



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI CAMPUS ALTO
PARAOPEBA**

**DANIEL VALENTE DE OLIVEIRA
DAVI OLIVEIRA LEONEL**

***APLICAÇÃO DA BARRA HOPKINSON NO ENSAIO BRASILEIRO
DINÂMICO DE TRAÇÃO***

**OURO BRANCO-MG
NOVEMBRO/2022**



Universidade Federal
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI CAMPUS ALTO
PARAOPEBA**

DANIEL VALENTE DE OLIVEIRA

DAVI OLIVEIRA LEONEL

***APLICAÇÃO DA BARRA HOPKINSON NO ENSAIO BRASILEIRO
DINÂMICO DE TRAÇÃO***

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal de São
João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba,
como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Mariana Arruda Pereira

OURO BRANCO-MG
NOVEMBRO/2022

DANIEL VALENTE DE OLIVEIRA

DAVI OLIVEIRA LEONEL

***APLICAÇÃO DA BARRA HOPKINSON NO ENSAIO BRASILEIRO
DINÂMICO DE TRAÇÃO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 15 / 12 / 2022

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof^a. Orientadora Dr^a. Mariana Arruda Pereira

Prof. Dr^o. Leandro Neves Duarte

Prof^a. Dr^a. Eliane Prado Cunha Costa dos Santos

APLICAÇÃO DA BARRA HOPKINSON NO ENSAIO BRASILEIRO DINÂMICO DE TRAÇÃO

Daniel Valente de Oliveira¹

Davi Oliveira Leonel¹

RESUMO

A Barra de Hopkinson (BH) é comumente utilizada como um método de teste na determinação do comportamento de materiais sob altas taxas de deformação, nas últimas décadas, verifica-se que o conhecimento relacionado a esse processo/método vem se aperfeiçoando. Ela também é frequentemente utilizada para a realização de análise de propriedades dinâmicas de materiais cerâmicos como, por exemplo, o concreto. Em alguns casos, os ensaios dinâmicos, estáticos, e as tensões de tração podem gerar a fratura do material, assim, muitos deles são feitos na iminência de se obter certa resistência à tração. Partindo desses pressupostos, o objetivo deste trabalho é apresentar e descrever as características do concreto, quando submetido a cargas dinâmicas, comparando aos resultados estáticos, utilizando o método de teste da Barra Hopkinson, derivando as forças de tração máxima, através da teoria de propagação das ondas unidimensionais. Todos os testes foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Politécnica de Madrid com autoria própria e participação de Victor Del Rey Pedraza, bem como supervisão de V. Sánchez-Gálvez. Verificou-se o fato de utilizar diferentes diâmetros das amostras e se é possível perceber sua influência significativa na relação tensão x deformação, onde não se obteve, até então, uma taxa padrão de proporcionalidade. Comparou-se também os resultados das tensões e áreas de fraturas das amostras submetidas aos métodos de ensaio dinâmicos e estáticos, porém não se obteve uma correlação exata entre esses dados, deixando-se uma lacuna a preencher por novas pesquisas na área.

Palavras-chave: Barra de Hopkinson. Ensaio Dinâmico. Ensaio Estático. Tração.

¹ Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São João del Rei

ABSTRACT

The Hopkinson Bar (HP) is commonly used as a test method in determining the behavior of materials under high strain rates. In the last decades, it appears that the knowledge related to this process/method has been improving. The Hopkinson Bar is also frequently used to analyze the dynamic properties of ceramic materials such as concrete. In some cases, dynamic and static tests, and tensile stresses can cause the material to fracture, so many of them are performed on the verge of obtaining a certain tensile strength. Based on these assumptions, the objective of this work is to present and describe the characteristics of concrete, when subjected to dynamic loads, comparing to static results, using the Hopkinson Bar test method, deriving the maximum tensile forces, through the theory of propagation of one-dimensional waves. All tests were carried out in the materials laboratory of the Polytechnic University of Madrid with the authorship and participation of Victor Del Rey Pedraza, as well as the supervision of V. Sánchez-Gálvez. It was verified the fact of using different diameters of the samples and if it is possible to perceive its significant influence in the proportion $\times$ deformation, where there was not, until then, a standard rate of proportionality $\times$ deformation. There was also no verification of the results of the questions and areas of fractures of the proposals to the methods of comparison by new and researches that are being verified in the area.

Keywords: Hopkinson bar. Dynamic Test. Static Test. Traction.

