

5 Resultados Experimentais

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados medidos dos dois testes experimentais em escala real realizados para a comparação dos resultados teóricos.

5.2. Resultados Experimentais do Teste 01

O protótipo de viga mista VM-01 foi submetido a um ensaio estático buscando obter a resistência última e analisar seu comportamento. O modelo VM-01 foi ensaiado seguindo o modelo de aplicação de carga descrito no Capítulo 4 (Programa Experimental). A Figura 5.1 mostra a configuração do modelo VM-01 após o ensaio.

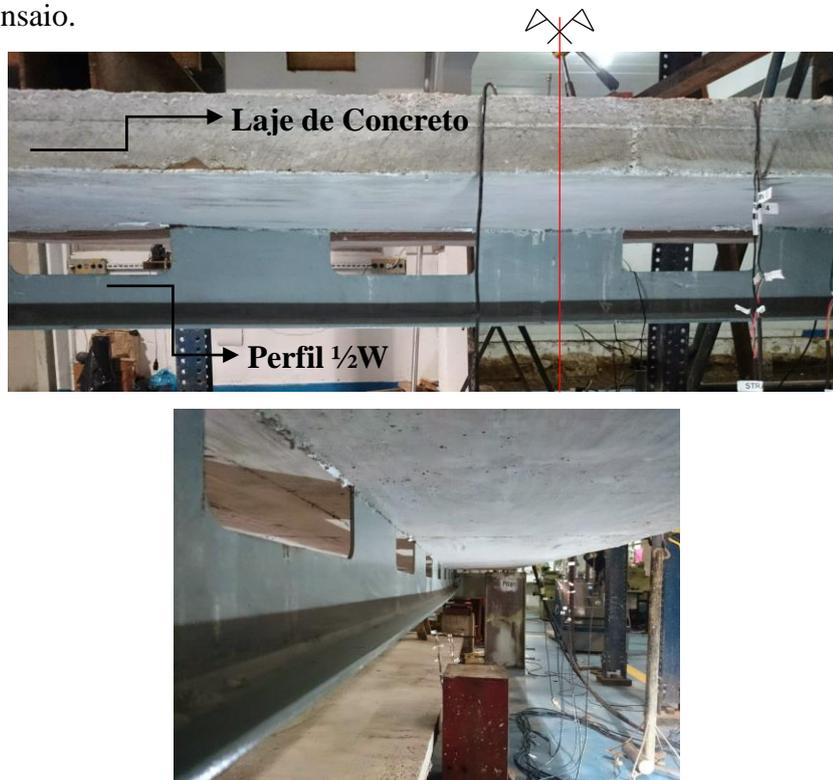


Figura 5.1 - Configuração do modelo VM-01 após ensaio.

Para o teste 01 a carga máxima atingida foi de $2P = 70$ kN (carga aplicada por atuador). O protótipo apresentou um comportamento caracterizado pela flexão com escoamento do perfil na região tracionada, entretanto, não foi possível verificar danos significativos do concreto na região comprimida.

5.2.1. Comportamento Momento Fletor/Deslocamento no Centro do Vão

O deslocamento vertical depende principalmente da rigidez da viga e do tipo de carregamento. A Figura 5.2 apresenta o diagrama que relaciona momento fletor solicitante e deslocamento vertical, medidos no centro do vão das vigas.

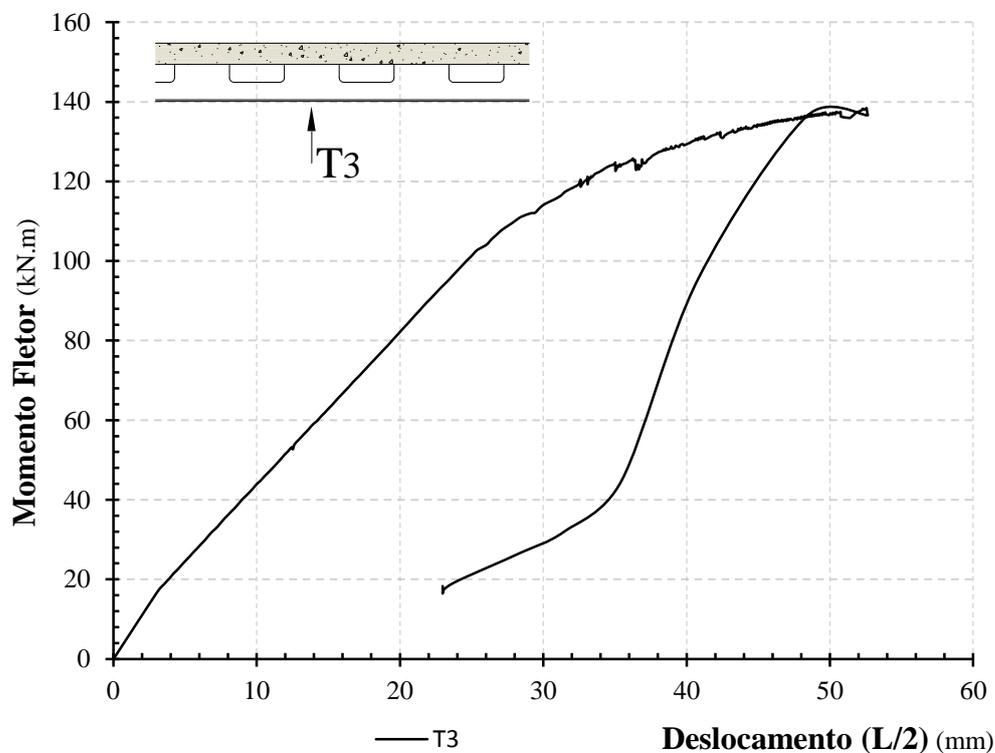


Figura 5.2 - Resultados viga mista VM-01: Momento Fletor x Deslocamento vertical no meio do vão.

