

Contribuições do mecanismo das chaves de cisalhamento em ligações do tipo pilar-viga

Contributions of the shear key mechanism in column-beam connections

Rafael Leandro Ferreira

Leandro Vanalli¹

Resumo:

Embora o emprego das chaves de cisalhamento seja recomendado pela NBR 9062:2017, pouco é informado sobre seu dimensionamento e aplicação na interface dos elementos de ligação semirrígida do tipo pilar-viga. Assim, estudos estão sendo desenvolvidos nacionalmente, buscando compreender a influência do mecanismo das chaves bem como determinar quais parâmetros devem ser observados quando da sua utilização. Neste trabalho são demonstrados resultados obtidos em pesquisas que comprovaram que as chaves de cisalhamento aumentam a resistência das ligações, bem como promovem o alívio das tensões transferidas aos consolos e o incremento significativo da contribuição ao panorama das fissurações, evitando escorregamento entre as peças, com o emprego de almofadas de elastômero como material de apoio.

Palavras-Chave: Chaves de cisalhamento — Ligações semirrígidas — Ligação pilar-viga

Abstract:

Although the use of shear keys is recommended by NBR 9062:2017, there is little information about its sizing and application in the interface of the elements of a pillar-beam-type semirigid connection. Thus, several studies are being developed nationally, seeking to understand the influence of the mechanism of keys as well as determining which parameters should be observed when they are in use. In this work, results obtained in studies that have proven that shear keys increase the strength of the connections are demonstrated, as well as they promote the relief of tensions transferred to concrete corbels and the significant increase in contribution to the cracking landscape, avoiding slipping between parts, with the use of elastomer pads as

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*

Centro de Tecnologia - Universidade Estadual de Maringá

Av. Colombo, 5790, Bloco E46, Maringá – PR, CEP: 87020-900, Brasil

*autor correspondente: rafaelferreira.ecivil@gmail.com

support material.

Keywords: Shear keys — semi-rigid connections — column beam connection

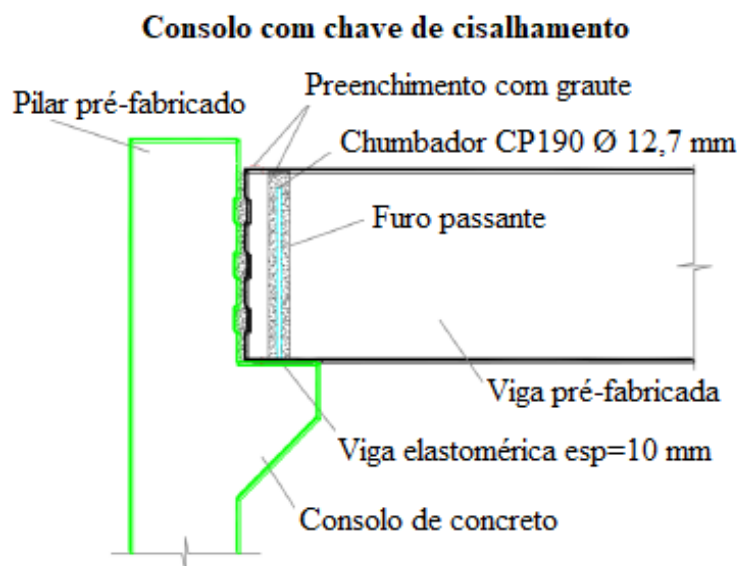
1. Introdução

Coligando conceitos de modulação, produção em massa e controles de qualidade mais rigorosos, usualmente as estruturas em concreto pré-moldado são compostas por elementos construtivos individuais, executados fora do canteiro e que se conectam por diferentes tipos de ligações.

As ligações constituem o ponto mais crítico do projeto em concreto pre-moldado, pois consistem em regiões de descontinuidades em que a distribuição das deformações não é linear, e ainda com grande concentração de tensões, influenciando diretamente na execução dos seus elementos adjacentes, determinando assim o comportamento da estrutura como um todo. Ou seja, as ligações influenciam nos esforços, no dimensionamento das seções dos elementos, deslocamentos globais, deformações estruturais e também nos tipos de vinculação entre as peças (FALEIROS, 2018). E é através delas que são realizadas as transferências das tensões atuantes entre os elementos.

Sendo um dos componentes de ligação mais usuais nas obras em CPM, os consolos são elementos de apoio utilizados nas ligações do tipo viga-pilar, projetados em região onde ocorrem elevadas tensões de cisalhamento devido à redução da altura do elemento na região do apoio. Esses esforços de cisalhamento podem ser resistidos de forma parcial através do emprego da chave de cisalhamento, que consiste em um sistema de ranhuras localizado entre a seção transversal do elemento e a interface de ligação do sistema de apoio, transmitindo parte das forças diretamente ao pilar e aliviando o consolo. A Figura 1 apresenta um modelo de chave de cisalhamento.

Através de revisão bibliográfica, este trabalho tem o objetivo de analisar a influência da chave de cisalhamento na resistência de ligações do tipo semirrígida, sua contribuição para a aderência na região das juntas e bem como no alívio de tensões cisalhantes nos consolos de concreto pré-fabricado, abrangendo os parâmetros contidos nas recomendações das normas, além de análises numéricas e experimentais realizadas por pesquisadores do país, visando contribuir para o meio acadêmico para um melhor entendimento do comportamento das ligações com emprego das chaves de cisalhamento.

Figura 1 – Modelo de ligação pilar-viga com chave de cisalhamento

Fonte: Adaptado de Faleiros Junior (2018).