1 INTRODUÇÃO

A Barra Hopkinson (BH) é um método de teste na determinação do comportamento de materiais sob altas taxas de deformação (ESTEVE; CIRNE, 2011). Nas últimas décadas, verifica-se que o conhecimento relacionado a esse processo/método vem se aperfeiçoando. De qualquer modo, o ponto de partida ocorreu com John Hopkinson, em 1872 e, posteriormente, seguiu-se com Bertram Hopkinson (ESTEVE; CIRNE, 2011).

Em linhas gerais, dentre os marcos mais relevantes associados à BH, relaciona-se o trabalho do já mencionado Bertram Hopkinson que, em 1914, apresentou a Técnica da Barra de Pressão, visando determinar a relação de pressão e tempo por conta de um impacto ocasionado por um objeto ou explosivo (ESTEVE; CIRNE, 2011).

Aponta-se, de igual modo, Dennison Bancroft, que em 1941 resolveu a equação de Pochhammer e Love no que tange à frequência na barra para velocidades longitudinais em barras cilíndricas. E, finalmente, inclui-se Kolsky, que em 1949 propôs um novo modo de fazer a Barra, ou seja, em vez de utilizar um lingote de aço anexado na extremidade da Barra de Pressão, usou um provete intercalado entre as duas barras (ESTEVE; CIRNE, 2011).

Atualmente, a Barra Hopkinson é compreendida por duas barras em que são intercaladas o provete do material que será testado. Para Esteve e Cirne (2011), “uma das extremidades da barra, considerada barra incidente ou input bar, é impactada com uma terceira barra, projétil, que vai produzir, uma onda de compressão que se propaga ao longo desta barra” (ESTEVE; CIRNE, 2011. p. 1-2). O pesquisador complementa que “parte da onda de compressão vai ser refletida, na passagem pelo provete, por este ser constituído por um material diferente e por ter diferentes dimensões, e parte será transmitida à segunda barra, denominada barra transmitida ou output bar” (ESTEVE; CIRNE, 2011, p. 1-2).

Neste contexto, cita-se o ensaio brasileiro de Tração – conhecido como *Brazilian Test* – desenvolvido por Fernando Luiz Lobo Barboza

Carneiro (1943) – engenheiro, professor e pesquisador. Por ser considerado um teste simples, passa-se a ser realizado sob uma vasta gama de taxas de deformação, permitindo a total caracterização do concreto em um sistema dinâmico.

As cargas dinâmicas passaram a ser vistas, em alguns casos, como responsáveis pela falha de materiais e, por causa disso, tem-se aumentado a necessidade de desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas técnicas de ensaios dinâmicos. Nesta esfera, encontra-se a frequentemente utilizada Barra Hopkinson, que pode ser aplicada com a intenção de analisar o comportamento mecânico de vários materiais, sendo metais, polímeros ou cerâmicos.

Por meio da pesquisa de V. Rey-De-Pedraza (2006), mesmo com o advento de novos materiais, o concreto continua mantendo a sua eficácia, sendo considerado um material eficaz para todos os tipos de edifícios civis e militares, especialmente devido à sua resistência a causas naturais ou eventos atípicos, como terremotos, ataques terroristas ou acidentes envolvendo explosões. Acredita-se que estas infraestruturas podem estar sujeitas a numerosas ações dinâmicas ao longo do tempo, diferente de cargas estáticas que foram tradicionalmente projetadas para resistir à compressão.

De acordo com Ruiz (2006) as ações dinâmicas causam ondas de compressão que viajam através do material, causando tensões de tração ao se refletir em superfícies livres, causando, portanto, a falha de materiais quebradiços, como o concreto. Entende-se que a projeção dessas ondas de tensões pode causar significativos danos ou até um colapso progressivo da estrutura. Esta é considerada uma das principais causas de mortes ou lesões em estruturas submetidas a cargas impulsivas.

Assim, de acordo com Gálvez (1999) o fato de os testes estáticos serem padronizados e amplamente descrito nos códigos e normas técnicas, permitiram que os parâmetros obtidos por meio destes, como, por exemplo, resistência a compressão, energia de deformação e módulo de elasticidade sejam característicos de análises particulares. No entanto, quando se trata de testes dinâmicos na Barra Hopkinson não se encontra

ensaio que demonstra a influência da geometria do espécime nos resultados de tais testes.

Destaca-se que o concreto possui baixa densidade com alta resistência à compressão graças à sua natureza cerâmica, porém sua desvantagem está em sua extrema fragilidade e à baixa tenacidade à fratura com uma resistência à tração limitada em comparação a sua alta resistência à compressão. Por isso, o principal uso do concreto é sob cargas compressivas. No entanto, acidentes ou ataques terroristas podem causar cargas dinâmicas externas, que diferem das forças estáticas usuais.