O momento fletor corresponde à soma do momento devido ao peso próprio com o momento da carga aplicada. O momento devido ao peso próprio da viga mista mais vigas de aplicação de carga foi de 16,5 kN.m. Ao atingir este valor, ocorre uma mudança na curva representando o início da aplicação do carregamento pelos atuadores, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.2. O deslocamento vertical refere-se aos valores obtidos experimentalmente pelo

transdutor de deslocamento T3 no centro do vão, mais o deslocamento devido ao peso próprio de 2,98 mm.

Na fase inicial de carregamento, a viga mista apresentou um comportamento elástico, até o nível de carga de $2P = 50$ kN (imposta em cada atuador, sendo a carga total na viga de 70 kN), já que as grandezas mencionadas mantêm uma relação linear. Quando $M_f > 0,75 M_{máx}$, o incremento do deslocamento vertical passou a aumentar mais rápido. Ou seja, a viga apresentou uma perda na rigidez, passando da fase elástica para a plástica.

Os valores últimos de carga aplicada ($2P$), momento fletor solicitante (M_s) e deslocamento vertical (d) para cada fase do comportamento da viga mista, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dados experimentais do modelo VM-01

Regime	2P kN	M_s kN.m	d mm
Elástico	50	104	26
Plástico	70	139	49 a 53

No estágio final do ensaio, o protótipo atingiu a plastificação, ou seja, desenvolveu uma crescente deformação vertical para um nível de carga aproximadamente constante. Devido a este fato, o valor da deformação é apresentado em forma de intervalo na Tabela 5.1.

Após o descarregamento, a estrutura apresentou deformação residual, permanecendo com 23 mm de deformação.

5.2.2. Comportamento e Fissuração

A observação do surgimento de fissuras foi realizada até a carga de plastificação, entretanto, não foi notado nenhum dano. Por medida de segurança, o mapeamento das fissuras foi paralisado e a visualização só foi feita após o ensaio.

No modelo VM-01 foram encontradas somente duas fissuras, ambas na região inferior da laje. Uma no meio do vão, estendendo-se por metade da largura efetiva, e outra afastada um pouco da primeira fissura. Ambas surgiram do mesmo lado da viga. A Figura 5.3 mostra a configuração das fissuras.



Figura 5.3 - Configuração das fissuras no modelo VM-01.

5.2.3.

Interface Aço-concreto e Comportamento da Conexão entre os Materiais

O valor da resistência ao cisalhamento longitudinal dos modelos não pode ser conhecido, uma vez que não foram ensaiados protótipos do tipo “Pushout”. Desta forma, a quantidade de armaduras transversais foi definida buscando-se obter a melhor condição de interação entre os dois materiais.

A Figura 5.4 apresenta o momento fletor solicitante em função dos deslocamentos medidos na interface entre o aço e o concreto, nos extremos da viga mista. No gráfico são mostradas duas curvas, referentes a cada transdutor posicionado nas extremidades.

O deslizamento só foi percebido em um nível elevado de carregamento, já próximo da ruptura, caracterizando-se a ligação na interface aço-concreto como interação completa, ou seja, somente uma linha neutra de plastificação é verificada.

No protótipo VM-01 o deslizamento só foi observado em uma das extremidades (T4), e iniciou ao atingir uma carga (2P) aproximada de 62 kN ou um momento fletor solicitante de 125 kN.m. O maior deslizamento, de 1,04 mm, foi registrado sob carga máxima.

No modelo não foi possível notar separação vertical entre o aço e o concreto.

