

4. Programa experimental

4.1. Introdução

Com o objetivo de verificar a influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga em compressão do concreto com e sem fibras, foi realizada uma pesquisa experimental no Laboratorio de Estructuras y Materiales da Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos da Universidade de Castilla-La Mancha em Ciudad Real, na Espanha.

Os corpos de prova de concreto de alta resistência foram moldados com a mesma dosagem de concreto, e divididos em três tipos denominados C1, C2 e C3. No tipo C1 foi utilizado o concreto sem fibras, no tipo C2 o concreto com fibras de polipropileno, e no tipo C3 o concreto com fibras de aço.

Todos os ensaios de fadiga foram realizados com as mesmas condições de carregamento variando-se apenas as frequências de carregamento, iniciando-se por 4 Hz, depois 1 Hz, 0,25 Hz e finalmente 0,0625 Hz.

Os resultados obtidos possibilitaram comprovar a influência da frequência e comparar o desempenho do concreto à fadiga em compressão nos três casos: sem fibras e com adição de dois diferentes tipos de fibras.

4.2. Produção dos concretos

Todo o concreto foi produzido em uma fábrica de estruturas pré-moldadas localizada na região metropolitana de Madri, Espanha.

A dosagem do concreto, os tipos de fibras, o conteúdo de fibras e o percentual volumétrico de fibras são apresentados na Tabela 4.1.

As fibras de polipropileno que foram utilizadas eram do tipo corrugada com ganchos suaves nas extremidades, com 40 mm de comprimento, seção retangular de 0,50 mm x 1,30 mm e esbeltez 62. A esbeltez – ou fator de forma – é a razão entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro equivalente. As fibras de aço tinham ganchos nas extremidades, com 35 mm de comprimento e seção circular com diâmetro de 0,55 mm, com esbeltez 64.

A Figura 4.1 mostra a foto das fibras e seus dados técnicos estão no Anexo A.

Tabela 4.1 – Dosagem dos concretos C1, C2 e C3.

Material:	Tipo:	C1	C2	C3
Cimento	ASTM tipo I 52,5R	437 kg/m ³		
Agregado miúdo	Areia d _{máx} 4 mm	828 kg/m ³		
Agregado graúdo	Brita d _{máx} 12 mm	947 kg/m ³		
Aditivo superplastificante	Glenium C-355	6,3 kg/m ³		
Água	—	153 kg/m ³		
Conteúdo de fibras	—	—	5 kg/m ³	50 kg/m ³
Teor volumétrico	—	—	0,56%	0,64%
Tipo de fibra	—	sem fibras	polipropileno	aço



Figura 4.1 – Foto das fibras de aço e de polipropileno.

Uma betoneira orbital de um metro cúbico de capacidade foi utilizada para a produção dos concretos. Para cada tipo de concreto foram produzidos setecentos litros para garantir uma mistura eficiente devido à grande capacidade da betoneira utilizada.

A sequência de produção do concreto, realizada na fábrica, relativa à introdução dos materiais e tempo de mistura foi a seguinte: agregados graúdo e miúdo (0 a 10 s), cimento (5 a 25 s), água (35 a 45 s) e super plastificante (65 a 75 s). A mistura prosseguiu até completar três minutos, quando as fibras foram introduzidas manualmente e a mistura prosseguiu por mais três minutos.

Foram realizados dois ensaios de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) para os concretos C1, C2 e C3 segundo a recomendação da norma europeia UNE-EN 12350-2 (2009). Um primeiro ensaio antes do início da moldagem dos corpos de prova, e um segundo no término com o objetivo de

avaliar a perda de plasticidade ao final da moldagem. O abatimento inicial foi de 24,0 cm para os três concretos. O abatimento final foi realizado 45, 78 e 45 minutos após o final da mistura e os valores foram 21,5 cm, 17,5 cm e 17,0 cm para os concretos C1, C2 e C3, respectivamente. A perda de abatimento entre o início e o fim da moldagem foi mais pronunciada nos concretos com fibras, mas não comprometeu a moldagem dos corpos de prova. Foi usado vibrador de imersão em todo o processo de moldagem.

Os corpos de prova permaneceram nos moldes durante 24 horas cobertos por uma lona plástica para evitar a perda de umidade. Logo após a desmoldagem foram armazenados em câmara úmida com temperatura e umidade controladas de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ e $95 \pm 1\%$, respectivamente.

