

Análise experimental da influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga do concreto

Experimental analysis of the influence of loading frequency on concrete fatigue behavior

Emerson Felipe Felix (1); Rogério Carrazedo (2); Edna Possan (3)

(1) *Doutorando, Departamento de Engenharia de Estruturas/EESC-USP*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas/EESC-USP*

(3) *Professora Doutora, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA)*
emerson.felipe.felix@gmail.com; rogcarrazedo@sc.usp.br; epossan@gmail.com

Resumo

A degradação do concreto por fadiga está relacionada a deterioração e danificação do material compósito quando submetido a carregamento cíclico. De modo geral, a deterioração do material sob ação de ensaios dinâmicos, ocorre semelhantemente ao de concretos em ensaio estático, entretanto, o modo de propagação de fissuras, a velocidade de propagação e o dano podem ser diferentes em função da taxa de carregamento aplicado. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento do concreto na fadiga por compressão, considerando diferentes frequências de carregamento. Para o estudo, foram analisados o número de ciclos (diretamente relacionado à vida útil), as deformações e a danificação do material. Os ensaios foram realizados considerando três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz), e dois níveis de tensão máxima (50% e 70% da resistência à compressão). Os resultados encontrados apontam que à medida que a frequência de carregamento é aumentada, o número de ciclos cresce exponencialmente, contrapondo-se ao dano, que decresce na mesma medida. Ademais, os resultados indicam que a inclusão de parâmetros referentes à deformação e ao nível de danificação, podem apresentar uma ótima alternativa para o estudo e determinação de formulações referentes à predição da vida útil do concreto sujeito à fadiga.

Palavra-Chave: Materiais compósitos, Concreto, Carregamento cíclico, Resistência à fadiga, Fadiga de baixo ciclo.

Abstract

The degradation of concrete by fatigue is related to deterioration and damage of the composite material when subjected to cyclic loading. In general, the deterioration of the material subjected to dynamic tests, occurs similarly to that of concretes subjected to static tests, however, the crack propagation mode, the propagation speed and the damage may be different depending on the loading rate at which the material is subjected. Thus, the present work aims to experimentally evaluate the behavior of concrete when subjected to compression fatigue, considering different loading frequencies. For the study, the number of cycles (useful life), the maximum specific deformation and damage indices of the material. The tests were performed considering three loading frequencies (0.125, 0.25 and 0.5 Hz), and two maximum stress levels (50% and 70% of the compression strength). The results indicate that as the frequency of loading is increased, the life of the concrete increases exponentially (reducing the test time), and more, that there is an increase in the total deformation of the concrete, causing a greater energy is needed to take it to rupture.

Keywords: Composite Materials, Concrete, Cyclic load, Fatigue Strength, Low-cycle Fatigue.

1 Introdução

No decorrer de sua vida útil, estruturas de concreto a exemplo de pontes, torres eólicas, estruturas offshore e pavimentos de aeroportos e rodovias, estão sob ação das mais variadas condições de solicitações, apresentando na maioria dos casos um espectro de carregamento variável e cíclico, responsável pela deterioração do material por fadiga.

A fadiga se refere a deterioração ou ruptura de um sólido quando submetido à repetidas cargas e descargas, e ocorre devido à degradação permanente e progressiva na microestrutura do material, para solicitações cíclicas de magnitude inferior à sua resistência (LÜ et al., 2004; SAINI; SINGH, 2020). Assim, a fadiga é um fenômeno que deve ser considerando no projeto de elementos que trabalham sob ação de cargas cíclicas, a fim de que os danos permanentes que comprometem a integridade estrutural sejam minimizados. A deterioração do concreto quando analisado por ensaios dinâmicos, ocorre de forma análoga aos ensaios estáticos, entretanto, o modo de propagação de fissuras, a velocidade de propagação e o dano podem ser diferentes em função do nível e da taxa de carregamento ao qual o material é submetido (DOWLING, 2012).

De modo geral, o nível de tensão S , que age no material, é de suma importância na análise e determinação da resistência à fadiga, ou vida útil (número de ciclos N , resistido antes da ruptura). O número N , pode ser descrito através da curva de Wöhler, ou curva S_x/N “Stress vs. Number”, que relaciona o nível de tensão aplicado ao número de ciclos que causam a ruptura no material. Para a maioria dos materiais, a curva de Wöhler mostra a existência de uma tendência na redução do número de ciclos à medida em que aumenta o nível de tensão (DOWLING, 2012).

Atualmente, apenas os materiais dúcteis, como os aços e as ligas, apresentam ábacos e curvas de Wöhler bem definidas. Para o concreto e outros materiais frágeis e quase-frágeis, ainda não existem curvas definidas para todas as classes e tipos, uma vez que o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à fadiga só ganhou destaque no decorrer das duas últimas décadas, ao passo em que os estudos correlatos às áreas de durabilidade, mecânica da fratura e mecânica do dano tiveram substancial avanço.

No que diz respeito ao desempenho do concreto quando submetido a cargas cíclicas, trabalhos vêm sendo desenvolvidos por estudos teóricos, experimentais e numéricos, e divididos quanto ao tipo de fadiga analisada, fadiga por tração (SUBRAMANIAM; SHAH, 2003; CHEN, et al., 2017), tração-compressão (LÜ et al., 2004), compressão (XIAO et al., 2013; LANTSOUGHT et al., 2016; JIANG et al., 2017) e flexão (KIM et al., 2013; ARORA; SINGH, 2016; KASU et al., 2019; SAIANI; SINSH, 2020). A maioria das pesquisas encontradas na literatura têm como objetivo a avaliação da fadiga à flexão, onde as tensões de tração são preponderantes.

No Brasil, por exemplo, as pesquisas são prioritariamente relacionadas à fadiga por flexão em vigas ou compressão e flexão em pavimentos de concreto, sendo a maioria de cunho numérico ou teórico-numérico (BARONI, 2010; JUNGES, 2017; MASCARENHAS; CARVALHO, 2019).

