5. Apresentação e análise dos resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos concretos e dos ensaios de fadiga, o histórico de deformações dos ensaios de fadiga e os modos de ruptura dos corpos de prova.

Os resultados do concreto sem fibras C4 são apresentados ao final deste capítulo, uma vez que a intenção destes ensaios não foi de comparar com os concretos C1, C2 e C3, e sim de validar o modelo proposto no capítulo 6.

5.2. Ensaios de caracterização

Como descrito no capítulo anterior, a caracterização das propriedades mecânicas das três dosagens de concreto (sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3) foi realizada por meio de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos para se obter a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Para se obter a resistência à tração por flexão, assim como as resistências residuais à tração por flexão, corpos de prova prismáticos também foram ensaiados à flexão em três pontos.

5.2.1. Ensaios de compressão

As propriedades mecânicas de resistência à compressão f_c , módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson v, inicialmente foram obtidas a partir de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e altura de 300 mm para cada dosagem de concreto em duas idades diferentes: aos 28 dias e um ano após a produção dos concretos. Os resultados de cada ensaio, bem como a média e o desvio padrão *DP* de cada série de ensaios,

estão apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.3. Na Tabela 5.1 para o concreto sem fibras C1, nas Tabelas 5.2 e 5.3 para o concreto com fibras de polipropileno C2 e para o concreto com fibras de aço C3, respectivamente.

Idada	nº do	fc	Ε	
laade	ensaio	MPa	GPa	v
	1	53	_	_
	2	55	35	0,207
29 diaa	3	60	31	0,190
20 0185	4	55	34	0,192
	média	56	33	0,196
	DP	3	2	0,009
	1	72	_	_
	2	77	34	0,194
1 200	3	75	34	0,194
Tano	4	76	35	0,210
	média	75	34	0,199
	DP	2	1	0,009

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas: concreto sem fibras C1.

Observa-se um aumento na resistência à compressão após um ano para o concreto sem fibras. O mesmo não ocorre com o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, onde o aumento foi desprezível.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas: concreto com fibras de polipropileno C2.

Idada	n⁰ do	fc	Ε	
luaue	ensaio	MPa	GPa	V
	1	68	_	_
	2	65	34	0,197
28 dias	3	64	37	0,222
	média	66	35	0,210
	DP	2	2	0,018
	1	85	—	—
	2	89	41	0,223
1	3	84	42	0,218
1 ano	4	84	40	0,214
	média	86	41	0,218
	DP	2	1	0,005

No caso do concreto com fibras de polipropileno o aumento após um ano ocorre tanto para a resistência à compressão quanto para o módulo de elasticidade e para o coeficiente de Poisson. Ao comparar o concreto com fibras de polipropileno com o concreto sem fibras, todas as propriedades mecânicas, em ambas as idades, foram maiores para o concreto com fibras de polipropileno.

Idada	n⁰ do	f_c	Ε	
luaue	ensaio	ensaio MPa GPa		V
	1	68	_	—
	2	64	33	0,208
29 diaa	3	70	36	0,214
20 0185	4	67	35	0,210
	média	67	35	0,211
	DP	3	1	0,003
	1	86	—	—
	2	86	37	0,204
1 000	3	85	39	0,216
i ano	4	88	39	0,214
	média	86	38	0,211
	DP	1	1	0,006

Tabela 5 3 –	Propriedades	mecânicas:	concreto	com fibras	de aco C3
	1 TOPTICUUUUU	modulicas.	001101010	00111 110103	

Os resultados apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.3 mostram que a resistência à compressão foi maior nos concretos com fibras para ambas as idades. A resistência à compressão aumentou aproximadamente 30% após um ano, em todos os concretos. O módulo de elasticidade aos 28 dias foi ligeiramente superior para os concretos com fibras, e após um ano o aumento foi de 3%, 17% e 9% para os concretos C1, C2 e C3, respectivamente. O coeficiente de Poisson dos concretos com fibras foi cerca de 8% maior em comparação ao concreto sem fibras, e a influência da idade foi pequena, salvo para o concreto com fibras de polipropileno, onde o aumento após um ano foi de aproximadamente 4%.

Em resumo, os concretos com fibras tiveram resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson maiores em comparação ao concreto sem fibras C1. Quanto à influência da idade, todas as propriedades aumentaram após um ano.

5.2.2. Ensaios de flexão em três pontos

Os corpos de prova prismáticos de seção transversal 100 mm x 100 mm e comprimento de 450 mm foram ensaiados à flexão em três pontos para determinar a resistência à tração por flexão $f_{t,f}$, e as resistências residuais à tração por flexão f_{Rj} , seguindo as recomendações da norma europeia UNE-EN 14651 (2007). Esses ensaios foram realizados um ano após a produção dos concretos.

Para o concreto sem fibras C1 foram ensaiados apenas três corpos de prova prismáticos, pois não existiam mais corpos de prova disponíveis devido à perda de alguns cubos nas configurações iniciais dos ensaios de fadiga do concreto C1. Para os concretos com fibras C2 e C3 foram ensaiados seis prismas à flexão em três pontos.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de flexão em três pontos, para o concreto sem fibras C1, onde $P_{máx}$ representa a carga máxima obtida em cada ensaio.

Idada	n⁰ do	P _{máx}	f _{t,f}	f_{R1}	f_{R2}	f _{R3}	f_{R4}
luaue	ensaio	kN			MPa		
	1	10,7	7,8	0	_	_	—
	2	9,2	6,7	0,1	0	—	—
28 dias	3	9,2	6,5	0,2	0	—	—
	média	9,7	7,0	0,1	0	—	—
	DP	0,9	0,7	0,1	0		—

Tabela 5.4 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto sem fibras C1.

Não foram realizadas leituras de abertura de fissura CMOD nos ensaios de flexão em três pontos para o concreto sem fibras C1 por questões de segurança do *clip gage*, uma vez que uma eventual ruptura brusca poderia danificá-lo.

Os resultados apresentados na Tabela 5.4 foram obtidos a partir das curvas carga x flecha, utilizando-se o procedimento descrito no item 4.4.1. A Figura 5.1 apresenta essas curvas para o concreto sem fibras C1.



Figura 5.1 – Curvas carga x flecha: concreto sem fibras C1.

Observa-se na Figura 5.1 que após a carga máxima o concreto sem fibras não suportou praticamente nenhuma carga. O mesmo é refletido nas resistências residuais à tração por flexão apresentadas na Tabela 5.4.

Na Tabela 5.5 estão apresentados os resultados obtidos para o concreto com fibras de polipropileno, e a Figura 5.2 apresenta as curvas carga x flecha e tensão x CMOD para esse mesmo concreto.

Idada	n⁰ do	P _{máx}	ft,f	f_{R1}	f_{R2}	f _{R3}	f_{R4}
luaue	ensaio	kN			MPa		
	1	9,9	7,1	0,6	0,6	0,6	0,7
	2	10,2	7,3	0,9	0,9	1,1	1,2
	3	8,8	6,4	1,0	1,0	1,1	1,2
1 000	4	9,0	6,5	0,5	0,5	0,7	1,0
T ano	5	10,7	7,8	0,9	1,0	1,2	1,8
	6	10,5	7,7	0,6	0,6	0,8	1,2
	média	9,9	7,1	0,8	0,8	0,9	1,2
	DP	0,8	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4

Tabela 5.5 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto com fibras de polipropileno C2.

O concreto com fibras de polipropileno foi capaz de suportar alguma carga residual depois de alcançada a carga máxima, como pode ser visualizado nas curvas da Figura 5.2, ou nas resistências residuais f_{Rj} na Tabela 5.5. Porém, a carga residual suportada é relativamente baixa, entre 10% a 20% da carga máxima $P_{máx}$. Observa-se que uma vez que $P_{máx}$ é alcançada ocorre uma queda brusca, e em seguida a carga suportada ao longo do ensaio é quase constante, com um leve crescimento conforme aumenta a deformação vertical. Esse comportamento é atribuído ao trabalho das fibras de polipropileno que não permitem que o corpo de prova se rompa. Esse leve crescimento da carga

residual suportada com o prisma já fissurado ocorre porque quanto maior a flecha, maior a abertura da fissura e mais fibras começam a trabalhar na superfície de ruptura.



Figura 5.2 – Curvas carga x flecha e tensão x CMOD: concreto com fibras de polipropileno C2.

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 foram calculados a partir das curvas carga x flecha, para que fossem comparáveis aos resultados do concreto sem fibras C1. Não se discute neste item se a avaliação do comportamento póspico em ensaios de flexão em três pontos é mais precisa utilizando-se os resultados de flecha ou de CMOD. Optou-se pelas leituras de flecha porque foram realizadas nos três concretos estudados, enquanto que as leituras de CMOD foram realizadas apenas nos concretos com fibras C2 e C3.