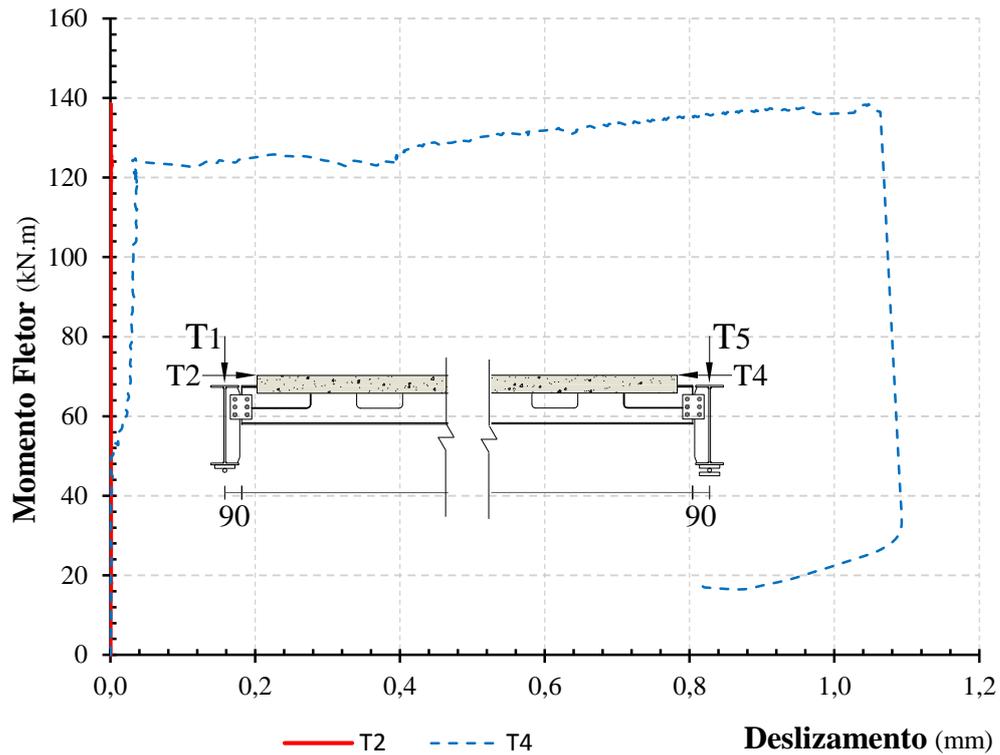


Figura 5.4 - Resultados viga mista VM-01: Momento Fletor x Deslizamento na interface aço-concreto.

5.2.4. Monitoramento das Tensões

O uso de extensômetros na viga metálica teve como objetivo obter os valores de deformações. A Figura 5.5 apresenta a identificação dos extensômetros posicionados na seção da viga metálica.

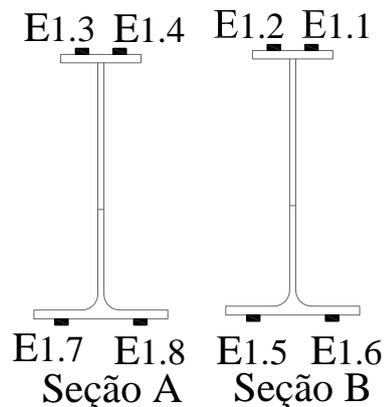


Figura 5.5 - Posicionamento e identificação dos extensômetros no protótipo VM-01 (ver localização das seções A e B na Figura 4.24).

A Figura 5.6 apresenta os gráficos das deformações medidas pelos extensômetros em função do momento fletor produzido pela força (2P) aplicada por um atuador. No gráfico também é traçada a reta da deformação correspondente à tensão escoamento do aço A572. Durante a concretagem foi danificado o extensômetro E1.1 não permitindo a leitura destes dados.

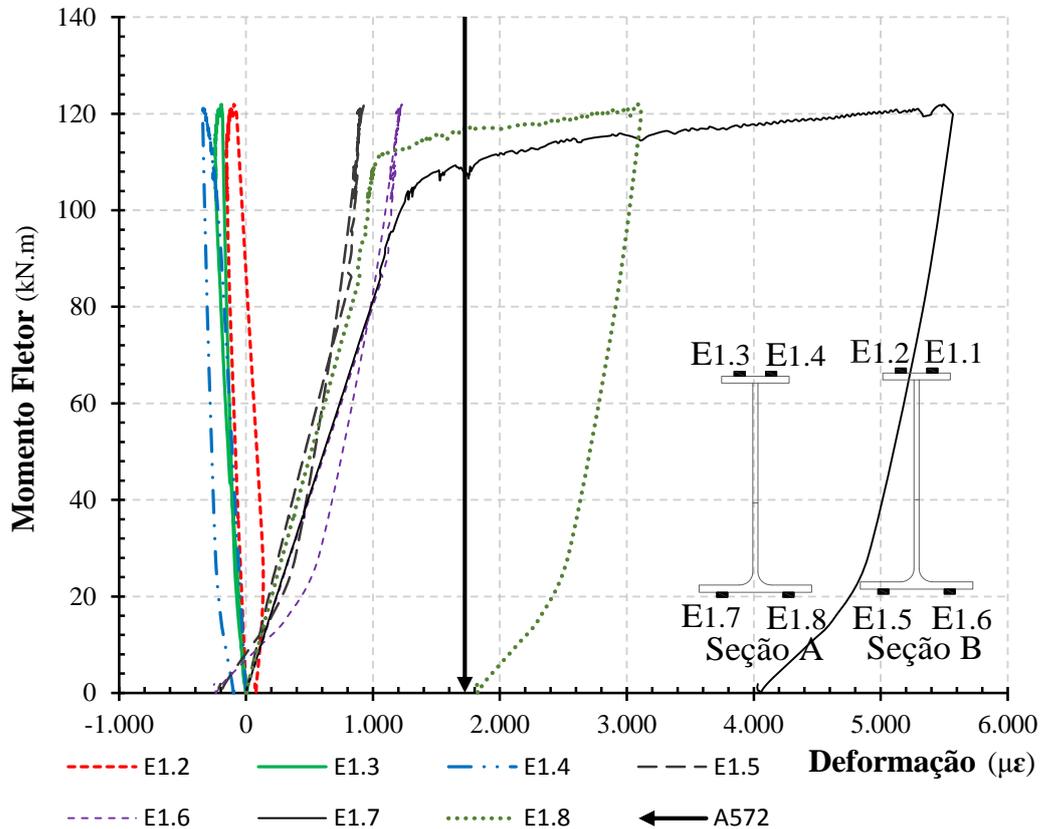


Figura 5.6 - Resultados do modelo VM-01: Momento Fletor x Deformação.