Outra perspectiva, são os estudos elaborados por Erzar & Forquin (2010), que analisaram e compararam os três métodos diferentes para obter a resistência à tração do concreto, ou seja, juntando os estudos elaborados por Novikov, Klepaczko e Gálvez (2017). No entanto, existe uma grande dispersão entre os resultados publicados.

Sabendo-se que a resistência do concreto varia, aumentando sob cargas dinâmicas, torna-se importante conhecer sua influência para se obter sua completa caracterização mecânica. É relevante a análise, ainda, porque o comportamento do concreto sob carga estática é conhecido, mas, sob análise de alta deformação, a obtenção de parâmetros fundamentais para sua caracterização mecânica, como resistência à tração e energia de deformação, permanece uma tarefa complexa.

Partindo desses pressupostos, o objetivo deste trabalho é apresentar e descrever as características do concreto, quando submetido a cargas dinâmicas, utilizando o método de teste da Barra Hopkinson, derivando as forças de tração máxima, através da teoria de propagação das ondas unidimensionais, comparando-as com os resultados do método estático, possuindo o corpo de prova do método dinâmico as mesmas dimensões e características do estático.

Faz-se necessário destacar que os resultados apresentados e discutidos neste artigo são consequência de um estudo realizado em Madrid (Espanha), em 2018, com o aluno D.O. Leonel da Universidade Federal de São João del Rei e os professores V. Rey-De-Pedraza, D. A. Cendón e V. Sánchez da Universidad Politécnica de Madrid.

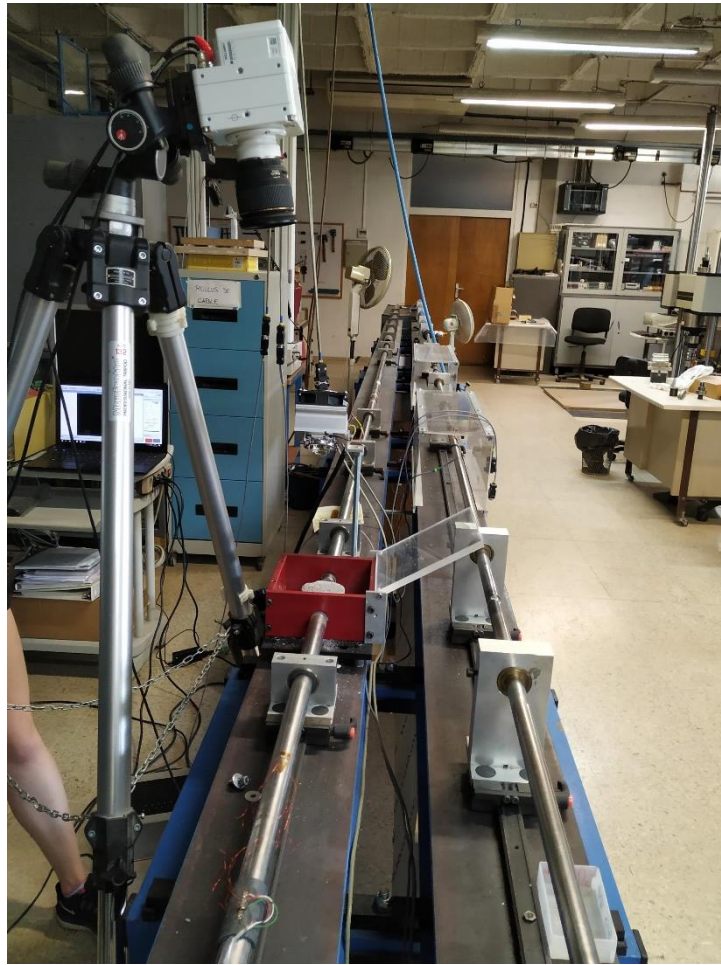
3 METODOLOGIA

Todos os testes de ensaio de análise de aplicação de cargas dinâmicas em concreto, foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Politécnica de Madrid, por se tratar de um teste pioneiro, não existem normas ou regras de regulamentação.

Para a execução do teste dinâmico, as amostras de concreto foram colocadas dentro de uma caixa de ensaio, que foi fabricada in loco, especificamente para a realização dos experimentos. Ela possui entradas laterais para as barras metálicas e uma tampa de vidro removível em sua face superior, possibilitando assim a observação e filmagem do rompimento da amostra, com uma câmera de alta velocidade posicionada através do vidro.