4.3. Descrição dos corpos de prova

Foram moldados para cada tipo de concreto, oito cilindros grandes (150 mm x 300 mm – diâmetro x altura), vinte e cinco corpos de prova cilíndricos pequenos (75 mm x 150 mm – diâmetro x altura), e vinte corpos de prova prismáticos (100 mm x 100 mm x 450 mm – espessura x altura x comprimento).

Os cilindros pequenos foram utilizados em um programa piloto que serviu de base para o planejamento da parte experimental da pesquisa. Os resultados dessa fase piloto não serão apresentados neste trabalho em função do pequeno número de corpos de prova ensaiados: quatro por série e por frequência e os restantes para determinação da resistência à compressão de cada concreto. Nos ensaios piloto a influência da frequência foi verificada.

Os corpos de prova cilíndricos grandes foram utilizados para caracterizar as propriedades mecânicas dos diferentes concretos, aos 28 dias e também no momento em que foram realizados os ensaios de fadiga – aproximadamente um ano após a produção dos concretos. Os ensaios foram: resistência à compressão f_c – seguindo as recomendações da norma americana ASTM C39 (2010) –, módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν segundo a norma ASTM C469 (2010).

Os corpos de prova prismáticos foram utilizados primeiramente para se obter a resistência à tração por meio de ensaios de flexão em três pontos. Esses ensaios foram realizados seguindo-se as recomendações da RILEM 162-TDF (2002) e da norma europeia UNE-EN 14651 (2007). A partir dos prismas restantes foram talhados cubos de 100 ± 1 mm de aresta, e esses cubos foram

utilizados nos ensaios de fadiga em compressão. Não existe nenhuma norma específica para ensaios de fadiga em compressão de concretos com fibras, porém, as dimensões dos cubos foram escolhidas seguindo as normas dos ensaios de flexão em três pontos, onde as fibras deveriam ser pelo menos 2,5 vezes menores que a menor dimensão dos corpos de prova.

A idéia inicial era ensaiar seis corpos de prova prismáticos à flexão e obter 56 cubos a partir dos quatorze prismas restantes. De cada prisma foram obtidos quatro cubos, sendo dois deles das extremidades dos prismas e outros dois da parte central, como mostra a Figura 4.2. Para cada tipo de concreto foram realizadas cinco séries de ensaios em corpos de prova cúbicos: uma série de seis ensaios de compressão estática para obter a resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$, e mais quatro séries de dez ensaios de fadiga, uma série para cada frequência de carregamento. Sobrando dez cubos para cada tipo de concreto para eventuais perdas de corpos de prova antes ou durante os ensaios. Cada série de ensaios foi realizada sob condições de carregamento idênticas.

Os ensaios de fadiga foram configurados com base na resistência à compressão $f_{c_{cub}}$, como será descrito na sequência deste capítulo. Em cada série de ensaios os corpos de prova cúbicos foram selecionados de forma alternada de maneira que metade dos cubos foi cortada da parte central de um prisma e a outra metade dos cubos obtida de alguma das extremidades. Além disso, em nenhuma série os ensaios foram realizados utilizando-se cubos de um mesmo prisma.

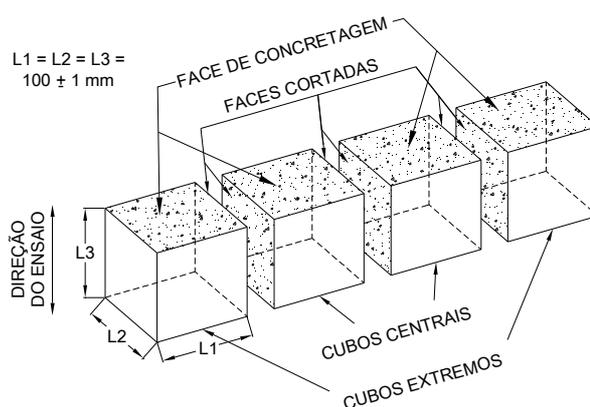


Figura 4.2 – Corpos de prova cúbicos cortados a partir de prismas.

Os cubos obtidos a partir das extremidades dos prismas tinham duas faces irregulares – a face superior, ou face de concretagem e uma face de corte –,

enquanto que os cubos centrais tinham três faces irregulares – a face de concretagem e duas faces de corte. Essas faces irregulares foram todas fresadas para garantir a paralelismo entre as faces e as dimensões dos cubos de 100 ± 1 mm. Os ensaios foram realizados sempre com a face de concretagem voltada para cima (Figura 4.2). Para os concretos com fibras sabe-se que as fibras têm orientação preferencial no sentido do comprimento dos prismas (Gettu *et. al.*, 2005; Schumacher, 2006; Akcay e Tasdemir, 2012). Sendo assim, a direção do ensaio foi sempre perpendicular à direção preferencial das fibras.

