

2. Fadiga em concreto

2.1. Comportamento à fadiga do concreto

O processo de degradação por fadiga está associado à deterioração sob carregamento cíclico, que leva ao surgimento e à evolução de microfissuras ou à propagação de microfissuras pré-existentes no material, podendo causar a ruptura da estrutura. A fadiga ocorre devido a um processo de degradação progressiva na microestrutura cristalina do material sujeito a condições de solicitações de magnitude inferior à sua capacidade resistente, isto é, as deformações ou as tensões impostas com magnitudes inferiores à deformação ou à tensão de ruptura.

A fissura por fadiga em concreto é de natureza frágil, no sentido de que existe pouca, se alguma, deformação plástica generalizada associada à fissura, ocorrendo o processo pela origem e propagação de microfissuras, sendo que geralmente a superfície de ruptura é perpendicular à direção de tensão aplicada (Callister, 2002).

No concreto, a fadiga tem origem em um nível microscópico e está associada ao aumento da abertura das fissuras e à redução da rigidez. Para o Instituto Americano do Concreto (ACI 215R-74, 1992), a ruptura por fadiga ocorre por uma microfissuração interna progressiva que por sua vez induz um incremento nas deformações no material.

Para o Comitê Europeu do Concreto (CEB 188, 1988), as fissuras por fadiga não têm uma topografia superficial definida, tornando-se difícil identificar a fadiga nas estruturas de concreto. A fadiga pode ocorrer em um elemento estrutural de concreto quando se desenvolve fissuração excessiva.

O processo de ruptura por fadiga é caracterizado por três etapas distintas que resultam no enfraquecimento gradual dos componentes estruturais:

- Etapa 1
(1a) Origem da fissura, quando uma pequena fissura se forma em algum ponto de alta concentração de tensões.

(1b) Descontinuidades pré-existentes, como microfissuras já existentes no material (devido à existência de falhas no concreto) previamente ao processo de fadiga.

(1c) Os dois itens anteriores, simultaneamente.

- Etapa 2: propagação da fissura, durante a qual a mesma avança em incrementos a cada ciclo, devido à existência de zonas de concentração de tensões.
- Etapa 3: ruptura final, que ocorre muito rapidamente, quando a fissura que está avançando atinge sua abertura crítica.

A ruptura por fadiga somente ocorre se o carregamento aplicado fornecer suficiente tensão para o crescimento e propagação das fissuras, ou para que alterações significativas ocorram no material, atingindo-se um estado de instabilidade e afetando a vida útil da estrutura. Esta situação é definida como o limite de fadiga do material. Esse limite de resistência à fadiga, também denominado resistência à fadiga, representa o maior valor de tensão cíclica que não irá causar a ruptura por fadiga, mesmo após incontáveis ciclos de carregamento e descarregamento, equiparáveis a um número infinito de ciclos (Castro e Meggiolaro, 2009).

As propriedades de fadiga podem ser determinadas a partir de ensaios de simulação em laboratório, e os dados obtidos geralmente são apresentados em gráfico de tensão S ou de deformação específica em função do número de ciclos N até a ruptura, para cada corpo de prova ensaiado.

Nos ensaios à fadiga dois tipos de comportamento $S \times N$ são verificados: (1) quanto maior a magnitude da tensão S , menor o número de ciclos N que o material é capaz de suportar antes da ruptura; (2) quando existe um limite de resistência à fadiga. Geralmente se considera como resistência à fadiga a tensão que não leve os corpos de prova a ruptura após dois milhões de ciclos.

Outro parâmetro importante que caracteriza o comportamento à fadiga de um material é a vida à fadiga, que representa o número de ciclos necessários para causar a ruptura em um nível de tensão específico. Existe sempre uma dispersão considerável nos resultados de ensaios de fadiga, uma variação no valor de N medido para vários corpos de prova ensaiados sob o mesmo nível de tensão, em especial para a fadiga em concreto (Lee e Barr, 2004).

A variabilidade nos resultados de ensaios de fadiga pode levar a incertezas de projeto quando a vida à fadiga, ou a resistência à fadiga estiverem sendo

consideradas. A variação nos resultados é consequência da sensibilidade da resistência à fadiga a uma variedade de parâmetros relacionados ao ensaio e ao material, que são impossíveis de serem controlados de maneira absolutamente precisa. No caso do concreto esses parâmetros incluem as condições de moldagem dos corpos de prova, o alinhamento do mesmo no equipamento de ensaio, a tensão média, a frequência dos ensaios, dentre outros.

Quanto maior o nível de tensão máxima, menor o número de ciclos alcançado, e mais rapidamente o concreto se deteriorará por fadiga, para uma mesma frequência de carregamento. De acordo com Stet e Frénay (1998) a ruptura é também acelerada pela redução da frequência de carregamento.

Estudos em laboratórios, tais como os de Cook e Chindaprasirt (1980, 1981), Cornelissen e Leewis (1986), Vandewalle (1998), dentre outros, têm mostrado também que a resistência à fadiga é afetada pela taxa de carregamento, sequência de carregamento, período de relaxação, tempo de cura, condições de umidade e temperatura, dentre outros.

Kim e Kim (1996) observaram que o concreto de elevada resistência apresenta comportamento à fadiga bastante distinto ao do concreto convencional, em que a resistência à fadiga é reduzida com o acréscimo da resistência do concreto.

O número de carregamentos repetidos para o colapso da estrutura pode ser empiricamente descrito por uma das equações mais conhecidas, a clássica equação SxN , que relaciona a tensão com o número de ciclos à fadiga, desenvolvida por Aas-Jakobsen (1970), dada por:

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_{t,f}} = 1 - \left(1 - \frac{S_{m\acute{i}n}}{S_{m\acute{a}x}}\right) \beta \log N \quad \text{eq.(2.1)}$$

onde $S_{m\acute{a}x}$ é a tensão máxima aplicada, $f_{t,f}$ é a resistência à tração na flexão estática do concreto, $S_{m\acute{i}n}$ é a tensão mínima aplicada, N é o número de ciclos para o colapso do material e β é um parâmetro do material obtido por regressão dos dados.

