



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TALES RENAN ZACARIAS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CONCRETO COM BRITA CALCÁRIA E
GRANÍTICA**

MOSSORÓ

2020

TALES RENAN ZACARIAS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CONCRETO COM BRITA CALCÁRIA E
GRANÍTICA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Rosendo Sobrinho, Prof. Msc.

MOSSORÓ

2020

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

ZO48a Zacarias de Oliveira, Tales Renan.
ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CONCRETO COM
BRITA CALCÁRIA E GRANÍTICA / Tales Renan Zacarias
de Oliveira. - 2020.
47 f. : il.

Orientador: Francisco Rosendo Sobrinho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2020.

1. FEMAP. 2. Concreto. 3. Elementos Finitos.
4. Tração por compressão diametral. I. Sobrinho,
Francisco Rosendo, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

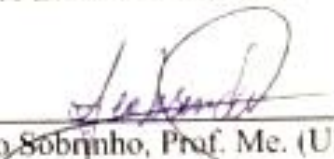
TALES RENAN ZACARIAS DE OLIVIERA

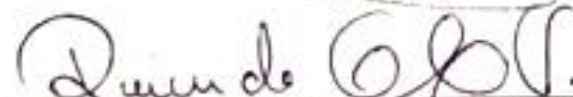
**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM CONCRETO COM BRITA CALCÁRIA E
GRANÍTICA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 07/02/2020.

BANCA EXAMINADORA


Francisco Rosendo Sobrinho, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente


Raimundo Gomes de Amorim Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Felipe Augusto Dantas Oliveira, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Renan e Albaniza, por todo apoio e por fazer com que tudo isso fosse possível

Agradeço a minha namorada, Maryane, por dar todo apoio necessário e por me acompanhar durante essa jornada.

Agradeço a Orientador, Francisco Rosendo Sobrinho, por me guiar em toda essa árdua jornada, sendo sempre presente tanto como orientador, como professor, que fez com que fosse possível a realização deste trabalho.

Agradeço a Banca Examinadora, professores Raimundo e Felipe, por disponibilizar seu tempo para prestigiar e avaliar o meu trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos que fizeram parte desta jornada.

RESUMO

Devido a abundância de rochas calcárias na região Nordeste, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará, se torna atrativo o estudo da utilização desta brita como agregado graúdo no concreto estrutural, para isso, faz-se necessário a análise dos traços com brita calcária e aditivo plastificante, para tentar obter uma resistência próxima ou equivalente ao concreto com brita granítica. Para encontrar a resistência a tração do concreto, utiliza-se de 3 ensaios principais, são esses os ensaios de tração axial, de tração por flexão, e de tração por compressão diametral. O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido mundialmente como ensaio brasileiro de tração, por ter sido criado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro, onde conseguimos de forma indireta, encontrar a resistência a tração do concreto, através de uma relação com sua compressão diametral. Utilizando de estudos por métodos numéricos se faz possível modelar numericamente ensaios destrutíveis do concreto. Esse trabalho teve como objetivo analisar o comportamento à tração do concreto com brita calcária e granítica por meio de ensaio experimental e simulação numérica. Foi realizado os ensaios experimentais seguindo as normas vigentes, em seguida utilizou-se o *software* computacional FEMAP® (Finit Element Modeling And Postprocesing) em que foram realizadas simulações do mesmo ensaio experimental e adquiriu-se os dados comportamentais do concreto. Com os dados adquiridos no ensaio experimental e da simulação computacional pelo FEMAP®, realizou-se a comparação com a formulação analítica do problema de tração por compressão diametral e constatou-se erros relativamente pequenos nas solicitações obtidas, apresentando uma opção efetiva na realização de ensaios. Por fim, foram obtidos os parâmetros de resistência a tração para o concreto com brita calcária com aditivo superplastificante e com brita granítica, constatando que há uma boa resistência a tração quando se utiliza aditivos, mas que não atinge a resistência do concreto que utiliza a brita granítica como agregado.

Palavras-chave: FEMAP. Concreto. Elementos finitos. Tração por compressão diametral.

ABSTRACT

Due to the abundance of limestone rocks in the Northeast region, mainly in the states of Rio Grande do Norte and Ceará, it is attractive to study the use of this gravel as a coarse aggregate in structural concrete, for this, it is necessary to analyze the strokes with limestone gravel and plasticizer additive, to try to obtain a resistance close to or equivalent to the concrete with granite gravel. To find the tensile strength of concrete, three main tests are used, these are the tests of axial tensile, flexural tensile, and diametrical compression tensile. The diametrical compression tensile test is known worldwide as the Brazilian tensile test, as it was created by Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro, where we were able to indirectly find the tensile strength of concrete, through a relationship with its diametrical compression. Using studies by numerical methods, it is possible to numerically model destructible concrete tests. This work aimed to analyze the tensile behavior of concrete with limestone and granite gravel by means of experimental tests and numerical simulation. The experimental tests were carried out according to the current standards, then the computer software FEMAP® (Finit Element Modeling And Postprocesing) was used, in which simulations of the same experimental test were carried out and the concrete behavioral data was acquired. With the data acquired in the experimental and computer simulation tests by FEMAP®, a comparison was made with the analytical formulation of the traction problem by diametrical compression and relatively small errors were found in the requests obtained, presenting an effective option in carrying out tests. . Finally, the tensile strength parameters were obtained for concrete with limestone gravel with superplasticizer additive and granite gravel, confirming that there is a good tensile strength when using additives, but that it does not reach the strength of the concrete that uses the gravel granite as aggregate.

Keywords: FEMAP. Concrete. Finite elements. Diametrical compression traction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Idealização do deslocamento da igreja.....	13
Figura 2: Igreja São Pedro dos Clérigos	14
Figura 3: Ensaio de tração por compressão diametral.....	15
Figura 4: Brazilian Test - Ensaio de compressão diametral de um rolo de concreto, realizado pela Divisão de Materiais de Construção, década de 1940	16
Figura 5: Representação do carregamento linear.....	16
Figura 6 - Ensaio de tração por flexão em modelo numérico	19
Figura 7 - Ensaio de tração na flexão	19
Figura 8: Máquina de ensaio universal.....	26
Figura 9: Corpo de prova na máquina antes de iniciar o ensaio.....	28
Figura 10 - Plataforma FEMAP® versão 11.4.1	30
Figura 11: Elemento Quad8	31
Figura 12: Malha em 2D refinada	32
Figura 13: Malhas 1, 2 e 3, com 4149, 18930 e 63243 elementos, respectivamente.....	37
Figura 14: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 1 (4194 elementos)..	37
Figura 15: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 2 (18930 elementos)	38
Figura 16: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 2 (63243 elementos)	38
Figura 17: Comportamento CP1 (Brita calcária e aditivo superplastificante) e suas tensões em “x”	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Força x deformação CP's com brita granítica	34
Gráfico 2: Força x deformação CP's com brita calcária	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dosagem padrão	23
Tabela 2: Resistência	35
Tabela 3: Resistência, força e módulo de elasticidade para brita calcária.	36
Tabela 4: Tensões obtidas para as malhas 1, 2 e 3, no CP 10	39
Tabela 5: Tensões obtidas para malha 3 (63243 elementos) com brita calcária e aditivo	40
Tabela 6: Tensões e forças máximas para ambos agregados.....	41
Tabela 7: Média das tensões e forças	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO	13
3.1.1 Ensaio de tração por compressão diametral	13
3.1.2 Ensaio por tração direta.....	17
3.1.3 Ensaio de tração na flexão	18
3.2 MODELAGEM E MODELOS MATEMÁTICOS	20
3.2.1 Método dos elementos finitos	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 ENSAIO EXPERIMENTAL	23
4.2 MATERIAIS	24
4.3 MÉTODOS	25
4.3.1 Mistura do concreto	25
4.3.2 Propriedades plásticas do concreto	25
4.3.3 Preparo dos corpos de prova	26
4.3.4 Cura do concreto	26
4.3.5 Máquinas utilizadas	26
4.3.6 Andamento e montagem	27
4.3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – MODELAGEM NUMÉRICA.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – FEMAP® (Dados do FEMAP).....	36

5.4 Análise entre resistências entre os CP's com brita granítica sem aditivo e brita calcária com aditivo superplastificante	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Para encontrar a resistência a tração do concreto, utiliza-se de 3 ensaios principais, são esses os ensaios de tração axial, de tração por flexão, e de tração por compressão diametral. O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido mundialmente como ensaio brasileiro de tração, por ter sido criado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro, onde conseguimos de forma indireta, encontrar a resistência a tração do concreto, através de uma relação com sua compressão diametral.

Este ensaio consiste na aplicação de carregamento uniaxial de compressão, ocorrendo dessa forma um esforço de tração transversal, que é dissipada ao longo do diâmetro na direção vertical. Utilizando de estudos por métodos numéricos se faz possível modelar numericamente ensaios indestrutíveis do concreto no próprio ambiente de trabalho. O método mais utilizado é o Método dos Elementos Finitos (MEF), criando um objeto espacial onde se faz a análise deste objeto. Atualmente há uma grande dependência de ensaios experimentais para se obter os parâmetros de resistência, ensaios estes que exigem mais tempo e gastos.

A análise numérica pelo método dos elementos finitos se torna uma boa opção para otimização de tempo em relação a estes ensaios. Ensaos experimentais são de extrema importância e a modelagem não os torna desnecessários, mas consegue-se diminuir a quantidade de realizações destes ensaios, com modelagens que provam-se ser precisas como o experimental. O FEMAP (Finite Element Modeling and Postprocessing) se propõe a ser uma alternativa viável para este tipo de fim, utilizando do método dos elementos finitos e conseguindo simular precisamente o ensaio proposto.