2. Fundamentação teórica

Nas ligações semirrígidas ocorrem transferências parciais das tensões entre os elementos da estrutura em concreto pré-moldado. Em regiões de descontinuidade, como os consolos, as tensões predominantes na interface dos elementos da ligação viga-pilar são as forças de cisalhamento. Araújo (1997) esclarece que os principais fatores a influenciarem a resistência da interface aos esforços de cisalhamento são a resistência do concreto, a aderência e a rugosidade da superfície de contato e também o emprego das chaves de cisalhamento.

A adesão constitui a primeira parcela resistente dos esforços em uma ligação, embora pouco contribua de forma efetiva. Assim se faz, pois ocorrem fissurações nos elementos à medida em que o carregamento é aplicado.

O comportamento rígido das chaves é prejudicado quando na presença de fissuração ou esmagamento no graute (material de preenchimento) ou na região mais solicitada (CEB – FIB, 2013). Ou seja, a transferência dos esforços na interface ocorre como resultado da perda da adesão entre as peças.

Após a máxima contribuição da adesão ser atingida, o atrito entre as peças é a próxima parcela resistente a atuar na ligação, promovendo um deslocamento relativo na interface dos elementos, sendo mais ou menos efetivo, a depender se a superfície é lisa ou possui rugosidades. Sendo assim, a rugosidade apresentada por uma das juntas contribui na transferência dos

esforços cortantes, mesmo se a peça apresentar estado de fissuração, sendo condição para isso que a compressão esteja presente em toda a interface de contato entre os elementos.

Quando a parcela resistente do atrito é superada pelos esforços de cisalhamento, a aderência mecânica passa a contribuir na resistência da ligação, garantida pela adequada taxa de armadura e também pelo emprego das chaves de cisalhamento. Assim, a ligação depende do atrito de cisalhamento entre as peças, já que a transferência do esforço cortante na interface através de uma fissura potencial acaba por ser resistida devido ao atrito ao longo desse plano quando há força de compressão normal através dessa fissura. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de atrito recomendados internacionalmente pela AASHTO, MAST e pelo PCI Design Handbook para diversas aplicações de concreto.

Tabela 1 – Coeficientes de atrito recomendados pela AASHTO, MAST e PCI Design Handbook

Aplicação do concreto	Coeficiente de atrito, μ		
	AASHTO	PCI Design Handbook	MAST
Concreto aplicado monoliticamente	1.4	1.4	1.4 - 1.7
Concreto aplicado sobre concreto endurecido com interface rugosa	1.0	1.0	1.4
Concreto aplicado sobre aço	0.7	0.6	0.7 - 1.0
Concreto aplicado sobre concreto endurecido de superfície lisa	-	0.4	0.7 - 1.0

Adaptado de Ibrahim *et al.* (2014)

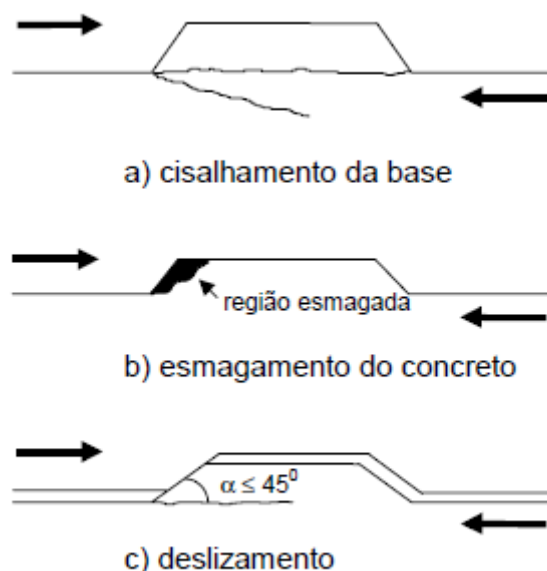
Ibrahim *et. al* (2014) explicam que a capacidade cortante de uma junta depende, portanto, da combinação do atrito entre as superfícies das peças e também da capacidade resistente ao cisalhamento do mecanismo das chaves, embora os modelos existentes nas recomendações da AASHTO e na German Recommendation muitas vezes negligenciem a sua contribuição.

É importante utilizar adequadas dimensões da chave de cisalhamento para garantir a correta transferência de esforços e assim, evitar a ocorrência de concentração de tensões. Araújo (2021) explica em sua tese que diversos autores demonstraram que o modo de ruptura das chaves de cisalhamento é função de suas dimensões, conforme a Figura 2.

As características da chave de cisalhamento (geometria, localização e o tipo do graute utilizado em seu preenchimento) podem influenciar no comportamento da ligação, atuando como uma restrição ao deslizamento entre os elementos da estrutura e tendo sua capacidade de resistência máxima ligada ao panorama de fissuração e também ao material de preenchimento

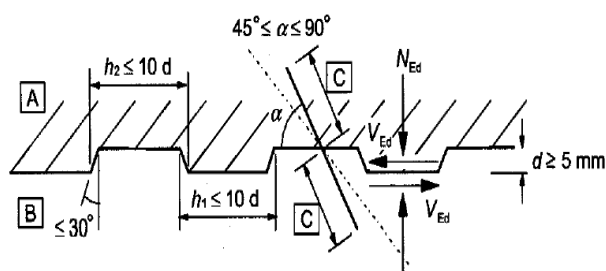
utilizado.

Figura 2 – Modos de ruptura das chaves de cisalhamento



Segundo o EUROCODE 2 parte 1-1, para que as chaves contribuam efetivamente no aumento da resistência ao cisalhamento, as rugosidades também devem respeitar certos preceitos, conforme explanado pela Figura 3.