A principal dificuldade encontrada para o estudo experimental do comportamento do concreto à fadiga, no Brasil, remete-se à incipiência de equipamentos capazes de realizar ensaios cíclicos com alta velocidade de carregamento. Medeiros (2012), por exemplo, realizou parte de sua pesquisa no exterior, devido a indisponibilidade, na época, de máquinas e equipamentos de laboratório para ensaios de fadiga à compressão. O autor

analisou experimentalmente o ganho de resistência à fadiga devido a incorporação de fibras na matriz cimentante do concreto, verificando ainda, a influência de distintas frequências de carregamento.

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma análise teórico-experimental do comportamento da fadiga por compressão, a fim de analisar a vida útil de concretos de classe C30, quando submetidos a carregamentos cíclicos com diferentes frequências. Para o estudo, foram analisadas a vida útil (número de ciclos até a ruptura), a deformação específica máxima e os padrões de fissuração. Os ensaios foram realizados considerando três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz) e dois níveis de tensão máxima (50% e 70% da resistência à compressão).

2 Fadiga no concreto

2.1 Comportamento à fadiga do concreto

A fadiga é um fenômeno que ocasiona danos localizados, permanentes e progressivos, quando o material é submetido a cargas cíclicas (RITCHIE, 1988). O processo de degradação do concreto por fadiga, está associado à sua deterioração quando submetido a repetidas cargas e descargas, causando o surgimento e evolução de fissuras na matriz do material (CORNELISSEN, 1984).

Callister (2012) descreve que a fissura ocasionada no concreto devido ao fenômeno da fadiga é, de natureza frágil, existindo assim, pouca ou nenhuma deformação plástica associada à evolução do dano, e mais, que o dano progride até que ocorra a ruptura do material.

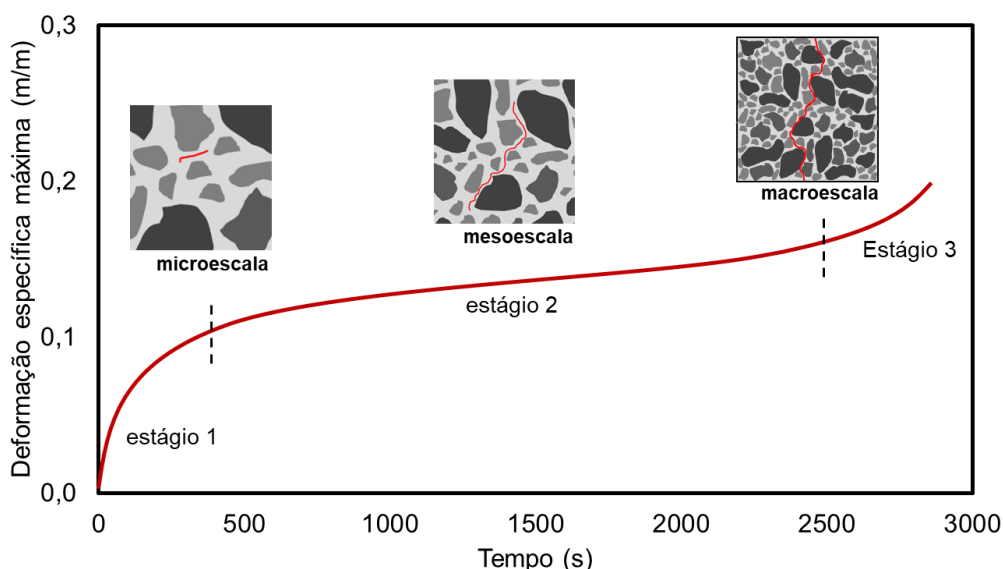


Figura 1 – Avanço de fissuras no concreto em função da deformação máxima e tempo de ensaio em corpos de prova submetidos à fadiga.

De modo geral, do surgimento da primeira microfissura até a ruptura do material, o dano por fadiga no concreto pode ser caracterizado por três estágios, de acordo com os níveis de

deformação (Figura 1): (i) origem da fissura, que é quando as microfissuras surgem devido à alta concentração de tensões em pontos de descontinuidades na estrutura cristalina ou, em regiões com descontinuidades pré-existent no material; (ii) propagação da fissura, devido ao acúmulo de energia nas extremidades das fissuras existentes; e (iii) ruptura do material, que ocorre de maneira abrupta, devido à natureza quase-frágil do material.

A fim de prever ou monitorar a vida útil de um elemento de concreto quando sujeito à fadiga, faz-se necessário conhecer o comportamento mecânico do material quando submetido à ciclos de carga e descarga. As propriedades do concreto referentes à fadiga são determinadas a partir de ensaios laboratoriais, e os dados obtidos geralmente são apresentados por meio do gráfico de tensão ou de deformação específica em função do número de ciclos até a ruptura, curva $S-N$ e $\varepsilon-N$, respectivamente.

Existem na literatura diversos modelos de previsão da vida útil do concreto quando submetido à fadiga, conforme apresentado nas Equações (1)-(4). Entretanto, boa parte dos modelos possuem como diretriz as curvas $S-N$ ou $\varepsilon-N$, obtidas em campanhas experimentais, às quais só atendem a um pequeno número de casos, o que inviabiliza o seu emprego de forma generalizada.

$$\frac{S_{max}}{f_{t,f}} = d + e \log(n) \quad \text{(Equação 1)}$$

$$\log(N) = 13,275 - 11,39 \left(\frac{S_{max}}{f_{ck}} \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\frac{S_{max}}{f_{est}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log(N) \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\log(N) = -2,66 - 0,94 \log(\dot{\varepsilon}_{sec}) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde S_{max} é a tensão máxima aplicada, $f_{t,f}$ é a resistência à tração na flexão estática do concreto, N é o número de ciclos para o colapso do material, d e e são parâmetros do material obtido por regressão dos dados, R é a razão entre a tensão mínima e máxima, f_{est} é a resistência característica do concreto, f_{est} é a resistência à compressão (depende da análise a ser feita) ou tração estática do concreto, $\dot{\varepsilon}_{sec}$ é a taxa de deformação específica secundária, ou ainda taxa de fluência secundária.