Não é possível observar uma diferença clara entre as curvas tensão x CMOD e carga x flecha, para o concreto C2, pois os valores de carga pós-pico oscilam em uma faixa muito baixa de valores, não ocorrendo o abrandamento suave de tensões.

Os resultados de resistência à tração por flexão e resistências residuais calculadas para o concreto com fibras de aço estão apresentados na Tabela 5.6. A Figura 5.3 mostra as curvas carga x flecha e as curvas tensão x CMOD.



Tabela 5.6 – Resistência à tração por flexão e resistências residuais: concreto com fibras de aço C3.

Idada	n⁰ do	P _{máx}	$f_{t,f}$	f_{R1}	f_{R2}	f _{R3}	f_{R4}
luaue	ensaio	kN			MPa		
	1	10,2	7,2	5,7	2,7	2,0	1,4
	2	9,5	7,0	5,3	3,1	1,6	1,3
	3	13,8	10,1	9,7	6,4	4,1	3,2
1 000	4	10,5	7,7	5,5	5,0	4,1	3,4
T ano	5	10,2	7,5	7,1	4,6	3,5	2,6
	6	9,9	7,2	5,4	4,2	3,2	2,7
	média	10,7	7,8	6,4	4,3	3,1	2,4
	DP	1,6	1,2	1,7	1,4	1,0	0,9

Ao se comparar a evolução das deformações contra a abertura da fissura CMOD na Figura 5.3, nota-se que a relação entre ambas não é linear como sugere a norma europeia UNE-EN 14651 (2007), apesar de seguirem naturalmente uma mesma tendência. A fissura pode abrir a uma velocidade maior do que o crescimento da flecha, dependendo da quantidade de fibras que trabalham ao longo do tramo pós-pico. Observa-se que para o terceiro ensaio C3-3 a carga máxima foi bastante superior às demais, esse aumento provavelmente ocorreu devido à maior quantidade de fibras na seção de ruptura do corpo de prova prismático. Apesar da maior carga máxima, as tensões residuais f_{R3} e f_{R4} foram próximas às dos demais ensaios do mesmo concreto C3.

O objetivo desses ensaios de caracterização da resistência à tração na flexão e resistências residuais não foi avaliar detalhadamente os benefícios da adição de fibras plásticas ou de aço a uma mesma matriz de concreto. Devido ao baixo número de ensaios para cada concreto – três ou seis ensaios –, não se procurou quantificar a diferença entre as distintas fibras. Ainda assim foi possível

verificar que o comportamento à tração na flexão do concreto com fibras de aço foi bastante superior ao do com fibras de polipropileno que, por sua vez, foi melhor do que o concreto sem fibras. Essas melhoras foram vistas no comportamento pós-pico, contudo nenhuma diferença significativa foi observada com respeito à carga máxima. Todas essas comparações são facilmente observadas na Figura 5.4, confrontando uma curva carga x flecha de cada concreto: sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3.



Figura 5.4 – Comparação do comportamento pós-pico dos concretos com e sem fibras.

5.3. Ensaios de fadiga

Foram realizadas cinco séries de ensaios em corpos de prova cúbicos de $100 \pm 1 \text{ mm}$ de aresta para cada dosagem de concreto. Primeiramente uma série de ensaios de compressão simples em seis ou mais corpos de prova cúbicos para se obter a resistência à compressão média dos cubos $f_{c_{cub}}$ para cada dosagem. A partir desta $f_{c_{cub}}$ iniciaram-se as quatro séries de ensaios de fadiga em compressão, em dez ou mais cubos, para cada frequência de carregamento, mantendo-se constante a tensão máxima em 85% de $f_{c_{cub}}$ e a razão entre as tensões mínimas e máximas R em 0,3.

5.3.1. Concreto sem fibras

Os ensaios de fadiga do concreto sem fibras foram realizados em duas etapas, conforme descrito no item 4.3. A primeira série de ensaios à fadiga em compressão foi realizada quando os corpos de prova atingiram seis meses de idade, a frequência foi de 4 Hz e a resistência média $f_{c_{cub}}$ foi obtida por meio de seis ensaios de compressão simples. A segunda etapa consistiu na continuação

dos ensaios à fadiga para as demais frequências um ano após a produção desse concreto. Para a realização desses ensaios de fadiga, após um ano, foi obtida uma nova resistência $f_{c_{cub}}$ ensaiando-se outros seis corpos de prova cúbicos. A Tabela 5.7 apresenta os resultados dos ensaios de compressão $f_{c_{cub}}$ do concreto sem fibras C1 para cada corpo de prova, para as duas etapas de ensaios: seis meses e um ano.

Número do ensaio	Resistência à compressão (MPa)				
	6 meses	1 ano			
1	78,5	77,5			
2	71,8	82,4			
3	64,7	79,8			
4	76,9	75,2			
5	71,4	73,5			
6	77,4	83,9			
média	73,5	78,7			
DP	5,2	4,1			

Tabela 5.7 – Resistência à	compressão em	n cubos $f_{c_{cub}}$:	concreto sem fibras C1.
----------------------------	---------------	-------------------------	-------------------------

Pode-se observar que a resistência média aumentou mais de 5 MPa entre seis meses e um ano. Por isso os ensaios de fadiga a 4 Hz – 6 meses – foram configurados com base na $f_{c_{cub}} = 73,5$ MPa, e os ensaios para as outras frequências – 1 ano – baseados na resistência média dos cubos de 78,7 MPa para o concreto sem fibras C1.

A Tabela 5.8 mostra os resultados dos ensaios de fadiga, número de ciclos suportados até a ruptura, para a frequência 4 Hz, onde L1, L2 e L3 correspondem às medidas das arestas dos cubos nas três dimensões, sendo L3 a altura do corpo de prova. A carga $P_{máx,c}$ é a carga máxima do ensaio de fadiga calculada para ser equivalente a 85% da tensão média de ruptura $f_{c_{cub}}$. As Tabelas 5.9 a 5.11 apresentam os resultados de fadiga para as frequências 1 Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz, respectivamente.

Número do ensaio	L1	L2 mm	L3	P _{máx,c} kN	Número de ciclos até a ruptura
1	99,29	99,50	99,70	617	8411
2	99,15	98,97	99,21	613	821
3	99,11	99,39	99,62	615	2485
4	99,14	99,42	99,21	616	1660
5	99,01	98,62	99,21	610	13020
6	99,72	99,26	99,89	618	22570
7	99,69	99,52	99,41	620	9521
8	99,74	99,29	99,63	619	4192
9	99,28	99,36	99,39	616	170256
10	99,40	99,25	99,78	616	1578
11	99,64	99,90	99,39	622	1222
12	99,72	99,50	99,37	620	133
13	100,11	99,63	99,54	623	7038

Tabela 5.8 – Ensaios de fadiga: frequência 4 Hz; concreto sem fibras C1.

Tabela 5.9 – Ensaios de fadiga: frequência 1 Hz; concreto sem fibras C1.

Número do ensaio	L1	L2 mm	L3	P _{máx,c} kN	Número de ciclos até a ruptura
1	100,82	100,65	100,00	679	282
2	100,23	100,34	100,61	673	23
3	100,32	100,31	99,43	673	759
4	100,48	100,30	100,30	674	1351
5	100,30	100,56	100,03	675	85
6	100,72	100,36	100,30	676	157
7	100,22	100,55	100,53	674	479
8	100,41	100,32	100,60	674	368
9	100,47	100,60	100,15	676	833
10	100,45	99,78	100,04	671	1571

Tabela 5.10 – Ensaios de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto sem fibras C1.

Número	L1	L2	L3	P _{máx,c}	Número de ciclos
uo ensaio		mm		KN	ale a luplula
1	100,09	100,89	100,50	676	98
2	100,34	100,13	100,19	672	1242
3	101,77	100,22	99,90	682	535
4	100,44	99,81	99,88	671	157
5	100,01	100,71	100,03	674	18
6	100,14	100,63	100,43	674	30
7	100,13	99,93	100,45	669	219
8	100,46	99,85	99,94	671	650
9	100,56	100,83	99,95	678	122
10	100,08	101,14	101,04	677	400

Número	L1 L2 L3		P _{máx,c}	Número de ciclos	
do ensaio		mm		kN	até a ruptura
1	100,19	100,19	100,15	672	339
2	100,48	100,02	99,83	672	473
3	100,72	100,23	100,19	675	102
4	100,10	100,03	99,88	670	234
5	100,72	100,44	100,85	677	11
6	100,34	100,52	100,11	675	142
7	99,93	100,90	100,32	675	76
8	99,99	100,36	100,12	671	275
9	100,07	100,37	100,35	672	329
10	100,50	99,80	99,70	671	38

Tabela 5.11 – Ensaios de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto sem fibras C1.