O estudo da viabilidade do uso da brita calcária como agregado para o concreto se diz muito viável, seja pela disponibilidade e abundância do material no estado do Rio Grande do Norte e Ceará, como pelo seu baixo preço. Com isso, caso seja provada sua viabilidade, torna seu uso bastante viável para o estado do Rio Grande do Norte e Ceará.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor a viabilidade do uso de métodos numéricos para modelagem do ensaio de tração por compressão diametral em corpos de prova de concreto com brita calcária e granítica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Mostrar a viabilidade do uso da brita calcária em determinadas situações;
- (ii) Verificar a relação de resistências da brita calcária com a brita granítica;
- (iii) Realizar modelagens que provem a eficiência do uso de métodos numéricos para obtenção de resultados práticos mesmo com limitação de processamento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Em um ensaio de tração, uma amostra ou peça de teste é submetida a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até a ruptura. Geralmente, o teste é realizado em uma amostra de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Isso é fixado em uma máquina de teste universal que aplica forças crescentes em sua direção axial, medindo as deformações correspondentes. As tensões ou cargas são medidas na própria máquina e, geralmente, o teste ocorre até o material quebrar pois é um teste destrutivo

3.1.1 Ensaio de tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral é normatizado pela norma brasileira ABNT NBR 7222/2011: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova (CP) cilíndricos. Nela, toda a aparelhagem é descrita, assim como a produção e dimensão do corpo de prova e o procedimento de ensaio.

Este ensaio surgiu em 1943, durante a abertura da Avenida Presidente Vargas, no Rio de Janeiro/RJ. Uma igreja muito antiga, conhecida como igreja de São Pedro, com sua construção datada em 1732, situava-se no centro de onde seria a futura avenida, com isso, impedindo a construção da mesma. Assim, foi-se encontrado a solução, que foi deslocá-la para o lado (FIGURA 1), utilizando rolos de concreto de 60cm de diâmetro (BRASIL, 2002).

Figura 1 - Idealização do deslocamento da igreja



Fonte: Colin (2011).

Segundo Schwartzman (2001), a ideia de deslocar a igreja foi do próprio autor do ensaio, que disse: “Eu ainda estava no início da carreira quando surgiu a ideia de se deslocar a Igreja de São Pedro - uma igreja histórica (1732) (FIGURA 2), pequena, barroca e com planta elíptica — para o outro lado da avenida Presidente Vargas, de modo a evitar que ela fosse demolida. “. O projeto consistia em substituir a parte inferior das paredes da igreja por concreto. Sob o concreto, seriam colocados rolos que serviriam para deslocar a igreja até o outro lado da avenida.

Figura 2: Igreja São Pedro dos Clérigos



Fonte: Acervo da Biblioteca Nacional / Reprodução. (BRASIL, 2002).

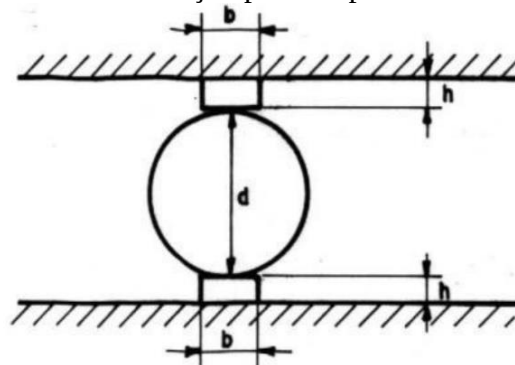
Algumas empresas já haviam obtido sucesso na Europa em transporte de construções sob rolos de aço, como a empresa “Franki”, mas no Brasil, surgiu a ideia de se fazer com rolos de concreto, os de aço eram calculados através da fórmula de hertz, o desafio foi em como calcular os de concreto, os rolos possuíam 60 cm, “O chefe do INT(Instituto Nacional de Tecnologia), Eng. Paulo Sá me designou para fazer o ensaio. Quando pus o rolo de concreto na máquina, ele quebrou de uma maneira inteiramente diferente dos de aço: por uma fissura vertical, abrindo-se em dois. Estudei isso teoricamente e me ocorreu propor um novo método para a determinação da resistência à tração dos concretos”, afirma Lobo (BRASIL, 2002).

Segundo Schwartzman (2001), a resistência a compressão era ensaiada em cilindros verticais com dimensões: 15 cm de diâmetro e 30cm de altura. Colocando os cilindros

orientados na horizontal, ou seja, deitados, entre os pratos da máquina, seria determinado a resistência a tração.

De acordo com Pinheiro (2007), para a determinação da resistência à tração do concreto, existem três ensaios: o da tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão. No entanto, o ensaio de tração por compressão diametral, ou ensaio brasileiro, é o mais utilizado. Para a sua execução, segundo a ABNT NBR 7222/2011, um corpo de prova cilíndrico é colocado com o seu eixo longitudinal de forma paralela aos pratos da prensa, sendo aplicada uma força ao elemento até que seja atingida a sua ruptura por tração indireta, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: ABNT NBR 7222 (2011).

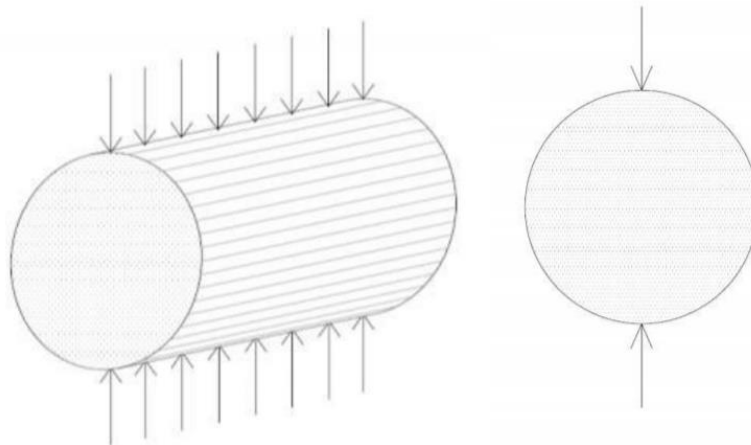
Segundo Conterato (2011), as tensões e consequentes deformações neste ensaio dependem das condições da interface entre o corpo de prova e os cabeçotes de aplicação da carga. Portanto, existe distinção nas soluções analíticas para este ensaio, que apresenta solução analítica a aplicação da carga linear, representado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4: Brazilian Test - Ensaio de compressão diametral de um rolo de concreto, realizado pela Divisão de Materiais de Construção, década de 1940



Fonte: Instituto Nacional de Tecnologia, BRASIL (2002).

Figura 5: Representação do carregamento linear



Fonte: Conterato (2011).

As tensões teóricas para esse caso foram apresentadas por Kennedy e Hudson (1968). O campo de tensão ao longo de todo o cilindro pode ser representado pelas Equações (1), (2) e (3)

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi} \cdot \left(\frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi} \cdot \left(\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi} \cdot \left(\frac{(R-y)^2x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2x}{r_2^4} \right) \quad (3)$$

Para as distribuições no plano horizontal do diâmetro (quando $y=0$), as tensões em x e y , são dadas pelas Equações (4) e (5), respectivamente.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi D t} \cdot \left(\frac{D^2 - 4x^2}{D^2 + 4x^2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi D t} \cdot \left(\frac{4D^2}{D^2 + 4x^2} - 1 \right) \quad (5)$$

Para as distribuições no plano vertical do diâmetro (quando $x=0$), as tensões x e y , são dadas pelas equações (6) e (7), respectivamente.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi D t} = \text{constante} \quad (6)$$

$$\sigma_y = - \frac{2P}{\pi t} \cdot \left(\frac{2}{D-2y} + \frac{2}{D+2y} - \frac{1}{D} \right) \quad (7)$$

Além disso, as tensões cisalhantes no plano, tanto em $y=0$, quanto em $x=0$, são nulas.

σ_x = tensão na direção x (horizontal);

σ_y = tensão na direção y (vertical);

x e y = cordenadas retangulares a partir do centro da seção do corpo de prova;

P = carga total aplicada;

D = diâmetro do corpo de prova;

t = espessura (altura) do corpo de prova.

De acordo com a ABNT NBR 7222/2011, a Equação (6) é utilizada para aquisição da posição da resistência à tração por compressão diametral e é expressa utilizando as seguintes nomenclaturas (equação 8):

$$f_{t,D} = \frac{2P}{\pi D L} = \frac{P}{\pi R L} \quad (8)$$

onde:

$f_{t,D}$ =resistência a tração por compressão diametral, expressa em Mpa, com aproximação de 0,05 Mpa;

P = carga máxima obtida no ensaio (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = altura do corpo de prova (mm);

R = raio do corpo de prova (mm).

3.1.2 Ensaio por tração direta

De acordo com Araújo (2001), de maneira análoga a resistência a compressão, a resistência a tração do concreto apresenta valores que variam bastante em torno de um valor médio. Assim, pode-se definir um valor médio f_{ctm} e um valor característico f_{ctk} , de forma semelhante ao que é feito na resistência a compressão.

Por definição, há dois valores característicos para a resistência a tração do concreto: Valor característico inferior $f_{ctk,min}$, corresponde ao quantil de 5%; Valor característico superior $f_{ctk,max}$, que corresponde ao quantil de 95%, podemos estimar esses valores característicos a partir das equações (9) e (10).

$$f_{ctk,min} = 0,95 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{2/3} \text{ Mpa} \quad (9)$$

$$f_{ctk,max} = 1,85 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{2/3}, \text{ Mpa} \quad (10)$$

Já para o valor médio da resistência podemos estimar através da equação (11):

$$f_{ctm} = 1,40 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{2/3}, \text{ Mpa} \quad (11)$$

Pode-se dizer que a resistência do concreto é diretamente relacionada ao tipo de ensaio utilizado, pois nos ensaios que são utilizados para a determinação da resistência, as tensões se distribuem de forma diferente em cada um desses ensaios.

