensão nos conectores vai estar diretamente ligada as formas geométricas dos conectores, bem como a flexibilidade do conector, pois, um conector que tem características mais flexíveis, tende a ser um conector com boa ductibilidade, desta forma ao se deformar para absorver tensão, ele acaba concentrando maiores tensões, abaixo veremos quadro com os dados de tensões máximas dos conectores de cisalhamento de todos os modelos, de acordo com o aumento da carga aplicada.

Para melhor visualização da evolução das tensões nos conectores, segue abaixo gráfico plotado com os dados das tensões a medida da evolução da carga aplicada.

Gráfico 12 – Tensões Máximas Principal nos Conectores de Cisalhamento



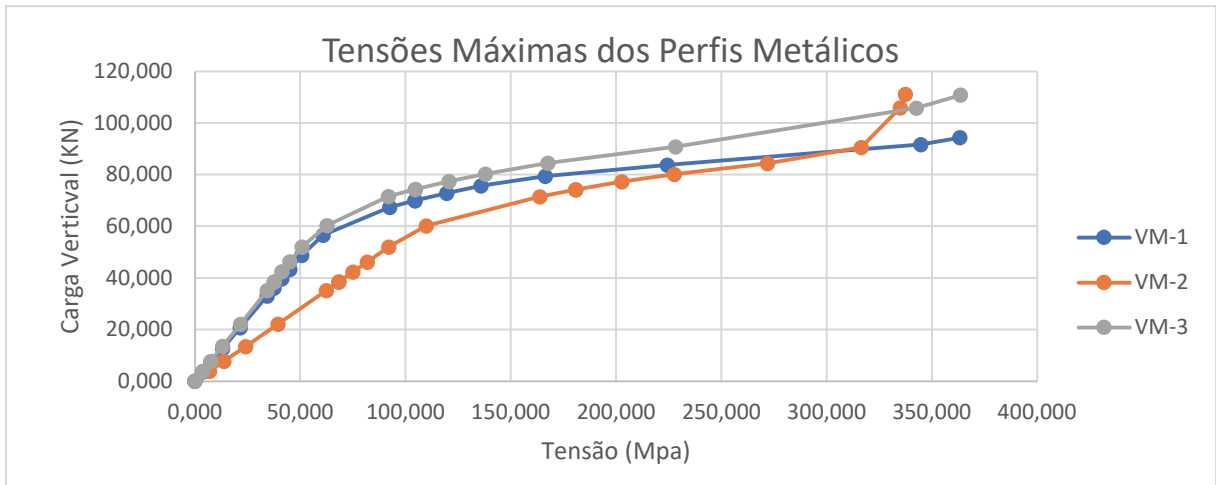
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como pode-se observar o modelo com conector do tipo stud bolt foi o que apresentou maior concentração de tensão, o que está relacionado diretamente com o deslocamento vertical do modelo, ele foi o modelo que apresentou maior deslocamento vertical, portanto ele teve maior deformação, desta forma concentrando maiores tensões nos conectores.

O gráfico abaixo apresenta as concentrações de tensões ao longo dos perfis metálicos em cada modelo, como os perfis metálicos a função deles é a resistência a tração, são os elementos que terão maior concentração de tensão do conjunto.

Ao analisar o gráfico vemos que o modelo VM-1 e VM-3 partem junto, a mais ou menos na metade da carga aplicada começam a seguir cada um seu rumo. No modelo VM-2, ele já parte diferente, isso é devido ao tipo do conector que é o perfobond, pelo fato do conector perfobond da maior rigidez ao perfil ele absorve tensão de forma mais rápida.