Reunindo-se todos os resultados dos ensaios de fadiga das Tabelas 5.8 até 5.11, para o concreto sem fibras C1 em um gráfico frequência *versus* número de ciclos, em escala logarítmica, verifica-se que o número de ciclos até a ruptura diminui para as menores frequências, como mostra a Figura 5.5.



Figura 5.5 – Ensaios de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto sem fibras C1.

5.3.2. Concreto com fibras de polipropileno

As séries de ensaios de fadiga em compressão realizadas para o concreto com fibras de polipropileno ocorreram um ano após a produção dos corpos de prova. Os resultados da série de ensaios de compressão em corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$ estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resistência à compressão em cubos: concreto com fibras de polipropileno.

Número	Resistência à compressão (MPa)
uo ensaio	1 ano
1	73,1
2	63,3
3	79,1
4	74,0
5	73,5
6	78,7
média	73,6
DP	5,7

A resistência à compressão média $f_{c_{cub}}$ obtida nos cubos do concreto com fibras de polipropileno foi inferior à obtida na caracterização por meio dos cilindros padronizados, assim como foi menor do que a resistência em cubos do concreto sem fibras que foi produzido com a mesma matriz de concreto.

Esperava-se que a resistência à compressão em cubos $f_{c_{cub}}$ fosse aproximadamente 20% maior do que a resistência à compressão obtida a partir de corpos de prova cilíndricos (Mindess, 2002). Para o concreto sem fibras C1 a resistência em cubos $f_{c_{cub,C1}} = 78,7$ MPa foi levemente superior à dos cilindros $f_{c_{C1}} = 75,0$ MPa. No concreto com fibras de polipropileno C2 a resistência em cubos $f_{c_{cub,C2}}$ 73,6 = MPa foi bastante inferior à resistência obtida a partir dos cilindros $f_{c_{c2}} = 86,0$ MPa.

Acredita-se que as resistências à compressão obtidas a partir dos cubos foram inferiores ao esperado devido a uma pequena falha no processo de moldagem dos corpos de prova prismáticos no que diz respeito à vibração. O ideal teria sido utilizar uma mesa vibratória para os moldes prismáticos, porém na indisponibilidade da mesma foi usado o vibrador de imersão. Devido às dimensões do prisma o vibrador de imersão não foi inserido perpendicularmente à face superior e sim levemente inclinado, movendo-se pela superfície para atingir todo o volume. Em seguida buscou-se vibrar as paredes laterais por fora dos moldes, porém, essa vibração externa aparentemente não surtia muito efeito. Ainda assim, a vibração interna e externa foi realizada em cada um dos moldes dos corpos de prova prismáticos.

A explicação das resistências nos cubos $f_{c_{cub}}$ resultarem abaixo do esperado se comparada a dos cilindros foi que o processo de vibração nos cilindros foi mais eficiente do que nos prismas. Com isso, apesar da elevada resistência, a resistência dos cubos resultou inferior ao esperado. Observa-se que essa redução de $f_{c_{cub}}$ foi maior no concreto com fibras de polipropileno, onde as fibras de polipropileno acabaram sendo um inconveniente para a qualidade do processo de vibração nos prismas.

Esse fato justifica que para os ensaios de fadiga é necessário obter a resistência à compressão a partir de corpos de prova com a mesma geometria que os corpos de prova do ensaios de fadiga.

As Tabelas 5.13 a 5.16 mostram os resultados dos ensaios de fadiga em compressão para o concreto com fibras de polipropileno C2, sendo a Tabela 5.13 para a frequência 4Hz, a Tabela 5.14 para a frequência 1Hz e as Tabelas 5.15 e 5.16 para as frequências 0,25 Hz e 0,0625 Hz, respectivamente.

Número do ensaio	L1	L2 mm	L3	P _{máx,c} kN	Número de ciclos até a ruptura
1	100,53	100,55	100,18	632	1009
2	100,68	100,43	100,25	633	6799
3	100,88	99,73	100,41	629	6792
4	100,08	100,64	100,52	630	668
5	100,32	100,73	100,12	632	1685
6	100,56	100,07	100,09	630	900
7	99,69	100,53	100,43	627	6446
8	99,97	100,67	100,25	630	2962
9	100,45	100,16	100,40	629	371
10	100,53	100,57	100,46	632	376
11	100,54	99,88	100,64	628	3656

Tabela 5.13 – Ensaios de fadiga: frequência 4 Hz; concreto com fibras de polipropileno.

Número do ensaio	L1	L2 mm	L3	P _{máx,c} kN	Número de ciclos até a ruptura
1	100 58	99.89	100.67	629	1457
	100,00	33,03	100,07	023	1407
2	101,12	99,62	100,00	630	11383
3	100,47	100,40	100,21	631	11589
4	100,23	100,47	100,27	630	2629
5	100,30	102,57	100,99	644	237
6	99,93	100,53	99,36	628	10480
7	100,70	100,14	100,48	631	1294
8	100,33	100,37	100,29	630	710
9	100,96	100,64	100,93	636	124
10	100,61	100,14	100,48	630	31020

Tabela 5.14 – Ensaios de fadiga: frequência 1 Hz; concreto com fibras de polipropileno.

Tabela 5.15 – Ensaios de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto com fibras de polipropileno.

Número	L1	L2	L3	P _{máx,c}	Número de ciclos
do ensaio		mm		kN	até a ruptura
1	100,75	100,52	100,48	634	1559
2	100,45	100,51	100,58	632	12
3	100,24	100,14	100,49	628	3500
4	100,43	100,36	100,52	631	176
5	100,72	100,45	100,38	633	632
6	100,92	100,51	100,38	635	1905
7	100,71	100,30	100,05	632	451
8	100,67	99,94	100,02	629	107
9	100,19	100,37	100,25	629	14
10	100,36	100,89	100,71	633	5113

Tabela 5.16 – Ensaios de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto com fibras de polipropileno.

Número	L1 L2 L3		Pmáx,c	Número de ciclos	
do ensaio		mm		kN	até a ruptura
1	100,35	100,40	99,96	630	617
2	100,22	100,74	100,98	632	74
3	100,47	100,11	100,16	629	119
4	100,75	100,52	101,06	634	40
5	100,15	100,37	100,73	629	1264
6	100,26	100,17	100,03	628	331
7	100,57	100,60	100,44	633	42
8	101,30	100,28	100,51	636	93
9	100,40	100,63	100,49	632	16
10	100,30	100,68	100,42	632	949

Os resultados dos ensaios de fadiga para o concreto com fibras de polipropileno apresentados nas Tabelas 5.13 até 5.16 estão agrupados na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Ensaios de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de polipropileno C2.

Observa-se uma melhora no comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras de polipropileno em comparação ao concreto sem fibras para as menores frequências, por exemplo, comparando-se a quantidade de corpos de prova que suportaram mais de mil ciclos para 0,0625 Hz, 0,25 Hz e 1 Hz. Ainda assim alguns corpos de prova não suportaram mais do que cem ciclos para as menores frequências.

5.3.3. Concreto com fibras de aço

Os ensaios de fadiga em compressão para o concreto com fibras de aço também foram realizados um ano após a produção dos corpos de prova. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas Tabelas 5.17 a 5.21. Na Tabela 5.17 estão os resultados de resistência à compressão nos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$; na Tabela 5.18 os resultados dos ensaios de fadiga para a frequência 4 Hz; na Tabela 5.19 para a frequência 1 Hz e nas Tabelas 5.20 e

5.21 estão os resultados para as frequências 0,25 Hz e 0,0625 Hz, respectivamente.

Número	Resistência à compressão (MPa)
uu ensaiu	1 ano
1	80,2
2	85,3
3	86,3
4	86,9
5	88,5
6	89,1
7	89,9
8	90,6
média	87,1
DP	3,3

Tabela 5.17 – Resistência à compressão em cubos: concreto com fibras de aço C3.

Observa-se neste caso que a resistência à compressão média obtida dos corpos de prova cúbicos $f_{c_{cub}}$, para o concreto com fibras de aço, foi bastante superior às demais resistências $f_{c_{cub}}$ dos concretos anteriores, C1 e C2.

A resistência em cubos $f_{c_{cub,C3}} = 87,1$ MPa para o concreto C3 foi levemente superior à resistência à compressão em cilindros $f_{c_{C3}} = 86,0$ MPa, assim como ocorreu para o concreto sem fibras C1.