Figura 3 – Requisitos mínimos das chaves de cisalhamento segundo o EUROCODE 2



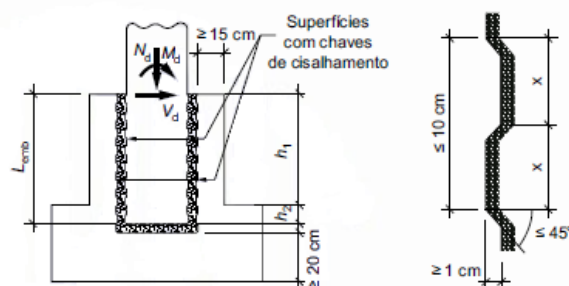
Fonte: EUROCODE 2 parte 1-1 (2013)

Assim, através da chave de cisalhamento os esforços cortantes concentrados no consolo podem ser mitigados, transferindo tensões provenientes da viga diretamente para o pilar através do atrito entre as juntas grauteadas, trabalhando como barreiras mecânicas e prevenindo deslizamentos significantes ao longo da junta.

O item 7.7.1.3 da NBR 9062:2017 apresenta detalhes de ligação pilar-fundação por meio de cálice utilizando superfícies com chave de cisalhamento, devendo esta apresentar profundidade mínima de 1 cm a cada pelo menos 5 cm, tanto na superfície interna do cálice quanto na base

do pilar, distribuídas ao longo de toda a altura de embutimento, conforme demonstrado pela Figura 4.

Figura 4 – Detalhe de cálice de interface com chaves de cisalhamento



Fonte: Adaptado de NBR 9062:2017

Faleiros Junior (2018) considera razoável afirmar que o comportamento da ligação pilar-viga seja diferente da pilar-fundação, já que nesta há o confinamento total de toda a região da chave-cisalhamento através da inserção de concreto na zona de ligação entre o pilar e o cálice de fundação. Uma vez que a NBR 9062:2017 permite e recomenda o emprego da chave de cisalhamento, mas não determina diretrizes para o seu uso nas ligações pilar-viga, estudos e ensaios vem sendo desenvolvidos para estabelecer a influência desse mecanismo na transferência dos esforços cortantes para o pilar e o alívio dos consolos nas estruturas de concreto pré-moldado.

3. Resultados em outras pesquisas

Serão apresentados neste capítulo os resultados de trabalhos experimentais realizados dentro do âmbito nacional, permitindo um panorama cronológico da abordagem do mecanismo das chaves de cisalhamento nos estudos realizados pelo país.

Tais experimentos possuem grande relevância devido ao crescente emprego de elementos pré-moldados dentro dos canteiros de obra, proporcionando de forma significativa os resultados da contribuição das chaves de cisalhamento na transferência dos esforços cortantes nas ligações do tipo pilar-viga em condições variadas e também operando fomento para novas pesquisas acerca dessa tecnologia e encontram-se disponíveis nos repositórios das respectivas instituições.

3.1 Araújo (2002)

Para o ensaio de cisalhamento direto, foram utilizados corpos de prova com superfície de

contato plana, com chaves de cisalhamento e, por fim, carregamento cíclico ou monotônico. Araújo (2002) determinou que a presença das chaves de cisalhamento na interface das ligações ocasionou um aumento de 250% na resistência da ligação, enquanto a rugosidade ocasionada pelas chaves aumentou a resistência da ligação em 165%, em comparação aos modelos com superfície plana e lisa. Na Figura 4 podemos observar o modelo de corpo de prova com a presença do mecanismo das chaves de cisalhamento utilizados nos ensaios por Araújo (2022).

Figura 4 – Detalhe do corpo de prova com a presença da chave de cisalhamento



Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2002)

As fibras metálicas utilizadas nos ensaios eram do tipo DRAMIX RL-45/30 BN com ganchos na extremidade, com comprimento de 30 mm, diâmetro de 0,62 mm, fator de forma 48, distribuídos nos dois volumes de fibras escolhidos: 0,75% e 1,50%, de acordo com o modelo de ligação estudado. Como as chaves foram confeccionadas com a mesma dimensão de 30 mm, o autor sugere que fibras mais curtas ocasionariam maiores ganhos de resistência na ligação. A variação da resistência à compressão do concreto de preenchimento da ligação foi um fator importante do ensaio, pois verificou-se que o aumento de 50 MPa para 100 MPa gerou um acréscimo médio de 35% na resistência das ligações com a presença das chaves de cisalhamento.

Os resultados para a força última das ligações com chave de cisalhamento sem adição de fibras apontaram uma redução de 13% para nichos espaçados em 28 cm, 22% para nichos espaçados de 42 cm e, por fim, 38% para os nichos com espaçamento de 56 cm, quando comparados aos modelos com chaves e adição de fibras.

A variação do intervalo entre os nichos também influenciou o comportamento da viga composta, ocasionando uma redução de 34% na força última da ligação com chave de cisalhamento e fibras, quando o espaçamento foi alterado de 28 cm para 56 cm sendo esta uma

perda menos acentuada que o modelo de viga com ligação plana e rugosa, que foi de 47%. O estudo aponta ainda que a resistência ao cisalhamento da ligação sofreu reduções inferiores quando realizadas as mesmas comparações, implicando que outros fatores podem influenciar no comportamento à flexão da viga com pequena quantidade de conectores.