Em virtude da dificuldade da execução do ensaio de tração direta, normalmente utilizamos o ensaio de tração por compressão diametral. De acordo com a CEB/90, a resistência média a tração axial f_{ctm} , pode ser estimada através da resistência obtida no ensaio de compressão diametral $f_{ct,sp}$, pela equação (12):

$$f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (12)$$

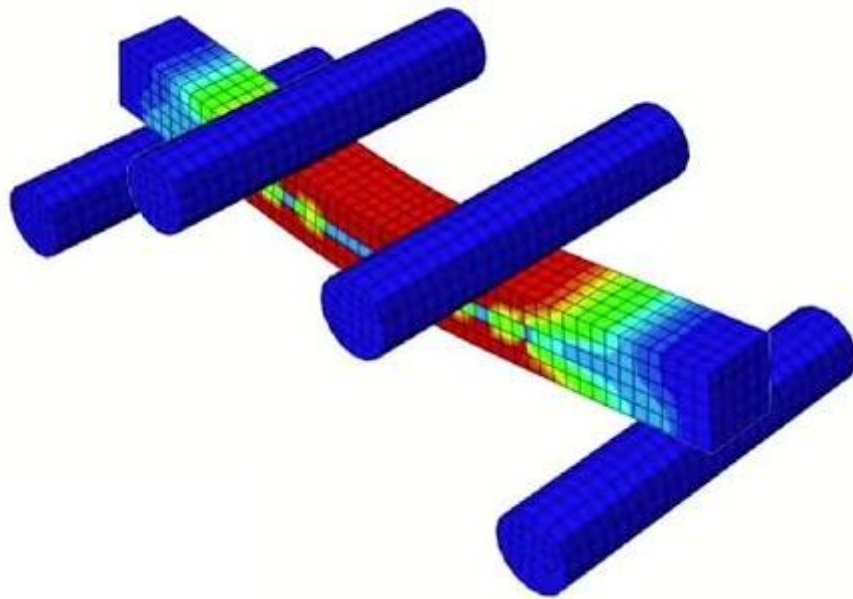
Considerando as equações (10) e (11), pode-se descrever a equação (13):

$$f_{ct,sp} = 1,56 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{2/3} \quad (13)$$

3.1.3 Ensaio de tração na flexão

Para a realização deste ensaio, um corpo de prova biapoado de seção prismática é submetido a flexão com carregamentos em duas seções simétricas, até sua ruptura, representados pelas Figuras 6 e 7. Os valores encontrados neste experimento são maiores do que os valores encontrados nos ensaios de tração direta e tração por compressão diametral (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

Figura 6 - Ensaio de tração por flexão em modelo numérico



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: ResearchGate (2019).

3.2 MODELAGEM E MODELOS MATEMÁTICOS

Para Zienkiewicz (2000), primeiramente, precisa-se entender o que é uma modelagem matemática, pois a solução dos problemas abordados neste trabalho envolve esse conceito, que tem por base porções elementares da álgebra linear. Com isso, se faz importante determinar o modelo na qual se deseja trabalhar.

A modelagem utilizada como guia para a determinação de um modelo é o método científico, que permite fazer associações do modelo físico com o modelo matemático em situações práticas e reais, ou seja, determinar um modelo matemático que não entre em contradições com a situação real ou que não desvie muito dos fenômenos envolvidos. (HARISH, 2019)

3.2.1 Método dos elementos finitos

Segundo Martínez (2013), a principal ideia do método dos elementos finitos tem como a divisão de um sistema contínuo em um conjunto de elementos de menor tamanho. Estes elementos ficam conectados entre si por uma série de pontos que chamamos “nós”. Isto é denominado discretização dos corpos.

Para Cook (1995), a equação que governa o sistema contínuo é a mesma que governa os demais elementos. Sendo assim, o que este método faz é passar de um sistema com infinitos graus de liberdade (contínuo) para um sistema já discretizado, que terá finitos graus, e poderá ser resolvido por um sistema de equações, sejam lineares ou não.

Segundo Sales (2019), métodos analíticos que permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões em uma dada estrutura existem apenas para alguns casos particulares. Assim, na necessidade de se desenvolver procedimentos aproximados que pudessem ser aplicados independentes da forma da estrutura e do tipo de carregamento, porém dentro da precisão aceitável para um problema de engenharia, surge o Método dos Elemento Finitos (MEF).

Tecnicamente, dependendo da perspectiva de alguém, pode-se dizer que o MEF teve sua origem no trabalho de Euler, já no século XVI. No entanto, os primeiros trabalhos matemáticos sobre MEF podem ser encontrados nos trabalhos de Schellback (1851) e Courant (1943).

O Método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para realizar a análise de elementos finitos (AEF) de um determinado fenômeno físico (HARISH, 2019)

Para Silva (2016), é necessário usar a matemática para compreender e quantificar de maneira abrangente quaisquer fenômenos físicos, como comportamento estrutural ou de fluidos, transporte térmico, propagação de ondas e crescimento de celular biológicas. A maioria desses processos são descritos por meio de equações diferenciais parciais (EDP).

No entanto, para um computador resolver essas EDPs, técnicas numéricas foram desenvolvidas nas últimas décadas e umas das mais importantes hoje é a técnica dos elementos finitos. Segundo Harish (2019), o método dos elementos finitos começou com a promessa significativa na modelagem de várias aplicações mecânicas relacionadas com a indústria aeroespacial e de engenharia civil. As aplicações do método dos elementos finitos somente agora estão começando a atingir seu potencial. Uma das perspectivas mais interessantes é sua aplicação em problemas acoplados, tais como a interação estrutura-fluido, termomecânicas, termoquímicas, biomecânicas, engenharia biomédica, eletromagnetismo, entre outras.

Existem muitos métodos alternativos propostos nas últimas décadas, mas sua aplicabilidade comercial ainda não foi comprovada. Para Azevedo, (2003), existem diferentes gêneros de EDPs e sua adequação ao uso com o MEF/FEM (Método dos elementos finitos/ Finit Element Method). Entender isso é particularmente importante para todos, independentemente da motivação para usar a análise de elementos finitos. É fundamental lembrar que o MEF/FEM é uma ferramenta e como todas as ferramentas sua eficiência depende do seu usuário.

De acordo com Silva (2016), as EDPs podem ser categorizados como elípticos, hiperbólicos e parabólicos. Ao resolver essas equações diferenciais, é necessário fornecer condições de contorno e/ ou iniciais. Com base no tipo de EDP, as entradas necessárias podem ser avaliadas. Exemplos de EDPs em cada categoria incluem a equação de Poisson (elíptica), equação de onda (hiperbólica) e lei de Fourier (parabólica).

Para Saad (2005), uma das primeiras etapas do MEF é identificar a EDP associada ao fenômeno físico. A EDP é conhecida como forma forte e a integral é conhecida como forma fraca. Considerando a EDP simples, como mostrado nas equações 14 e 15, a equação é multiplicada pela função de teste $v(x)$ em ambos os lados e integrada ao domínio $[0,1]$

$$u''(x) = f(x) \quad (14)$$

$$\int u''(x) v(x) = \int f(x) v(x) \quad (15)$$

Agora, usando integração por partes, pode-se reduzir a equação 16 a:

$$u'(x) v(x) \Big|_0^1 - \int u'(x) v'(x) = \int f(x) v(x) \quad (16)$$

Como visto anteriormente, a ordem de continuidade necessária para a função desconhecida $u(x)$ é reduzida em um. A equação diferencial anterior exigia que $u(x)$ fosse diferenciável pelo menos duas vezes, enquanto a equação integral exige que ela fosse diferenciável pelo menos uma vez. O mesmo vale para funções multidimensionais, mas as derivadas são substituídas por gradientes e divergências.

Sem aprofundar na matemática, o teorema de representação de Riesz pode provar que existe uma solução única para $u(x)$ para forma integral e, portanto, a diferencial. Além disso, se $f(x)$ for contínuo, também garante que $u(x)$ seja contínuo (GUIRADO, 1979).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é dividido em duas etapas, sendo que a primeira uma pesquisa experimental constituída por ensaios práticos de tração por compressão diametral, e uma segunda parte sendo análise numérica composta por uma modelagem destes ensaios. Para o ensaio prático, utilizar-se-á dois traços diferentes: o primeiro com brita granítica e o segundo com brita calcária. Com isso, obtendo resultados práticos destes experimentos, será possível compará-los quanto a eficiência do uso da brita calcária em relação a brita granítica.

Tendo os resultados práticos e teóricos, através do ensaio de tração por compressão diametral e da modelagem com o auxílio do FEMAP[®] respectivamente, pode-se ter uma relação do real com o teórico, e também encontrar a quantidade de elementos ideais para aproximar a modelagem aos dados obtidos em laboratório.

4.1 ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental foi feito no laboratório de ensaios mecânicos, nas instalações da UFERSA. Foram preparados dois tipos de corpos de prova: o primeiro tipo composto por brita granítica e o segundo composto por brita calcária.

A escolha da brita calcária, para a moldagem de um dos tipos de corpo de prova, deu-se devido a abundância das rochas calcárias na região Nordeste, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará, tornando interessante o estudo da viabilidade do uso deste tipo de brita para o desenvolvimento de concreto estrutural.

Os traços, tanto com granítica como calcária, foi baseado no trabalho de Pinto (2019), apresentando na Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem padrão

Tipo de brita	Traço(cimento/areia/brita)	A/C	Aditivo
Calcária	1:1,5:1,5	0,44	1,20%
Granítica	1:1,5:1,5	0,43	0%

Fonte: Autoria própria (2020).

