

Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Modelagem de Concreto Poroso com Aplicação em Pisos Permeáveis

Camila Martins Mesquita; Gustavo Silva Ferreira; Lucas Vitorino Firmino e
Matheus Martins Mesquita

Universidade UNA de Catalão – Campus Santa Cruz

*MSc. Davidson de Oliveira França Júnior; Professor Orientador, Curso de Engenharia Mecânica
camilamartins01@hotmail.com; gustavogsf1@gmail.com; lucas.vfs@hotmail.com;
matheusmesquita1999@hotmail.com.*

Resumo

Um piso permeável é uma tecnologia que vem sendo utilizada com mais intensidade na última década, ela possibilita que a água pluvial não fique contida em sua superfície, já que há poros no interior concreto são responsáveis por absorver a água e evitar o escoamento do líquido pela superfície do pavimento. Nesse sentido, essa alternativa possibilita que os lençóis freáticos voltem a ser reabastecidos nas regiões de grandes centros urbanos e que enchentes sejam amenizadas ou até mesmo eliminadas. Atrelado a esta metodologia construtiva, devido ao concreto ser um material heterogêneo, não-linear e com a presença da porosidade impondo grandes vazios dispostos aleatoriamente surgem diversas dificuldades de projeto e execução e, dentre estas, destaca-se a complexidade na análise da resposta estrutural do piso. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma alternativa robusta para tal, pois é utilizado em várias áreas das engenharias como forma de determinar a resposta estrutural (deslocamentos, esforços e tensões). O MEF consiste na discretização da estrutura em partes menores, conservando as propriedades iniciais do sistema. Este procedimento numérico permite determinar soluções aproximadas de problemas envolvendo equações diferenciais. Tendo isto em vista, o objetivo deste trabalho é aplicar o MEF na modelagem de um piso permeável utilizando o *software* ANSYS para resolução do problema. Para o estudo foram analisados modelos lineares sem e com vazios (porosidade), a fim de investigar a resposta estrutural. A interação solo-estrutura foi levada em consideração nas análises, uma vez que a flexibilidade do solo influencia na resposta estrutural do piso. Os resultados são explorados em termos de deslocamentos e tensões nos sistemas envolvidos.

Palavra-Chave: Método dos Elementos Finitos, Piso Permeável, ANSYS, Concreto Poroso.

Abstract

A permeable floor is a technology that has been used more intensively in the last decade, it allows rainwater not to be contained on its surface, since pores in the concrete interior are responsible for absorbing water and preventing the runoff of the liquid across the floor surface. In this sense, this alternative makes it possible for the water tables to be replenished in regions of large urban centers and for floods to be alleviated or even eliminated. Linked to this constructive methodology, due to concrete being a heterogeneous, non-linear material and with the presence of porosity imposing large voids arranged randomly, several design and execution difficulties arise and, among these, the complexity in the analysis of the structural response stands out. The Finite Element Method (FEM) is a robust alternative for this, as it is used in several areas of engineering as a way to determine a structural response (displacements, efforts and stresses). The MEF consists of discretizing the structure into smaller parts, preserving the system's initial functions. This numerical procedure allows to determine approximate solutions to problems on the contour of differential equations. With this in mind, the objective of this work is to apply the MEF in the modeling of a permeable floor using ANSYS *software* to solve the problem. For the study were linear models with and without voids (porosity), in order to investigate a structural response. The soil-structure interaction was taken into account in the analyses, since the flexibility of the soil influences the structural response of the floor. The results are explored in terms of displacements in the involved systems.

Keywords: Finite Element Method, Permeable Floor, ANSYS, Porous Concrete.

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização nas grandes cidades traz consigo a ocupação e impermeabilização da superfície do solo, pela construção dos grandes edifícios com calçadas e pisos impermeáveis, que por sua vez estão interligadas por ruas pavimentadas, logo, conclui-se a influência humana no ciclo hidrológico das cidades. Vale ressaltar, que a crescente demanda por vias de tráfego asfaltadas levou à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como o concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland (HÖLTZ, 2011).

Agra (2011) defende que a ocupação urbana através de áreas impermeáveis como telhados, ruas, estacionamentos e passeios também altera as características de volume e qualidade do ciclo hidrológico. Com a drenagem da água através do solo prejudicada pela ação antrópica, o escoamento e o retorno ao lençol freático da água tornam-se mais difíceis, resultando em alagamentos e enxurradas.

Araújo et al. (2000) afirmam que as ações públicas para as soluções desses problemas no Brasil estão voltadas, na maioria das vezes, somente para as medidas estruturais. As soluções geralmente encontradas têm sido a construção de redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia, sem que se avaliem os reais benefícios da obra.

Uma das alternativas para reduzir estes impactos é a utilização de concretos permeáveis, que podem ser utilizados como cobertura para pavimentos em via de pedestres, estacionamentos e para tráfego de veículos leves. Ao mesmo tempo que permitem a infiltração da água no solo, colaboram com a diminuição das superfícies impermeabilizadas na cidade (POLASTRE E SANTOS, 2006).

Marchioni e Silva (2011) afirmam ainda que pavimentos permeáveis podem reduzir o escoamento superficial em até 100%, dependendo da intensidade da chuva, e retardam a chegada da água ao subleito reduzindo assim a erosão do solo. Portanto, o concreto permeável é uma das alternativas que auxiliam na recuperação da capacidade de infiltração do solo que vem sendo perdida com devido ao avanço das áreas urbanas (POLASTRE E SANTOS, 2006).

O desenvolvimento de pesquisas e utilização do concreto permeável está em estágio primitivo no Brasil, além disso, o número de publicações e metodologias para a aplicação deste material é escasso, dificultando sua execução e aplicação. Outro problema é a dificuldade de dosagem e moldagem desse material, dificultando o processo de execução e análise de resultados (BETEZINI, 2013).

A modelagem estrutural com o solo, de uma forma geral, corresponde uma análise de um problema de interação solo-estrutura, em que a estrutura fica sujeita a modificação de seus esforços dependendo do efeito do solo. Portanto, investigar os efeitos nessa temática traz uma abordagem pertinente aplicada ao concreto poroso (FRANÇA JÚNIOR, 2019).

De acordo com Soriano (2009), o Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que fornece soluções aproximadas para diversas áreas de engenharias; têm como objetivo determinar a resposta estruturais (deslocamentos, esforços e tensões) de um corpo sujeito a forças externas, possibilitando principalmente o estudo do comportamento em sistemas complexos com a presença de vazios, onde a análise de tensão é de difícil obtenção e condiz em uma particularidade neste tipo de piso.

Diversos trabalhos apresentam a análise de pisos permeáveis no que se diz respeito a dosagem do concreto poroso e quanto a aplicabilidade nas obras, tais como Neves Monteiro (2010), realizou um estudo experimental na determinação de um traço de concreto poroso produzidos com materiais da cidade, avaliando as características e comparando com estudos que já foram realizados. (Moreira Ramos, 2018) analisou os valores de resistência à tração e compressão das dosagens em relação a um traço referência, das propriedades mecânicas e de permeabilidade do concreto permeável com adição de agregado miúdo e cinza de madeira. Devido à complexidade da abordagem, trabalhos envolvendo a análise estrutural em concreto poroso são mais restritos.

1.1. OBJETIVO

Assim sendo, o objetivo do deste trabalho é aplicar o MEF na modelagem de um piso permeável utilizando o *software* ANSYS na análise de deslocamentos e tensões. Para a análise foram estudados modelos assumidos como lineares e homogêneos, mas sem e com vazios (porosidade), bem como o efeito da interação solo-estrutura foi aplicada nas análises, uma vez que um solo mais rígido ou mais flexível implica em situações distintas de projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCRETO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, obtido através da mistura homogênea de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, e água, podendo conter aditivos e adições (RIBEIRO, 2015). A qualidade do concreto depende diretamente da qualidade dos materiais utilizados para a sua produção. Para garantir uma mistura adequada e obter uma resistência desejada é necessário possuir material adequado, conhecer as características dele, para então, calcular as proporções de cada agregado e o fator água/cimento. Outros fatores que devem ser levados em consideração são: transporte, lançamento, compactação e cura do concreto (ANDOLFATO, 2002).

As razões da maior utilização do concreto em relação aos outros materiais são: sua excelente resistência à ação da água; facilidade na obtenção de diversas formas e volumes devido à sua consistência plástica; baixo custo e disponibilidade de matéria prima (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.2. CONCRETO POROSO

2.2.1. Histórico do Concreto Permeável

O concreto permeável é um tipo de concreto com alto índice de vazios interligados, preparado com pouca ou nenhuma areia, o que permite a passagem desobstruída de grandes quantidades de água (KRISLEI, 2015).

Quanto a aplicação, o concreto permeável tem sido usado de diversas maneiras como: construção de casas, edifícios, painéis pré-fabricados, blocos curados e pisos desde a metade do século XIX. De acordo com Ghafoori (1995), isso ocorreu na época em virtude da escassez de cimento e de bons tijolos, além da grande disponibilidade de agregados graúdos.

De acordo com Polastre e Santos (2006), já existem registros de aplicações em vários países, como no Japão e no Chile. Nos últimos anos a comunidade científica

internacional passou a estudar de maneira mais aprofundada este material, com o objetivo de caracterizá-lo e normalizá-lo de maneira mais adequada.