Número do ensaio	L1	L2 mm	L3	P _{máx,c} kN	Número de ciclos até a ruptura
1	100,27	100,42	99,77	759	1398
2	100,78	100,89	100,26	767	1751
3	100,23	100,84	100,18	762	1347
4	100,58	100,34	100,09	761	1673
5	100,27	100,70	99,73	761	5952
6	101,20	100,31	100,29	765	849
7	100,43	100,33	100,53	760	4070
8	100,40	99,91	100,51	756	1176
9	100,56	100,30	100,20	760	2042
10	100,58	100,07	99,94	759	2635

Tabela 5.18 – Ensaios de fadiga: frequência 4 Hz; concreto com fibras de aço C3.

Número	L1	L1 L2 L3 P _n		P _{máx,c}	Número de ciclos
do ensaio		mm		kN	até a ruptura
1	100,52	100,93	100,44	765	2365
2	101,03	100,31	99,85	764	1344
3	100,02	100,57	100,23	758	154
4	100,43	100,94	100,56	764	746
5	100,41	100,17	99,97	758	7438
6	100,92	100,39	100,18	764	412
7	100,07	100,26	100,08	756	2077
8	100,75	100,75	100,25	765	4082
9	99,85	100,15	100,35	754	3120
10	100,72	100,25	99,95	761	3945

Tabela 5.19 – Ensaios de fadiga: frequência 1 Hz; concreto com fibras de aço C3.

Tabela 5.20 – Ensaios de fadiga: frequência 0,25 Hz; concreto com fibras de aço C3.

Número do ensaio	L1	L2	L3	P _{máx,c}	Número de ciclos até a ruptura
de enicale		111111		NIN	ato a raptara
1	100,85	100,60	99,92	765	1291
2	100,45	100,84	100,54	764	237
3	100,57	100,40	100,69	761	314
4	100,63	100,60	100,13	763	716
5	100,69	100,27	99,73	761	5541
6	100,82	100,20	99,92	762	1014
7	100,57	100,84	100,24	765	986
8	99,83	100,21	100,15	754	2432
9	100,68	100,37	100,30	762	751
10	100,31	100,45	100,43	760	3659

Tabela 5.21 – Ensaios de fadiga: frequência 0,0625 Hz; concreto com fibras de aço C3.

Número do ensaio	L1	L2	L3	P _{máx,c}	Número de ciclos até a ruptura
		111111		- NIN	
1	100,11	100,40	100,16	758	221
2	100,04	100,90	100,45	761	1875
3	100,35	101,05	100,19	765	1144
4	100,02	100,64	100,39	759	1246
5	100,37	100,83	100,27	763	2409
6	100,39	100,51	100,54	761	1273
7	100,10	100,24	100,14	757	1121
8	100,04	100,34	99,42	757	256
9	100,09	100,30	100,18	757	1304
10	99,88	100,31	100,09	755	741

Os números de ciclos até a ruptura de cada um dos 40 ensaios de fadiga em compressão realizados para o concreto com fibras de aço, para as quatro frequências selecionadas estão apresentados em conjunto na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Ensaios de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de aço C3.

Nota-se na Figura 5.7 que os números de ciclos até a ruptura para as menores frequências se aproximam dos números de ciclos para as frequências mais altas para o concreto com fibras de aço. Bastante diferente do concreto sem fibras, e ainda com um desempenho superior ao concreto com fibras de polipropileno nas menores frequências.

A comparação entre os três concretos estudados pode ser visualizada na Figura 5.8, onde estão desenhadas as médias e desvio padrão DP de cada concreto para cada frequência selecionada.



Figura 5.8 – Ensaios de fadiga: concretos C1, C2 e C3; médias e desvios padrão.

Essas médias e desvios padrão apresentados na Figura 5.8 foram obtidas por meio de equações baseadas na distribuição de Weibull de três parâmetros. Essa distribuição de Weibull mostra uma boa concordância com os resultados de ruptura por fadiga, pois seus parâmetros de ajuste de escala e forma permitem modelar uma grande variedade de dados. Ang e Tang (1975), Ross (2004) e Lai *et al.* (2006) afirmam que as distribuições de Weibull são usadas para descrever vários fenômenos ou ruptura de componentes. A metodologia utilizada para se

obter as médias e os desvios padrão usando-se a distribuição de Weibull de três parâmetros está descrita no Anexo B.

Há grande variabilidade nos resultados de números de ciclos até a ruptura para uma mesma série de ensaios de fadiga, por exemplo: C1, 4Hz. Se a média e o desvio padrão forem calculados por meio das equações convencionais a média seria de 18,7 mil ciclos e o desvio padrão 46 mil ciclos. Esses valores não seriam reais se fosse desenhada a faixa de valores dos ensaios como na Figura 5.8, como a média ± o desvio padrão. Por isso optou-se por calcular a média e o desvio padrão utilizando-se as equações da distribuição de Weibull de três parâmetros.

Observa-se na Figura 5.8 que existe um aumento no número de ciclos até a ruptura do concreto com fibras de polipropileno C2, para o concreto sem fibras C1, para as menores frequências. A faixa de resultados do número de ciclos para o concreto com fibras de aço C3 para as menores frequências foi bastante superior comparada às dos concretos C1 e C2.

A Figura 5.9 reúne os três gráficos apresentados na Figura 5.8, onde é possível comparar entre os três concretos estudados, para as quatro frequências de carregamento selecionadas.



Figura 5.9 – Ensaios de fadiga: comparação entre os concretos com e sem fibras.

Comparando-se os três concretos para cada frequência selecionada, considerando-se a Figura 5.9, é possível observar a melhora do comportamento à fadiga a baixas frequências pela adição de fibras, onde as fibras de aço tiveram o melhor desempenho. Para a frequência 0,0625 Hz a faixa de valores para o concreto com fibras de aço C3 foi maior do que toda a faixa de valores para o concreto sem fibras C1. Entre o concreto com fibras de polipropileno C2 e o concreto sem fibras C1, os números de ciclos variaram entre faixas semelhantes, sendo que a dispersão para o concreto C2 foi maior. Passando-se para a frequência 0,25 Hz percebe-se uma melhora progressiva de C1 para C2 e de C2 para C3, seja por meio dos valores médios (linhas e símbolos mais espessos), seja por meio da faixa de valores (± o desvio padrão). Na frequência 1 Hz observa-se que a faixa de valores para o concreto sem fibras esteve bastante abaixo das faixas de valores dos concretos com fibras. Entre os concretos com fibras a média do número de ciclos foi maior para o concreto C2, porém, a dispersão dos resultados foi bastante alta, com valores variando desde pouco mais de cem ciclos até mais de trinta mil ciclos. Para a maior frequência 4 Hz todos os resultados oscilaram praticamente dentro de uma mesma faixa, onde a média e variação foram maiores para o concreto sem fibras C1, influenciada por um único corpo de prova que resistiu mais de 170 mil ciclos.

Resumindo: o comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras de aço foi melhor apenas para as menores frequências; o concreto com fibras de polipropileno teve desempenho intermediário entre o concreto sem fibras e o concreto com fibras de aço; para a maior frequência ensaiada não houve uma diferença representativa entre os três concretos.

Ficou comprovado experimentalmente que a frequência de carregamento influencia o comportamento do concreto à fadiga em compressão, e que a adição de fibras melhora o desempenho à fadiga para as frequências mais baixas.

5.4. Histórico de deformações

O histórico de deformações ao longo de cada ensaio foi estudado com o objetivo de compreender o efeito da frequência no comportamento à fadiga do concreto em compressão, assim como o benefício da adição de fibras para as diferentes frequências selecionadas.

Como descrito anteriormente no capítulo 2, em um ensaio de fadiga em concreto, quando a deformação específica na tensão máxima é desenhada em função do tempo do ensaio a curva resultante é denominada curva de fluência cíclica (Figura 2.7). Essa curva tem um tramo central praticamente linear, cuja inclinação pode ser chamada de taxa de deformação específica secundária ou taxa de fluência secundária $\dot{\varepsilon}_{sec}$ (Sparks,1982; Cornelissen ,1984; CEB 188, 1988; Hordijk *et al.*, 1995).

Para efeitos práticos, na sequência deste trabalho, esta taxa de deformação específica secundária será denominada apenas taxa de deformação ou apenas $\dot{\epsilon}$. Essa taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ foi obtida em todos os ensaios de fadiga, para cada concreto e frequência.

Duas análises diferentes foram realizadas com o histórico de deformações dos ensaios de fadiga: comparar a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ e comparar a evolução das deformações máximas ao longo do ensaio.

