



2023

Estudo da capacidade resistente do contato de elementos pré-moldados de fundação

Ronan Franco dos Santos ^a; Andrés Batista Cheung ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, ronan.f@ufms.br

^b Professor Orientador, Dr., andres.cheung@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

Elementos de concreto pré-moldado são amplamente utilizados dentro da construção civil visando o melhor aproveitamento dos materiais e qualidade de execução. As estacas prensadas, destinadas para reforço e execução de fundações, são compostas por segmentos pré-moldados de concreto interligados entre si por apoio direto. O comportamento do sistema estrutural de concreto pré-moldado é influenciado diretamente pela técnica adotada nas juntas entre os elementos. Sabe-se que a face de contato entre os segmentos deve estar perfeitamente plana para a execução das estacas prensadas. No presente estudo foi analisado a influência das juntas na capacidade resistente do concreto à compressão em segmentos utilizados na execução de estacas prensadas. O estudo foi realizado no laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e seu resultado foi definido em termos de resistência à compressão do concreto. Os modelos utilizados foram confeccionados utilizando as mesmas técnicas de preparo de segmentos usados na execução de estacas prensadas. A capacidade resistente dos segmentos analisados reduziu consideravelmente com a presença da junta, influenciadas principalmente pelas condições das faces transversais dos elementos em contato. A perda de resistência dos modelos que simulavam a junta entre os segmentos de estacas prensadas foi da ordem de 20% quando comparada à resistência dos segmentos monolíticos. Os modelos ensaiados não atingiram a eficiência mecânica encontrada na resistência à compressão do concreto dos corpos de prova utilizado na preparação dos segmentos de estacas prensadas. Para obter melhor aproveitamento estrutural do sistema e mitigar perdas, foi recomendado melhor controle na confecção dos segmentos de estacas prensadas.

Palavras-chave: estacas prensadas; concreto pré-moldado; juntas; apoio direto.

ABSTRACT

Precast concrete elements are widely used in the construction industry to make better use of materials and improve the quality of execution. Pressed piles, used for reinforce and executing foundations, are made up of precast concrete segments interconnected by direct bearing. The behavior of the precast concrete structural system is directly influenced by the technique adopted for the joints between the elements. It is known that the contact face between the segments must be perfectly flat for the execution of pressed piles. This study analyzed the influence of joints on the compressive strength of concrete segments used in the execution of pressed piles. The study was carried out at the Materials and Civil Construction Laboratory (LMCC) of the Federal University of Mato Grosso do Sul (UFMS) and its results were defined in terms of the concrete's compressive strength. The models used were made using the same techniques for preparing the segments used in the execution of pressed piles. The resistance capacity of the segments analyzed decreased considerably with the presence of the joint, influenced mainly by the conditions of the transverse faces of the elements in contact. The loss of strength of the models that simulated the joint between the pressed pile segments was around 20% when compared to the strength of the monolithic segments. The models tested did not achieve the mechanical efficiency found in the compressive strength of the concrete specimens used to prepare the pressed pile segments. In order to obtain better structural use of the system and mitigate losses, better control was recommended when making the pressed pile segments.

Keywords: pressed piles; precast concrete; joints; direct bearing.

1. INTRODUÇÃO

A análise e o projeto de fundações são elementos cruciais na engenharia civil, especialmente em estruturas de grande porte. Nesse contexto, as estacas de reação, também conhecidas como estacas prensadas ou mega (*jacked pile ou pressed pile*), desempenham um papel fundamental. A investigação detalhada, projeto e instalação dessas estacas demandam uma compreensão das características do solo, da capacidade dos elementos estruturais e das técnicas construtivas envolvidas.

De acordo com Vasconcelos (2002), não se sabe ao certo o momento exato que explique quando o uso de peças pré-moldadas de concreto começou a ser consumido. Segundo ele, o Hipódromo da Gavea, no Rio de Janeiro, fundado em 1932, foi a obra pioneira no Brasil a fazer uso de elementos pré-moldados, aplicando essa metodologia no desenvolvimento das estacas de fundações e nas cercas. O âmbito da construção civil está em permanente avanço, sempre em busca da otimização de fatores como qualidade, tempo e custo. El Debs (2019) afirma que as características do concreto pré-moldado possibilitam benefícios importantes para a construção, melhorando o controle dos componentes pré-moldados e diminuindo desperdícios de materiais. Logo, pode-se dizer que as construções que fazem uso de pré-moldados oportunizam maior presteza em sua execução.

As estacas prensadas (Mega) são constituídas por segmentos de concreto pré-moldado, simples ou armado, ou segmentos metálicos. A NBR 6122:2019 (Anexo Q, pág. 103) enfatiza que “a principal característica deste tipo de estaca é a sua cravação estática através de cilindro hidráulico, reagindo contra a estrutura existente e compatível à resistência dos esforços que serão aplicados”. São utilizadas tanto para reforços de fundações como para fundações definitivas. Durante a fase construtiva, a estaca vai ganhando comprimento conforme a necessidade de carga, através de segmentos. As emendas das estacas são feitas por superposição, criando um contato entre elas, muitas das vezes, por meio de uma junta seca – sem elemento de apoio. Cabe ressaltar que essa junta influencia na transferência de esforços de uma estaca para outra. Para garantir um melhor aproveitamento da capacidade resistente das estacas, é necessário que as juntas suportem e transmitam as cargas solicitadas e estimadas no projeto sem que haja o comprometimento do concreto adjacente às emendas da peça.

Sendo a estaca um elemento de concreto pré-moldado, a avaliação das juntas para transferência de esforços torna-se um critério importante a ser estudado. Irregularidades nas faces adjacentes às juntas, método executivo e dimensões da seção transversal, influenciam diretamente no comportamento estrutural do elemento pré-moldado. Podendo esses fatores serem determinantes para a resistência dos segmentos que compõem a estaca.

A fim de obter melhor aproveitamento estrutural das estacas, mitigar perdas, e otimizar o processo construtivo, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a influência da superfície de contato na capacidade resistente dos segmentos de concreto pré-moldado utilizados na execução de estacas prensadas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. A execução de estacas prensadas

2.1.1. Processo executivo

O processo executivo das estacas prensadas consiste na cravação dos segmentos pré-moldados superpostos no solo com o auxílio de um cilindro hidráulico, munido de bomba e manômetro, reagindo contra uma estrutura existente, fundação, ou uma estrutura de reação, conforme a figura 1 (Gotlieb, 1998).