Todos os corpos de prova cúbicos utilizados foram cortados a partir dos corpos de prova prismáticos 28 dias após a produção de cada dosagem de concreto. Uma vez cortados e fresados os cubos voltaram para a câmara úmida onde permaneceram até a realização dos ensaios de fadiga.

Foram selecionadas quatro frequências de carregamento, iniciando-se por 4 Hz, depois 1 Hz, 0,25 Hz e finalmente 0,0625 Hz. Em cada série de ensaios de fadiga de pelo menos dez corpos de prova cúbicos foram ensaiados em condições de carregamento idênticas, para cada tipo de concreto e frequência. A Tabela 4.2 resume o total de ensaios realizados com os corpos de prova cúbicos. Para cada concreto foi realizada uma série de seis ou mais ensaios de compressão simples em cubos, para se obter a resistência média dos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$, pois os ensaios de fadiga de cada concreto foram configurados com base nessa resistência $f_{c_{cub}}$.

Tabela 4.2 – Série de corpos de prova cúbicos utilizadas nos ensaios de fadiga.

Dosagem de concreto	Resistência à compressão $f_{c_{cub}}$	Ensaio de fadiga (Hz)			
		4	1	0,25	0,0625
C1 sem fibras	6 + 6	13	10	10	10
C2 com fibras de polipropileno	6	11	10	10	10
C3 com fibras de aço	8	10	10	10	10

Foram realizados três ensaios de fadiga adicionais para o concreto sem fibras C1 na frequência 4 Hz, e um ensaio adicional para o concreto com fibras de polipropileno C2 também para a frequência 4 Hz. Também foram ensaiados dois corpos de prova a mais para a caracterização da resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ para o concreto C3.

Os ensaios de fadiga foram iniciados pelo concreto sem fibras C1, seis meses após a produção dos corpos de prova, para a frequência 4 Hz. A continuação dos ensaios para as demais frequências ocorreu um ano após a

produção dos corpos de prova. Por esse motivo foram ensaiados inicialmente seis cubos e posteriormente mais seis cubos à compressão para o concreto C1: os primeiros seis cubos aos seis meses, antes dos ensaios para a frequência 4 Hz; e outros seis cubos após um ano, antes dos ensaios das frequências 1 Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz. Com isso, a idéia inicial de se realizar para cada concreto seis ensaios de flexão, seis ensaios de compressão estática em cubos $f_{c_{cub}}$ e quarenta ensaios de fadiga – dez para cada frequência –, foi modificada no concreto sem fibras C1 porque os ensaios de fadiga foram realizados em idades diferentes: seis meses e um ano. E como alguns cubos do concreto sem fibras C1 foram perdidos quando cortados e outros foram utilizados para ajustar as configurações para os ensaios de fadiga, foi necessário reduzir o número de ensaios de flexão em três pontos do concreto C1 de três para seis ensaios.

Para os concretos com fibras C2 e C3 foram realizadas todas as séries de ensaios planejadas: uma série de seis ensaios de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos, uma série de seis ensaios de compressão estática em corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$, e mais quatro séries de dez ensaios de fadiga – uma série para cada frequência de carregamento.

4.4. Descrição dos ensaios e dos equipamentos

4.4.1. Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas obtidas para cada tipo de concreto foram a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, por meio de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos, e a resistência à tração na flexão e resistências residuais por meio ensaios em corpos de prova prismáticos.

Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson foram realizados em corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e altura de 300 mm. Para realizar tais ensaios foi utilizada uma máquina servo-hidráulica, da empresa Servosis, modelo MES-300 de 3000 kN. Essa máquina é composta de um pórtico de ensaios onde se situam dois pratos de compressão guiados por quatro colunas e um módulo central como mostra a

Figura 4.3. Os acessórios e extensometria necessários para cada tipo de ensaio foram adaptados à máquina em função das características específicas de cada ensaio. Essa máquina exerce uma força de compressão no corpo de prova até a ruptura do mesmo. Para o caso dos ensaios de compressão esta força é exercida perpendicularmente à seção transversal do corpo de prova, na direção do eixo do cilindro.