O diâmetro do conector, quando alterado de 8 mm para 12,5 mm gerou um aumento de 37% na resistência da ligação nos modelos com a presença das chaves. Mas o autor destaca que a principal contribuição dessa variação da dimensão do conector se deu na absorção de energia pela ligação até a ruptura, uma vez que o deslizamento relativo da ligação foi gradativo também.

3.2 Oliveira JR (2012)

Oliveira Jr (2012) realizou ensaios para determinar a força máxima por chave-cisalhamento em elementos de ligação semirrígida tipo pilar-viga com adição de fibras de aço ao concreto pré-moldado. Nesta etapa foram utilizados corpos de prova monoótipos e com interface de concreto em fibras, inicialmente utilizando três chaves de cisalhamento, mas sendo posteriormente alterado para duas chaves, devido a limitação dos equipamentos de aplicação das cargas, que não conseguiram romper os modelos iniciais com três chaves.

Confirmando que a tensão normal à interface não influenciou os resultados, os valores médios foram calculados em modelos de concreto sem adição de fibras, modelos de concreto com 1% de adição de fibras e, por fim, modelos com 2% de adição de fibras. Os ensaios demonstraram um aumento de 8% na força máxima por chave, sendo independente do volume de fibras adicionado, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Força máxima por chave cisalhamento de acordo com o volume de fibras

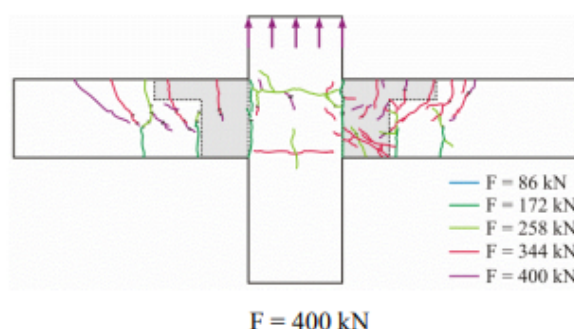
Modelo de concreto	Força máxima
Sem adição de fibras	111,31 kN
Adição de 1%	135,39 kN
Adição de 2%	144,11 kN

Embora o aumento da força máxima pela adição das fibras tenha sido pequeno, a ligação pilar-viga suportou até 641,53 kN sem romper pela tensão de cisalhamento, uma vez que foram empregadas 6 chaves-cisalhamento na interface do modelo analisado, com força máxima total de 812,34 kN (sendo 135,39 kN por chave).

Já a resistência ao cisalhamento (τ_c) média variou de 3,09 MPa a 5,44 MPa para modelos com 3 chaves e de 3,46 MPa para 10,22 MPa para os que apresentavam apenas 2 chaves, não

considerando a adição de fibras ao concreto na região e nem a influência da tensão normal da interface. Outro ponto importante é que, a adição de fibras acima de 2% não gerou acréscimos significativos da força de cisalhamento. O autor indicou que as dimensões da chave podem ser incompatíveis para a correta distribuição das fibras na região de preenchimento do concreto. O panorama de fissuração do modelo analisado indicou a formação de um mecanismo na ligação em que as forças originárias da armadura positiva são transferidas da viga para as chaves-cisalhamento sem passar pelas emendas da armadura, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Panorama de fissuração para modelo em concreto pré-moldado



Fonte: Adaptado de Oliveira JR (2012)

Os ensaios demonstraram que as tensões cortantes tiveram maior intensidade no meio do vão e não na ligação, com as chaves-cisalhamento contribuindo para que o modo de ruptura ocorresse por flexão, confirmando sua eficiência na transferência desses esforços do pilar para as vigas.

3.3 Soto (2013)

Em parceria com os pesquisadores Aguiar (2013) e Silva (2013), Soto (2013) estudou o comportamento de vigas reforçadas quanto ao momento fletor e também aos esforços de cisalhamento.

O primeiro método de reforço escolhido foi o do encamisamento da viga por meio da aplicação de uma camada adicional de concreto no substrato (face tracionada), com o emprego de armadura longitudinal e sem acréscimo de armadura na parte superior da viga (face comprimida).

Ao todo, foram analisadas dez vigas biapoiadas de concreto armado, com seções transversais de 150 mm x 350 mm e camada de reforço de concreto auto-adensável de 5 cm - na colaboração com Aguiar (2013), e 150 mm x 400 mm e camada de reforço de concreto auto-adensável de

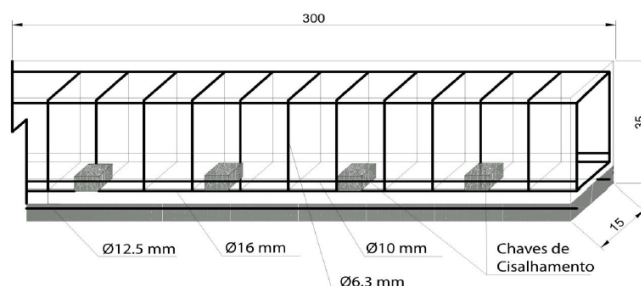
10 cm – na parceria com Silva (2013). As demais dimensões utilizadas foram as mesmas para ambas as análises: comprimento de 3000 mm, vão teórico de 2800 mm, além de taxas de armadura longitudinal e transversal idênticas.

A armadura longitudinal adotada nas peças antes do reforço foi composta por quatro barras de aço, sendo duas peças com diâmetro de 16 mm e duas com diâmetro de 10 mm. Para a armadura transversal foram empregados estribos de 6,3 mm de diâmetro com espaçamento de 12,5 cm e duas barras de 5 mm como porta-estribos.

