

4

Caracterização dos Ensaios Experimentais

Neste capítulo tem-se como objetivo a descrição do planejamento dos ensaios experimentais, os exemplos de projeto e a tentativa de caracterização do caminho da transmissão de esforços em ligações viga-coluna semi-rígidas mistas em aço-concreto.

4.1

Introdução

Os ensaios experimentais em modelos estruturais em escala real, quando realizados em condições semelhantes às existentes na prática, constituem a melhor forma de aferição de resultados de modelos de cálculo analíticos ou numéricos.

De forma geral os modelos estáticos são realizados com o objetivo de estudar o comportamento de estruturas ou elementos estruturais, sob ações de caráter permanente que atuam geralmente no mesmo sentido, como o peso próprio e algumas sobrecargas.

Para cada modelo ensaiado apresenta-se a definição geométrica, a caracterização dos materiais utilizados, a instrumentação, os procedimentos de execução do ensaio e assim como alguns resultados e conclusões.

O programa de ensaios foi definido de forma a ser estudado o comportamento global de ligações limitadas pelos seguintes parâmetros:

- Ligações viga-coluna;
- Placa de extremidade estendida ou ajustada parafusada;
- Efeito da quantidade e espaçamento dos conectores de cisalhamento tipo stud;
- Ligações bilaterais, em cruz;
- Simetria geométrica e de carregamentos;

- Pilares de perfis laminados;
- Interação parcial e completa.

4.2

Escolha do Modelo Experimental

A região dos apoios onde ocorrem momentos negativos, especialmente em vigas contínuas, Figura 4.1, é um tópico de intermináveis discussões, devido ao grande número de variáveis envolvidas neste mecanismo de transmissão de esforços, o qual é constantemente utilizado em projetos. Assim, com a finalidade de analisar o verdadeiro comportamento desta região de momentos negativos, propõem-se dividir este sistema em diferentes componentes de maior influência.

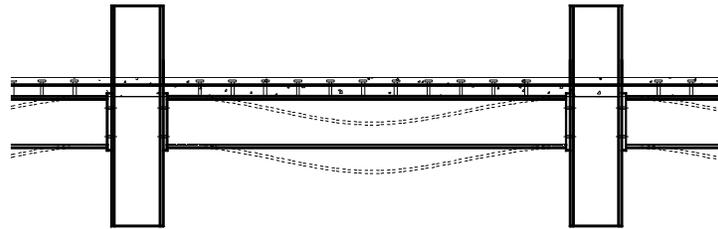


Figura 4.1 - Viga contínua.

As principais componentes, que podem ser observadas na Figura 4.2, são: laje de concreto, as barras da armadura e os conectores de cisalhamento, componentes estas ainda pouco estudadas.

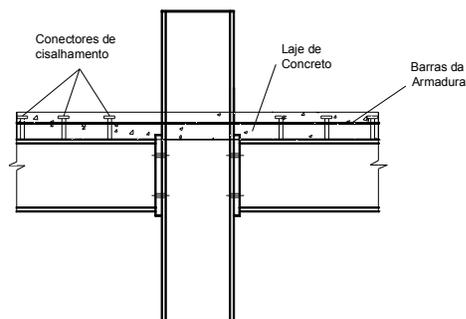


Figura 4.2 - Elementos de composição da região de momento negativo.

Este estudo parte do princípio que existe uma trajetória de transmissão dos esforços. Este caminho inicia-se na mesa da viga e fixa-se através da solda do conector de cisalhamento, passando para o concreto, onde ocorre à interação entre estes dois componentes. Esta trajetória prossegue do concreto para as

barras de armadura, ocorrendo novamente interação entre estes últimos componentes. Por fim passa-se a atuação propriamente dita das barras da armadura. Esta trajetória de transmissão de esforços possui pontos ainda sem uma caracterização do desempenho estrutural, ou seja, sem uma coerente avaliação do equilíbrio e estabilidade do comportamento, Figura 4.3.

