

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

JOSÉ PENACHIO JÚNIOR

Avaliação da capacidade de carga no arrancamento de alças de içamento em lajes pré-  
moldadas de concreto

São Paulo

2019

JOSÉ PENACHIO JÚNIOR

**Avaliação da capacidade de carga no arrancamento de alças de içamento em lajes pré-moldadas de concreto**

**Versão Original**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Ciências.

Área de concentração: Estruturas de concreto

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Túlio Nogueira Bittencourt

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catálogo-na-publicação

Penachio Júnior, José

Avaliação da capacidade de carga no arrancamento de alças de içamento em lajes pré-moldadas de concreto / J. Penachio Júnior -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

92 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Estruturas de concreto 2. Alças de içamento 3. Peças pré-moldadas de concreto I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Mercia Maria Semensato Bottura de Barros pelo conhecimento técnico e ajuda constante nos ensaios de laboratório e paciência na elaboração dos relatórios.

À construtora HM Engenharia do Grupo Camargo Corrêa pelo financiamento na minha especialização em estruturas de concreto e apoio na produção dos corpos de prova.

À FDTE (Fundação para o desenvolvimento tecnológico de engenharia) pela bolsa de estudos.

Ao corpo técnico do Hall Tecnológico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo do prédio da Engenharia civil pela ajuda na execução dos ensaios.

## RESUMO

PENACHIO JÚNIOR, José. **Avaliação da capacidade de carga no arrancamento de alças de içamento em lajes pré-moldadas de concreto.** 2018. Dissertação (mestrado em Engenharia civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Nesta dissertação, as alças de içamento de lajes pré-moldadas utilizadas em obras residenciais foram caracterizadas e ensaiadas à tração com o propósito de integrá-las ao sistema produtivo que conta com as lajes devidamente empilhadas no canteiro de obra e içadas ainda jovem até o pavimento. O centro de carga devido aos pontos de içamento deve coincidir com o baricentro da laje e o conjunto de pontos deve resistir aos esforços solicitantes, que no presente trabalho, destacam-se os momentos fletores máximos e punção em cada ponto.

A segurança estrutural quanto à flexão foi avaliada pela resistência dos materiais, com base na flexão simples, e pela proposta de bielas e tirantes através da treliça 45° proposta por *Morsch* e que também foi utilizada para determinar a carga máxima a partir das tensões de tração na superfície cônica próxima ao ponto de içamento na tentativa de relacioná-la às cargas de punção calculadas por equações obtidas de normas, como ACI 318 e NBR 6118, e equação de resistência à carga de punção proposta por *Muttoni* em 2008.

## ABSTRACT

PENACHIO JÚNIOR, José. **Evaluation of the load-bearing at pull-out test of metallic inserts in precast concrete slabs.** 2018. Master Science dissertation (M.Sc. Civil Engineering) – Polytechnic, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

In this research, the metallic inserts in concrete precast slabs to lift up, which are useful in residential buildings and this lifting system was characterized and took at evaluable of strength at pull-out testing with the purpose of integration into the productive system which contain the precast slabs produced in construction site. The loading center of group lifting inserts may coincide with center of mass in the slab and the set should resist efforts such as bending of the slab and punching shear at each lifting handle.

The structural safety of concrete over bending has been evaluated by flexural stress on the across section no cracked concrete and also strut and tie model proposed by *Morsch* and which model has been suggested to determine the punching shear load on conical surface near by lifting insert in the precast concrete slab and compare with some codes, such as ACI 318 and NBR 6118, also *Muttoni's* punching shear load equation of 2008.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E NUMERAÇÃO

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
DGL	Gancho de 12,5 mm de diâmetro na diagonal da laje maciça armada em duas direções por tela Q196 eletrossoldada;
LTIPO	Gancho de 12,5 mm de diâmetro paralelo a duas arestas da laje maciça armada em duas direções por tela Q196 eletrossoldada;
I	Conjunto de barras de reforço e tela de fretamento;
II	Não há reforço e fretamento;
III	Somente barras de reforço;
IV	Somente a armação de fretamento;
V	Semelhante ao conjunto I, porém com as dimensões reduzidas em 50%;
VI	Somente com barras de reforço reduzidas;
GPB	Gancho por baixo;
GPC	Gancho por cima.
A	Direção paralela do eixo da alça de içamento em relação aos apoios no ensaio.
B	Direção perpendicular do eixo da alça de içamento em relação aos apoios no ensaio.

**Sumário**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>MATERIAIS</b> .....	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>EQUIPAMENTOS</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>CONFIGURAÇÕES DE ARMADURA NO SISTEMA DE IÇAMENTO</b> .....	<b>49</b>
<b>5.3.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>49</b>
<b>5.3.2</b>	<b>QUANTIDADE DE ARMADURA POR PONTO DE IÇAMENTO</b> .....	<b>52</b>
<b>5.3.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DA CARGA DE ARRANCAMENTO DO GANCHO</b> .....	<b>54</b>
<b>5.3.4</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>54</b>
<b>5.3.5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de lajes pré-moldadas no canteiro de obras. ....	14
Figura 2 – Longarina pré-moldada de concreto. ....	15
Figura 3 – Vigas baldrame pré-moldadas de concreto. ....	16
Figura 4 – Pré-lajes de concreto. ....	17
Figura 5 – Dimensões do içador tipo chapéu (medidas em centímetros). ....	18
Figura 6 – Posicionamento da laje sobre as paredes estruturais. ....	19
Figura 7 – Transporte feito por guindaste. ....	19
Figura 8 – Concretagem sobre a pilha de mesma laje. ....	20
Figura 9– Manutenção da seção plana na estrutura deformada. ....	23
Figura 10– Solicitação de laje biapoiada em ensaio de arrancamento de inserto metálico. ....	24
Figura 11 – Tração máxima na fibra superior em seção não fissurada. ....	25
Figura 12 – Estado de fissuração de carga pontual que delimita a superfície cônica. ....	26
Figura 13 – Destaque para engrenamento entre os grãos e a ligação pelo efeito de pino pela(s) armadura(s). ....	26
Figura 14 – Efeito de pino de ligação entre as duas faces da fissura pela armadura de reforço. ....	27
Figura 15 – Divisão da carga pontual em duas partes na alça metálica. ....	28
Figura 16 – Metade da superfície cônica a 45° do plano horizontal em cada “perna” da alça metálica. ....	28
Figura 17 – Orientação paralela (A) e ortogonal (B) do eixo da barra em relação aos apoios em vermelho. ....	29
Figura 18 – Proposta de modelo de bielas e tirantes para o gancho paralelo (A) aos apoios laterais. ....	29
Figura 19 – Proposta de modelo de bielas e tirantes para o gancho ortogonal (B) aos apoios laterais. ....	29
Figura 20 – Corpo de prova do trabalho feito por SHIN et al. (2016). ....	30
Figura 21 – Ensaio de arrancamento de inserto metálico em laje pré-moldada feito por SHIN et al. (2016). ....	30
Figura 22 – Vista em corte do ensaio feito por SHIN et al. (2016). ....	31
Figura 23 – Superfície cônica de ruptura a 35° (concrete breakout strength) pelo ACI 318. ....	32
Figura 24 – Placas de ancoragem propostas por POVEDA et al.(unidade em mm). ....	32

Figura 25 – Corpos de prova com as placas de ancoragem propostas por Poveda et al. ....	33
Figura 26 – Superfície cônica resistente sob tensão de tração em Poveda et al. ....	34
Figura 27 – Parafuso ancorado em pilar de concreto (OKTAVIANUS ET AL. 2017). ....	35
Figura 28 – Combinação de molas (OKTAVIANUS ET AL. 2017). ....	36
Figura 29 – Alças de içamento em laje pré-moldada. ....	36
Figura 30 – Superfície de ruptura em laje fletida (Muttoni 2008). ....	37
Figura 31 – Caminhamento das tensões de metade da laje ensaiada baseado pela teoria de Morsch. ....	38
Figura 32 – Laje quadrada maciça pré-moldada de concreto de 9 cm de altura 4 metros de lado. ....	40
Figura 33 – Dois apoios laterais no ensaio de arrancamento do gancho. ....	44
Figura 34 – Representação do ensaio de arrancamento de gancho metálico. ....	44
Figura 35 – Dimensão L do modelo de viga simplesmente apoiada do ensaio. ....	45
Figura 36 - Laje Tipo I GPC – Gancho em cima da armadura (tela) positiva, duas barras de reforço ( $\Phi$ 8mm) de 1,5 m e uma tela de fretamento de 1 X 1 m. ....	49
Figura 37 Tipo II GPB – Gancho por baixo da armadura (tela) positiva. ....	49
Figura 38 Tipo II GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva. ....	50
Figura 39 Tipo III GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e duas barras de reforço ( $\Phi$ 8mm) de 1,5 m. ....	50
Figura 40 Tipo IV GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e tela de fretamento 1 X 1 m. ....	50
Figura 41 Tipo V GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva, duas barras de reforço ( $\Phi$ 8mm) de 1 m e tela de fretamento 0,5 X 0,5 m. ....	51
Figura 42 Tipo VI GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e duas barras de reforço ( $\Phi$ 8 mm) de 0,8 m. ....	51
Figura 43 DGL GPC – Gancho ( $\Phi$ 12,5mm) na diagonal por cima da tela e sem reforço. ....	51
Figura 44 Bomba manual para o acionamento do macaco hidráulico ....	54
Figura 45 Sistema fechado de carregamento em gancho central ....	54
Figura 46 Sistema transdutor de pressão – ADS e notebook ....	54
Figura 47 – Esquema representativo das fases de carregamento. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados experimentais do trabalho feito por SHIN et al (2016). .....	31
Tabela 2 – Carga pontual devido somente ao peso da laje .....	40
Tabela 3 – Fator majorador da ação no ponto de içamento – Manual da Trejor. ....	40
Tabela 4 – Fator redutor devido à resultante vertical da ação do cabo – Manual da Trejor. ....	40
Tabela 5 – Descrição de cada coeficiente mínimo de amplificação dinâmica extraída da NBR 9062.....	41
Tabela 6 – Formulário.....	45
Tabela 7 - Quantidade de aço em cada ponto de içamento. ....	52
Tabela 8 - Padrões de fissuração nas fases 1, 2 e 3 caracterizadas pelo ensaio. ....	56
Tabela 9 – Comparação entre as cargas obtidas até o aparecimento da primeira fissura e máxima tração pelo modelo de treliça. ....	61
Tabela 10 – Fase 2 do carregamento – Deslocamento de partes de concreto ao redor do gancho (ruptura de cone/punção).. ....	62
Tabela 11 – Resistências características (NBR 8800) das barras quanto à força cortante e à tração. ....	63
Tabela 7 – Resultados dos ensaios à compressão axial aos 7 dias de idade dos corpos de prova cilíndricos de concreto. ....	92

# 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um aglomerado constituído de agregados e cimento como aglutinante e é, portanto, uma rocha artificial. A fabricação do concreto é feita pela mistura dos agregados, areia e brita, com cimento e água, à qual conforme a necessidade são acrescentados aditivos que influenciam as características físicas e químicas do concreto fresco ou endurecido. O concreto fresco é moldado em formas e adensado por vibradores. O endurecimento do concreto começa após poucas horas e, de acordo com o tipo de cimento, atinge aos 28 dias de idade cerca de 60 a 90% de sua resistência.

O concreto pode ser fabricado na obra (moldado-in-loco) ou ser pré-moldado, cuja fabricação pode ser realizada em um outro local, distante do canteiro de obras e geralmente protegido das intempéries, ou no próprio canteiro de acordo com a necessidade do construtor, entretanto, há a necessidade de transportar a peça endurecida até o local de destino.

A produção de peças pré-moldadas de concreto traz consigo a industrialização de todo o processo que também inclui o transporte e que, de modo geral, pode contribuir satisfatoriamente nas construções de edifícios de moradia popular através da elevação da velocidade de produção e redução de custo de cada unidade habitacional. Há um déficit habitacional no Brasil, principalmente em centros urbanos, onde famílias moram em habitações precárias à beira de córregos poluídos, entretanto a construção civil brasileira demanda, de maneira geral, de ideias inovadoras, que além de elevar o patamar tecnológico das empresas nacionais para se tornarem cada vez mais competitivas através do aumento dos índices de produtividade, reduzirá o custo de implantação de edifícios populares e que poderão atender as famílias de baixa renda. Por essa lógica, a racionalização da produção de edifícios, que engloba também projetos estruturais eficientes, é altamente recomendada para todos os sistemas estruturais, em destaque o de alvenaria estrutural que já possui em certos canteiros de obra um processo de construção “amarrado” com peças pré-moldadas de concreto, sejam elas vergas, contravergas, patamares de escada e lajes (Figura 1) (MAMEDE, 2001). Destacam também como peças pré-moldadas nos elementos de fundação de edifícios as estacas e vigas baldrames (Figura 3).

Figura 1 – Produção de lajes pré-moldadas no canteiro de obras.



Há inúmeros elementos pré-moldados de concreto além dos usualmente utilizados nos empreendimentos residenciais, por exemplo longarinas protendidas de viadutos e pontes (Figura 2), barreiras mecânicas de rodovias, vigas baldrame (Figura 3), estacas, pré-lajes (Figura 4) etc. Não há como imaginar a concretagem no local de uma longarina protendida sobre uma importante rodovia que liga a capital do estado de São Paulo ao interior sem interrupção do tráfego em dias úteis com pouco gasto em forma, escoramento e mão de obra.

Figura 2 – Longarina pré-moldada de concreto.

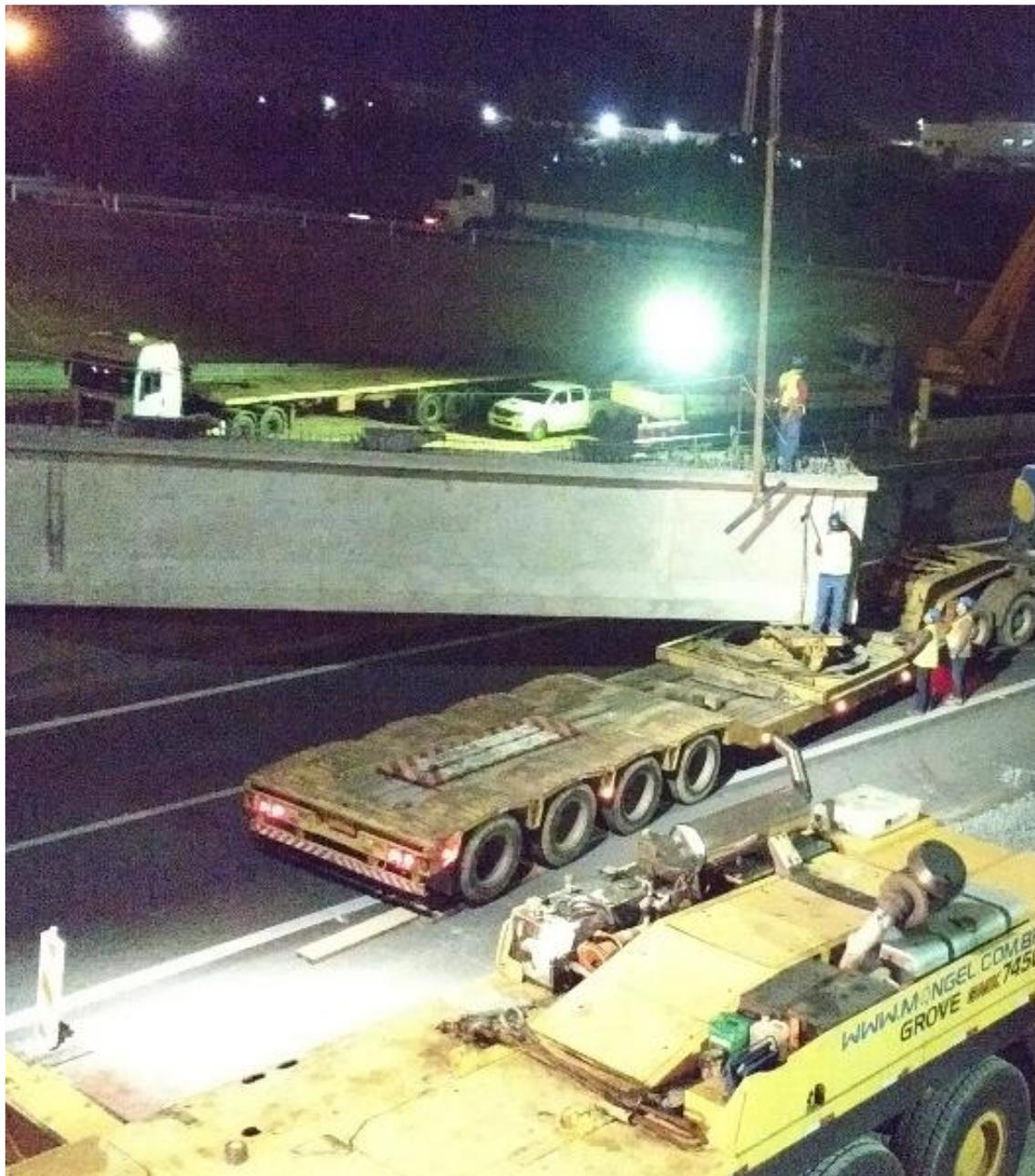


Figura 3 – Vigas baldrameas pré-moldadas de concreto.



Figura 4 – Pré-lajes de concreto.

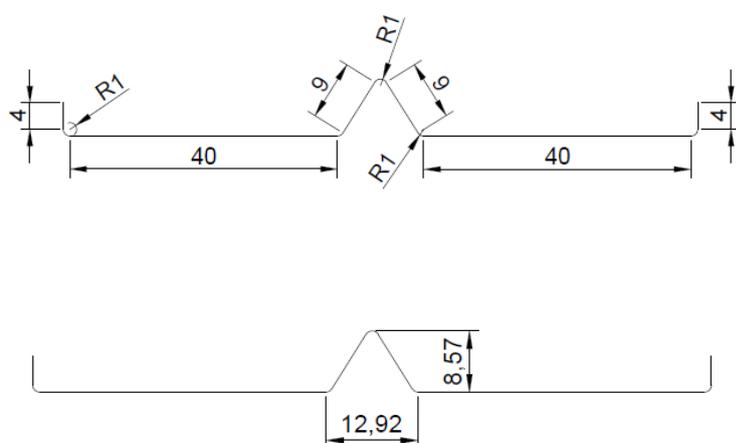


As peças pré-moldadas de concreto, em especial as lajes maciças, podem contribuir satisfatoriamente na redução de custos de produção através de ganho substancial de tempo e na economia de materiais, pois a produção destas poderá ocorrer paralelamente com outros serviços e sem interrupção, por exemplo, em dias chuvosos se houver cobertura no local de armação e concretagem além da significativa economia de formas. O processo executivo contempla ainda o içamento destas lajes até o ponto de apoio (Figura 6), seja por guindastes ou gruas (Figura 7), que implica em projetos eficientemente adequados dos pontos de içamento espalhados pela laje e que podem apresentar diversas configurações, por exemplo: profundos e

cilíndricos em peças robustas de concreto, cilíndricos com furos e barras passantes para peças pequenas de pequeno porte, porém para as peças esbeltas como as lajes, é necessário um sistema de içamento que utilize a maior área resistente possível (HANDBOOK OF PRECAST CONCRETE, 2014).

O ponto de içamento de baixo custo e amplamente utilizado em lajes pré-moldadas de edifícios habitacionais é composto, por exemplo, de barra de aço dúctil e maleável em forma tipo chapéu (Figura 5) sem e com alguns reforços, por exemplo armadura de fretamento e barras de ancoragem.

Figura 5 – Dimensões do içador tipo chapéu (medidas em centímetros).



O sistema de içamento é composto pela armação positiva, negativa, a própria armação local do inserto, concreto envolvente e deverá resistir aos esforços solicitantes oriundos do peso próprio da laje, vento, inclinação do cabo de içamento e aceleração no momento do transporte.

O inserto em questão de baixo custo constitui de uma barra dobrada (gancho) em forma de chapéu, conforme a Figura 5, inserido em concreto endurecido jovem, com ganho de resistência após sete dias da sua concretagem devido ao tempo mínimo que uma peça consegue ficar no canteiro de obra até o seu lançamento

Figura 8 8).

As lajes pré-moldadas consideradas neste trabalho fazem parte do projeto estrutural de unidades habitacionais do programa Minha Casa Minha Vida e são armadas para resistir aos

momentos fletores positivos e tensões de tração devido ao momento fletor negativo, esforços de fendilhamento e força cortante no entorno dos ganchos metálicos espalhados pela laje.

Figura 6 – Posicionamento da laje sobre as paredes estruturais.



Figura 7 – Transporte feito por guindaste.



Figura 8 – Concretagem sobre a pilha de mesma laje.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As lajes pré-moldadas de concreto no momento do içamento são solicitadas quanto à flexão e forças cortantes concentradas ao redor de cada inserto metálico. Há, portanto, momentos positivos e negativos combinados com as tensões cisalhantes no concreto que transmitem tensões de compressão e tração em uma superfície cônica de geratriz com ângulo entre 35° e 45° em relação ao plano horizontal. O ângulo depende do estado de fissuração do concreto no entorno do gancho de içamento. As barras de aço tanto do inserto quanto dos reforços podem escorregar quando submetidos ao carregamento e para evitar esse tipo de problema, devem ser respeitadas as regras de comprimento de ancoragem segundo a NBR 6118 de 2014.

Distinguem-se dois estádios no material concreto armado segundo Leonhardt e Monnig, 2008:

Estádio I – o concreto não está fissurado na zona tracionada e absorve as forças de tração.

Estádio II – o concreto está fissurado na zona tracionada e as forças de tração devem ser totalmente absorvidas pela armadura.

As barras de aço tracionadas, lisas ou nervuradas, transferem localmente parte da carga ao concreto a partir das tensões de aderência entre ambos. São elas:

- a. Aderência por adesão – Entre o aço e a nata de cimento existe uma ação de colagem, que provém da adesão ou de forças capilares. Este efeito de colagem ou de adesão depende também da rugosidade e da limpeza da superfície das armaduras. Este efeito, isoladamente, não é suficiente para uma boa ligação, porque é destruído no caso de pequenos deslocamentos.
- b. Aderência por atrito – Uma vez rompida a adesão, para o menor deslocamento relativo, aparece uma resistência de atrito entre o aço e o concreto, desde que existam pressões transversais às armaduras. Essas pressões transversais podem ser causadas por tensões de compressão transversais devidas às cargas, pela retração ou pela expansão do concreto. O coeficiente de atrito é alto devido à rugosidade da superfície do aço ( $\mu = 0,3$  a  $0,6$ ). A ferrugem provoca uma rugosidade tão grande que produz um denteamento na superfície e, com isso, uma aderência mecânica, esta por sua vez, pode ser considerada confiável quando existirem pressões transversais.

- c. Aderência mecânica – Engrenamento mecânico, do tipo encaixe, entre a superfície da armadura e o concreto. São chamados de “consolos de concreto” e solicitados ao corte antes que a barra de aço possa deslizar no concreto. A resistência ao corte é o tipo de ligação mais efetiva e confiável e é imprescindível para que se possam aproveitar as resistências mais elevadas do aço.

As barras lisas, como exemplo as próprias barras de aço CA25 utilizadas como insertos metálicos neste trabalho, transferem o carregamento ao concreto através da aderência por adesão e atrito e por este motivo os insertos metálicos CA25 provêm de ganchos nas pontas para conferir o apoio necessário no concreto das lajes pré-moldadas. As barras nervuradas por sua vez presentes na armação positiva e negativa das lajes e na região dos insertos como armadura de fretamento e reforço contam com todas as características aderentes mencionadas.