O avanço considerável dos estudos nos Estados Unidos (EUA) em relação a esse material, principalmente nas décadas, onde permitiu ao *American Concrete Institute* (ACI) desde 2006 produzir coletâneas dos trabalhos relacionados ao mesmo, através do boletim ACI 522 - *Pervious Concrete*, o qual possui uma série de trabalhos relevantes e especificações para o auxílio na produção de concreto permeável.

No ano de 2015 foi lançada a ABNT “NBR 16416:2015 - Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos”, que estabelece requisitos mínimos de projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto. Além das definições de pavimento, ela apresenta também requisitos mínimos para a estrutura de acordo com o uso, e ainda a permeabilidade mínima relacionada ao tipo de revestimento.

Atualmente no Brasil os estudos de desenvolvimento e desempenho do concreto permeável voltado para a área estrutural têm sido mais escassos. E é um fato visível que tal inovação proporciona vantagens tanto econômicas quanto ambientais, de forma que é de suma importância que seja feito um estudo mais aprofundado sobre este assunto. (ASSUMPÇÃO E SANTANA, 2017).

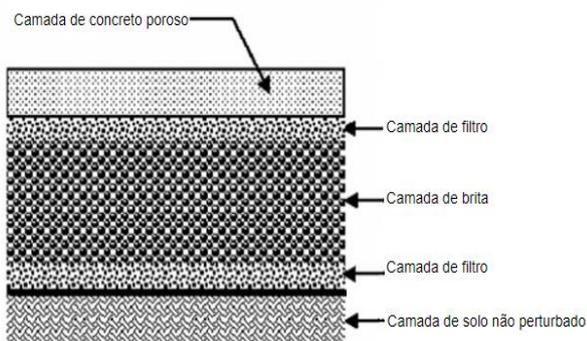
Segundo estes mesmos autores, desde meados da década de 1980, o assunto sobre pavimentos porosos pareciam ser o próximo passo analisando trabalhos anteriores sobre manutenção de águas pluviais; sendo capaz de resolver esses problemas, pois tinham uma enorme capacidade dessa criação, dado que os pavimentos são dois terços das superfícies potencialmente impermeáveis em bacias hidrográficas urbanas específicas.

2.2.2. Estrutura do Concreto Poroso

Através de quantidades controladas de água e cimento é possível formar um espesso revestimento em torno das partículas agregadas do concreto permeável, assim, criam-se muitos vazios interligados, que deixam a peça altamente permeável. Normalmente se obtém um índice de 15 a 25% de vazios e um escoamento de água da ordem de 200L/m²/min *American Concrete Institute* (ACI 522, 2010).

A alta porosidade reduz a resistência deste material em relação ao concreto comum, de modo que sua aplicação em pavimentos não se vale a todo tipo de tráfego, mas é adequado à maior parte dos locais de tráfego leve ou pouco intenso. (POLASTRE E SANTOS, 2006).

A maior aplicação do concreto permeável é como constituinte de pavimento permeável, como mostrado na Figura 1, com espessuras entre cinco e dez centímetros sobre camadas subsequentes, sendo: uma de agregados miúdos, outra de agregado graúdo, camada de revestimento e camada de assentamento.



(a) Camadas de assentamento



(b) Concreto Poroso



(c) Exemplo do efeito da porosidade na absorção



(d) Exemplo de piso com concreto poroso

Figura 1 – Camadas e Exemplos de Piso permeável (ANDIT, 2009; MARCHIONI ET AL., 2011).

No caso da Figura 1 apresentada, o concreto permeável entra na camada de revestimento e tem a função de permitir a passagem rápida da água, que então chega às outras camadas, para então ser conduzida a infiltração no subsolo. Pode ser observado os efeitos vantajosos que a porosidade proporciona bem como um adequado acabamento (MARCHIONI E SILVA, 2011).

Uma vantagem econômica da produção de concreto permeável é que pode ser executado *in loco*, com materiais encontrados na região, evitando custos de transporte elevados. Ainda, pode ser fabricado com baixa tecnologia e mão de obra não especializada, se ela receber um treinamento básico adequado (HÖLTZ, 2011).

Sua adoção também contribui para a manutenção dos aquíferos subterrâneos e para redução da velocidade e da quantidade do escoamento superficial dessas águas. Por permitir a infiltração natural das águas pluviais, ele também acaba contribuindo para um uso mais eficiente do solo, pois podem minimizar a sobrecarga em obras de drenagem, com pontos de retenção, valas, tubulações e outros mais (POLASTRE E SANTOS, 2006).

Porém como desvantagem, há sempre a possibilidade de colmatagem e constantes gastos com a manutenção e limpeza do concreto. Nas considerações de Baptista e Nascimento (2011), a colmatagem de uma estrutura de infiltração possui como causa básica a deposição de material particulado de finos no interior da estrutura preenchendo os vazios do meio poroso. As partículas maiores ficam retidas nas camadas superiores ao passo que as menores vão sendo carregadas para as partes mais profundas. De maneira geral esse é o fenômeno que faz com que o meio poroso perca através do tempo sua capacidade de condutividade hidráulica de maneira lenta e progressiva.

A longo prazo, a infiltração de águas pluviais na estrutura pode tornar-se se nula, uma vez que o sistema perde sua função drenante e passa a comportar-se como estrutura impermeável ou de retenção hidráulica. Assim, a colmatagem está diretamente ligada à vida útil do pavimento ou do meio poroso (VIRGILIIS, 2009).

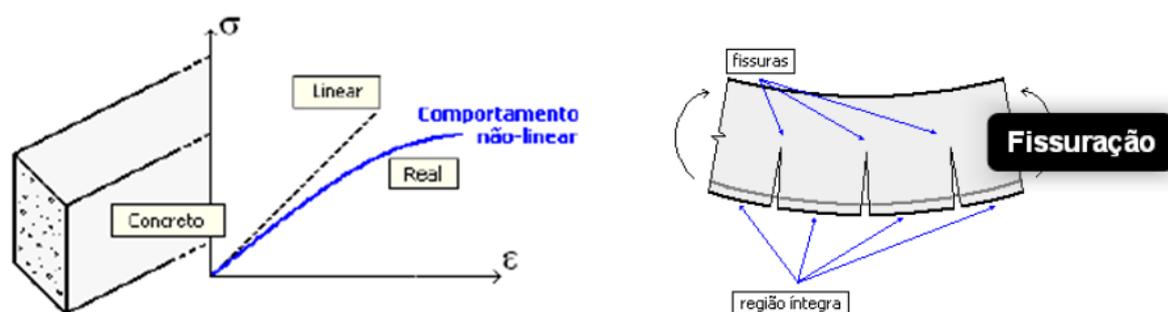
Embora se saiba do emprego do concreto permeável já há algumas décadas na Europa e Estados Unidos, no Brasil existem poucas citações do uso deste material, em sua maioria relacionados à drenagem urbana. Maior atenção tem sido dada a blocos de concreto intertravado e blocos de concreto vazado (POLASTRE E SANTOS, 2006).

2.3. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO CONCRETO

2.3.1. Aspectos Não-Lineares do Concreto

De uma maneira geral, uma análise não-linear é um cálculo no qual a resposta da estrutura, seja ela em deslocamentos, esforços ou tensões, possui comportamento não-linear, ou seja, não-proporcional à medida que um carregamento é aplicado e as tensões aumentam, a forma do concreto altera desproporcional. Portanto, para que os resultados da análise estrutural seja o mais real, tem sempre que for viável considerar os efeitos da não-linearidade.

A não-linearidade física (NLF) é o fenômeno equivalente à não-proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material, onde esse comportamento está conectado à propriedade não-linear do material. Pelo fato do concreto ser um material heterogêneo, as tensões não são proporcionais às deformações e sofre fissuração. Assim, além do concreto possuir uma não linearidade por conter materiais distintos em sua composição (pasta e agregados), o efeito da porosidade aumenta esse comportamento não linear. A Figura 2 a seguir mostra aspecto não linear e o efeito da fissuração devido a flexão (TQS Ltda, 2017).



(a) Diagrama tensão vs deformação do concreto

(b) Fissuras no efeito da flexão

Figura 2 – Comportamento não-linear e fissurado do concreto (TQS LTDA, 2017).

Conforme observado na Figura 2, além deste comportamento não-linear dos materiais do concreto, existe mais uma condição relativa ao concreto que é a fissuração, que devido à baixa resistência à tração do concreto, é normal a aparição de fissuras por toda a extensão dos elementos à medida que o carregamento é aplicado na estrutura.

De acordo com grau de união dos componentes, a resistência à compressão do concreto e a pequena resistência à tração pode sofrer alterações devido a formas distintas de fissuras no concreto. O agregado tem função fundamental na resistência do concreto pois possui maior módulo de ruptura. Assim, no interior do concreto a ruptura geralmente se dá por cisalhamento na área de interação do agregado graúdo e da pasta (BASILEU, 2012).

2.3.2. Efeito das tensões no concreto convencional e no concreto poroso

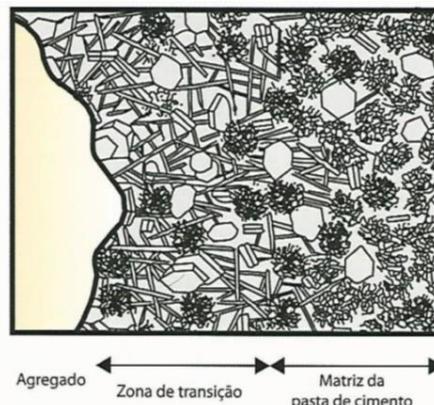
Os deslocamentos e, conseqüentemente, as tensões calculadas nos diversos componentes e peças estruturais, são valores nominais, são válidas para satisfazer uma série de condições. As regiões mais propensas às falhas são as que contêm seções com alterações na geometria, ocorrendo pontos onde temos um aumento localizado de deslocamentos, ou seja, gerando pontos de concentração de tensão (ROSA, 2002).