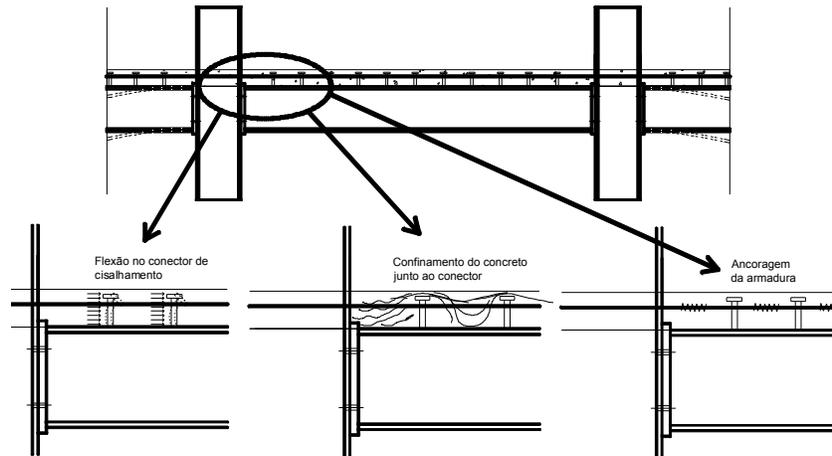


Figura 4.3 - Componentes da região de momento negativo.

Cada uma das componentes, ou variáveis que são representadas na Figura 4.3, possui inúmeros possíveis níveis de variações que influenciam direta ou indiretamente no seu comportamento.

4.2.1

Caracterização das Principais Variáveis

Inúmeras variáveis existem na região de momento negativo, mas entre elas existem as que mais influenciam o comportamento estrutural. A seguir será listada cada uma das componentes, e algumas das suas principais variáveis de influência, com suas características mais comumente utilizadas na construção.

O conector de cisalhamento possui entre suas diversas variáveis o diâmetro, sua altura e seu posicionamento que está influenciado diretamente pelo primeiro e segundo conector, separados longitudinalmente e também lateralmente, podendo também ser distanciados das barras da armadura.

As barras de armadura têm sua variabilidade significativa na sua quantidade, diretamente relacionada com a seção transversal, espaçamento entre as mesmas e conseqüentemente o seu diâmetro. Também podem ser

citadas outras variáveis como o comprimento de ancoragem, o tipo de aço e o tipo de barra, podendo ela ser lisa ou com corrugações.

A laje de concreto entre suas principais variáveis pode-se destacar sua geometria como a largura, o comprimento e a espessura. Uma propriedade mecânica que possui forte influência é a sua resistência, representada através de sua resistência característica a compressão, F_{ck} .

O perfil metálico, elemento de ligação da laje pode ser diretamente influenciado por meio da ligação do conector de cisalhamento através da solda. Esta solda pode variar de acordo com a espessura da mesa deste perfil, e também como a quantidade de conectores soldados a esta mesa.

De forma a avaliar a influência destas variáveis no comportamento das componentes dentro deste sistema de ligação semi-rígida mista, propõe-se alguns ensaios experimentais que buscam isolar cada uma das componentes, identificando seu real comportamento.

A trajetória de transmissão de esforços que é o objetivo deste trabalho pode ser descrito nos parágrafos abaixo em suas diversas fases.

Na fase inicial, descrita como FASE 1, onde ocorre o deslizamento entre a viga de aço e a laje de concreto para a acomodação dos elementos até o início das tensões ao longo destes elementos. Nesta fase ocorre a ruptura da ligação química entre a laje de concreto e a mesa da viga metálica, sem que ocorram fissuras na laje e solicitações significativas nas barras de armadura.

Num segundo momento, FASE 2, sucede a interação entre a laje de concreto e o conector de cisalhamento, ocorrendo o início de tensões significativas nestes elementos. Na laje de concreto surgem as primeiras fissuras transversais ao perfil metálico. A armadura adapta-se a solicitação de tração através da ancoragem. Devido ao deslizamento da laje de concreto, ocorre a compressão do concreto sob o conector passando a existir bulbos de tensões em torno do conector de cisalhamento.