A metodologia desse trabalho teve também o objetivo de avaliar as características do concreto. Através dos traços mostrados na Tabela 1, foram confeccionados os corpos de prova (CP). Os traços são praticamente iguais, diferenciando somente que para o com brita calcária

como agregado graúdo utilizou-se 1,20% de aditivo superplastificante. O mesmo aditivo é dispensado para o traço com brita granítica.

Os corpos de prova, após a etapa da moldagem concluída, foram rompidos em um ensaio de tração por compressão diametral, o qual consegue relacionar a resistência a compressão diametral do corpo de prova com a resistência a tração do mesmo.

4.2 MATERIAIS

Os insumos utilizados para a realização do trabalho foram os seguintes:

- Cimento: cimento Portland CP III 40. Onde 40 corresponde à sua resistência em MPa aos 28 dias.

- Agregado miúdo: areia com dimensão máxima de 4,75 mm.

- Agregado graúdo: brita calcária com dimensão máxima de 19 mm;

- Agregado graúdo: brita granítica com dimensão máxima de 19 mm;

- Água: água coletada da rede de abastecimento de água potável fornecida pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN).

- Aditivo: o aditivo utilizado para a realização desse trabalho foi o aditivo plastificante – redutor de água para concreto – onde em sua ficha técnica consta as seguintes descrições:

Propriedades:

Grande redução na quantidade de água

- ❖ Longa manutenção do slump;
- ❖ Rápida dispersão no concreto ;
- ❖ Dosagens econômicas ;
- ❖ Boa compatibilidade com incorporadores de ar;
- ❖ Boa estabilização em altas consistências ;
- ❖ Bom funcionamento com uma grande variedade de cimentos.

Áreas de aplicação

- Ideal para concreto pré-moldado e dosagens na betoneira
- Concreto auto-adensável
- Concreto com alta resistência a agentes agressivos
- Concreto aparente
- Concreto de alto desempenho
- Concreto de alta fluidez
- Concreto usinado

Dados técnicos

Densidade: 1,08 g/cm³

Dosagem recomendada: 0,2 a 5% sobre o peso do cimento.

Características

Tipo do produto: Superplastificante

Estado: Líquido

Cor: Marrom

Armazenagem: Armazenar em local seco, coberto e arejado. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.

Validade: 12 meses a partir da data de fabricação

Embalagens: Tambor de 240 kg, container de 1000 kg, granel.

Descarte: Para preservação do meio ambiente, favor esvaziar completamente as embalagens.

Além da máquina de ensaio, foi utilizado um computador Desktop para modelagem numérica, este computador possui as seguintes características:

- Processador: AMD Ryzen™ 7 2700 CPU 4.1Ghz,
- Memória RAM:16GBytes,
- Armazenamento: HD de 2 teraBytes e um SSD de 240GB.
- Sistema operacional: Windows 10 PRO.

4.3 MÉTODOS**4.3.1 Mistura do concreto**

A mistura dos materiais foi baseada nas especificações da norma ABNT NBR 12655/2015 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

4.3.2 Propriedades plásticas do concreto

Após o preparo do concreto, foi realizado o teste de consistência do material. Nesse teste também chamado de *Slump test* foi seguido o procedimento de acordo com a norma ABNT 32 NBR NM 67/1998 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

4.3.3 Preparo dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova de cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, obtendo-se um volume de 0,00157 m³. Tais dimensões dos corpos de prova são prescritas na NBR 5738 (ABNT, 2015).

4.3.4 Cura do concreto

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em água e deixados por 28 dias, esse é o procedimento de cura, também prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

4.3.5 Máquinas utilizadas

Para a realização dos ensaios, utilizou-se a máquina de ensaio universal da marca EMIC, modelo DL10000, que pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8: Máquina de ensaio universal



Fonte: Autoria própria (2020).

A máquina possui as seguintes características:

- Capacidade: 10.000 kgf (100 kN);
- Tipo: bifuso de bancada, com duas colunas guias cilíndricas paralelas;
- Acionamento: fusos de esferas recirculantes;
- Faixa de velocidades: 0,01 a 500 mm/min;
- Medição de força: através de células de carga intercambiáveis;
- Classe de medição de força: classe 1 segundo a norma NM ISO7500-1 (Classe 0,5 sob consulta), fornecida com certificado de calibração RBC (Rede Brasileira de Calibração);
- Compatibilidade eletromagnética: máquina de linha certificada segundo Norma IEC 61000 contra interferência eletromagnética por membro da RBLE (Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios);
- Medição do deslocamento: sensor óptico (encoder), com resolução de 0,01 mm;
- Indicação de força e deslocamento: através de programa computacional (janela tipo display para acompanhamento dos valores em tempo real);
- Extensometria: dois canais; 34
- Saída de dados: digital através de porta serial RS232;
- Análise de dados e controle de ensaio: através de programa computacional;
- Console (teclado ou joystick): com funções básicas de movimentação para ajustes de acessórios;
- Curso útil: 1200 mm;
- Distância entre colunas: 400 mm;
- Altura: 1920 mm;
- Largura: 920 mm;
- Profundidade: 500 mm;
- Peso aproximado: 420 kgf;
- Alimentação: 220 V AC 50/60 Hz;
- Consumo máximo: 704 VA

4.3.6 Andamento e montagem

Foram moldados 5 corpos de prova para cada tipo de brita, totalizando 10 corpos de prova, com medidas de 10cm de diâmetro por 20cm de altura cada. Para os corpos que receberam brita calcária como agregado graúdo, utilizou-se de aditivo superplastificante, já nos

que receberam a brita granítica, não se utilizou de aditivos. Foram definidos alguns fatores para se manter constantes:

Cura: Após a moldagem do corpo de prova, os mesmos permaneceram nos seus moldes em cura natural durante 24h, após esse tempo iniciou-se a cura submersa em água.

Idade do concreto: estabeleceu-se a idade de 28 dias tanto para os corpos sem aditivos quanto para os com aditivos. Idades essas escolhidas de acordo com a literatura da ABNT NBR 5738/2015 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Após a realização do ensaio, realizou-se a modelagem numérica no software, para aquisição dos parâmetros de força máxima e deformações.

Para a realização do ensaio de tração por compressão diametral, foi utilizado dois pratos de compressão na máquina de ensaio EMIC DL 10000. Foi centralizado o corpo de prova na placa inferior, que permanece fixa desde seu encaixe. O prato superior é móvel e é posicionado antes da realização do ensaio, fazendo uma pré-carga. A figura 9 mostra o posicionamento do corpo de prova na máquina do ensaio, antes da sua realização.

Figura 9: Corpo de prova na máquina antes de iniciar o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2020)

Os parâmetros que foram utilizados no ensaio, foram baseados no tipo de material que é feito o corpo de prova e em suas dimensões. A velocidade do ensaio foi definida para que o material se rompesse entre 4 e 5 minutos.

Desta forma, na interface computacional do aparelho que foi realizado o ensaio, foram registradas as seguintes definições:

- ❖ Caracterização da área: particular para cada ensaio;

- ❖ Resultados obtidos no fim do ensaio: Força máxima;
- ❖ Velocidade do ensaio: 0,01mm/s;
- ❖ Limite de força: 100 kN (limite da máquina);
- ❖ Limite de deslocamento: 5mm;
- ❖ Quando parar o ensaio: Quando um dos limites acima for alcançado.

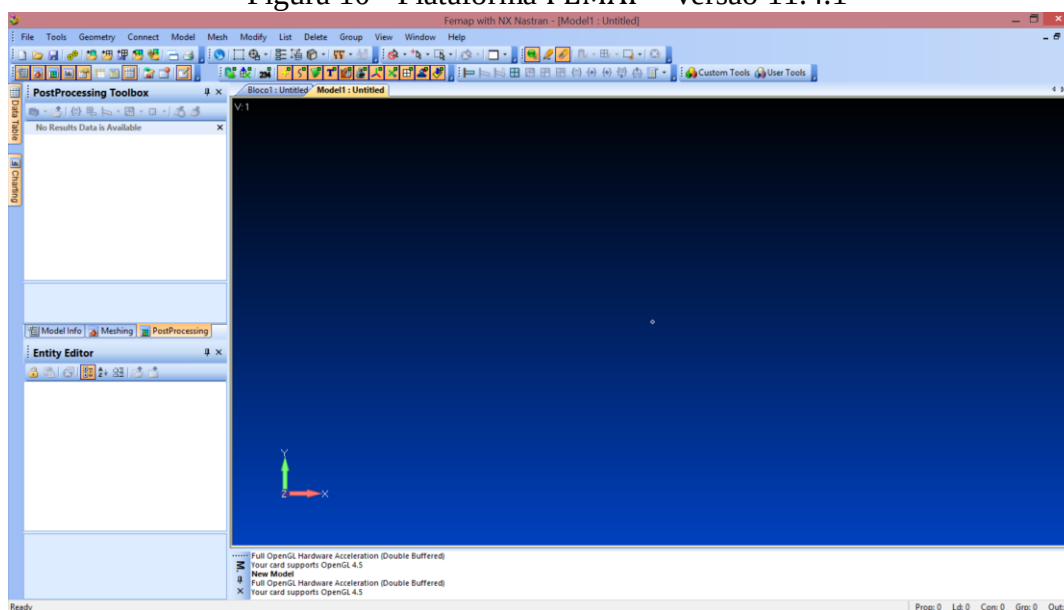
4.3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – MODELAGEM NUMÉRICA

FEMAP® - Finit Element Modeling And Postprocessing

O FEMAP® é como o pré e pós-processador, nativo do Windows e independente do CAD para análise avançada de elementos finitos de engenharia. Conta com recursos de visualização, manipulação da geometria, malha de elementos finitos e criação de modelos, suporte a *solver*, pós-processamento e análise de resultados, além de personalização (SIEMENS, 2019).