Figura 4.3 – Máquina servo-hidráulica de ensaios de compressão.

Dinamometria: para medir a carga aplicada nos ensaios, essa máquina utiliza um captador de pressão HBM P8AP 500B de ± 3000 kN, com sensibilidade de $2 \text{ mV/V} \pm 2\%$ e um erro máximo de $0,3\%$.

Extensometria: as deformações axiais e radiais medidas no ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são a seguir descritos.

- Deformações axiais: dois extensômetros resistivos Solartron do tipo AX/1/6. Esses extensômetros foram calibrados para um percurso de ± 1 mm, com uma sensibilidade de $213,77 \text{ mV/V/mm}$ e um erro inferior a $0,3\%$. Foram acoplados na posição vertical a anéis metálicos fixados no terço central dos corpos de prova cilíndricos (Figura 4.4).

- Deformações radiais: dois extensômetros resistivos Solartron do tipo AX/1/S que foram calibrados para um percurso de ± 1 mm, com erro menor que 0,22% e uma sensibilidade de 212,01 mV/V/mm. Esses extensômetros foram acoplados a um aparato fixado na metade da altura do corpo de prova (Figura 4.4).

A aquisição de dados e o controle da máquina de ensaios foram realizados por meio de software PCD 1065-W da empresa Servosis. Dos quatro extensômetros utilizados, dois foram para as medidas axiais e outros dois para as medidas radiais. A média de cada par de extensômetros era armazenada automaticamente.

Essa máquina utilizada para ensaios de compressão, assim como para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, funciona por meio do controle de carga. Para o ensaio de compressão a taxa de carregamento imposta foi de 0,20 MPa/s seguindo-se as recomendações normativas da ASTM C39 (2010). Para o ensaio de módulo de elasticidade primeiramente foi realizada uma pré-carga de compressão de 30 kN a uma velocidade de 0,30 mm/s, posteriormente o ensaio de compressão prosseguiu até 40% da carga de ruptura segundo recomendação da norma americana ASTM C469 (2010).

A Figura 4.4 ilustra os aparatos utilizados para posicionar os extensômetros radiais e axiais em um corpo de prova cilíndrico.

Para cada dosagem de concreto foram realizados quatro ensaios à compressão a cada idade: 28 dias e um ano após a produção dos concretos. O primeiro ensaio era realizado para obter somente a resistência à compressão. Utilizando-se 40% da resistência à compressão do primeiro ensaio, um segundo corpo de prova cilíndrico era ensaiado para obter o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, seguindo-se as recomendações da ASTM C469 (2010). Em seguida esse segundo corpo de prova era ensaiado até a ruptura para determinar a sua resistência à compressão. Para o terceiro cilindro, com a média das resistências dos ensaios anteriores era calculado o valor correspondente a 40% de f_c para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Continuando-se o ensaio até a ruptura, era obtida também a resistência à compressão desse corpo de prova. O mesmo procedimento era utilizado para o quarto corpo de prova, a partir da média da resistência dos três primeiros cilindros eram obtidos os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, e por fim a resistência à compressão. Para

cada dosagem de concreto e cada idade foram obtidos quatro valores de resistência à compressão, três resultados para o módulo de elasticidade e três valores de coeficiente de Poisson.



Figura 4.4 – Extensometria axial e radial em um corpo de prova cilíndrico: ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Todos os corpos de prova cilíndricos tiveram a face superior fresada para garantir a planicidade da face superior e da inferior.

Ensaio de flexão em três pontos

Para a obtenção da resistência à tração na flexão e resistências residuais foram realizados ensaios de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos de seção transversal de 100 mm x 100 mm e comprimento de 450 mm, em uma máquina servo-hidráulica híbrida de 250 kN. Essa máquina está montada em pórtico projetado pela empresa Servosis com um pistão hidráulico da marca Instron como mostra a Figura 4.5. O deslocamento máximo do pistão é de ± 50 mm, com um percurso máximo de 100 mm.

Seguindo-se as recomendações da RILEM 162-TDF (2002) e da norma europeia UNE-EN 14651 (2007) foi feito um corte na seção central dos corpos de prova prismáticos de altura igual a um sexto da seção transversal $h_{ent} = 1/6 H$.

Esse corte serve como entalhe inicial para induzir que a ruptura se iniciasse sempre na seção transversal central.