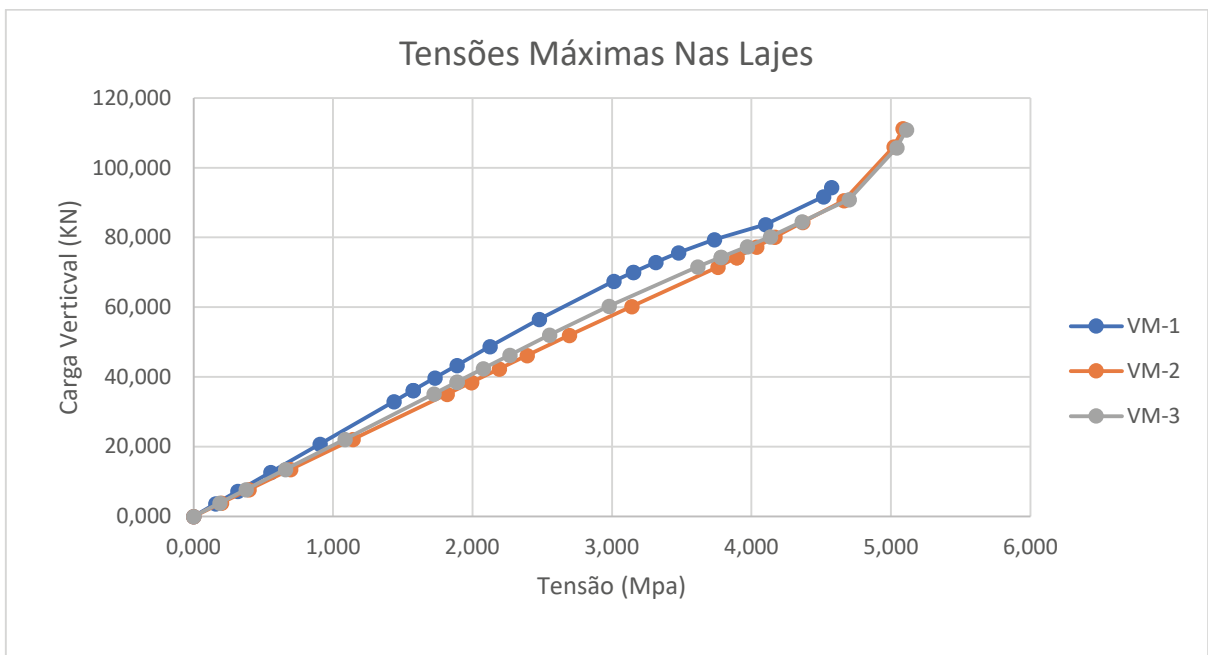
Gráfico 13 – Tensões Máximas Principal nos Perfis Metálicos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Já nas lajes, veremos no gráfico abaixo que os modelo VM-2 e VM-3 é que partem juntos. E o VM-1 segue seu caminho sozinho, a laje do VM-1 foi a que apresentou menor tensão na laje, isso se da pelo fato de ser um modelo que tem grande deslocamento vertical, o que acaba propiciando ao modelo concentrar mais tensões nos conectores e no perfil metálico.

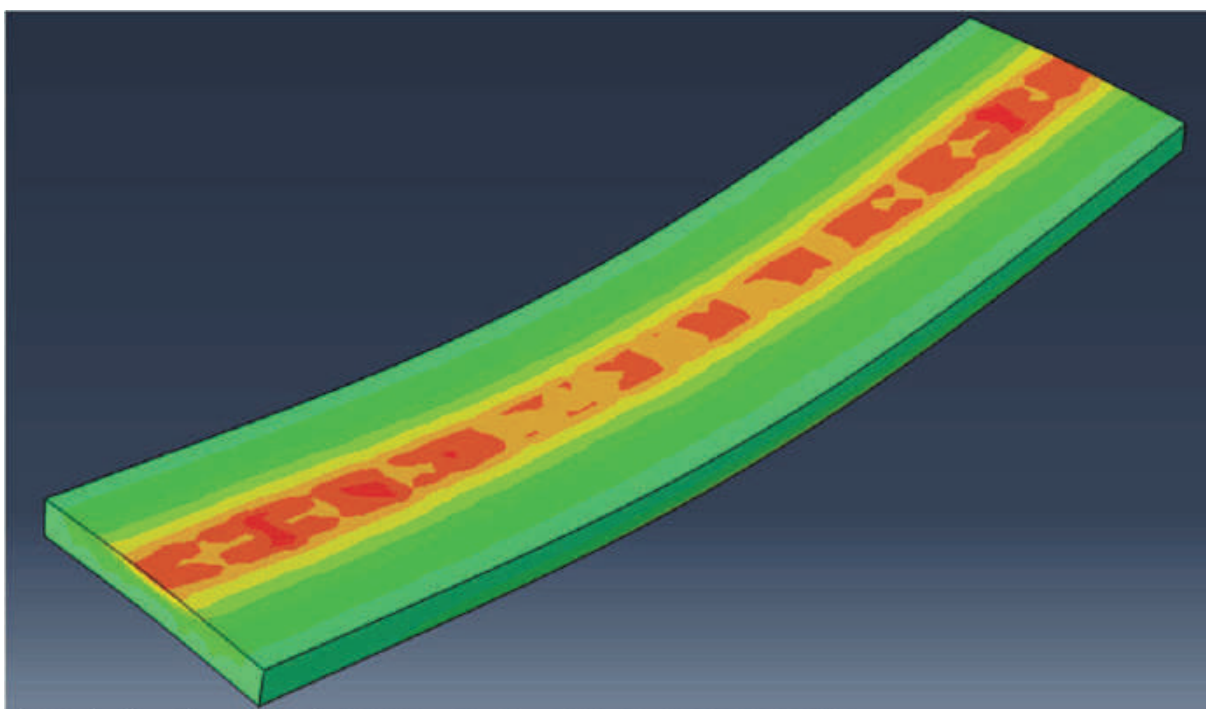
Gráfico 14 – Tensões Máximas Principal nas Lajes de Concreto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Mas abaixo, veremos imagens referentes as concentrações de tensões máximas principais ao longo das lajes. Na laje do modelo VM-1, observa-se que as concentrações de tensões são restritas aos locais em torno dos conectores de cisalhamento.