As hastes de metal da barra de Hopkinson foram fixadas às barras da máquina e partes de isopor foram colocadas abaixo da amostra do concreto afim de elevá-las até ao nível das barras Hopkinson. A amostra de concreto foi então posicionada, tensionada entre as barras e então a caixa foi fechada e parafusada. Realizou-se então o lançamento do projétil com o auxílio de uma barra de metal longa, todos os lançamentos foram padronizados e os disparos foram feitos com a pressão de 1 bar – Figura 1.

Figura 1 – Sistema de ensaio dinâmico com a barra Hopkinson



Fonte: Os autores, 2022.

A câmera foi conectada a um notebook, e posicionada o mais próximo de um ângulo de 90 graus sobre a caixa de teste – Figura 1.

Temos então a realização do teste, o compressor foi acionado, liberando a pressão e permitindo que o projétil fosse disparado rompendo a amostra – Figura 2.

Figura 2 – Amostras já rompidas após os ensaios

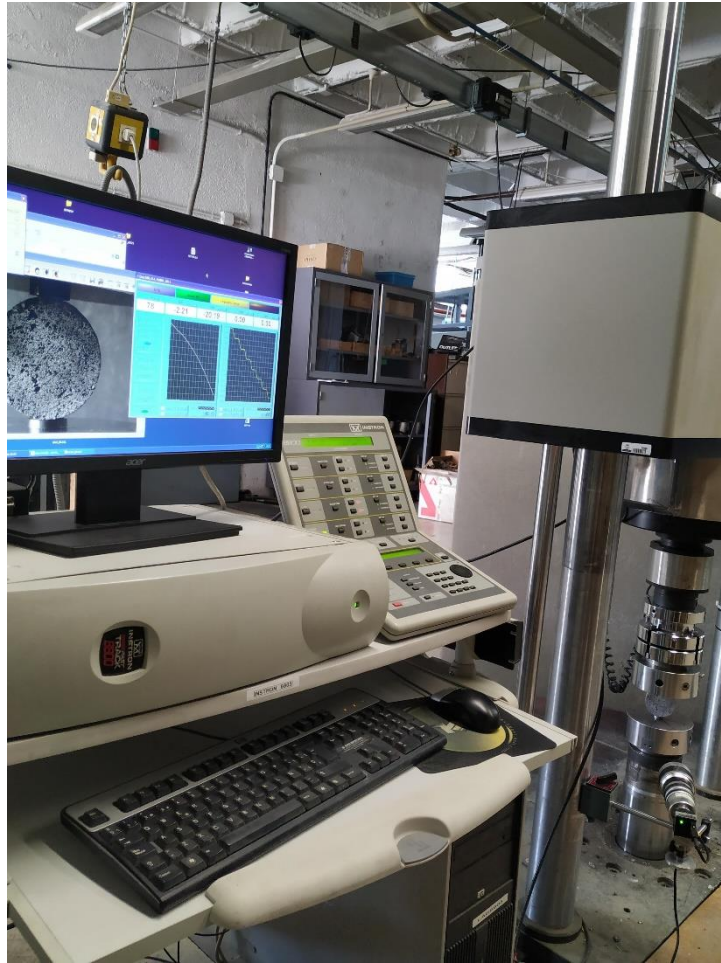


Fonte: Os autores, 2022.

Os valores das ondas utilizadas foram amplificados em 900 x para uma melhor leitura da máquina analisadora de ondas, os programas utilizados para se analisar as ondas foram o WaveStar e o Instrument Manager.

Por se tratar de um estudo foram realizados também testes estáticos para fins de comparação, utilizando-se um sistema de teste hidráulico Instron 8803. O programa utilizado foi uEye Cockpit, além de uma câmera de alta definição - Figura 3.

Figura 3 – Ensaio estático com sistema Hidráulico Instron 8803



Fonte: Os autores, 2022.

Os valores de deformação dos ensaios dinâmicos e estáticos, foram obtidos utilizando-se o software QTI Plot, que converteu os valores de ondas em tensão.

Para a confecção dos corpos de amostra, foi utilizado o traço conforme a Tabela 1 correspondente a um concreto convencional, no entanto, nas amostras de teste de pequenos diâmetros foi necessário limitar o tamanho dos agregados utilizando um tamanho máximo de 4,5 mm, a fim de melhorar a trabalhabilidade do concreto devido ao tamanho reduzido das amostras. Os moldes usados para a fabricação foram tubos de PVC concretados proporcionalmente ao comprimento, sendo o diâmetro de 75mm, deixados na câmara de cura por 28 dias.