O primeiro termo da Equação 2.1 é determinado por uma razão entre tensões, sendo o quociente entre a tensão aplicada durante o ensaio e a resistência à tração na flexão estática do concreto.

A equação de Aas-Jakobsen foi desenvolvida a partir de ensaios de tração na flexão, contudo pode ser empregada para ensaios de compressão apenas

substituindo-se a resistência à tração na flexão estática pela resistência à compressão estática.

A curva SxN representada em função do logaritmo de N , também denominada como curva de Wöhler, escreve-se:

$$\frac{S_{máx}}{f_{t,f}} = d + e \log N \quad \text{eq.(2.2)}$$

onde d e e são constantes empíricas referentes ao material, obtidas por regressão dos dados. A maioria dos estudos existentes sobre fadiga de concretos apresenta resultados modelados por meio das Equações 2.1 e 2.2.

2.2. Fatores intervenientes na vida à fadiga

Os estudos de fadiga em estruturas vêm sendo realizados desde o século XIX com destaque para o alemão August Wöhler, entre 1850 e 1870, que introduziu diversas idéias e procedimentos usados até hoje no dimensionamento à fadiga. O foco desses estudos teve ênfase na análise de estruturas metálicas ferroviárias. O estudo de fadiga em concreto teve suas primeiras publicações na década de 20 nos Estados Unidos com Clemmer (1922), Crepps (1923), Clifford (1924) e Hatt (1924, 1925) *apud* Zhang *et al.* (1996) .

Desde então muitos estudos de fadiga em concreto foram desenvolvidos. O enfoque dos estudos levou a tipos distintos de ensaios à fadiga: tração na flexão, tração direta, compressão e tensões alternadas nos tipos de ensaios anteriores, de tal forma que não existe um ensaio padrão para caracterizar o comportamento à fadiga. O modo de carregamento – tipo de ensaio – influencia o desempenho do concreto à fadiga, visto que os fatores que governam a ruptura do concreto em compressão são distintos dos que em tração ou em flexão. Também podem influir na vida à fadiga os materiais constituintes, as condições de umidade, a relação entre tensões mínima e máxima, a frequência de carregamento, etc.

2.2.1. Modo de carregamento: tipos de ensaios

Crepps (1923) e Hatt (1924, 1925) *apud* Zhang *et al.* (1996) procuraram determinar o comportamento à fadiga do concreto realizando ensaios em tensão

alternada, concluindo que a tensão alternada não afetava a resistência à fadiga do concreto em relação a testes não alternados.

Zhang *et al.* (1996) relatam estudos similares onde Clemmer (1922) e Clifford (1924) observaram que a tensão alternada tinha uma pequena influência na resistência à fadiga do concreto.

Tepfers e Kutti (1979) desenvolveram um modelo à fadiga apoiado em ensaios em compressão. Posteriormente, os autores verificaram por meio de análise estatística que a mesma expressão poderia ser aplicada também para ensaios à fadiga em tração, propondo:

$$\frac{S_{máx}}{f_{est}} = 1 - 0,0685(1 - R) \log N \quad \text{eq.(2.3)}$$

onde f_{est} é a resistência à compressão ou tração estática do concreto e R é a razão entre a tensão mínima e a tensão máxima.

Em um estudo posterior Tepfers (1982) desenvolveu um ensaio cíclico com tensão alternada usando duas combinações de carregamento: a primeira com tensão de compressão constante na direção horizontal e com tensão de tração variável na direção vertical, e a segunda com tensão de tração constante na direção horizontal e com tensão de compressão variável na direção vertical. Esse autor verificou desta maneira que a tensão alternada afetou o comportamento à fadiga, mas observou que o efeito era muito pequeno para descrever um modelo de fadiga.

Cornelissen (1984) determinou o efeito da tensão alternada no comportamento à fadiga do concreto realizando duas séries de ensaios: tração-compressão e flexão alternada e propondo as seguintes equações de fadiga:

- tração-compressão

$$\log N = 9,36 - 7,93 \left(\frac{S_{máx}}{f_t} \right) - 2,59 \left(\frac{S_{mín}}{f_{ck}} \right) \quad \text{eq.(2.4)}$$

- flexão alternada

$$\log N = 9,36 - 7,45 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_{ct,f}} \right) - 1,93 \left(\frac{S_{m\acute{i}n}}{f_{ck}} \right) \quad \text{eq.(2.5)}$$

onde f_t é a resistência à tração pura e f_{ck} é a resistência à compressão axial.

O autor observou que o número de ciclos necessários para que ocorra o colapso aumenta com a diminuição da razão entre tensões, e que os ensaios em tração-compressão causam maior dano por fadiga no concreto do que os ensaios alternados em flexão.

Cook e Chindaprasirt (1980) analisaram a influência da história de tensões nas propriedades do concreto em compressão, e observaram que um carregamento de longa duração produziu um pequeno acréscimo na resistência e grande aumento na rigidez do concreto, enquanto o carregamento cíclico ocasionou uma leve diminuição na resistência e grande redução na rigidez do material. Esses autores relataram que ambas as histórias de carregamentos diminuíram o pico de tensão, e que o carregamento de longa duração resultou em redistribuição das concentrações de tensão, enquanto o carregamento cíclico produziu microfissuras.

Em um estudo posterior Cook e Chindaprasirt (1981) determinaram a influência do carregamento de longa duração e do carregamento cíclico nas propriedades do concreto em tração. Os resultados mostraram que o carregamento de longa duração reduziu a resistência à tração. Na história de carregamentos cíclicos uma análise estatística indicou que as diferenças de resistência não foram significativas. Observam também que o módulo de elasticidade apresentou uma leve redução para ambas as histórias de carregamentos, mostrando-se mais acentuada para concretos de baixas resistências.

Várias pesquisas apresentadas até então observaram que quanto maior a tensão máxima, maior o grau de deterioração do concreto, e que se a tensão for ampliada acarreta em um menor número de ciclos à fadiga.

Existiram controvérsias quando o assunto foi a influência da tensão alternada na resistência à fadiga do concreto, entre os resultados obtidos pelos diversos autores. Enquanto Crepps (1923) e Hatt (1924, 1925) *apud* Zhang *et al.* (1996) verificaram que a tensão alternada não influenciava a resistência à fadiga, autores como Clemer (1922) e Clifford (1924) *apud* Zhang *et al.* (1996) e Tefers (1982) observaram que existia uma pequena influência. Entretanto,

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.