5.4.1. Taxa de deformação

Uma forma de avaliar o comportamento à fadiga dos três concretos estudados para as quatro diferentes frequências escolhidas por meio histórico de deformações foi desenhar o número de ciclos até a ruptura *versus* a taxa de deformação em escala logarítmica, para cada ensaio.

A Figura 5.10 apresenta o número de ciclos *versus* a taxa de deformação para os concretos sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3.





Figura 5.10 – Número de ciclos x taxa de deformação \dot{c} : C1, C2 e C3.

Observa-se na Figura 5.10 que os resultados individuais de cada série de ensaios de fadiga se alinham. No próximo capítulo serão apresentadas equações para curvas de ajuste, que na escala log-log são linhas, e essas linhas, em cada frequência, são praticamente paralelas entre si. Observa-se também que o número de ciclos é maior para uma mesma taxa de deformação quanto maior for a frequência de carregamento.

Na Figura 5.11 está redesenhada a Figura 5.10 separando-se agora os gráficos por frequência, para os três concretos C1, C2 e C3.

1E-

1E-4

1E-5

1E-6

έ (s⁻¹)

C1

4 Hz

4 Hz

1 Hz

0,25 Hz

0,0625 Hz

0,0625 Hz

🔶 1 Hz

▲ 0.25 Hz

100000



Figura 5.11 – Número de ciclos x taxa de deformação $\dot{\epsilon}$: 4 Hz, 1Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz.

As linhas que se ajustam para cada série de ensaios – tipo de concreto e frequência selecionada – agora estão mais próximas ao separar os gráficos por frequência na Figura 5.11 em comparação à Figura 5.10, onde foram separados por tipo de concreto. Para uma mesma taxa de deformação é possível observar que o número de ciclos é maior para o concreto com fibras de aço.

A Figura 5.12 reúne em um mesmo gráfico todos os resultados dos ensaios de fadiga.



Figura 5.12 – Número de ciclos x taxa de deformação \dot{c} : 4 Hz, 1Hz, 0,25 Hz e 0,0625 Hz.

A legenda da Figura 5.12 tem 12 símbolos diferentes para as 12 séries de ensaios de fadiga: três tipos de concreto e quatro frequências de carregamento. Observa-se que os resultados se agrupam por frequência. Para uma taxa de deformação qualquer, o menor número de ciclos seria para o concreto sem fibras C1 para a menor frequência 0,0625 Hz, enquanto que o maior número de ciclos seria para o concreto com fibras de aço C3 para a frequência 4 Hz. Selecionando-se uma taxa de deformação, por exemplo, 10⁻⁶, ou um número de ciclos, por exemplo, 500 ciclos, e traçando-se uma linha dos menores para os maiores valores: primeiro encontram-se resultados para a menor frequência 0,0625 Hz para o concreto C1, logo C2 e em seguida C3; chega-se então à próxima frequência 0,25 Hz seguindo-se a mesma ordem C1, C2 e C3; repete-se a sequência para a frequência 1 Hz, e por fim a mesma ordem C1, C2 e C3 para a maior frequência 4Hz.

No próximo capítulo será abordada uma relação direta entre $\dot{\varepsilon}$ e *N* para cada série de ensaios, e serão obtidas equações que melhor se ajustem aos resultados de cada série de ensaios por meio do modelo probabilístico proposto.

5.4.2. Deformações máximas

Outra forma de avaliar o comportamento à fadiga dos concretos estudados foi realizada comparando-se o histórico de deformações em dois casos: comparando-se as quatro frequências ou os três concretos. A Figura 5.13 mostra as curvas de fluência cíclica (evolução das deformações específicas máximas ao longo do tempo) separadas em três gráficos, sendo um gráfico para cada tipo de concreto. No eixo das abscissas o tempo de ensaio foi normalizado, e no eixo das ordenadas a deformação específica máxima variou de 0 a 1%, para uma melhor comparação entre todos os gráficos.

Para essa comparação foram selecionadas duas curvas para cada série de ensaios de fadiga. Essas duas curvas por série foram as que apresentaram as maiores e as menores deformações específicas máximas ao longo do ensaio, equivalentes a uma envoltória das deformações específicas ao longo do tempo para todos os ensaios de uma mesma série.

Cada série de ensaios de fadiga foi configurada para diferentes valores de cargas máxima e mínima, correspondentes a 85% de $f_{c_{cub}}$ e a razão entre tensões R com valor de 0,3. O ponto de início de cada ensaio – tensão média S_m - variou para cada concreto, assim como variou para cada corpo de prova cúbico em função das suas dimensões. Sendo assim, o início do armazenamento de dados com respeito às deformações também variou. Para uma melhor comparação das curvas de fluência cíclica foi selecionada como deformação específica zero, em todas as curvas, o primeiro ponto de deformação específica mínima durante o primeiro ciclo. Os ensaios de fadiga partiam de uma carga média, ou tensão média, até o valor correspondente a S_{max} , seguindo um sinal senoidal (ver Figura 4.8), onde era armazenado o primeiro ponto de máximo; a carga então era reduzida até a carga correspondente a S_{min} , sendo esse o primeiro ponto de mínimo armazenado. Esse primeiro ponto de mínimo foi considerado como deformação específica inicial zero, nas Figuras 5.13 e 5.14, visto que todas as deformações seguintes seriam superiores a essa.

A Figura 5.13 apresenta as curvas de fluência cíclica para os concretos: sem fibras C1, com fibras de polipropileno C2 e com fibras de aço C3. Sendo duas curvas para cada série de ensaios (maiores e menores deformações específicas), como descrito anteriormente.



Figura 5.13 – Tempo normalizado x deformação específica máxima: C1, C2 e C3.

Cabe ressaltar que estas duas curvas para cada série de ensaios representam apenas as maiores e menores deformações específicas máximas ao longo do ensaio, o que não significa que a curva de maiores deformações específicas corresponda obrigatoriamente ao maior número de ciclos da série, ou que a curva de menores deformações específicas corresponda ao menor número de ciclos. Na sequência deste capítulo será detalhado o histórico de deformações de cada um dos ensaios de fadiga. Onde se comprova que nem sempre a maior deformação específica total ao longo do ensaio ocorreu no corpo

de prova que suportou o maior número de ciclos, nem a menor deformação específica total no com menor número de ciclos, ainda que em alguns casos exista essa tendência.

A partir da Figura 5.13 algumas observações podem ser realizadas quanto à deformação específica máxima total – ou deformação específica última – e sobre o formato das curvas para os diferentes tipos de concreto.

A deformação específica máxima total, correspondente à deformação verificada na última carga máxima antes da ruptura do corpo de prova foi maior para os concretos com fibras. O concreto com fibras de aço C3 suportou maiores deformações que o concreto com fibras de polipropileno C2. A deformação específica última não atingiu 1% (ou 1 mm) para os concretos C1 e C2, enquanto que para o concreto com fibras de aço a ruptura ocorreu em valores de deformação específica próximos ou até superiores a 1% (ou 1 mm). Como a altura dos corpos de prova cúbicos era de 100 ± 1 mm, uma deformação específica de 1% equivale aproximadamente a 1 mm. Na sequência deste capítulo serão comparadas deformações reais ao invés de comparar deformações específicas.

Quanto à forma das curvas é possível observar que para os concretos com fibras C2 e C3, em alguns casos, houve uma quebra de tendência no tramo central das curvas. Entende-se que essa quebra de tendência reflete o ponto a partir do qual uma ou mais fibras começaram a trabalhar, onde uma ou mais fibras eram tracionadas costurando fissuras e microfissuras. Em alguns casos essa(s) fibra(s) se rompia(m), e essa situação se reflete em um salto na curva de deformação máxima. Esse fato é mais visível nas curvas do concreto com fibras de polipropileno C2 do que no concreto com fibras de aço C3 (Figura 5.13).

As taxas de deformação $\dot{\varepsilon}$ apresentadas nas Figuras 5.10 a 5.12 foram obtidas a partir inclinação dos tramos centrais de cada curva, *i.e.*, de cada ensaio de fadiga. Quando esse tramo central tinha uma quebra de tendência, a inclinação obtida foi uma média ponderada das duas ou três inclinações com respeito ao tempo decorrido em cada tramos linear. Os detalhes de cada curva, como as deformações antes, durante e depois desse tramo central, assim como o tempo decorrido em cada um desses três períodos serão abordados na sequência deste capítulo.

A Figura 5.14 reordena as mesmas curvas apresentadas na Figura 5.13, separando em gráficos para cada frequência.



Figura 5.14 – Tempo normalizado x deformação específica máxima: 0,0625 Hz, 0,25 Hz, 1 Hz e 4 Hz.