O uso deste software permite ao usuário fazer diversas análises, como simulação térmica, dinâmica de fluidos, e estrutural, sendo a estrutural a qual será a abordada neste trabalho. Na Figura 10 é mostrada a interface inicial do *software*.

Figura 10 - Plataforma FEMAP® versão 11.4.1



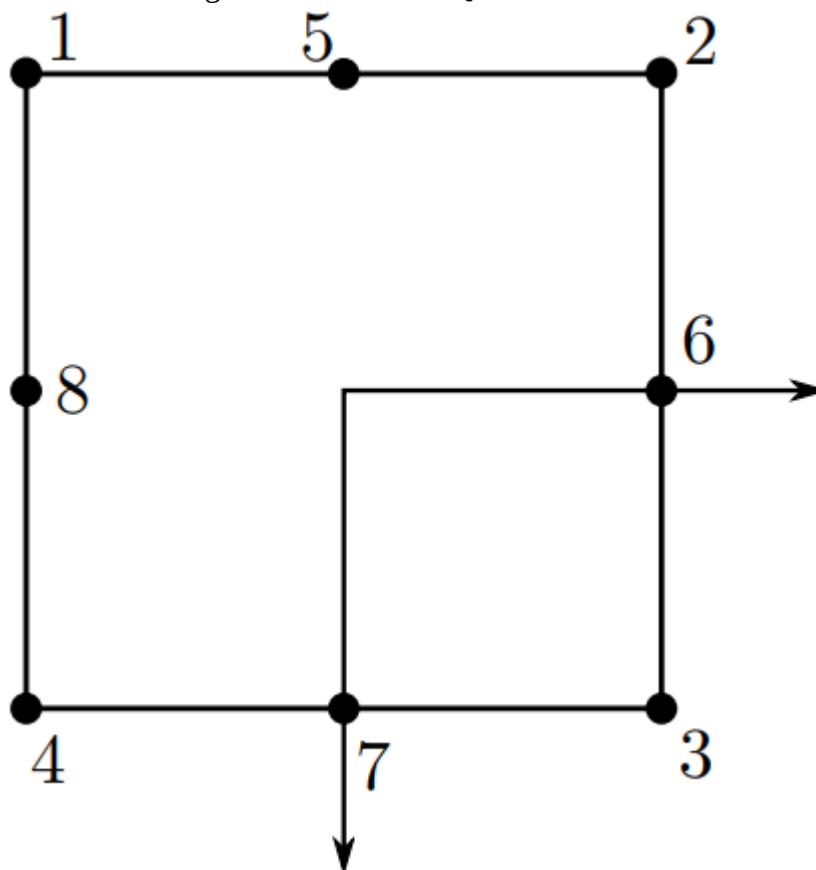
Fonte: Autoria própria (2020).

Com a posse dos resultados obtidos no ensaio experimental, fez-se possível a comparação de dados através deste software, utilizando o método dos elementos finitos como base matemática para execução dos cálculos.

Foi realizada a simulação de um ensaio de tração por compressão diametral para dois tipos de brita, sendo elas calcária e granítica respectivamente. Primeiro foi utilizado uma malha de elementos finitos discretizado com um elemento plano de tensão constante Quad8 (Figura 11), que consiste em um elemento linear com 8 nós e 2 graus de liberdade, para gerar um elemento em 2D. A simulação realizada foi baseada no experimento laboratorial explicado

anteriormente, sendo feita uma simulação das condições de contorno e carregamento em que o corpo de prova foi submetido durante o ensaio. Apesar do ensaio ser dinâmico, a simulação foi realizada de maneira estática, para isso foi aplicada a carga adquirida pela máquina EMIC no instante em que houve a captura de uma determinada imagem.

Figura 11: Elemento Quad8

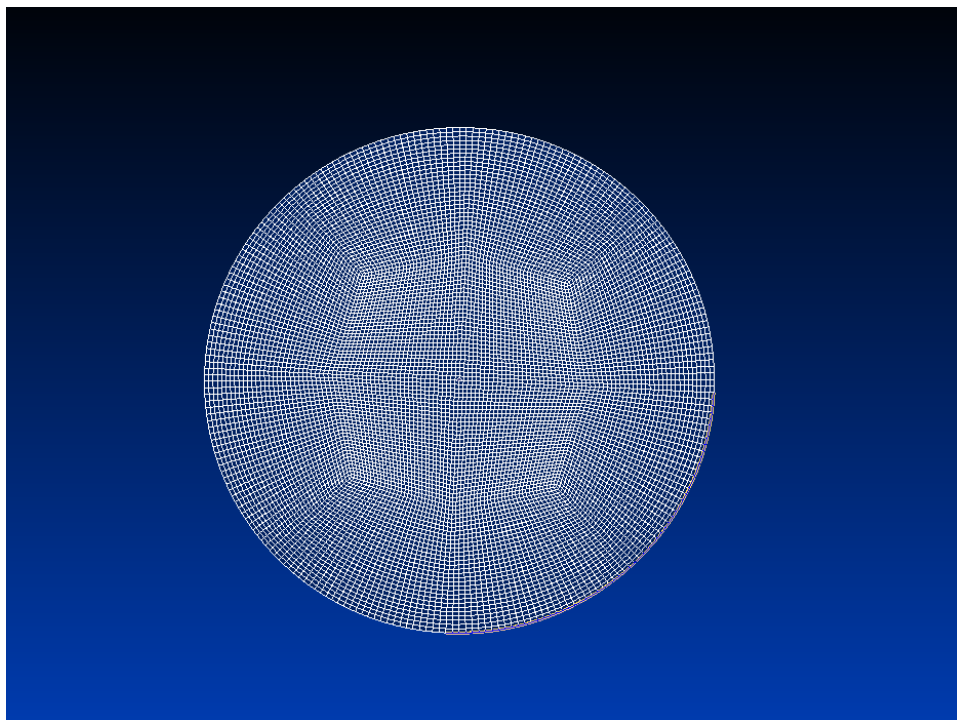


Fonte: Autoria própria (2020).

Para análise comparativa, foram utilizados os dados do ensaio citado anteriormente do CP 01 (com aditivo) no instante 327s, e do CP 10 (sem aditivo) no instante 391s. Os instantes citados foram escolhidos para que a carga obtida experimentalmente fosse aplicada no FEMAP® e fossem adquiridos dos esforços de tensão e deslocamentos através da análise por elementos finitos e, posteriormente, fossem feitas as comparações com os valores obtidos no ensaio experimental.

Para a modelagem em 2D, foi modelada com um elemento Quad8 com 2 graus de liberdade por nó, de superfície circular, que representa a seção do corpo de prova. A Figura 11 mostra o modelo do elemento para a malha mais refinada.

Figura 12: Malha em 2D refinada



Fonte: Autoria própria (2020).

A carga no FEMAP® foi aplicada de acordo com a utilizada na fase experimental e considerando uma região de 1 cm de aplicação distribuída ao longo do comprimento em nós na parte superior do CP, esse valor representa 1/10 do diâmetro.

Já para a modelagem 3D, foi utilizada dos mesmos métodos da 2D, tendo como diferença inicial que o elemento foi extrudado no valor da altura do CP (200mm), desta forma, foi gerado um elemento em 3 dimensões e cada nó possui 6 graus de liberdade. Duas placas foram geradas pela necessidade de simular de maneira mais próxima possível do ensaio real, restringindo a movimentação dessas placas na direção horizontal e gerando um atrito entre o CP e a placa. Na placa superior foi lançado o carregamento necessário para o rompimento do CP, valor este que foi coletado na máquina na hora do rompimento do mesmo. Já na placa inferior, foi feita uma restrição do movimento, gerado um atrito entre o CP e a placa. Foram utilizadas as malhas 4149, 18930 e 63243 elementos, com todas as condições de contorno aplicadas, gerado o carregamento, foi analisada a convergência destes ensaios de acordo com a quantidade de elementos analisada, sendo a mais que mais convergiu para o experimental a de 63243 elementos.

Os valores de tensão foram obtidos no centro do modelo, uma vez que, no ensaio experimental, a solução analítica é dada no centro, quando $x=0$. Para encontrar os valores do deslocamento, como o Módulo de Elasticidade do concreto foi obtido experimentalmente.

A simulação realizada foi baseada no experimento laboratorial explicado anteriormente, sendo feita uma simulação das condições de contorno e carregamento em que o corpo de prova foi submetido durante o ensaio. Apesar do ensaio ser dinâmico, a simulação foi realizada de maneira estática, para isso foi aplicada a carga adquirida pela máquina EMIC no instante em que houve a captura de uma determinada imagem.

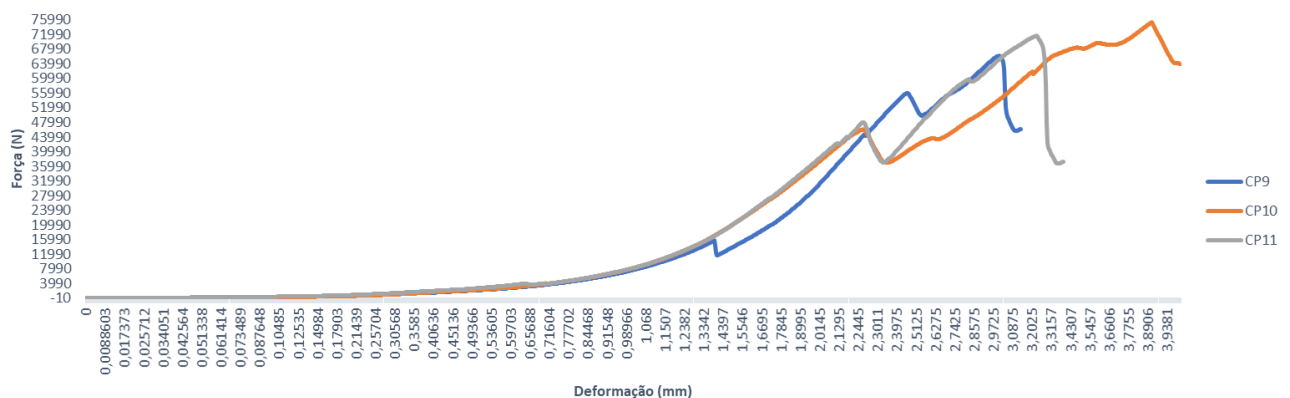
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios de tração e compressão diametral obtidos na primeira etapa do processo experimental. Posteriormente, tem-se a apresentação dos resultados obtidos na segunda etapa, a simulação computacional.