Em lajes apoiadas numa direção e submetidas a carregamento uniformemente distribuído, os momentos fletores na direção  $x$  são iguais aos de um conjunto de vigas simplesmente justapostas, porque não surgem flechas diferentes na direção  $y$ , exceto em bordos livres. Uma laje apoiada numa direção com largura  $b$  pode ser, portanto, dimensionada na direção  $x$  como se fosse uma viga retangular, para um momento fletor  $m_x = M_x/b$  referido a uma largura unitária, por exemplo 1 metro. O perigo de ruptura por força cortante em lajes é pequeno, de modo que as lajes na maioria das vezes mantêm a sua capacidade de carga sem armadura de cisalhamento. Em casos de carga não-uniforme ou sob cargas concentradas surgem, além dos momentos fletores  $m_x$ , também momentos transversais  $m_y$  e as respectivas deformações. Ambos os momentos diminuem com as distâncias  $x$  ou  $y$ , respectivamente, ao centro de carga. Por esta razão, tais lajes possuem armaduras em ambas direções. Sob cargas concentradas surgem, conseqüentemente, fissuras em ambas as direções, ou até mesmo em forma circular. Por ocasião de ruptura por flexão, o concreto é solicitado biaxialmente. A largura da laje que também atua na direção  $y$  depende da relação das armaduras  $A_{sx}/A_{sy}$ . Para cargas concentradas muito elevadas, pode ocorrer, no ponto de aplicação da carga, uma ruptura por força cortante, devido à ocorrência do puncionamento de um cone de concreto (punching failure).

As lajes apoiadas em pontos, como por exemplo as lajes de piso sem vigas ou de fundação para pilares individuais, apresentam nos trechos dos apoios os momentos principais que, sendo ambos negativos, desenvolvem-se em círculos concêntricos ou de forma radial, de modo que, em primeiro lugar, aparecem fissuras de flexão circulares e que devido à grande força cortante que atua simultaneamente continuam a se desenvolver na laje como fissuras de

cisalhamento com inclinação suave. Nesta ocasião, existe o perigo de punção, pois em lajes com carga sobre uma grande área, ocorre o puncionamento de um cone de concreto com inclinação de 30° a 35°. Em lajes de fundação com grande parcela de carga sobre a base do cone de ruptura, a inclinação do cone é de 45° aproximadamente. Para evitar este tipo de ruptura, os valores de cálculo das tensões de cisalhamento devem ser limitados, ou deve-se dispor de uma armadura de cisalhamento distribuída sobre a superfície de ruptura do cone.

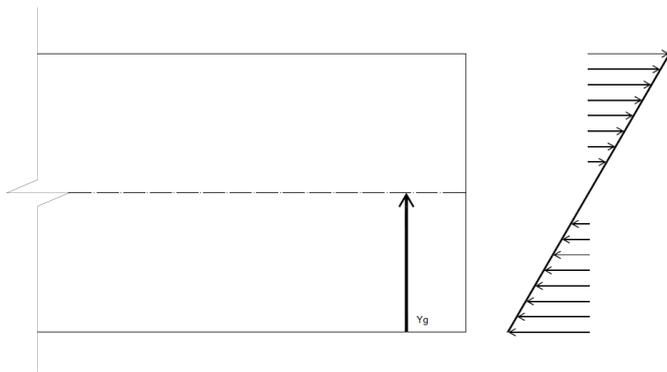
A resistência à flexão da laje de concreto apoiada em uma direção no estágio I pode ser calculada pela Equação 1 da tensão atuante na seção retangular em análise pela teoria da resistência dos materiais na flexão simples que se baseia na manutenção da seção plana da laje na estrutura deformada sem fissuração (Figura 9). Este conceito pode ser estendido para as faixas de laje calculadas como vigas.

O aumento do momento de inércia da seção retangular de concreto devido à presença de armadura positiva, reforço e fretamento acarretará o aumento do momento fletor resistente da peça e não será considerado para efeito de verificação. A razão entre os módulos de elasticidade do aço e concreto deve ficar entre 6 a 10 e, por este motivo, o momento de inércia da seção resulta em um valor maior em comparação à seção inteiramente de concreto. O modelo de seção preenchida inteiramente de concreto é mais conservador em relação ao citado anteriormente, que justifica o emprego deste para o cálculo da tensão de tração na fibra mais afastada em relação ao centroide da seção.

Equação 1– Distribuição de tensão na seção retangular da laje em flexão simples como modelo de viga.

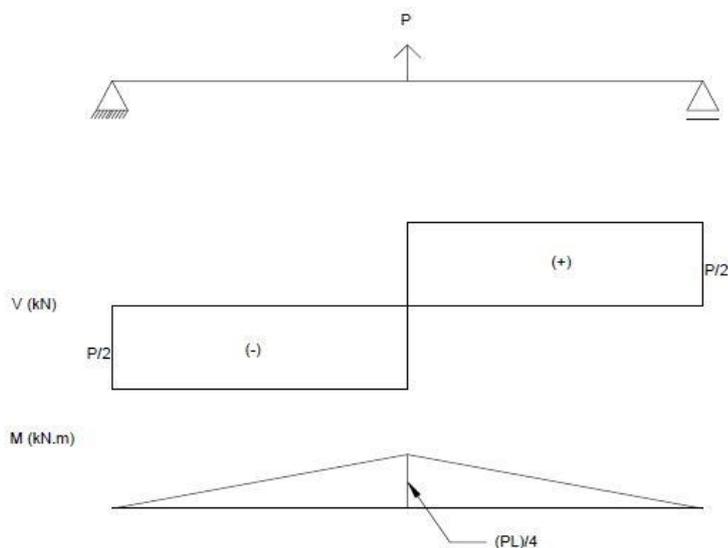
$$\sigma = \frac{M}{I} * y$$

Figura 9– Manutenção da seção plana na estrutura deformada.



Conforme a solicitação da laje pré-moldada quadrada biapoiada (Figura 10), é possível estimar a carga de aparecimento da primeira fissura na fibra superior (Figura 11). Nos casos de içamento de laje maciça de 4 X 4 m por exemplo, há a possibilidade de verificar as tensões máximas de tração no concreto em uma análise pelo método dos elementos finitos, por exemplo.

Figura 10– Solicitação de laje biapoiada em ensaio de arrancamento de inserto metálico.



Equação 2 – Momento fletor máximo na laje ensaiada como modelo de viga biapoiada com carregamento concentrado no meio do vão.

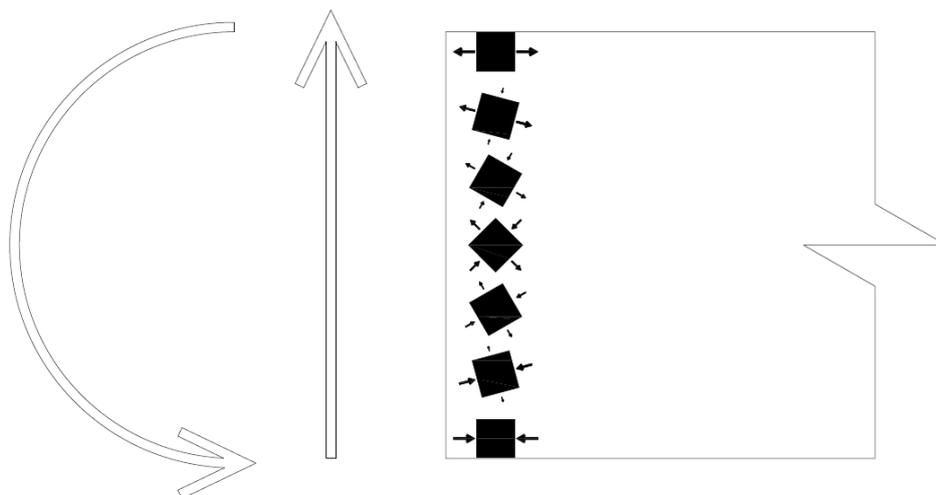
$$M_{\text{máx}} = \frac{P \cdot L}{4}$$

Ao substituir a tensão  $\sigma$  por  $f_{ctm,7}$  na Equação 1 e ao igualar os momentos nas equações 01 e 02, resulta na Equação 3.

Equação 3 – Carga resistente de arrancamento de inserto em laje biapoiada de seção retangular.

$$P = \left(\frac{2}{3}\right) * \left(\frac{B \cdot H^2}{6}\right) * (f_{ctm,7})$$

Figura 11 – Tração máxima na fibra superior em seção não fissurada.



As lajes geralmente estão sujeitas a grandes tensões de tração e compressão oriundas dos momentos fletores solicitantes e pequenas tensões de cisalhamento nos bordos de apoio e, por este motivo, não há necessidade de armar as lajes para resistir às tensões de cisalhamento. Há, entretanto, a necessidade de armar lajes submetidas a grandes cargas pontuais para não ocorrer a ruptura por puncionamento (punching shear failure).

A segurança em relação a estados limites últimos de forças cortantes em peças de concreto armado sem armadura de cisalhamento é garantida por diferentes mecanismos resistentes.

Nos trechos das peças em que as forças cortantes não são muito elevadas, elas se comportam como se estivessem submetidas à flexão pura com banzos praticamente paralelos ao eixo da peça. As possíveis fissuras nesses trechos são perpendiculares ao eixo da peça e se iniciam a partir da extremidade do banzo tracionado.

A resistência ao cisalhamento de peças fissuradas por flexão pode ser justificada por meio de dois modelos diferentes do funcionamento da região de concreto situada entre duas fissuras adjacentes. Em um deles se admite a cooperação máxima e no outro a cooperação mínima do concreto entre as fissuras (FUSCO, 2008).

No modelo de cooperação máxima do concreto entre fissuras, admite-se que a transmissão da força cortante ao longo do elemento possa ser feita por meio de três diferentes mecanismos resistentes alternativos, cada um deles transmitindo uma parcela da força cortante total:

V1 – parcela transmitida pelo banzo comprimido da peça;

V2 – parcela transmitida através da fissura de flexão, em virtude do engrenamento existente entre os grãos do agregado graúdo e retransmitida adiante por tensões de tração na alma da peça (Figura 12);

V3 – parcela transmitida através da fissura de flexão por meio de armadura de flexão, que se comporta como um pino de ligação entre as duas faces da fissura, sendo retransmitida adiante por tração no trecho da alma entre duas fissuras adjacentes (Figura 14).

Figura 12 – Estado de fissuração de carga pontual que delimita a superfície cônica.

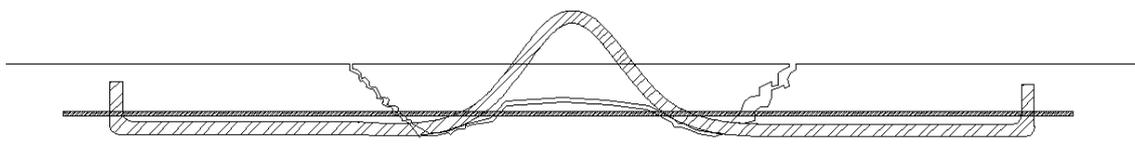


Figura 13 – Destaque para engrenamento entre os grãos e a ligação pelo efeito de pino pela(s) armadura(s).

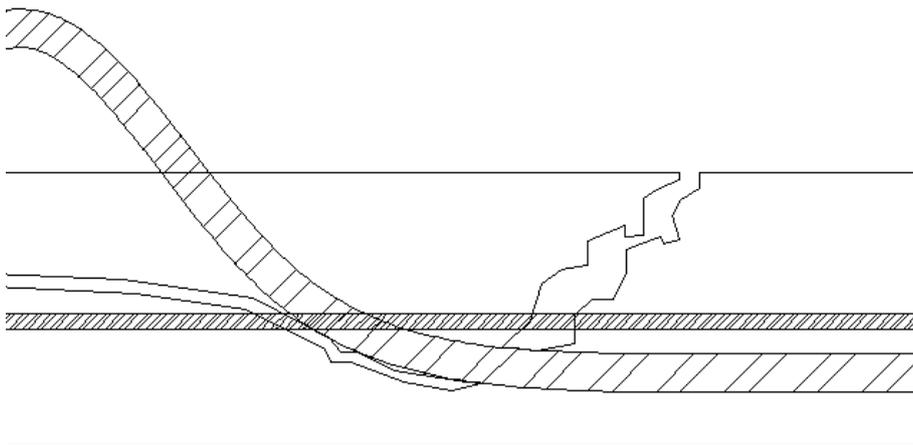
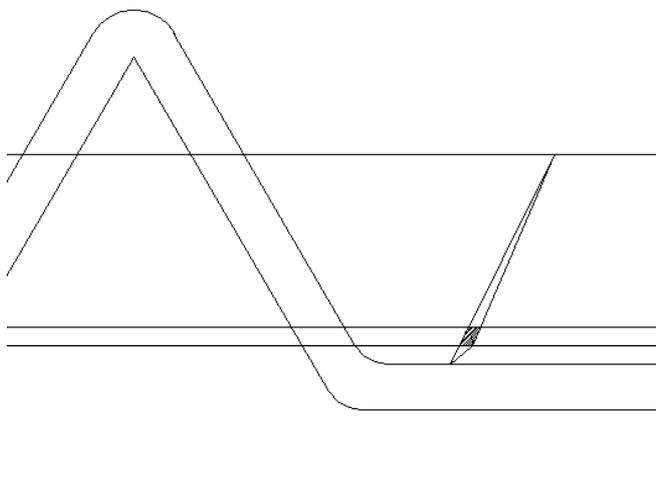


Figura 14 – Efeito de pino de ligação entre as duas faces da fissura pela armadura de reforço.



As tensões de cisalhamento oriundas das cargas concentradas em alças de içamento espalhadas pela laje pré-moldada introduz tensões máximas, a 45° pelo círculo de Mohr quando a peça não estiver fissurada, no meio da seção. São elas: de compressão e de tração, estas últimas, devem ser resistidas pela armadura e não pelo concreto, pois a resistência característica à tração do concreto é da ordem de 10% da resistência característica à compressão do mesmo material (FUSCO, 1986). A transmissão das tensões cisalhantes no concreto, que é um material duro e frágil, ocorre diferentemente dos materiais dúcteis como o aço por exemplo, porque as movimentações atômicas nos aços deformados sob tensão de tração ou compressão ocorrem predominantemente sem repulsão entre os átomos metálicos diferentemente dos cristais que formam o concreto devido ao seu caráter iônico, pois qualquer mudança de posição de um íon componente do concreto imposta pelo estado de tensão poderá propagar uma microfissura causada pela repulsão de cargas de mesmo sinal (CALLISTER, 2002).

O cálculo da carga resistente devido à força cortante solicitante na laje de concreto sem fissura imediatamente no entorno do inserto metálico poderá ser realizado através da resistência à tração do concreto na superfície de tronco de cone, que envolve o inserto até o topo da laje, a 45° do plano horizontal (Figura 16). A resistência à tração do concreto  $f_{ctm,7}$  foi calculada conforme a norma NBR 6118 e utilizada para o cálculo da carga resistente pelo modelo da superfície cônica a 45° de seção no estágio I (sem fissuração).

Equação 4 – Carga de arrancamento resistente proposta pelo modelo do cone de concreto a 45°.

$$P = A_{\text{cone}} * f_{ctm,7} * \cos 45^\circ$$

A carga pontual se divide em duas partes conforme a geometria do inserto metálico em destaque na figura 15 e a partir de cada parte se dissipa através de uma superfície de formato cônico ao redor de cada “perna” da alça metálica (Figura 16).

Figura 15 – Divisão da carga pontual em duas partes na alça metálica.

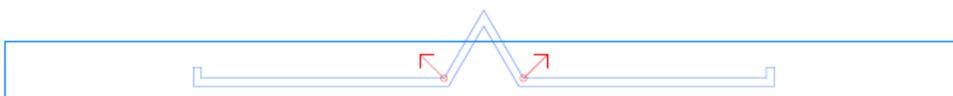


Figura 16 – Metade da superfície cônica a 45° do plano horizontal em cada “perna” da alça metálica.



As metades de cada “perna” solicitam a laje biapoiada conforme proposta de treliça pela orientação A ou B. Os modelos conforme a Figura 17 foram baseados na treliça de Morsch a 45°. O profissional responsável pelo sistema de içamento poderá propor um modelo de bielas e tirantes para qualquer situação de içamento de laje diferentemente do apresentado na figura 18 e 19, os quais foram propostos para o caso de laje apoiada em uma direção conforme o ensaio de arrancamento de gancho metálico em laje quadrada de 1,5 m de lado.

Figura 17 – Orientação paralela (A) e ortogonal (B) do eixo da barra em relação aos apoios em vermelho.

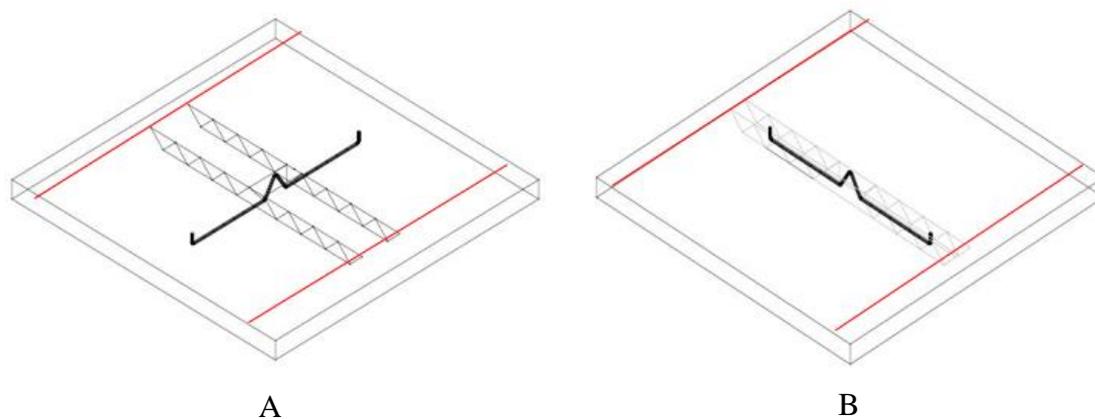


Figura 18 – Proposta de modelo de bielas e tirantes para o gancho paralelo (A) aos apoios laterais.

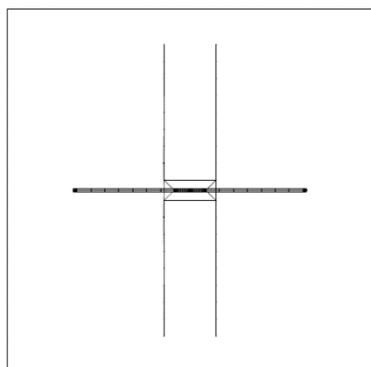
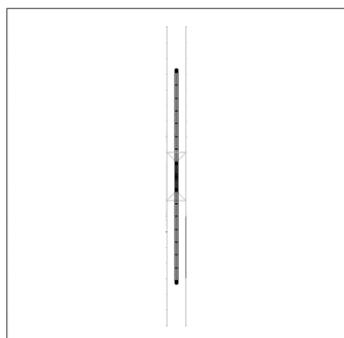


Figura 19 – Proposta de modelo de bielas e tirantes para o gancho ortogonal (B) aos apoios laterais.



O trabalho experimental feito por SHIN et al. (2016) teve como proposta a avaliação do efeito da placa na ancoragem de inserto metálico no que diz respeito ao grau de fissuração do concreto sob tensão. Os resultados experimentais foram comparados ao modelo adotado pelo ACI – 318 (2004), o qual sugere uma superfície cônica, antigamente sugerida com inclinação de  $45^\circ$  a partir do ponto mais profundo da barra ancorada. Atualmente, a ACI - 318 recomenda o uso de  $35^\circ$  para determinação da área da superfície cônica devido aos efeitos de borda. Os autores ensaiaram lajes de concreto pré-moldado de  $f_{ck} = 25,9$  MPa de 1 metro por 1 metro.

Figura 20 – Corpo de prova do trabalho feito por SHIN et al. (2016).

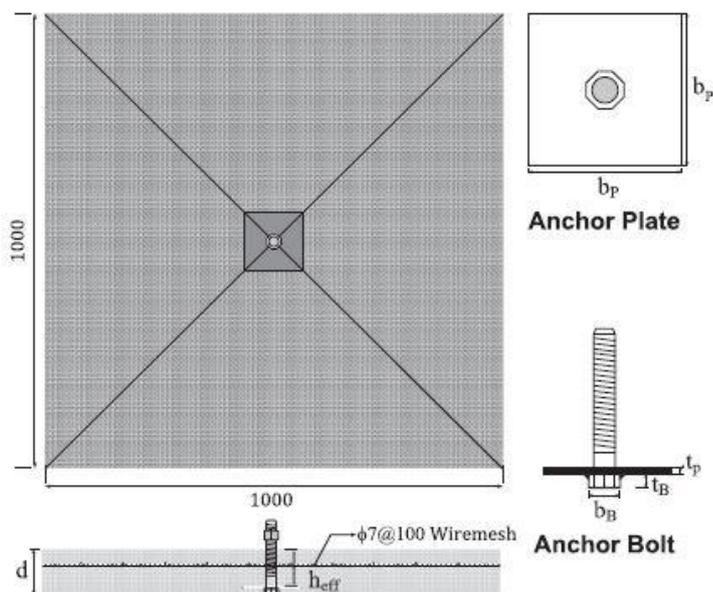
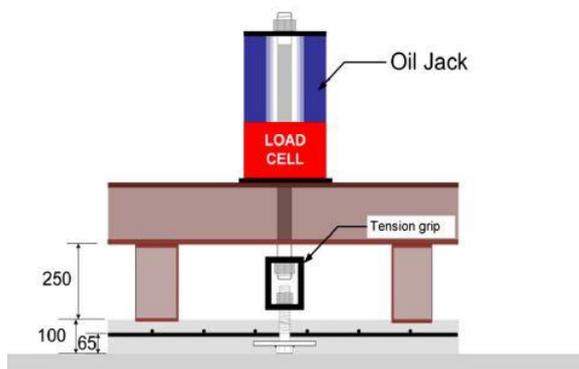


Fig. 3. Dimension of specimens (unit: mm).

Figura 21 – Ensaio de arrancamento de inserto metálico em laje pré-moldada feito por SHIN et al. (2016).



Figura 22 – Vista em corte do ensaio feito por SHIN et al. (2016).



Os resultados obtidos pelo método do ACI, Tabela 1, são próximos aos resultados dos corpos de prova sem a placa de ancoragem e que demonstra que o critério adotado pelo código ACI é uma boa aproximação para insertos tracionados.

Tabela 1 – Resultados experimentais do trabalho feito por SHIN et al (2016).

Test results.

No.	Test specimen	Anchor type		Expected load by ACI318 (kN)	Experimental loads (kN)				Increment from no-plate anchor (%)
		Type	Plate		Test 1	Test 2	Test 3	Average	
1	S-P0-T0	Single	No	35.1	38.5	31.3	33.5	34.4	-
2	S-P50-T9	Single	Yes	44.0	41.3	48.0	44.3	44.5	26.8
3	S-P100-T9	Single	Yes	44.0	53.5	47.8	51.3	50.8	44.8
4	S-P130-T9	Single	Yes	44.0	53.2	50.0	55.5	52.9	50.7
5	S-P200-T9	Single	Yes	44.0	55.3	52.0	-	53.6	52.8
6	S-P130-T3	Single	Yes	44.8	45.5	47.8	48.0	47.1	34.1
7	S-P130-T6	Single	Yes	44.1	48.0	47.5	48.3	47.9	36.5
8	S-P130-T12	Single	Yes	43.9	53.8	57.8	53.3	54.9	56.5
9	G-P0-T0	Group (2)	No	49.4	49.8	50.8	50.3	50.3	43.2

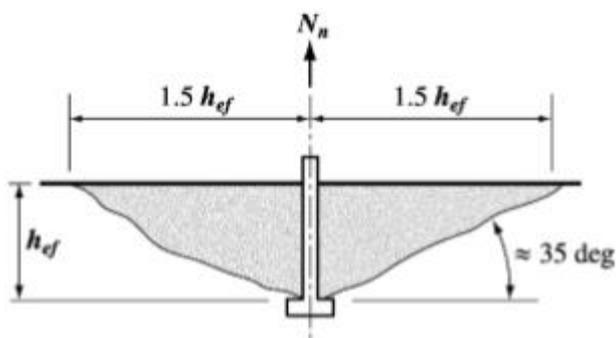
O código ACI 318 recomenda uma superfície cônica de ângulo de 35° da geratriz com o plano horizontal pelo fato de a peça de concreto estar submetida concomitantemente a momentos fletores e forças cortantes pontuais (Figura 23).

Equação 5 – Carga de tração resistente na superfície cônica segundo a ACI 318 de 2004.

$$N_{cb} = 12,55 * \sqrt{f_{ck,7}} * h_{ef}^{1,5}$$

Unidades:  $f_{ck,7}$  em MPa;  $h_{ef}$  em mm e  $N_{cb}$  em N.

Figura 23 – Superfície cônica de ruptura a 35° (concrete breakout strength) pelo ACI 318.