Observando-se a Figura 5.14 fica mais claro observar que as deformações máximas ao longo dos ensaios foram maiores para os concretos com fibras. As deformações geralmente foram maiores para o concreto C3 e as deformações do concreto C2 foram um pouco superiores em comparação ao concreto sem fibras C1, pelo menos na metade final do tempo de ensaio. A deformação final foi maior para os concretos com fibras, principalmente para o concreto com fibras de aço C3 nas frequências 0,0625 Hz, 0,25 Hz e 1 Hz quando chega a superar 1 mm (1%). No caso do concreto com fibras de aço C3, apenas para a frequência 4 Hz a deformação final não alcançou 1 mm (1%).

O limite máximo de deformações dos ensaios de fadiga pode ser melhor compreendido observando a envoltória das curvas carga *versus* deformação, do ensaio de compressão em cubos para a obtenção da resistência à compressão média $f_{c_{cub}}$, para cada concreto, como mostra a Figura 5.15. As curvas mais grossas demarcam a envoltória dos ensaios de cada série e a linha pontilhada – que corresponde a 85% de $f_{c_{cub}}$ para um cubo teórico com arestas medindo 100,00 mm – que demarca a variação máxima e mínima da deformação na carga correspondente à tensão máxima dos ensaios de fadiga realizados.

A deformação total em cada tipo de concreto nos ensaios de fadiga está esquematicamente demarcada na Figura 5.15 nas linhas tracejadas e seus valores máximos e mínimos – destacado em itálico – variaram de: 0,36 a 0,69 mm para o concreto sem fibras C1; 0,34 a 0,83 mm para o concreto com fibras de polipropileno C2; 0,75 a 1,34 mm para o concreto com fibras de aço C3.



Figura 5.15 – Envoltórias das curvas carga x deformação: ensaios de compressão em cubos; concretos C1, C2 e C3.

Observa-se na Figura 5.15 que o concreto com fibras de aço C3 tem maiores deformações que os demais concretos e que o concreto sem fibras foi o que apresentou as menores deformações, tanto nos ensaios de compressão estática (cotas sólidas) quanto nos ensaios de fadiga (cotas tracejadas). As deformações máximas dos ensaios de fadiga oscilaram entre valores próximos dos obtidos das envoltórias dos ensaios estáticos, para cada concreto.

A Figura 5.16 mostra a curva da evolução das deformações máximas dividida em três períodos: 1) início do ensaio; 2) tramo central do ensaio de onde se obtém \dot{c} ; 3) final do ensaio. Nessa figura, D_i e T_i, correspondem à variação da deformação máxima e tempo correspondente a cada período, respectivamente.



Figura 5.16 – Três períodos de um ensaio de fadiga.

As Figuras 5.17 a 5.28 ajudam a visualizar todos os detalhes dos históricos das deformações máximas de cada um dos ensaios de fadiga. Essas figuras são gráficos em colunas, onde no eixo das abscissas tem-se os números de ciclos até a ruptura para cada ensaio de fadiga, e nos eixos das ordenadas à esquerda tem-se a deformação máxima e à direita o tempo normalizado.

Cada coluna é dividida em três partes, correspondentes à deformação antes D1, durante D2 e depois D3 do tramos central. Dentro de cada uma das três partes da coluna estão anotados os valores de deformação em milímetros correspondentes a cada período. As linhas tracejadas T2 demarcam o percentual do tempo total do ensaio correspondente ao tramo central – etapa 2 e as linhas pontilhadas T1 marcam o percentual do tempo correspondente ao início do ensaio. O tempo do final do ensaio T3 não é apresentado, porém, é facilmente calculado como T3 = 1 - T1 - T2. A média das deformações finais de cada série é demarcada por uma linha vermelha e o desvio padrão dessas deformações finais corresponde à área sombreada em torno dessa linha vermelha. Finalmente as deformações máximas obtidas das envoltórias dos ensaios de compressão estática $f_{c_{cub}}$ estão marcadas por duas estrelas no eixo vertical esquerdo.

As Figuras 5.17 até 5.20 apresentam o resumo do histórico de deformações para o concreto sem fibras C1, separados para cada frequência, iniciando-se por 0,0625 Hz até 4 Hz. As Figuras 5.21 a 5.24 mostram o histórico

das deformações para o concreto com fibras de polipropileno C2. O resumo das deformações máximas do concreto com fibras de aço C3 é apresentado nas Figuras 5.25 até 5.28.



Figura 5.17 - Histórico de deformações: concreto sem fibras; 0,0625 Hz.



Figura 5.18 - Histórico de deformações: concreto sem fibras; 0,25 Hz.



Figura 5.19 - Histórico de deformações: concreto sem fibras; 1 Hz.



Figura 5.20 – Histórico de deformações: concreto C1; 4 Hz.



Figura 5.21 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 0,0625 Hz.



Figura 5.22 - Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 0,25 Hz.



Figura 5.23 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 1 Hz.



Figura 5.24 – Histórico de deformações: concreto com fibras de polipropileno; 4 Hz.



Figura 5.25 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 0,0625 Hz.



Figura 5.26 - Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 0,25 Hz.



Figura 5.27 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 1 Hz.



Figura 5.28 – Histórico de deformações: concreto com fibras de aço; 4 Hz.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 5.17 a 5.28 a deformação máxima foi limitada a 1 mm para uma melhor comparação entre todos os ensaios. Para o concreto com fibras de aço C3 alguns corpos de prova deformaram mais do que 1 mm antes da ruptura. Para esses corpos de prova foi marcada em <u>destaque</u> a deformação total no topo das colunas correspondentes à deformação no final do ensaio, visto que essas colunas não foram desenhadas em sua escala real, pois superaram o limite de 1 mm dos gráficos.

As deformações totais em cada concreto acompanharam as faixas de valores de deformação obtidas das envoltórias dos ensaios de compressão simples $f_{c_{cub}}$ (Figura 5.15). Alguns corpos de prova romperam com deformações fora da faixa de valores demarcados pelas envoltórias, porém sempre próximos a estas. Tomando-se como exemplo as deformações máximas de cada concreto: nenhum corpo de prova do concreto sem fibras deformou mais do que 0,70 mm; assim como nenhum dos ensaios de fadiga do concreto com fibras de polipropileno teve deformação final maior do que 0,85 mm; e para o concreto com fibras de aço nenhuma deformação final foi inferior a 0,75 mm.

Observando-se as deformações ao longo de cada ensaio, para as doze séries nas Figuras 5.17 a 5.28, verifica-se que as deformações menores nem sempre ocorreram nos corpos de prova com menor número de ciclos, nem as deformações maiores com o maior número de ciclos de cada série de ensaios. Apesar de uma aparente tendência, nos concretos C1 e C2, de que os corpos de prova que resistiram menores números de ciclos em cada série foram os que suportaram menores deformações.

Como visto anteriormente nas Figuras 5.13 e 5.14, comparando-se as curvas de fluência cíclica, o concreto sem fibras rompeu com as menores deformações e o concreto com fibras de aço teve as maiores deformações. Esse fato é comprovado pelas Figuras 5.17 a 5.28, para todos os ensaios de cada série. A comparação entre os três concretos e as quatro frequências também pode ser feita com o auxílio da Tabela 5.22 que resume a média \pm o desvio padrão da deformação total e da deformação no tramo central D2 (de onde se obteve $\dot{\varepsilon}$), para cada série de ensaios.

134

Conorato	Deformação	Frequência (Hz)					
Concreto	(mm)	4	1	0,25	0,0625		
C1	Total	56 ± 5	55 ± 7	49 ± 8	55 ± 9		
CI	Central	13 ± 2	14 ± 6	15 ± 5	14 ± 3		
C2	Total	72 ± 10	65 ± 10	56 ± 12	58 ± 12		
	Central	23 ± 7	29 ± 5	21 ± 9	19 ± 8		
<u></u>	Total	88 ± 7	94 ± 14	99 ± 10	104 ± 12		
03	Central	34 ± 9	27 ± 13	29 ± 8	31 ± 9		

Tabela 5.22 – Deformação total e central: média ± desvio padrão.

A Tabela 5.22 mostra que as deformações foram maiores nos concretos com fibras, tanto para as deformações totais, quanto para as deformações no tramo central (maior parcela do tempo do ensaio), sendo maiores para os concretos com fibras de aço. Com respeito à frequência, aparentemente as deformações foram menores para as frequências mais baixas para os concretos C1 e C2, porém, a variabilidade dos valores de deformações não permite afirmar que existe uma relação entre as deformações totais e a frequência. Para o concreto com fibras de aço C3 ficou claro que quanto menor a frequência, maiores foram as deformações totais.