Tal fato indica que com o passar dos anos a evolução tecnológica e o desenvolvimento de equipamentos mais modernos e precisos vêm mudando a maneira de se entender os fatores que afetam o desempenho do concreto à fadiga de modo um tanto sensível e por vezes controverso.

2.2.2. Materiais constituintes do concreto

Agregados

A influência do tipo de agregado foi avaliada por alguns pesquisadores, porém, não existe consenso quanto a influência no desempenho do concreto à fadiga.

Williams (1943) e Zhang *et al.* (1997) observaram que concretos com agregados leves apresentavam resistência à fadiga em flexão menor do que com agregados convencionais. Cornelissen (CEB 188, 1988) verificou que o mesmo ocorria em fadiga em compressão.

Contrariamente, Tepfer e Kutti (1979) e Sparks (1982) não encontraram diferenças na resistência à fadiga em compressão, e Cornelissen (CEB 188, 1988) constatou que o mesmo ocorria em tração para concretos com agregados leves e convencionais.

Waagard (1986) *apud* Zhang *et al.* (1997) afirma que em compressão os concretos com agregado leve resultaram em um maior número de ciclos do que os com agregado convencional. Saito (1984) *apud* Zhang *et al.* (1997) também observou melhor desempenho à fadiga para concretos com agregados leves, neste caso em ensaios de tração.

Não se pode afirmar então que agregados leves tem melhor ou pior desempenho à fadiga. A designação agregado leve é um tanto ampla, e não é certo que um agregado mais leve tenha obrigatoriamente piores propriedades mecânicas. Os estudos apresentados neste item mostram diferentes tipos de ensaios à fadiga, não permitindo a comparação precisa quanto ao tipo de agregado.

No tocante à dimensão máxima dos agregados, Iwama e Fukuda (1986) ensaiaram concretos com agregados de dimensão máxima de 20 e 40 mm e concluíram que não houve influência no comportamento à fadiga. Koyanagawa

et al. (1994) ensaiaram à flexão concretos com as mesmas dimensões máximas e verificaram que a diferença no comportamento à fadiga foi desprezível para elevadas tensões máximas, acima de 80%. Para tensões inferiores, a dimensão máxima de 20 mm teve um desempenho à fadiga levemente superior.

Fator água/cimento e consumo de cimento

Poucas publicações relatam a influência específica do fator água/cimento, ou do consumo de cimento no desempenho do concreto à fadiga.

Graf e Brenner (1934, 1936) *apud* Zhang *et al.* (1997) comentam que o aumento do fator água/cimento, ou do consumo de cimento, diminuem a resistência à fadiga. Klaiber e Lee (1982) relataram que a resistência à fadiga em flexão reduziu quando o fator água/cimento foi inferior a 0,4, porém, quando o fator a/c esteve entre 0,4 e 0,6 não houve variação significativa. Também em ensaios de fadiga em flexão, Zhang *et al.* (1997) não observaram influência na resistência à fadiga variando o fator água/cimento de 0,39; 0,45; 0,53; 0,65, apesar de a resistência estática ter aumentado com a redução de a/c.

No estudo de Tepfers e Kutti (1979) foram utilizadas duas dosagens de concreto com diferentes consumos de cimento, 236 e 365 kg/m³; esses autores reportam que o desempenho à fadiga em tração indicou ser independente do consumo de cimento.

Os relatos apresentados sobre a influência dos materiais constituintes no comportamento à fadiga do concreto permitem observar que não há consenso com relação a quanto, e como cada propriedade de cada material influi na resistência à fadiga do concreto. Enquanto algumas pesquisas mostram que certa característica de um dado material aumenta a resistência à fadiga do concreto, outros trabalhos relatam o contrário. Esse fato comprova o quanto é difícil ter uma precisão do comportamento à fadiga de um material heterogêneo, como é o caso do concreto, e o quanto é importante considerar as características dos materiais utilizados e as condições a que o concreto foi submetido quando fabricado.

É importante ressaltar que além do tipo de agregado, ou fator a/c que se está utilizando, existe a importância do tipo de ensaio que está sendo executado, se em tração direta, em compressão ou em flexão, observando-se que cada ensaio produz um efeito distinto no concreto.

2.2.3. Saturação do concreto

Na tentativa de determinar as diferenças no comportamento à fadiga de concretos secos ou saturados, Cornelissen e Leewis (1986) realizaram ensaios onde a tensão máxima foi situada entre 40% e 90% da resistência à tração, e a tensão mínima entre 0% e 40% da tensão de tração para ensaios em tração pura, e entre 0% e 30% da resistência à compressão para aqueles alternando-se tração-compressão. A frequência de carregamento foi mantida constante em 6 Hz. Aproximadamente trezentos resultados foram analisados para determinar o número de ciclos para o colapso, que podem ser descritos pelas seguintes expressões:

- ensaios em tração pura
 - amostras secas

$$\log N = 14,81 - 14,52 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_t} \right) - 2,79 \left(\frac{S_{m\acute{i}n}}{f_t} \right) \quad \text{eq.(2.6)}$$

- amostras saturadas

$$\log N = 13,92 - 14,52 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_t} \right) - 2,79 \left(\frac{S_{m\acute{i}n}}{f_t} \right) \quad \text{eq.(2.7)}$$

- ensaios alternando tração-compressão
 - amostras secas e saturadas

$$\log N = 9,36 - 7,93 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_t} \right) - 2,59 \left(\frac{S_{m\acute{i}n}}{f_{ck}} \right) \quad \text{eq.(2.8)}$$

A Figura 2.1 apresenta os resultados obtidos a partir das expressões propostas por Cornelissen e Leewis (1986).