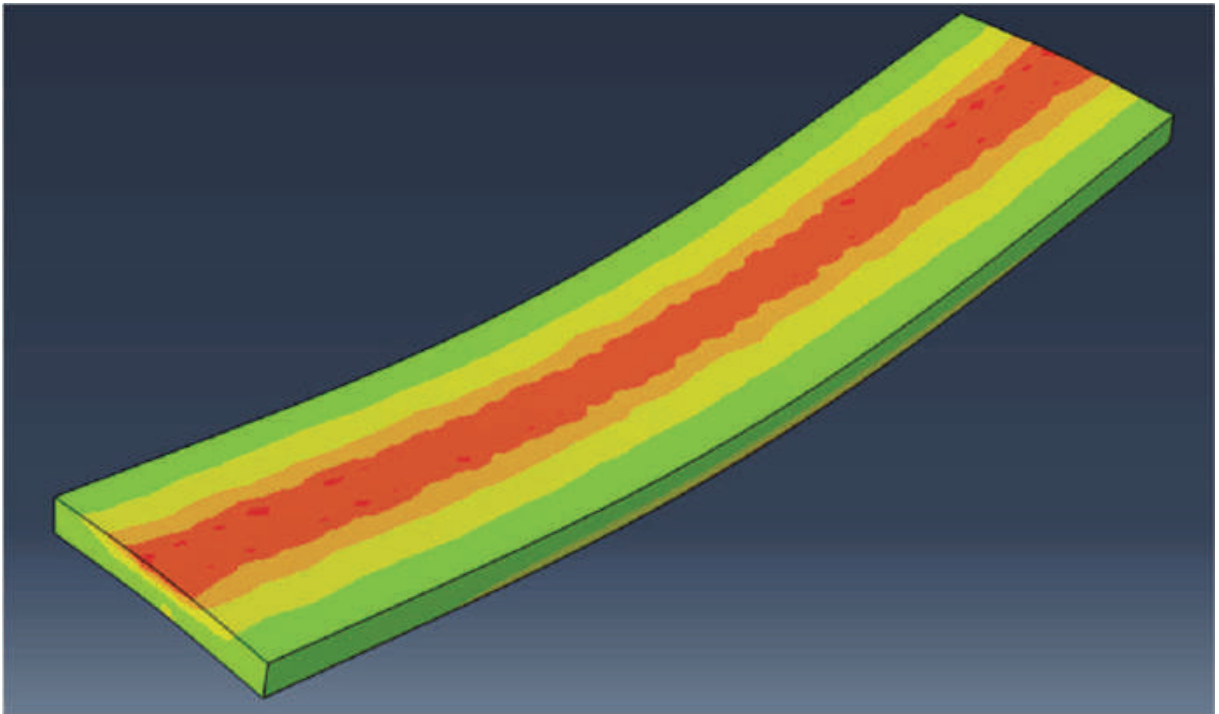
Figura 30 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-1



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Já no modelo VM-2, que é o modelo com conectores do tipo perfobond observa-se uma continuidade nas tensões principais, ou seja, existe uma conformidade nas distribuições de tensões ao longo de toda laje de concreto.