Reunindo-se o número de ciclos até a ruptura, as deformações máximas ao longo dos ensaios e a frequência de carregamento é possível entender porque o concreto resiste a um menor número de ciclos à fadiga em compressão para as menores frequências, e porque as fibras elevam o número de ciclos apenas para as baixas frequências se for levada em consideração a taxa de carregamento aplicada nas diferentes frequências selecionadas, seguindo o raciocínio a seguir.

Diversos autores (Reinhardt, 1987; Bischoff e Perry, 1991; Wu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012, entre outros) comprovaram que as propriedades mecânicas do concreto são superiores para taxas de carregamento elevadas, consideradas dinâmicas.

Vegt e Weerheijm (2007) desenvolveram uma técnica para explicar esse fenômeno analisando a propagação de fissuras e microfissuras em ensaios de impacto em concreto, utilizando uma barra Hopkinson, sob diferentes taxas de carregamento: 10⁻⁴ GPa/s, considerada estática; 50 GPa/s e 1000 GPa/s, consideradas dinâmicas. Com o tratamento de imagens microscópicas de fatias dos corpos de prova após os ensaios esses autores comprovaram que a ruptura a baixas taxas de carregamento ocorre pela formação de uma única macrofissura. Essa macrofissura se forma a partir de microfissuras em diferentes

direções que tentam encontrar outras microfissuras para formar uma grande fissura que leva o corpo de prova à ruptura. Essas microfissuras surgem das ligações mais fracas ao redor dos agregados ou na zona de transição – a interface entre a pasta de cimento e as partículas dos agregados. Esses autores concluíram que no ensaio a baixa taxa de carregamento as microfissuras têm tempo de procurar o caminho mais frágil e juntarem-se em uma única macrofissura. Já no caso das altas taxas de carregamento, as microfissuras são geradas não somente nos pontos mais frágeis e muitas vezes ao invés de circular os agregados, atravessam os mesmos. Isso faz com que ocorram múltiplas microfissuras e a ruptura ocorre de uma maneira mais frágil, pelo aparecimento de diversas macrofissuras acompanhadas de inúmeras microfissuras por toda a extensão da fatia analisada. Esses autores justificaram que a altas taxas de carregamento as microfissuras não têm tempo de encontrar o caminho mais frágil, aliado à ocorrência de diversas fissuras em todas as direções, a ruptura ocorre pela formação de múltiplas macrofissuras, suportando maiores deformações, consumindo mais energia e elevando a resistência.

Seguindo esse raciocínio de que a ruptura ocorre pela formação de uma única fissura para baixas taxas de carregamento, ou múltiplas fissuras para taxas de carregamento elevadas, é possível explicar porque o número de ciclos até a ruptura dos ensaios de fadiga, realizados no programa experimental, foi menor para as frequências mais baixas. As taxas de carregamento dos ensaios realizados no programa experimental deste trabalho foram muito inferiores às do estudo de Vegt e Weerheijm (2007), mesmo assim a teoria de uma única fissura ou múltiplas fissuras é válida. As taxas de carregamento, utilizadas no programa experimental, foram de 7, 28, 110 e 420 MPa/s para as frequências 0,0625 Hz, 0,25 Hz, 1 Hz e 4 Hz, respectivamente.

Se nos ensaios de fadiga realizados com a menor frequência 0,0625 Hz as microfissuras têm tempo de se unir, formando uma macrofissura principal que leva o corpo de prova à ruptura, nos ensaios com a maior frequência 4 Hz essas microfissuras não têm tempo de se encontrar em um caminho mais frágil, e múltiplas microfissuras vão aparecendo por toda a extensão do corpo de prova e o tempo – ou número de ciclos – para que essas microfissuras se encontrem é maior.

Essas microfissuras, em um ensaio de fadiga, abrem e fecham a cada ciclo de carga e descarga. No início do ensaio – período 1 da Figura 5.16 – as primeiras deformações a cada ciclo são as maiores de todo o decorrer do ensaio, salvo as últimas deformações antes da ruptura. Essas deformações

136

iniciais vão diminuindo a cada ciclo, até que se estabilizam e se inicia o período 2, onde o incremento de deformação a cada ciclo é praticamente constante ¿. Essas deformações são oriundas em parte da deformação elástica dos componentes do concreto, principalmente dos agregados graúdos, e em parte da abertura de microfissuras ao longo de toda a extensão tridimensional do corpo de prova - nesse caso o cúbico. E tendo-se em conta que o modo de ruptura por deslizamento foi sempre observado, com a superfície de ruptura inclinada em relação ao eixo de carregamento. Entende-se que no início do ensaio surgem microfissuras por toda a extensão do corpo de prova, ocorrendo uma redistribuição de tensões e surgindo um plano de tensões principais. Imaginando-se que esse plano de tensões principais fosse uma diagonal ligando um vértice superior do cubo com o vértice inferior oposto mais distante, como sugere a Figura 5.29. As microfissuras mais afastadas desse plano de ruptura se estabilizam, e apenas as microfissuras próximas ao plano de ruptura seguem propagando-se, ao se abrir e fechar a cada ciclo. Sendo assim, nos ensaios a baixas frequências esse plano de ruptura surge a partir da propagação de microfissuras em um caminho mais frágil. Nos ensaios de fadiga a frequências mais altas, esse mesmo plano de ruptura pode ocorrer, porém, outras microfissuras ao redor também podem se unir, desviando ou aumentando a superfície de ruptura.



Figura 5.29 – Modo de ruptura: ensaio de fadiga; concreto sem fibras, 1Hz.

No caso dos concretos com fibras, quando essas microfissuras estão se propagando e se unindo para formar a superfície principal de ruptura, uma ou mais fibras costuram as microfissuras atrasando sua propagação. Para as frequências mais baixas, esse atraso ocorre até o ponto em que a(s) fibra(s) se rompe(m), ou as fissuras contornam a(s) fibra(s). Para as frequências mais altas, algumas fibras podem conter a propagação de fissuras nas zonas mais frágeis, e antes que essas fissuras se propaguem surgem outras microfissuras que se unem e criam um novo plano de ruptura.

Isso explica porque os concretos com fibras tiveram melhor comportamento à fadiga nas menores frequências e não na maior frequência selecionada 4 Hz. O desempenho superior do concreto com fibras de aço em relação ao do com fibras de polipropileno nas menores frequências se deve ao fato de que as fibras de aço são mais resistentes e mais eficazes do que as fibras de polipropileno.

Uma última forma de entender porque a frequência de carregamento influenciou o desempenho à fadiga, e porque as fibras melhoraram esse desempenho apenas nas menores frequências pode ser realizada observandose a deformação a cada ciclo nas 12 séries de ensaios de fadiga, levando-se em consideração que cada tipo de concreto tem um limite máximo de deformação que segue as envoltórias dos ensaios de compressão estática da Figura 5.15. A deformação a cada ciclo não é apresentada em valores individuais, porém, é facilmente obtida a partir das Figuras 5.17 a 5.28. Observa-se que a deformação a cada ciclo foi maior para o concreto sem fibras C1, menor para o concreto com fibras de aço C3 e intermediária para o concreto com fibras de polipropileno C2, pois as fibras restringem a propagação de fissuras reduzindo a deformação a cada ciclo. Com respeito às frequências, a deformação por ciclo foi maior para a frequência mais baixa e menor para a frequência mais alta, nos três concretos estudados.

Se existe um limite máximo de deformação que cada concreto suporta e este limite é menor no concreto sem fibras, se a deformação por ciclo é maior no concreto sem fibras, esse vai romper com um menor número de ciclos em comparação aos concretos com fibras. Assim como, se a deformação por ciclo foi maior para a frequência mais baixa 0,0625 Hz – com as microfissuras procurando o caminho mais frágil – e menor para a frequência mais elevada 4 Hz nos três concretos estudados, o número de ciclos para se atingir a deformação limite que leva o corpo de prova à ruptura é menor para as frequências mais baixas.

5.5. Modo de ruptura

A ruptura observada em todos os corpos de prova ensaiados, sejam eles à compressão estática, ou à fadiga em compressão, independente da geometria do corpo de prova ou frequência de carregamento, ocorreu sempre por deslizamento, com a superfície de ruptura inclinada em relação ao eixo de carregamento.

A superfície de ruptura nos corpos de prova cúbicos sempre partia das arestas ou vértices em direção ao centro do cubo. Em geral dois padrões de ruptura foram observados: a separação em duas partes semelhantes com o formato de duas pirâmides separadas por uma diagonal do cubo que une dois vértices mais distantes, sendo a base de cada pirâmide as faces superior e inferior do cubo (Figura 5.29); ou duas pirâmides, ou cones, que se sobrepõem, onde o vértice de cada pirâmide esta na base da outra pirâmide como mostra a Figura 5.30. Esses dois padrões de ruptura ocorreram em todas as séries de ensaios: de compressão simples ou de fadiga a diferentes frequências, para os concretos com e sem fibras. Esse mesmo padrão foi observado nos ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos, como mostra a Figura 5.31.