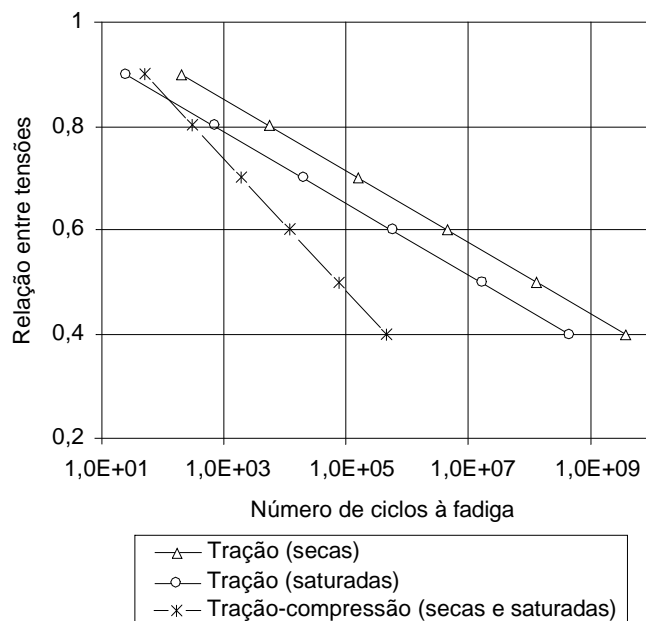


Figura 2.1 – Curvas $S \times N$ comparando amostras secas e saturadas (Cornelissen e Lewis, 1986).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2.1, as amostras ensaiadas secas tiveram um desempenho à fadiga superior ao das amostras saturadas. Esses resultados mostram ainda que os ensaios alternando-se tração-compressão apresentaram menor resistência à fadiga do que os ensaios em tração pura.

Raithby e Galloway (1974) estudaram a influência das condições de umidade no número de ciclos à fadiga em flexão do concreto convencional: com o concreto saturado, com o concreto seco ao ar por uma semana e com o concreto seco em forno por uma semana. Os ensaios foram realizados após seis meses da moldagem dos corpos de prova, e a razão entre as tensões máximas e a resistência à tração na flexão estática situou-se entre 55 e 95%. Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 20 Hz, as expressões obtidas por meio dos resultados publicados pelos autores, para cada método de cura analisado, são:

- amostras saturadas

$$\log N = 13,275 - 11,39 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_{ck}} \right) \quad \text{eq.(2.9)}$$

- amostras secas ao ar

$$\log N = 14,965 - 12,676 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_{t,f}} \right) \quad \text{eq.(2.10)}$$

- amostras secas em forno

$$\log N = 13,48 - 11,42 \left(\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_{t,f}} \right) \quad \text{eq.(2.11)}$$

As variáveis são as mesmas já definidas em equações anteriores. A Figura 2.2 apresenta os resultados obtidos a partir das expressões propostas por Raithby e Galloway (1974).

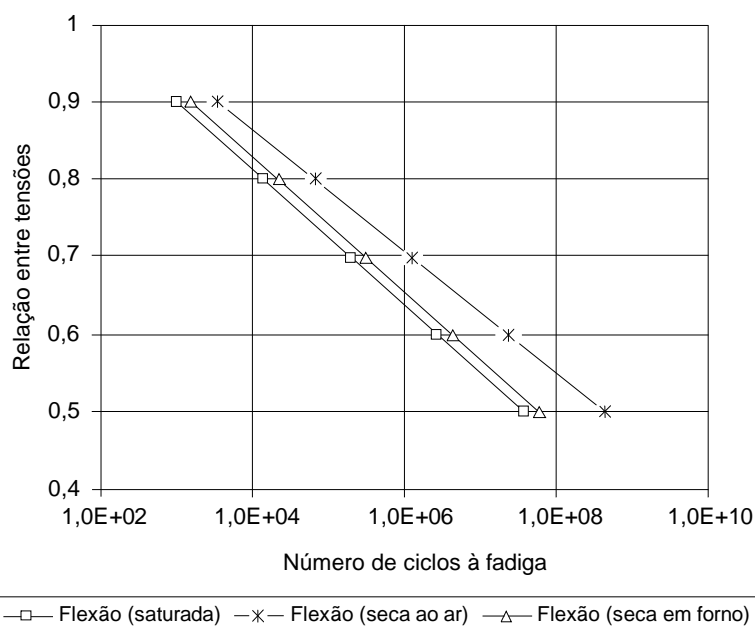


Figura 2.2 – Curvas SxN comparando-se amostras secas e saturadas (Raithby e Galloway, 1974).

Os resultados da Figura 2.2 mostram a mesma tendência do estudo de Cornelissen e Lewis (1986), verificando-se que o concreto saturado apresenta desempenho à fadiga inferior ao concreto seco ao ar, mas praticamente o mesmo desempenho que o concreto seco ao forno. Esses autores relataram que não existe uma evidência direta para explicar as diferenças ocorridas nas diferentes condições de umidade.

2.2.4. Condições climáticas

Um estudo sobre a influência das características climáticas no comportamento à fadiga foi desenvolvido por Domenichini e Di Mascio (1990), para avaliar pavimentos de concreto já construídos na Itália. Esses autores observaram uma grande influência dos parâmetros climáticos, destacando-se a amplitude diária da temperatura, a intensidade da radiação solar, a velocidade do vento, a média de precipitação anual e os ciclos de gelo e degelo.

De acordo com Balbo e Severi (2002) o gradiente de temperatura determina a magnitude de tensões. Podendo ser relevante em um dia quente de verão, onde maiores tensões são obtidas. Contudo, na análise de estruturas submetidas à fadiga, a frequência de variação da temperatura é muito menor em geral do que as frequências de carregamento que as estruturas são submetidas, sendo a variação de temperatura, então, consideradas como carregamento cíclico de longa duração.

2.2.5. Frequência de carregamento

A frequência de carregamento pode exercer influência no comportamento à fadiga do concreto sob certas condições. Os estudos apresentados a seguir apontam que para níveis de tensões elevados, acima de 75% da resistência estática do concreto, ao se elevar a frequência de carregamento, se eleva a vida à fadiga. Isso é, mantendo-se todas as variáveis constantes em um dado ensaio de fadiga, apenas alterando-se a frequência, quanto maior for a frequência, maior seria o número de ciclos até a ruptura. Seguindo-se esse raciocínio, um ensaio a alta frequência consumiria mais energia para levar um corpo de prova à ruptura quando comparado a um ensaio a baixa frequência.