Tabela 1- Traço do concreto utilizado nas amostras

	% material	kg / m ³
Cimento	11	360
Agregado	34	799
Água	15	140
Areia	37	940
Poros	2	0
Aditivo	1	6
	100%	

Fontes: Os autores, 2022.

Foi realizada então a remoção das amostras, as paredes de moldes de PVC foram cortadas de forma cuidadosa no sentido do comprimento para não danificar o concreto. Os cilindros foram então cortados na oficina para assim se obter os discos de 22 mm de espessura. Esta espessura também coincide com o diâmetro da barra Hopkinson.

Depois de finalizado o período da cura foi realizada a caracterização estética das amostras. Foram produzidos o total de 8 ensaios dando resistência à compressão característica de 50 MPa.

Os testes estáticos de tração indireta foram conduzidos através de máquina Instron 8501, com o deslocamento de controle de 0,15 mm / min., para todos os diâmetros e uma célula de carga de 25 kN.

Além disso, as deformações na superfície da amostra foram registradas com a técnica de correlação de imagem digital (DIC) (vídeo com câmera de alta resolução para captar a ruptura). A gravação dos vídeos foi feita com um intervalo de 0,25 segundos (4 fps), com a intenção de corrigir erros de dados produzidos pelo software.

O estado de tensão ao longo do plano de carregamento para este ensaio é conhecido, através da Equação 1:

$$\sigma_T = \frac{(2F)}{(\pi BD)} \quad (1)$$

Onde:

σ_T é o estado de tensão ao longo do plano;

F é a força aplicada;

B é espessura da amostra;

D é o diâmetro da amostra;

A Equação (1) atribui que a aplicação da carga é feita em geratrizes opostas, porém no caso deste artigo, não foi utilizado uma divisão de banda para a aplicação de carga, mas sim a utilização de um disco de aço 22 mm de diâmetro e 5 mm de espessura colocado entre a amostra e a placas da máquina. Isto foi feito para recriar as mesmas condições de teste como os utilizados e descritos a seguir para o ensaio dinâmico da barra Hopkinson.

Ao registrar a força aplicada pela máquina de ensaio estático, as deformações no centro da amostra foram obtidas a partir da DIC Analysis, obtendo a curva de tensão-deformação.

Para caracterização dinâmica dos testes em concreto, utilizou-se as técnicas baseadas na barra Hopkinson (BH). O procedimento comum para a montagem consiste em 4 elementos básicos, sendo eles o projétil, a barra incidente, o tubo e a barra refletida. Para o presente trabalho, foram usadas barras de comprimento de 3 metros, diâmetro de 22 mm e um medidor de projétil. Além disso, para proteger as barras de possíveis danos, duas placas de aço foram utilizadas em contato com a amostra.

O projétil foi disparado através de uma câmara de ar comprimido e através da variação da pressão, se obteve uma gama variável de velocidades e, por conseguinte, a taxa de tensão. O projétil disparado remete à barra de entrada, gerando nesta compressão de impulsos, e, por

isso, foi passado através do mesmo para poder atingir o ponto final até a amostra. Parte da onda passou pela sonda e a outra parte foi refletida de volta pela barra incidente. Da mesma forma, a onda na amostra, foi totalmente transmitida para a barra.

Toda montagem foi instrumentada com dois extensômetros, transmitidas para a barra incidente, recolhendo e transmitindo os pulsos. O processo de ruptura da amostra foi registrado com a câmera de alta velocidade para futuras análises das imagens, assim obtendo o deslocamento e as deformações pela técnica de correlação de imagem digital (DIC).

O sistema de obtenção de dados consistiu em um condicionador de sinal Vishay, modelo 2210, com quatro canais para extrair o sinal das bandas, além de um osciloscópio digital Tektronix modelo 714L de TDS 500 MHz, para registrar os dados das faixas para o computador. Além disso, utilizou-se uma câmera de alta velocidade Vision Research, modelo Fantasma v12.1.

As imagens da câmera de alta velocidade foram processadas usando o DIC software (Digital Correlation de imagem) para identificar a ocorrência de fissuras. Tanto os dados do osciloscópio quanto da câmera começaram a utilizar os dados de tensão gerados pela barra incidente. A obtenção de dados foi definida para 1000 pontos para um total de 5 ms. Sendo assim um total de 5000 pontos.

De acordo com a teoria, a propagação de ondas em dimensão sólida se faz por meio dos registros obtidos da barra incidente e das ondas transmitidas, resultando os pontos das barras em contato com a amostra e com incidência de outras forças nestes mesmos. A partir do registro das ondas e considerando o conjunto tensão/deformação, pôde-se medir as deformações na direção perpendicular – Equação 2.

$$\varepsilon = 2.v.s \quad (2)$$

Onde:

- ε é a deformação;
- v é o coeficiente de Poisson;
- s é o tempo em segundos.