De acordo com Lee e Barr (2004), são muitos os motivos que inviabilizam o uso da curva de Wöhler (Equação (1)) de forma generalizada, sendo a principal, a determinação dos parâmetros por meio da regressão de dados, uma vez que existe uma dispersão considerável nos resultados de ensaios de fadiga, considerando corpos de prova do mesmo lote de ensaiados sob o mesmo nível de tensão.

Ortega et al. (2018) relatam que a grande dispersão nos resultados é decorrente da sensibilidade da resistência à fadiga a uma variedade de parâmetros relacionados ao ensaio e ao material, que são quase impossíveis de serem controlados de maneira precisa, como as condições de moldagem, o alinhamento do corpo de prova no equipamento de ensaio, a imposição das tensões máximas e mínimas, a frequência de carregamento e o posicionamento dos extensômetros ou Strain Gauges.

2.2 Fatores de influência na determinação da vida útil por fadiga

O Estudo da fadiga no concreto, teve suas primeiras publicações em meados da década de 20, com o trabalho de Clemmer (1922), onde foi observado que o concreto possui um comportamento distinto ao do aço, quando submetido a carregamento cíclico, e que este mecanismo de degradação estava correlacionado aos princípios da mecânica da fratura.

Ao longo dos últimos cem anos, após a publicação dos primeiros trabalhos, muitos estudos de fadiga no concreto foram desenvolvidos, sendo a maioria (até a década de 90) referentes à determinação de um modelo geral, que considerasse os distintos tipos de ensaios à fadiga: tração direta, tração na flexão, tração por compressão, compressão, e tração-compressão alternada.

De acordo com Medeiros (2012), o modo de carregamento influencia o comportamento do concreto à fadiga, uma vez que são distintos os fatores que governam o mecanismo de ruptura do concreto na compressão, tração ou flexão. Ademais, sabe-se que outros parâmetros podem influenciar na resistência à fadiga e vida útil, como os materiais constituintes, condições de umidade, relação entre tensões mínima e máxima (R), frequência de carregamento, entre outras.

Raithby e Galloway (1974) analisaram a influência das condições de umidade na determinação do número de ciclos até a ruptura do concreto convencional. Os autores analisaram as condições do concreto saturado, concreto seco ao ar por uma semana (Equação (2)), e concreto seco em forno por uma semana. Os resultados encontrados foram coincidentes com os observados por Cornelissen e Lewis (1986), onde o concreto saturado apresenta vida útil inferior ao do concreto seco ao ar, mas praticamente a mesma que o concreto seco em forno.

Tepfers e Kutti (1979) propuseram modelos para a determinação da vida útil de concretos submetidos à fadiga por compressão, tração e flexão, verificando por meio de análises estatísticas, que a Equação (3) atende aos diferentes tipos de carregamento. Entretanto, Cornelissen (1984) apresentou um estudo demonstrando que o modo de carregamento tem influência no comportamento do concreto à fadiga, e que um único modelo não representaria adequadamente o fenômeno para os diferentes tipos de carregamentos. Ademais, Cornelissen (1984) e Zhang et al. (1996) verificaram que os ensaios alternados causam maior redução na resistência à fadiga do que aqueles puramente em tração na flexão.

No que se refere aos materiais constituintes, ainda não se chegou a um consenso quanto a influência da relação água/cimento (a/c) e do consumo de cimento, os estudos de Tepfers e Kutti (1979) e Zhang et al. (1997) mostram que estes parâmetros são indiferentes ao comportamento do concreto submetido à fadiga por tração ou flexão, afetando apenas a resistência estática do material.

Quanto ao tipo de agregado empregado, Sparks (1982) mostrou que existe uma forte correlação entre a taxa de deformação secundária e o número de ciclos até a ruptura do concreto, fazendo com que concretos produzidos com agregado leve tenham uma menor vida útil, quando comparados aos concretos com agregado convencional (agregados de origem basáltica ou granítica). A Equação (4) apresenta a formulação desenvolvida pelo autor, para a vida útil de concretos contendo agregado graúdo convencional, submetidos a carregamento cíclico por compressão.

Por fim, sabe-se que frequência de carregamento (f) pode exercer grande influência no comportamento à fadiga do concreto, e mais, que ao se elevar a frequência, a vida útil à fadiga aumenta. Porém, a maioria dos trabalhos existentes na literatura, que corroboram com essa afirmação, foram desenvolvidos para altas frequências ($f > 1,0$) e para tensões máximas variando entre 75% e 95% da resistência estática (ZHANG et al., 1996). Jansen (1996) observou que para tensão máxima menor que 75% da resistência estática do concreto, as frequências entre 1 e 15 Hz apresentam pequena influência na resistência à fadiga, e mais, que uma redução de 100 vezes na frequência resulta numa redução de 10 a 30 vezes no número de ciclos.

3 Desenvolvimento experimental

A metodologia adotada no presente trabalho constitui-se de cinco etapas, conforme apresentado na Figura 2: i) seleção e caracterização dos materiais utilizados; ii) dosagem e moldagem dos concretos; iii) ensaios para definição de propriedades mecânicas do material, por meio de carregamento estático; iv) ensaio de fadiga à compressão; e (v) análise dos resultados obtidos.

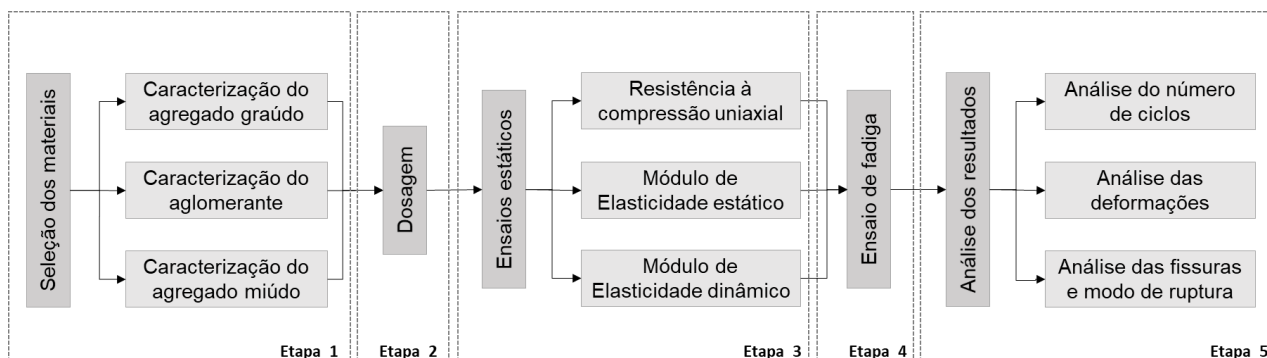


Figura 2 – Metodologia adotada na pesquisa.