A terceira etapa, FASE 3, onde ocorre a interação completa ou total do concreto da laje e as barras de armadura. A laje de concreto encontra-se totalmente sob fissuras estabilizadas, que ocorrem na linha transversal aos conectores de cisalhamento. Os bulbos de tensões do concreto em torno dos conectores de cisalhamento estão completamente caracterizados, solicitando o

conector a esforços de flexão, cisalhamento e arrancamento, impedindo que a laje de concreto separe do perfil de aço.

Na última e quarta fase, a laje de concreto encontra-se num grau de fissuração que não mais contribui para a rigidez em conjunto com as barras de armadura, fazendo com que a resistência desta região seja reduzida somente a seção da armadura contribuinte, que em seguida inicia o processo de escoamento com perda da aderência com o concreto e logo após ocorre à ruptura.

4.2.2

Caracterização das Variáveis Avaliadas

Levando-se em conta o que foi comentado nos parágrafos anteriores, apresentam-se na Tabela 4.1 as variáveis que mais influenciam no comportamento da ligação mista e assim como alguns níveis de utilização das mesmas. Isto foi feito visando determinar o número de experimentos que seriam gerados para combinar todas as variáveis em seus níveis pertinentes.

Tabela 4.1 – Primeira descrição das componentes e as suas características mais comuns.

Armadura		Conectores		Vão	Concreto	
Tipo de aço	Quant./Diam.	Esp. Entre Conect. [mm]	1º Pos. Conect. [mm]	[mm]	tc [mm]	Resist. [MPa]
tipo 1	2 ϕ 16	200	200	7000	100	15
tipo 2	4 ϕ 16	250	300	8000	110	20
	2 ϕ 20	300	400	9000	120	30
	4 ϕ 20	350	500	10000	130	40
		400	600			50
		450				
2	4	6	5	4	4	5

Número de Experimentos: **19200**

A combinação de todas variáveis e seus níveis gera uma quantidade de ensaios desproporcional, de forma que é necessária a redução destes elementos para que se alcance uma quantidade coerente de ensaios.

A Tabela 4.2 apresenta uma segunda tentativa com um número reduzido de variáveis e níveis de modo que a redução dos experimentos ainda não se mostra adequado.

Tabela 4.2 – Segunda descrição das componentes e suas características comuns.

Armadura	Conectores		Concreto	
	Quant./Diam.	Esp. Entre Conect. [mm]	1º Pos. Conect. [mm]	Espessura [mm]
2 ϕ 16	200	200	100	15
4 ϕ 16	300	250	110	20
2 ϕ 20	400	300	120	25
4 ϕ 20	450	400	130	30
4	4	4	4	4

Número de Experimentos:

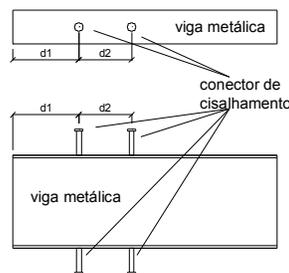
1024

Uma nova organização para os ensaios gera uma tabela com as principais componentes mais significativas, Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Descrição final das componentes e as suas características mais comuns.

Armadura			Concreto Resistência	Conector		
Comprimento [mm]	Quantidade [und]	Diâmetro [mm]	Fck [MPa]	d1 [mm]	d2 [mm]	Quantidade [und]
$d1 + d2 + d2$	2	16	20	100	100	3
$d1 + d2 + d2$	4	20	30	200	250	2

O comprimento da armadura é calculado através da combinação do espaçamento dos conectores, Figura 4.5, representados pela distância da face externa da mesa do pilar até do primeiro conector, $d1$, e do espaçamento entre os próprios conectores, $d2$.