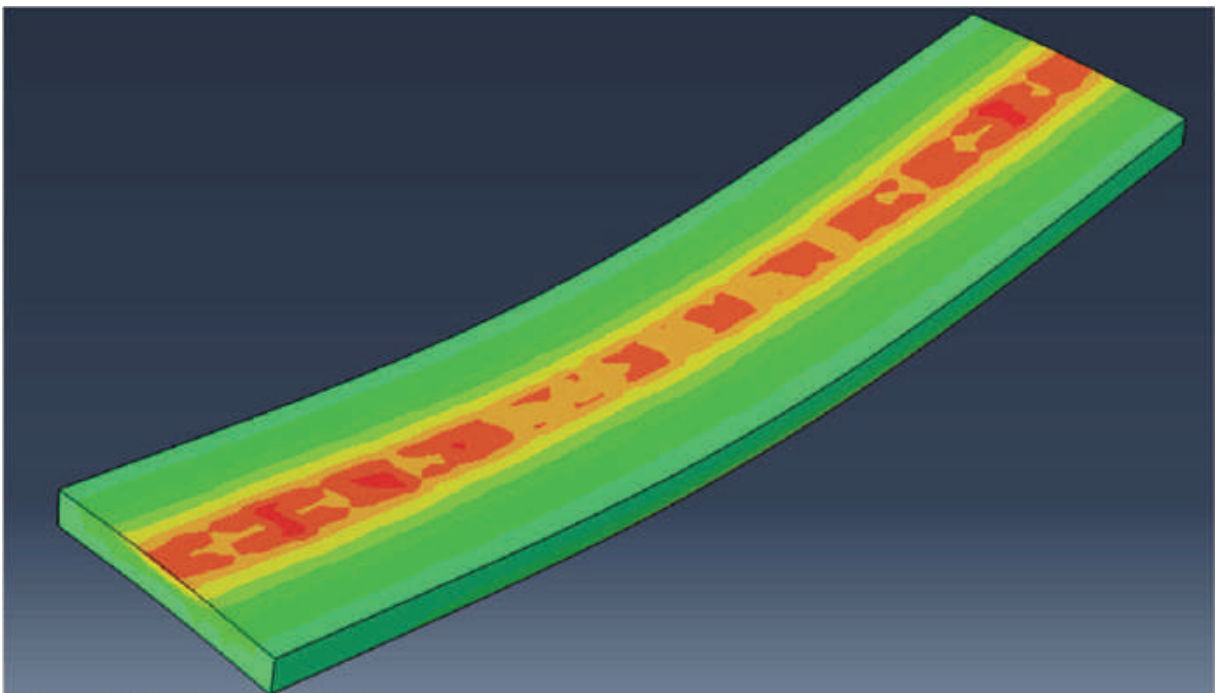
Figura 31 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-2



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na laje da viga mista com conector do tipo Perfil U, que é o modelo VM-3, as concentrações de tensões principais foi muito parecido com a viga VM-1, ou seja, as tensões máximas principais ficaram majoritariamente concentradas no entorno dos conectores.

Figura 32 – Tensões Máximas Principal na Laje de Concreto do Modelo VM-3



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Aqui chega-se ao final das análises das tensões de cada elemento que compõe as vigas mistas em análises nesse trabalho. Vimos que os resultados estão todos em nexos uns aos outros, que os resultados estão de acordo com o esperado.

Ao final das análises vimos que o melhor desempenho apresentado foi o do modelo VM-2, que é a viga mista composta por conectores de cisalhamento do tipo Perfobond, mas os outros dois modelos apresentaram bons resultados, inclusive entre eles dois, que ficaram muito próximas em várias características de deslocamento, e tensões.

6 CONCLUSÃO

Ao fim desse trabalho, pode-se observar a relevância do assunto aqui abordado, pois quando trata-se de estruturas mistas do ponto de vista técnico, ainda estamos em constante evolução, pois, por mais que esse modelo estrutural já seja utilizado em alguns projetos e construções, a utilização desse sistema construtivo ainda é muito inferior ao convencional, concreto armada e protendido, com exceção apenas em obras de grande porte, na área de infraestrutura, onde vemos mais comumente a utilização de sistema de vigas-mistas de aço e concreto.