Dinamometria: para medir a carga aplicada nos ensaios dessa máquina foi utilizada uma célula de carga dinâmica de ± 25 kN, com erro inferior a $\pm 0,25\%$ da leitura entre 1% e 100% da capacidade da célula de carga. Sua sensibilidade varia entre 1,6 e 2,4 mV/V.

Extensometria: no ensaio de flexão em três pontos foram medidos o deslocamento vertical e abertura de fissura ou abertura da boca do entalhe (CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*).

- Para medir o deslocamento vertical, ou flecha, foram utilizados dois extensômetros indutivos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) Solartron, do tipo AS/2.5, de $\pm 2,5$ mm, com erro menor que 0,25%.
- Para a medida da abertura de fissura CMOD foi utilizado um extensômetro resistivo do tipo *clip gage* de ± 5 mm, marca Instron modelo 2630-111 com erro inferior a 0,30%.



Figura 4.5 – Máquina híbrida adaptada para ensaios de flexão em três pontos.

A Figura 4.6 mostra os LVDT posicionados um a cada lado do corpo de prova medindo o deslocamento do ponto de aplicação de carga, e também o *clip gage* medindo a abertura da fissura CMOD abaixo do corpo de prova.

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados associado à própria máquina, e os dados foram armazenados de forma contínua a uma taxa de aquisição de 2 Hz. O deslocamento vertical armazenado foi a média automática dos dois deslocamentos medidos pelos LVDT.

Os ensaios foram realizados por controle de deslocamentos onde foi imposta uma taxa de carregamento de 0,20 mm/s, seguindo as recomendações da RILEM 162-TDF (2002) e da norma europeia UNE-EN 14651 (2007).



Figura 4.6 – Extensometria do ensaio de flexão em três pontos.

Observa-se na Figura 4.6 que os apoios do corpo de prova são cilindros metálicos que permitem rotação em torno do seu eixo, seguindo-se as recomendações normativas. Abaixo do corpo de prova prismático foram colocados dois pequenos cilindros de concreto apenas para segurança do *clip gage*, no caso de uma ruptura brusca. Procedimentos de segurança adicionais foram impostos por meio do software configurador do ensaio, o qual permite estabelecer limites para cada um dos canais de leitura: carga, deslocamento ou extensômetros. Com isso os limites máximos de leitura desses canais jamais seriam ultrapassados, garantindo-se a qualidade dos resultados armazenados e a segurança dos equipamentos utilizados.

Existem diversas normas e recomendações de como avaliar o comportamento pós-pico de ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos

de concreto com fibras (JSCE-SF4, 1984; Banthia e Trottier, 1995; ASTM C1018, 1997; RILEM TC 162-TDF, 2002; ASTM C 1609/C, 2005; UNE-EN 14651, 2007; entre outras). A maioria dessas normas fornece índices de tenacidade ou índices equivalentes a distâncias pré-determinadas de deslocamento vertical ou de abertura de fissura, para avaliar energias consumidas durante ensaio, ou resistências residuais à tração na flexão.

Neste trabalho foram calculadas a resistência à tração na flexão e as resistências residuais segundo a norma UNE-EN 14651 (2007) por:

$$f_{(R)j} = \frac{3F_j S}{2B(H - h_{ent})^2} \quad \text{eq.(4.1)}$$

onde

f_j – resistência à tração na flexão para cada ponto j determinado;

F_j – carga em cada ponto j determinado;

S – vão entre apoios, mantido constante em 360 mm;

B – espessura do corpo de prova;

H – altura do corpo de prova;

h_{ent} – profundidade do entalhe.

Essa norma sugere que sejam obtidas resistências residuais à tração na flexão f_{Rj} a distâncias predeterminadas de abertura da boca do entalhe – ou abertura de fissura – CMOD, correspondentes a $CMOD = CMOD_j$ ou $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3$ e 4), onde F_1 é a carga correspondente a $CMOD_1 = 0,5$ mm, F_2 para $CMOD_2 = 1,5$ mm, F_3 para $CMOD_3 = 2,5$ mm e F_4 para $CMOD_4 = 3,5$ mm como mostra a Figura 4.7. Por exemplo, f_{R3} é a resistência residual à tração na flexão correspondente a uma abertura de fissura CMOD de 2,5 mm. A resistência à tração na flexão f_{tf} é obtida usando-se a Equação 4.1 utilizando-se a carga máxima $P_{máx} = F_j$.