Na pesquisa com Aguiar (2013), para as análises da contribuição das chaves de cisalhamento nas vigas reforçadas em regiões tracionadas, ainda foram acrescentadas duas barras longitudinais de 12,5 mm. Já para a colaboração com Silva (2013) foi acrescentada apenas a camada de reforço na região comprimida.

Segundo o autor, o objetivo dos ensaios era analisar a influência da existência das chaves de cisalhamento produzidas ao longo da ligação formada pelo contato entre o concreto do substrato e do reforço. Ou seja, determinar se esse mecanismo aumentaria a resistência aos esforços cortantes na interface entre elementos moldados em etapas distintas. A Figura 6 apresenta detalhes das vigas reforçadas com presença de chaves de cisalhamento utilizadas nos ensaios.

Figura 6 – Características das vigas com reforço e chaves de cisalhamento



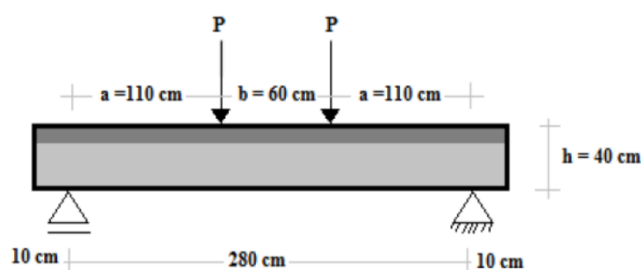
Fonte: Soto (2013)

Os procedimentos de preparo do substrato para receber a nova camada de reforço do concreto visaram obter ganho significativo na aderência entre as peças, confeccionadas em etapas diferentes. Isso se deve ao objetivo de garantir ao máximo as características de uma viga de comportamento monolítico, possibilitando maiores benefícios do reforço.

Para os ensaios foram utilizados dois esquemas de carregamento: no esquema “a” foram aplicadas duas cargas concentradas de mesma intensidade a 110 cm do eixo dos apoios, fazendo com que a viga sofresse flexão pura (sem esforços de cisalhamento); enquanto que no esquema

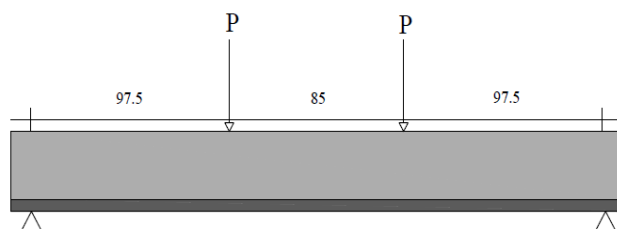
“b” também foram aplicadas duas cargas concentradas de mesma intensidade mas a 0,975 cm dos apoios. O autor explica que na colaboração com Aguiar (2013) os dois esquemas foram empregados, enquanto que na parceria com Silva (2013) somente o esquema “a” foi utilizado. O carregamento aplicado nos dois esquemas teve incrementos de 5 kN até o surgimento da primeira fissura nas peças, passando aí a ser de 10 kN. Para cada incremento fazia-se a leitura dos deslocamentos e deformações, realizando o ensaio até a ruptura das vigas. Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os dois esquemas de ensaio adotados.

Figura 7 – Esquema de ensaio “a”



Fonte: Soto (2013)

Figura 8 – Esquema de ensaio “b”



Fonte: Soto (2013)

As cargas de ruptura e os deslocamentos foram obtidos até o momento de ruptura das vigas. Assim, com os resultados obtidos nos ensaios, a capacidade resistente na parte tracionada da viga obteve melhor desempenho no modelo com a presença das chaves de cisalhamento, que teve sua capacidade portante aumentada em 58%. O autor destaca que a mesma viga ainda apresentou comportamento muito próximo do modelo de viga monolítica, chegando a 99% de sua resistência à ruptura.

Quanto ao aumento na aderência das peças, não houve contribuição significativa do mecanismo das chaves de cisalhamento na região tracionada. O autor acredita que isso se deve ao fato de

que o concreto adicionado na região de tração teve sua resistência desprezada já que o acréscimo de armaduras proporcionou maiores ganhos na capacidade portante.

Já para a face comprimida das vigas, o modelo que apresentou o menor acréscimo de carga em comparação à viga original foi também a viga com a presença das chaves de cisalhamento, com aumento de 46% de sua capacidade portante. Outro ponto importante destacado por Soto (2013) é que na região comprimida, aparentemente as chaves de cisalhamento proporcionaram aumento na aderência na região de preenchimento.

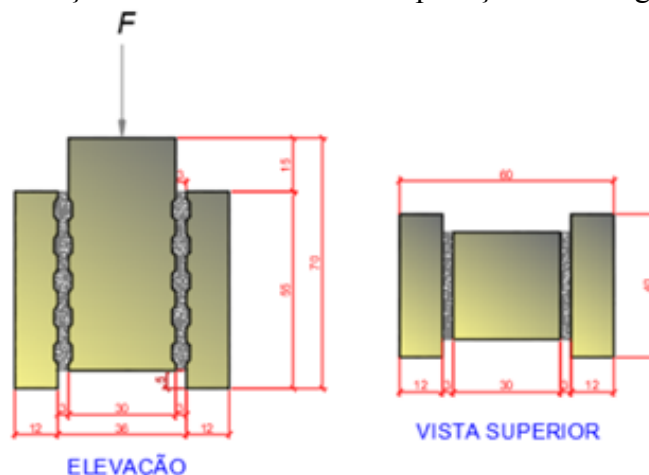
Garantida a aderência entre as camadas, pode-se afirmar que o reforço da viga através de encamisamento aliado ao emprego do mecanismo das chaves de cisalhamento pode aumentar a rigidez da peça e também proporcionar comportamento muito próximo de uma viga monolítica entre os elementos da estrutura e tendo sua capacidade nas mesmas condições.