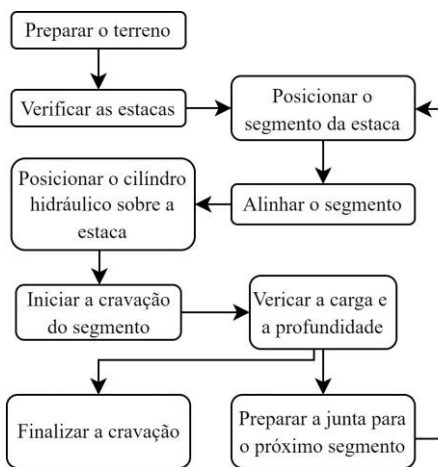
Figura 1 – Estaca prensada reagindo contra estrutura.
Fonte: Autor



De acordo com o Manual de Execução de Fundações e Geotecnia (ABEF, 2012), as estacas que serão utilizadas devem estar em boas condições, lisas, principalmente nas faces de contato umas com as outras, não sendo admitidas protuberâncias ou falta de paralelismo nas faces transversais. Para dar continuidade às estacas, usa-se barras de aço e concreto no interior dos segmentos. Para as estacas de

concreto, as emendas são feitas principalmente com juntas a seco. As estacas prensadas com segmentos metálicos possuem um sistema de rosca ou encaixes nas emendas. A cravação deve ser interrompida após a estaca atingir 1,5 a carga de trabalho. Logo após, deve-se aplicar essa carga durante 5 minutos e medir os deslocamentos residuais. Em seguida, aplica-se a carga de trabalho durante 10 min e verifica-se o deslocamento ocorrido. Os deslocamentos devem atender o critério do projetista. Para o reforço de fundações, a carga deve ter esforços compatíveis com a estrutura. A sequência executiva das estacas prensadas está exposta no fluxograma da figura 2.

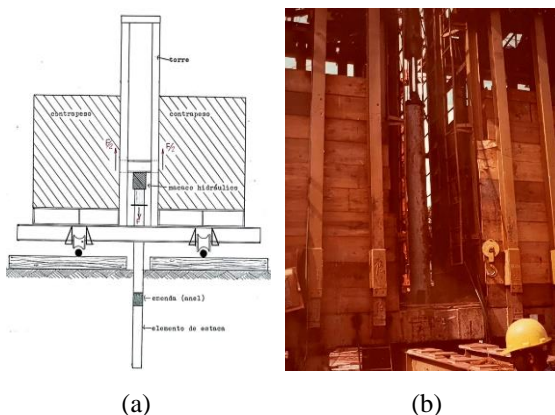
Figura 2 – Fluxograma do processo executivo das estacas prensadas. Fonte: Autor



2.1.1. Emenda por anel metálico

London *et al* (1984) mostrou o uso do anel metálico para a fazer a ligação das estacas mega na execução de uma obra em Campo Grande - MS. As estacas utilizadas eram vazadas, com comprimentos dos segmentos pré-moldados de 1,5 m, 3 m e 5 m, e a seção transversal da estaca possuía 30 cm de diâmetro. Os segmentos foram cravados com auxílio de um cilindro hidráulico reagindo em uma estrutura de reação (cargueira) como mostra a figura 3.a e 3.b.

Figura 3 – Estaca Mega com reação em plataforma. Fonte: London, 1984.



Durante a cravação com o equipamento, as estacas sobrepõem-se uma à outra. Na emenda das estacas foi colocado uma chapa metálica (anel) sem chanfros, no formato circular, tendo o diâmetro de 305 mm e altura de 200 mm, fixada nas estacas por atrito lateral. Também, nos orifícios das estacas, eram colocadas barras de aço e preenchidos com argamassa como mostra a figura 4. A técnica do anel metálico nas emendas dos segmentos auxilia no prumo das estacas cravadas à reação. Com isso, é esperado que as faces das estacas tenham toda a área de contato da seção transversal para transmitir os esforços sem causar trajetórias diferentes das tensões, garantindo assim uma maior capacidade resistente das juntas e das estacas em si.

Figura 4 – Preparação das juntas nas estacas Mega. Fonte: London, 1984.



2.1.2. O uso de estacas prensadas

Com a evolução do método executivo, Junqueira (1994) apresentou em seu trabalho um ponto de vista prático sobre a execução das estacas prensadas para o uso como fundações definitivas e reforços de fundações, descrito nos parágrafos a seguir.

Em 1976, foi apresentada uma solução em estacas prensadas para o edifício Itamaraty em Goiânia - GO onde foram utilizados segmentos de concreto armado. As estacas tinham seção de 25 cm de diâmetro e 80 cm de altura, com um orifício de 5 cm de diâmetro no meio da seção. Esses furos eram usados posteriormente para a interligação dos segmentos de forma a garantir a verticalidade da estrutura final. As estacas atingiram comprimentos de 5 a 14 metros e foram dimensionadas para permitir uma carga estrutural de trabalho de 300 a 700 kN. Contudo, foi relatado o rompimento das cabeças das estacas quando submetidas a carregamentos na ordem de 600 kN, ou até menores. Ficando definido que para aquela obra, os segmentos de estacas com 25 cm de diâmetro garantiam funcionalidade para carregamentos na ordem de 400 kN (Junqueria, 1994).

Já em outra obra, dessa vez em Manuas - AM, foi relatada a execução da fundação da edificação de uma agência bancária no ano de 1980. Como havia restrições no cronograma da obra, optou-se pelo uso de estacas prensadas. Os segmentos pré-moldados tinham seção diametral de 30 cm com 80 cm de altura e eram vazados por um furo de 5 cm de diâmetro. Para a interligação dos segmentos, era feito o preenchimento do furo com concreto plástico e colocadas 4 armaduras com diâmetro de 12,5 mm com 80 centímetros de comprimento, de forma que a armadura transpassasse os segmentos de concreto.

Como reforço de fundação, foi apresentado um caso no edifício Serrano localizado em Goiânia - GO. Ao apresentar inúmeras trincas no edifício, optou-se pelo reforço das fundações, onde a execução de estacas prensadas sobressaiu em comparação com os custos de outros métodos. Foram utilizados segmentos pré-moldados de 25 cm de diâmetro com 80 cm de altura (Junqueira, 1994).