Calculando a média entre as deformações medidas pelos extensômetros posicionados na mesma linha (E1.2; E1.3 e E1.4; E1.5 e E1.6; E1.7 e E1.8) foi possível determinar a tensão atuante por meio da lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), onde $E = 200000$ MPa. Na Figura 5.7 a abscissa do gráfico representa o momento fletor solicitante e a ordenada ilustra as tensões. Com base na análise dos resultados apresentados nesta figura, pode-se concluir que a mesa inferior do perfil foi submetida a tensões de tração e as chapas superiores a tensões de compressão.

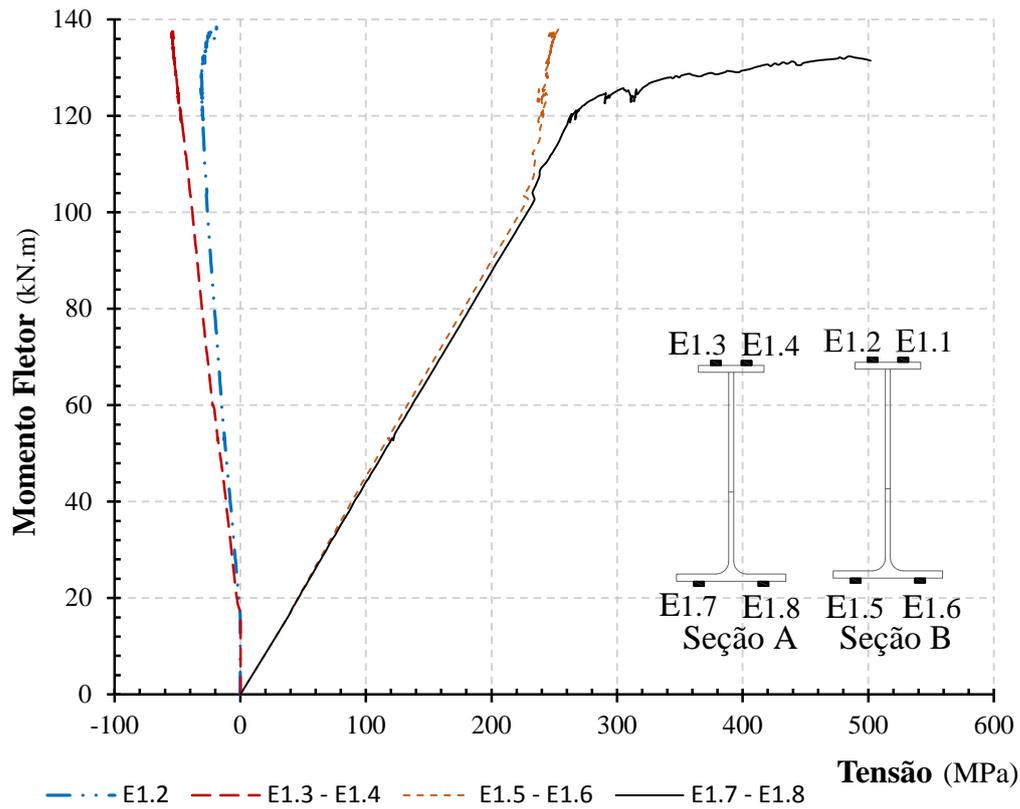


Figura 5.7 - Modelo VM-01: Momento Fletor x Tensão.

5.3. Resultados Experimentais do Teste 02

Seguindo a configuração de ensaio descrito no Capítulo 4 para o modelo VM-02, foi realizado o teste 02 obtendo dados, por meio da instrumentação, necessários para descrever seu comportamento. A Figura 5.8 mostra a configuração do modelo VM-02 após o ensaio.

Para o teste 02 a carga máxima atingida foi de $2P = 95$ kN (carga aplicada por atuador). O protótipo apresentou um comportamento caracterizado pela flexão até atingir a carga última que provocou a ruptura da solda de ligação entre perfis U de reforço.



Figura 5.8 - Configuração do protótipo VM-02 após ensaio.

5.3.1. Comportamento Momento Fletor/Deslocamento no Centro do Vão

O deslocamento vertical no meio do vão foi medido por meio de um transdutor posicionado na face superior da laje de concreto. A Figura 5.9 apresenta o diagrama que relaciona momento fletor solicitante e deslocamento vertical, medidos a meio vão das vigas.