3.4 Faleiros Junior (2018)

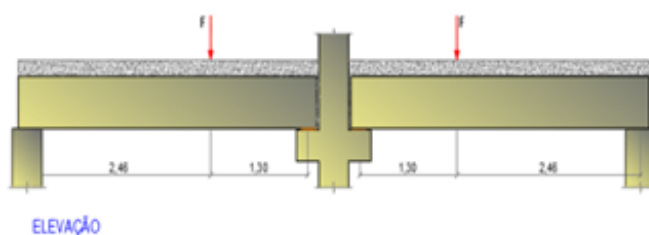
Faleiros Junior (2018) realizou ensaios de cisalhamento direto para verificar o comportamento de ligações pilar-viga semirrígidas com a presença de chaves de cisalhamento.

O comportamento semirrígido da ligação se dá através do emprego de consolo, rugosidades na interface das peças (chaves de cisalhamento) e, por fim, por adição de armadura negativa do tirante do capeamento. Assim, foi garantida a transferência dos esforços verticais (cisalhantes) da ligação. Para determinar a contribuição do mecanismo das chaves, os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em dois modelos de corpos de prova, sendo um modelo para a verificação da resistência da rugosidade na interface dos elementos de uma ligação do tipo pilar-viga (PR e PE) e um pórtico com ligação semirrígida no pilar central com carregamentos provenientes dos dois lados e presença de elastômero (PCD), conforme demonstrado nas Figuras 9 e 10.

Nos modelos tipo PR e PE, através dos ensaios de cisalhamento direto constatou-se que, conforme o carregamento se intensificava, surgiram fissuras inclinadas na região de preenchimento (graute) e a formação de um caminho da biela de compressão por meio das rugosidades internas (chaves) presentes nos pilares. Verificou-se também que as tensões de cisalhamento máximas na interface dos elementos da ligação chegaram a 1400 kN/m^2 nos dois modelos analisados, sendo superiores ao máximo de 1000 kN/m^2 (1 MPa) indicado pelo EUROCODE 2. Assim, o autor aponta para o conservadorismo aplicado ao dimensionamento destes elementos de ligação, embora o modelo estivesse confinado e sem ocorrência de momentos fletores e tensões de tração.

Figura 9 – Simulação do modelo PR e PE e aplicação do carregamento

Fonte: FALEIROS JUNIOR (2018)

Figura 10 – Simulação do modelo de pórtico PCD, com aplicação do carregamento

Fonte: FALEIROS JUNIOR (2018)

Para o modelo de pórtico PCD com ligação semirrígida no pilar central, com o acréscimo do carregamento a partir de 90 kN no ponto de aplicação, ocorreu fissuração na parte superior da interface pilar-viga e posteriormente o descolamento do material de preenchimento na parede do pilar nas chaves de cisalhamento superiores, quando a carga atingiu 290 kN.

Quanto às aberturas máximas, o modelo PCD apresentou fissuras de 2,64 mm quando aplicada a força máxima de 800 kN. Assim, o ensaio demonstrou que as paredes de contato entre o material de preenchimento e o concreto das peças apresentaram condições resistentes favoráveis, uma vez que não ocorreu nenhum tipo de escorregamento das chaves de cisalhamento.

Por fim, isolando as parcelas totais resistidas pelos componentes da ligação semirrígida, do efeito pino da barra do tirante e do consolo, a contribuição das chaves de cisalhamento foi de 220,12 kN em uma força resistente total na ligação de 538,40 kN, aliviando assim 40,88% dos esforços no modelo analisado (PCD).

O autor destaca também a importância do tipo de aparelho de apoio utilizado na ligação, já que

a almofada do tipo elastômero permite a mobilização dos esforços e torna efetiva a contribuição das chaves de cisalhamento, o que não ocorre em aparelhos de apoio do tipo chapa de aço, que não sofrem deformações, tornando a ligação rígida e a transferência dos esforços sendo realizada diretamente da viga para o consolo.

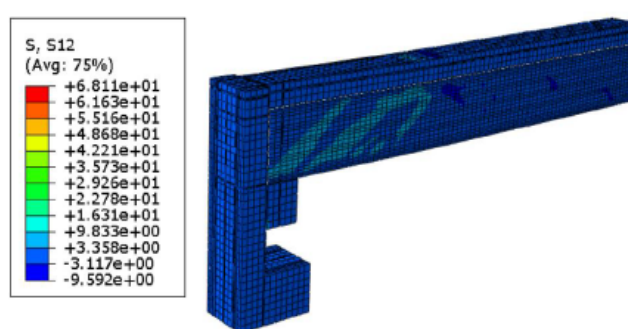
3.4 Chaves (2021)

Chaves (2021) utilizou a metodologia dos estudos realizados por outros pesquisadores, verificando a contribuição da chave de cisalhamento na transferência de esforços na ligação pilar-viga através de recursos numéricos da ferramenta computacional ABAQUS® e fundamentada no método dos elementos finitos.

Com base nos ensaios experimentais de outros autores, dentre eles Faleiros Junior (2018), o estudo procurou estabelecer parâmetros para os modelos numéricos da ligação semirrígida pilar-viga com escala real, estabelecendo assim, a contribuição efetiva das chaves de cisalhamento para as estruturas em questão.