Zhang *et al.* (1996) relatam sobre o trabalho pioneiro desenvolvido por Graf e Brenner na Alemanha entre os anos de 1934 e 1936, com relação ao estudo do efeito da frequência de carregamento no comportamento à fadiga do concreto em compressão. Esses autores constataram que uma frequência entre 4,5 e 7,5 Hz apresenta pequeno efeito na vida à fadiga, mas a vida à fadiga diminuiu quando a frequência foi reduzida para valores inferiores a 0,16 Hz.

Murdock (1965) *apud* Zhang *et al.* (1996) e Hanson (1974) constataram que quando a tensão máxima é menor do que 75% da resistência estática do

concreto, as frequências entre 1 e 15 Hz apresentam pequena influência na resistência à fadiga.

A experiência relatada por Sparks e Menzies (1973) mostrou que quando a tensão máxima estava entre 75% e 100% da resistência à compressão estática do concreto, o aumento na frequência de carregamento melhorou o desempenho à fadiga, porém, essa não foi quantificada. Entretanto, quando a tensão máxima foi menor, as frequências variando entre 0,1 e 100 Hz, não tiveram efeito sobre o número de ciclos à fadiga.

De acordo com Jansen (1996) até 75% da tensão estática máxima, para frequências variando desde 1 até 15 Hz, a influência na vida à fadiga é muito pequena. Para tensões mais elevadas a vida à fadiga vai decrescer com a diminuição da frequência. Esse autor mostra que frequências mais baixas resultam em um menor número de ciclos até a ruptura. Uma redução de 100 vezes na frequência resulta numa redução do número de ciclos em 10 a 30 vezes.

De acordo com o Cornelissen (1983) *apud* Milenkovic e Pluis (2000) se a frequência for reduzida por um fator 100, o número de ciclos até a ruptura reduzirá por um fator $\sqrt{100}$.

A influência da frequência de carregamento pode ser analisada por dois pontos de vista de acordo com Petkovic (1991) *apud* Milenkovic e Pluis (2000):

- 1 – o valor da frequência afeta os resultados de fadiga da mesma maneira que a taxa de carregamento afeta os resultados estáticos. Um aumento na frequência, portanto, é especialmente significativo para altos níveis de tensão;
- 2 – ao carregar o concreto a uma baixa frequência atuando durante um longo período de tempo pode levar à fluência do material. Esse fato também é significativo para níveis de tensão elevados.

Hohberg (2004) realizou uma série de ensaios de fadiga em compressão em concreto, variando a frequência desde 1 até 20 Hz e a razão entre tensões $S_{m\acute{a}x}/f_c$ de 0,60 a 0,84 em três diferentes resistências à compressão (25, 45 e 95 MPa); os resultados para as frequências mais baixas resultaram em número de ciclos até a ruptura menor para uma mesma razão entre tensões, comparado às frequências mais altas.

Raue e Tartasch (2005) compararam o número de ciclos até a ruptura com frequências de 1 e 5 Hz em ensaios de compressão em concretos aerados autoclavados, e o número de ciclos foi menor para a menor frequência.

Cervo (2004) apresenta resultados de ensaios de fadiga em flexão em prismas de concreto sob diferentes frequências: 1, 5 e 10 Hz. O número de ciclos até a ruptura reduziu para as frequências mais baixas. Comparando-se as duas frequências mais baixas, os resultados a 1 Hz foram maiores do que a 5 Hz. Esses resultados são mostrados na Figura 2.3.

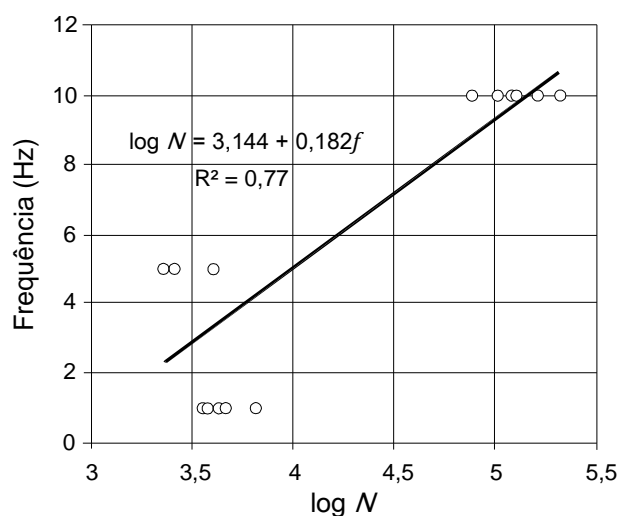


Figura 2.3 – Número de ciclos *versus* frequência (Cervo, 2004).

Cornelissen (1984) apresenta resultados de ensaios de fadiga em tração ou tração-compressão em flexão variando a frequência como mostram as Figuras 2.4 a 2.6.

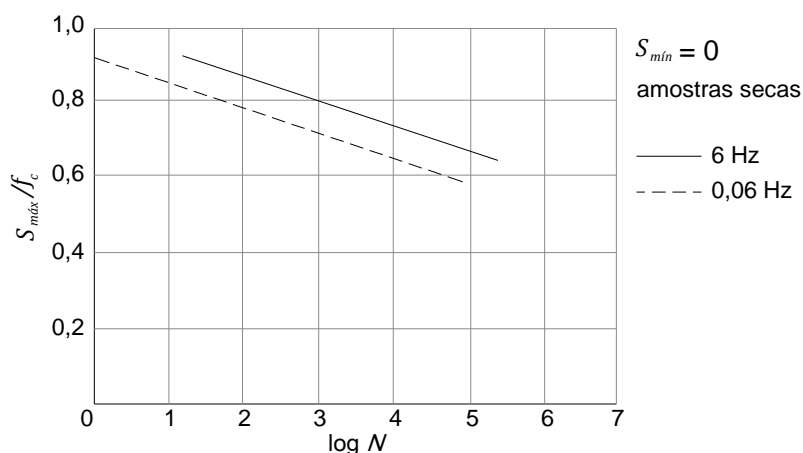


Figura 2.4 – Variação da frequência em ensaio de tração na flexão (Cornelissen, 1984).