2.2. Ligações entre elementos pré-moldados

De maneira geral, a finalidade das ligações é garantir a transferência de esforços de um elemento para o outro dentro de um sistema estrutural. As juntas entre elementos pré-moldados influenciam diretamente na capacidade resistente do conjunto. As ligações para esses elementos devem resistir às forças que estão sujeitas ao longo da sua vida útil, ter ductilidade (ou seja, poder deformar sem falhar), e apresentar boa durabilidade. O desempenho das juntas depende da rugosidade das faces transversais e da resistência característica do concreto dos segmentos pré-moldados. A rugosidade da face é influenciada pela técnica utilizada na preparação das peças pré-moldadas. A resistência do concreto endurecido é direcionada por fatores como consumo de cimento e de água, grau de adensamento e tipo de agregado, onde quanto maior o consumo de cimento e menor a relação água-cimento, maior a resistência do concreto (Araújo, 2023).

2.2.1. Juntas de Compressão

Para resistir às tensões de compressão, as ligações entre os elementos pré-moldados podem ser feitas por meio de elementos metálicos, camadas de argamassa e até por junta seca. As forças de compressão predominantes nas juntas entre elementos pré-moldados podem ser transmitidas através do apoio direto (junta seca) quando há um maior controle sobre a fabricação das peças e quando as tensões de compressão localizadas nas juntas são pequenas (Holly e Abrahão, 2020). Sendo assim, as ligações com apoio direto precisam de um bom acabamento

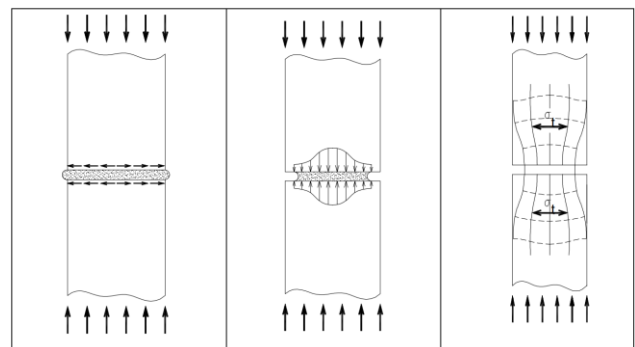
nas peças pré-moldadas, qualidade de montagem e boa resistência mecânica.

De acordo com a NBR 9062:2022 (item 7.2.1.2), para ligações solicitadas predominante por compressão “*permite-se o assentamento de elementos pré-moldados com juntas a seco, em situações onde a pressão de contato sobre os apoios não ultrapassa o valor de $0,042 f_{cd}$, sendo que f_{cd} refere-se à menor das resistências características dos materiais em contato*”. Para casos onde é assegurada a restrição total das rotações na região de apoio, a tensão não pode ultrapassar $0,06 f_{cd}$. Também é permitido o uso de argamassa com a finalidade de corrigir imperfeições nas faces bem como evitar a transmissão de cargas por poucos pontos de contato.

2.2.2. Fendilhamento por juntas de argamassa

A utilização de argamassa para juntas entre elementos pré-moldados é muito comum. Argamassas de boa qualidade impactam diretamente no desempenho das estruturas pré-moldadas e influenciam na ligação das juntas. Porém, Vambersky (1990) definiu que a capacidade resistente das juntas não era governada pela resistência do esmagamento da argamassa e sim pela fissuração nos elementos pré-moldados adjacentes à junta. Essa fissuração se dava pelas tensões de fendilhamento causadas pela expulsão lateral da argamassa. Quando a argamassa é comprimida e não há o confinamento lateral, ela é expulsa pelas extremidades. A argamassa localizada na região central da junta concentra as tensões nesse ponto, gerando trajetórias diferentes das tensões, resultando assim o fendilhamento do concreto, apresentado na figura 5.

Figura 5 – Fendilhamento causado pelas juntas de argamassa. Fonte: El Debs, 2001.



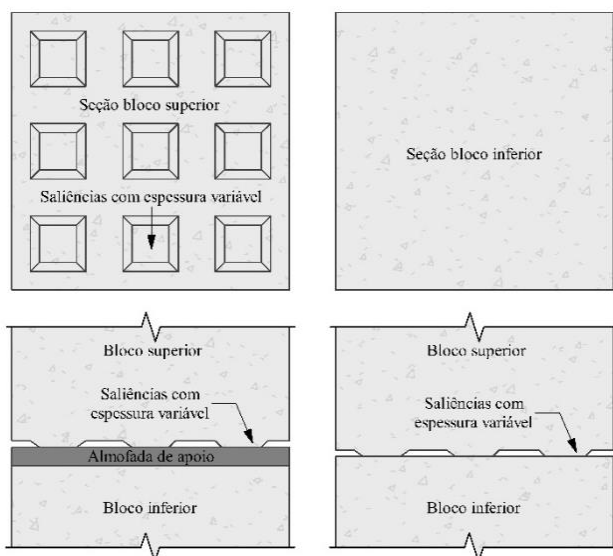
2.2.3. Influência da armadura de reforço, almofada de apoio e o contato descontínuo entre segmentos pré-moldados

O estudo realizado por Barboza (2001) evidencia que a presença da armadura de reforço na região adjacente às juntas não gera ganhos significativos para a

resistência do elemento pré-moldado, apenas torna-o mais dúctil e diminui a região de ruptura. A ligação entre os elementos pré-moldados foi realizada por meio de juntas de argamassa. Assim, as tensões de fendilhamento ficaram restritas à área das juntas, como evidenciado por Vambersky (1990), causando apenas o descolamento do concreto na região de cobrimento. Durante a aplicação da carga, todas as armaduras entraram em escoamento, atingindo cerca de 60% da tensão última. Para simular o contato descontínuo entre os segmentos foi realizado ensaios que caracterizavam os efeitos causados pela transmissão de esforços de um elemento pré-moldado para o outro através de uma superfície de contato irregular. Ficou relatado que nos modelos ensaiados com a superfície plana, não há como obter um contato perfeito entre os elementos pré-moldados, logo a capacidade resistente dos elementos é bastante reduzida pelas tensões de contato entre as peças. Para os modelos simulando a superfície de contato descontínua, a redução da capacidade era ainda mais significativa, pois as tensões se concentravam logo abaixo dos pontos de contato entre os segmentos. Logo, pode-se dizer que o apoio direto influencia negativamente a capacidade resistente do sistema estrutural.

Ditz *et al.* (2016) promoveram um estudo visando analisar a influência de almofada de apoio entre segmentos pré-moldados em comparação com o contato direto entre os elementos. As almofadas de apoio eram confeccionadas com argamassas modificadas e para simular a descontinuidade dos elementos, foram preparadas peças com 9 saliências nas faces de contato conforme a figura 6.