A simulação numérica da ligação também permitiu a verificação da trajetória das tensões cortantes no modelo PCD com apoio de almofada de elastômero de Faleiros (2018). A Figura 11 demonstra que os esforços cisalhantes atingiram o mecanismo das chaves na interface do pilar, configurando assim alívio das tensões transmitidas ao consolo e, portanto, contribuição efetiva das chaves de cisalhamento.

Figura 11 – Tensões cortantes no modelo PCD com almofada em elastômero

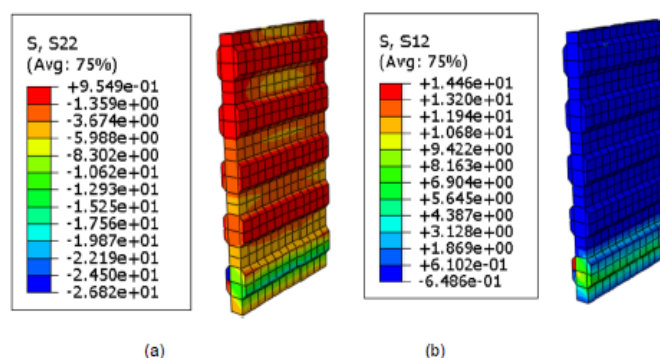


Fonte: Chaves (2021)

Para conseguir isolar os esforços resistidos pelo mecanismo das chaves de cisalhamento no modelo numérico, o autor fez uso do recurso *History Output* do ABAQUS®, e também de função interna para a soma das forças. Assim, encontrou o esforço total absorvido na interface da ligação e em seguida, o comparou com o modelo analítico de Faleiros Junior (2018).

As tensões normais e cisalhantes absorvidas pela chave de cisalhamento na interface pilar-viga, de acordo com o software ABAQUS® estão apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Tensões normais (a) e cortantes (b) na chave de cisalhamento



Fonte: CHAVES (2021)

A análise numérica demonstrou que o mecanismo das chaves absorveu um total de 204,18 kN (sendo 200,89 kN de forças normais presentes na face do pilar e 3,29 kN de forças cisalhantes), contra 220,12 kN para os mesmos parâmetros do modelo analítico tipo PCD com almofada elastomérica de Faleiros Junior (2018). Ou seja, 7,81% a menos que os modelos experimentais, comprovando a efetividade do mecanismo para o modelo analisado e também reforçando a necessidade dos coeficientes de segurança no dimensionamento das estruturas. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos de acordo cada modelo.

Tabela 3 – Esforços resistidos pelo mecanismo das chaves de cisalhamento

Esforço absorvido pelo mecanismo de chave de cisalhamento		
Modelo	Esforço Vertical (kN)	Diferença (%)
Númerico ABAQUS® (2017)	204,18	- 7,81
Númerico/ Analítico	278,47	+ 26,51
Experimental Faleiros Junior (2018)	220,12	-

Fonte: CHAVES (2021)

O autor também realizou a análise numérica para um dos ensaios de ligação semirrígida estudado por Haddade (2016). O modelo NCE apresenta almofada de apoio em elastômero do tipo Neoprene, chumbador, estribos e conta com as chaves de cisalhamento apenas na interface do pilar, conforme Figura 13.

Figura 13 – Modelo NCE com chaves de cisalhamento na interface do pilar



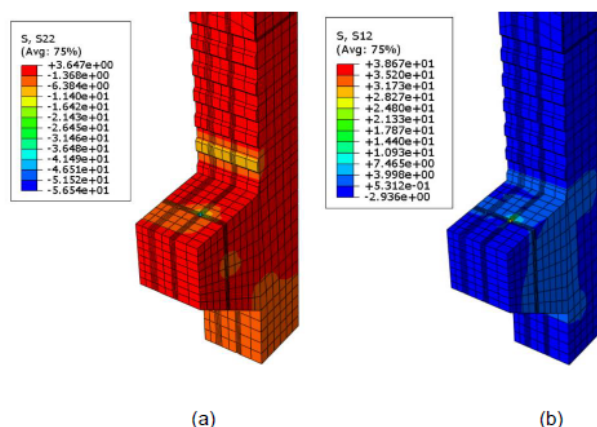
Fonte: Adaptado de Haddade (2016)

O autor realizou a modelagem numérica na ferramenta computacional ABAQUS® de acordo com os parâmetros apresentados no estudo original, utilizando no software elementos do tipo sólido para a ligação e seus constituintes: viga, pilar, almofada em elastômero de Neoprene, material de preenchimento e armadura negativa de continuidade. Já para o pino e demais partes das armaduras, foram utilizados elementos do tipo *wire* (fio).

Para simular o carregamento à compressão adotado na pesquisa de Haddade (2016), foram criadas duas etapas de carregamento: na primeira foi aplicada uma força de 7 kN na distância de $\frac{1}{4}$ do pilar mais a carga gravitacional de $9,81 \text{ m/s}^2$, e na segunda etapa uma carga de 110 kN sobre uma chapa metálica de 250 mm de diâmetro e 25 mm de espessura.

Utilizando novamente o recurso *History Output* para as forças normais e cisalhantes verticais mais o recurso interno para a somatória das forças, foi obtida uma reação de -10,73 kN, ou seja, não ocorreu contribuição alguma das chaves de cisalhamento. Chaves (2021) explica que isso ocorreu porque foram utilizadas apenas chaves no pilar e sem um par de mecanismos não se forma o binário de forças necessárias para o mecanismo trabalhar. A Figura 14 apresenta as tensões normais e cisalhantes na interface do pilar do modelo NCE.