As ondas na barra incidente foram transmitidas, refletindo as forças de tensão nas extremidades da amostra e a tensão média que se aproxima. Utilizou-se as Equações 3-4.

$$F1 = E.A.(\varepsilon_j - \varepsilon_r) \quad (3)$$

$$F2 = E.A.(\varepsilon_t) \quad (4)$$

Onde:

- F é força de tensão nas extremidades das barras;
- ε é módulo de elasticidade das barras;
- A é área da barra.

Teve-se como ensaios de tração indiretos estáticos a Equação 5:

$$\sigma_m = \frac{(F1+F2)}{\pi \cdot B \cdot D} \quad (5)$$

Onde:

- σ_m é a tensão média;
- B é espessura da amostra;
- D é o diâmetro da amostra.

Os cálculos do ensaio estático são mais simples, sendo utilizada a Equação 6, uma vez que a máquina utilizada para o ensaio fornece as tensões e deslocamentos, não sendo necessário medi-los através da captação de ondas pelo strain gauge (que mede a tensão com o auxílio do Osciloscópio), feito no ensaio dinâmico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Resultados dos ensaios estáticos

Os resultados de carga máxima e tensão de rompimento para cada um dos diâmetros avaliados são mostrados na Tabela 2. É possível notar que existe pouca dispersão entre diâmetros diferentes, uma vez que a diferença de tensão entre o menor e o maior diâmetro é de 11,7 %. Por meio disto, pode-se estimar com alta precisão o estado de tensão na amostra sob compressão diametral. Além disso, é necessário obter a taxa de deformação e tensão na direção perpendicular ao referido plano.

Consequentemente, ao recorrer-se à utilização da técnica de correlação de imagem digital utilizando o software NCORR, utiliza-se as imagens registradas pela câmera de alta velocidade e da correlação de campos digitais, obtendo os deslocamentos e deformações de toda a superfície da amostra.

A análise DIC (Correlação Digital de Imagens) foi utilizada na maior parte dos ensaios, utilizando como medidores de deformação na amostra. Esse tipo de análise é feito se extraíndo os frames dos vídeos gravados pelas câmeras de alta velocidade com o auxílio do software Matlab, se mostrando uma técnica versátil de análise de ondas de instrumentação tradicionais, permitindo também uma análise posterior à ruptura, a obtenção de campos de deslocamentos e deformações de toda a parte e não apenas para as regiões fissuradas. Em muitos casos, não é possível prever com precisão o caminho que irá fissurar na amostra, pois o uso do DIC é uma grande vantagem para a análise post-mortem.

Para poder ter uma ideia mais próxima sobre a precisão obtida com a análise DIC para a taxa de deformação, foram utilizadas, tanto no teste dinâmico quanto no teste estático, amostras de diâmetros similares, contando com o uso de extensômetros ao longo do eixo de carga das mesmas. – Tabela 2.

Tabela 2- Resultados Ensaio Estáticos de Tração Indireto

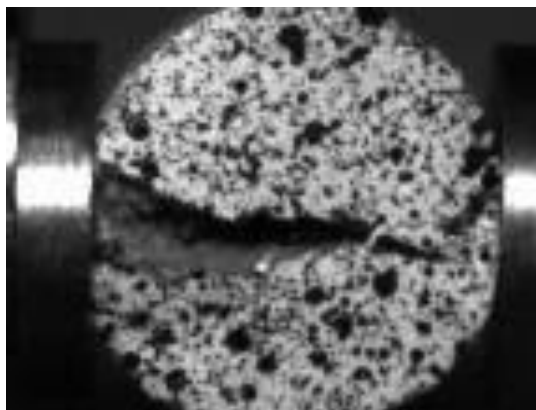
DIÂMETRO DA FRATURA(MM)	ÁREA DE FRATURA (mm ²)	CARGA MÁXIMA (KN)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)
75	1650	9,94	3,84
42	924	5,57	3,84
32	704	4,4	3,98
28	616	4,15	4,29
MÉDIA	973,5	6,015	3,99

Fontes: Os autores, 2022.

O modo de falha em todos os casos foi direto e com esforços de compressão menores que 10 KN – ou seja, todas as amostras testadas colapsaram com a presença de uma lacuna diametral entre os pontos de aplicação de carga.