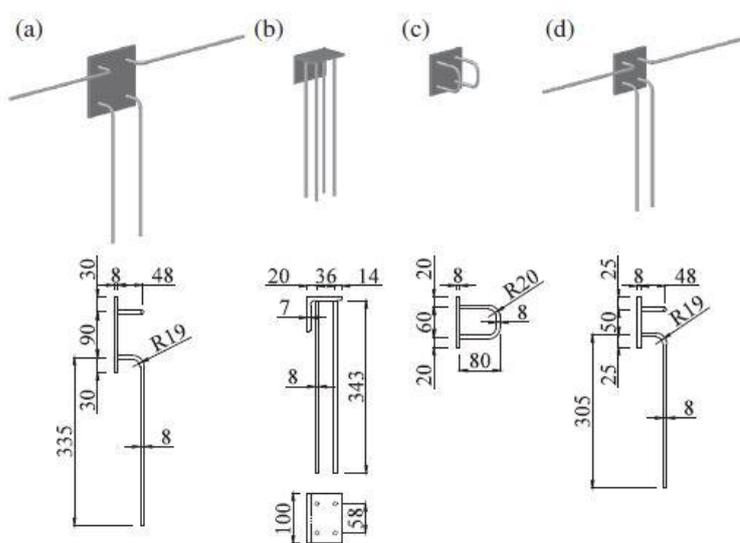
A ACI 318 de 2004 também recomenda utilizar a equação 6 para verificar a carga resistente quanto ao puncionamento em lajes. Segue:

Equação 6 – Carga resistente ao puncionamento de laje pelo ACI 318.

$$P = \left(\frac{1}{3}\right) * (b_o * d) * (\sqrt{f_{ck,7}})$$

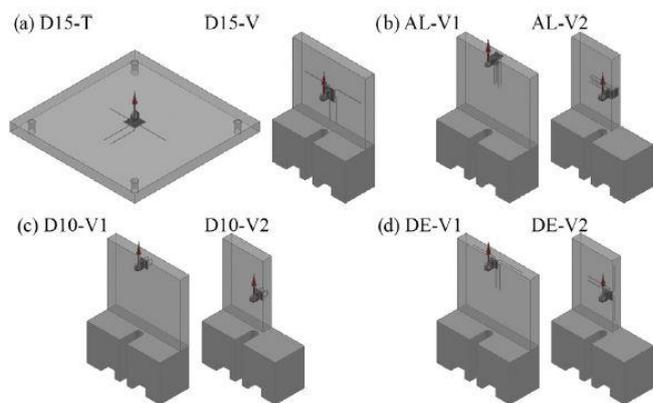
O trabalho de Poveda et al. (2016) realizou inúmeros ensaios de tração e cisalhamento de quatro tipos de placas com barras de ancoragem, em um total de vinte quatro corpos de prova. Essas placas são utilizadas para fixação e transporte de painéis pré-moldados de concreto.

Figura 24 – Placas de ancoragem propostas por POVEDA et al.(unidade em mm).



O ensaio foi realizado com três corpos de prova de cada tipo para duas diferentes transmissões de tensão, a normal e tangencial.

Figura 25 – Corpos de prova com as placas de ancoragem propostas por Poveda et al.



Os resultados experimentais foram comparados com os resultados pela modelagem em elementos finitos do software ATENA alimentado por equações constitutivas não lineares e representação explícita da fratura (perda de energia na região fissurada) ambos suplementados por análise teórica ao comparar as possíveis rupturas: no aço, entre o aço e concreto, desagregação do concreto próximo da barra de ancoragem na região fissurada do concreto e na região do cone de resistência do concreto. O modelo de cálculo da carga de tração resistente foi baseado no modelo ACI 318 de 2004 (Figura 26).

Figura 26 – Superfície cônica resistente sob tensão de tração em Poveda et al.

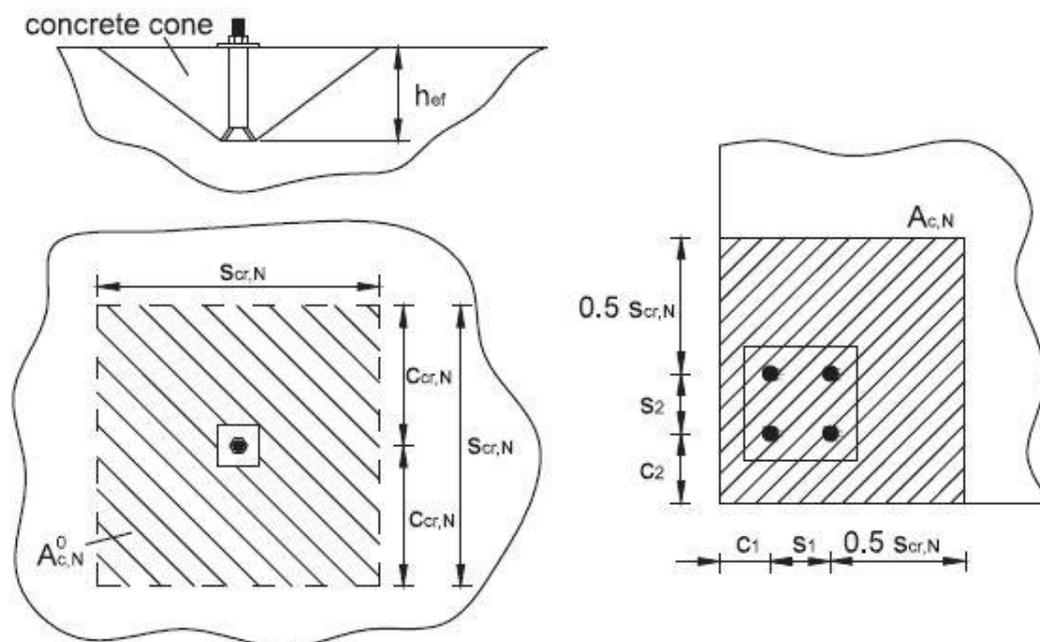


Gráfico 1 – Resultados dos 24 corpos de prova de Poveda et al.

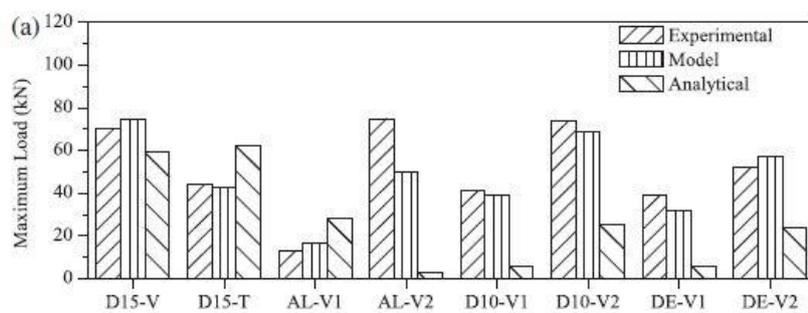
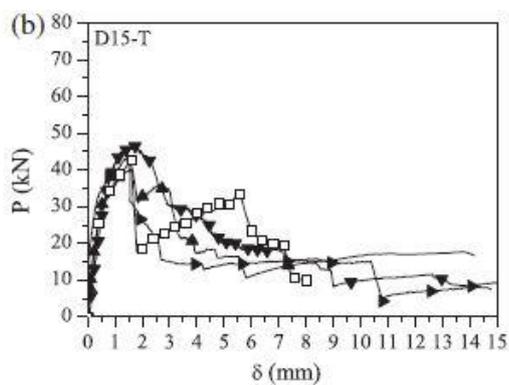


Gráfico 2 – Resultado do ensaio de tração feito por Poveda et al.



A modelagem em elementos finitos ficou bem próxima do resultado experimental, aproximadamente 40 kN. A análise teórica superestimou o resultado, aproximadamente 50 kN. A resistência característica à compressão do concreto foi superior a 70 MPa. A análise teórica foi mais conservadora para os testes de cisalhamento quando comparado ao experimental e modelagem.

O trabalho de Oktavianus et al. (2017) focou na carga de arrancamento de parafuso (Figura 27) blindado e ancorado em pilares circulares com a finalidade de compará-la a uma estimativa feita por análise em elementos finitos (ABAQUS) e abordagem teórica ao considerar o modelo de combinação de molas (Figura 28). A resistência característica à compressão do concreto utilizado foi de 40 MPa.

O modelo teórico para o cálculo da resistência à tração do cone de concreto  $P_{u,c}$  foi baseado também pela Equação 5. O primeiro patamar na zona do concreto foi estimado pelo  $P_{c,c}$ .

$$P_{c,c}^{ACI} = 8A_{brg}f'_c$$

Onde:  $A_{brg}$  é a área de contato/apoio da cabeça do parafuso no concreto e  $f'_c$  como a resistência característica à compressão do concreto.

Figura 27 – Parafuso ancorado em pilar de concreto (OKTAVIANUS ET AL. 2017).

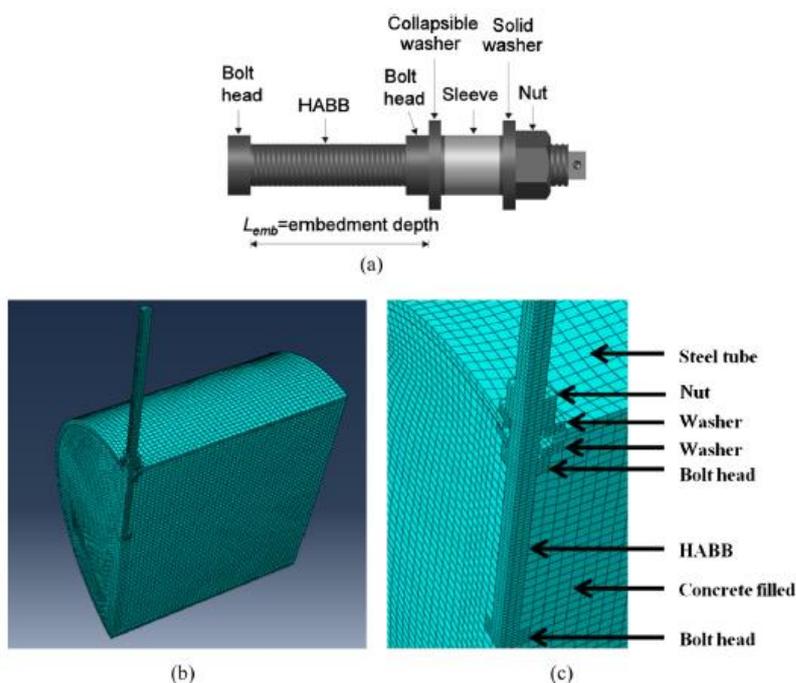
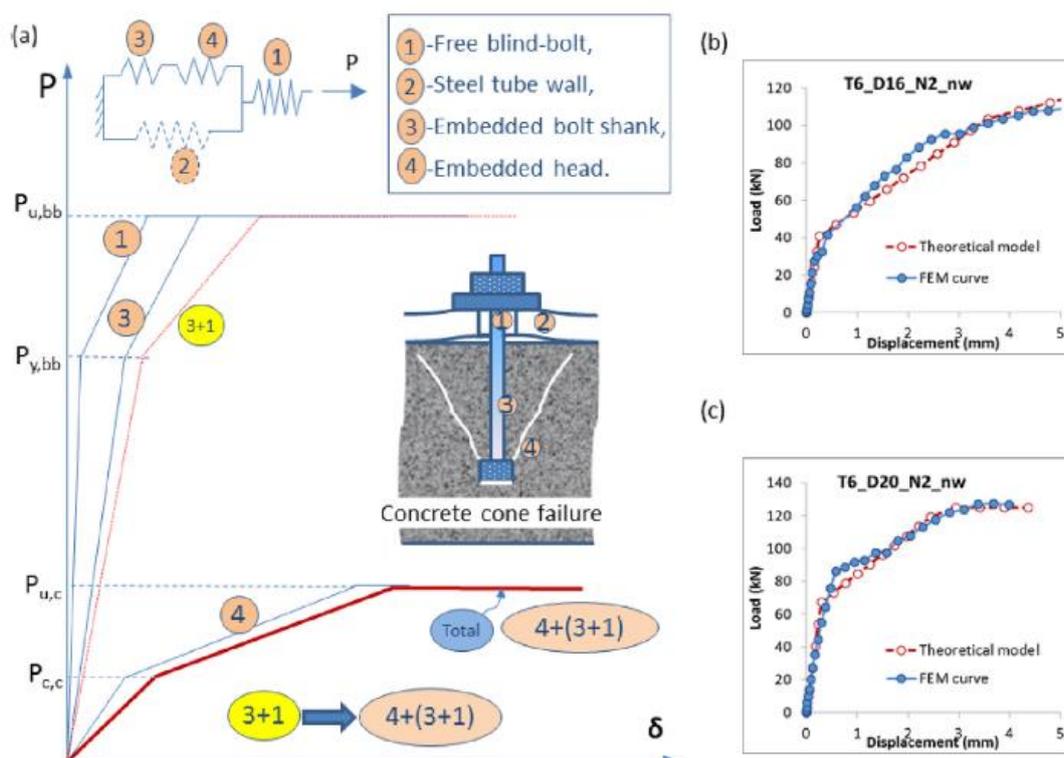
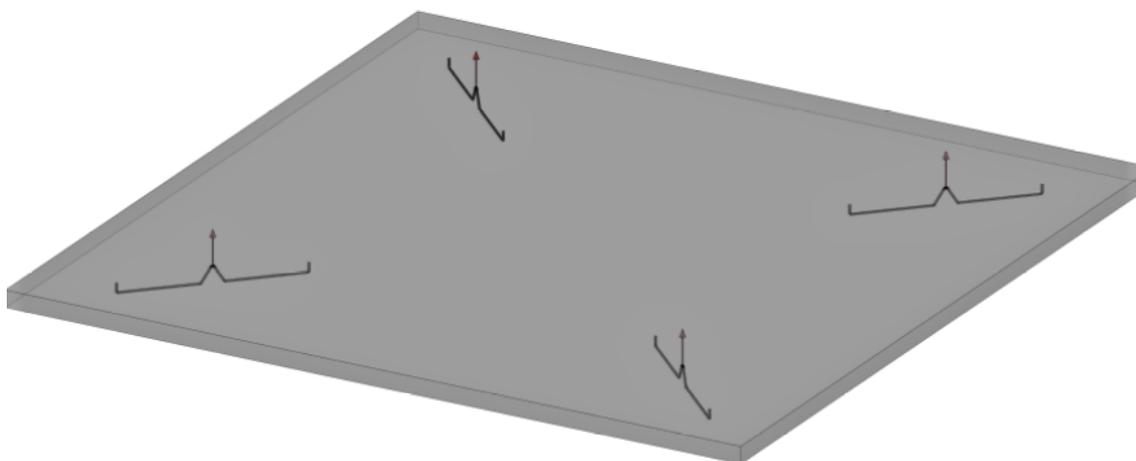


Figura 28 – Combinação de molas (OKTAVIANUS ET AL. 2017).



As lajes maciças (Figura 29) consideradas neste trabalho possuem sistema de içamento baseado em barras de aço lisas e dobradas, que devem resistir a todas solicitações impostas. Todas as barras possuem armação adicional de reforço. Trata-se, portanto, de um sistema mais simples quando comparado aos demais citados em outros trabalhos, estes de fundamental importância na tentativa de entender melhor a transmissão de tensões do inserto metálico para o interior do concreto.

Figura 29 – Alças de içamento em laje pré-moldada.



A NBR 6118 estabelece a equação 7 para verificação da carga resistente (tensão de cisalhamento multiplicada pela área de análise) em lajes carregadas pontualmente sem armadura de cisalhamento. É admitida uma superfície crítica C' na laje, no entorno da carga pontual (pilar), na qual é conferida uma tensão de cisalhamento resistente do concreto, a qual depende evidentemente da resistência característica do concreto na idade de 7 dias do ensaio, acrescido do efeito da ligação de pino pela taxa de armadura da seção em análise.

Equação 7 – Carga pontual resistente em laje pela NBR 6118.

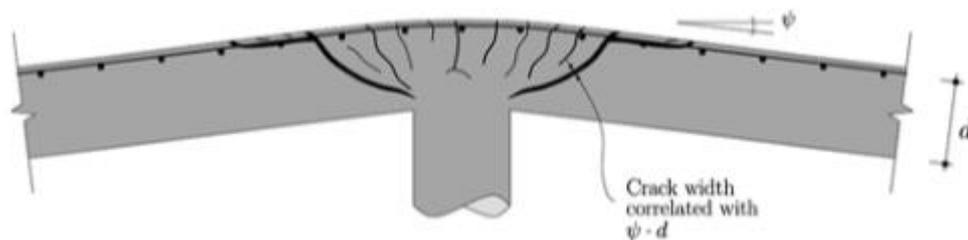
$$P = (u * d) * 0,13 * \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) * (100 * \rho * f_{ck,7})^{\frac{1}{3}}$$

A equação 8 é baseada na carga de punção em lajes deformadas proposta por Muttoni, porém sem o fator de correção devido à deformação imposta pela flexão (Figura 30). Este fator reduziria a carga proposta.

Equação 8 – Carga pontual resistente em laje por Muttoni 2008 sem o fator de minoração devido à deformação imposta pela flexão.

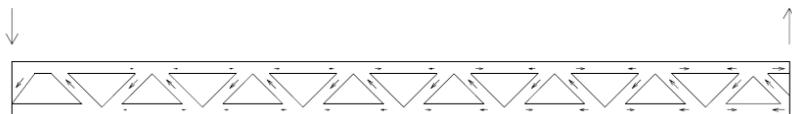
$$P = \left(\frac{3}{4}\right) * (b_o * d * \sqrt{f_{ck,7}})$$

Figura 30 – Superfície de ruptura em laje fletida (Muttoni 2008).



Foram levantados alguns parâmetros úteis nas propostas de cálculo descritas acima. São eles: altura do tronco de cone ( $d$ ), diâmetro da circunferência inferior do tronco cônico ( $\Phi_{inf}$ ), resistência média à tração do concreto aos 7 dias de idade ( $f_{ctm,7}$ ), resistência característica à compressão do concreto aos 7 dias de idade ( $f_{ck,7}$ ) e área da superfície cônica a  $45^\circ$  do plano horizontal ( $A_{sup.con.}$ ), taxa geométrica de armadura aderente  $\rho$  (%) na seção analisada da laje.

Figura 31 – Caminhamento das tensões de metade da laje ensaiada baseado pela teoria de Morsch.



A laje considerada neste trabalho não possui armadura no banzo superior tracionado e alma (estribos ou armaduras de punção), portanto, o concreto deverá resistir aos esforços de tração.

O modelo de treliça simples não considera a posição vertical do gancho de içamento (acima ou abaixo da armadura positiva), porém auxiliou na elaboração da proposta de bielas e tirantes (Figura 18 e Figura 19), de máximas tensões nos banzos tracionados e comprimidos.

Equação 9 – Cálculo iterativo de  $y$  para determinar a carga de plastificação da seção de momento máximo da laje apoiada em uma direção.

$$\frac{M}{z} = f_{ctm,7} * (B * y)$$

Os conceitos aqui abordados poderão ser extrapolados para outras peças de concreto e esforços solicitantes. Por exemplo, o modelo de bielas e tirantes poderá auxiliar em casos complicados de estado plano de tensões (EPT) e ser comparado com as tensões obtidas pelo método dos elementos finitos (MEF) em casos gerais de análise tridimensional.

### 3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como proposta a determinação da carga resistente quanto ao arrancamento de um inserto metálico em laje jovem de 7 dias de idade de  $f_{ck,7}$  conhecido a partir de 24 ensaios de arrancamento de gancho tipo “chapéu” de aço CA25 inserido em laje de 7 dias de idade quadrada pré-moldada maciça de concreto armado de 9 cm de altura e 1,5 metros de lado, de taxa de armadura de 0,2% capaz de resistir aos momentos fletores positivos. As cargas obtidas experimentalmente devem ser comparadas a diferentes formas de modelo de cálculo e características para subsidiar o projetista de informações capazes de orientá-lo quanto à carga resistente de trabalho a adotar em situações de içamento de laje a partir de diferentes modelos de cálculo.

### 4 JUSTIFICATIVA

A determinação da carga de trabalho em cada ponto de içamento, por exemplo, em laje quadrada maciça de concreto de 4,0 metros de lado e 9 cm de altura, utilizada em projetos estruturais de edificações habitacionais e que servirá de base motivacional pelo contexto deste trabalho.

A laje exemplificada na figura 32 é pré-moldada de concreto e possui taxa de armadura de aproximadamente 0,2% que em estado limite último (ELU) é capaz de resistir aos esforços solicitantes para a qual foi dimensionada e também atender aos requisitos quanto à flecha máxima em estado limite de serviço (ELS). Há somente armadura para resistir aos momentos fletores positivos.

Os carregamentos distribuídos para o dimensionamento quanto aos esforços de flexão da laje foram: permanentes = 1 kN/m<sup>2</sup> e acidentais (variáveis) = 1,5 kN/m<sup>2</sup> (NBR 6120).

Figura 32 – Laje quadrada maciça pré-moldada de concreto de 9 cm de altura 4 metros de lado.

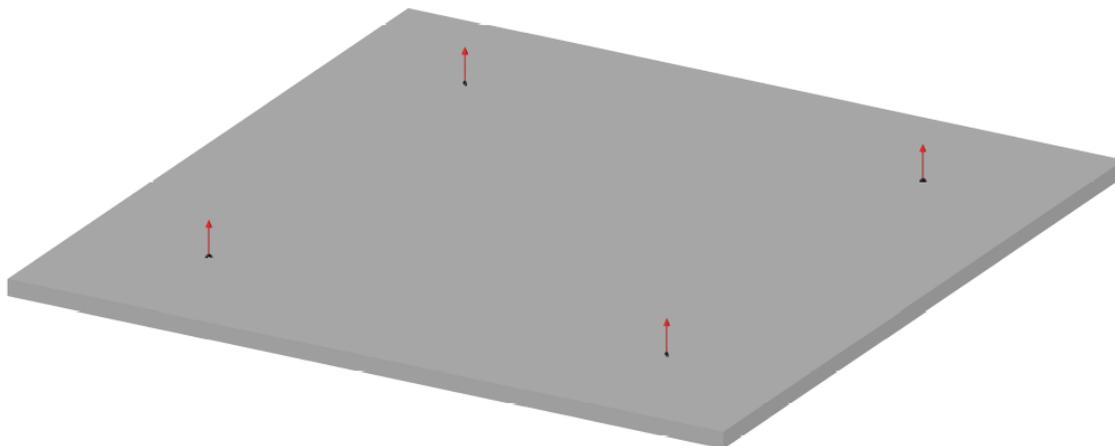


Tabela 2 – Carga pontual devido somente ao peso da laje

gk - Carga (kN) por ponto de içamento					
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Lx (m)	Ly (m)	H (m)	N° Pontos	gk (kN)
25,00	4,00	4,00	0,09	4,00	9,00

Tabela 3 – Fator majorador da ação no ponto de içamento – Manual da Trejor.

Y - Fator dinâmico do equipamento de movimentação e elevação	
1,3	Pontes rolantes lentas
1,5	Guindastes hidráulicos e gruas
2	Movimentação não aconselhada com pá carregadeira ou similar
2,2	Pontes rolantes com velocidade de deslocamento superior a 90 m/min

Tabela 4 – Fator redutor devido à resultante vertical da ação do cabo – Manual da Trejor.

b - Fator de perda devido à inclinação dos cabos	
1	Ângulo $\beta = 0^\circ$
0,96	Ângulo $\beta = 15^\circ$
0,86	Ângulo $\beta = 30^\circ$
0,7	Ângulo $\beta = 45^\circ$

0,5	Ângulo $\beta = 60^\circ$
-----	---------------------------

Equação 10 – Carga de trabalho (S) em cada ponto de içamento devido à carga por ponto de içamento ( $g_k$ ) combinado aos fatores (Y e b) – Manual da Trejor.

$$S = \frac{g_k * Y}{b}$$

Para o exemplo do içamento da laje acima (Figura 32) com guindaste e inclinação dos cabos em relação ao plano vertical igual a zero graus ( $\beta = 0^\circ$ ), pela equação do manual da Trejor resulta em:

$$S = \frac{9 * 1,5}{1} = 13,5 \text{ kN}$$

A solicitação dinâmica, pela NBR 9062, pode ser calculada de forma aproximada pela equação 11.