3.1 Seleção e caracterização dos materiais

Neste estudo, para a produção dos concretos, empregou-se como aglomerante o cimento Portland CP II Z 32, composto com pozolana, com classe de resistência de 32 MPa. A massa específica ($3,06 \text{ g/cm}^3$) e a área superficial específica ($3965,00 \text{ cm}^2/\text{g}$) deste cimento foram determinadas de acordo com a NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001) e com a NBR 16372:2015 (ABNT, 2015b), respectivamente.

A areia quartzosa e brita 0 de origem basáltica, foram empregadas como agregados miúdo e graúdo, respectivamente. Para a caracterização dos agregados (Tabela 1), foram realizados os ensaios de composição granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção de água e módulo de finura.

Quanto à composição granulométrica do agregado miúdo, verificou-se que os dois lotes analisados se encaixam dentro dos limites granulométricos recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para areia fina. Em relação aos agregados graúdos, os resultados comprovaram a dimensão máxima característica de 9,5 mm, correspondente a brita 0.

Tabela 1 - Caracterização física dos agregados.

| Propriedades | Agregado miúdo | Agregado graúdo | Normas utilizadas |
|--------------------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|
| Massa unitária (kg/m³) | 1390,00 | 1401,00 | (NBR 7251, 1982); (NBR 7810, 1983) |
| Massa específica (kg/m³) | 2520,00 | 2590,00 | (NBR NM 53, 2003) |
| Absorção (%) | 0,22 | 1,45 | (NBR NM 53, 2003) |
| Módulo de finura | 1,46 | - | (NBR NM 248 2003) |

Relata-se que em todas as concretagens foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento local, sendo dispensável o controle de sua aceitação.

3.2 Dosagem dos concretos

Na presente pesquisa foi elaborado um traço para um concreto convencional, com resistência característica à compressão igual a 30 MPa. Para a dosagem, fez-se o uso do método da ABCP com abatimento fixado em (120±20) mm. Na Tabela 2 é apresentado o consumo de materiais, sendo o traço em massa de: 1; 2,26: 2,9:0,52.

Tabela 2 – Consumo de materiais do traço de concreto C30.

| Material | Consumo |
|----------------------|------------|
| Cimento (CP II Z 32) | 363 kg/m³ |
| Agregado miúdo | 820 kg/m³ |
| Agregado graúdo | 1049 kg/m³ |
| Água | 189 kg/m³ |

3.3 Ensaios com e sem carregamento estático

Para os ensaios de caracterização dos concretos com carregamento estático, foram moldados 60 corpos de prova com formato cilíndrico, 10 cm altura e diâmetro de 5 cm, ensaiados aos 28 dias, quanto: (i) resistência à compressão axial “ f_c ” (6 CPs); (ii) ao módulo de elasticidade estático “ E_s ” (6 CPs) e dinâmico “ E_d ” (todos os CPs ensaiados à fadiga), de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 8522 (ABNT, 2017) e ASTM E1876 (2015).

Os Ensaios do módulo de elasticidade dinâmico foram realizados por meio da técnica de excitação por impulso (TEI), uma técnica não destrutiva, a qual permite que o corpo de prova seja empregado em outro ensaio. Este ensaio foi realizado com o propósito de determinar a variação do módulo de elasticidade, e o dano correspondente, durante a realização do ensaio de fadiga.

O módulo de elasticidade dinâmico e seu respectivo módulo estático, obtido via formulação de Popovics (2008) (Equação (5)), foi determinado em todos os CPs antes do início dos ensaios de fadiga, e após ensaio com um número de ciclos de 20, 40, 60 e 80% de $N_{médio}$ (Número médio de ciclos que causa a ruptura da amostra).

$$E_c = 0,107 E_d^{1,4} \rho^{-1} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde E_c é o módulo de elasticidade estático (em Pa), ρ é a densidade do concreto (em kg/m³), E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (em Pa).

3.4 Ensaios de Fadiga

Para a realização dos ensaios de fadiga, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, submetidos à compressão cíclica em uma máquina servo hidráulica Instron 8805 de capacidade máxima de ± 1500 kN. A escolha dos corpos de prova foi realizada buscando uma dimensão com que a velocidade máxima de carregamento usada nos ensaios fosse inferior à velocidade máxima suportada pela máquina (80 kN/s).

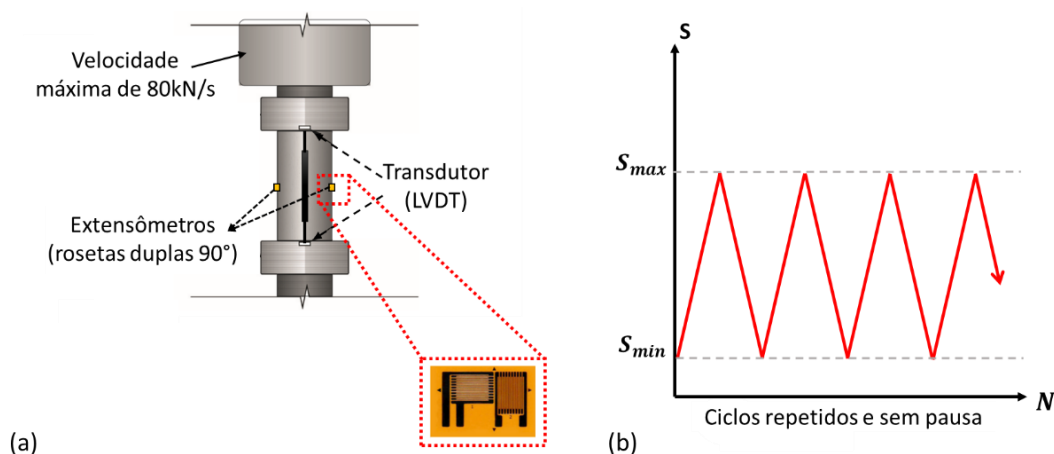


Figura 4 – Esquema (a) do posicionamento dos extensômetros no CP e (b) do carregamento cíclico de compressão.