Na impossibilidade de se medir a abertura de fissura CMOD, a norma europeia fornece uma relação entre a flecha δ e CMOD:

$$\delta_j = 0,85CMOD_j + 0,04 \quad \text{eq.(4.2)}$$

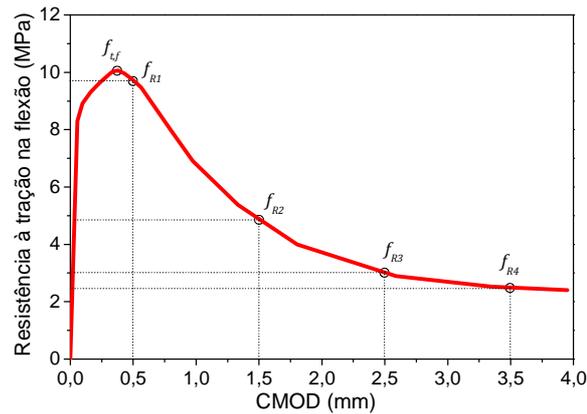


Figura 4.7 – Resistências residuais à tração na flexão (UNE-EN 14651, 2007).

4.4.2. Ensaio de fadiga

Para a realização dos ensaios de fadiga em compressão foram utilizados corpos de prova cúbicos de 100 ± 1 mm de aresta, em uma máquina servo-hidráulica Instron 8805 de capacidade máxima de ± 100 toneladas. A escolha de corpos de prova cúbicos foi realizada buscando uma dimensão de corpo de prova com carga de ruptura próxima da carga máxima da máquina de ensaios, e que a dimensão mínima fosse pelo menos 2,5 vezes maior que o comprimento das fibras. Não foram escolhidos cilindros padronizados de diâmetro 100 mm, pois esses teriam carga de ruptura inferior a cubos de 100 mm de aresta, enquanto que cilindros padronizados de diâmetro 150 mm superariam a capacidade da máquina de ensaios.

Essa máquina servo-hidráulica tem um controle eletrônico que recebe sinais analógicos de até seis canais diferentes, seja carga, deslocamento ou leitura proveniente de um extensômetro qualquer. Esses sinais são filtrados e convertidos em sinais digitais, e qualquer um desses sinais poderia controlar os ensaios. A Figura 4.8 mostra uma visão geral desta máquina de ensaios.

Dinamometria: foi utilizada uma célula de carga dinâmica de ± 1000 kN, com um erro inferior a $\pm 0,25\%$ da leitura entre 1% e 100% da capacidade da célula de carga. Sua sensibilidade varia entre 1,6 e 2,4 mV/V.

Extensometria: foram utilizados extensômetros indutivos LVDT idênticos aos descritos anteriormente no item 4.4.1. Esses LVDT foram utilizados somente nos ensaios para a obtenção da resistência à compressão em corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$.

O sistema de aquisição de dados utilizado é associado à própria máquina de ensaios e permite o armazenamento de dados em diversas configurações,

assim como taxas de armazenamento, as quais variaram entre os ensaios de compressão $f_{c_{cub}}$ e de fadiga, e entre os ensaios de fadiga a diferentes frequências de carregamento. A Tabela 4.3 apresenta as taxas de armazenamento utilizadas para cada tipo de ensaio.

Tabela 4.3 – Taxas de armazenamento de dados: ensaios em corpos de prova cúbicos: compressão e fadiga.

Tipo de ensaio	Frequência de carregamento	Taxa de armazenamento de dados	Dados por segundo
Compressão $f_{c_{cub}}$	ensaio estático	10 Hz	10
Fadiga	4 Hz	500 Hz	125
	1 Hz	200 Hz	200
	0,25 Hz	50 Hz	200
	0,0625 Hz	10 Hz	160



Figura 4.8 – Máquina de ensaios utilizada para os ensaios de fadiga.

Os ensaios de fadiga foram configurados por meio do controle de carga. Para se obter as cargas máximas e mínimas para cada dosagem de concreto foi necessário ensaiar corpos de prova cúbicos, visto que a resistência à compressão dos cubos $f_{c_{cub}}$ difere da resistência à compressão obtida nos corpos de prova cilíndricos.