As tensões e deslocamentos que atuam nesses pontos conseguem ser muito maiores que os nominais, e na maior parte dos casos, o efeito de suas concentrações acarretam rupturas localizadas nestas regiões.

Geralmente, quando um corpo de prova de concreto é submetido a 70% de sua tensão última, começam a surgir microfissuras na pasta de cimento. A união dessas microfissuras estão presentes na zona de transição entre agregado e pasta, na qual contribui para o início do colapso do conjunto devido a uma tensão de compressão. A propagação dessas microfissuras no ensaio de tração acontece de forma mais rápida, sendo necessária uma menor quantidade de carga para romper o material. Isso explica o fato de o concreto apresentar uma resistência a tração muito menor do que a compressão (MEHTA E MONTEIRO, 2014).



(a) Concreto Fraturado



(b) Zona de transição entre pasta e agregado

Figura 3 – Concreto fraturado (S. E. PILS, 2019; Mehta e Monteiro, 2014).

No concreto permeável, a zona de transição está presente, sendo a região que está contida o agregado e a pasta de cimento, esse ponto é o que minimiza a resistência do concreto, já que apresenta uma grande quantidade de vazios e microfissuras. Por essa razão que mesmo os elementos individuais do concreto apontando alta rigidez, essa zona incide o sistema por não permitir a transferência de tensões (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que “durabilidade é definida como vida útil de um material sob determinadas condições ambientais” e que há uma relação entre resistência e durabilidade, quando a primeira está associada ao alto índice de vazios. Eles concluem que o concreto permeável possui uma durabilidade menor. Uma vez que há o surgimento de microfissuras devido a ciclos de temperatura, maior concentração de tensões e umidades ambientais.

Tendo em vista os aspectos completos que envolvem a análise de tensões neste material, uma alternativa para tal análise é o emprego do método dos elementos finitos.

2.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

2.4.1. Definição e Conceitos

A metodologia principal do MEF consiste em se dividir o domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (formato triangular, quadrilateral, tetraédrico, etc.), conforme ilustra esquematicamente a Figura 4. Este processo é bastante utilizado na engenharia, onde usualmente tenta-se resolver um problema complexo, subdividindo-o em uma série de problemas mais simples.

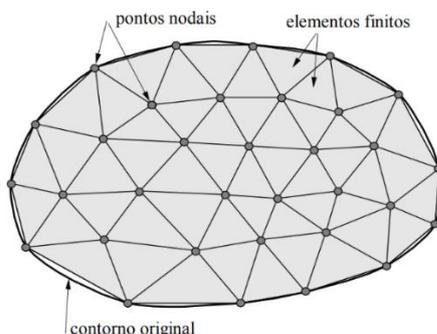


Figura 4 - Malha triangular aplicada em um discretização através do MEF (Souza, 2003).

Devido ao fato de as sub-regiões apresentarem dimensões finitas, estas sub-regiões são chamadas elementos finitos, em contraste com os elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial e integral. Advém daí, o nome Método dos Elementos Finitos, estabelecido por Ray Clough, na década de 50. Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais, conforme indica a Figura. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha de elementos finitos (SORIANO, 2009).

Diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos. Estes apresentam formas geométricas diversas (por exemplo, triangular, quadrilateral, cúbico etc.) em função do tipo e da dimensão do problema a ser analisado (se unidimensional, bidimensional ou tridimensional). A Figura 5 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos.

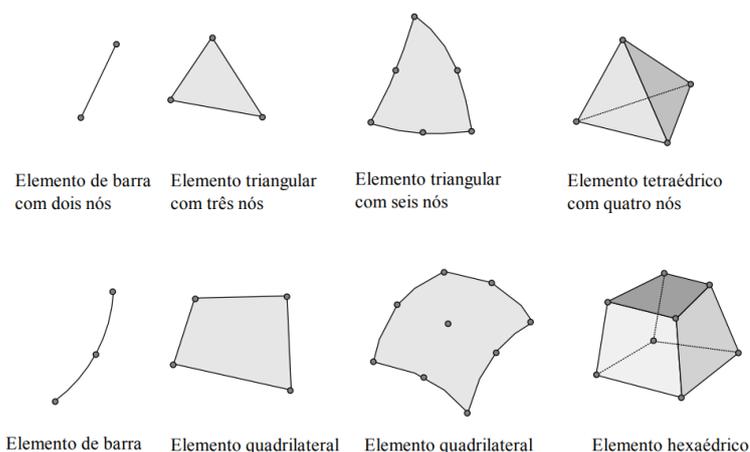


Figura 5 – Geometrias e tipos de elementos finitos aplicados no MEF (Souza, 2003).

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora seja um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise. A desvantagem neste processo é o aumento no custo computacional envolvido (SOUZA, 2003).

Ao dividir o domínio em malha, são estabelecidas atribuições em cada elemento, depois da determinação e resolução das equações de equilíbrio, os valores nos nós dos

campos variáveis se tornam conhecidos, em seguida, quanto a esses valores vão ser utilizadas as funções de interpolação, que representam o comportamento de todos os nós da estrutura, obtendo um valor aproximado para o meio contínuo (SORIANO, 2009).

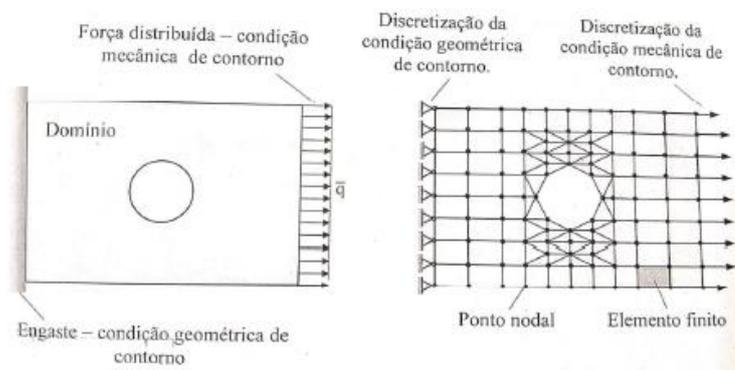


Figura 6 – Discretização por elementos finitos em regiões de concentração de tensões (SORIANO, 2009).

De acordo com Simão (2014), a precisão do Método dos Elementos Finitos depende não só da formulação dos elementos, mas também da malha gerada para analisar um determinado problema. Portanto, na discretização da estrutura, deve-se decidir o número, o tipo e o arranjo de cada um dos elementos de acordo o que se deseja analisar.

No caso com geometrias de furos mais complexas (caso do piso poroso semelhante Figura 6), bem como na incorporação de outros meios como o solo, no refinamento da malha maiores cuidados devem ser levados em consideração, como a distribuição dos elementos no contorno e na conectividade dos nós (França Júnior, 2020).

Tendo em vista os aspectos citados anteriormente, o MEF possui diversas vantagens, tais como: analisar modelo complexos, incluir diferentes materiais na análise, diferentes carregamentos e condições de contorno, entre outras complexidades. Em contrapartida, dependendo da análise o MEF traz um alto custo computacional, soluções aproximadas e os resultados dependem da malha utilizada.

2.4.2. Formulação Numérica pelo MEF

O método dos elementos finitos é uma técnica numérica para resolver problemas de valor de contorno. A técnica consiste na divisão do domínio em um número finito de elementos (os quais chamamos de elementos finitos) e na utilização de funções apropriadas para construir uma aproximação da solução real sobre esses elementos, utilizando conceitos variacionais.

Para problemas estruturais estáticos, o método dos elementos finitos resulta em um sistema de equações que podem ser expressas na forma da Lei de Hooke, dada por:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (2.1)$$

Sendo $\{F\}$ o vetor global de forças externas, $\{U\}$ o vetor global de deslocamentos e $[K]$ a matriz de rigidez global da estrutura.

3. METODOLOGIA

As etapas que compreendem este trabalho estão dispostas através do fluxograma da Figura 7.

Primeiramente apresentam-se a sequência do trabalho, que envolve a de piso permeável. Assim, foi realizada as pesquisas bibliográficas que abordam sobre o concreto permeável, analisamos conceitos que envolvem o material e suas não-linearidades, bem como as tensões.