Figura 4.4 – Padrão para espaçamento dos conectores ($d1$ e $d2$)

De forma a criar uma série de experimentos com uma quantidade reduzida de ensaios apresenta-se um método conhecido como Projeto Robusto, desenvolvido por Genichi Taguchi [24], [25] e [26]. Da década de 1950 em

diante, Taguchi desenvolveu uma metodologia que utilizava a aplicação de métodos estatísticos objetivando melhorar a qualidade dos produtos manufaturados, que realiza uma distribuição coerente das variáveis dentro de seus níveis, através de arranjos de combinação, representados por matrizes. A matriz ou arranjo utilizado no qual se encaixa estas variáveis selecionadas e seus respectivos níveis é apresentada abaixo, na Tabela 4.4. A tabela descrita abaixo é referida como 2^7 , que representa sete variáveis com dois níveis cada, para uma série de oito ensaios. O arranjo adotado apresenta oito ensaios, os quais abrangem de forma homogênea as variáveis da Tabela 4.3.

Tabela 4.4 - Matriz de combinações do arranjo 2^7 (L8).

Combinações	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4	Variável 5	Variável 6	Variável 7
1	1	1	1	2	2	2	2
2	1	2	2	2	2	1	1
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	1	1	1	1	1	1
5	2	2	1	1	2	2	1
6	2	1	2	1	2	1	2
7	2	1	2	2	1	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fazendo a conversão da Tabela 4.4 para forma das variáveis e seus níveis reais, é obtida a Tabela 4.5, apresentada abaixo.

Tabela 4.5 – Matriz de combinações resultante com as variáveis e níveis.

Comb.	Armadura			Concreto	Conector		
	Comprimento [mm]	Quantidade [und]	Diâmetro [mm]	Fck [MPa]	Espaço 1 [mm]	Espaço 2 [mm]	Quantidade [und]
1	650	2	16	30	200	250	2
2	500	4	20	30	200	100	3
3	450	4	20	20	100	250	2
4	300	2	16	20	100	100	3
5	650	4	16	20	200	250	3
6	500	2	20	20	200	100	2
7	450	2	20	30	100	250	3
8	300	4	16	30	100	100	2

A partir desta combinação de variáveis podem ser realizadas variações desta tabela, onde alguns modelos de confinamento da laje são propostos. Estes

modelos de confinamento buscam representar a continuidade da laje de concreto como ocorre em estruturas tradicionais, mas aplicada em elementos de escala reduzida, através de contenções em torno de todo o seu contorno ou parcialmente

São propostos quatro níveis de confinamento para estes ensaios. Inicia-se com o confinamento total, e partir daí apresenta-se o confinamento parcial, sem confinamento e avaliação do comprimento de ancoragem da armadura, que serão explicados detalhadamente a seguir.

4.3

Projeto dos Modelos Experimentais

A escolha do modelo experimental iniciou-se a partir do estudo das variáveis envolvidas de maior influência, através da redução do número de ensaios e por fim um ensaio em escala real.

De modo a estudar o comportamento destes elementos de uma forma individual, propõem-se experimentos em pequena escala, representando todos os ensaios conforme o arranjo de Taguchi apresentado na Tabela 4.3.

O modelo experimental inicial pode ser representado através da Figura 4.5, onde podem ser observados os seus principais componentes como: laje de concreto, barra de armadura, conectores de cisalhamento e por fim, o perfil metálico.

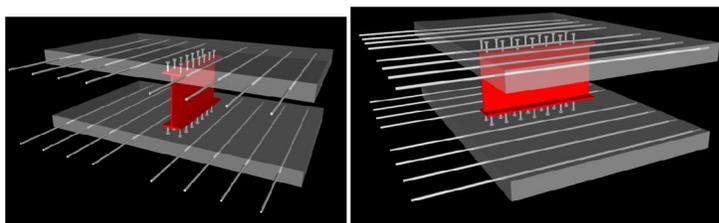


Figura 4.5 – Principais elementos que compõem o ensaio inicial.

Com o modelo experimental definido, deve-se apenas adaptá-lo aos modelos experimentais de confinamento já descritos anteriormente. O projeto experimental parte da idéia de avaliar a região de momento positivo da viga

mista, adequando o experimento às suas necessidades a partir do ensaio de push-out.