Para se obter essa resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$ os ensaios de compressão foram realizados por meio do controle de deslocamentos com o intuito de permitir o armazenamento dos dados do ensaio após a carga máxima. Caso fosse utilizado o controle de cargas, uma vez alcançada a carga máxima, a máquina de ensaios buscaria uma carga superior e ocorreria a ruptura brusca do corpo de prova. Enquanto que no controle por deslocamentos após a carga máxima ocorre o abrandamento de tensões e é possível obter o comportamento pós-pico. A taxa de carregamento utilizada nesses ensaios foi de 0,1 mm/min e foi calculada para ser equivalente a 0,20 MPa/s como sugere a norma americana ASTM C39 (2010).

Para o controle de carga dos ensaios de fadiga foi utilizado um sinal senoidal como mostra a Figura 4.9.

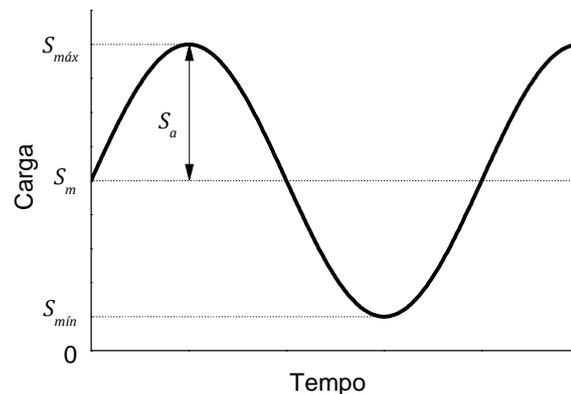


Figura 4.9 – Sinal senoidal: parâmetros de configuração do ensaio de fadiga.

onde $S_{máx}$ e $S_{mín}$ são as tensões máxima e mínima, S_m a tensão média e S_a a amplitude de carregamento.

Todos os ensaios de fadiga tiveram as mesmas configurações quanto à tensão máxima $S_{máx} = 85\%$ da resistência à compressão média dos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$ e razão entre tensões mínima e máxima $R = S_{mín}/S_{máx} = 0,3$. Como os ensaios foram controlados por carga, as dimensões de todos os cubos foram medidas com precisão de centésimos de milímetro e foram calculados os valores de carga correspondentes às tensões máximas e mínimas a serem aplicadas em cada corpo de prova.

Os ensaios de fadiga foram realizados em três etapas:

- a primeira etapa o corpo de prova cúbico foi comprimido em passos de 100 kN por minuto até $2/3$ da tensão média S_m . Nessa etapa, os parafusos da

rótula do prato superior de compressão estavam afrouxados para corrigir qualquer pequena imperfeição no paralelismo entre as faces inferior e superior do cubo. Os parafusos eram então apertados, garantido que todo o dispositivo estivesse imóvel. E uma gaiola metálica era colocada ao redor do ensaio, por medida de segurança, para prevenir que fragmentos de concreto, ou até mesmo todo o corpo de prova, fossem arremessados fora da máquina de ensaios no caso de uma ruptura brusca (Figura 4.10).

- a segunda etapa consistiu em mais um passo de compressão de um minuto até alcançar a carga correspondente à tensão média S_m .
- finalmente foram iniciados os ciclos de carga e descarga, conforme Figura 4.9, para cada frequência pré-estabelecida. Os dados de carga, de deformação e o número de ciclos foram armazenados para os pontos de máximo e mínimo a cada ciclo.



Figura 4.10 – Gaiola de proteção ao redor do ensaio de fadiga.

A última coluna da Tabela 4.3 apresenta a quantidade de dados por segundo que o software controlador armazenava internamente nunca inferior a 125 dados por segundo para os ensaios de fadiga. Porém, apenas os pontos de máximo e mínimo a cada ciclo foram salvos em arquivos, pois caso fossem armazenados todos os dados (de 125 a 200 dados por segundo) os arquivos finais de cada ensaio de fadiga seriam muito pesados dificultando a sua manipulação e análise. No programa experimental piloto ficou comprovado que se a taxa de armazenamento interna fosse inferior a cem dados por segundo, os máximos e mínimos armazenados em arquivo não seriam precisos.

Variação da razão entre tensões

Com base nos resultados dos ensaios de fadiga dos três tipos de concreto: sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3 foi desenvolvido um modelo probabilístico que contempla as variáveis de um ensaio de fadiga como: o número de ciclos suportados até a ruptura N , as tensões máximas $S_{máx}$ e mínimas $S_{mín}$ e a razão entre as tensões mínima e máxima R incluindo também a frequência de carregamento. Esse modelo validado pelos resultados experimentais, analisados no capítulo 5, será apresentado no capítulo 6.