Figura 6 – Esquema de transferência de tensões. Fonte: Adaptada, Ditz, 2016.



Os resultados foram observados nos segmentos de concreto com classe de resistência de 65 MPa e expressos em termos de resistência à compressão. Comparando os valores de resistência à compressão do bloco monolítico e dos blocos descontínuos com a face lisa, a resistência do bloco monolítico foi da ordem de 70% superior ao bloco descontínuo com almofada de argamassa. Já comparada aos blocos lisos sem a presença da almofada de argamassa, a resistência foi da ordem de 90% superior. Para os modelos descontínuos com saliências propositais, a ruptura deu início na região de saliência mesmo com ou sem almofada, apresentada na figura 7. Para os modelos com faces lisas, as fissuras ocorreram nas extremidades das faces.

Figura 7 – Formação de fissuras nos ensaios de transferência de tensões de compressão em blocos com saliências na face ligada. Fonte: Ditz, 2016.



2.3. Comentários adicionais

O número de publicações disponíveis para acesso da literatura evidenciando o uso de estacas prensadas é limitado. Não há um consenso sobre as técnicas utilizadas na execução. As ligações entre os segmentos são feitas de acordo com as técnicas da empresa que executa o serviço. Sendo assim, há diferentes maneiras para analisar a transmissão de esforços de um segmento para o outro. Nos trabalhos anteriormente apresentados, foram mostradas técnicas encontradas para a transmissão dos esforços de compressão para elementos pré-moldados em geral, visando a transferência de cargas dentro da superestrutura de um sistema, ficando relatado que o apoio direto entre os elementos gera perda na resistência do sistema estrutural. Não havendo estudos que evidenciam a influência das juntas na capacidade resistência das estacas prensadas, o presente estudo irá analisar a influência da junta por apoio direto entre os segmentos de concreto usados frequentemente para a instalação desse tipo de fundação.

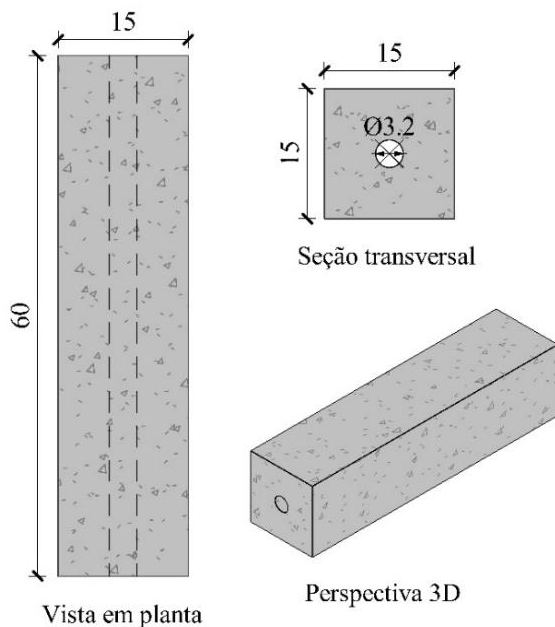
3. METODOLOGIA

O estudo consiste em avaliar a influência da junta na capacidade resistente do concreto através de ensaios que definem a resistência à compressão de segmentos monolíticos e segmentos descontínuos de estacas prensadas.

3.1. Modelo

Os modelos utilizados para a análise da influência das juntas correspondem aos segmentos pré-moldados de fundação usados para execução de estacas prensadas. As estacas possuem seção transversal quadrada de 15 cm com altura de 60 cm, vazadas com um furo de 32 mm centralizado na seção, conforme a figura 8. Os segmentos são constituídos de concreto simples.

Figura 8 – Modelo do segmento pré-moldado das estacas.
Fonte: Autor



3.2. Materiais

Os materiais utilizados para a formulação do concreto foram cimento Portland CP V – ARI, areia, brita nº 0 e água. A granulometria dos agregados foi aferida de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 7211, sendo o agregado graúdo enquadrado como brita nº 0 com diâmetros menores que 9,5 mm. A areia se enquadra na classe granulométrica fina.

3.3. Traço

O traço do concreto foi confeccionado a partir da finalidade de sua utilização. Foi definido a classe de agressividade III com relação água cimento $a/c \leq 0,55$. O consumo mínimo de cimento é de 320 kg/m^3 ,

sendo sua classe de resistência correspondida a C45, para aplicação manual. O traço bem como o consumo de materiais é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Traço do concreto. Fonte: Autor

Traço em massa – 1 : 2,05 : 1,87 : 0,5		
Material	kg	litros
Cimento Portland - CPV - ARI	40	-
Areia fina	82	54
Brita 0	115	78
Água	-	20

3.3.1. Preparação do concreto

O concreto foi preparado no canteiro da empresa especializada em serviços de fundações com o auxílio de uma betoneira. Os materiais foram separados de acordo com as proporções contidas na tabela 1. A sequência de preparo do concreto iniciou com a colocação do agregado graúdo, em seguida foram adicionados o cimento, a areia fina e a água. Para a execução de 15 segmentos de estacas, foram necessários 3 traços de concreto, feitos separadamente no mesmo dia.

3.4 Confeção dos segmentos

As estacas foram moldadas com o auxílio de fôrmas prismáticas de chapa de aço. As fôrmas continham um furo nas chapas das seções transversal onde era introduzido um tubo de cano PVC com diâmetro de 32 mm. O concreto das estacas foi adensado utilizando mesa vibratória. Os segmentos foram separados em 3 grupos distinguidos pelo traço de preparo. Após moldadas, as estacas permaneceram em processo de cura no próprio canteiro, como exposto na figura 9.

Figura 9 – Segmentos moldados de estacas prensadas.
Fonte: Autor



3.5. Ensaio de compressão dos corpos de prova

3.5.1. Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de provas é normatizada pela NBR 5738:2015 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Os corpos de prova coletados para o ensaio possuem dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura). Permaneceram em processo de cura nas mesmas condições das estacas até a realização dos ensaios. Para cada traço de concreto, foram coletados 4 corpos de prova, resultando no total em 12 corpos de prova.

3.5.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto (f_c) é obtida através de ensaios em uma prensa de 1200 kN. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da FAENG, na Cidade Universitária da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. A figura 10 exemplifica o esquema adotado para o ensaio dos corpos de prova utilizando a prensa do laboratório.