- Resultados dos ensaios dinâmicos

Após o teste dinâmico, a forma de fratura da amostra foi semelhante em todos os casos, com o início da fenda na extremidade em contato com a barra de entrada, progredindo diametralmente para a extremidade oposta em contato com a barra de transmissão – Figura 4.

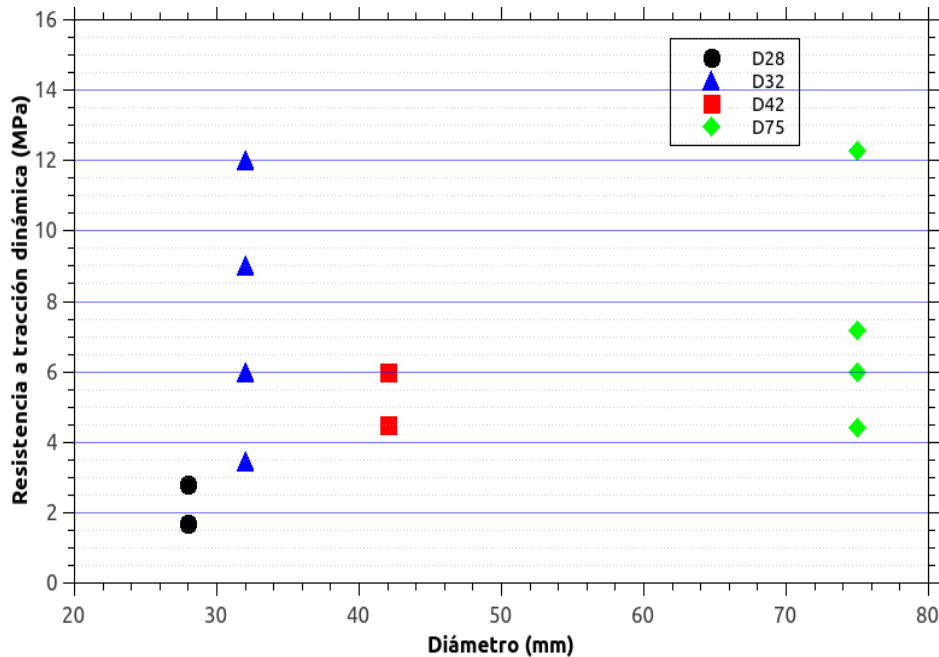
Figura 4 - Instante da ruptura durante o ensaio dinâmico

Fonte: LEONEL, D.O.; RODRIGUES, G. F.; LAGE H. F. 2021.

Um total de 20 ensaios foram realizados na barra Hopkinson. Os resultados de resistência à tração obtida são mostrados nas considerações a seguir. Neste tipo de ensaios, a principal dificuldade se encontra em controlar as amostras e a taxa de deformação que alcança. Tal taxa depende principalmente de dois fatores: a pressão com que o projétil é lançado e a geometria das amostras.

A resistência à tração alcançadas pelas amostras se mostraram maiores em diâmetros superiores. Dado que todos os diâmetros são testados sobre uma gama de taxas de deformação, variando entre 500 s⁻¹ a 2500 s⁻¹, é possível estudar a sua influência sobre a resistência de tração. Comparando cada geometria na Figura 3, as forças máximas obtidas são proporcionais às velocidades de deformação na ruptura das amostras.

Apesar da compreensão sobre estes fatores, salienta-se que existe uma dificuldade em corrigir a taxa de deformação em cada ensaio, podendo desta forma aumentar sua complexidade, tais como os diâmetros menores que foram testados. Em alguns casos, mesmo reduzindo a pressão disparada no projétil, a taxa de deformação obtida é alta (até 400 s⁻¹). Três amostras com os diâmetros menores mostram que a taxa de deformação subiu quando comparada a outros ensaios. Isto torna a padronização dos testes desafiadora, por ter uma velocidade de deformação não homogênea, o que teria permitido maior clareza da análise de influência isoladas do tamanho da amostra na resistência à tração obtida – Figura 5.

Figura 5 - Gráfico de Resistência à tração em função do diâmetro do cilindro

Fonte: LEONEL, D.O.; RODRIGUES, G. F.; LAGE H. F. 2021

Baseado nas análises da Figura 3 de resistência à tração em função do diâmetro do cilindro acima, é possível observar que para todos os diâmetros existe uma tendência semelhante relacionando o aumento da resistência à tração com a taxa de deformação. As curvas permitem identificar duas áreas de comportamento. A primeira corresponde para onde o aumento da taxa de deformação segue, o que não resulta em um aumento da resistência à tração no ensaio estático. A segunda corresponde que o aumento na resistência é significativamente influenciado pela taxa de deformação. Esta conclusão, que já foi estudada por diversos autores – como Zielinski & Reinhardt, Weerheijm & Doormaal, Erzar & Forquin, pode ser estendida para a influência do diâmetro das referidas amostras do gráfico.