Equação 11 – Carga de cálculo equivalente em cada ponto de içamento pela NBR 9062.

$$g_{eq,d} \geq \gamma_f * \beta_a * g_k$$

Onde:

$g_k$  é a carga estática característica permanente;

$g_{eq,d}$  é a carga estática equivalente de cálculo permanente;

$\beta_a$  é o coeficiente de amplificação dinâmica;

$\gamma_f$  é o coeficiente de ponderação das ações, com valor igual a 1,30 para esta análise aproximada.

Tabela 5 – Descrição de cada coeficiente mínimo de amplificação dinâmica extraída da NBR 9062.

Coeficiente mínimo de amplificação dinâmica	
$\beta_a$	Descrição
1,3	Na ocasião do transporte, com carga permanente em situação desfavorável.
0,8	Na ocasião do transporte, com carga permanente em situação favorável, ou outro valor definido em verificação experimental comprovada.
1,3	Na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem do elemento.
1,4	Na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem do elemento sob circunstâncias desfavoráveis, como o formato do elemento ou detalhes que

	dificultem a sua extração da fôrma ou superfície de contato com a fôrma maior que 50 m <sup>2</sup> .
<1,3	Na ocasião do saque da fôrma, manuseio no canteiro e montagem quando os elementos forem de peso superior a 300 kN. O valor de b <sub>a</sub> deve ser estabelecido conforme experiência local, bem como formas e equipamentos de içamentos adotados.
3	Para projetos de dispositivos de içamento, para saque, manuseio e montagem, em contato com a superfície do elemento ou ancorado no concreto.
1,3	Para o caso de transporte e içamento de pilares, sendo obrigatória a limitação da tensão da armadura longitudinal do elemento a 0,50f <sub>yk</sub> .

Para o exemplo do içamento da laje acima (figura 32) com guindaste e inclinação dos cabos em relação ao plano vertical igual a zero graus ( $\beta = 0^\circ$ ), pela equação extraída da NBR 9062, tem-se:

$$g_{eq,d} = 1,3 * 1,3 * 9$$

$$g_{eq,d} = 15,2 \text{ kN}$$

Estima-se para a carga equivalente de cálculo permanente (carga de trabalho) em cada ponto de içamento na laje quadrada acima como referência futura no decorrer deste trabalho o maior valor encontrado entre os dois citados acima, 15,2 kN.

A laje considerada neste trabalho não possui armadura no banzo superior tracionado e alma (estribos ou armaduras de punção), portanto, o concreto deverá resistir aos esforços de tração tanto na zona tracionada da seção devido ao momento fletor negativo quanto da região ao redor da alça de içamento (cone de concreto).

Buscou-se neste trabalho uma metodologia simples para verificação da carga por ponto de içamento a partir da flexão simples da laje pela teoria da resistência dos materiais, tração máxima no banzo superior calculada pelo modelo de bielas e tirantes na seção de momento máximo, carga de ruptura do cone de concreto através da tensão de tração na alma da treliça simples 45° de Morsch proposta neste trabalho, punção pela equação de Muttoni 2008, punção pela NBR 6118 e ruptura do cone de concreto e punção pela ACI 318, em todos os casos comparados aos resultados experimentais. Serão descritas três fases de carregamento, de acordo, com o estado de fissuração da peça no momento do ensaio, são eles: Fase 1 – carga de

arrancamento até o aparecimento da primeira fissura; Fase 2 – carga obtida após o aparecimento da primeira fissura até o destacamento de pequenas placas de concreto no entorno da alça de içamento e Fase 3 – carregamento máximo a partir da fase 2 até o deslocamento vertical da peça atingir 7,5 cm (final de curso do macaco hidráulico no ensaio) posteriormente ao aparecimento da rótula plástica no meio do vão do corpo de prova.

A fase 1 será analisada, neste trabalho, quantitativamente para garantir um critério de cálculo com a finalidade de dimensionar, por meio verificações, uma alça de içamento em uma laje maciça pré-moldada de concreto, a fase 2 por tensões máximas de tração na alma na superfície do cone de ruptura ( $45^\circ$ ) ou pela carga de punção e a fase 3 citada apenas de forma qualitativa com base nos critérios de cálculo, pois a peça ensaiada se encontra fissurada e com grandes deformações. As barras das alças devem ser dimensionadas previamente e são constituídas por aço CA 25, com menor teor de carbono em relação ao CA 50, maior facilidade para dobramento e ruptura menos fragilizada, pois os átomos de ferro constituintes conseguem preencher os vazios com menor interferência dos átomos de carbono (CALLISTER, 2012). Foram utilizadas as alças de içamento de aço CA 25 de 12,5 mm de diâmetro diferentemente do aço ASTM 36 recomendado pela norma de pré-moldados NBR 9062, pois se trata de um material amplamente utilizado pelas construtoras brasileiras como insertos metálicos de peças pré-moldadas de concreto para içamento.

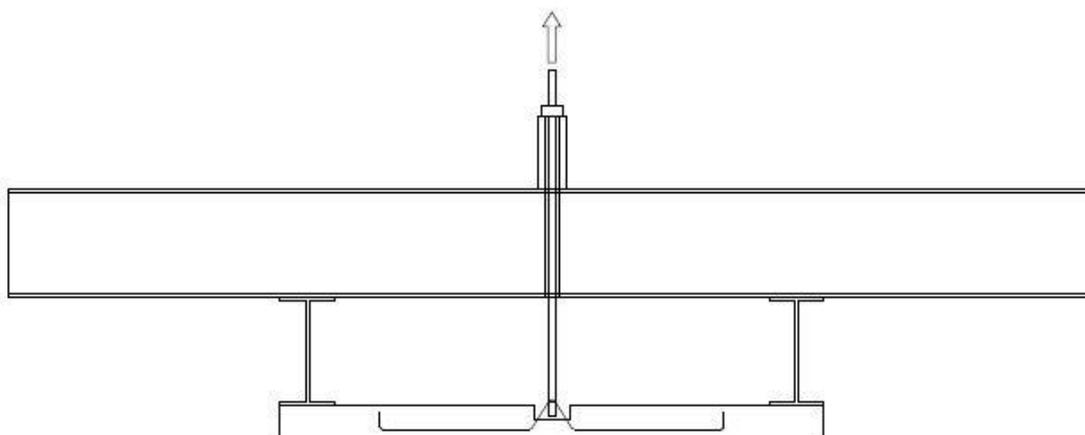
Diante do exposto, não há uma metodologia clara, com base em normas internacionais e a NBR 6118, para dimensionar o sistema de içamento quanto à forma e área de contato do içador, se há necessidade ou não de reforços, e o mais importante, o mecanismo de transmissão das tensões no concreto.

O ensaio de arrancamento da alça metálica (Figura 34) proporcionará que a laje seja submetida simultaneamente a esforços de flexão e tensões de cisalhamento consideráveis no ponto de aplicação da carga e possa representar a solitação da qual o inserto metálico e o cone de concreto ao seu redor estão submetidos. Trata-se, portanto, de ensaio de aplicação de carga com laje biapoiada conforme a figura 34 de momento máximo no meio do vão  $m_x = M_x/b$  e força cortante considerável na superfície cônica.

Figura 33 – Dois apoios laterais no ensaio de arrancamento do gancho.

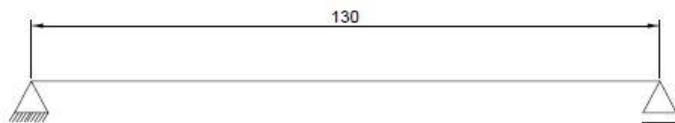


Figura 34 – Representação do ensaio de arrancamento de gancho metálico.



As lajes içadas de maneira geral não obedecem a solicitação quanto à flexão como foi proposto pelo ensaio, porém há a possibilidade de determinar os momentos máximos por metro ( $m_x$ ) de laje através de softwares de cálculo estrutural nos pontos de içamento.

Figura 35 – Dimensão L do modelo de viga simplesmente apoiada do ensaio.



O formulário abaixo sintetiza todos os modelos propostos neste trabalho.

Tabela 6 – Formulário.

Descrição	Equação	Nº
Carga de aparecimento da 1ª fissura na face superior da laje pela teoria da resistência dos materiais na flexão simples.	$P = \left(\frac{2}{3}\right) * \left(\frac{B * H^2}{6}\right) * (f_{ctm,7})$	Equação 3
Carga máxima de tração no banzo superior sem armadura – Proposta de modelo de bielas e tirantes.	$\frac{M}{z} = f_{ctm,7} * (B * y)$	Equação 9
Carga de ruptura do cone de concreto calculada pela tensão de tração máxima na alma da treliça de Morsch (45°) proposta para o ensaio.	$P = (f_{ctm,7}) * [(\sqrt{2} * \pi) * (R_{topo}^2) - (R_{barra}^2)] * \left(\cos \frac{\pi}{4}\right)$	Equação 4
Carga de punção baseada na NBR 6118 (2014)	$P = (u * d) * 0,13 * \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) * (100 * \rho * f_{ck,7})^{\frac{1}{3}}$	Equação 7

Carga de punção proposta por MUTTONI (2008)	$P = \left(\frac{3}{4}\right) * (b_o * d * \sqrt{f_{ck,7}})$	Equação 8
Carga de punção pela ACI 318 (2004)	$P = \left(\frac{1}{3}\right) * (b_o * d) * (\sqrt{f_{ck,7}})$	Equação 6
Carga de tração resistente na superfície do cone de concreto pela ACI 318 (2004)	$P = 12,55 * \sqrt{f_{ck,7}} * h_{ef}^{1,5}$	Equação 5

A área do cone foi determinada pela equação 12 abaixo e foi incorporada na equação 4.

Equação 12 – Área do tronco de cone a 45° do plano horizontal.

$$A_{cone} = \sqrt{2} \int_{R_{barra0}}^{R_{topo2\pi}} r dr d\theta;$$

$$A_{cone} = [(\sqrt{2} * \pi) * (R_{topo}^2) * (R_{barra}^2)] .$$

### ACOS CA 25 E CA 50

A verificação quanto às forças cortante e tração resistentes serão baseadas na NBR 8800, ambas reduzidas pelo coeficiente de 1,1.

Equação 13 – Força cortante resistente no aço.

$$F_{v,rd} = ((0,6) * (f_y) * A_{barra})/1,1$$

Equação 14 – Força de tração resistente no aço.

$$F_{rd} = ((f_y) * (A_{barra}))/1,1$$

Os modelos utilizados para calcular a carga resistente pela flexão simples e carga de ruptura pelo modelo de bielas e tirantes são justificados pelo momento fletor negativo solicitante no momento do içamento da laje. As cargas resistentes de punção foram baseadas pela NBR 6118, Muttoni e ACI 318 e servirão de apoio para validar a possibilidade de utilizá-las na verificação da carga de arrancamento de inserto metálico em lajes maciças pré-moldadas, pois as mesmas são utilizadas para verificação quanto ao cisalhamento na transmissão de tensões no encontro entre as lajes e pilares. Neste trabalho o pilar foi substituído pela barra de alça metálica,  $\Phi$  de 12,5 mm.

A área da superfície cônica calculada pela integral da equação 12 acima foi estimada como a área resistente do cone de concreto ao redor do inserto metálico capaz de resistir às tensões de tração oriundas da força cortante. Este modelo é justificado por ser simples e rápido de estimar a carga resistente. A ideia principal por trás deste modelo é a dispersão radial da força cortante através de tensões de compressão e tração, estas na superfície cônica e resistidas pelo próprio concreto. O cone a  $45^\circ$  é uma estimativa pelo próprio modelo de bielas e tirantes a  $45^\circ$  também, de tal maneira que o somatório de tensões resulte em forças equilibradas com as demais oriundas do momento fletor negativo nos quatro nós localizados na parte superior da laje e no entorno da alça metálica (Figuras 18 e 19). O modelo de ruptura do cone de concreto proposto pela ACI 318 parece ser bem razoável por se tratar de um modelo difundido em diversos trabalhos na área de transmissão de esforços ao concreto pelo inserto metálico.

### **Parâmetros utilizados pelos modelos de cálculo:**

$\rho$  é a taxa de armação da laje;

$f_{ck,7}$  é a resistência característica à compressão do concreto aos 7 dias de idade;

$f_{ctm,7}$  é a resistência média à tração do concreto aos 7 dias de idade calculada a partir do  $f_{ck,7}$  conforme a NBR 6118;

$f_{ctk,7}$  é a resistência característica à tração do concreto aos 7 dias de idade calculada a partir do  $f_{ck,7}$  conforme a NBR 6118

$B$  é a largura da laje (corpo de prova);

$H$  é a altura da laje (corpo de prova);

$M$  é o momento fletor máximo na laje ensaiada;

$z$  é a distância entre os eixos dos banzos (tracionado e comprimido);

$d$  é a altura considerada na seção resistente da laje;

$b_o$  é o perímetro de controle a  $(1/2)*d$  (ACI 318, 2004);

$u$  é o perímetro de contorno crítico  $C'$  (NBR 6118, 2014);

$u*d$  é a área da superfície crítica;

$R$  é o raio;

$\Phi$  é o diâmetro;

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 5.1 MATERIAIS

- Tela Q196 (armadura positiva), CA50;
- Tela Q159 (armadura de fretamento), CA50;
- Barras longitudinais, CA50  $\Phi$ 8mm (armadura de reforço);
- Ganchos CA25 de comprimento total 110 cm e diâmetro de 12,5 mm;
- Concreto  $f_{ck} = 25\text{MPa}$  aos 28 dias de idade;
- Duas vigas de duplo perfil I soldado de aço 1020 de 1,0 m de comprimento e 20 cm de altura;
- Uma viga de seção retangular vazada de 2,14 m de comprimento, 45 cm de altura e 13 cm de largura.

### 5.2 EQUIPAMENTOS

- Um macaco com furo de 120 kN de capacidade e 7,5 cm de curso.
- Uma bomba hidráulica para acionar o macaco, a mesma contém um transdutor de pressão para determinar a carga aplicada por esta;
- Um aparelho ADS500 que aplica uma tensão nominal de 10 V em cada canal para determinar a diferença de potencial, através do transdutor de pressão, quando o macaco é acionado;
- Um notebook e software capaz de fazer as leituras dos sinais enviados pelo ADS500.

### 5.3 CONFIGURAÇÕES DE ARMADURA NO SISTEMA DE IÇAMENTO

As lajes foram moldadas com oito diferentes configurações de armadura no ponto de içamento e para cada configuração foram concretadas três lajes quadradas (corpos de prova), totalizando vinte e um corpos de prova de 1,5 m por 1,5 m e com 9 cm de altura. Cada configuração foi chamada de laje tipo para os ganchos com diâmetro de 12,5 mm e paralelos a duas arestas do corpo de prova e DGL para os ganchos orientados no plano diagonal das lajes. No total são sete configurações de gancho paralelo a duas arestas e uma na diagonal.

#### 5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Figura 36 - Laje Tipo I GPC – Gancho em cima da armadura (tela) positiva, duas barras de reforço ( $\Phi$  8mm) de 1,5 m e uma tela de fretamento de 1 X 1 m.

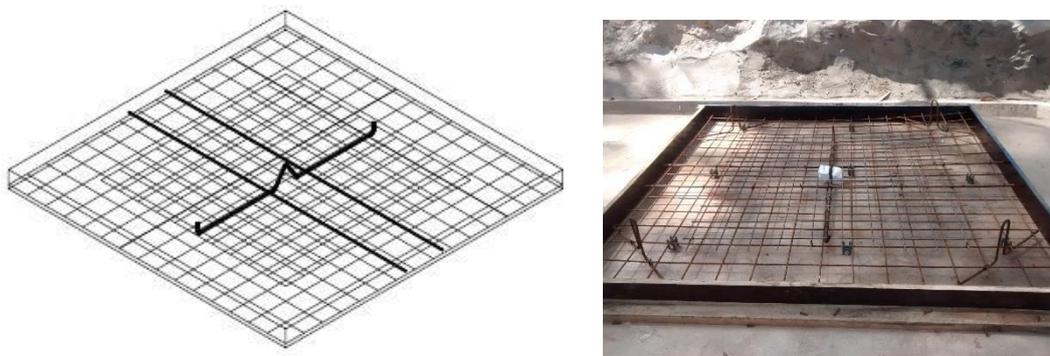


Figura 37 - Tipo II GPB – Gancho por baixo da armadura (tela) positiva.

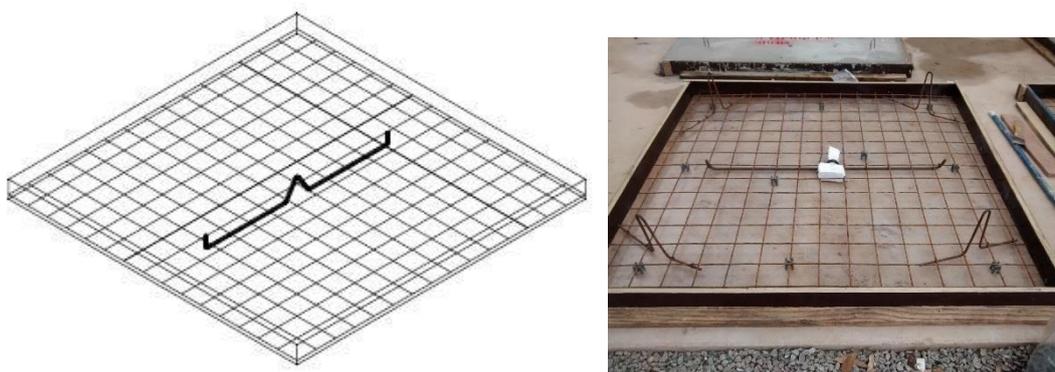


Figura 38 - Tipo II GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva.

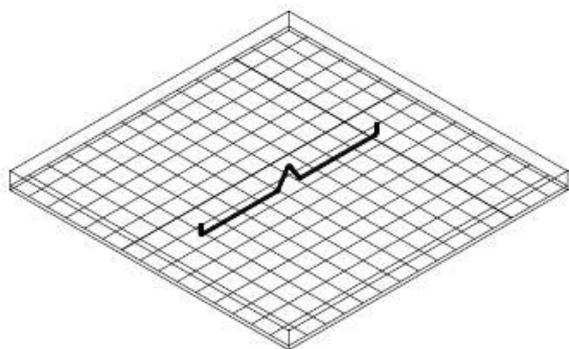


Figura 39 - Tipo III GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e duas barras de reforço ( $\Phi$  8mm) de 1,5 m.

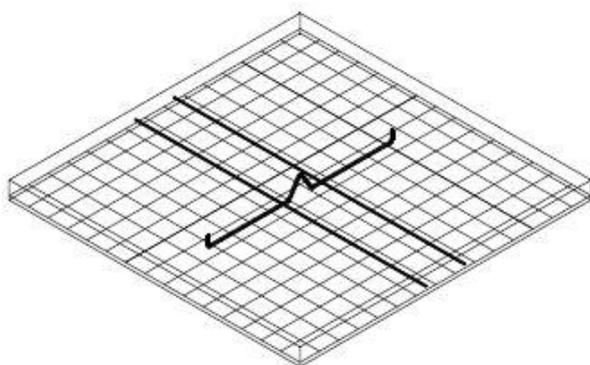


Figura 40 - Tipo IV GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e tela de fretamento 1 X 1 m.

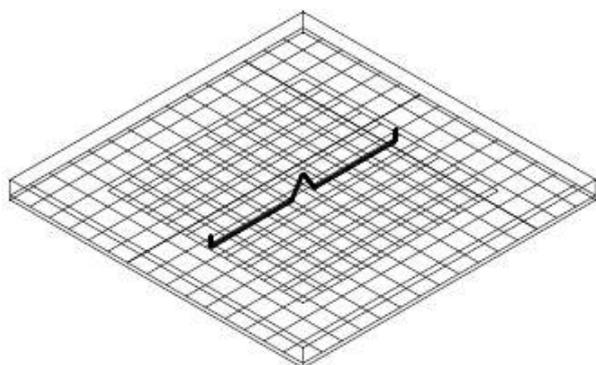


Figura 41 - Tipo V GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva, duas barras de reforço ( $\Phi$  8mm) de 1 m e tela de fretamento 0,5 X 0,5 m.

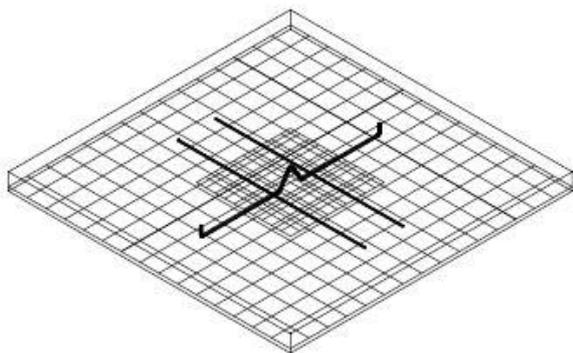


Figura 42 - Tipo VI GPC – Gancho por cima da armadura (tela) positiva e duas barras de reforço ( $\Phi$  8 mm) de 0,8 m.

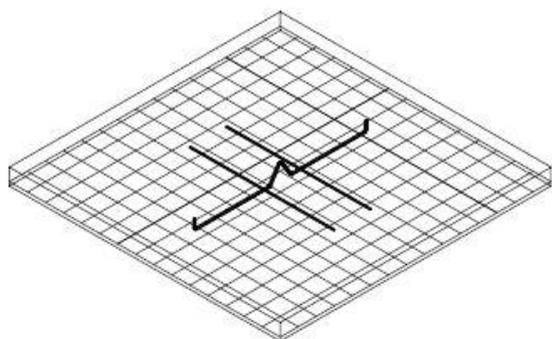
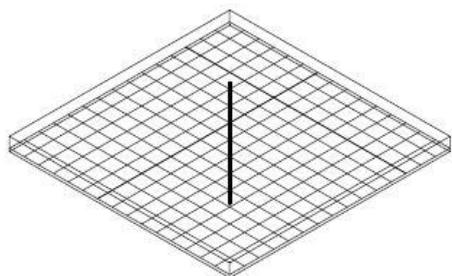


Figura 43 - DGL GPC – Gancho ( $\Phi$  12,5mm) na diagonal por cima da tela e sem reforço.



### 5.3.2 QUANTIDADE DE ARMADURA POR PONTO DE IÇAMENTO

Os materiais utilizados em cada ponto de içamento foram pesados para comparação prévia entre as diferentes configurações (Tabela 7).

Tabela 7 - Quantidade de aço em cada ponto de içamento.

LAJE TIPO I GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Tela Q159 1X1 m	1	2,5
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Barra ( $\Phi$ 8mm) 1,5 m	2	1,140
Total		4,7
LAJE TIPO II GPB		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Total		1,1
LAJE TIPO II GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Total		1,1
LAJE TIPO III GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Barra ( $\Phi$ 8mm) 1,5 m	2	1,1
Total		2,2
LAJE TIPO IV GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Tela Q159 1X1 m	1	2,5
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Total		3,5

LAJE TIPO V GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Tela Q159 0,5X0,5 m	1	0,6
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Barra ( $\Phi$ 8mm) 1 m	2	0,8
Total		2,4
LAJE TIPO VI GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Barra ( $\Phi$ 8mm) 0,8 m	2	0,6
Total		1,7
DGL GPC		
Material	Quantidade	Massa (kg)
Gancho CA25 1,1 m	1	1,1
Total		1,1

### 5.3.3 AVALIAÇÃO DA CARGA DE ARRANCAMENTO DO GANCHO

#### 5.3.4 MÉTODO

O ensaio de arrancamento foi realizado com acionamento manual de um macaco hidráulico (Figura 44) acoplado a um sistema de barra e porca olhal, preso ao gancho da laje tipo (Figura 45).

O eixo da barra do gancho foi orientado conforme a direção dos apoios e diagonal do corpo de prova. Serão denominados de paralelos (A) e ortogonais (B) aos mesmos apoios e diagonais (DGL).

As pressões, relativas às cargas, foram convertidas em sinal elétrico pelo transdutor de pressão e analisadas graficamente em um computador (notebook) (Figura 46).