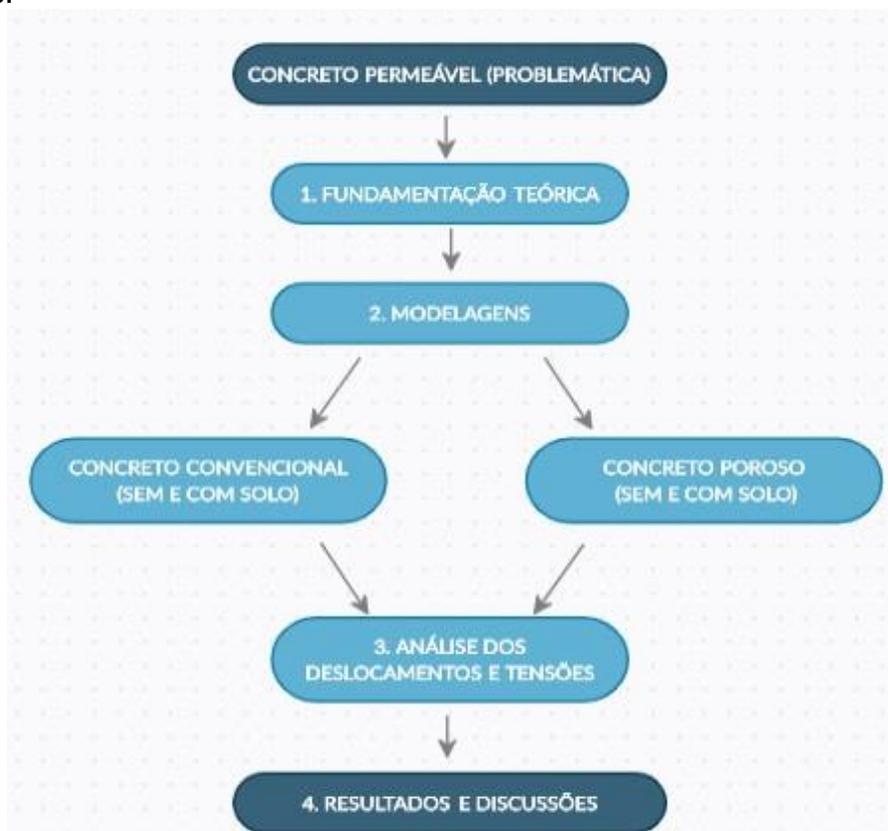


Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa (Autores, 2021).

A partir disso, realizamos alguns estudos de caso através do método dos elementos finitos, com modelagens feitas com intuito de avaliar os deslocamentos e tensões em neste tipo de problema. O estudo foi dividido basicamente em três casos: o primeiro é o concreto modelado como um meio linear elástico sem porosidade, o segundo o efeito da porosidade (mais densa) foi incluída na modelagem do concreto e, por fim, o terceiro caso é caracterizado pela modelagem do concreto com porosidade menos densa. Vale ressaltar que em todos os casos o efeito da flexibilidade do solo de apoio foi incorporado nas análises. De acordo com METHA (2006) o módulo de elasticidade do concreto com agregado leve varia de 14 a 21 GPa, que está entre 50, dessa forma o concreto é representado de forma linear e, do ponto de vista estrutural, o módulo de elasticidade do concreto foi assumido de 21 GPa. Tal adoção é justificada conforme item 8.2.8 da NBR 6118/2014 para um concreto com de classe C20 com uso de granito, ou seja, resistência característica a compressão de 20 MPa.

O material do concreto poroso é considerado não-linear, ou seja, uma mistura homogênea entre a pasta (cimento, água, areia) e os agregados graúdos (brita); a dosagem depende muito do teor de argamassa, da quantidade de pedras, da relação água/cimento.

Assim, o efeito da porosidade foi incorporado nas modelagens ao criar vazios nessas estruturas.

A primeira modelagem é do concreto como uma placa sem vazios sobre base rígida no plano, usando o elemento PLANE, com dimensões de 0,1 m de espessura e 1 m de comprimento. Uma carga de 1000 N/m foi aplicada na superfície e na parte inferior do solo, aplicado em todos os nós de apoio de 1º gênero. Uma rigidez alta foi assumida no solo para que o mesmo seja considerado na situação rígida, em que seu módulo de elasticidade foi assumido de $16e^{20}$ Pa.

O segundo caso, a placa é modelada no estado plano com base flexível (solo), com as mesmas características da estrutura da placa no primeiro caso (mesma carga e sem vazios). Assim, à medida que vai flexibilizando o solo, ou seja, diminuindo o módulo de elasticidade, o solo tende a ficar mais flexível. Vale ressaltar que os módulos de elasticidade do solo foram assumidos apenas para flexibilizar a base de apoio, pois existem diferentes tipos de solo que podem ser empregados nesta faixa analisada.

Nesse trabalho abordamos os deslocamentos no solo flexível e solo rígido, mas no solo rígido temos uma situação mais desfavorável do ponto de vista da aplicabilidade do concreto poroso, pois quanto mais o piso é compactado o solo vai reduzir seus vazios e permeabilizar menos. Por outro lado, se não for muito compactado, poderá levar a estrutura do piso a ocorrer fissuras, pois à medida que aumenta os vazios no solo há probabilidade de a placa fissurar em baixo e romper por flexão, visto que o concreto resiste pouco a tração, cerca de 10% da resistência à compressão.

A ferramenta ANSYS faz a análise dos deslocamentos gerados pela flexibilização do solo em análise, simulando assim um padrão de eventos aleatórios nas diversas condições em que o solo se encontra para instalação da calçada permeável, com a variação em modelos do concreto comum, bem como o concreto poroso.

Vale ressaltar que os valores de elasticidade do solo são assumidos apenas para incorporar o efeito de uma alta rigidez ou de uma parcela flexível no solo, não representando um tipo específico de solo, pois se sabe que a análise nesta situação envolve diversos critérios e comportamentos relacionados ao material solo em específico.

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS SEM EFEITO DA POROSIDADE

A Figura 8 mostra a modelagem da área em análise para o concreto convencional (CC), modelada através do programa ANSYS. A partir dessa área refinamos a malha e aplicamos as condições de contorno para obter as simulações de acordo com as especificações do solo em estudo.

Na Figura 9 podemos ver os elementos finitos já com uma malha refinada no formato triangular, de forma mais uniforme para que os resultados de deslocamentos gerados não possuam deformações que não condizem com a realidade. Podemos notar também os apoios de cor azul, onde foram travados os deslocamentos, sendo eles na lateral em X e na parte inferior em Y, simulando apoios de 1º gênero, sendo essas as condições de contorno necessárias para estes problemas. Em seguida, foi aplicado a carga na parte superior da placa de concreto, carga essa sinalizada pela seta de cor vermelha de 1000 N/m de magnitude e aplicada uniformemente pela placa de concreto.

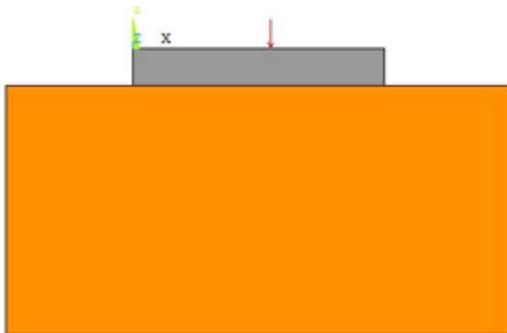


Figura 8 – Modelamento / área sem poros.

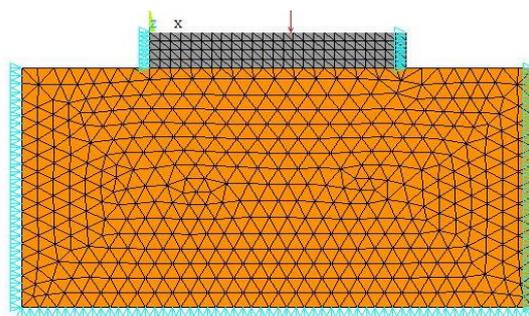


Figura 9 – Malha refinada sem poros.

Feito a modelagem e refinamento das áreas e malha dos elementos, se utilizou esses mesmos procedimentos de modelagem para as condições do solo com suas devidas propriedades, inicialmente rígido e posteriormente variando sua flexibilidade e imprimindo os resultados de solução nodais e seus deslocamentos em Y.

A Figura 10 representa o solo em seu estado mais rígido com o módulo de elasticidade definido em $E=16e^{20}$ Pa, através do mapa de calor podemos visualizar as áreas mais afetadas pela pressão aplicada na área da placa, sendo na cor azul os maiores deslocamentos e na cor vermelha os deslocamentos nulos. Assim, o deslocamento máximo de encurtamento foi de $0,720e^{-8}$ m. A Figura 11, após compreender como a força será distribuída ao longo da estrutura foi analisado como a estrutura se comportou com a força aplicada na sua parte superior, onde se pode ver que com o solo em sua condição mais rígida não se deslocou, diferente do concreto que foi comprimido pela força aplicada.

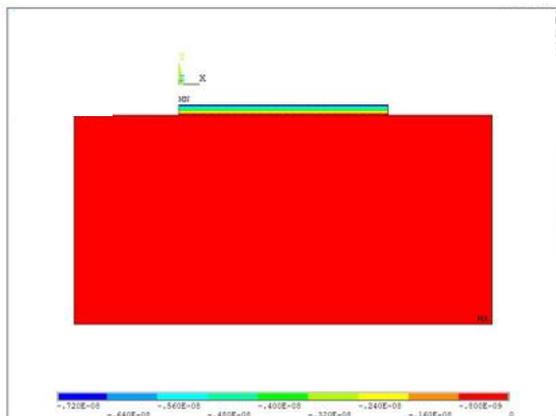


Figura 10 – Deslocamentos da placa em um solo assumido rígido ($E=16e^{20}$ Pa).

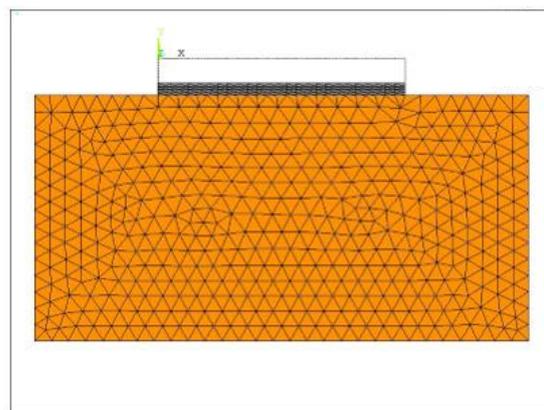


Figura 11 – Comportamento de deslocamento da malha para solo rígido ($E=16e^{20}$ Pa).