5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EXPERIMENTAL (DADOS DA MÁQUINA)

O gráfico 1 mostra as curvas dos corpos de prova com brita granítica (sem aditivo).

Gráfico 1: Força x deformação CP's com brita granítica

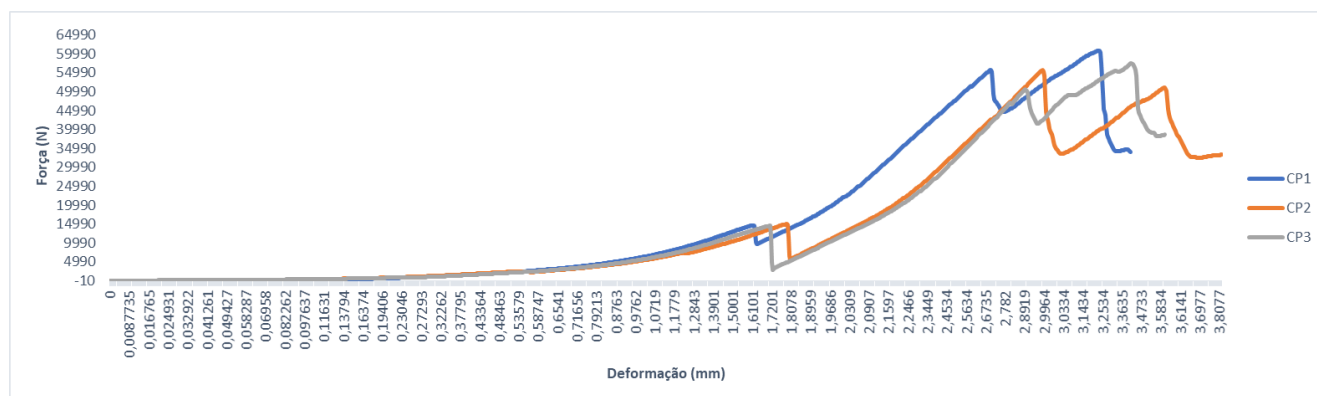


Fonte: Autoria própria (2020)

Percebe-se que a carga máxima de ruptura dos CP's com brita granítica, chega a cerca de 75 kN. Além disso, nota-se um comportamento bastante semelhante entre todos os corpos de prova, sendo o CP 10 o que aguentou maior carga entre os demais, e o CP 9 o menor, porém com maior deslocamento, isso devido a um ganho de resistência interna ao final do ensaio. Foram considerados os 3 corpos de prova dentro da média das resistências adquiridas no ensaio, que representa um comportamento padrão.

Já as curvas dos corpos de prova com aditivo superplastificante são apresentadas no Gráfico 2.

Gráfico 2: Força x deformação CP's com brita calcária



Fonte: Autoria própria (2020)

Nestas curvas, nota-se um comportamento bastante semelhante entre ambos, sendo o CP1 o que resistiu a maior força, chegou aos 60 kN.

Após a obtenção dos resultados experimentais de força, foi determinado o f_{ck} do concreto dos corpos de prova, utilizou-se da equação 8, e após obter esse resultado foi calculado o módulo de elasticidade dos corpos de prova a serem usados para a modelagem, seguindo o método estabelecido na ABNT NBR 8522/2017 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação a compressão. Usa-se a Equação 17 para a determinação f_{ck} e a Equação 18 para a determinação do módulo de elasticidade.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (17)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (18)$$

Considera-se $\alpha_E = 0,9$ para calcário e 1 para o granito.

Os valores de força máxima, resistência e módulo de elasticidade para os CP com brita granítica são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Resistência, força e módulo de elasticidade para brita granítica

CP	Resistência (MPa)	Força máxima (N)	Módulo de elast. (MPa)
10	2,39	75276	26551
11	2,27	71590	25546
8	2,16	67984	24924

Fonte: Autoria própria (2020).

Os valores de força máxima, resistência e módulo de elasticidade para os CP com brita calcária e aditivo superplastificante são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Resistência, força e módulo de elasticidade para brita calcária.

CP	Resistência (MPa)	Força máxima (N)	Módulo de elast. (MPa)
1	1,93	60886	22615
2	1,77	55704	21198
3	1,83	57567	21732

Fonte: Autoria própria (2020).

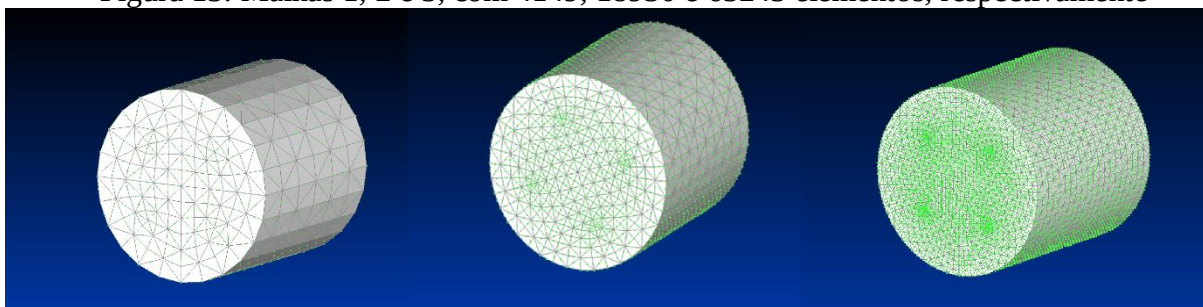
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – FEMAP® (Dados do FEMAP)

Além de poder adquirir todas as tensões e deslocamentos em cada ponto no momento do rompimento, o programa FEMAP possibilita a visualização do comportamento do sólido durante o ensaio. A interface do programa possui ferramentas com funções que mostram praticamente todas as informações necessárias para se obter os parâmetros de resistência do material. No *software* é disponibilizado a modelagem visual do corpo de prova, onde é possível ver por zonas tanto sua deformação, quanto a tensão em que o elemento está submetido em cada ponto.

5.3 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA MALHA

As malhas a serem utilizadas foram definidas, e para cada uma, foram captadas as tensões no centro do corpo de prova de cada modelo, com finalidade de observar a convergência da tensão para o valor experimental (desejado), comparando-os e calculando-se o erro posteriormente. As malhas utilizadas possuem 4149, 18930 e 63243 elementos, que serão chamadas de malhas 1, 2 e 3 respectivamente, como mostra a Figura 14:

Figura 13: Malhas 1, 2 e 3, com 4149, 18930 e 63243 elementos, respectivamente



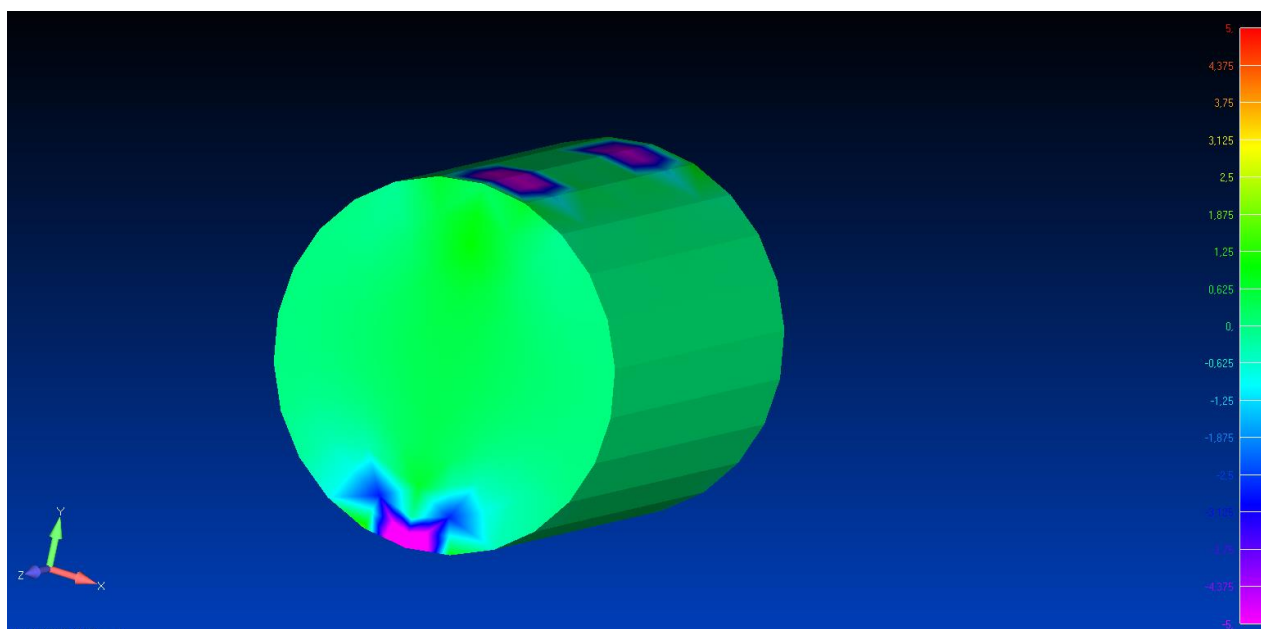
Fonte: Autoria própria (2020)

Em seguida, realizou-se a análise do modelo e obteve-se as tensões de tração e deslocamentos para cada quantidade de elementos utilizada.