Figura 44 - Bomba manual para o acionamento do macaco hidráulico



Figura 45 - Sistema fechado de carregamento em gancho central



Figura 46 - Sistema transdutor de pressão – ADS e notebook



### 5.3.5 RESULTADOS

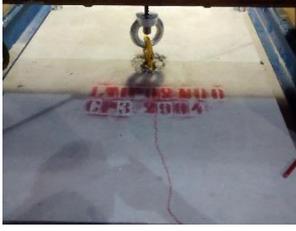
A orientação do gancho de içamento em relação aos dois apoios no corpo de prova (Figura 45) será indicada pelas letras A e B, respectivamente paralelo e ortogonal aos apoios laterais e DGL de orientação diagonal para o eixo da barra.

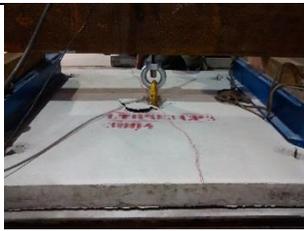
Para todos os sistemas que utilizam o gancho (alça convencional utilizada neste trabalho), o padrão de fissuração foi parecido com destaque ao gancho orientado pela diagonal de laje que apresentou fissuras em outras direções, além da linha paralela aos apoios, e que foi introduzido neste contexto, apenas, para comparar os resultados obtidos (fase 1, 2 e 3) e padrão de fissuração com os demais corpos de prova, cujas cargas de fase 1 e 2 comparadas com os resultados obtidos pelas equações 2 e 3 da proposta de bielas e tirantes. Em geral, nos vinte e um corpos de prova ensaiados, com exceção aos que continham a barra do gancho orientada pela diagonal da laje, houve uma fissura longitudinal passante pelo ponto de içamento que atravessa a laje toda e paralela aos dois apoios laterais usados para apoiar a viga central (Figura 45), esta típica de flexão destacada pela fase 1. A fase 2 caracterizada pelo deslocamento de concreto no entorno ao gancho, típico do cone de ruptura em  $45^\circ$ , porém com o concreto já fissurado e a fase 3 qualitativamente caracterizada por inúmeras fissuras, deslocamento do concreto ao redor do ponto de içamento e deformação excessiva do corpo de prova imposta pelo curso do macaco (7,5 cm), porém sem arrancamento do gancho.

O padrão de carregamento no ensaio é composto de máximos, dentre os quais, destaquemos três, o primeiro máximo que foi observado no momento do aparecimento da primeira fissura longitudinal na região central do corpo de prova (fase 1) e, após este, houve um decréscimo de carga até o corpo de prova resistir novamente e atingir o segundo máximo, chamado de fase 2, este caracterizada pelo destacamento de partes de concreto ao redor do gancho. Na sequência houve alguns picos de carga até o final de curso do macaco. Os resultados foram agrupados na Tabela 8 com as imagens de cada fase de carregamento.

Tabela 8 - Padrões de fissuração nas fases 1, 2 e 3 caracterizadas pelo ensaio.

Sigla	Orientação	Fase 1 – Primeira fissura (flexão)	Fase 2 – Deslocamento de concreto	Fase 3 – Final de curso (7,5 cm)
LTIPO I GPC ( $f_{ck,7} = 14,60 \text{ MPa}$ )	A	 18,7 kN	 27,1 kN	 42,0 kN
	A	 16,4 kN	 26,1 kN	 36,6 kN
	B	23,6 kN	 23,8 kN	 38,2 kN
LTIPO II GPB ( $f_{ck,7} = 15,55 \text{ MPa}$ )	B	 21,0 kN	 24,5 kN	 37,6 kN

	A			
		17,4 kN	17,9 kN	27,4 kN
	B			
		22,6 kN	25,6 kN	34,8 kN
LTIPO II GPC ( $f_{ck,7} = 12,73 \text{ MPa}$ )	A			
		19,0 kN	16,5 kN	25,4 kN
	B			
		19,0 kN	21,0 kN	21,9 kN
	B			
		19,1 kN	25,5 kN	24,5 kN

LTIPO III GPC ( $f_{ck,7} = 14,83 \text{ MPa}$ )	B			
		22,1 kN	26,1 kN	28,6 kN
	A			
		20,6 kN	19,7 kN	32,4 kN
	B			
		26,7 kN	29,8 kN	37,6 kN
LTIPO IV GPC ( $f_{ck,7} = 16,30 \text{ MPa}$ )	B			
		22,0 kN	26,4 kN	32,2 kN
	A			
		14,8 kN	22,8 kN	25,4 kN
	B			
		15,0 kN	24,9 kN	28,3 kN

LTIPO V GPC ( $f_{ck,7} = 18,78 \text{ MPa}$ )	B			
		21,4 kN	27,9 kN	39,2 kN
	A			
		19,2 kN	26,9 kN	38,5 kN
	B			
		22,7 kN	30,1 kN	34,8 kN
LTIPO VI GPC ( $f_{ck,7} = 17,74 \text{ MPa}$ )	B			
		20,8 kN	25,8 kN	38,3 kN
	A			
		18,9 kN	21,8 kN	28,0 kN

	B			
		19,6 kN	24,3 kN	31,4 kN
DGL GPC ( $f_{ck,7} = 16,28 \text{ MPa}$ )				
		20,2 kN	22,5 kN	24,4 kN
				
		25,1 kN	24,5 kN	22,2 kN
				
		26,4 kN	21,0 kN	23,6 kN

As cargas obtidas pelo ensaio (conforme os gráficos 3 e 4) foram comparadas com as cargas obtidas na flexão simples pela equação da resistência dos materiais e proposta de bielas e tirantes. Os resultados estão dispostos na tabela 9.

O  $f_{ctm,7}$  foi utilizado para aproximar as cargas resistentes, determinadas a partir dos diferentes modelos, às cargas obtidas nos ensaios, pois os valores do  $f_{ckt,7}$  são menores e, portanto, distanciaria os valores de cálculo dos experimentais.

A direção A da barra do gancho, na tabela 9, é paralela aos apoios laterais e a B ortogonal. A carga teórica obtida pela treliça de Morsch está ancorada pela teoria de bielas e tirantes, estes últimos resistidos pela tração e compressão do concreto.

Tabela 9 – Comparação entre as cargas obtidas até o aparecimento da primeira fissura e máxima tração pelo modelo de treliça.

Sigla	Amostra	Direção	Experimental		P(kN) Teórico - tração no concreto	
			$f_{ck,7}$ (MPa)	P (kN)	Flexão simples	Treliça
LTIPO I GPC	1	A		18,70		
	2	A	14,60	16,40	11,16	30,32
	3	B		23,60		
LTIPO II GPB	1	B		21,00		
	2	A	15,55	17,40	11,64	32,29
	3	B		22,60		
LTIPO II GPC	1	A		19,00		
	2	B	12,73	19,00	10,19	26,44
	3	B		19,10		
LTIPO III GPC	1	B		22,10		
	2	A	14,83	20,60	11,29	30,81
	3	B		26,70		
LTIPO IV GPC	1	B		22,00		
	2	A	16,30	14,80	12,01	33,85
	3	B		15,00		
LTIPO V GPC	1	B		21,40		
	2	A	18,78	19,20	13,20	39,00
	3	B		22,70		
LTIPO VI GPC	1	B		20,80		
	2	A	17,74	18,90	12,71	36,84
	3	B		19,60		

As cargas de punção, conforme a fase 2 do carregamento, estão dispostas na tabela 10, esta conta com as cargas obtidas por normas, equação 5 e somatório de tensões de tração na superfície cônica (treliça - 45°) próxima da barra do gancho.

Tabela 10 – Fase 2 do carregamento – Deslocamento de partes de concreto ao redor do gancho (ruptura de cone/punção).

Direção	Experimental		P (kN) Teórico - Deslocamento de concreto				
	$f_{ck,7}$ (MPa)	P (kN)	ACI - 318	Treliça	NBR 6118	Muttoni	ACI - 318 (cone)
A		27,10					
A	14,60	26,10	17,30	19,71	20,31	28,52	18,6
B		23,80					
B		24,50					
A	15,55	17,90	28,96	35,04	34,78	51,30	29,8
B		25,60					
A		16,50					
B	12,73	21,00	16,15	17,99	0,00	26,63	17,4
B		25,50					
B		26,10					
A	14,83	19,70	17,44	19,92	14,87	28,75	18,8
B		29,80					
B		26,40					
A	16,30	22,80	18,28	21,21	17,91	30,14	19,7
B		24,90					
B		27,90					
A	18,78	26,90	19,62	23,31	19,55	32,35	21,1
B		30,10					
B		25,80					
A	17,74	21,80	19,07	22,44	15,78	31,44	20,5
B		24,30					

Os resultados do corpo de prova com a barra do gancho orientada pela diagonal não foram incorporados às tabelas 9 e 10, pois não foi proposto um caminhamento de tensões devido à complexidade deste.

As resistências à tração e ao cisalhamento das barras do gancho de içamento de CA 25 foram calculadas segundo a NBR 8800, conforme a tabela 11.

Tabela 11 – Resistências características (NBR 8800) das barras quanto à força cortante e à tração.

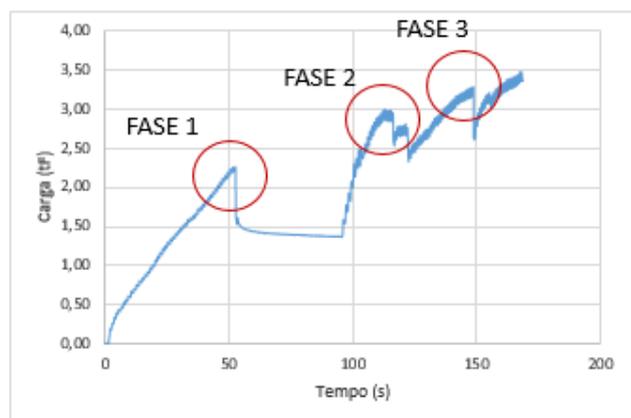
$\phi_{\text{barra}}$ (mm)	Área <sub>barra</sub> (mm <sup>2</sup> )	CA25 $f_y$ (MPa)	
		cortante (kN)	tração (kN)
12.50	122.72	16,00	26,68

Obs:  $f_y = 250$  MPa.

## 6 CONCLUSÕES

Buscou-se neste trabalho uma metodologia simples para verificação da carga por ponto de içamento a partir da flexão simples da laje pela teoria da resistência dos materiais, tração máxima no banzo superior calculada pelo modelo de bielas e tirantes na seção de momento máximo, ruptura na superfície cônica pela tensão de tração na alma da treliça simples 45° de Morsch proposta neste trabalho pelo modelo do ensaio e ACI 318, punção pela equação de Muttoni de 2008, punção pela NBR 6118 e ACI 318, em todos os casos comparados aos resultados experimentais. Foram descritas três fases de carregamento, de acordo, com os máximos alcançados no ensaio e estado de fissuração da peça, são eles: Fase 1 – carga de arrancamento até o aparecimento da primeira fissura; Fase 2 – carga obtida após o aparecimento da primeira fissura até o destacamento de pequenas placas de concreto no entorno da alça de içamento e Fase 3 – carregamento máximo a partir da fase 2 até o deslocamento vertical da peça atingir 7,5 cm (final de curso do macaco hidráulico no ensaio) posteriormente ao aparecimento da rótula plástica no meio do vão do corpo de prova (Figura 47).

Figura 47 – Esquema representativo das fases de carregamento.



A fase 1 analisada, neste trabalho, quantitativamente para garantir um critério de cálculo com a finalidade de dimensionar, por meio verificações, uma alça de içamento em uma laje maciça pré-moldada de concreto, a fase 2 por tensões máximas de tração na alma na superfície do cone de ruptura ( $45^\circ$ ) e tensões de cisalhamento e a fase 3 citada apenas de forma qualitativa com base nos critérios de cálculo, pois a peça ensaiada se encontra fissurada e com grandes deformações. As barras das alças devem ser dimensionadas previamente e são constituídas por aço CA 25, com menor teor de carbono em relação ao CA 50, maior facilidade para dobramento e ruptura menos fragilizada, pois os átomos de ferro constituintes conseguem preencher os vazios com menor interferência dos átomos de carbono (CALLISTER, 2012). A NBR 9062 recomenda o uso de inserto constituído de aço A36 com baixo teor de carbono, porém o CA25 é amplamente difundido em empreendimentos do Minha Casa Minha Vida e por este motivo foi utilizado neste trabalho. Os comprimentos de ancoragem do gancho central e reforços, de grande importância para a segurança do conjunto, não foram avaliados neste trabalho e devem ser respeitados no contexto geral.

Diante do exposto, não há uma metodologia clara, com base em normas internacionais e pela a NBR 6118, para dimensionar o sistema de içamento quanto à forma e área de contato do içador, se há necessidade ou não de reforços, e o mais importante, o mecanismo de transmissão das tensões no concreto.

Foi utilizado o  $f_{ctm,7}$  ou invés do  $f_{ctkinf,7}$  como limite superior da tensão de tração nos modelos teóricos de cálculo como alternativa para se chegar o mais próximo possível dos valores experimentais.

Deve-se salientar que as fases 1, 2 e 3 descritas neste trabalho incidem para o corpo de prova ensaiado por se tratar de laje maciça pré-moldada de 9 cm de altura amplamente utilizada em edifícios residenciais para programas habitacionais necessários. Portanto, os modelos adotados serviram para conflitar os resultados experimentais obtidos e nada impede de extrapolar o modelo de cálculo com as devidas correções das equações para obter os momentos e cargas pontuais resistentes a partir do  $f_{ck}$  e  $f_{ctm}$  (Equação 1 até a equação 9). As solicitações, por sua vez, podem sofrer variações de acordo com o modelo estrutural e carregamento. Por exemplo, neste trabalho a fase 1 foi caracterizada pelo aparecimento de fissura longitudinal no meio do vão, onde a solicitação pelo momento fletor sobressaiu ao deslocamento de concreto devido à força cortante.

Chama-se atenção pelo fato do corpo de prova ensaiado ter sido solicitado concomitantemente por momento fletor e força cortante concentrada como ocorre em lajes de edifícios de programas habitacionais no momento do içamento. Este efeito combinado faz com que a inclinação da geratriz do cone resistente de concreto fique mais abatida. É muito complicado modelar os dois efeitos para se chegar a uma única carga de trabalho.

Diante do exposto no parágrafo anterior, devem-se analisar os momentos fletores até o aparecimento da 1ª fissura, como também, a possível punção ou deslocamento da parte superior da laje no entorno da alça metálica, então, calcular através dos modelos sugeridos, por exemplo, os momentos resistentes (1ª fissura) e carga resistente à tração na superfície do cone de concreto e punção. A partir das etapas supramencionadas, caracterizam-se as fases 1, 2 e 3, sendo a fase 1 a que demanda de menor carga para a tração do gancho e a 3 a maior evidenciada pelo arrancamento parcial do gancho.

Foi utilizado um índice, cuja relação carga teórica pela carga experimental serviu para comparar as cargas oriundas de normas, as propostas de bielas e tirantes, flexão simples e equação do Muttoni sem o fator que incorpora a deformação da laje devido à flexão e que reduz a carga de punção, pois não foram medidos os deslocamentos verticais do corpo de prova no ensaio.

Percebe-se, até o aparecimento da primeira fissura, que os resultados obtidos pela flexão simples ancorada pela resistência dos materiais são menores que os valores experimentais, conforme o Gráfico 3. Essa diferença pode ser justificada pelo  $f_{ctm,7}$  calculado a partir do  $f_{ck,7}$  e utilizado na resistência à tração do concreto ao invés do valor obtido por ensaio de compressão diametral, por exemplo. De qualquer maneira, o índice mostra a tendência conservadora nos dois métodos (Gráfico 3 e Gráfico 4).

O modelo do ensaio é isostático e mesmo assim foi possível alcançar cargas superiores ao o deslocamento de concreto na fase 2 o que sugere outros mecanismos de transferência de carga no interior da peça de concreto. Provavelmente o efeito de pino se fez presente com elevada deformação do corpo de prova.

Gráfico 3 – Índices obtidos pela direção A (orientação paralela da barra do gancho) – Fase 1.

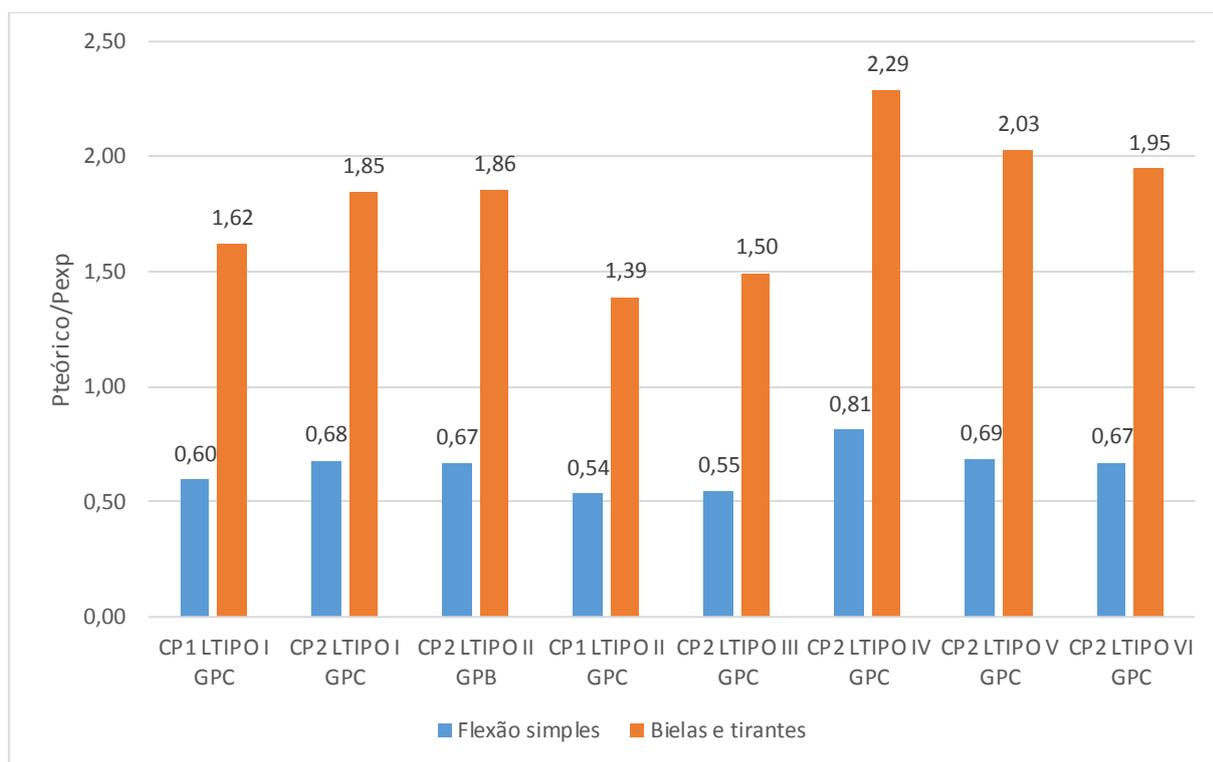
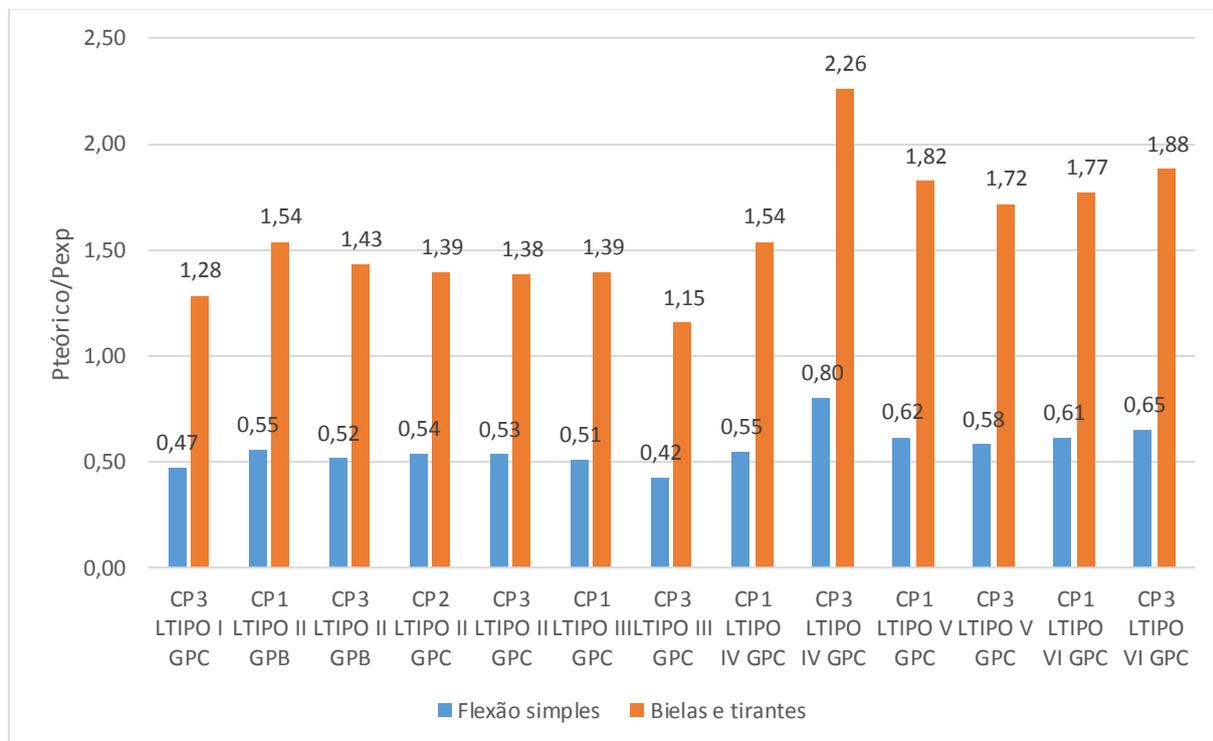
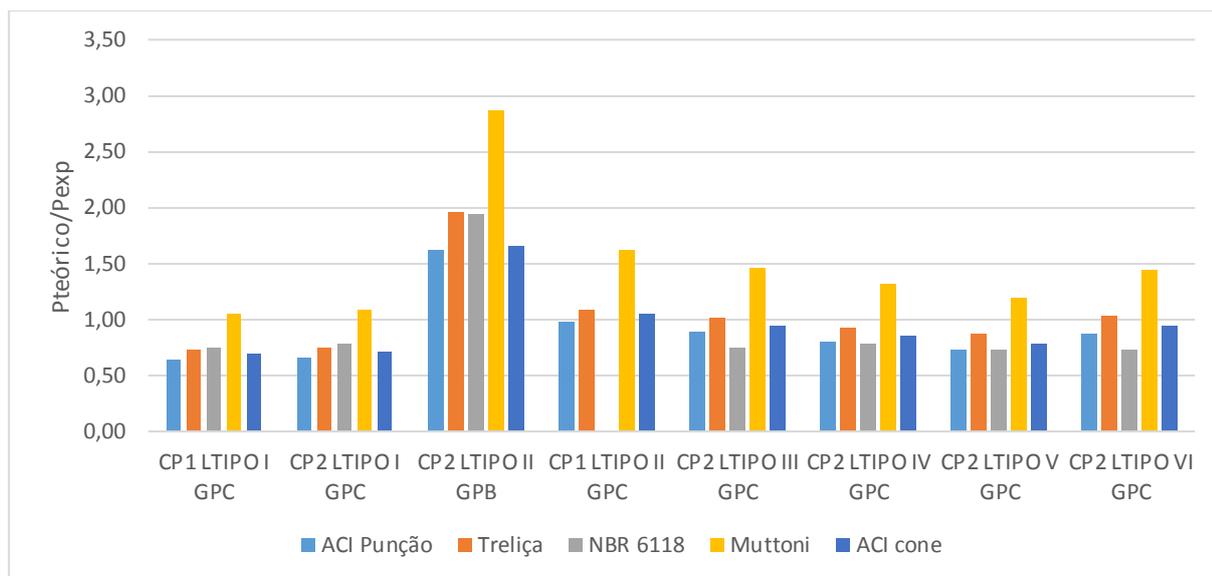


Gráfico 4 – Índices obtidos pela direção B (ortogonal aos apoios) – Fase 1.



O destacamento de placas de concreto começa a ocorrer depois do aparecimento da primeira fissura longitudinal típica de flexão, este foi calculado conforme a tabela 10 para diferentes normas e equações. Há a tendência de maiores resultados para resistências maiores à compressão do concreto.