O ensaio busca simular, ou reproduzir, a região de momentos negativos, onde ocorrem fissuras, devido à tração no concreto da seção mista. Desta forma transforma-se o ensaio push-out criando um ensaio de arrancamento pull-out usando as barras de armadura, de modo que o concreto das lajes seja tracionado.

Pode ser observado na Figura 4.6 uma simulação do projeto em questão, onde as barras de armadura são fixadas externamente a estrutura da laje do pull-out, enquanto o atuador hidráulico empurra o perfil metálico.

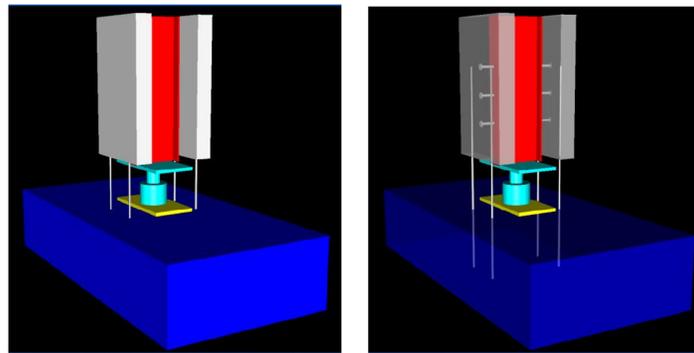


Figura 4.6 – Modelo Pull-out posicionado para ensaio.

4.3.1

Projeto dos Ensaios de Pull-out

O ensaio comentado anteriormente e apresentado na Figura 4.6, busca determinar a situação que mais se adapta às condições reais da laje de concreto.

Os modelos de pull-out subdivididos pelos modos de confinamento serão comentados e apresentados de maneira gráfica de acordo com o nível de confinamento, Figura 4.7. Os modos de contenção ou confinamento do concreto são de dois tipos, os laterais e os longitudinais, que também podem ser combinados.

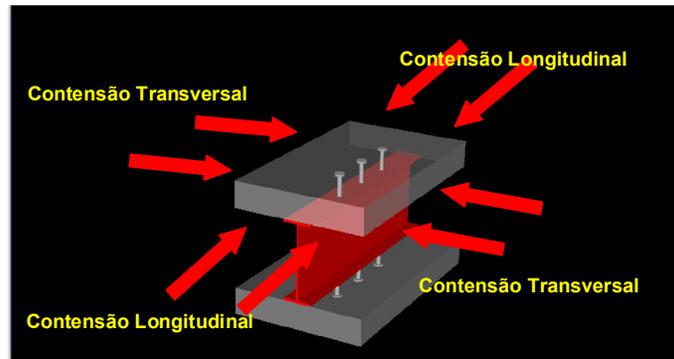


Figura 4.7 – Sistema de contenção

Nas Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, são representados de modo real o verdadeiro travamento, que é simbolizado na Figura 4.7 por meio de setas e textos. Esta representação se faz através das placas de cor verde, as quais representam a forma de conter a expansão do concreto, buscando através de suas combinações a forma mais próxima do comportamento da laje contínua.

4.3.1.1

Confinamento Total

Neste ensaio propõe-se apresentar o confinamento total, onde existirá uma contenção ou confinamento a laje de concreto na direção da ação do esforço de tração e lateralmente, já que em uma laje de concreto em situação real este efeito é muito maior que o modelo aqui proposto na Figura 4.8.