5.3.1 Análise de convergência de tensão para o CP 10 (Brita granítica)

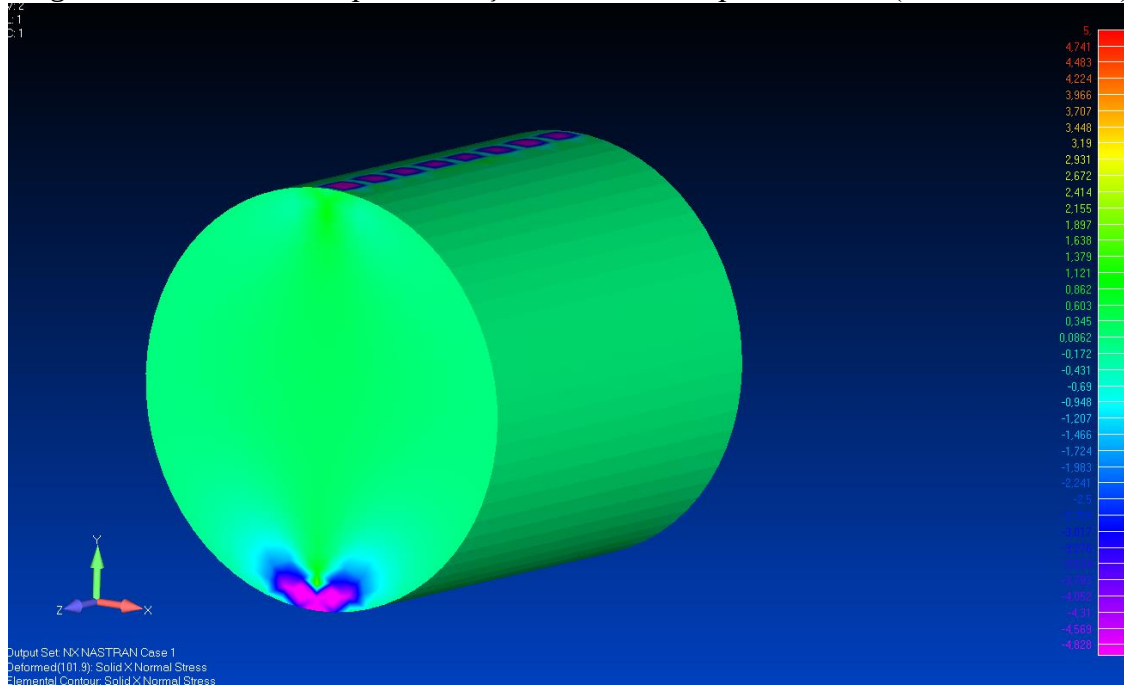
Para o CP 10, além das condições de contorno já descritas anteriormente, foi aplicada uma carga de 75276 N, valor encontrado no ensaio experimental para o dado instante. Após a aplicação da carga, se tornou possível obter as tensões. As Figuras 15, 16 e 17 mostram o comportamento do corpo para cada tipo de malha.

Figura 14: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 1 (4194 elementos)



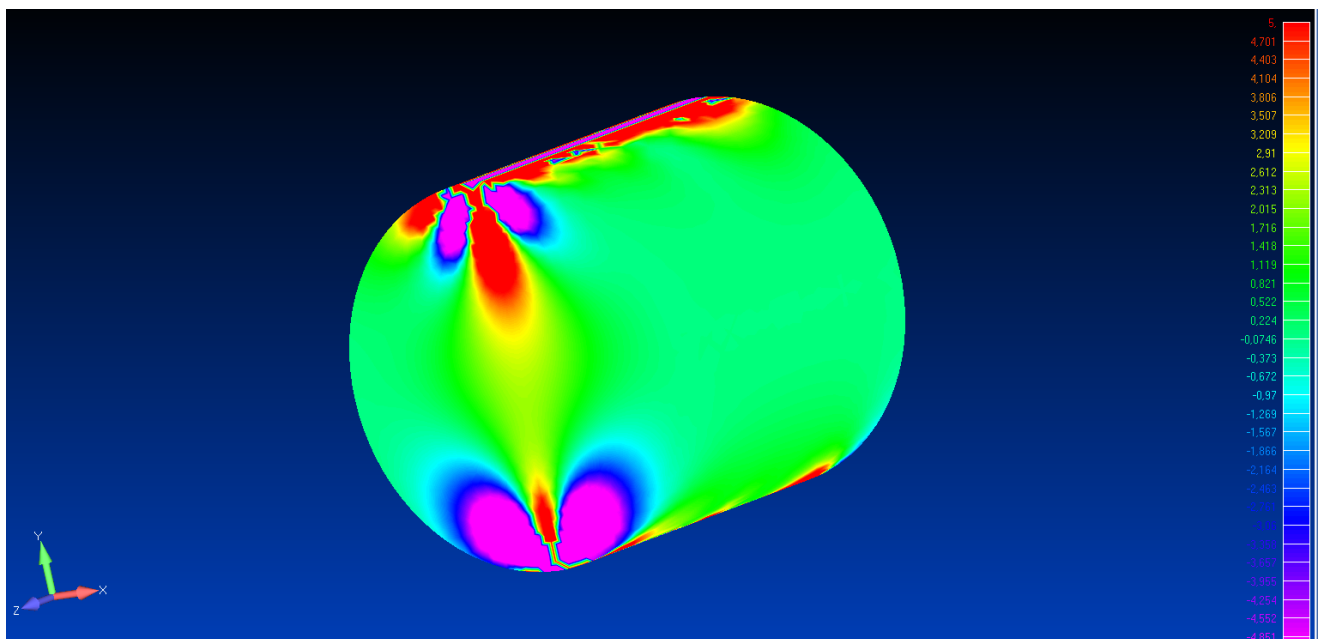
Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 15: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 2 (18930 elementos)



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 16: Tensões em Mpa, na direção “x” do CP 10 para malha 2 (63243 elementos)



Fonte: Autoria própria (2020)

Nota-se na malha 1 (Figura 14), que houve uma inconsistência na aplicação do carregamento, devido a falta de refinamento da malha, o que não atendeu as expectativas. Na malha 2 (Figura 15), percebe-se um carregamento distribuído de forma melhor, mas ainda assim nota-se uma diferença em relação ao esperado analítico. Na malha 3 (Figura 16), pode-se notar que o carregamento foi distribuído de forma homogênea, mostrando a fidelidade da modelagem em relação ao ensaio experimental, sendo esta malha que atendeu ao requisito de fidelidade ao ensaio.

Para a comparação com os resultados experimentais, escolheu-se o ponto central, tendo em vista que as equações analíticas (Equações 6 e 8) a tensão máxima é obtida no centro do elemento, ou seja, para $x=0$, todos os valores foram obtidos no mesmo local. Para a obtenção dos valores de tensão no centro, utilizou-se a ferramenta “Query”, que pode ser aplicada através dos seguintes comandos: List > Output > Query.

O valor de tração obtido no ensaio experimental pela Equação 8, foi de 2,39 MPa, já os valores obtidos numericamente através da modelagem estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Tensões obtidas para as malhas 1, 2 e 3, no CP 10

Malha	Tensão (Mpa)	Erro (%)
1	2,12	11,3%
2	2,24	6,27%
3	2,41	0,8%

Fonte: Autoria própria (2020)

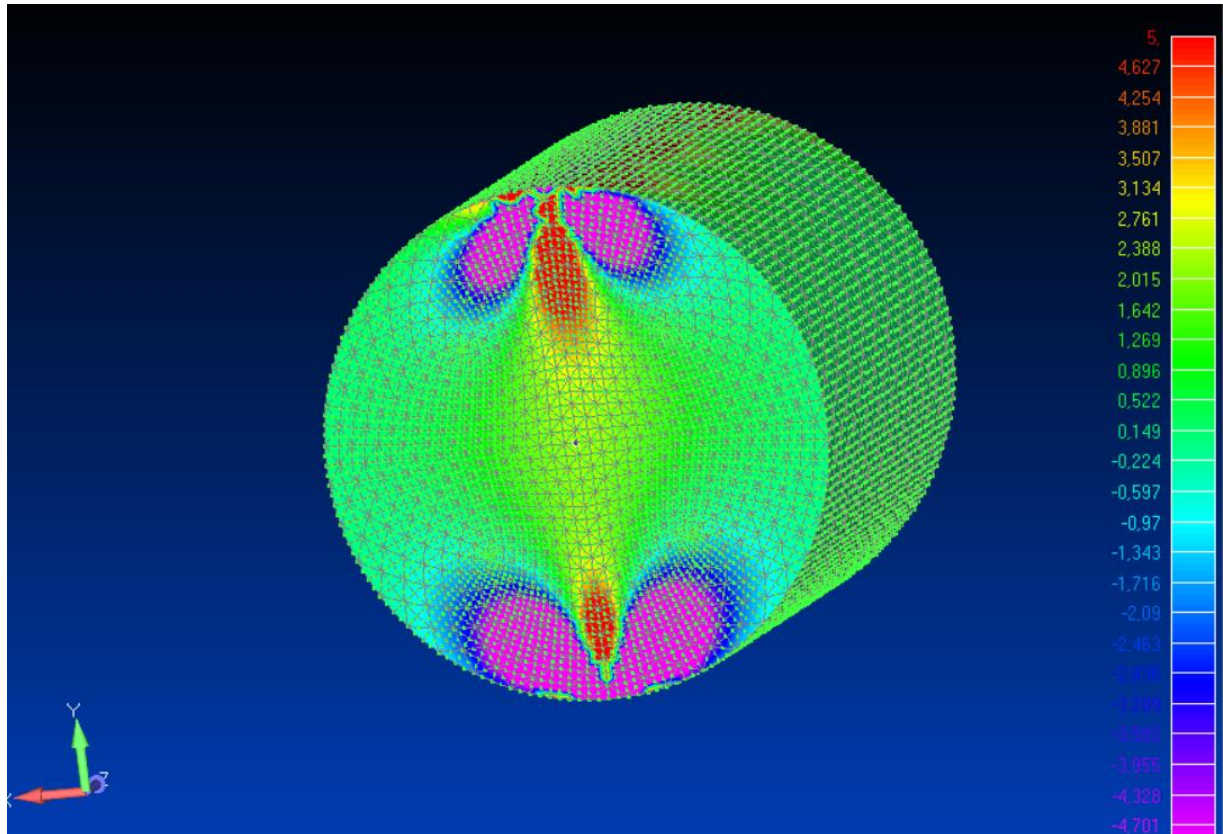
O estudo das tensões mostra que as malhas convergem. Com o aumento da quantidade de elementos, resultando em um refinamento da malha, obtém-se um valor próximo ao experimental (e analítico). A Tabela 4 mostra que a tensão para a malha 3 (63243 elementos), a tensão foi de 2,41 MPa, sendo a mais aproximada do experimental dentre as outras malhas.