Figura 10 – Ensaio de resistência à compressão. Fonte: Autor



Os corpos de prova foram retificados. Ao total, foram ensaiados 12 corpos de prova. A resistência do concreto foi encontrada a partir das recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018) utilizando a equação 1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão do concreto [MPa];

F : força [N];

D : diâmetro do corpo de prova [mm].

3.6. Ensaio de compressão nos segmentos de estacas

Para analisar a influência da capacidade resistente das juntas foram realizados ensaios de compressão a fim de comparar os segmentos de estaca inteiros e os segmentos descontínuos, simulando a emenda das estacas. Os ensaios foram realizados com auxílio de um pórtico de reação (2000 kN) presente no LMCC, levados até a ruptura dos modelos, tendo seus resultados expressos em função da resistência à compressão do concreto. Os segmentos foram posicionados no equipamento de modo que ficassem centralizados como mostrado na figura 11.

Figura 11 – Esquema dos ensaios para os segmentos monolíticos. Fonte: Autor



Foram ensaiados 3 segmentos monolíticos, sendo 1 para cada tipo de traço do concreto. Não houve um tratamento nas faces em contato com o pórtico de forma que representasse o método de execução das estacas prensadas, onde o cilindro hidráulico é posicionado diretamente sobre o segmento.

Para realizar os ensaios que simulavam a junta entre os segmentos pré-moldados de estacas prensadas, foi preciso dividir cada segmento em duas partes de forma que obtivessem comprimento igual aos modelos monolíticos e suficiente para ajustar na prensa. O esquema dos ensaios utilizados para obter a resistência à compressão do segmento descontínuo é representado na figura 12.

Figura 12 – Esquema dos ensaios para os segmentos descontínuos. Fonte: Autor



As estacas foram divididas ao meio com o auxílio de uma bancada utilizada para cortar peças de mármore. Os segmentos foram posicionados, sobrepostos entre si, no pórtico de reação de forma que obtivessem o mesmo comprimento de um segmento contínuo e as faces cortadas ficassem perfeitamente planas. Os segmentos divididos foram capeados nas faces cortadas 4 dias antes da realização dos ensaios para que a ruptura do concreto não fosse influenciada pelas faces de apoio e ocorresse na junta de contato. Para simular o contato entre as estacas, foram colocadas as faces moldadas na região de contato entre as peças. Foram realizados 12 ensaios, utilizando um segmento de estaca por vez. A denominação dos modelos foi feita considerando a forma, monolítico ou não, e o traço usado para a moldagem. A resistência à compressão das amostras ensaiadas foi obtida através da equação 2.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão do concreto [MPa];

F : força [N];

A : área da seção transversal do segmento [mm].

3.7 Avaliação numérica das concentrações de tensões

3.7.1 LISA

O software LISA FEA foi utilizado para analisar as concentrações de tensões nos modelos descontínuos pelo método de elementos finitos. A simulação foi limitada a 1300 nós, oferecidos pela versão gratuita do software. Nas simulações foram utilizados elementos tridimensionais hexaédricos. Em cada nó

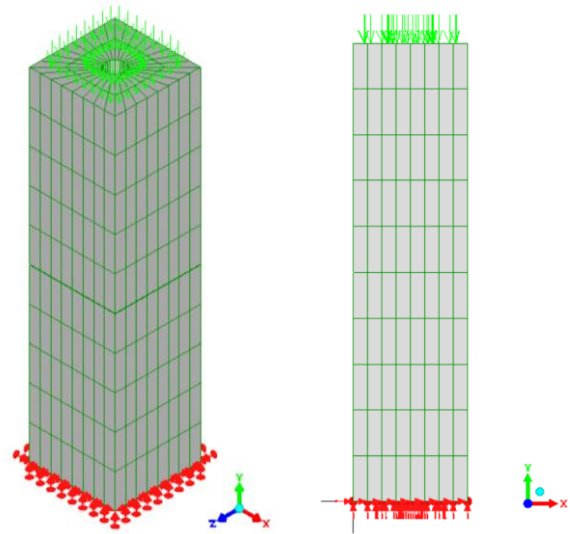
era permitido deslocamento nas direções x, y e z, totalizando três graus de liberdade.

3.7.2 Modelos

O esquema 3D modelado no software para realizar a simulação numérica é apresentado na figura 13. Foram realizadas 5 análises variando a região de contato entre os segmentos. As saliências geradas para o contato foram modeladas com a espessura de 1 mm. Os segmentos, superior e inferior, possuem seção e altura compatíveis com os modelos descontínuos ensaiados (15x15x30cm).

Figura 13 – Discretização do esquema no software LISA.

Fonte: Autor



4. Resultados e discussões

4.1 Resistência mecânica do concreto

Os resultados apresentados na tabela 2 indicam as resistências à compressão dos corpos de provas aos 24 dias de idade, coletados para cada traço de concreto. A resistência prevista para o concreto utilizado na confecção das estacas era de 45 MPa aos 28 dias. Os resultados dos corpos de prova que destoaram dos resultados do conjunto não foram considerados para a análise de resistência à compressão do concreto.

Tabela 2 - Resistência à compressão do concreto das estacas – $f_{c,24}$ (MPa)

Concreto	C1	C2	C3
CP-1	44,8	39,1	38,8
CP-2	39,3	40,7	43,3
CP-3	41,5	45,6	43,4
f_{cm}	41,9	41,8	41,8
σ	2,3	2,8	2,1
cov	5%	7%	5%

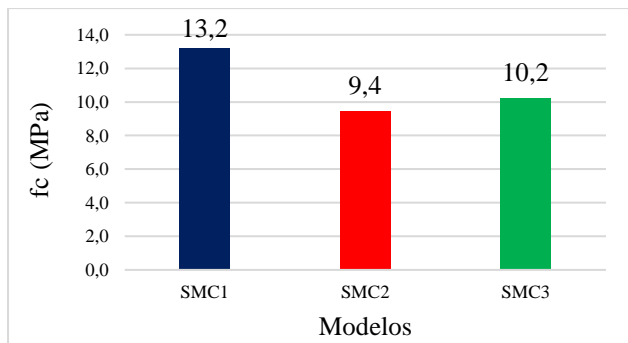
Com os resultados obtidos nos ensaios, observou-se que o primeiro, o segundo e o terceiro traço, obtiveram resistência à compressão média de mesmas grandezas, indicando que mesmo para diferentes betonadas de concreto as resistências foram similares. Considerando os 3 traços, a resistência média dos concretos confeccionados para a fabricação das estacas é de 41,83 MPa com um desvio padrão de 2,4 MPa.