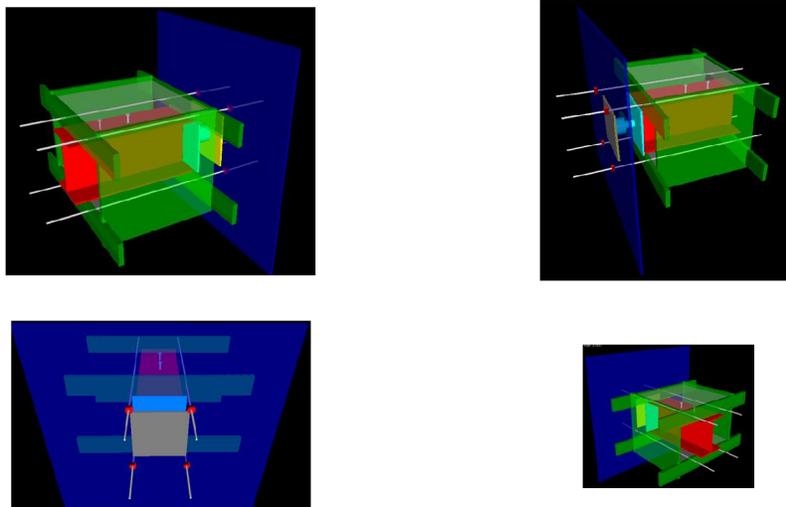


Figura 4.8 – Modelo Pull-out – Confinamento Total.

O confinamento total, constituído pelas placas de cor verde em torno das lajes de concreto, apresentado na Figura 4.8, buscam representar a continuidade da laje, a qual simula a existência de uma laje de largura e comprimento de modo a representar a continuidade em todas as direções laterais, situação encontrada na condição real.

4.3.1.2

Confinamento Parcial

A Figura 4.9, enfoca a continuidade da laje na direção longitudinal do elemento, ou seja, na direção da ação de tração, diferente do modelo anterior, não possuirá mais a contenção lateral.

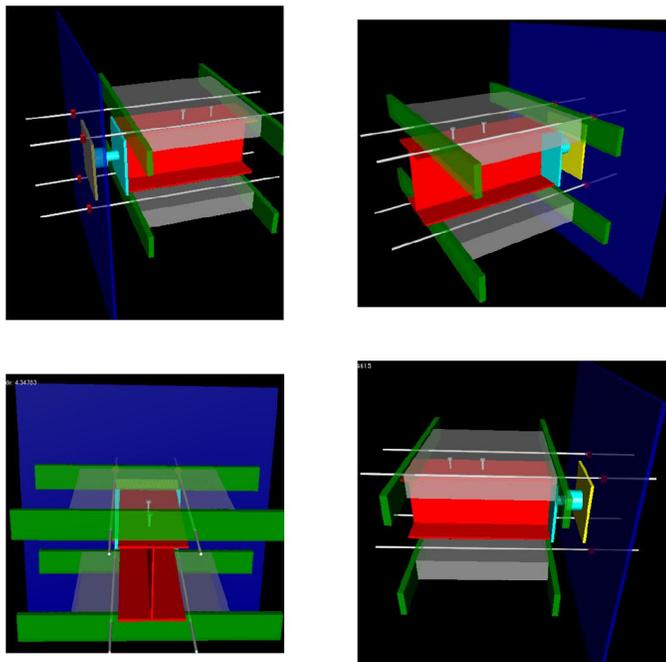


Figura 4.9 – Modelo Pull-out – Confinamento Parcial.

4.3.1.3

Sem Confinamento

Este modelo considera que a continuidade da laje não influencia no comportamento deste ensaio experimental, Figura 4.10, sendo assim, o modelo é aberto em todas as direções laterais e longitudinais, livre de qualquer tipo de confinamento ou contenção.