Os parâmetros resultantes para os diferentes diâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Resultados dos ensaios Dinâmicos de Tração Indireta

DIAMETRO DA FRATURA(MM)	ÁREA DE FRATURA (mm²)	CARGA MÁXIMA (KN)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)
49	1078	24,07	9,3
47	1034	18,38	7,1
41	902	25,36	9,8
38	836	29,24	11,3
MÉDIA	962,5	24,26	9,38

Fonte: Os autores, 2022.

5 CONCLUSÕES

Com as análises dinâmicas feitas neste projeto foi possível avaliar a aplicação de uma técnica nova experimental utilizada para medir a tensão dinâmica de alta velocidade, por meio da Barra Hopkinson usando o método Brasileiro de tração diametral. Foi possível também observar que, com as expressões de elasticidade discutidas, obteve-se o estado de tensão das amostras testadas e, conseqüentemente, a força de tração máxima, usando a teoria da propagação de ondas unidimensionais.

Diante do exposto, percebe-se uma diferença ao comparar a tensão máxima média obtidas na Tabela 2 e 3, observando que nos ensaios dinâmicos de tração indireta obtêm-se uma tensão 2,3 vezes maior do que nos ensaios estáticos, para as mesmas amostras. Este fato proporciona uma lacuna ainda a preencher por novas pesquisas na área que possam mostrar uma correlação entre os dois ensaios como já é existente entre os ensaios de compressão simples e tração direta do concreto.

Nota-se, também, uma variação entre 28 mm e 75 mm quando as amostras foram testadas de forma estática à tração utilizando a barra Hopkinson e entre 38 mm e 49 mm quando testadas de forma dinâmica. Apesar dos resultados indicarem que não existe uma correlação entre os ensaios, é precoce afirmar que o ensaio dinâmico tem menor área de fratura e maior tensão, sendo necessário mais testes para comprovar este fato.

É importante também mais estudos para aprimoramento dos modelos numéricos do DIC, verificando melhor a correlação de imagens das fraturas das amostras com sua análise de tensões.

Contudo, o presente trabalho contribuiu inicialmente para análises de resistência dinâmica em concretos, podendo ser futuramente aprimorado para implementação de normas técnicas a fim de regulamentar padrões no Brasil e no mundo, assim, evitar tragédias como as de Chernobyl.

REFERÊNCIAS

- GÁLVEZ DÍAZ-RUBIO F. 1999 **Caracterización mecánica de materiales cerámicos avanzados a altas velocidades de deformación**. PhD thesis. Universidad Politécnica de Madrid
- ERZAR B, FORQUIN P. 2010 **An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain**. Exp. Mech. 50, 941–955.
- ESTEVES, João Carlos Marques; CIRNE, José Maria Osório de Sousa. **Projecto e Instalação de um Sistema de Barras de Hopkinson em Alumínio para Caracterização Dinâmica de Materiais Compósitos**. Dissertação – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Coimbra. 2011.
- KLEPACZKO JR, BRARA A. 2001 **An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling**. Int. J. Impact Eng. 25, 387–409.
- REY-DE-PEDRAZA V, CENDÓN DA, SÁNCHEZ-GÁLVEZ V, GÁLVEZ F. 2017 **Measurement of fracture properties of concrete at high strain rates**. Phil. Trans. R. Soc. A 375: 20160174.
- SCHULER H, MAYRHOFFER C, THOMA K. 2006 **Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates**. Int. J. Impact Eng. 32, 1635–1650.
- WEERHEIJM J, VAN DOORMAAL JCAM. 2007 **Tensile failure of concrete at high loading rates: new test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests**. Int. J. Impact Eng. 34, 609–626.
- WU H, ZHANG Q, HUANG F, JIN Q. 2005 **Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete**. Int. J. Impact Eng. 32, 605–617.
- ZIELINSKI AJ, REINHARDT HW. 1982 **Stress-strain behaviour of concrete and mortar at high strain rates of tensile loading**. Cem. Concr. Res. 12, 309–319.
- LEONEL, Davi Oliveira; RODRIGUES, Gustavo Facchini; LAGE Hammila Ferreira; **Aplicação da barra hopkinson no ensaio de tração**. TCIC II – Universidade Federal de São João del Rei, Departamento de Engenharia Civil. 2021.