A máquina servo-hidráulica possui controle eletrônico que recebe sinais analógicos de até seis canais diferentes, seja carga, deslocamento ou leitura proveniente de um extensômetro qualquer. A Figura 4.a mostra uma visão geral da posição dos dois extensômetros do tipo roseta dupla (com direções variando em 90°) e dois LVDT, utilizados nos CPs. Já na Figura 4.b é apresentado o esquema de carregamento cíclico empregado.

Os ensaios de fadiga foram configurados por meio do controle de carga. Como apresentado na Figura 4.b, a definição das cargas máximas e mínimas foi realizada considerando duas configurações distintas, uma para a carga máxima de 50% do f_c e outra para 70% de f_c , considerando nos dois casos, uma carga mínima de 0 kN.

Ao todo foram analisados quatro CPs para a determinação do número de ciclos médio, necessário para a ruptura por fadiga na compressão, para os seis casos estudados. Os seis casos se referem à combinação das três frequências de carregamento (0,125, 0,25 e 0,5 Hz) e, dos dois níveis de tensão máxima (50% e 70% de f_c).

Para facilitar a leitura dos resultados, utilizou-se a nomenclatura C30SXFYAZ, onde C30 remete à classe de resistência do concreto, SX refere-se à tensão máxima adotada (S5 para 50% e S7 para 70%), FY descreve a frequência do carregamento (F125 para 0,125 Hz, F25 para 0,25 Hz e F5 para 0,5 Hz) e, AZ remete-se ao número da amostra (A1, A2, A3 ou A4). A Figura 5 apresenta de forma simplificada todos os casos estudados neste trabalho.

A análise do dano, em função do número de ciclos, foi realizada após a determinação do $N_{médio}$ de cada um dos cenários. O dano foi mensurado em quatro CPs (Figura 5), sendo a

análise realizada para CPs submetidos à diferentes números de ciclos (20, 40, 60 e 80% do $N_{\text{médio}}$). Os resultados foram confrontados com os dados obtidos pelas curvas tensão vs. deformação, e analisados juntamente a inspeção macro visual do nível de fissuração do material.

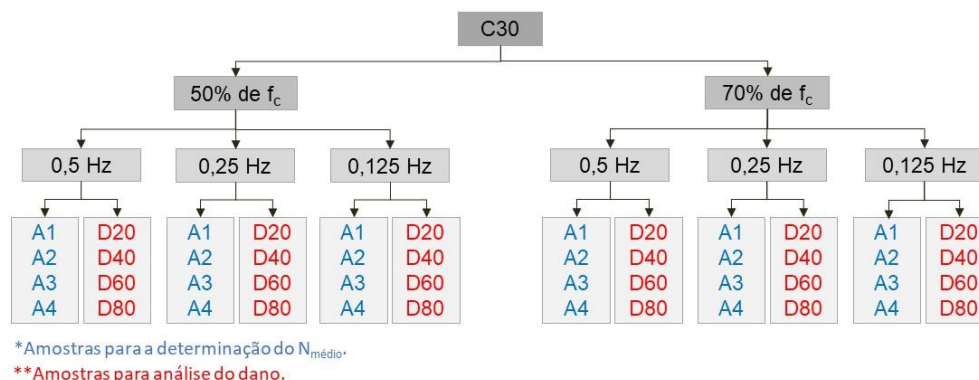


Figura 5 – Experimentos realizados neste trabalho.

4 Resultados

Inicialmente são apresentados na Tabela 3, os resultados da resistência à compressão axial (f_c) e módulo de elasticidade estático (E_s) para os CPs ensaiados aos 28 dias. Diante dos resultados obtidos é possível verificar que os ensaios estáticos apresentam, com boa confiabilidade, as propriedades mecânicas do concreto, uma vez que os desvios calculados para a resistência e o módulo de elasticidade, foram inferiores a unidade.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas aos 28 dias.

| Nº do ensaio | f_c (MPa) | E_s (GPa) |
|---------------|-------------|-------------|
| 1 | 36,89 | 35,1 |
| 2 | 37,43 | 34,85 |
| 3 | 38,61 | 35,68 |
| 4 | 37,23 | 35,59 |
| 5 | 36,82 | 35,26 |
| 6 | 36,14 | 34,92 |
| Média | 37,19 | 35,23 |
| Desvio padrão | 0,83 | 0,34 |

Após a determinação da resistência à compressão média, foram realizados os ensaios de fadiga para a determinação do número de ciclos até a ruptura. Os ensaios foram realizados para seis casos, de acordo com a Figura 5.

Na Figura 6, é apresentado um gráfico da variação do número de ciclos versus a frequência de carregamento, assim como, a mediana e o intervalo de confiança, considerando a média \pm o desvio padrão.

Diante dos resultados apresentados na Figura 6, é possível observar que mesmo para baixas frequências ($f < 1,0$), o número de ciclos necessário para levar as amostras à ruptura,

decrece à medida em que diminui a frequência de carregamento, comportamento observado também nos trabalhos de Zhang et al. (1996) e Medeiros (2012), onde foram analisadas fadiga em alta frequência ($f > 1,0$). Ademais, observa-se que este comportamento se apresenta independentemente do nível de tensão máxima aplicada (50% ou 70% de f_c), diferente do observado por Jansen (1996), onde o autor relata uma pequena ou quase inexistente influência da frequência na resistência à fadiga de concretos com tensões máximas inferiores à 75% da resistência à compressão.