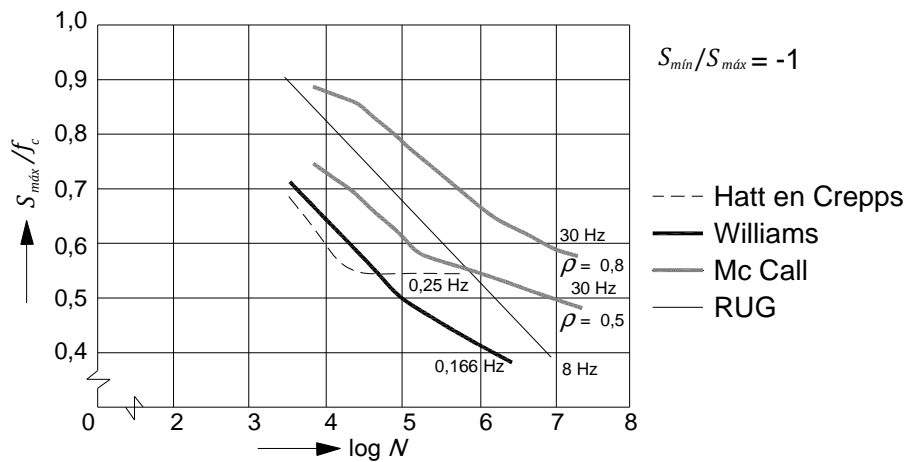


Figura 2.5 – Variação da frequência em ensaios de tensão alternada em flexão (Cornelissen, 1984).

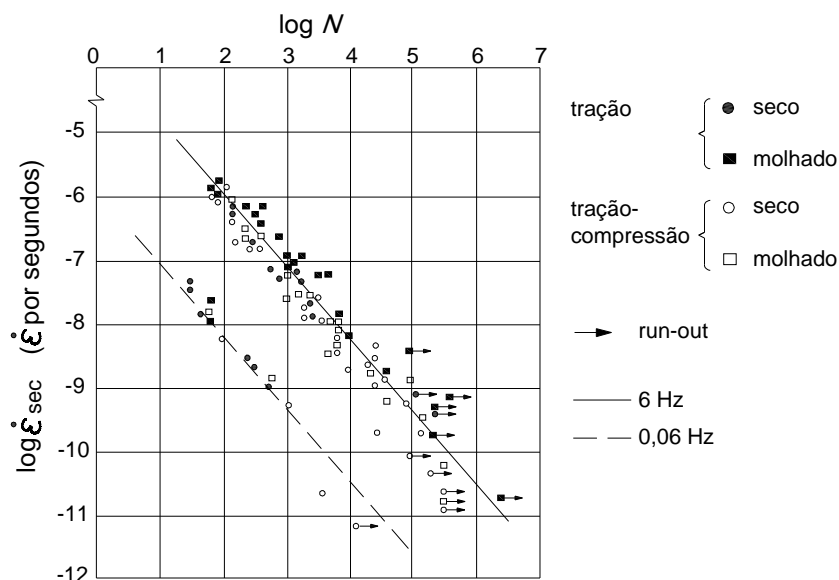


Figura 2.6 – Variação da frequência: ciclos *versus* taxa de fluência secundária (Cornelissen, 1984).

Pode-se observar nas Figuras 2.4 e 2.5 que para uma mesma tensão o número de ciclos em geral é menor para a menor frequência. Na Figura 2.6 observa-se que para uma mesma taxa de fluência secundária $\dot{\epsilon}_{sec}$ – ou taxa de deformação específica secundária – a vida à fadiga é menor para as menores frequências. Essas figuras apontam que a vida à fadiga é maior para as maiores frequências. Essa situação pode ser melhor visualizada na Figura 2.7, denominada curva de fluência cíclica (Sparks, 1982; Cornelissen, 1984; CEB 188, 1988; Hordijk *et al.*, 1995), onde a deformação específica máxima a cada ciclo é desenhada no eixo das ordenadas *versus* o tempo no eixo das abscissas.

Em geral a deformação específica total, ou mesmo a deformação total, aumenta gradualmente com o aumento do número de ciclos, sendo que a deformação específica total é função do nível de tensão, independente do número de ciclos até a ruptura (CEB 188, 1988). O desenvolvimento da deformação específica consiste em três períodos diferentes: um rápido crescimento de zero a 10% do tempo total; um crescimento uniforme de 10 a 80% (segundo período); um rápido crescimento até a ruptura. Esse segundo período pode ser expresso por uma reta, cuja inclinação seria a taxa de deformação específica secundária, ou ainda taxa de fluência secundária, $\dot{\epsilon}_{sec}$ (Figura 2.7).

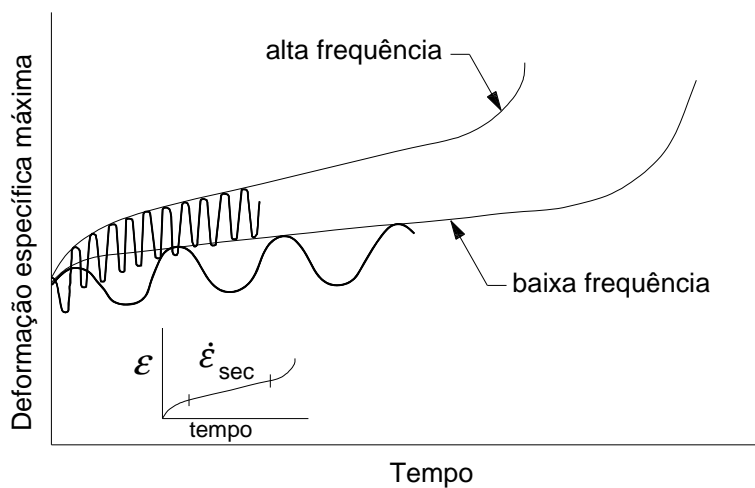


Figura 2.7 – Curva de fluência cíclica (Cornelissen, 1984).

Na Figura 2.7 verifica-se o tempo para o colapso é maior para a frequência mais baixa, assim como a inclinação do tramo central linear da curva – taxa de fluência secundária – é menor, contudo, o número de ciclos é menor.