Apresentado nas Figuras 10 e 11 a aplicação da modelagem com o solo enrijecido, flexibilizamos o solo para avaliar o efeito da flexibilidade neste problema, mostrando as diferentes condições ambiente em que se pode ser feita a instalação da calçada.

Seguindo assim, na Figura 12 já podemos ver o solo flexibilizado para o módulo de elasticidade assumido menor no valor de $E=16e^9$ Pa, aplicando a mesma força mostrada no primeiro exemplo, extraindo uma diferente solução nodal de deslocamento em Y.

Ao visualizar e comparar a Figura 12 com a Figura 10, se conclui que ao flexibilizar o solo a deformação se dissipou ao longo da área do concreto e solo, essa flexibilização se dá, pois, o solo flexibilizado não repulsa toda a força como o solo rígido, se deformando

também com a aplicação da carga, gerando os chamados bulbos de tensões e deformabilidade do solo. O deslocamento máximo nesta situação foi de $0.552e^{-7}$ m.

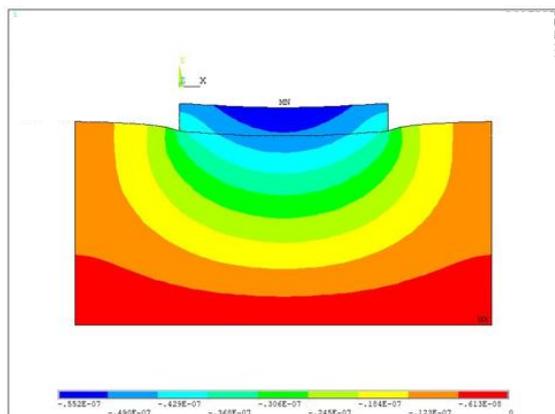


Figura 12 – Deslocamentos da placa e em um solo assumido com flexibilidade intermediária ($E=16e^9$ Pa).

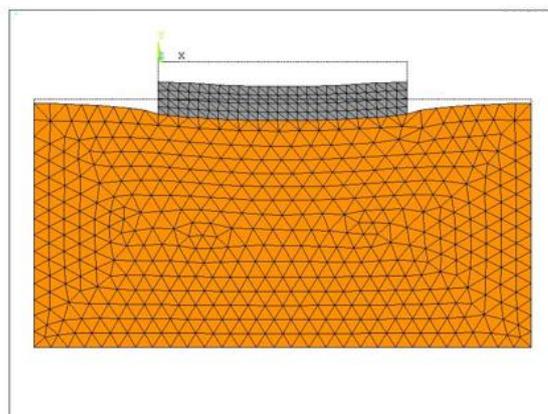


Figura 13 – Comportamento de deslocamentos da malha para um solo com flexibilidade intermediária ($E=16e^9$ Pa).

A partir da extração é possível avaliar que a flexibilidade do solo influencia nos deslocamentos do conjunto, pois tanto o solo encurtou quanto a placa sofreu efeito flexão nessa situação.

As Figuras 14 e 15 ilustram a situação em que se flexibilizou ainda mais o solo, minimizando o módulo de elasticidade para $E=16e^5$ Pa. Assim, é possível observar que devida a rigidez do solo ser muito baixa em relação a rigidez da placa, nota-se que o solo deforma mais e a placa não sofre o efeito da flexão. Com isso, apesar do deslocamento do conjunto ser maior a placa de concreto tem um comportamento tendendo a um deslocamento de corpo rígido, mostrando uma situação diferente que deve ser avaliada para instalação da placa de concreto. O deslocamento máximo gerado foi de $0,420e^{-3}$ m.

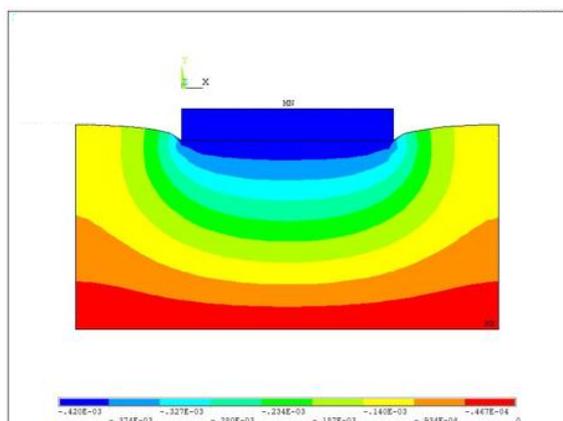


Figura 14 – Deslocamentos da placa e um solo assumido flexível ($E=16e^5$ Pa).

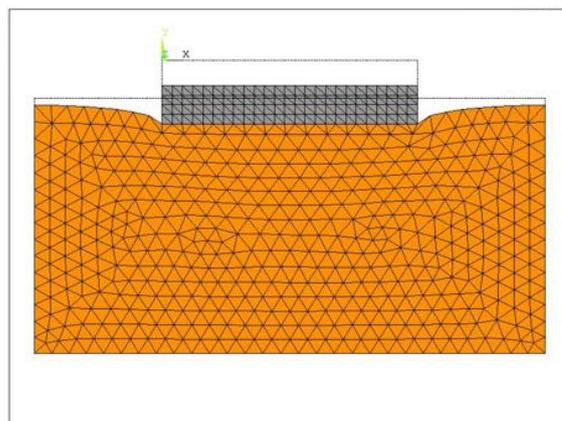


Figura 15 – Comportamento de deslocamentos da malha para um solo flexível ($E=16e^5$ Pa)

Uma vez que foram avaliadas as simulações do concreto convencional, assim foi possível analisar se o concreto poroso se comportará de forma diferente, quando colocado em situações semelhantes, ou seja, incluído o efeito da porosidade com os mesmos parâmetros do concreto comum para se obter os resultados.

4.2. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS COM EFEITO DA POROSIDADE

Sabendo que o concreto poroso (CP) possui uma quantidade de vazios em sua estrutura o presente caso tem o intuito de avaliar se como o padrão de vazios é gerado de forma arbitrária, algumas partes da placa podem ficar mais suscetível a deslocamentos e as fissuras. Para que uma placa seja considerada porosa, deve ter entre 15% e 35 % de seu volume vazios, segundo a regulamentação do *American Concrete Institute* (ACI 522, 2010). Após modelar as áreas e os vazios ilustrados da Figura 16, obtemos um modelo aplicável de uma placa poroso para avaliação numérica, realizada no ANSYS. Assim, foi seguido os mesmos padrões do concreto convencional, em que foram aplicadas as mesmas condições de contorno nas malhas da estrutura e do solo, bem como o carregamento. A Figura 16 e 17 apresenta o problema.

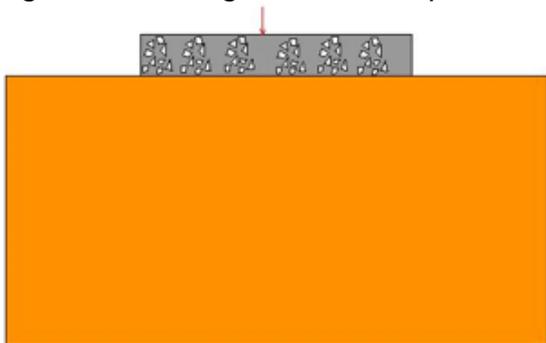


Figura 16 – Modelamento / áreas com poros.

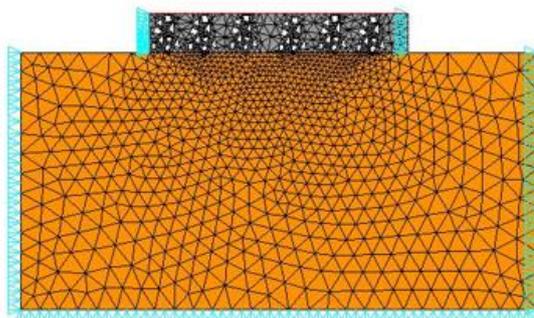


Figura 17 – Malha refinada do concreto com poros.

Ao se refinar a malhar nos elementos triangulares (Figura 17) se observa que não há uma uniformidade nos tamanhos e posição dos elementos, pois a malha aplicada foi trabalhada para que se coincida os nós nos pontos que ligam os elementos e ao mesmo tempo consiga contornar os limites dos vazios.

Definindo inicialmente o módulo de elasticidade para situação rígida ($E=16e^{20}$ Pa) os resultados, representado na Figuras 18 e 19, se observa que deslocamento gerado não são uniformes, isso se dá devido à quantidade de vazios na placa, indicando que os valores são alterados pelos vazios modelados. O solo, assim como no concreto convencional sem poros e solo rígido, não sofre nenhum deslocamento com a aplicação da pressão, o que já se era esperado. A placa de concreto poroso sofreu um deslocamento máximo de $-0,222e^{-4}$ m, ou seja, bem maior do que na situação da placa sem poros.

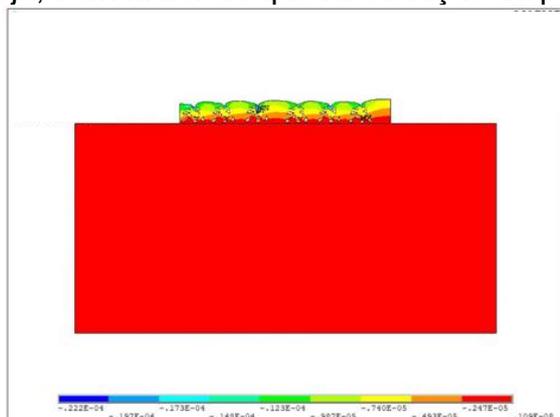


Figura 18 – Deslocamentos da placa com poros em um solo assumido rígido ($E=16e^{20}$ Pa).