4.2 Resistência dos segmentos de estacas

4.2.1 Segmentos monolíticos

A figura 14 mostra os resultados obtidos nas amostras de segmentos ensaiados, onde foi analisado o desempenho dos segmentos monolíticos. Os resultados dos ensaios foram expressos em função da resistência à compressão do concreto. O segmento monolítico que apresentou melhor desempenho foi o correspondente ao traço do concreto C1, modelo SMC1. Os modelos SMC2 e SMC3 apresentaram resistências menores. A média das resistências dos segmentos monolíticos é de 10,9 MPa.

Figura 14 – Resistência à compressão dos segmentos monolíticos. Fonte: Autor

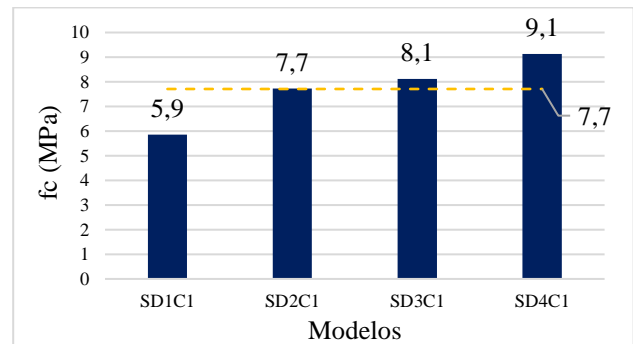


A diferença entre a capacidade resistente destes segmentos se dá, além do uso de diferentes traços de concreto, pela condição da extremidade da seção e esbeltez. As irregularidades das faces em contato com o pórtico de reação condicionam a resistência dos segmentos monolíticos. Mesmo com o uso de concreto com resistência média à compressão de 41,86 MPa, os segmentos não alcançaram capacidade semelhante.

4.2.2 Segmentos descontínuos

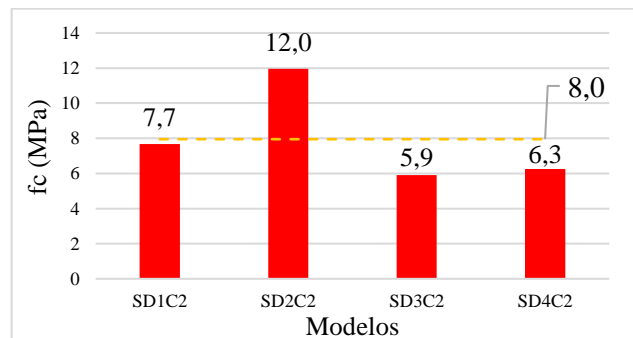
A capacidade das juntas foi testada nos segmentos descontínuos e apresentadas em função da resistência à compressão dos blocos empilhados. Os resultados para o primeiro grupo de estacas pertencente ao concreto do traço C1, estão apresentados na figura 15.

Figura 15 – Resistência à compressão dos segmentos descontínuos – C1. Fonte: Autor



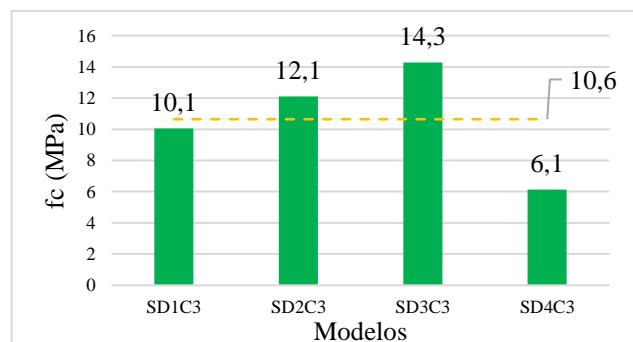
A variabilidade entre a capacidade resistente dos segmentos simulando a junta se dá pela condição das faces de contato. A média das resistências à compressão dos segmentos descontínuos pertencentes ao grupo de traço C1 foi de 7,7 MPa. Comparando com a resistência à compressão do segmento monolítico, a presença da junta reduziu em 42% a resistência do modelo. Os segmentos descontínuos do grupo do traço C2, é apresentado na figura 16.

Figura 16 – Resistência à compressão dos segmentos descontínuos – C2. Fonte: Autor



Para os modelos descontínuos do traço do concreto C2, a média das resistências é de 8,0 MPa. Ao comparar com o segmento monolítico, houve uma queda na capacidade resistente do segmento de 16%. Os resultados do traço C3 é mostrado na figura 17.

Figura 17 – Resistência à compressão dos segmentos descontínuos – C3. Fonte: Autor



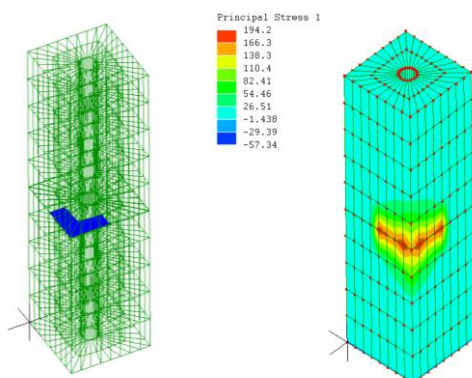
Para o grupo de concreto C3, os modelos SD2C3 e SD3C3 apresentaram resistência mecânica maiores que a resistência obtida com os segmentos monolíticos. Esse aumento na capacidade resistente foi influenciado pelas melhores condições observadas nas faces em contato nas juntas e entre os segmentos e a prensa. A média da resistência à compressão dos segmentos do grupo C3 foi de 10,6 MPa, sendo 6% maior que a resistência do segmento monolítico pertencente ao mesmo grupo.

Em geral, os modelos monolíticos apresentaram resistência média a compressão superior em relação aos modelos descontínuos. Considerando todos os grupos de concreto, a resistência à compressão média dos segmentos descontínuos foi de 8,8 MPa com um desvio padrão de 2,7 MPa. Já a resistência à compressão média dos segmentos monolíticos foi de 10,9 MPa. Essa diferença na resistência dos modelos foi da ordem de 20% inferior para os segmentos descontínuos. Isso se deve ao fato que as ligações em contato direto diminuem a capacidade resistente do conjunto por conta das imperfeições presentes nas faces de contato. As faces em contato têm sua forma definida pela técnica de preparação dos segmentos, fôrma de moldagem e condições de armazenamento.