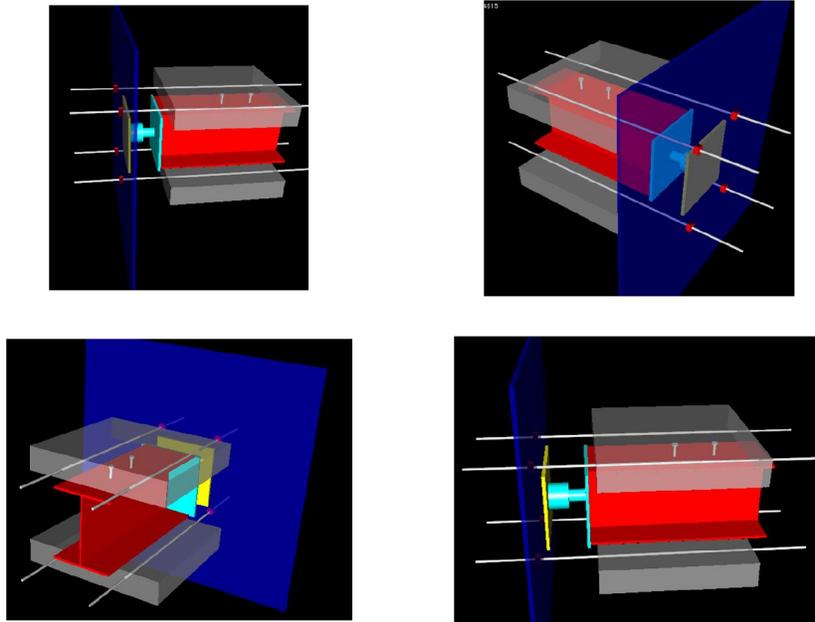


Figura 4.10 – Modelo Pull-out – Sem Confinamento

4.3.1.4

Ancoragem da Laje

Este modelo parte do princípio do não confinamento como descrito no modelo anterior. No entanto, ele tem o objetivo de calibrar a formulação para a resistência de ancoragem sem a solicitação dos conectores de cisalhamento, mas dentro das limitações das variáveis e seus níveis apresentados na Tabela 4.5. Na Figura 4.11 é apresentado o ensaio de ancoragem na armadura, onde se faz a aplicação de carga através do atuador hidráulico em toda a extensão da extremidade do perfil metálico, junto com a laje de concreto, os quais são empurrados, determinando assim a ancoragem da armadura e a resistência do conector.

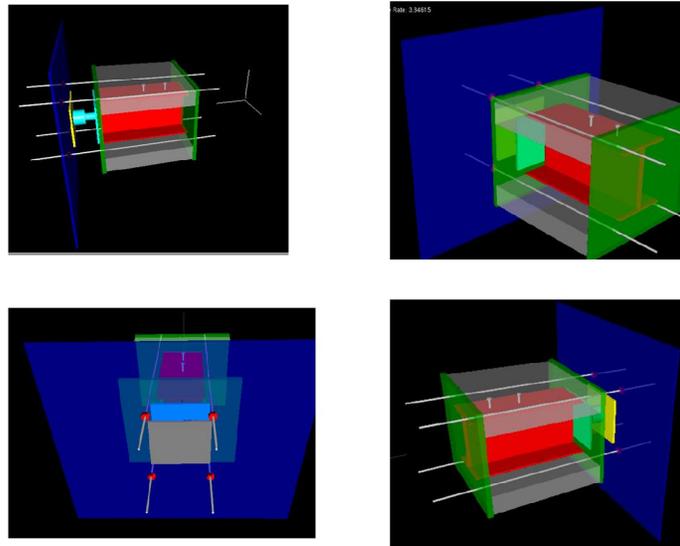


Figura 4.11 – Modelo Pull-out – Sem Confinamento, ancoragem e tração

Este sistema visa avaliar a componente do confinamento do concreto, buscando analisar a sua contribuição dentro deste conjunto de componentes. Focando na contribuição da ancoragem da armadura submetida à tração, juntamente com o conector avaliando sua resistência à flexão, cisalhamento e a resistência ao arrancamento caracterizado pelo ponto onde ocorre o deslizamento da armadura.

Nestes ensaios muitas variáveis podem ser trabalhadas, além das já comentadas. Pode ser destacado o posicionamento das barras de armadura, a sua quantidade e conseqüentemente sua seção transversal, variando diâmetro, seção transversal total e seu comprimento.

A distribuição dos conectores de cisalhamento é outra variável com elevado peso na soma de contribuições deste tipo de ligação, onde a distância entre o primeiro conector e a face externa da mesa do pilar delimita o primeiro assunto de discussão, assim podendo em seguida incluir a distância do segundo em relação ao primeiro conector.

Destaca-se também a largura de influência da laje, largura a qual a ligação mista utiliza da laje para resistir os esforços solicitantes.