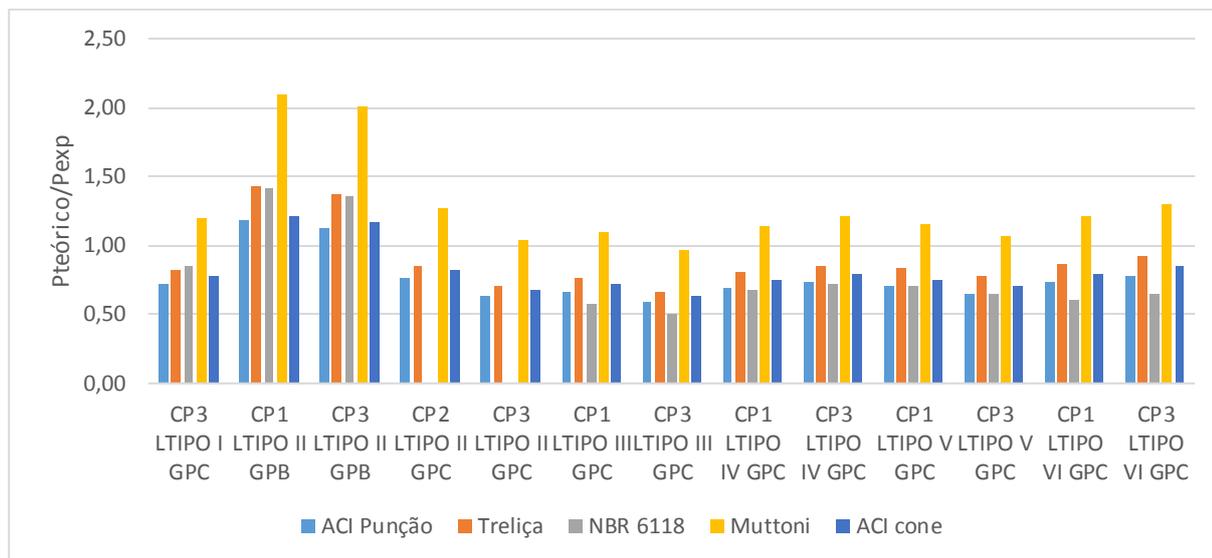
Gráfico 5 – Índices obtidos pela direção A no destacamento de placas de concreto – Fase 2.



Houve uma grande divergência nas cargas obtidas pelas normas e equações com relação às cargas experimentais na LTIPO II GPB, possivelmente a altura  $d$  considerada nos cálculos foi superestimada. A altura  $d$  foi determinada com base na posição vertical da barra do gancho, acima ou abaixo da armadura positiva. Os reforços foram considerados de forma qualitativa, apenas, para verificar acréscimos ou decréscimos de carga de deslocamento do concreto, da necessidade de imposição destas frente às solicitações e, pelo exposto, há a necessidade de armadura negativa para resistir aos esforços de flexão na região do içador. A tela de fretamento foi especificada anteriormente ao trabalho para resistir às tensões de tração impostas pelo momento fletor negativo. Houve uma mudança na posição da tela no momento da armação do corpo de prova para simular o efeito de um possível equívoco, pois há a possibilidade de ocorrer o posicionamento da tela simplesmente por cima do gancho no canteiro de obra, se não houver um controle eficaz. As barras de reforço, por sua vez, poderiam ser colocadas mais próximas das “pernas” da alça metálica, pois além de garantir com maior eficácia o efeito de pino na superfície cônica de ruptura possibilitaria o aumento da área do cone.

A equação de Muttoni sem a deformação da laje superestima as cargas resistentes de punção, entretanto as demais seguem próximas pelos outros métodos de cálculo (Gráfico 5 e Gráfico 6).

Gráfico 6 – Índices obtidos pela direção B no destacamento de placas de concreto – Fase 2.



A carga obtida pela treliça de Morsch 45° não fissurada é praticamente igual à carga de punção sem momento atuante obtida pela NBR 6118. Aparentemente o manual ACI 318 foi o mais conservador com relação à carga de punção e ruptura do cone de concreto neste trabalho.

Os resultados mostrados neste trabalho servirão de apoio para uma análise estrutural de um tipo específico de alça (gancho de içamento) em uma laje maciça de 9 cm de altura, muito utilizada em edifícios residenciais. As cargas últimas, assim chamadas nesta dissertação e que levam em conta a carga máxima obtida entre a fase 2 e o curso final do macaco, possuem uma relação direta com a armadura de reforço ou fretamento, pois no momento da aplicação da carga a peça de concreto se encontra toda fissurada e deformada, sem capacidade resistente.

Os reforços foram considerados, através de suas respectivas taxas de armação, nos cálculos da carga de punção pela NBR 6118, apenas. A armadura de fretamento em todos os corpos de prova, por exemplo, foi intencionalmente posicionada imediatamente acima do inserto metálico para simular um possível desajuste entre o executado e o projetado. As tensões de tração presentes na parte superior da laje imediatamente acima do gancho deveriam ser resistidas pela armadura de fretamento e que ocorreu neste trabalho conforme o exposto acima. O mesmo pode ser dito com relação às armaduras de reforço posicionadas também acima do

gancho, porém com a diferença que estas distribuiriam parte da carga concentrada além do entorno do gancho considerado pela superfície de cone a 45°. A princípio as barras de reforço contribuíram para a ligação efeito de pino no cálculo pela NBR 6118, porém não há precisão nos resultados para evidenciar a efetiva participação nos resultados tanto pelos reforços de barras quanto pela tela de fretamento. Foi considerada apenas a capacidade resistente do concreto na análise dos resultados, não houve a possibilidade de verificar o grau de influência das armaduras de reforço e fretamento na carga resistente de acordo com a flexão simples da laje e ruptura do cone de concreto ou punção devido à força cortante na peça de concreto imposta pela barra do inserto.

As verificações devem ser feitas com relação às cargas de tração oriundas dos momentos fletores máximos na peça a ser içada e força cortante em cada ponto de içamento. Serão listados alguns tópicos essenciais para a o içamento de laje sem armadura negativa na região do gancho:

- O nível da carga de trabalho acarretará na escolha do diâmetro da barra do gancho, porém neste trabalho as cargas de primeira fissura das lajes ensaiadas, que são peças esbeltas, se mostraram próximas para todos os corpos de prova. O engenheiro deverá decidir se o efeito da existência de fissura devido ao momento de 1ª fissuração implicará em danos maiores à peça ou simplesmente ficará escondida ou fechada como no presente caso quando a fissura devido ao momento negativo é fechada pelo momento positivo na mesma peça quando submetida ao carregamento em serviço. Conclui-se, então, que a laje ensaiada neste trabalho é tracionada na fibra superior com o aparecimento da 1ª fissura, antes mesmo da punção do gancho, cisalhamento e tração da barra. O içamento por ganchos de outras peças de concreto como vigas, pilares e lajes diferentes das quais foram ensaiadas nesta pesquisa (150x150x9cm) deve ser melhor estudado, pois nestes casos, a barra poderá romper por tração, cisalhamento antes mesmo da peça de concreto romper ou, então, a peça romper por puncionamento na região do gancho.
- O modelo de cálculo de punção ou deslocamento de camada de concreto acima do inserto pela superfície de cone a 45° proposta neste trabalho poderá ser utilizada pelo engenheiro calculista na tentativa de estimar a carga resistente.
- A garantia de segurança no içamento por guindaste ou grua passa pela inserção dos fatores de segurança para o nível de carga por ponto de içamento em que não ocorra fissuração da peça. A quantidade de pontos de içamento dependerá da força atuante, que

leva em consideração os fatores de redução (fator dinâmico dos equipamentos de movimentação e elevação, coeficiente de ponderação da resistência do concreto e inclinação dos cabos), e do peso próprio da peça de concreto.

- Os resultados mostraram maiores nos ganchos de eixo ortogonal, direção B, aos apoios, logo é recomendado que a direção do eixo do gancho tipo “chapéu” coincida com a direção determinada pela reta que une o ponto de içamento e o centro de massa da laje.

O trabalho de Oktavianus de 2017, por exemplo, explorou a interação e deformação dos materiais distintos em regime elástico no ensaio de arrancamento de pino imerso em concreto através da combinação de molas. É um ótimo ponto de partida mesmo sem ficar muito claro o comportamento elástico do concreto, mas o princípio deve ser preservado para trabalhos futuros que devem ser complementados talvez por conceitos de mecânica da fratura.

Trabalhos futuros com novos ensaios de arrancamento poderão considerar a instalação de strain-gages nas barras de reforço, tela de fretamento e na própria barra do gancho para determinar a deformação destes materiais quando o gancho estiver submetido ao arrancamento. Há alguns tópicos importantes que poderão ser explorados em outros ensaios:

- Flecha da laje ensaiada;
- Laje apoiada em uma e duas direções;
- Medir o diâmetro da placa de concreto despreendida após a fase 2 de carregamento;
- Maior controle do posicionamento da armadura de reforço (barra e tela);
- Mudança na configuração da barra de reforço;
- Novos corpos de prova com diferentes dimensões;
- Suplementação do ensaio com instrumentos sensíveis de medidas de deformação do concreto em pontos específicos;
- Ensaio ao arrancamento de inserto com barras de diferentes diâmetros;
- Controle de velocidade do carregamento.

A proposta de verificação do gancho de içamento (CA 25) utilizado neste trabalho em laje maciça pré-moldada passa pela carga por ponto de içamento que deve ser limitada a:

$$P \leq \text{menor} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{flexão simples}} \\ P_{\text{cone}} \\ P_{\text{punção}} \end{array} \right\}$$

A flexão simples pode ser limitada pela tensão de tração máxima,  $f_{ctm,7}$  ou  $f_{ctk,7}$ , na fibra tracionada mais distante da linha neutra da seção, cabe ao engenheiro projetista escolher o parâmetro de acordo com a sua necessidade. A equação da ACI 318 e superfície cônica proposta neste documento como treliça poderão auxiliar na determinação da carga resistente quanto ao deslocamento de concreto ao redor do inserto. Cabe ressaltar que as cargas de punção são investigativas e poderão ser exploradas com maior rigor em futuros trabalhos, mas todos os modelos com exceção da equação do Muttoni apresentaram resultados próximos aos modelos de ruptura do cone de concreto (ACI 318 e treliça).

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Alvenaria estrutural – Bloco de concreto - Procedimento: NBR 15961**. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos - Procedimento: NBR 7222**. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - NBR 6120**. Rio de Janeiro, 1980.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - NBR NM 67**. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Procedimento: NBR 5739**. Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova – Procedimento: NBR 5738**. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de concreto dosado em central – Procedimento: NBR 7212**. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: NBR 6118**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios - NBR 8800**. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – NBR 9062**. Rio de Janeiro, 2017.
- ACI COMMITTEE 318 – 05, **Building code requirements for structural concrete and commentary**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004.
- ALMEIDA, S.F., **Análise experimental estática e dinâmica da rigidez de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 204 p., 2010.

- BACHMAN, H.; STEINLE, A., **Precast concrete structures**. Ernst and Sohn. Berlin, Germany, 2011.
- BARAVELLI, J. E., **Trabalho e tecnologia no programa MCMV**. Tese de doutorado. Faculdade de arquitetura da Universidade de São Paulo, 226 p., 2014.
- BEER, F. P., **Resistência dos materiais**. McGraw – Hill, São Paulo, 652 p., 1982.
- CALLADINE, C. R., **Theory of shell structures**. Cambridge, 763 p., 1983.
- CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. LTC. São Paulo, 2002.
- COLLINS, P. M.; MITCHELL, D.; **Prestressed concrete structures**. Response publications, Canada, 1997.
- DAL CIN, A.; RUSSO, S., **Annex and rigid diaphragm effect on the failure analysis and earthquake damages of historic churches**. Vol. 59, pp 122-139, 2016.
- DAVID, D. L., **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 250 p., 2007.
- FERREIRA, D. V. G., **Edifícios com lajes maciças e paredes portantes pré-moldadas de concreto leve com pérolas de EPS**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 156 p., 2013.
- FIORITO, A. J. S. I., **Manual de argamassas e revestimentos**. PINI – 2ª ed., São Paulo, pp 29 – 40, pp 65 – 80, 2009.
- FRANCO, L. S., **Desempenho estrutural do elemento parede de alvenaria empregado na alvenaria estrutural não armada, quando submetido a esforços de compressão**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 136 p., 1987.
- FUSCO, P. B., **Estruturas de concreto: solicitações normais**. Guanabara dois, Rio de Janeiro, pp 06 – 42, 1986.
- FUSCO, P. B., **Estruturas de concreto: solicitações tangenciais**. Editora PINI, São Paulo, pp 170 – 199, 2008.
- HANDBOOK OF PRECAST CONCRETE – **Inserts, connectors, anchors and lift systems**. Ohio, United States, 164 p., 2014.
- KUERES, D.; SIBURG, C.; HERBRAND, M.; CLASSEN, M.; HEGGER, J. **Uniform design method for punching shear in flat slabs and column bases**. Engineering Structures 136, p. 149 - 164. Elsevier, 2017.

- LEONHARDT, F; MONNIG, E. **Construções de concreto, volume 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Interciência, Rio de Janeiro, 2008.
- LEONHARDT, F; MONNIG, E. **Construções de concreto, volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. Interciência, Rio de Janeiro, 2007.
- MAMEDE, F.C., **Utilização de pré-moldados em edifícios de alvenaria estrutural**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 204 p., 2001.
- MANUAL DA TREJOR, **Sistema de içamento com rosca**. São Paulo.
- MANUALE D'USO – **Tubo Ancora**. Bérgamo – Itália, 2006.
- MUTTONI, A., **Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement**. ACI Structural Journal, Title nº 105 S42, 440 – 450. 2008.
- MUTTONI, A.; SCHWARTZ, J.; THURLIMANN. B.; **Design of concrete structures with stress fields**. Birkhauser Verlag, 143 p. Basel, Switzerland, 1997.
- OLIVEIRA, D. C.; GOMES, R. B.; MELO, G. S., **Punção em lajes lisas de concreto armado com furo adjacente ao pilar e transferência de momento**. IBRACON. Vol. 7, nº 3, p. 414 – 467, Brasil, 2014.
- POLAK, M. A., **Punching shear in reinforced concrete slabs**. Farmington Hills, ACI, 2005.
- POVEDA, E.; ORTEGA, J. J.; RUIZ, G.; PORRAS, R.; CARMONA, J. R. **Normal and tangential extraction of embedded anchor plates from precast façade concrete panels**. Engineering Structures 110, p. 21 – 35. Elsevier, 2016.
- OKTAVIANUS, Y.; CHANG, H.; GOLDSWORTHY, H. M.; GAD, E. F. **Component model for pull-out behaviour of headed anchored blind bolt within concrete filled circular hollow section**. Engineering Structures 148, p. 210 – 224. Elsevier, 2017.
- PRIETO, C. M. L., **Ensaio de arrancamento e cisalhamento em descontinuidades reforçadas com barras de aço**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 177 p., 2011.
- SHIN, J.; KIM, J.; CHANG, H., **Anchor plate effect on the breakout capacity in tension for thin-walled concrete panels**. Engineering Structures 106, p. 147 - 153. Elsevier, 2016.
- SILVA, G. R., **Manual de traços de concreto**. Livraria Nobel – 3ª ed., São Paulo, pp 14, 25 e 38, 1975.

TOMO, F. C., **Cr terios para projeto de edif cios de paredes portantes de concreto pr -moldado**. Disserta o de mestrado. Escola de Engenharia de S o Carlos da Universidade de S o Paulo, 117 p., 2013.

## APÊNDICE

Gráfico 7 – Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO I GPC.

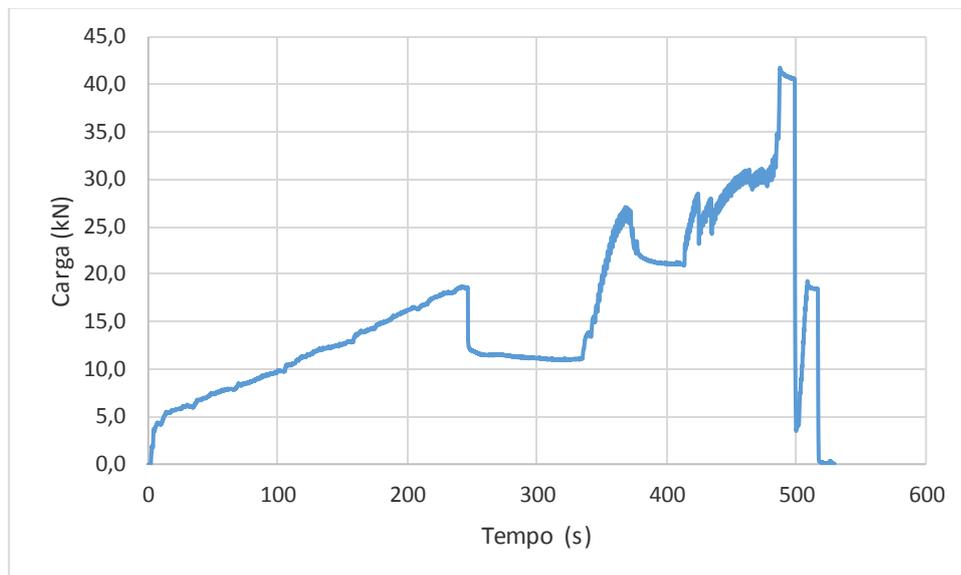


Gráfico 8 – Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO I GPC.

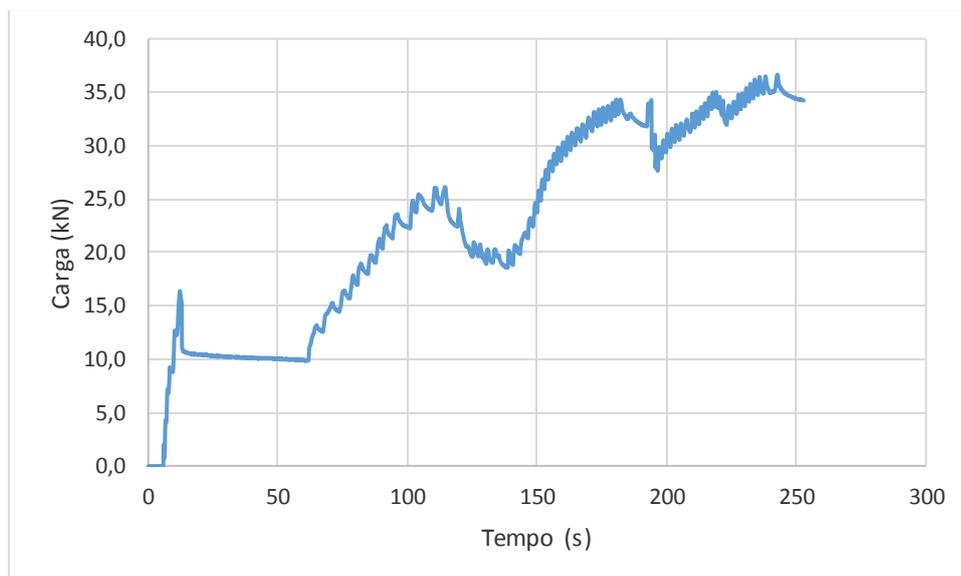


Gráfico 9 – Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO I GPC.

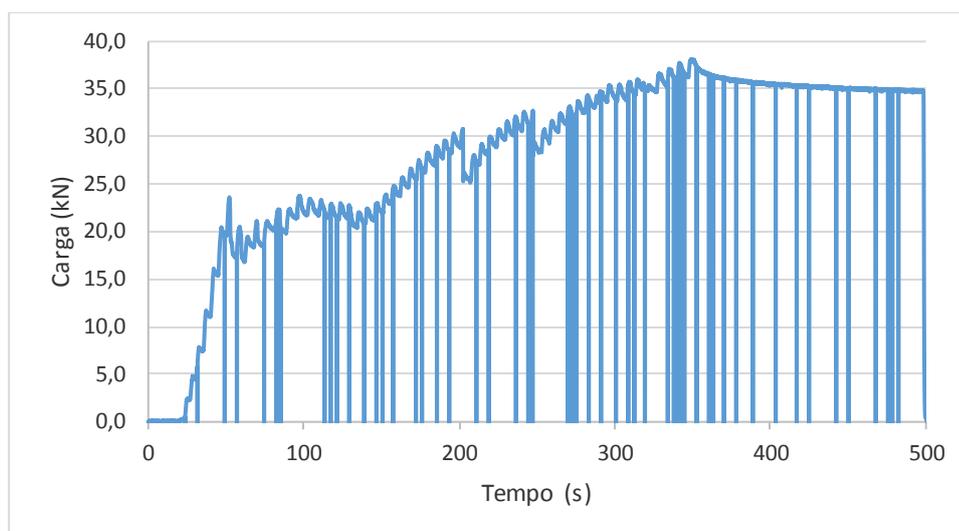


Gráfico 10 – Máximos LTIPO I GPC.

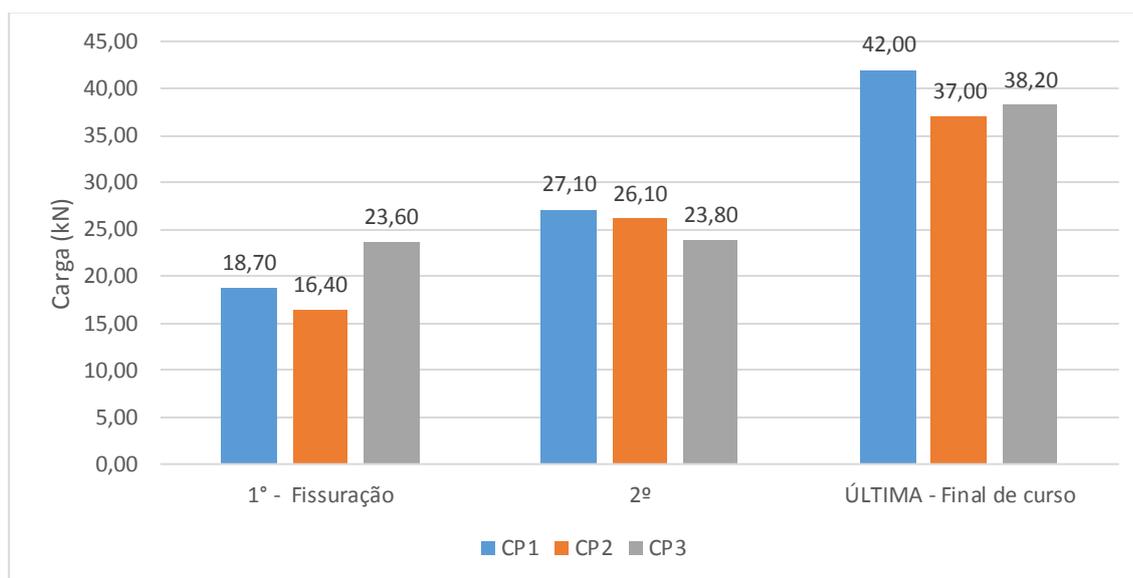


Gráfico 11 – Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO II GPB.

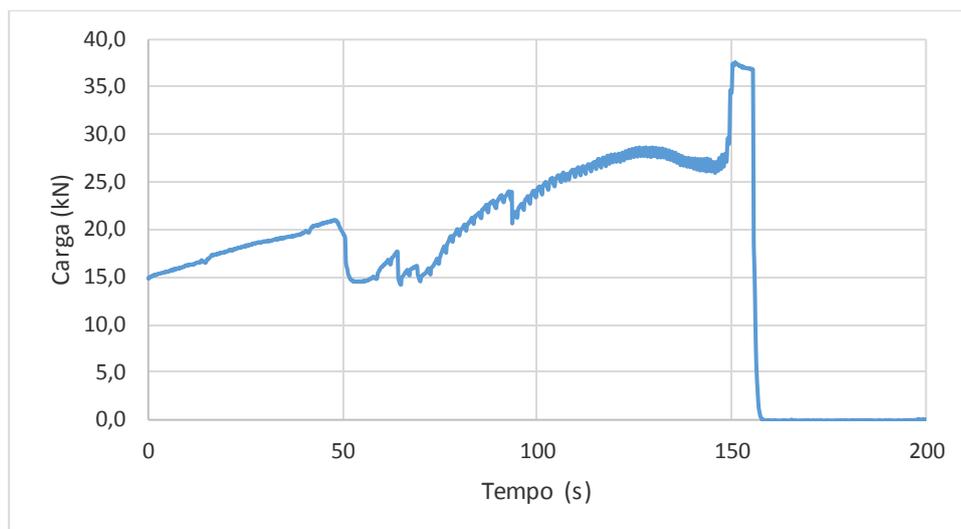


Gráfico 12 – Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO II GPB.