4.2.3 Análise das simulações numéricas

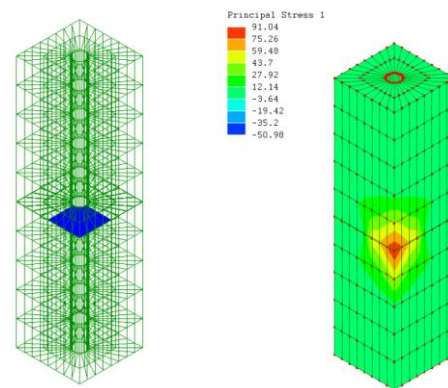
Os modelos analisados visavam simular o contato descontínuo nos segmentos das estacas prensadas a fim de buscar compreender onde as tensões de contato se concentravam quando os segmentos eram solicitados à compressão.

Figura 18 – Distribuição das tensões no contato de 15% de área (MPa). Fonte: Autor



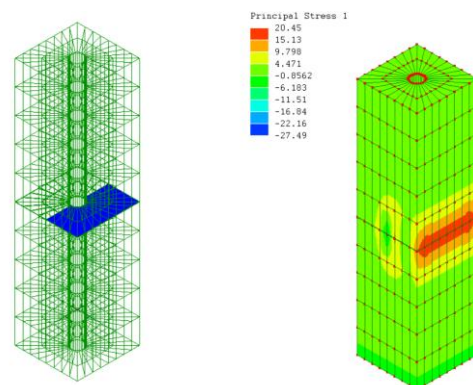
Para o modelo com o contato entre os segmentos com apenas 15% da área da seção transversal (simulado pela área em azul do modelo à esquerda – figura 18) observa-se que as tensões se concentram onde há o contato entre as peças.

Figura 19 – Distribuição das tensões no contato de 25% de área (MPa). Fonte: Autor



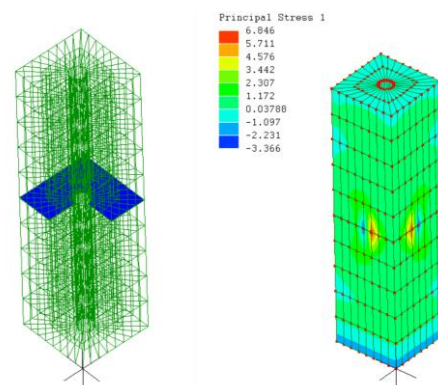
Com o contato de 25% da área entre os elementos (figura 19) a concentração das tensões se assemelha à análise anterior, onde as maiores tensões tendem a se localizar na região adjacente aos contatos entre os elementos.

Figura 20 – Distribuição das tensões no contato de 50% de área (MPa). Fonte: Autor



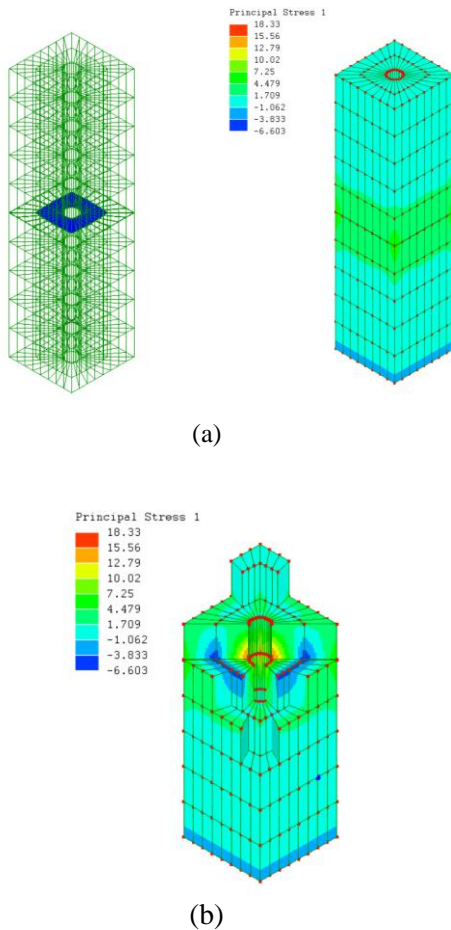
O contato entre as peças considerando 50% da seção transversal concentra as tensões próximo às faces acima da junta das peças, como mostrado na figura 20. A distribuição das tensões indica onde o concreto terá maior solicitação quando submetido a um carregamento.

Figura 21 – Distribuição das tensões no contato de 75% de área (MPa). Fonte: Autor



Com o aumento da área de contato é possível observar uma melhor distribuição das tensões nos elementos. Analisando um contato de 75% (figura 21), nota-se que a concentração da tensão surgiu numa pequena região onde se inicia a descontinuidade do contato entre as peças.

Figura 22 – Distribuição das tensões no contato de 35% de área no meio da seção (MPa). Fonte: Autor



A transferência de esforços pelo meio da seção distribui as tensões de maneira mais uniforme, quando comparado aos outros casos. Na figura 22 é possível observar que a maior concentração de tensão ocorre em alguns pontos próximos à seção vazada do furo.

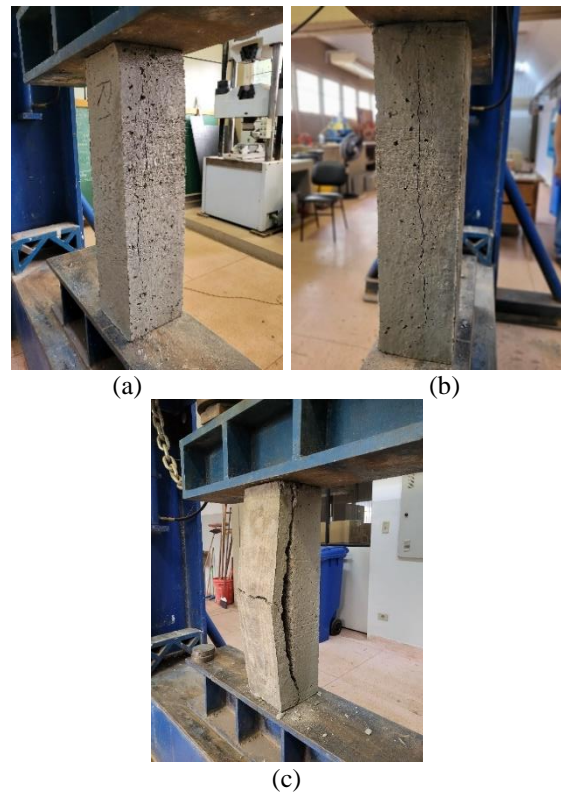
A partir das análises das distribuições das tensões influenciadas pelo contato entre as juntas é possível ter maior compreensão de como o elemento irá se comportar ao transmitir os esforços solicitados por área reduzida. A compressão da distribuição de tensão ajuda a caracterizar de maneira mais adequada o comportamento da ruptura durante os ensaios com os segmentos reais de estacas prensadas. Sabe-se que transferências de esforços de compressão por área reduzida entre elementos de concreto, gera trajetórias diferenciadas entre as tensões, causando o fendilhamento do concreto adjacente às juntas, onde

ocorre a ruptura por exceder o esforço de tração que o concreto suporta.