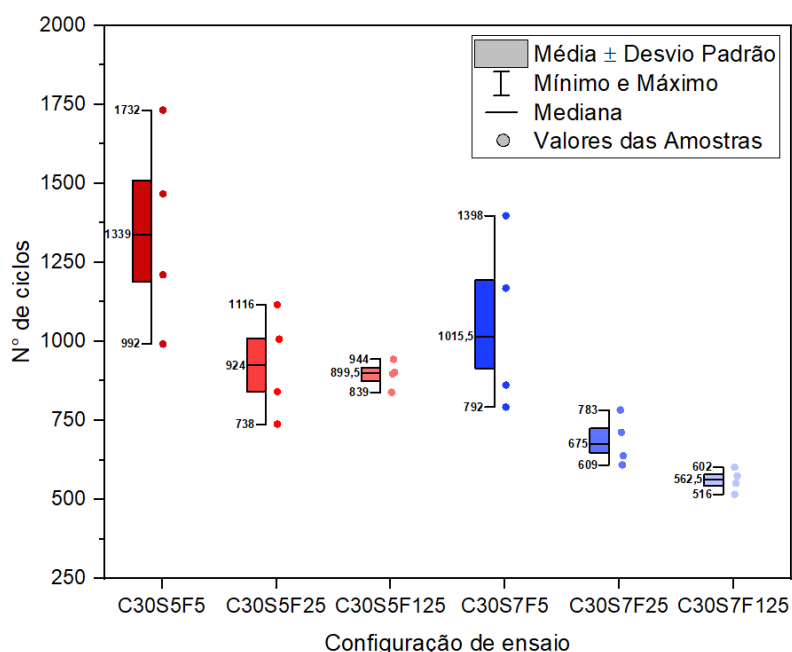


Figura 6 – Número de ciclos até a ruptura versus frequência de carregamento.

Considerando a variabilidade do número de ciclos necessário para levar a amostra à ruptura (Figura 6), observou-se que a dispersão dos dados em torno da média, decresce à medida em que frequência diminui, independente da tensão máxima empregada. Tal fato, indica que o grau de confiabilidade de modelos de estimativa da vida útil, de componentes estruturais de concreto sujeitos à fadiga por compressão, é função da frequência de carregamento. Ortega et al. (2018) encontraram resultados que corroboram com tal afirmação. Os autores verificaram que o grau de confiabilidade obtido em modelos de vida útil na fadiga com baixo número de ciclos, é maior que nas de alto número de ciclo, se considerado o mesmo número de amostras na criação da formulação.

Quanto a análise do efeito do carregamento cíclico nas deformações, a Figura 7 apresenta a evolução das deformações máximas ao longo do tempo, para as amostras com os maiores números de ciclos, de todas as configurações de ensaio. A fim de facilitar a comparação dos resultados, o tempo de ensaio foi normalizado e, as deformações plotadas em porcentagem.

Como pode ser observado nas Figuras 7.a e 7.b, as curvas referentes ao histórico da deformação máxima, podem ser descritas por meio de curvas do tipo “S”, ou denominadas de curvas de fluência cíclica, independente da frequência adotada, ou do nível de tensão empregado.

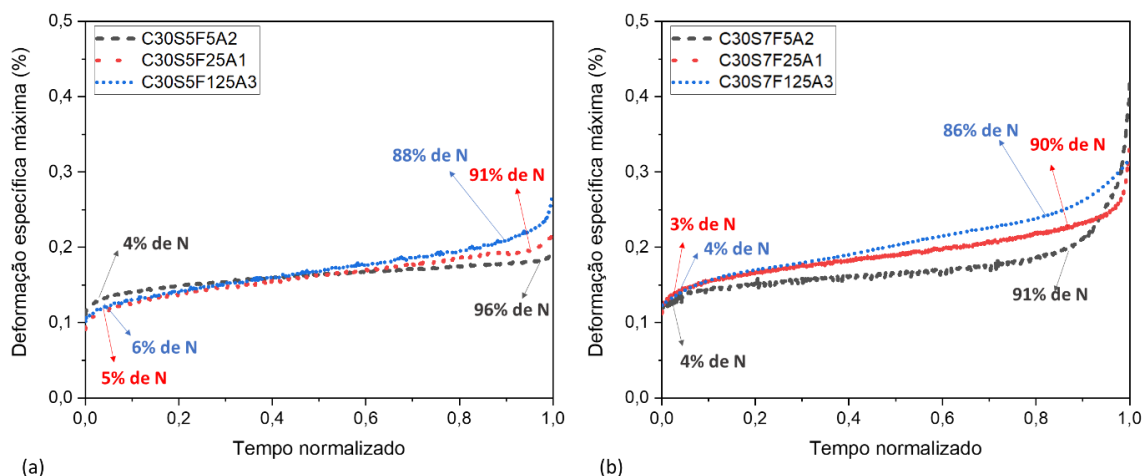


Figura 7 – Tempo normalizado versus deformação específica máxima para (a) 50% de f_c e (b) 70% de f_c .

Considerando ainda as curvas de deformação, pôde-se estimar os instantes de tempo, no qual o material se encontra nos diferentes estágios de degradação, conforme apresentado na Figura 1. Neste estudo, foi observado que independentemente do nível de tensão aplicado, a propagação de fissuras, definido pelo estágio II, ocorre em um intervalo médio de 85% do número de ciclos necessários para levar à ruptura (N), sendo os valores iniciais e finais, dependentes da frequência de carregamento, por exemplo, para o caso C30S5F5A2, o estágio II iniciou aos 4% de N e finalizou aos 96%, enquanto que para o caso C30S5F125, o início e o fim do estágio II foram, 6% e 88% de N, respectivamente. De modo geral, o intervalo de tempo, entre o surgimento das fissuras e o início da ruptura, decresce a medida em que diminui a frequência de carregamento, e para uma mesma frequência, o intervalo se mantém fixo para diferentes níveis de tensão máxima, desde que mantida a relação entre as tensões mínima e máxima.

Na Figura 8 são apresentados os níveis médios de dano para os casos analisados em função da razão entre o número de ciclos no instante da mensuração e, o número médio de ciclos necessários para leva a amostra à ruptura. Para a criação das curvas de ajuste, foram acrescentados os valores teóricos de dano para os instantes inicial ($D=0$) e final ($D=1$).