Esta temática também abre novos leques tanto de conhecimentos como profissionais, pois o conhecimento deste assunto por ser restrito a uma parcela dos profissionais da área, pode tornar-se elemento diferencial no mercado de trabalho. Vale salientar a importância pessoal deste conhecimento técnico, conhecimento que pode ser aplicado em diversas temáticas pessoais, principalmente no aprofundamento dos estudos acadêmicos da área de estruturas e método dos elementos finitos.

Ao fim deste trabalho, verifica-se que os resultados apresentados atenderão aos objetivos propostos, além de atender as expectativas no que diz respeito ao desempenho de cada conector de cisalhamento.

Por fim, e como já exposto, a viga com melhor desempenho foi a viga VM-2, viga mista com conector de cisalhamento do tipo perfobond, isso, considerando aspectos técnicos de deformações, deslizamentos relativos e concentração de tensões. Mas, os outros dois modelos, VM-1 e VM-3 apresentaram resultados similares, o que também colocam como bons conectores de cisalhamentos para este propósito. Então, por mais que o modelo com conector do tipo perfobond apresentou o melhor resultado, isso não significa que os outros conectores não sejam bons, pelo o contrário, na utilização práticas para desenvolvimento de projetos, devemos abordar outros aspectos, além do desempenho estrutural, para a partir daí escolhermos um conector, sendo o caso.

Como objetivo de continuidade da pesquisa, as sugestões de novos estudos para complemento ou continuidade deste trabalho são:

- Análise de qual seria a equivalência da quantidade de conectores para ter um mesmo desempenho estrutural;
- Análise de um novo conector de cisalhamento (Trelaçados/Com outros tipos de furações, entre outros);

- Análise dos conectores do tipo stud bolt com posicionamentos diferentes na mesa da viga metálica;
- Análise da utilização de combinação de diferentes tipos de conectores em uma mesma viga mista.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS Inc S. **ABAQUS Analysis user's manual**. Version 6.14, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.
- ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estruturas mista aço-concreto**. São Carlos, 2000. 277p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- ALVA, G. M. S.; MALITE, M. **Comportamento Estrutural e Dimensionamento de Elementos Mistos Aço-Concreto**. Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, vol. 7, n. 25, p. 51-84. 2005.
- AZEVEDO, Alvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Livro. Editora. Cidade. 2003.
- AYYUB, B. M.; SOHN, Y. G.; SAADATMANESH, H. Journal of Structural Engineering. v. 166(11), p. 2931-2951. **Prestressed composite girders under positive moment**. 1990.
- CORRÊA, A. F.; DAUZACKER, L. A. V. J. **Estruturas Mistas - Aço Concreto: Vantagens da Utilização**. Monografia. Faculdade Capixaba da Serra. Serra-ES. 2015.
- DUTRA, C. M.; VERÍSSIMO, G. DE S.; RIBEIRO, J. C. L.; PAES, J. L. **Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Conectores de Cisalhamento Tipo Crestbond**. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica. São Paulo. 2014.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **1994-1-1: Eurocode 4 -Design of composite steel and concrete structures**; Part 1.1: General rules and rules for buildings, 2011.
- FORTES, W. R. **Estudo Numérico de Conectores de Cisalhamento Tipo Perfobond**. Dissertação. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. 2018.
- FRANSSSEN, J. M., **SAFIR: A Thermal/Strutural Program for Modeling Structures Under Fire**. Engineering Journal, Trird Quarter. 2005.
- GRIFFIS, L. G. The 1994 T.R. **High Lectura: Composite Frame Construction in: National Stell Construction Conference**, Pittsburgh, Pennsylvania, 18 – 20 maio, 1994. Proceedings. Nem York, AISC. v. 1, p. 1.1-1.72.
- HBV – Systeme. **Innovationen in Holz-Verbunbauweise**. Disponível em: <http://www.hbv-systeme.de/>. Acesso em: 01 dez 2020.
- LEMES, Daniela. **Análise Teórico e Experimental de Conectores de Cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas**. Tese. USP – São Carlos. São Paulo. 2007.
- LIMA, Ésio M. F.. **Análise Numérica de Vigas Mistas Protendidas Com Interação Parcial**. **Dissertação**. UFC. Fortaleza. 2018.

LORENC, W.; KUBICA, E. **Behavior of Composite Beams Prestressed With External Tendons: Experimental Study**. Journal Of Constructional Steel Research. Ed. 62. Pag. 1353-1366. 2006.