Sparks (1982) afirmou que existe uma forte correlação entre a taxa de fluência secundária e o número de ciclos até a ruptura. Esse autor desenvolveu duas expressões para relacionar N e $\dot{\epsilon}_{sec}$, baseadas em ensaios de compressão em concretos com diferentes tipos de agregados, e relatou que essas expressões são independentes da frequência de carregamento, porém, são dependentes do tipo de agregado:

- concreto com agregados convencionais

$$\log N = -2,66 - 0,94 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad \text{eq.(2.12)}$$

- concreto com agregado leve

$$\log N = -3,79 - 1,06 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad \text{eq.(2.13)}$$

Cornelissen (1984) proveu uma expressão semelhante, para ensaios de flexão, válida para a frequência de 6 Hz:

$$\log N = -3,25 - 0,89 \log \dot{\epsilon}_{sec} \quad \text{eq.(2.14)}$$

Embora a influência da frequência de carregamento – ou do tempo – foi observada primeiramente na década de sessenta por Rüschi (1960) e confirmada por Awad e Kilsdorf (1971), Sparks e Menzies (1973) e Holmen (1979) na década de setenta, essa não foi incluída na clássica equação de fadiga até a década seguinte, quando Hsu (1981) e Furtak (1984) melhoraram a Equação 2.1, incluindo o período e a frequência de carregamento, respectivamente. Posteriormente Zhang *et al.* (1996) alteraram a equação proposta por Furtak redefinindo a razão entre tensões R para o caso de tensões alternadas.

Hsu (1981) propôs uma classificação do regime de fadiga em estruturas de concreto em função do espectro de carregamento cíclico durante a vida em serviço dessas estruturas (Tabela 2.1). Boa parte das estruturas sujeitas à fadiga de alto ciclo, tais como pavimentos em auto-estradas e em aeroportos e pontes, devem ter uma vida à fadiga correspondente a pelo menos dez milhões de ciclos de carregamento, assumindo-se uma vida útil em torno de 50 a 60 anos. Algumas estruturas necessitam ser projetadas para resistir a um maior número de ciclos entre 50 e 500 milhões. Essas formam, na classificação de Hsu (1981), a categoria das estruturas sujeitas a altíssimos ciclos de fadiga.

Tabela 2.1 – Classificação da fadiga em função do número de ciclos (Hsu, 1981).

Baixo ciclo			Alto ciclo				Altíssimo ciclo		
0	10^2	10^3	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Estruturas sujeitas a sismos		Pavimentos de aeroportos e pontes		Pontes e pavimentos em autoestradas		Estruturas para escoamento de tráfego nas grandes cidade		Estruturas marinhas	

Hsu (1981) realizou ensaios de fadiga introduzindo a frequência de carregamento como nova variável. Foram determinados dois modelos de fadiga,

um para alto ciclo de fadiga ($N > 10^3$) e outro para baixo ciclo de fadiga ($N < 10^3$):

- elevado número de ciclos à fadiga ($N > 10^3$)

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_c} = 1 - 0,0662(1 - 0,556R) \log N - 0,0294 \log T \quad \text{eq.(2.15)}$$

- baixo número de ciclos à fadiga ($N < 10^3$)

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_c} = 1,20 - 0,20R - 0,133(1 - 0,779R) \log N - 0,053(1 - 0,455R) \log T \quad \text{eq.(2.16)}$$

onde f_c é a resistência à compressão estática, R é a razão entre a tensão mínima e a tensão máxima aplicadas, T é o período de repetição da carga e as demais variáveis são as mesmas definidas em equações anteriores.

Esse autor desenvolveu essas equações com base em ensaios de compressão, porém, verificou as equações para ensaios à flexão encontrados na literatura e afirma que se for substituída a resistência à compressão estática f_c pela resistência à tração na flexão f_{tf} , os modelos se ajustam bem a dados experimentais de fadiga em flexão.

A Figura 2.8 apresenta uma curva $S \times N$ obtida a partir da Equação 2.15 para alto ciclo de fadiga, onde se pode observar que para uma mesma tensão, quanto maior a frequência maior seria o número de ciclos até o colapso.

Furtak (1984) também propôs um modelo à fadiga considerando o efeito da frequência, por meio de um coeficiente de frequência baseado em dados experimentais de fadiga em compressão:

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f_c} = CN^{-A}(1 + B'R \log N)C_f \quad \text{eq.(2.17)}$$

$$C_f = 1 + m(1 - nR) \log f \quad \text{eq.(2.18)}$$

onde A , B' , C , m e n são constantes determinadas experimentalmente, C_f é o coeficiente do efeito da frequência e f é a frequência de carregamento.

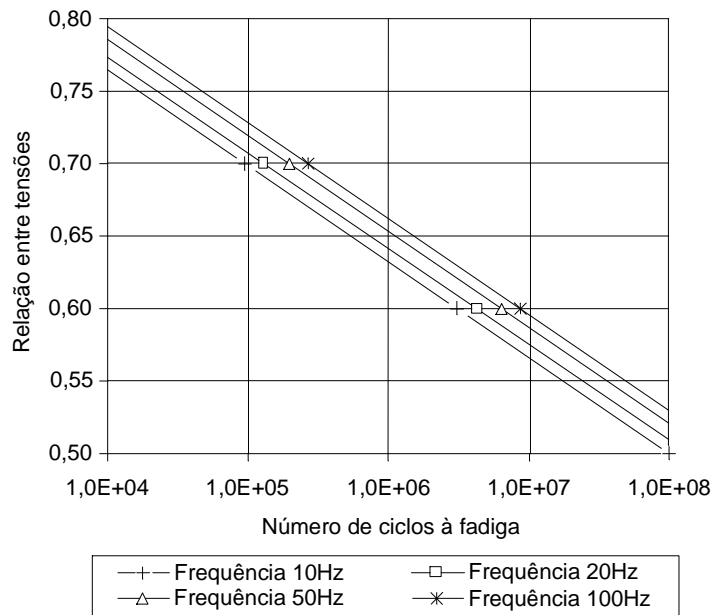


Figura 2.8 – Curva S_xN : alto ciclo à fadiga; modelo desenvolvido por Hsu (1981).