Assim como no protótipo VM-01, o momento fletor atuante corresponde à soma do momento devido ao peso próprio com o momento produzido pela carga aplicada. O momento devido ao peso próprio da viga mista, mais vigas de aplicação de carga foi de 15 kN.m. Ao atingir este valor, ocorre uma mudança na curva representando o início da aplicação do carregamento pelos atuadores, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.9. O deslocamento vertical refere-se aos valores obtidos experimentalmente pelo transdutor de deslocamento T3, mais o deslocamento devido ao peso próprio de 1,64 mm.

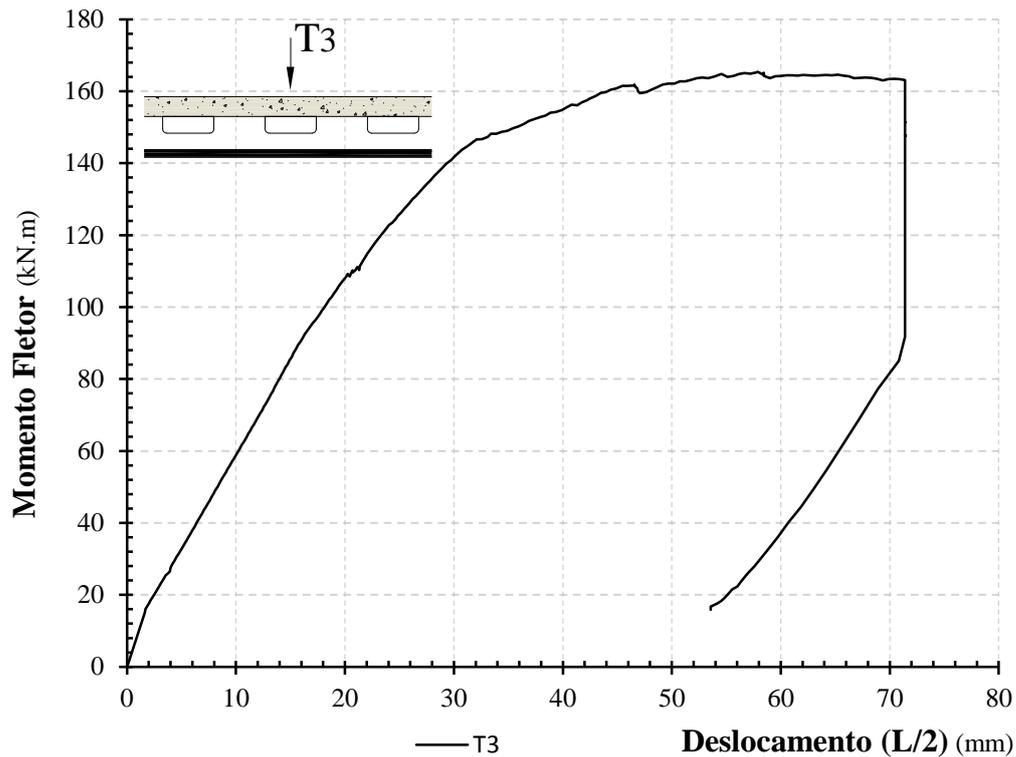


Figura 5.9 - Resultados viga mista VM-02: Momento Fletor x Deslocamento vertical no meio do vão.

Inicialmente, a viga VM-02 comportou-se elasticamente até atingir uma carga $2P = 79$ kN (aplicada pelo atuador). Neste instante, quando $M_f > 0,85 M_{m\acute{a}x}$, as deformações aumentam para um menor incremento de carga até a carga total imposta na viga de $2P = 95,5$ kN. Ao atingir uma carga de $2P = 60$ kN (ou um momento solicitante de $M_s = 110$ kN.m), é possível notar-se uma perda de rigidez da viga devido a acomodação da estrutura, já que esta carga foi mantida por 30 minutos. Entretanto, o protótipo conservou um comportamento elástico de acordo com o aumento de carga.

Os valores últimos de carga aplicada ($2P$), momento fletor solicitante (M_s) e deslocamento vertical (d) para cada fase do comportamento da viga mista, são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Dados experimentais do modelo VM-02.

Regime	2P kN	M_s kN.m	d mm
Elástico	79	140	30
Plástico	95,5	165	54-71

O patamar verificado na Figura 5.9 corresponde ao instante em que a carga ficou estabilizada, e a viga demonstrou um comportamento dúctil. Neste momento, o modelo atinge a carga máxima e desenvolve uma crescente deformação vertical para um nível de carga aproximadamente constante. Devido a este fato, o valor da deformação é apresentado em forma de intervalo na Tabela 5.2.

Após o descarregamento, a estrutura apresentou uma deformação residual de 54 mm, no meio do vão.

5.3.2. Comportamento e Fissuração

Como no modelo VM-01, só foi possível realizar a observação da fissuração na laje de concreto após o ensaio, por motivos de segurança.

No modelo VM-02, foi observado diversas fissuras no trecho central, ao longo da largura efetiva na face inferior da laje, como apresentado na Figura 5.10.