5.3.2 Análise CP 1 (Brita calcária e aditivo superplastificante) com a malha ótima (Malha 3 de 63243 elementos)

Como a malha ótima já foi obtida (Malha 3), a que possui um valor mais próximo do experimental, a utilizaremos para as demais modelagens e comparações com o analítico. Na

Figura 17 pode-se ver o comportamento do CP 1 utilizando a malha 1, e na Tabela 5 tem-se a tensão obtida e o erro apresentado.

Figura 17: Comportamento CP1 (Brita calcária e aditivo superplastificante) e suas tensões em “X”.



Fonte: Autoria própria (2020)

Tabela 5: Tensões obtidas para malha 3 (63243 elementos) com brita calcária e aditivo

Malha	Tensão (Mpa)	Erro (%)
3	1,96	1,5

Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se que a malha 3 (63243 elementos) possui uma grande aproximação com o resultado experimental, tanto para a modelagem com os CP's de brita granítica, quanto para os com brita calcária e aditivo superplastificante. Apresentando um erro de 1,5%, nota-se a viabilidade da modelagem como parâmetro de comparação.

5.4 Análise entre resistências entre os CP's com brita granítica sem aditivo e brita calcária com aditivo superplastificante

Para os CP's moldados, foi estabelecido o mesmo traço para ambos, tendo como diferença apenas a adição do aditivo superplastificante nos CP's que tiveram a brita calcária como agregado graúdo. Foram utilizados 3 corpos de prova como amostra, pois durante o ensaio dois corpos de prova romperam-se durante a pré-carga, portanto para critério de comparação, só foi utilizado 3 corpos de prova com ambas a britas. O quadro 1 mostra as tensões e forças máximas para os CP's citados.

Tabela 6: Tensões e forças máximas para ambos agregados

CP Brita calcária	Tensão máxima (Mpa)	Força máxima (N)
1	1,93	60886
2	1,77	55704
3	1,83	57567
CP Brita granítica	Tensão máxima (Mpa)	Força máxima (N)
9	2,10	66116
10	2,39	75276
11	2,27	71590

Fonte: Autoria própria (2020)

Na Tabela 7, é mostrado a média entre as tensões e forças de ambos materiais utilizados

Tabela 7: Média das tensões e forças

CP's agregado	Tensão média (Mpa)	Força média (N)
Brita calcária	1,84	58052
Brita granítica	2,25	70994

Fonte: Autoria própria (2020).

Como mostrado na Tabela 7, a resistência média dos CP's com brita granítica foi maior, mesmo sem a adição de aditivo superplastificante, a força média resistida foi consideravelmente maior, podendo afirmar que, para fins de resistência a tração, recomenda-se a brita granítica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais foram essenciais para se obter parâmetros reais das propriedades dos materiais, propriedades essas que foram de suma importância para o início da modelagem no FEMAP.

A modelagem computacional apresentou dados concretos, e bem próximos ao analítico, ocorrendo erros de 11,2% para a malha mais grosseira, o que mostra que o refinamento da malha para sólidos em 3D é essencial para que seja utilizado o método dos elementos finitos como método numérico. Notou-se uma inconsistência na distribuição de cargas pelos elementos na malha mais grosseira, e na malha mais refinada não houve esse problema.

Portanto, a modelagem por Elementos Finitos apresenta uma boa solução para simular ensaios de maneira totalmente computacional, evitando o desgaste físico e de materiais durante um procedimento experimental. Vale salientar que um método numérico não descarta a necessidade do método analítico-experimental, pois são de extrema importância para determinar características e analisar o comportamento do material, porém, ao utilizar a modelagem, é possível reduzir a quantidade de ensaios.

Durante a análise dos resultados analíticos e dos obtidos no *software*, foi analisado os materiais com dois tipos de agregado graúdo, a brita calcária em um traço com aditivo superplastificante, e a brita granítica sem aditivo nenhum, ambos com as mesmas proporções de cimento, areia e brita, diferenciando minimamente no fator água-cimento. Com base nos resultados experimentais, utilizou-se a malha ótima de 63243 elementos para a modelagem numérica, que possuiu resultados bastante aproximados do ensaio experimental. Com ambos os parâmetros, notou-se que a brita calcária ainda há uma grande discrepância em relação à resistência à tração.

Com isso, sugere-se para trabalhos futuros, a utilização de malhas com mais elementos do que a utilizada neste trabalho, com finalidade de reduzir o erro, além de também realizar os ensaios de compressão, para obter resultados mais coerentes, tendo em vista a divergência de comportamento do concreto nas situações de compressão, em relação as de tração.

Usar a malha mais refinada foi a solução encontrada neste trabalho, para que haja fidelidade com os ensaios experimentais, tornou-se imprescindível o uso de malhas com cada vez mais elementos, divergindo para um resultado mais próximo com o analítico possível.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, José Milton de. **A Resistência à tração e energia de fratura do concreto**. Rio Grande: Dunas, 2001. 32 p. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero_02.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222** – Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-deprova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Mossoró, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Mossoró, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: - CONCRETO - DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ESTÁTICOS DE ELASTICIDADE E DE DEFORMAÇÃO À COMPRESSÃO. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Mossoró, 2015.
- BRASIL. Instituto Nacional de Tecnologia. Ministério da Ciência e Tecnologia (Org.). **Instituto Nacional de Tecnologia, desde 1921 gerando tecnologia para o Brasil**. Brasília: Int, 2002. 97 p. Disponível em: <<http://www.int.gov.br/docman/informacoes-institucional/251-livro-do-int-80-anos/file>>. Acesso em: 23 jan. 2020.
- Comité Euro-International du Béton. **CEB-FIP Model Code 1990**. Lausanne, 1993
- COLIN, Silvio. **A igreja de São Pedro dos Clérigos**. 2011. Disponível em: <<https://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2011/01/02/a-igreja-de-sao-pedro-dos-clerigos/>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- CONTERATO, Leandro. **Rochas Basálticas: Obtenção de parâmetros Elásticos pelo ensaio de tração Indireta**. 2011. 61f. Trabalho de diplomação (Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- COOK, Robert D.. **Finite element modeling for stress analysis**. Nova Iorç: John Wiley & Sons, 1995. 320 p
- GUIRADO, João César. **Uma generalização do teorema de Riesz**. 1979. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Instituto de Matemática, Estatísticas e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1979.
- HARISH, Ajay. **FEM and FEA Explained**. 2019. 32 f. - Curso de Mechanical Engineering, Institute Of Continuum Mechanics, Hannover, 2019. Cap. 1.
- KENNEDY, T. W.; HUDSON, W. R.. **Application of the indirect Tensile Test to Stabilized**

Materials, Highway Research Record, Washington, n. 235, p. 36-48, 1968.

MARTÍNEZ, Marco Nieto. **Modelagem da detecção de danos via elementos finitos e redes neurais artificiais**. 2013. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

MOHAMAD, Gihad. **Resistência a tração na flexão**. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Ensaio-de-resistencia-a-tracao-na-flexao-e-a-compressao_fig18_323337268>. Acesso em: 20 jan. 2020.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios: Características do concreto**. São Carlos: Dee, 2004. 380 p. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2019.

PINHEIRO, Libânio M.. **Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. 380 p.

PINTO, Gerry Felício Silva. **Análise comparativa dos agregados graúdos, britas calcária e granítica, para utilização em concreto**. 2019. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

ROSENDO SOBRINHO, Francisco. **Análise do comportamento mecânico do concreto com brita calcária e aditivo através do ensaio de compressão diametral utilizando a correlação digital de imagens**. 2015. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SAAD, Martin H.. **Elasticity: Theory, Applications and Numerics**. Kingston: Tlfebook, 2005. 473 p.

SALES, Isabella Lourrane Nunes de. **Análise comparative entre ensaio experimental utilizando a correlação digital de imagens, simulação pelo software FEMAP® e o método analítico da tração por compressão diametral no concreto**. 2019. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

SCHWARTZMAN, Simon. **Um espaço para a Ciência: a formação da comunidade científica no Brasil**. Brasília: MCT – Centro de Estudos Estratégicos, 2001.

SILVA, Marcello Congro Dias da. **Equações diferenciais parciais e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Ctc, 2016. 20 p. Disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2016/relatorios_pdf/ctc/MAT/MAT-Marcello%20Congro%20Dias%20da%20Silva.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ZIENKIEWICZ, O.C. **Finit Element Method, Vol. 2 - Solid Mechanics**. 5. ed. Swansea: Butterworth Heinemann, 2000. 476 p.