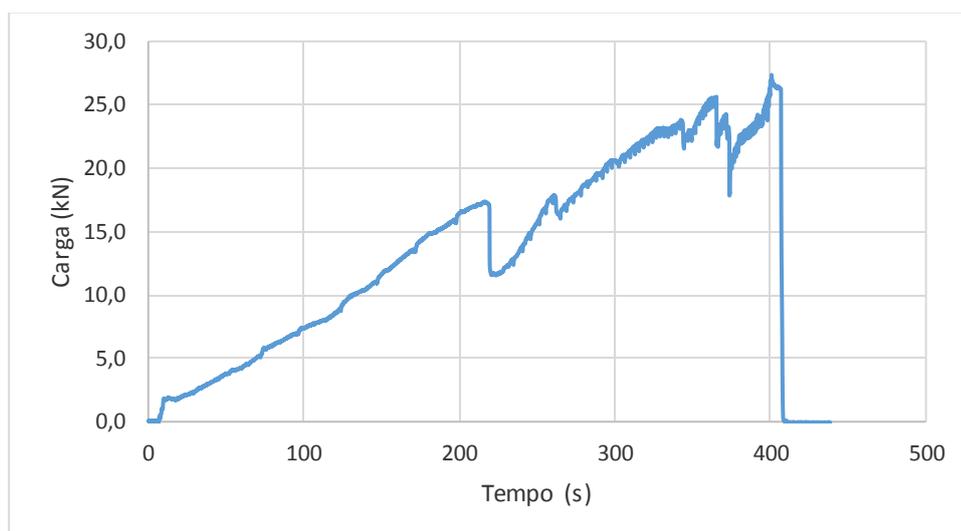


Gráfico 13 – Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO II GPB.

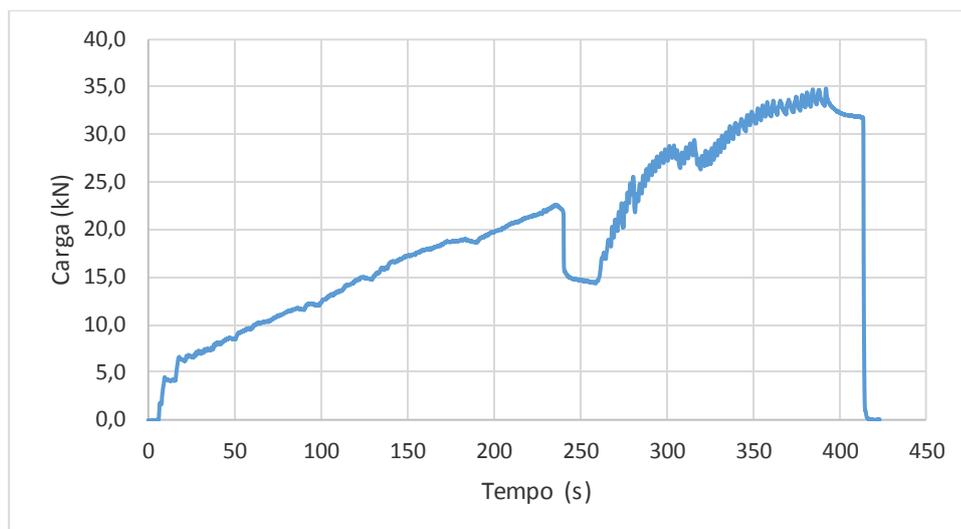


Gráfico 14 – Máximos LTIPO II GPB.

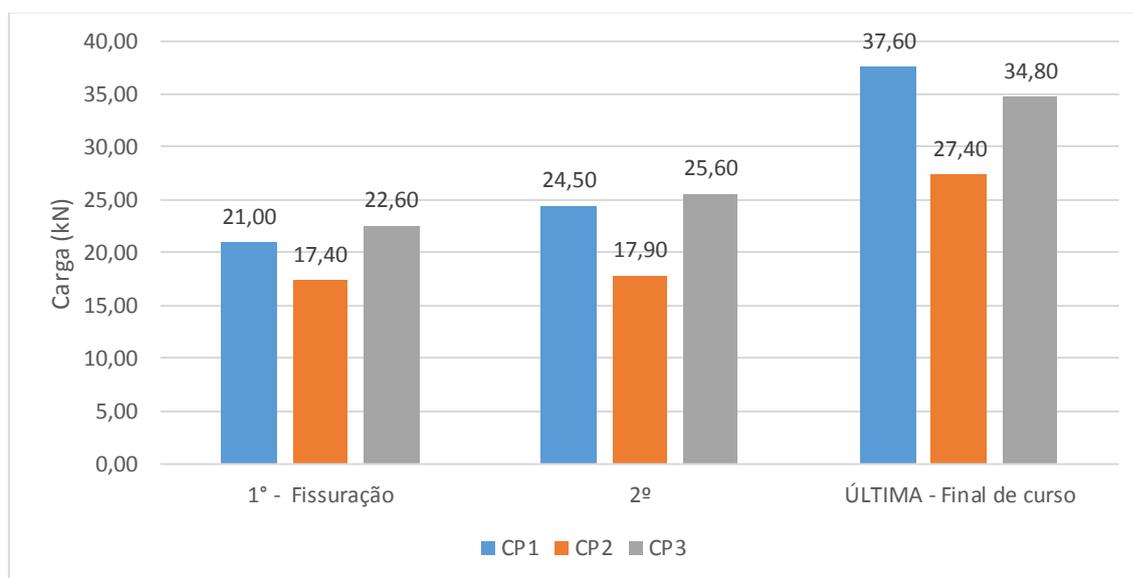


Gráfico 15 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO II GPC.

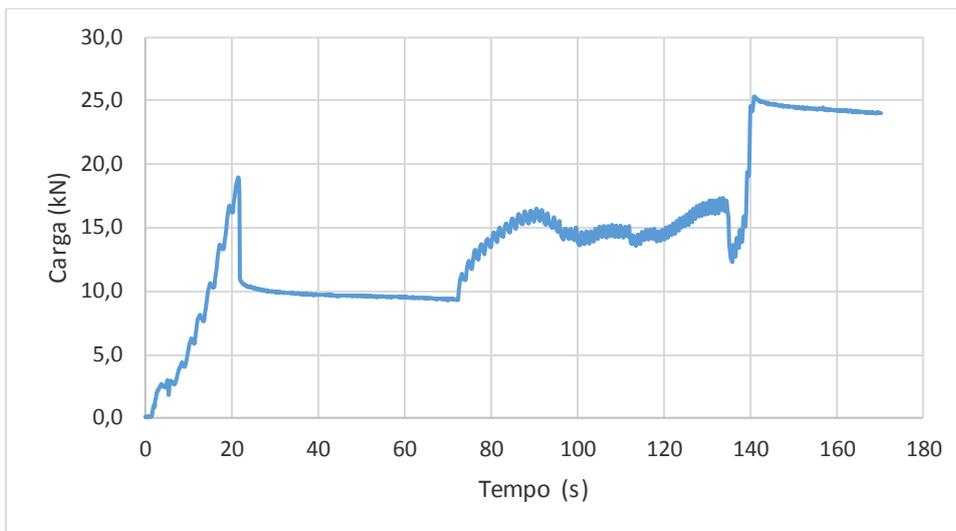


Gráfico 16 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO II GPC.

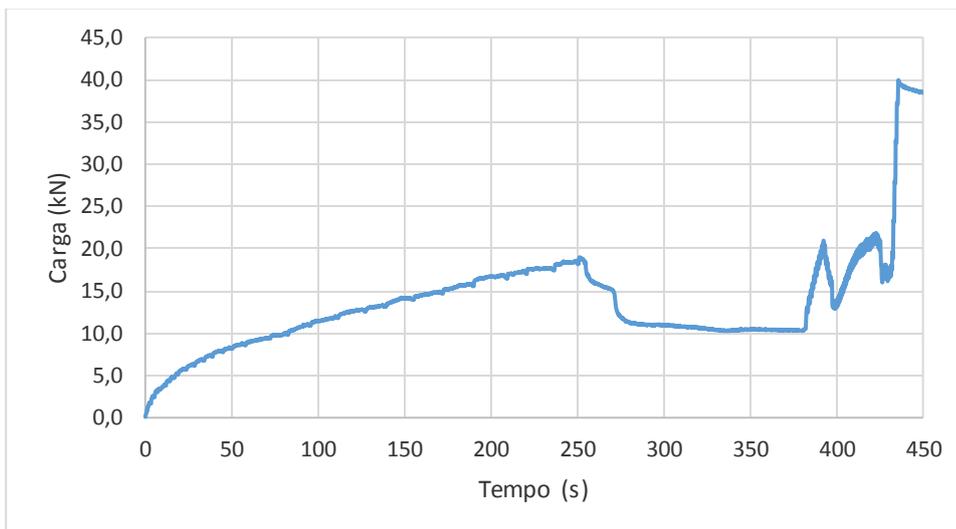


Gráfico 17 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO II GPC.

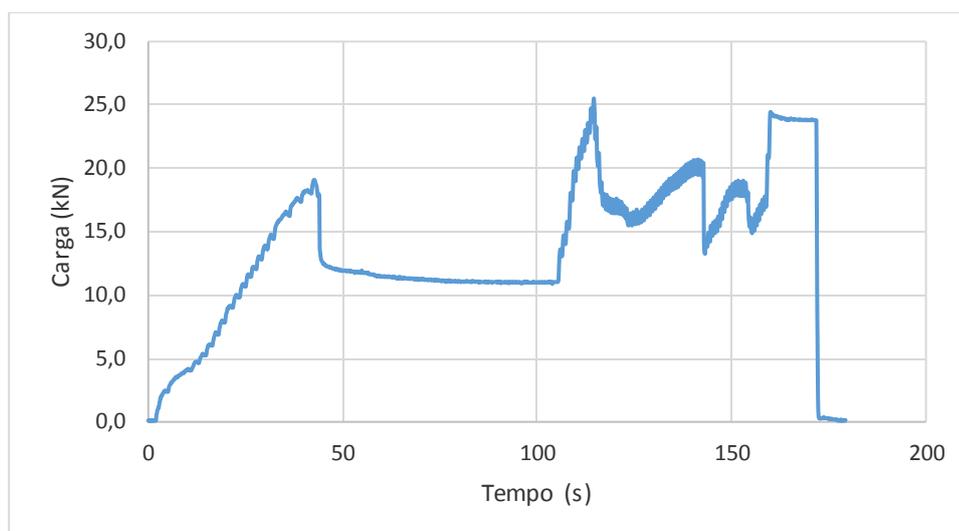


Gráfico 18 - Máximos LTIPO II GPC.

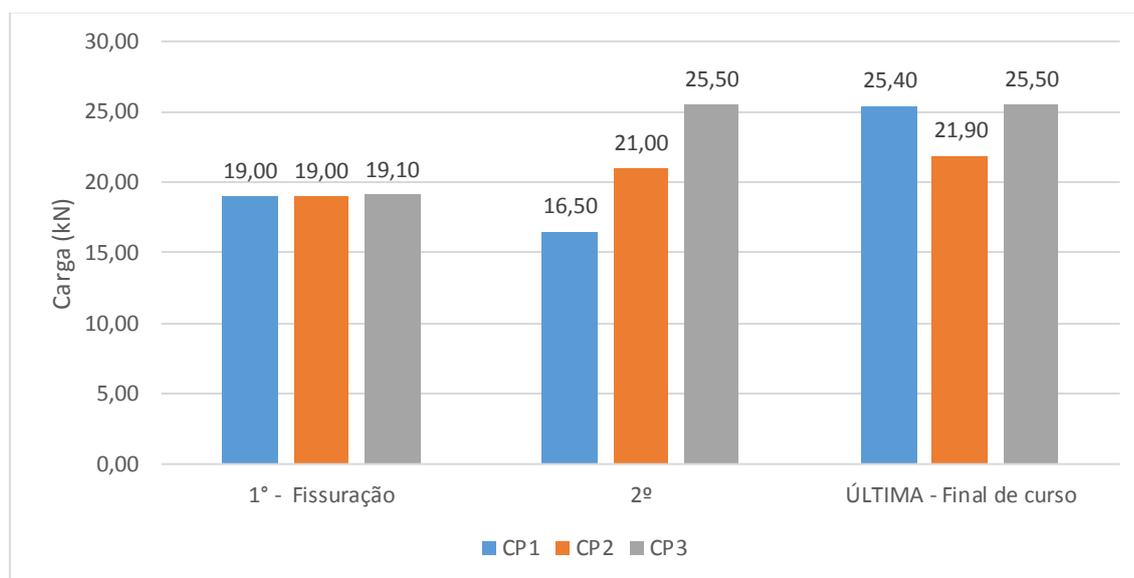


Gráfico 19 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO III GPC.

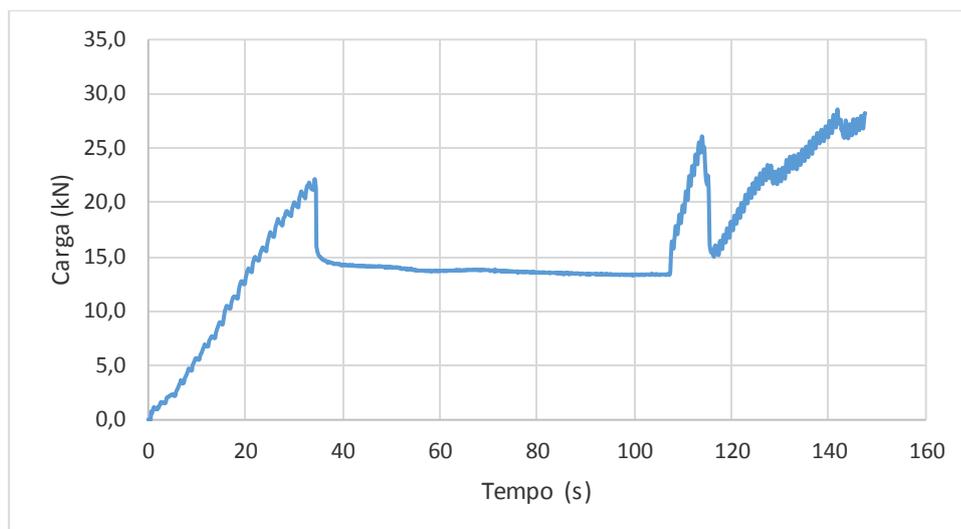


Gráfico 20 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO III GPC.

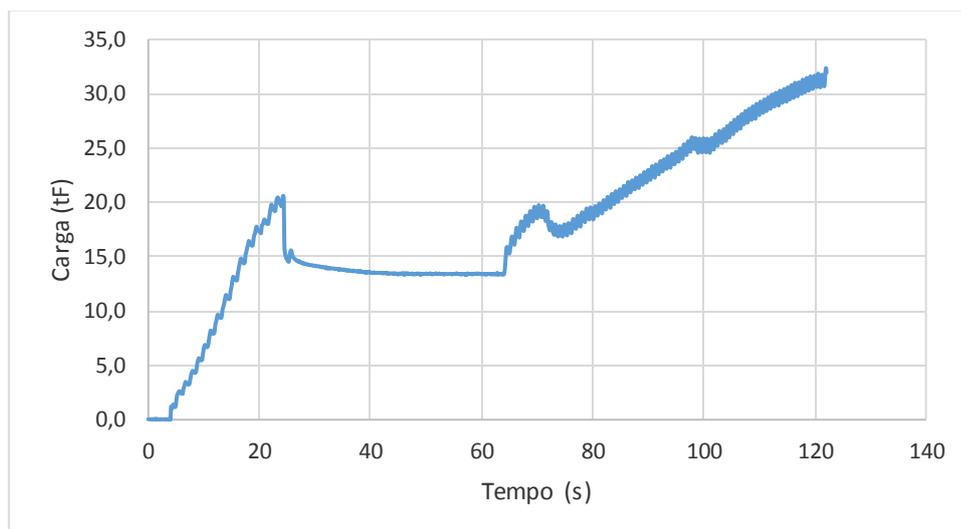


Gráfico 21 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO III GPC.

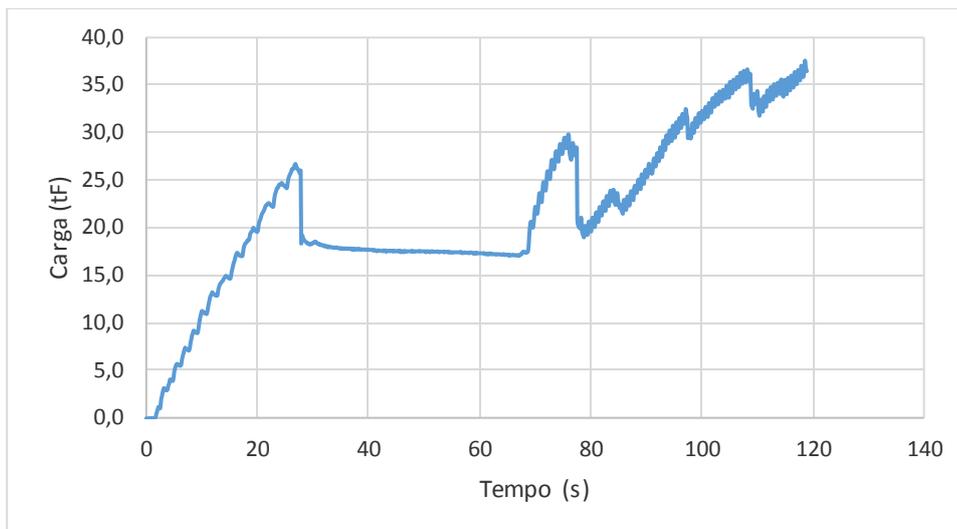


Gráfico 22 – Máximos LTIPO III GPC.

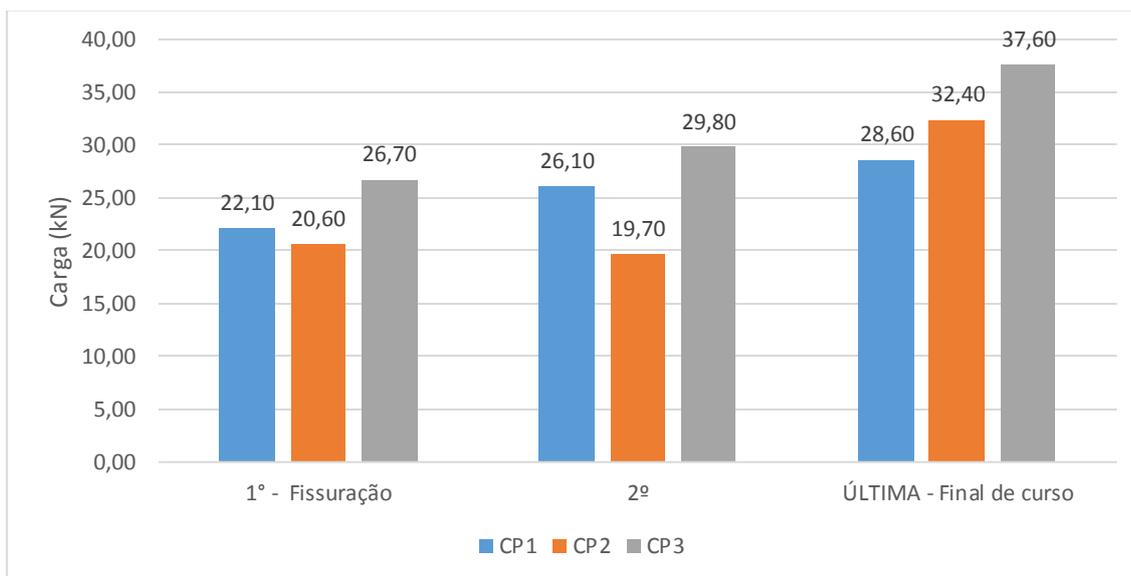


Gráfico 23 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO IV GPC.

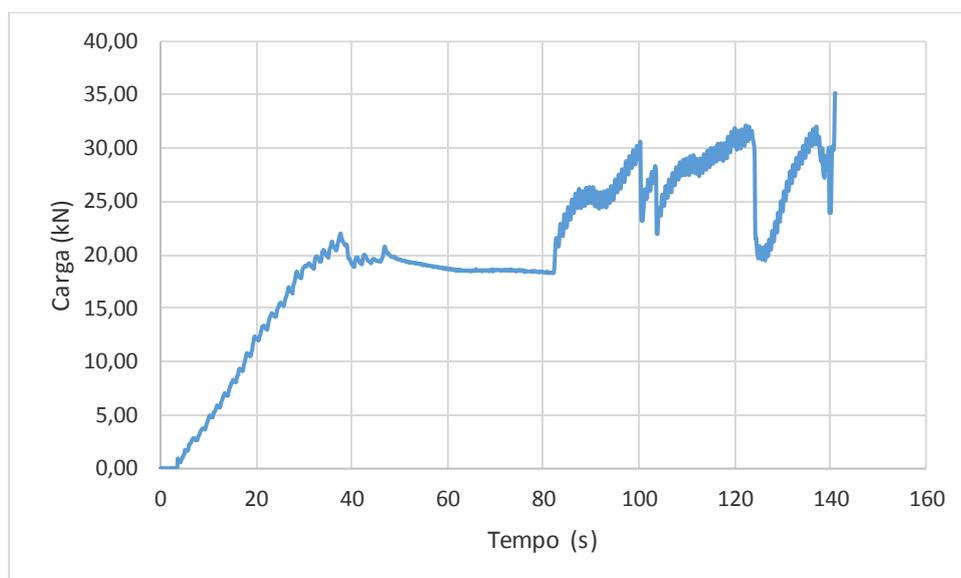


Gráfico 24 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO IV GPC.

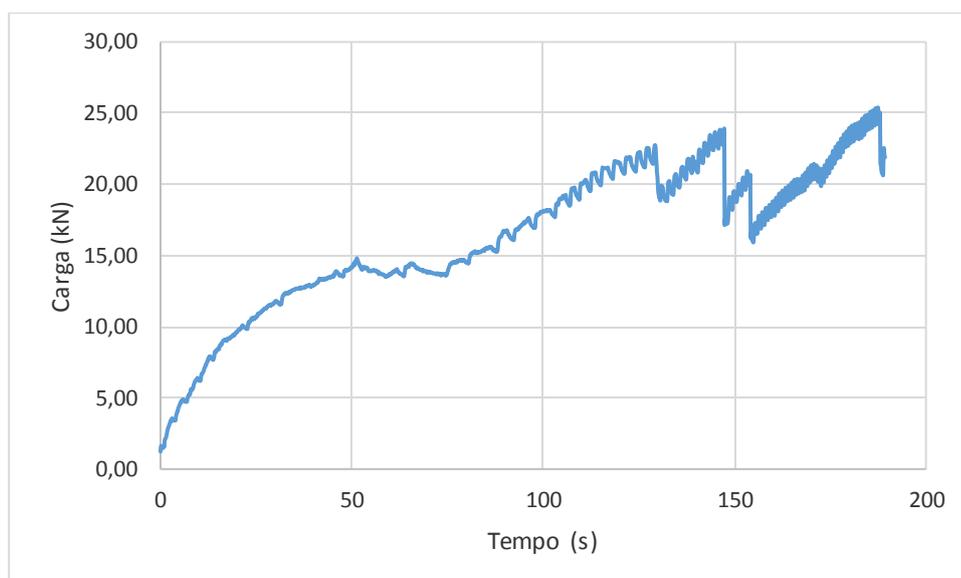


Gráfico 25 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO IV GPC.