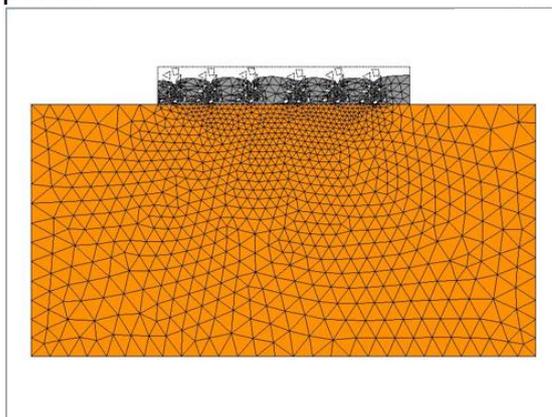


Figura 19 – Comportamento de deslocamentos da malha da placa para um solo rígido ($E=16e^{20}$ Pa).

Feito isso foi flexibilizado mais o solo, para acompanhar os deslocamentos da estrutura, se aplicando um módulo de elasticidade de $E=16e^9$ Pa (solo com flexibilidade intermediária), com as mesmas condições de contorno e pressão na linha superior, ao se extrair as modelagens ilustradas nas Figuras 20 e 21. Os deslocamentos obtidos pela aplicação da carga sobre a placa de concreto foram diferentes, onde o deslocamento ocorreu de forma mais obtusa nas áreas onde há mais vazios gerados logo menor resistência. O deslocamento máximo gerado pela pressão aplicada foi de $-0,698e^{-4}$ m.

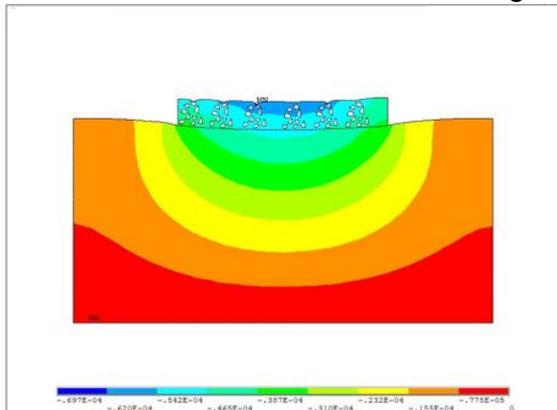


Figura 20 – Deslocamentos na placa e em um solo assumido com flexibilidade intermediária ($E=16e^9$ Pa).

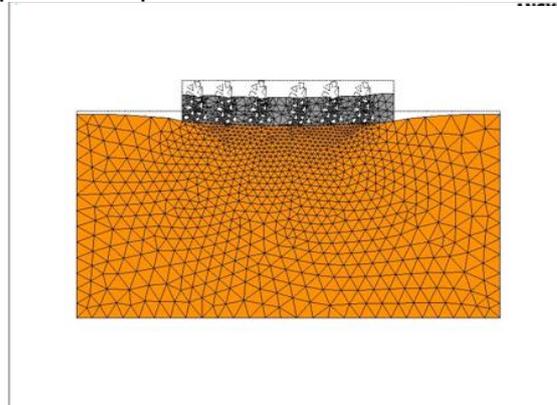


Figura 21 – Comportamento de deslocamentos da malha para um solo com flexibilidade intermediária ($E=16e^9$ Pa).

Após a análise do efeito citado, considerando uma maior flexibilização do solo com o módulo de elasticidade em $E=16e^5$ Pa, assim obtivemos os resultados da modelagem ilustrados nas Figuras 22 e 23, solução nodal do deslocamento e da malha, respectivamente.

Dessa forma se observou que o comportamento obtido foi semelhante ao concreto convencional, ou seja, a placa mesmo com poros acompanhou o deslocamento do solo sendo rebaixada. Assim, os vazios gerados pela modelagem do concreto poroso não influenciaram significativamente na deformação da placa através pressão aplicada. Então pode-se afirmar que o efeito da porosidade no concreto poroso é mais significativo quando este está apoiado sob uma base rígida. O deslocamento máximo foi de $-0,421$ m que ocorreu com a placa acompanhando a deformação do solo, devido à alta flexibilidade do mesmo, mostrando que com uma base flexível a placa de concreto não sofrerá tanto o impacto de pressões se comparado a base rígida.

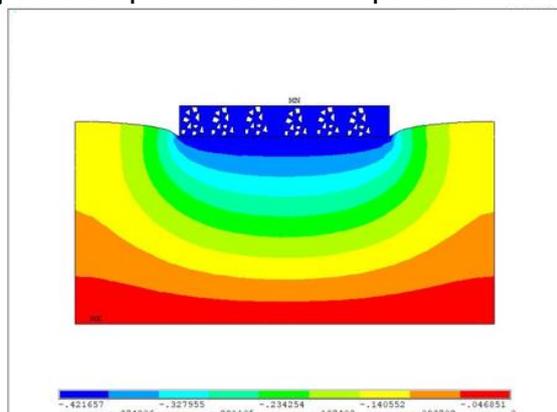


Figura 22 – Deslocamentos na placa e em um solo assumido como flexível ($E=16e^5$ Pa).

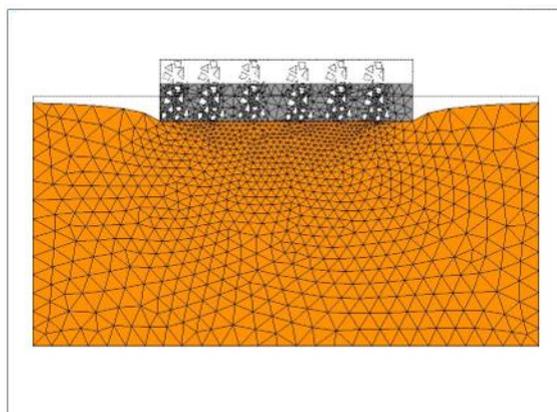


Figura 23 – Comportamento de deslocamentos da malha para um solo flexível ($E=16e^5$ Pa).

Os resultados de deslocamentos obtidos para ambos os ensaios foram resumidamente colocados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Deslocamentos Máximos (m)

| Elasticidade Do Solo | Deslocamentos (m) | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| | Concreto Convencional | Concreto Poroso |
| Solo Rígido $E=16e^{20}$ Pa | $-0,720e^{-8}$ | $-0,222e^{-4}$ |
| Solo Intermediário $E=16e^9$ Pa | $-0,552e^{-7}$ | $-0,698e^{-4}$ |
| Solo Flexível $E=16e^5$ Pa | $-0,420e^{-3}$ | $-0,421e^{-3}$ |

Os resultados obtidos através da modelagem das simulações de cargas, engastes, flexibilização, refinamento de malha, propriedades dos materiais e representação dos elementos foram satisfatórios, através deles analisamos deslocamentos em que as placas e solos sofreram mediante as condições pré-definidas.

Os resultados de deslocamentos oferecidos pelo *software* exibem o que realmente ocorre na prática, pois quanto menor é o Módulo de Young, outro nome dado para o coeficiente de elasticidade, menor será a rigidez, assim ocorrem maiores deslocamentos. Vale citar que programa é exagerado em suas ilustrações, como visto nas Figuras 11 a 23. Este excesso demonstrado pelo ANSYS é proposital, pois geralmente há resultados que estão em casas de centímetros, micro, nano, ou até mais, e para o ser humano perceber estes resultados tão pequenos (como ocorreu neste trabalho) a olho nú é muito difícil.

A modelagem feita para o concreto poroso apesar de ser simplificada, se mostrou bem eficiente, pois mostrou como a aplicação de carregamento causa a deformação onde há a maior porcentagem de poros, e percebe-se através dos resultados de deslocamento nos resultados.

4.3. MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DAS TENSÕES

Foram analisadas neste item, através do modelo computacional aplicado com os mesmos parâmetros determinados anteriormente na análise dos deslocamentos, a obtenção dos efeitos das tensões. Nesta análise temos somente a tensão final demarcada nas imagens, durante o processo existem vários pontos em que o solo e o concreto variam suas concentrações de tensões durante a aplicação da carga.

Nas Figuras 24 e 25 estão representadas, a malha dos elementos nos modelos de concreto convencional (sem vazios) e concreto poroso (com vazios), com o solo rígido e flexível. Por questões de complexidade, esta análise foi realizada apenas com dois vazios triangulares (Figura 25), com intuito de demonstrar as concentrações de tensões nessas regiões, uma vez que modelar uma placa com excesso de porosidade traz uma distribuição complexa nas tensões. Assim, para a análise houve à necessidade de um refinamento maior nos elementos de três nós em torno dos dois vazios, a fim de se obter um número maior de elementos e em menor área possível em torno do furo, pois assim a solução passa a ser mais aproximada.

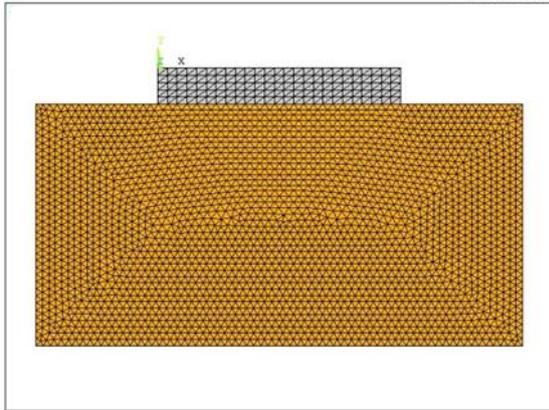


Figura 24 – Modelo de concreto convencional e solo.