MAIA, K. A. F. P.; CARVALHO, H.; RODRIGUES, F. C. **Análise Numérica de Vigas Mistas Considerando a Contribuição do Atrito na Interface Aço-Concreto e da Flexibilidade dos Conectores de Cisalhamento**. CILAMCE. Florianópolis. 2017.

MALITE, M. **Sobre o Cálculo de Vigas Mistas Aço-Concreto: Ênfase em Edificações**. Dissertação. USP-São Carlos. 1990.

MASCIA, N. T.; FORTI, N. C. S.; SORIANO, J.; NICOLAS, E. A. **Análise de Vigas Mistas em Concreto e em Madeira**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 4, n. 2, p. 57-74. 2007.

MEDEIROS, L. F. DE; MOSER, A.; SANTOS, N. DOS. **A simulação computacional como técnica de pesquisa na administração**. Revista Intersaberes, v. 9, n. especial, p. 28, 2014.

MIOTTO, J. L. **Estruturas Mistas de Madeira-Concreto: Avaliação das Vigas de Madeira Laminada Colada Reforçadas com Fibras de Vidro**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – São Carlos. 2009.

OLIVEIRA, A. L. C. **Contribuição Para Análise de Vigas Mistas de Madeira Laminada Colada e Concreto**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2002.

PEREIRA, A. **Projeto Ótimo de Pórticos Planos com Restrição à Flambagem**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. Livro. 8ª Edição. LTC. 2009. Rio de Janeiro.

SÁ, A. G. P.; SANTOS, W. A. DOS. **Estruturas Mistas Aço e Concreto**. Monografia. Instituto Doctum de Educação e Tecnologia. Minas Gerais. 2014

SILVA, Elder Nogueira. **Modelagem Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas Mistas de Aço e Concreto Protendidas**. Dissertação. UFScar. São Paulo. 2018.

SILVA, Mariele Carmo. **Análise Numérica de vigas mistas levando em conta a flexibilização e a ductilidade dos conectores de cisalhamento**. Dissertação – UFMG. 2009.

SILVA, M. C. B. **Sistemas Estruturais Híbridos**. Puc- Goiás.

SILVA, H. P. **Simulação Numérica do Comportamento de Conectores de Cisalhamento Tipo Crestbond**. Universidade Federal de Viçosa. Dissertação. Viçosa – MG. 2013.

SILVA, V. P.; PANNONI, F. D. **Estruturas de Aço para Edifícios: Aspectos Tecnológicos e de Concepção**. São Paulo. 2010

SILVA, W. V.; SOBRINHO, B. E.; SIQUEIRA, J. P. A.; MACEDO, T. A.; BESSA, M. A. S.; SANTOS, J. C. **Estudo Experimental e Numérico de Conectores de Cisalhamento do Tipo Stud Bolt em Vigas Mistas**. CILAMCE. Brasília – DF. 2016.

SOUSA, J. A. **Modelagem Numérica de Vigas Mistas de Aço-Concreto Utilizando Conectores de Cisalhamento Treliçados**. Universidade Federal do Ceará – Campus Russas. Monografia. Russas. 2019.

SOUZA, Alex S. C.; SILVA E. N. **Simulação Numérica do Comportamento de Vigas Mistas de Aço e Concreto Protendidas**. REEC. Volume 15, Nº 1, p. 52-68. 2019.

SOUZA, D. A. 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Estruturas Mistas de Aço e Concreto**. Natal, 2014.

SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia. Universidade Federal do Pará. 2003.

TRISTÃO, A. G. **Comportamento de Conectores de Cisalhamento em Vigas Mistas Aço-Concreto com Análise da Resposta Numérica**. Dissertação. USP – São Carlos. 2002.

TRISTÃO, G. A.; NETO, J. M. **Comportamento de Conectores de Cisalhamento em Vigas Mistas Aço-Concreto com Análise da Resposta Numérica**. Publicação Interna: Cadernos de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, vol. 7, n. 23, p. 121-144. 2005.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de Um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, 287p. 2007.

VIANA, J. DA C. **Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores Perfobond e T-Perfobond Para Vigas Mistas**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 307p. 2009.

WROBEL, L. C. **Análise Não-Linear de Estruturas Laminadas Pelo Método dos Elementos Finitos**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1977.