Figura 14 - Tensões normais (a) e cisalhantes (b) na interface do pilar do modelo NCE



Fonte: Chaves (2021)

Com o objetivo de legitimar os resultados dos esforços das chaves de cisalhamento no modelo NCE, o autor utilizou procedimento similar ao do modelo PCD, em que foram isoladas as forças normais verticais com recurso da ferramenta computacional, integrando as forças transmitidas pela almofada de elastômero em Neoprene. Assim, a força vertical transmitida pelo material de apoio foi de 147,15 kN, do total de 220 kN que foram aplicados na análise numérica.

$$V_{pino} = 220 - (-10,73) - 147,15 = 83,58 \text{ kN}$$

Portanto, a armadura negativa efetivou uma mobilização de 83,58 kN, correspondente a 37,99% do esforço total.

Chaves (2021) afirma que essa análise é importante para demonstrar numericamente que não é qualquer mecanismo de chave de cisalhamento que absorve os esforços verticais. O autor conclui ainda que pelo fato das chaves de cisalhamento estarem presentes somente no pilar, não ocorreu a formação do binário de forças resistentes na interface da ligação e, consequentemente, não foram absorvidos os esforços verticais.

4 Conclusões

Através dos resultados obtidos pelos pesquisadores em seus respectivos trabalhos experimentais, pode-se afirmar que o objetivo desse trabalho foi alcançado, uma vez que ficou comprovado que o emprego das chaves de cisalhamento em ligações semirrígidas do tipo pilar-viga aumenta a resistência das ligações consideravelmente, promovendo parte do carregamento cortante diretamente da viga para o pilar e aliviando parcela significativa das tensões cortantes distribuídas aos consolos.

Como a utilização das chaves de cisalhamento é recomendada pela NBR 9062:2017, nota-se também que não há maiores indicativos de seu dimensionamento e aplicação nas ligações do tipo pilar-viga em Norma. Isso se deve talvez aos vários fatores a serem considerados quanto ao seu emprego nas estruturas de concreto pré-moldado, como o detalhamento da armadura negativa, uso de de almofadas de alastômero, conectores, espaçamento, intensidade do carregamento, resistência à compressão do concreto utilizado, adição de fibras, a variação da geometria dos elementos, dentre outros.

É importante ressaltar também as condições em que cada ensaio foi realizado, de acordo com o disposto pelos pesquisadores, estabelecendo condições algumas vezes ideais para a análise dos esforços aplicados nas ligações.

Quanto à aderência entre peças moldadas em etapas distintas, é possível concluir que as chaves de cisalhamento podem contribuir em regiões comprimidas, embora não tenha sido quantificado nos ensaios realizados.

Por fim, os resultados podem ser satisfatórios ao adicionar as fibras de aço ao concreto pré-moldado afim de incrementar a força máxima a ser resistida pelo mecanismo das chaves.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos pesquisadores citados nesse trabalho, por sua grande contribuição não somente ao avanço dos estudos das ligações e do mecanismo das chaves de cisalhamento, mas também ao promoverem e compartilharem seu conhecimento com os colegas de meio acadêmico.

Agradeço aos amigos da especialização, principalmente aos estimados engenheiros Gabriel Menezes e Lorena Lenzi, os quais tornaram essa trajetória muito mais estimulante.

Por fim, agradeço a todo corpo docente da Universidade Estadual de Maringá por levar adiante de forma primorosa o conhecimento de nossa amada engenharia, em especial ao meu orientador e coordenador do curso, Prof. Dr. Leandro Vanalli, por todo o auxílio e atenção a mim dispensados durante a especialização e ao Prof. Dr. Rafael Alves de Souza, por ter compartilhado seu conhecimento e inspirado o tema de minha pesquisa.

Referências

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos**

- preenchidos com concreto de alto desempenho.** São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002, 319p.
- ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão.** São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1997, 201p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR-6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 221p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9062:** Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017. 43p.
- CHAVES, R. J. S. **Análise numérica da contribuição da chave de cisalhamento em ligações viga-pilar com consolo e utilizando almofada elastomérica no apoio da viga.** São Carlos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021, 171p.
- FALEIROS JUNIOR, J. H. **Estudo experimental dos mecanismos resistentes das juntas com chave de cisalhamento em ligações pilar-viga.** São Carlos. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil). Universidade Federal de São Carlos. 2018, 194p.
- HADADE, M. Â. S. **Comportamento de ligações viga-pilar típicas com continuidade de armadura negativa em estruturas pré-fabricadas.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2016, Tese de Doutorado, 228p.
- IBRAHIM *et. al.* **Ultimate shear capacity and failure of shear connection in precast concrete construction.** Malaysia, 2014, Malaysian Journal of Civil Engineering 26(3). p.414-430.
- LACERDA, B. M. **Estudo numérico e experimental do comportamento de painéis duplos treliçados preenchidos com concreto moldado no local.** Uberlândia. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013, 180 p.
- OLIVEIRA JR. L. A. **Ligação viga-pilar em estruturas de concreto pré-moldado solidarizada por concreto com fibras de aço – análises estática e dinâmica.** São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2012, 255p.
- SOTO, R. C. **Reforço e recuperação de vigas de concreto armado.** Goiânia. Universidade Federal de Goiás, 2013. 73 p.

SOUZA, R. A. **Concreto estrutural**: análise e dimensionamento de elementos com descontinuidades. São Paulo. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. 2004, 379p.