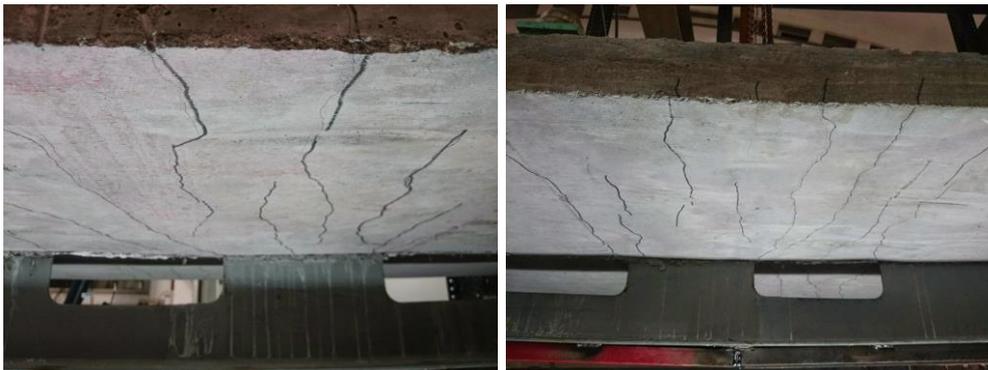


Figura 5.10 – VM-02: Fissuras no meio do vão de ambos os lados da laje de concreto.

Também, foram notadas fissuras longitudinais na face superior da laje próximo aos apoios. Na abertura, próximo à extremidade que obteve o maior deslizamento na interface aço-concreto, pode-se notar a ruptura do concreto junto à alma do perfil, como pode ser visto na Figura 5.11 (b) e (c).

Também, pode-se destacar que a fissuração é intensa na região central de flexão e pouco expressiva na região de cisalhamento constante (próximo aos apoios).

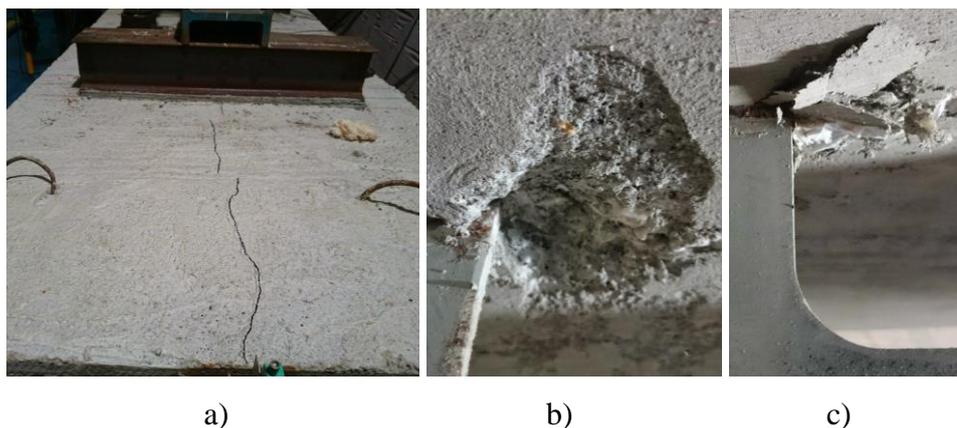


Figura 5.11 - VM-02: Fissuras na face superior da laje de concreto (a) e esmagamento do concreto na abertura próximo a alma do perfil metálico (b e c).

5.3.3.

Interface Aço-concreto e Comportamento da Conexão entre os Materiais

Para a medição do deslizamento na interface entre o aço e o concreto foram utilizados transdutores de deslocamentos (T2 e T4) posicionados horizontalmente nas extremidades da viga. A Figura 5.12 apresenta o gráfico momento fletor solicitante pelo deslizamento para cada transdutor.

Assim como no modelo VM-01, o deslizamento passa ser expressivo sob elevadas cargas, próximo da ruptura. Podendo considerar a ligação na interface aço-concreto como interação completa.

O deslizamento relativo entre a laje de concreto e o perfil de aço implica no aparecimento das fissuras longitudinais na laje. No protótipo VM-02 observou-se o aparecimento de fissuras próximo dos apoios. O início da fissuração pode ser compreendido como o limite no grau de interação completa da seção mista.

Durante a fase inicial do carregamento, o deslizamento medido nas duas extremidades é similar. À medida que a carga aplicada aumenta, foi observado diferença nos deslizamentos de um dos lados da viga. Na VM-02, a ruptura da solda entre os perfis U ocorreu próximo da extremidade onde os deslizamentos foram maiores, como observado no gráfico T4 da Figura 5.12.