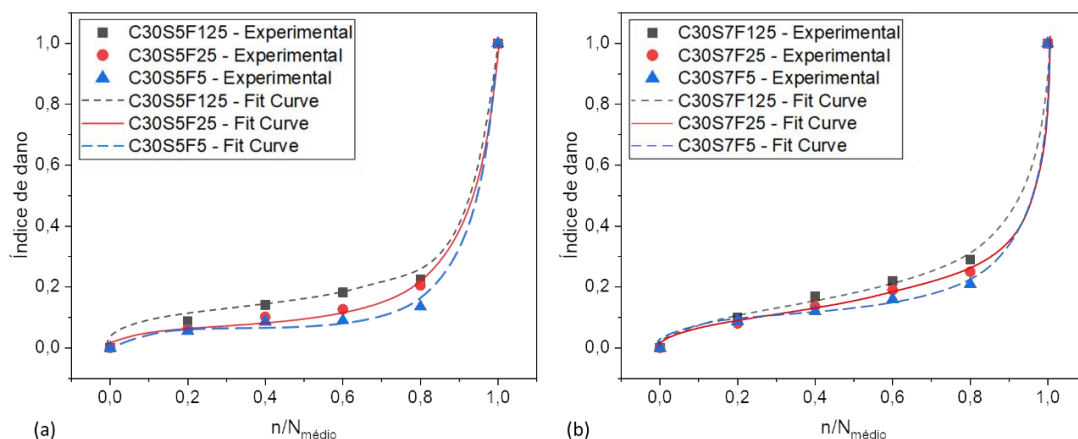


Figura 8 – Dano médio das amostras ensaiadas com (a) 50% de f_c e (b) 70% de f_c .

Diante da Figura 8, é possível indicar que uma curva do tipo “S”, pode ser empregada para representar o avanço do dano no concreto, em função do número de carregamento. Ademais, verifica-se que o índice de danificação do material, cresce em função do nível de tensão máxima aplicada, como esperado, e diminui com o aumento da frequência de carregamento. Este mesmo padrão de comportamento, foi constatado por Chen et al. (2017), em ensaios realizados em concretos sujeitos à fadiga por tração direta.

Na Figura 9 são apresentados os padrões de fissuração de duas amostras, C30S5F5 e C30S7F5, em diferentes instantes do ensaio (60%, 80% e 100% de N). Destaca-se que não são apresentadas as imagens referentes aos instantes antes de 60% de N, já que em nenhum dos casos analisados, foram identificadas fissuras na superfície do concreto.

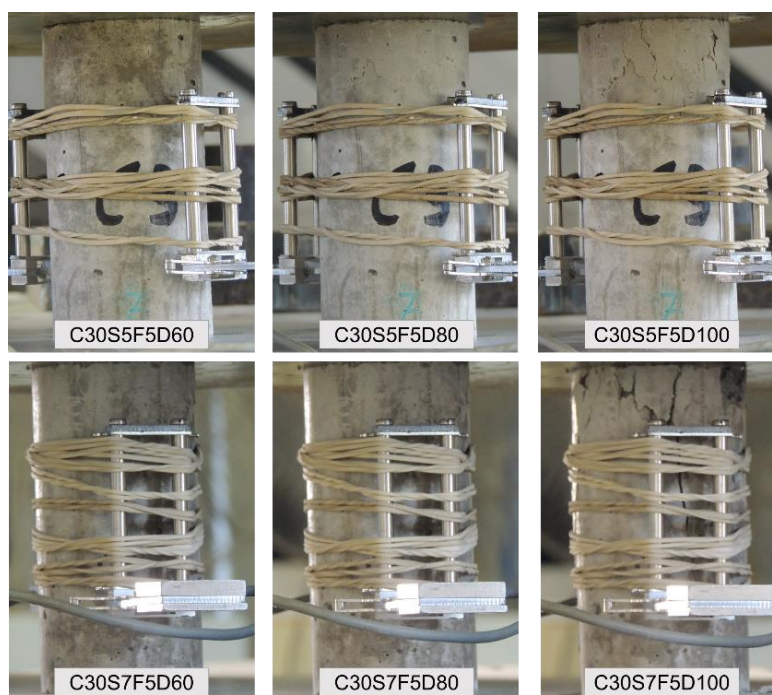


Figura 9 – Avanço da fissuração no concreto.

Analisando conjuntamente as Figuras 8 e 9, é possível notar que o índice de dano determinado pela variação do módulo dinâmico, obtido pela técnica de excitação por impulso, descreve coerentemente a perda de rigidez do material, dando um indicativo do seu nível de degradação.

Das Figuras 8 e 9, observa-se que as fissuras se tornam aparentes e, em maior proporção, após 80% de N, onde o dano já se situa entre 0,15 e 0,20. Ademais, como o dano em função do número de ciclos apresenta um comportamento semelhante ao da curva de fluência cíclica, pode-se inferir que a ruptura pode ocorrer após 80% de N, e que a ruptura se torna mais abrupta ao aumentar a frequência do carregamento.

5 Conclusões

O comportamento mecânico do concreto submetido à fadiga por compressão, incluindo a sua vida útil, a perda de rigidez, a evolução das deformações e do dano, foram investigadas neste ANAIS DO 62º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2020 – 62CBC2020

trabalho para dois níveis de tensão e três frequências de carregamento. Os resultados obtidos possibilitaram as seguintes considerações:

- A vida útil à fadiga aumenta a medida em que aumenta a frequência de carregamento aplicada, desde que mantido o nível de tensão aplicado. A razão para este fenômeno se deve ao fato de que para maiores frequências de carregamento, o material passa a ter seu comportamento mecânico governado por propriedades dinâmicas, e as propriedades dinâmicas do material são superiores às estáticas;
- Verificou-se que diminuiu o número de ciclos necessário para levar a amostra à ruptura ao aumentar o nível de tensão de 50 para 70% de f_c , sendo este fato acompanhado do aumento do nível de dano no material, conforme se vê em ensaios estáticos;
- A perda de rigidez do material é gradual e, função do número de carregamentos cíclicos. Foi observado que o dano pode ser descrito por meio de uma curva do tipo “S”, comportamento este, semelhante ao da curva de fluência cíclica. Ademais, relata-se que para índices de dano superiores a 0,2 ou 0,3, o material já se encontra em iminência de ruptura, sendo esta, mais abrupta ao aumentar a frequência de carregamento;
- Neste estudo, foi observado que independentemente do nível de tensão aplicado, a propagação de fissuras, ocorre em um intervalo médio de 85% do número de ciclos necessários para levar o corpo de prova à ruptura, sendo os valores iniciais e finais, dependentes da frequência de carregamento. O intervalo de tempo, entre o surgimento das fissuras e o início da ruptura, decresce a medida em que diminui a frequência de carregamento, e para uma mesma frequência, o intervalo se mantém fixo para diferentes níveis de tensão máxima, desde que mantida a relação entre as tensões mínima e máxima;
- O índice de dano determinado pela variação do módulo dinâmico, obtido pela técnica de excitação por impulso, descreve coerentemente a perda de rigidez do material, dando um indicativo do seu nível de degradação.

Por fim, os resultados encontrados neste trabalho indicam que a inclusão de parâmetros referentes à deformação e ao nível de danificação, podem apresentar uma ótima alternativa para o estudo e determinação de formulações referentes à predição da vida útil do concreto sujeito à fadiga por compressão.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (CNPq 141078/2018 e CNPq 310564/2018-2) e, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES código 001) pelo fomento fornecido à pesquisa.

7 Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo – Determinação absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015b.

ARORA, S.; SINGH, S. P. Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, n. 1, p. 782-791, 2016.

ASTM International. **ASTM E1876:** Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, 2015.

BARONI, H. J. M. **Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma introdução.** 5ª Edição, Editora LTC: Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

CHEN, X.; BU, J.; FAN, X.; LU, J.; XU, L. Effect of loading frequency and stress level on low cycle fatigue behavior of plain concrete in direct tension. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 367-375, 2017.

CLEMMER, H. F. Fatigue of concrete. **Proceedings, American Society for Testing and Materials**. v. 22, n. 2, p. 408-419, 1922.

CORNELLISSEN, H. A. W. **Fatigue failure of concrete in tension.** Heron, v. 29, n. 4, p. 2-67, 1984.

CORNELLISSEN, H. A. W.; LEEWIS, M. **Fatigue experiments for the design of plain concrete pavements.** Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, CROW-PIARC-CEMBUREAU, Report 1, Holanda, 1986.

DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue.** Practice Hall, 4th edition, United States, 2012.

JANSEN A. **Research to fatigue behaviour of topping on prefabricated concrete girders.** Thesis (Master). Delft University of Technology. Holanda, 1996.

JIANG, C.; XIANGLIN, G.; HUANG, Q.; ZHANG, W. Deformation of concrete under high-cycle fatigue loads in uniaxial and eccentric compression. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 379-392, 2017.

JUNGES, P. **Análise de fadiga em pontes curtas de concreto armado a partir de dados de sistemas B-WIM.** Tese (Doutorado). Centro Tecnológico: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

- KASU, S. R.; DEB, S.; MITRA, N.; MUPPIREDDY, A. R.; KUSAM, S. R. Influence of aggregate size on flexural fatigue response of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 1-9, 2019.
- KIM, J.; YI, C.; LEE, S.J.; ZI, G. Flexural fatigue behaviour of concrete under uniaxial and biaxial stress. **Magazine of Concrete Research**, v. 65, n. 12, p. 757-764, 2013.
- LANTSOGH, E. O. L.; VAN DER VEEN, C.; BOER, A. Proposal for the fatigue strength of concrete under cycles of compression. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 138-156, 2016.
- LEE, M. K.; BARR, B. I. G. An overview of the fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 299-305, 2004.
- LÜ, P.; LI, Q.; SONG, Y. Damage constitutive of concrete under uniaxial alternate tension–compression fatigue loading based on double bounding surfaces. **International Journal of Solids and Structures**, v. 41, p. 3151-3166, 2004.
- MASCARENHAS, F. Jr. R.; CARVALHO, R. C. Vida útil à fadiga da armadura longitudinal de vigas de pontes de concreto armado frente ao tráfego real de veículos pesados. **Revista AICONPAT**, v. 9, n. 3, p. 303-319, 2019.
- MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, IBRACON, 2014.
- ORTEGA, J. J.; RUIZ, G.; YU, R. C.; AFANADOR-GARCÍA, N.; TARIFA, M.; POVEDA, E.; ZHANG, X.; EVANGELISTA JR., F. Number of tests and corresponding error in concrete fatigue. **International journal of fatigue**, v. 116, p. 210-219, 2018.
- POPOVICS, J. S. **A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete**. University of Illinois, Urbana, IL. ACI-CRC Final Reports, 2008.
- RAITHBY, K. D.; GALLOWAY, J. W. Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete. ABELES Symposium: Fatigue of Concrete. **ACI Publication**, v. 41, p. 15-34, 1974.
- RITCHIE, R. O. Mechanisms of fatigue crack propagation in metals, ceramics and composites: role of crack tip shielding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 103, n. 1, p. 15-28, 1988.
- SAINI, B. S.; SINGH, S. P. Flexural fatigue life analysis of self-compacting concrete containing 100% coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 1-13, 2020.
- SPARKS, P. R. Influence of rate of loading and material variability on the fatigue characteristics of concrete. **ACI Journal**, v. 75, n. 16, p. 331-342, 1982.
- SUBRAMANIAM, K. V.; SHAH, S. P. Biaxial tension fatigue response of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 6, p. 617-623, 2003.
- TEPFERS, R.; KUTTI, T. Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete. **ACI Journal**, v. 76, n. 29, p. 635-652, 1979.
- XIAO, J.; LI, H.; YANG, Z. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 681-688, 2013.
- ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K. Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, p. 361-375, 1996.
- ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K. Further research on fatigue properties of plain concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 49, n. 78, p. 241-252, 1997.