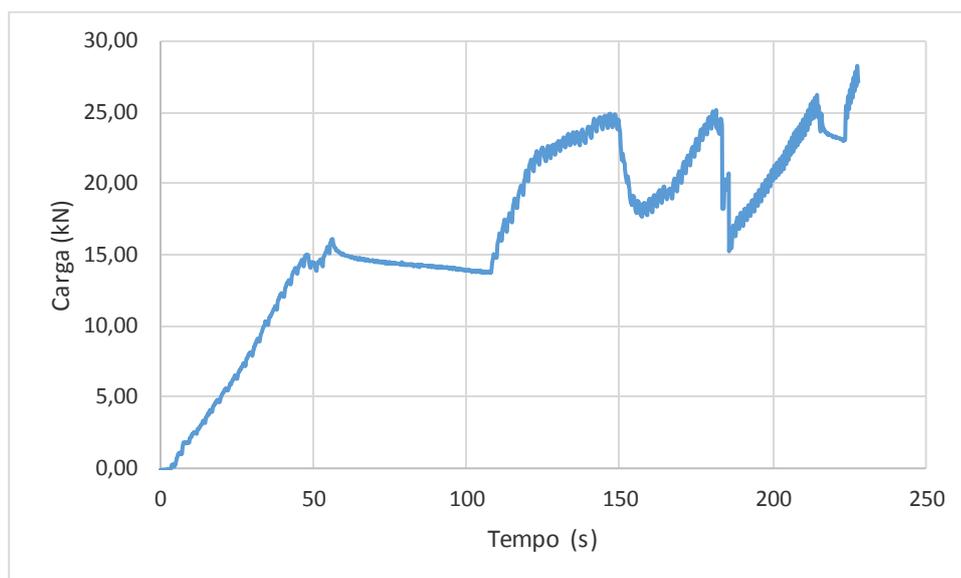


Gráfico 26 – Máximos LTIPO IV GPC.

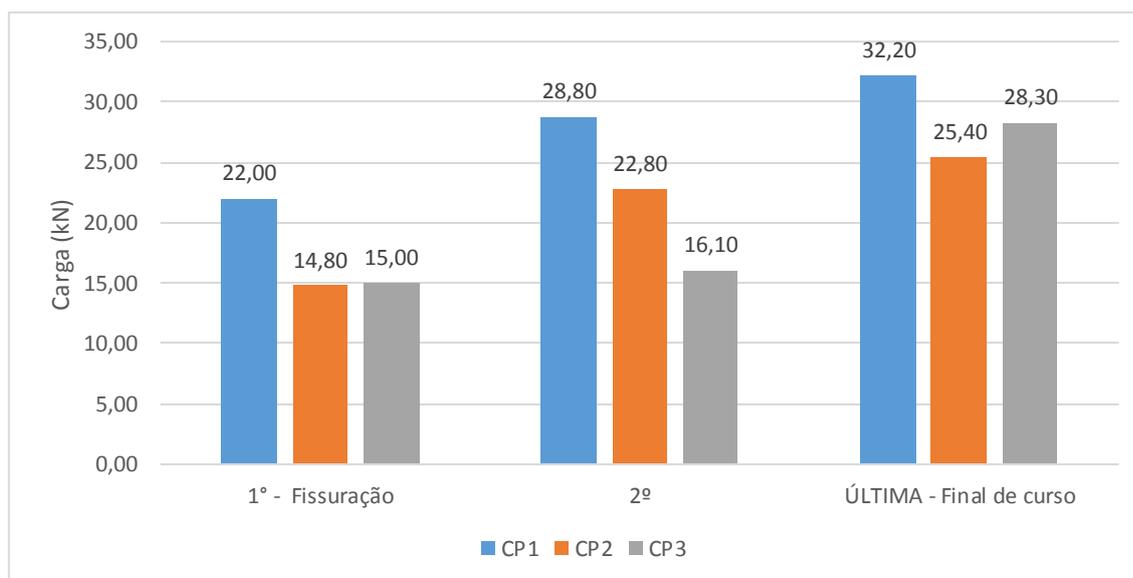


Gráfico 27 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO V GPC.

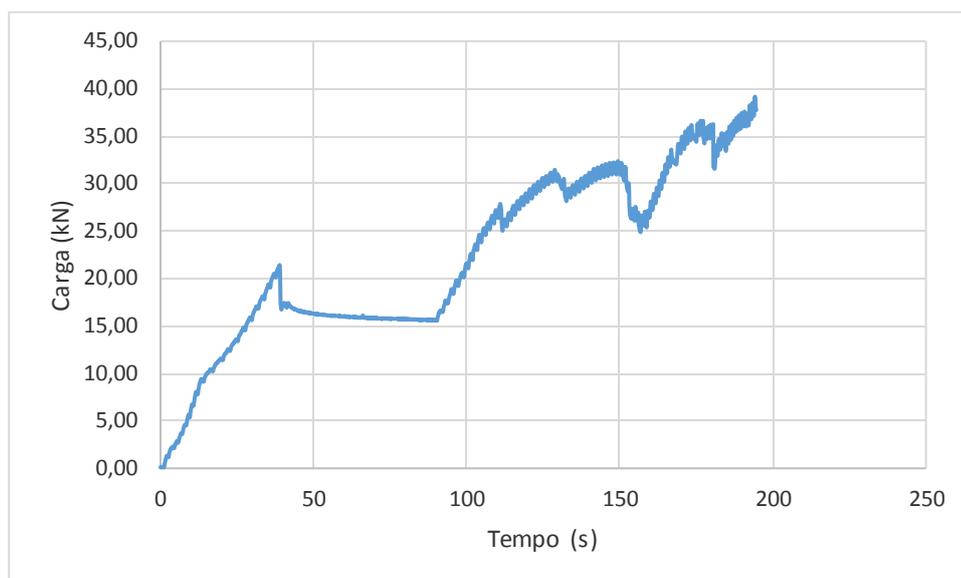


Gráfico 28 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO V GPC.

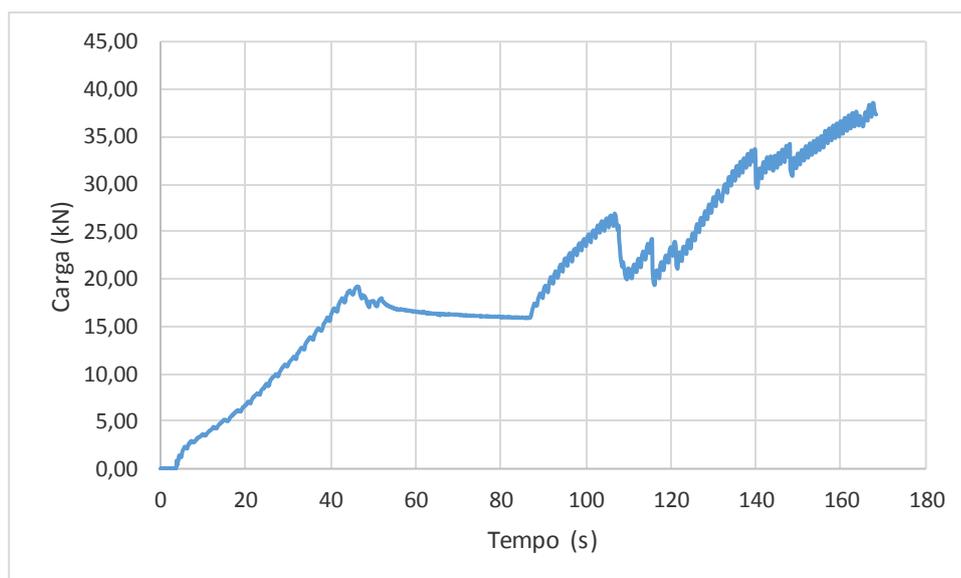


Gráfico 29 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO V GPC.

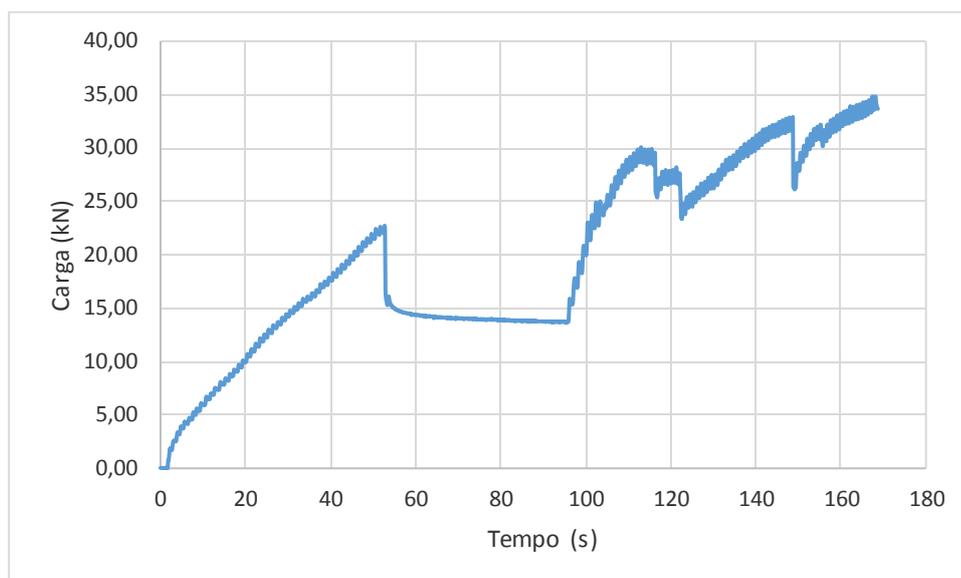


Gráfico 30 - Máximos LTIPO V GPC.

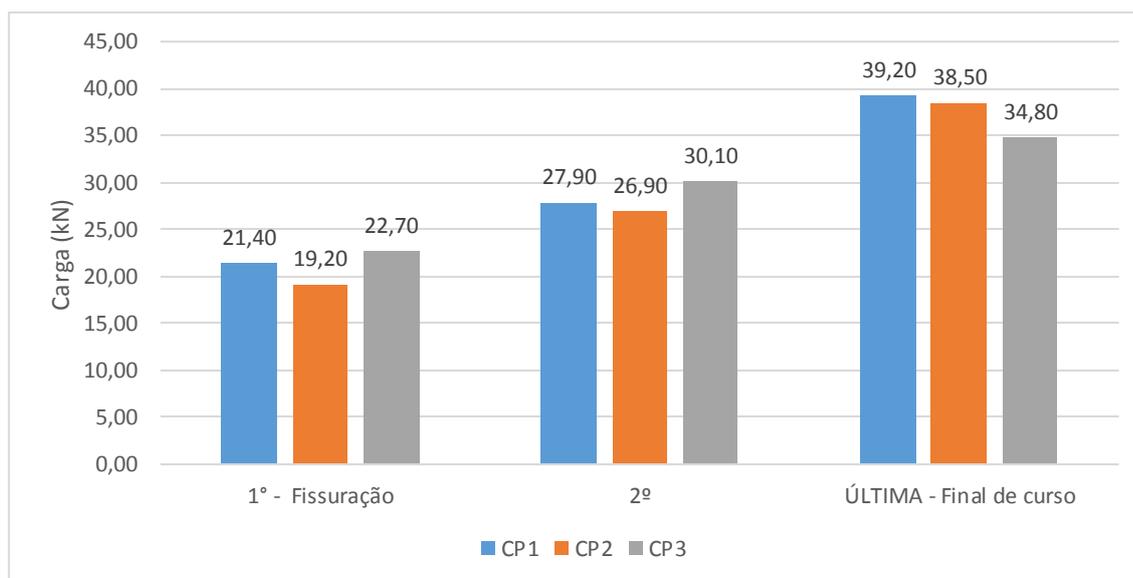


Gráfico 31 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje TIPO VI GPC.

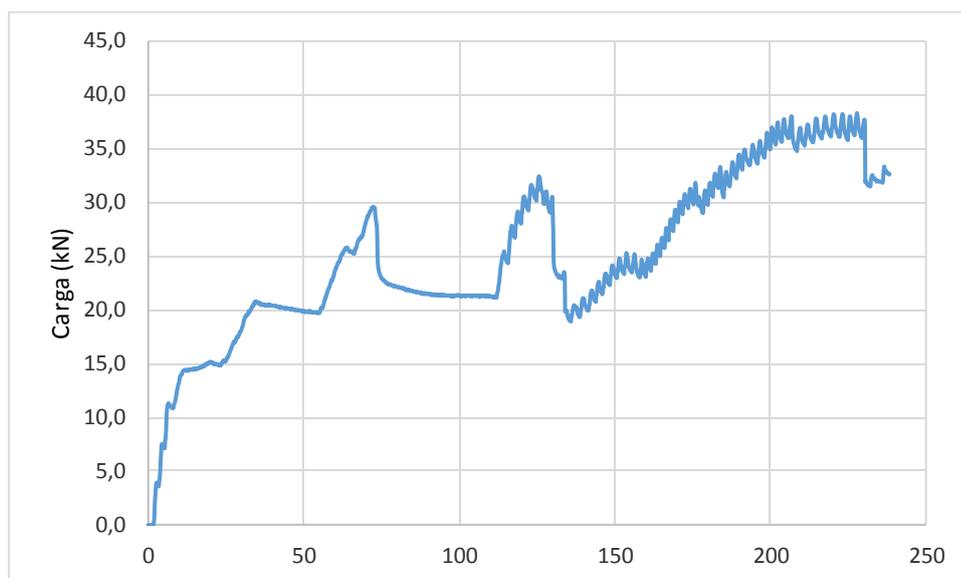


Gráfico 32 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje TIPO VI GPC.

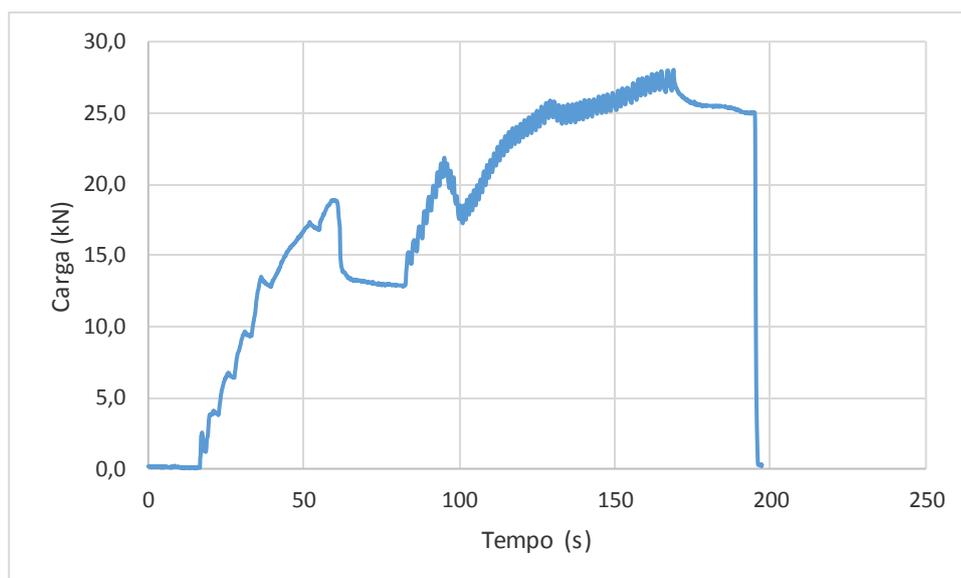


Gráfico 33 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje TIPO VI GPC.

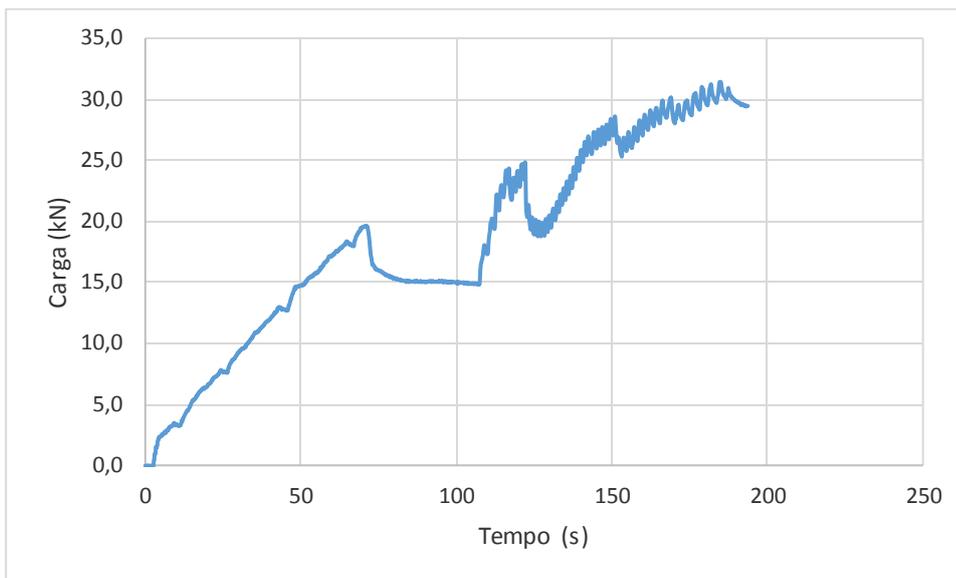


Gráfico 34 - Máximos LTIPO VI GPC.

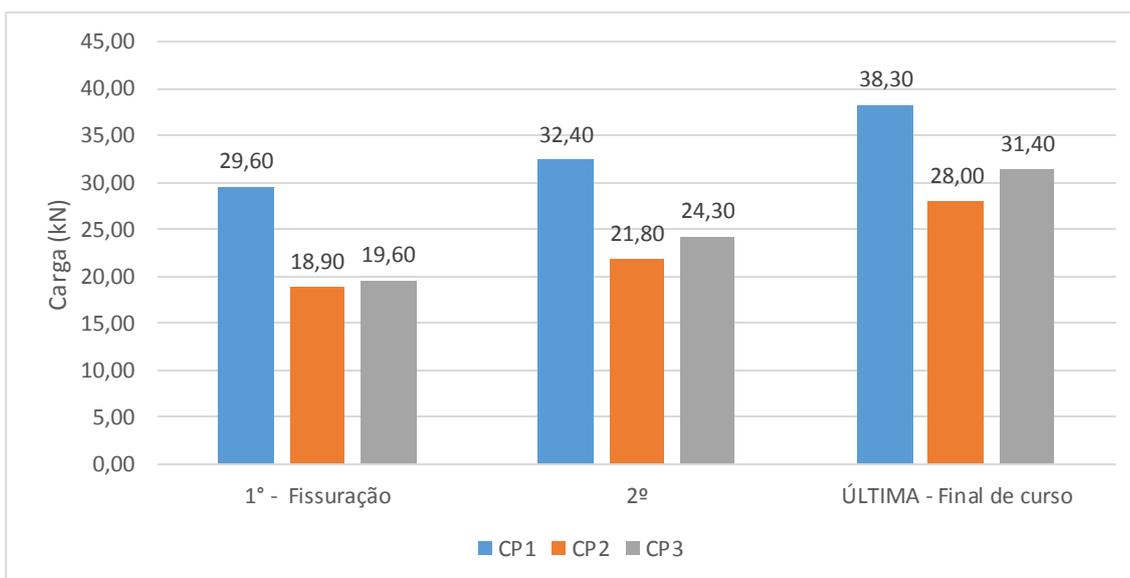


Gráfico 35 - Capacidade de carga do gancho no CP1 da laje DGL GPC.

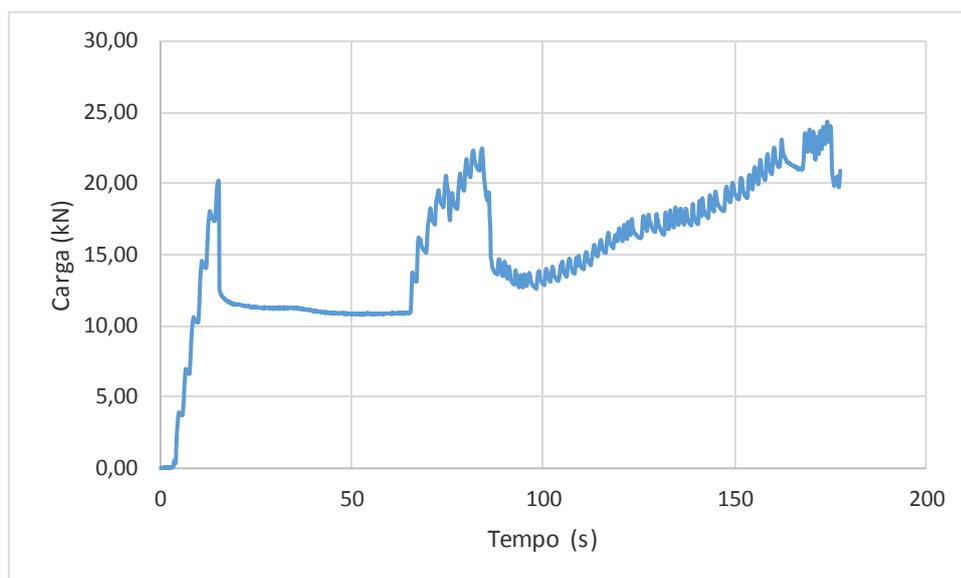


Gráfico 36 - Capacidade de carga do gancho no CP2 da laje DGL GPC.

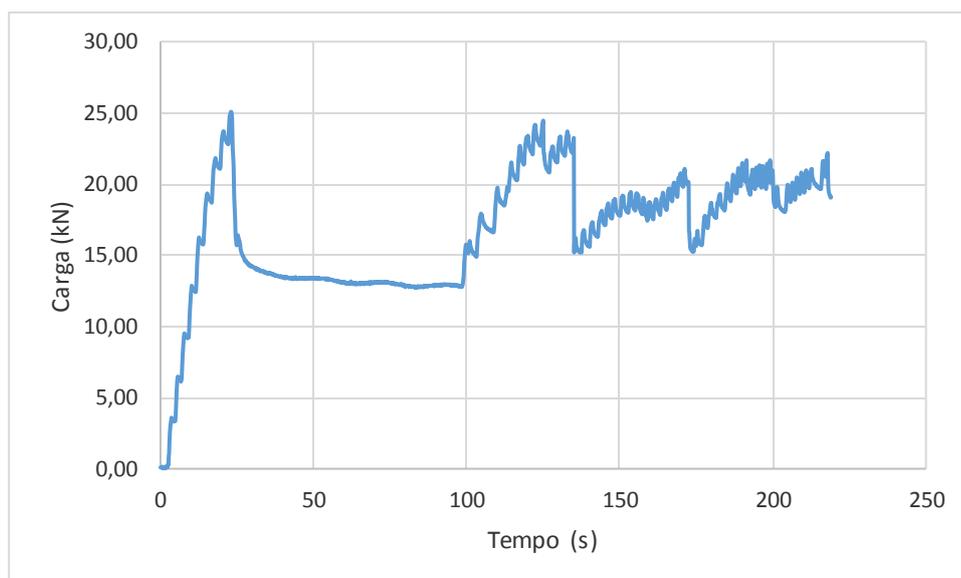


Gráfico 37 - Capacidade de carga do gancho no CP3 da laje DGL GPC.

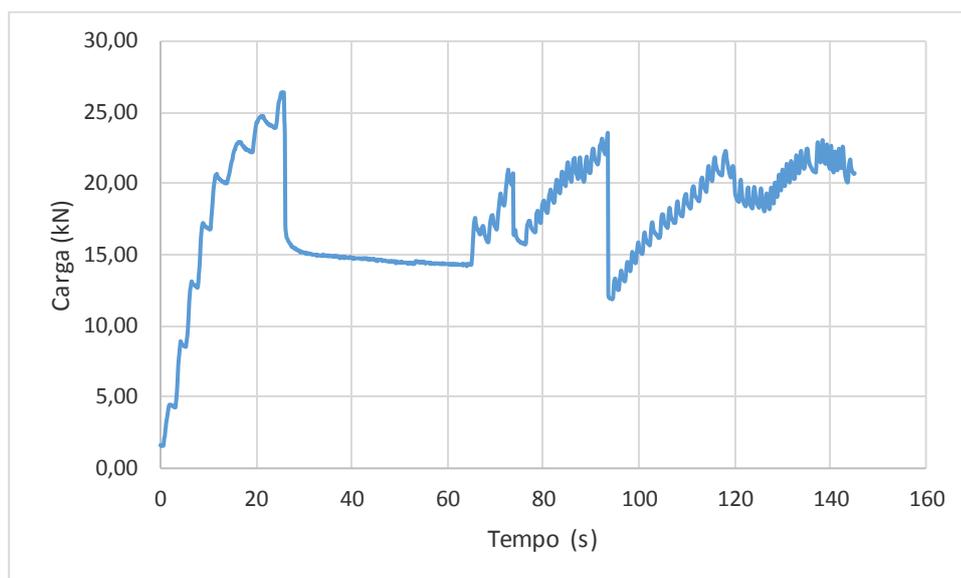


Gráfico 38 - Máximos DGL GPC.