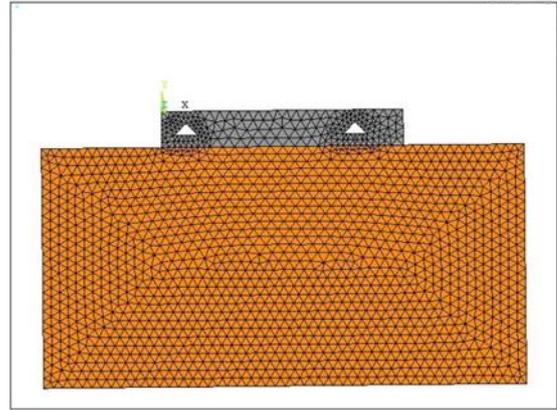


Figura 25 – Modelo de concreto vazado e solo.

4.4. ANÁLISE DAS TENSÕES NO CONCRETO CONVENCIONAL

Comparando as tensões entre solo rígido e solo flexível com modelo de concreto convencional (sem vazios), as Figuras 26 e 27 mostra o comportamento da estrutura após a aplicação completa da carga representada pelo mapa de calor, em que o resultado da concentração de tensão máxima na placa tanto para solo rígido quanto para solo flexível são constantes no interior da estrutura. Outro aspecto a ser analisado é que as tensões do solo são absorvidas na forma de bulbos de tensões.

Com auxílio e requisição da ferramenta de análise do sistema ANSYS, é possível enxergar as concentrações de tensão, avaliado após aplicação da carga. Foram retiradas as imagens em mapa de calor e um corte feito na placa (1/3 da espessura) para a análise. Para a Figura 26, com solo rígido, é possível ver que devido o deslocamento do concreto e imobilidade do solo (solo rígido), a concentração de tensão reage ao longo do sistema, sendo progredida a maior concentração de tensão na placa acontecendo no concreto com valor máximo de -1000 Pa (Figura 27).

Na Figura 28, no modelo com solo flexibilizado, podemos visualizar a dissipação da carga recebida pelo concreto através solo devido a sua flexibilização. Logo, tem-se a maior concentração de tensão nas bordas da placa, com valor de aproximadamente -1687,52 Pa (Figura 29). Pode-se notar que ocorre um alívio de tensão na região central da placa, com valor obtido de -898,53 Pa (Figura 29).

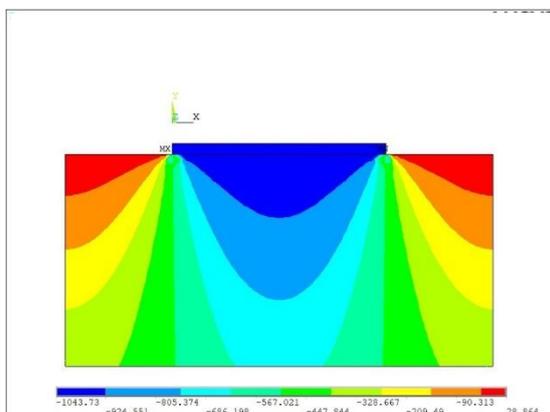


Figura 26 – (Concreto convencional) Tensão em um solo rígido $E= 16e^{20}$ Pa.

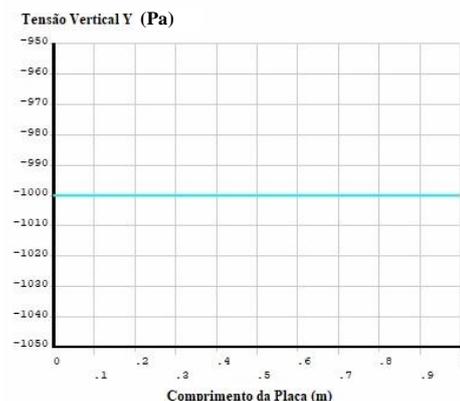


Figura 27 – (Concreto convencional) Tensão em um solo rígido de $E= 16e^{20}$ Pa.

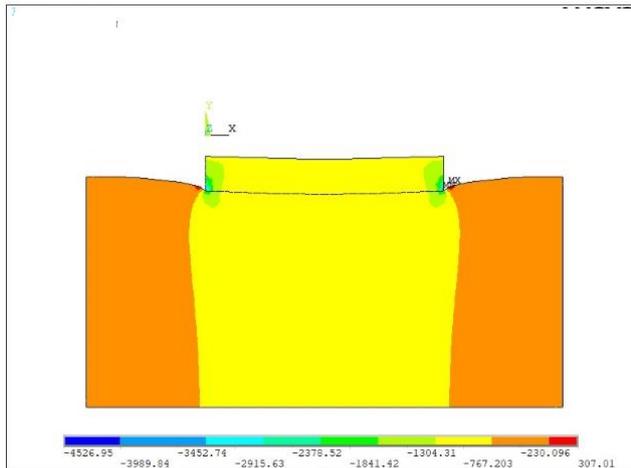


Figura 28 – (Concreto convencional) Tensão em um solo de $E= 16e^9$ Pa.

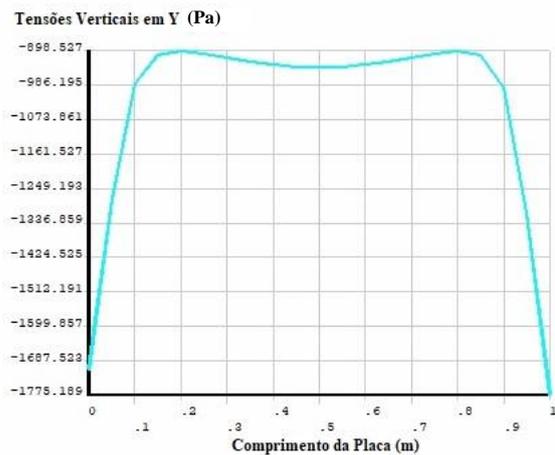


Figura 29 – (Concreto convencional) Tensão em um solo de $E= 16e^9$ Pa.

4.5. ANÁLISE DE TENSÕES COM EFEITO DA POROSIDADE

Comparando as tensões entre solo rígido e solo flexível no modelo de concreto poroso (com vazios), na Figura 30, com solo rígido, é possível visualizar os poros (vazios) com o excesso de deformação, conseqüentemente, excesso de tensões causadas na estrutura com aplicação da carga. Nesta posição, o concreto apresenta grandes deslocamentos devido à alta concentração de tensão no local, com concentrações máximas de tensão aproximadamente de tração 31,26 Pa e de compressão -2134,31 Pa (Figura 31). Na região central sem o furo as tensões ficam próximas do modelo sem poros, ou seja, com valores de -1000 Pa, demonstrando que os poros e superfícies irregulares tendem a ter um aumento de tensões. Ao redor do furo a distribuição é complexa, então foi extraída as máximas tensões apresentadas.

No momento em que a aplicação da carga acontece foi possível observar na visualização “animação” do ANSYS, um deslocamento gradual onde as áreas mais frágeis (vazios) do modelo vão sofrendo os maiores deslocamentos bem como concentrações de tensão nessas regiões. A fragilidade é causada pela ausência de concreto no local dos poros para reagir à carga aplicada, como o solo está rígido eleva as altas concentrações de tensão na não linearidade do concreto poroso (vazios).

Na Figura 32, com a flexibilização do solo, os vazios sofrem diferentes tensões pelo fato de acomodação da estrutura, com valores máximos apenas de compressão de -2363,59 Pa. As tensões na região central da placa (fora da região dos poros) não apresentaram grandes alterações, com valores de -957 Pa (Figura 33). Assim, as tensões apresentam uma concentração que oscila próxima ao furo e tem distribuição complexa.

Por fim, pode-se afirmar que a distribuição de tensões em estruturas com vazios e sob solos rígidos ou flexíveis é complexa e devem ser analisadas minuciosamente. Um fator importante é que o presente estudo, mesmo de carácter mais superficial sobre os efeitos, trouxe uma visão global do comportamento dessas estruturas com comparativo das tensões nas mesmas regiões.

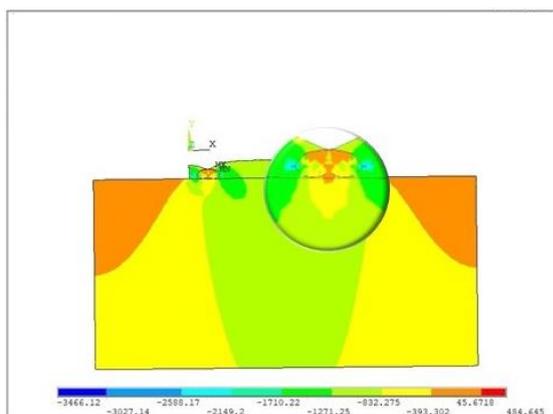


Figura 30 – (Concreto poroso) Tensão em um solo Rígido de $E= 16e^{20}$ Pa.