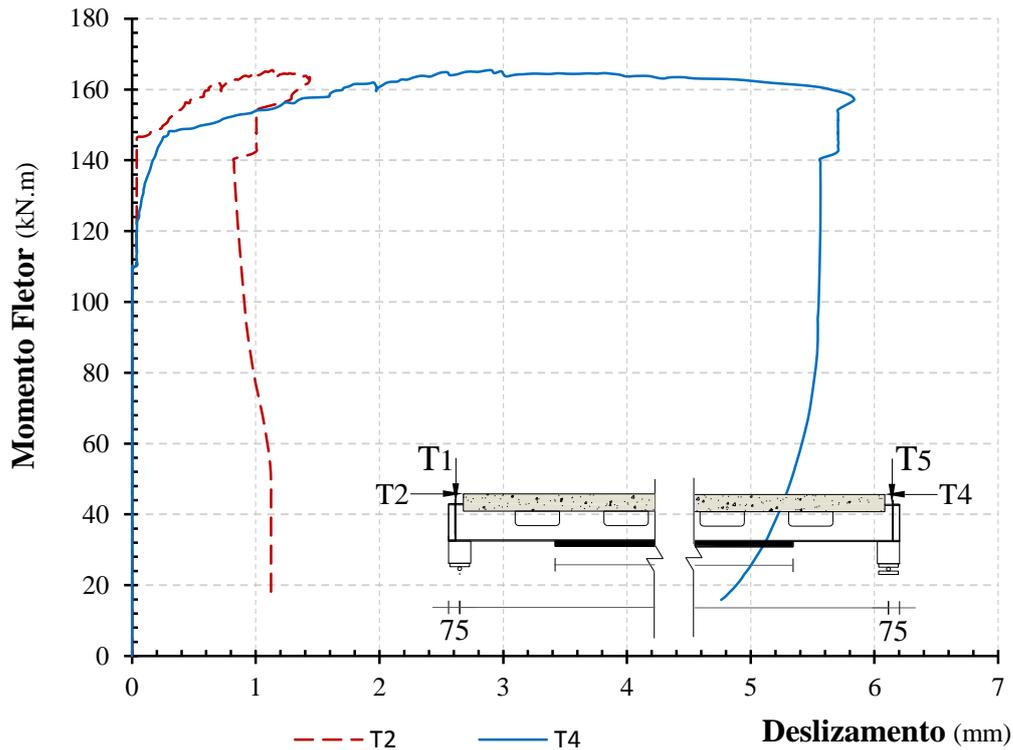


Figura 5.12 - Resultados viga mista VM-02: Momento Fletor x Deslizamento na interface aço-concreto.

Na Figura 5.13 é mostrado o posicionamento da solda entre perfis U, onde ocorreu a ruptura entre eles.

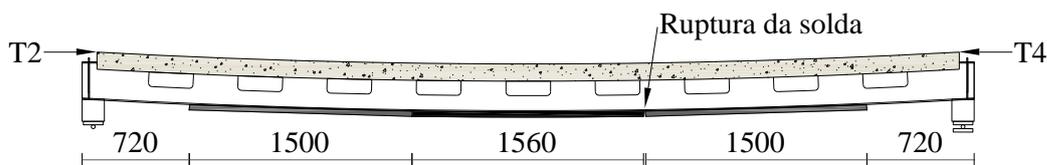


Figura 5.13 - Modelo indicando a posição da ruptura da solda na viga VM-02 (dimensões em mm).

Na viga mista VM-02 o deslizamento, em ambas as extremidades, iniciou-se próximo à carga (2P) de 83 kN e um momento solicitante correspondente de 147 kN.m. O deslizamento máximo registrado foi de 1,43 mm no transdutor T2 e de 5,8 mm no transdutor T4. Neste caso, não foi possível notar separação vertical entre o aço e o concreto.

5.3.4. Monitoramento das Tensões

Para a medição das deformações foram utilizados extensômetros uniaxiais no perfil nas regiões da mesa superior, mesa inferior e perfil U. A Figura 5.14 mostra o posicionamento de cada extensômetro.

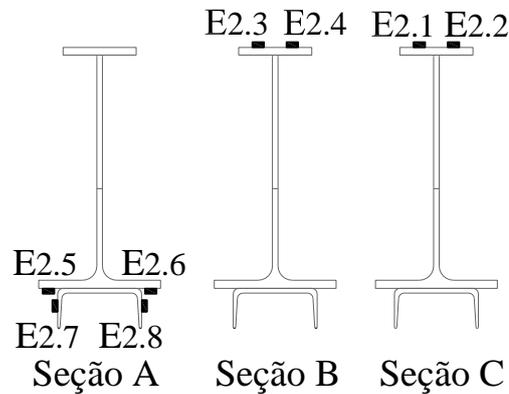


Figura 5.14 - Posicionamento e identificação dos extensômetros no protótipo VM-02 (ver localização das seções A, B e C na Figura 4.28).

A Figura 5.15 exibe os gráficos das deformações, medidas por cada extensômetro, em função do momento fletor produzido pela força (2P) (imposta pelo atuador). No gráfico também são traçadas as retas da deformação correspondente à tensão de escoamento dos aços A572 e A36.