Zhang *et al.* (1996) desenvolveram um modelo considerando a influência da frequência de carregamento e o efeito da tensão alternada na resistência à fadiga, por meio de ensaios de tração-compressão e tração na flexão. As tensões mínimas variaram, com $R = 0,5; 0,2; 0; -0,2; -0,5; -0,8; -1$ e foram combinados em treze níveis de tensões máximas, $S_{máx}/f_{est} = 0,5$ a $0,975$. A frequência foi de 1 Hz para $N < 10^3$, 5 Hz para $10^3 \leq N \leq 10^5$ e 20 Hz para $N > 10^5$. A expressão obtida pelos autores foi a seguinte:

$$\frac{S_{máx}}{f_{est}} = (op^{-\log f} + q)[1 - (1 - R)\beta' \log N] \quad \text{eq.(2.19)}$$

$$R = R' = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} \quad \text{para } R \geq 0 \quad \text{eq.(2.20)}$$

$$R' = \left| \frac{f_{ct,f}}{f_{ck}} \right| R \quad \text{para } R < 0 \quad \text{eq.(2.21)}$$

onde o , p , q , e β' são constantes determinadas experimentalmente, f_{est} é a resistência estática, f é a frequência de carregamento, R é a razão entre as tensões mínima e máxima, R' é razão entre tensões para o caso de tensão alternada, $f_{ct,f}$ e f_{ck} são as resistências à tração na flexão e à compressão axial, respectivamente.

Os resultados apresentados por Zhang *et al.* (1996) que serviram de base para a elaboração da Equação 2.19, mostram que quanto maior a frequência de carregamento, maior a vida à fadiga – maior número de ciclos.

Os modelos apresentados por Hsu (1981), Furtak (1984) e Zhang *et al.* (1996) apontam para a mesma tendência ao compararem a frequência de carregamento com o número de ciclos até a ruptura; quanto mais baixa a frequência menor o número de ciclos. A Figura 2.9 apresenta uma simulação desses modelos mantendo-se constantes dados provenientes de um ensaio de fadiga (tensões máximas, mínimas e de compressão), variando-se apenas a frequência de carregamento. Esses modelos estão de acordo com os demais estudos expostos anteriormente neste item, onde frequências baixas levam a uma menor vida à fadiga e frequências altas levam um maior número de ciclos até a ruptura.

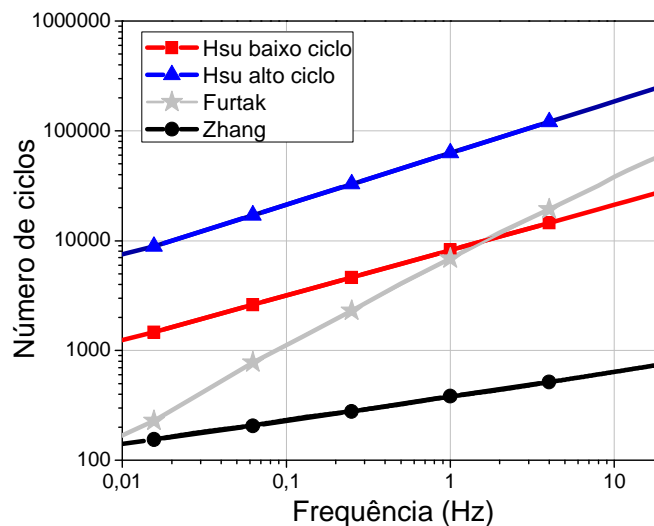


Figura 2.9 – Número de ciclos *versus* frequência por vários autores.

Em contrapartida um modelo simplificado apresentado por Siemes (1998) que relaciona a frequência f , o número de ciclos até a ruptura N_i^f a uma frequência f e o número de ciclos até a ruptura a frequência de 1 Hz N_i^1 , mostra resultados contrários ao expostos anteriormente, sendo:

$$\log N_i^f = \log N_i^1 - 0,65 \log \frac{1}{f} \quad \text{eq.(2.22)}$$

Seguindo-se esse modelo simplificado, arbitrando-se diferentes valores para o número de ciclos até a ruptura para 1 Hz e variando-se a frequência, desenhando-se o número de ciclos até a ruptura *versus* a frequência, a tendência apresentada contraria os modelos propostos anteriormente, onde o número de ciclos aumenta com a redução da frequência, como apresenta a Figura 2.10.

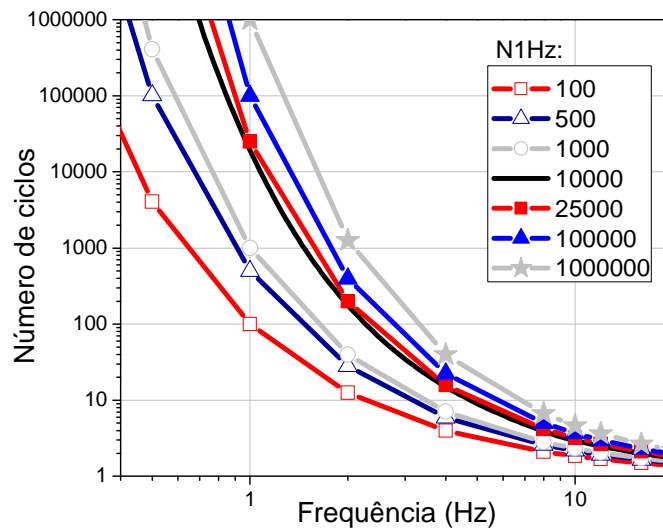


Figura 2.10 – Ciclos *versus* frequência; modelo simplificado de Siemes (1988).

A explicação provável para esta contradição está na simplicidade do modelo proposto por Siemes (1988), que visa relacionar diretamente a frequência com o número de ciclos sem o auxílio de dados como as tensões e resistências utilizados nos modelos tradicionais.

2.3. Comentários finais

Neste capítulo foram apresentados estudos debatendo-se a influência de diversos fatores no comportamento à fadiga do concreto, com destaque para a frequência de carregamento – um dos focos deste trabalho. O desempenho à fadiga do concreto com fibras será abordado no final do capítulo seguinte.