4.2.4 Tipos de rupturas

A ruptura dos modelos monolíticos SMC1, SMC2 e SMC3 se originou na parte superior se estendendo ao longo do comprimento dos segmentos, como mostrado na figura 23.a, b e c, respectivamente.

Figura 23 – Modo de ruptura dos segmentos monolíticos. Fonte: Autor



O modo de ruptura característico dos segmentos monolíticos ocorreu a partir das concentrações de tensões em área reduzida na seção transversal dos modelos, originadas pelas irregularidades presentes nas faces em contato com a prensa. Durante os ensaios também foi observado que na maioria dos modelos havia a descontinuidade do contato presente nas juntas dos segmentos descontínuos como apresentado na figura 24.

Figura 24 – Descontinuidade no contato entre os segmentos. Fonte: Autor



Nos segmentos descontínuos, as rupturas iniciaram na região de contato, causadas pelo acúmulo de tensões geradas pela área de contato reduzida, como foi relatado durante a simulação numérica. Foi observado fissuras causadas pelo esmagamento do concreto na região adjacente às juntas de ligação, em destaque na figura 25.

Figura 25 – Ruptura por esmagamento do concreto dos segmentos descontínuos. Fonte: Autor



A junta presente na transferência de esforços entre os segmentos descontínuos ligava as faces moldadas pelas fôrmas metálicas, originando fissuras que levaram à ruptura iguais às rupturas dos segmentos monolíticos, influenciada pelas irregularidades nas faces em contato, como na figura 26.

Figura 26 – Ruptura por concentração de tensões nos segmentos descontínuos. Fonte: Autor



Alguns modelos apresentaram fissuração na região de contato com a saliência da face, semelhante ao modo de ruptura mostrado na figura 7 e descrito por Ditz

(2016). É possível perceber a fissuração originada no meio da seção do modelo pela figura 27.

Figura 27 – Fissuras originadas nas juntas dos segmentos descontínuos. Fonte: Autor



5. Considerações finais

A bibliografia apresentada sobre as ligações em elementos pré-moldados mostrou que não há uma única forma de realizar juntas para a transferência de esforços dentro do sistema estrutural. Foi observado durante a simulação numérica que a superfície de contato influencia diretamente no comportamento estrutural do concreto, especialmente quando essa superfície não é perfeitamente regular.

A partir das análises feitas com o apoio direto entre os segmentos de estacas prensadas, concluiu-se que este tipo de ligação reduz consideravelmente a capacidade resistente do concreto e que valores reduzidos devem ser adotados. Observando os resultados apresentados, a superfície de contato dos modelos diminuiu a resistência do concreto tanto nos segmentos monolíticos, quanto nos descontínuos. A diminuição da resistência à compressão do concreto com a presença da junta por apoio direto foi de 20% quando comparada aos segmentos contínuos.

Considerando a resistência à compressão do concreto obtida a partir dos corpos de prova, os modelos em geral não apresentaram desempenho semelhante. Logo, não é possível submeter os segmentos a grandes solicitações dentro de um sistema estrutural de estacas prensadas, pois a junta presente entre os segmentos limita a capacidade de carga e transferência de esforços. Para a melhoria do comportamento das juntas, um maior controle na fabricação dos segmentos de estacas prensadas deve ser estudado, eliminando as protuberâncias das faces transversais e

garantindo o paralelismo entre os segmentos. Assim, será possível obter melhor desempenho estrutural, mitigar perdas e otimizar o processo executivo das estacas prensadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se realizar estudos visando a influência da armadura de fretagem, colocadas nas extremidades dos segmentos, na capacidade resistente da junta por apoio direto. Buscando comparar se haverá melhorias significativas no conjunto dos modelos analisados com e sem a presença do aço.

6. Agradecimentos

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sobretudo ao curso de Engenharia Civil que me forneceu conhecimento necessário para estar até aqui. Ao meu professor orientador, Prof. Andrés Batista Cheung, por todos ensinamentos transmitidos. À Solidifica Fundações e Geotecnia por proporcionar condições para a realização do trabalho. À MECFOR pelo auxílio prestado. A Deus e à minha família por estarem comigo nesta jornada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 5ª ed, Rio Grande do Sul: Editora DUNAS, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: Informação e documentação: Citações em documentos: Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. **Manual de execução de fundações e geotecnia: práticas recomendadas**. São Paulo: PINI, 2012.
- BARBOZA, A. S. R. **Comportamento de juntas de argamassa solicitadas à compressão na ligação entre elementos pré-moldados**. Tese (Doutorado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- DITZ, J. D.; EL DEBS, M. K.; SIQUEIRA, G. H. Modified mortar pad behavior in the transfer of compressive stresses. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.9, n. 1, p 414-434, 2016.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2ª ed., rev. e ampl. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2019. 456 p.
- GOTLIEB, Mauri. **Fundações: Teoria e Prática**. 2ª ed. São Paulo, SP: PINI, 1998.
- HOLLY, I.; ABRAHOIM, I. Connections and joints in precast concrete structures. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 28, n. 1, p. 49-56, 2020.
- LONDON, A.; BOZELLI, E.; RIBAS, H. C.; GRIPP, R. **ESTACA MEGA**. Campo Grande, MS, 1984.
- JUNQUERIA, S.; MASSAD, F. **Aspectos Práticos sobre a instalação e utilização de estacas prensadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- VAMBERSKY, J. N. J. A. **Mortar joints loaded in compression**. In: INTERNATIONAL SEMINAR DELFT, The Netherlands, 1990. Proceedings - Prefabrication of concrete structures. Delft, Delft University Press. p.167-180.
- VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O concreto no Brasil, volume III: pré-fabricação, monumentos, fundações**. São Paulo, SP: Studio Nobel, 2002. 350 p.