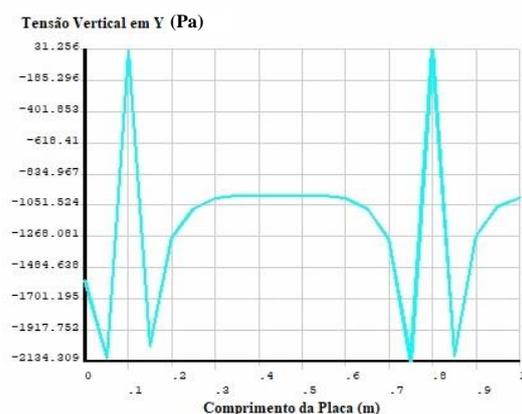


Figura 31 – (Concreto poroso) Tensão em um solo Rígido de $E= 16e^{20}$ Pa.

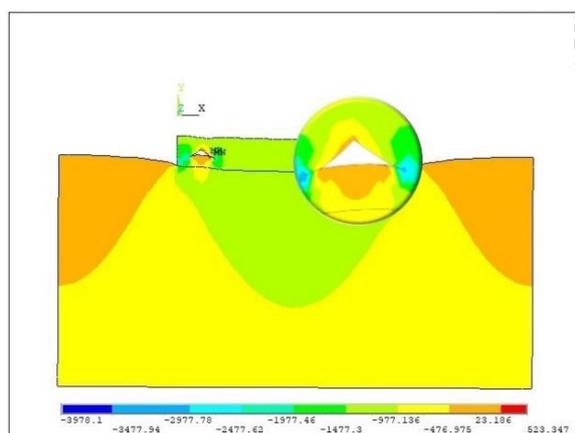


Figura 32 – (Concreto poroso) Tensão em um solo de $E= 16e^9$ Pa.

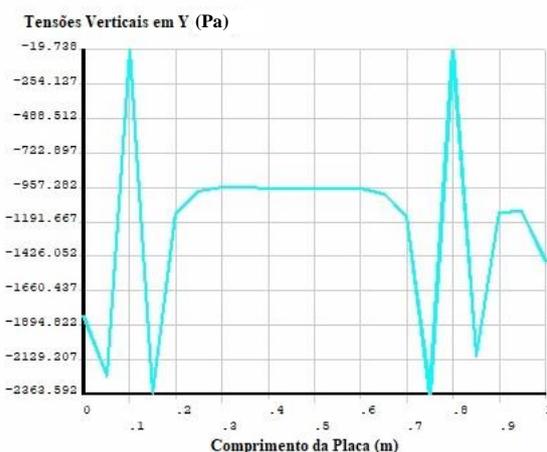


Figura 33 – (Concreto poroso) Tensão em um solo de $E= 16e^9$ Pa.

5. CONCLUSÃO

A modelagem computacional feita através do ANSYS apresentou resultados que poderão demonstrar a influência da porosidade do sistema placa/piso e solo em pisos permeáveis.

Com desenvolvimento do material apresentado pode se chegar em resultados que se aplicados antes de realizar o desenvolvimento em campo, poderá dar uma visão ao projetista e mostrar diferentes condições para continuidade do projeto.

No que se contempla ao piso permeável, conclui-se que uma placa de concreto poroso, onde não se há controle dos vazios que serão gerados nela através da dosagem na fabricação desse concreto, deve-se ter um cuidado em relação ao ambiente de instalação, ambiente esse que pode ocasionar grandes fadigas sobre essa placa que não terá uma vida útil grande devido menor resistência causada pelos vazios causando fissuras e trincas sobre a ele. A espessura de projeto e condições do solo vão influenciar diretamente nos impactos causados pelo uso e comportamento estrutural desse modelo em campo. As forças de pressão poderão ser absorvidas de maneira semelhantes aos de uma condição normal, mas o efeito da porosidade do material será determinante e necessita de estudos aprofundados.

No que tange ao meio ambiente, o concreto poroso vem a ser uma excelente alternativa, pois não é algo que é difícil de ser aplicar em diversas situações nas cidades.

A calçada/piso permeável traz grandes benefícios, onde o principal seria o reabastecimento de lençóis freáticos que estão abaixo de grandes centros urbanos, e vem a ser ótima solução para diminuir ou até mesmo eliminar enchentes nestes locais.

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se investigar os efeitos das tensões na região de furos, analisando situações mais simples (furos circulares) e progredindo a análise e identificando as tensões.

REFERÊNCIAS

ACI Committee 522. **Pervious Concrete, 522R-10**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2010.

AGRA, S. G. **Estudo Experimental de Microreservatórios para Controle do Escoamento Superficial**. Porto Alegre, UFRGS. 2001. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3282?locale=pt_BR>. Acesso em: 01 abr. 2021.

ANDOLFATO, Rodrigo P. **Controle Tecnológico Básico Do Concreto**. Ilha Solteira, 2002. Disponível em: <http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_7351contbo le_tecnolygi co_bysico_do_concbeto_pdf.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2021.

ARAÚJO, Paulo R.; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDENFUM, Joel A. **Avaliação Da Eficiência Dos Pavimentos Permeáveis Na Redução De Escoamento Superficial**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5 n.3, p. 21-29, Jul/Set 2000. Disponível em: Acesso em: 14 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSUMPÇÃO, I.C. e SANTANA, M. **Análise do Traço De Concreto Permeável Quanto a Sua Resistência à Compressão e Permeabilidade**. Faculdade Capixaba de Nova Venécia (UNIVEN), Espírito Santo. 2017. Disponível em: < <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/12/analise-do-traco-de-concreto-permeavel-quanto-a-sua-resistencia-a-compressao-e-permeabilidade.pdf> >. Acesso em: 17 mai. 2021.

BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo.; BARRAUD, Sylvie, **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

BASILEU, C. **Concreto Armado**. Faculdade Pitágoras, Belo Horizonte, 2012.

BETEZINI, Rafael. **Estudo Preliminar De Concretos Permeáveis Como Revestimento De Pavimentos Para Áreas De Veículos Leves**. São Paulo 2013. Disponível em: Acesso em: 25 abr. 2021.

BITTENCOURT, T. N.. **Estudo experimental do fraturamento do concreto estrutural por meio de corpos de prova cilíndricos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CANHOLI, Aluísio. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.

CORNELL FRACTURE GROUP. **Franc3D Menu & Dialog Reference**. Cornell University, Ithaca, 1998.

FERNANDES, C. A., et al.. Reforço de pilares de elevado do metrô de São Paulo, **41º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 1999.

FRANÇA JÚNIOR, D. O. **Modelagem Analítica-Numérica-Experimental de Problemas de Interação Solo-Fluido-Estrutura em Barragens sob Ação de Sismo**. 2019. 52 f. Seminário (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

FRANÇA JÚNIOR, D. O. **Notas de Aula da Disciplina de Método dos Elementos Finitos**. Universidade UNA de Catalão, Catalão, 2020.

GHAFOORI, N. Development of No-Fines. **Concrete Pavement Applications. Journal of Transportation Engineering**, v.126, n.3, p. 283 – 288, May/June 1995. Disponível em: Acesso em: 20 nov. 2013. HAIR, J. F. et al. Análise Multivariada de Dados. Porto Alegre: ArtMed Editora S.A., 2005.

HÖLTZ, Fabiano C. **Uso De Concreto Permeável Na Drenagem Urbana: Análise De Viabilidade Técnica E De Impacto Ambiental**. 2011.118 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. Disponível em: Acesso em: 28 mai. 2021.

KRISLEI, Pereira K. **Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de campinas**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, São Paulo, 2015. Disponível em:< http://www.puccampinas.edu.br/websist/Rep/Sic08/Resumo/2015818_144_134_374889159_resoni.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2021.

MARCHIONI, Mariana S.; SILVA, Cláudio. **O Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas**. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2011/06/Cartilha_Pavimento_Intertravado_Permeavel_v1.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2021.

MAZZONETTO, Caroline. **Concreto Permeável**. Revista Infraestrutura Urbana. ed. 11, fev. 2012. Disponível em:< <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoestecnicas/13/artigo254488-1.aspx>>. Acesso em: 09 mai. 2021.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. N.P. Hasparyk. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

POLASTRE, B. e SANTOS, L.D. **Concreto Permeável – Impermeabilização Do Solo E Drenagem Urbana**. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. 2006. Disponível em: < <http://www.usp.br> >. Acesso em: 11 mai. 2021.

RIBEIRO, Enio J. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto**. Goiânia, 2015 Disponível em: < <http://www.ipog.edu.br/home>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

ROSA, E da. **Análise de Resistência Mecânica – Mecânica da Fratura e Fadiga**. Edison da Rosa – UFSC, 2002.

ROSA, Giovanna Aparecida Alves. **Interação dinâmica fluido-barragem-solo em vibrações livres e forçadas através do método dos elementos finitos**. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão, 2019.

SHAH, S.P.; SWARTZ, S.E.; OUYANG, C.. **Fracture mechanics of concrete** -applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials, New York, John Wiley & Sons, 1995.

SIMÃO, David Willians da Glória. **Análise e dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas na alma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pernambuco, Caruaru, 2014.

SOUZA, Remo Magalhães de Souza. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. 2003. 80 f. Notas de Aula (Departamento de Engenharia Civil) – Universidade Federal do PARÁ, Belém, 2019.

VIRGILIIS, Afonso L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009.213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

Referências de sites

Agência Nacional de Infraestrutura e Tráfego (ANDIT). <https://slideplayer.com.br/slide/7292711/>
<Acesso em: 25/07/2021>

Introdução às não-linearidades em edifícios em concreto armado. **TQS Informática Ltda**. (2017). Disponível em: < <https://pt.scribd.com/document/357460454/Fase-VII-Nao-Linearidade>>. Acesso em: 17 mai. 2021.