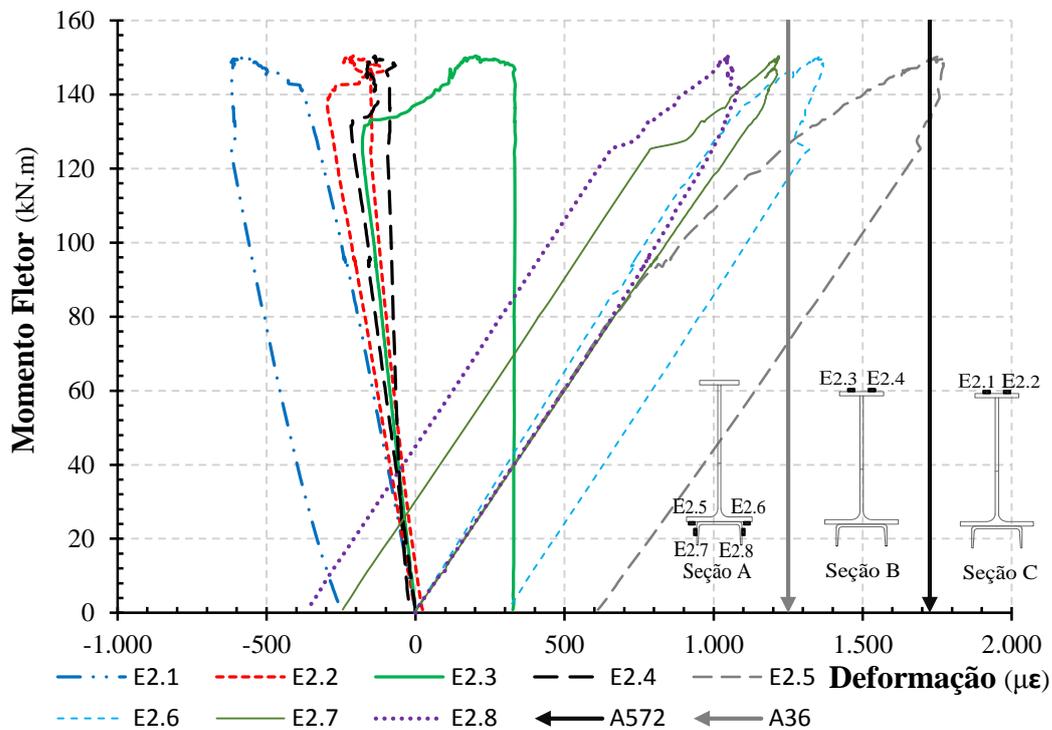


Figura 5.15 - Resultados do modelo VM-02: Momento Fletor x Deformação.

Com a média entre as deformações medidas pelos extensômetros posicionados na mesma linha (E2.1 e E2.2; E2.3 e E2.4; E2.5 e E2.6; E2.7 e E2.8) foi possível determinar a tensão atuante utilizando a lei de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), onde $E = 200000$ MPa. Na Figura 5.16 a abcissa do gráfico representa o momento fletor solicitante e a ordenada ilustra as tensões. Com base na análise dos resultados apresentados nesta figura, pode-se concluir que a mesa inferior do perfil foi submetida a tensões de tração e as chapas superiores a tensões de compressão.

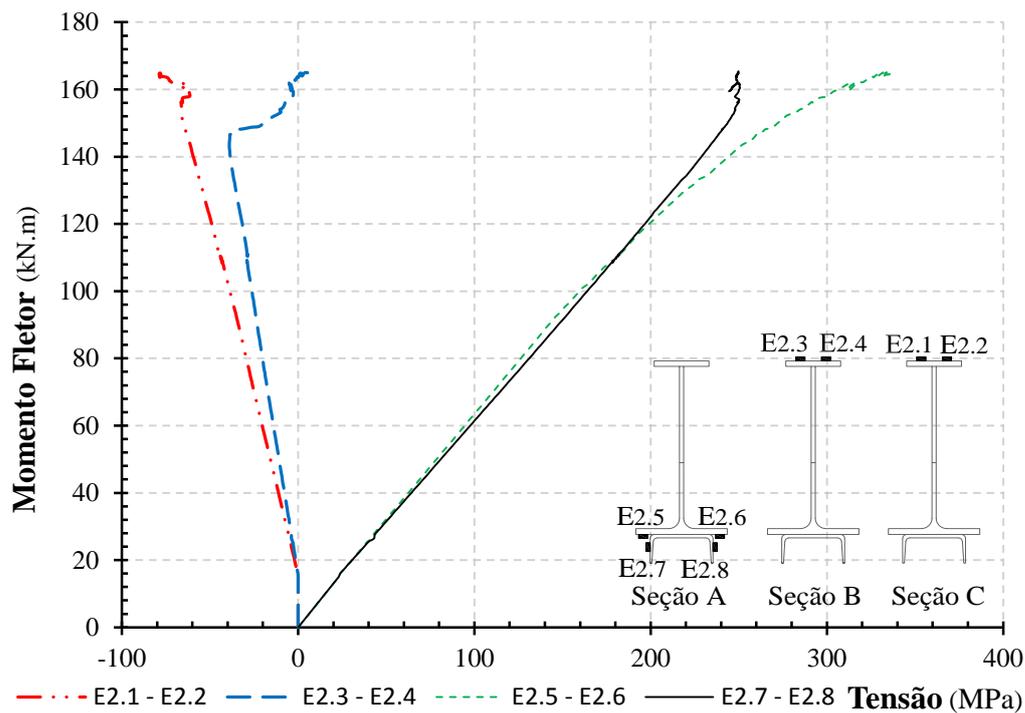


Figura 5.16 - Modelo VM-02: Momento Fletor x Tensão.