O modelo probabilístico proposto contempla a razão entre tensões mínimas e máximas R , porém os ensaios realizados para os concretos C1, C2 e C3 mantiveram essa razão constante $R = 0,3$. Com o intuito de validar o modelo proposto para diferentes razões entre tensões foi realizada uma outra etapa de ensaios de fadiga em compressão variando apenas a razão entre tensões R . No momento em que foi decidido realizar esses ensaios já não existiam mais corpos de prova disponíveis, tampouco estavam disponíveis os mesmos materiais constituintes para repetir a mesma dosagem.

Optou-se por produzir uma nova dosagem de concreto de alta resistência sem fibras que será denominada C4. Essa nova dosagem está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dosagem do concreto sem fibras C4.

Material:	Tipo:	Peso (kg/m ³)
Cimento	I 52.5 R	300
Água	—	140
Agregado graúdo	Brita $d_{máx}$ 12 mm	750
Agregado miúdo	Areia $d_{máx}$ 4 mm	1090
Filler	Calcário	90
Aditivo superplastificante	Glenium ACE-425	4,6

Para essa nova dosagem foram produzidos quatro corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura somente para obter a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Para os ensaios de fadiga em compressão em corpos de prova cúbicos, foram produzidos 20 prismas de seção transversal 100 mm x 100 mm e comprimento de 450 mm. Desses prismas pretendia-se obter 50 cubos de 100 ± 1 mm de aresta para a realização de três series de ensaios: 20 ensaios para obter a

resistência à compressão em cubos $f_{c_{cub}}$ e duas séries de quinze ensaios de fadiga, uma série com razão entre tensões $R = 0,3$ e outra com $R = 0,1$.

Esses ensaios foram iniciados quando o concreto sem fibras C4 atingiu seis meses de idade. Não se esperava que a resistência à compressão deste concreto superasse os 100 MPa, porém quando foram ensaiados os corpos de prova cúbicos à compressão para obter a resistência $f_{c_{cub}}$, que seria usada para configurar os ensaios de fadiga alguns corpos de prova superavam 100 MPa. Superando-se assim o limite da máquina de ensaios de 100 toneladas.

Como este concreto C4 não continha fibras decidiu-se reduzir o tamanho dos cubos para 80 ± 1 mm de aresta. Dessa maneira foi possível obter os 50 cubos para realizar as três séries de ensaios previstas.

Para a configuração dos ensaios de fadiga, os ensaios de compressão em cubos para a obtenção de $f_{c_{cub}}$ do concreto sem fibras C4 foram realizados de maneira idêntica aos mesmos ensaios para os concretos C1, C2 e C3. Os ensaios de fadiga do concreto C4 foram configurados inicialmente idênticos aos concretos anteriores com respeito à $S_{máx} = 85\% f_{c_{cub}}$, com $R = 0,3$. Porém, como alguns desses ensaios atingiram mais de um milhão de ciclos sem romper, enquanto que alguns corpos de prova romperam com poucos milhares de ciclos, foi então arbitrada uma tensão máxima superior de 90 MPa = 94% $f_{c_{cub}}$, e foram ensaiados à fadiga os 30 corpos de prova cúbicos de 80 ± 1 mm de aresta.

4.5. Resumo do programa experimental

A Tabela 4.5 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados no programa experimental para cada tipo de concreto: ensaios estáticos de resistência à compressão f_c , de módulo de elasticidade E , de coeficiente de Poisson ν , de resistência à tração na flexão $f_{t,f}$ e ensaio de compressão em corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$; ensaios de fadiga para diferentes frequências 4 Hz, 1 Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz e para diferentes razões entre tensão mínima e máxima $R = 0,3$ e $0,1$.

Tabela 4.5 – Resumos dos ensaios realizados no programa experimental.

Tipo de concreto				C1	C2	C3	C4
Cilindros	150 x 300 mm	Ensaio estáticos	f_c	8	7	8	4
			E	6	5	6	3
			ν	6	5	6	3
Prismas	100 x 100 x 450 mm		$f_{t,f}$	3	6	6	–
			$f_{c_{cub}}$	6+6	6	8	20
Cubos	100 mm de aresta		Ensaio de fadiga	4 Hz	13	11	10
		1 Hz		10	10	10	–
		0,25 Hz		10	10	10	–
		0,0625 Hz		10	10	10	–
		$R = 0,3$		–	–	–	15
		$R = 0,1$		–	–	–	15