Cabe ressaltar que a configuração pós-ensaio dos corpos de prova rompidos não corresponde exatamente à configuração de ruptura ao final do último ciclo devido ao controle de carga dos ensaios de fadiga. Apesar de o ensaio ser controlado por carga, o fim do ensaio ocorria quando se atingia um limite de deformação pré-configurado. Esse limite de deformação era configurado com uma margem superior em 1,5 mm à máxima deformação estática de cada concreto, pois já se sabia que alguns corpos de prova poderiam suportar maiores deformações finais em fadiga em comparação às deformações estáticas. Dependendo do nível de carga em que ocorra a ruptura, a máquina de ensaios pode procurar uma carga mais alta, ou apenas reduzir gradualmente a carga quando o corpo de prova já está rompido. Com isso, na configuração de ruptura vista após o ensaio (Figuras 5.29 a 5.35) pode ter ocorrido um carregamento pós-ruptura, aumentando ou modificando a configuração de ruptura.



Figura 5.30 - Modo de ruptura: ensaio de fadiga; concreto sem fibras, 0,0625 Hz.



Figura 5.31 – Modo de ruptura por deslizamento: ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico; concreto sem fibras.

A principal diferença entre os concretos com e sem fibras foi que nos concretos com fibras as laterais dos cubos se mantinham aderidas ao centro do corpo de prova porque as fibras costuravam as superfícies de ruptura. A Figura 5.32 apresenta a vista da face superior de três corpos de prova cúbicos ensaiados à fadiga para o concreto sem fibras C1, frequência 1 Hz; com fibras de polipropileno C2, frequência 4 Hz; e com fibras de aço C3, frequência 0,0625 Hz.



Figura 5.32 - Face superior dos corpos de prova rompidos: C1, C2 e C3.

Observa-se na Figura 5.32 que nos três concretos se destaca o que seria a base de um cone, ou uma pirâmide. No caso do concreto sem fibras C1 as faces laterais se separaram, enquanto que nos concretos com fibras C2 e C3 as faces laterais se mantiveram aderidas porque as fibras costuraram as fissuras.

A Figura 5.33 mostra uma vista de duas faces laterais de um corpo de prova cúbico do concreto com fibras de polipropileno C2 ensaiado à fadiga em compressão com frequência 0,25 Hz. Observam-se as faces laterais aderidas e o desenho das fissuras indicando a formação duas pirâmides.



Figura 5.33 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de polipropileno; frequência 0,25 Hz

A vista de duas faces laterais de um corpo de prova rompido do concreto com fibras de aço C3 ensaiado à fadiga com frequência 4 Hz é apresentada na Figura 5.34, onde pode ser visto o desenho das fissuras separando-se um corpo central piramidal das faces laterais.

Apenas para comprovar que a ruptura também ocorreu dividindo o cubo em duas pirâmides, com a superfície de ruptura guiada por uma diagonal ligando um vértice superior do cubo a um vértice inferior oposto mais afastado, tanto no concreto sem fibras como na Figura 5.29 quanto nos concretos com fibras, a Figura 5.35 mostra um corpo de prova rompido do concreto com fibras de aço C3, ensaiado à fadiga na frequência 0,25 Hz. Observa-se que as partes seguem aderidas, pela presença das fibras costurando a superfície de ruptura.



Figura 5.34 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de aço; frequência 4 Hz, separação em um corpo central e laterais aderidas.



Figura 5.35 – Faces laterais de um corpo de prova rompido: concreto com fibras de aço; frequência 0,25 Hz, separação em duas partes semelhantes.

5.6. Ensaios de fadiga – variação da razão entre tensões

Como descrito no final do capítulo 4, foi realizada uma nova etapa de ensaios de fadiga em uma nova dosagem de concreto sem fibras, denominada concreto C4. Esta nova dosagem foi produzida apenas para realizar três séries de ensaios ($f_{c_{cub,C4}}$, R = 0,3, R = 0,1) que serviram para validar o modelo probabilístico proposto no capitulo seis, além da obtenção das propriedades mecânicas por ensaios de compressão em cilindros.

Para obter as propriedades mecânicas de resistência à compressão f_c , módulo de elasticidade *E* e coeficiente de Poisson v foram realizados ensaios à compressão seguindo os mesmos procedimentos e normas adotados nos concretos C1, C2 e C3, em quatro corpos de prova cilíndricos de diâmetro 150 mm e altura 300 mm. A Tabela 5.23 apresenta os resultados destes ensaios.

Idade	n⁰ do ensaio	fc	Ε	ν
		MPa	GPa	
6 meses	1	95,0	—	—
	2	88,4	36,1	0,24
	3	91,9	37,4	0,25
	4	87,3	37,3	0,24
	média	90,6	36,9	0,24
	DP	4	1	0

Tabela 5.23 - Propriedades mecânicas: concreto sem fibras C4.

Para obter a resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ usada para configurar os ensaios de fadiga foram ensaiados vinte corpos de prova cúbicos de 80 ± 1 mm de aresta. A Tabela 5.24 apresenta os resultados de resistência à compressão desses 20 ensaios ordenados do menos resistente ao mais resistente.

Número do	$f_{c_{cub}}$	Número do	$f_{c_{cub}}$
ensaio	MPa	ensaio	MPa
1	84	11	98
2	85	12	99
3	85	13	100
4	88	14	100
5	89	15	102
6	90	16	102
7	90	17	102
8	91	18	103
9	93	19	104
10	97	20	108

Tabela 5.24 – Resistência à compressão $f_{c_{cub}}$ concreto sem fibras C4.

A média desses 20 ensaios de compressão foi 95,5 MPa e o desvio padrão 7 MPa. Conforme descrito no final do capítulo 4, pretendia-se que a configuração dos ensaios de fadiga em termos de tensão máxima fosse a mesma utilizada nos concretos C1, C2 e C3: $S_{máx} = 85\% f_{c_{cub}}$, sendo 15 ensaios com razão entre tensões mínima e máxima R = 0,3 e 15 ensaios com R = 0,1. Após alguns ensaios com $S_{máx} = 85\% f_{c_{cub}} = 81,2$ MPa e R = 0,3 alguns dos corpos de prova atingiram mais de um milhão de ciclos sem chegar a ruptura, enquanto que outros corpos de prova romperam com poucos milhares de ciclos. Optou-se então por uma tensão máxima de 90 MPa = 94% $f_{c_{cub}}$ com a qual foram realizadas as duas séries de quinze ensaios de fadiga em compressão variando a razão entre tensões R. A Tabela 5.25 apresenta esses resultados de ensaios de fadiga do concreto sem fibras C4.

Número	Número de ciclos		
do ensaio	R = 0,3	<i>R</i> = 0,1	
1	38	46	
2	73	125	
3	150	222	
4	667	302	
5	2149	731	
6	2798	858	
7	2927	1106	
8	7288	1231	
9	7600	1753	
10	7839	2265	
11	9218	2352	
12	11863	3961	
13	17172	4276	
14	20426	5988	
15	75378	7153	

Tabela 5.25 – Resistência à compressão $f_{c_{cub}}$: concreto sem fibras C4.

Observa-se na Tabela 5.25 que os ensaios configurados com maior razão entre tensões R = 0,3 resistiram a um maior número de ciclos em virtude da menor amplitude de tensões aplicada, consequentemente menor deformação a cada ciclo. Os resultados dos menores números de ciclos das duas séries são da mesma ordem de grandeza, porém, observa-se uma grande diferença nos corpos de prova que resistiram a um maior número de ciclos.

Lembrando que estes ensaios do concreto sem fibras C4 foram realizados apenas com o objetivo de validar o modelo probabilístico proposto no capítulo 6, e não tiveram como objetivo comparar os resultados com os concretos C1, C2 e C3.

5.7. Comentários finais

Dentre os três concretos principais C1, C2 e C3 apresentados e analisados neste capítulo em todas as propriedades avaliadas, sejam estáticas (f_c , $f_{c_{cub}}$, E, v, $f_t e f_{Rj}$) ou de fadiga, o desempenho do concreto com fibras de aço C3 foi igual ou superior aos concretos C1 e C2. O desempenho do concreto sem fibras C1 foi sempre inferior, e o concreto com fibras de polipropileno C2 teve desempenho intermediário entre C1 e C3.

Quanto ao efeito da frequência de carregamento nos ensaios de fadiga em compressão, comprovou-se que o número de ciclos à fadiga diminuiu com a redução da frequência, na faixa de frequências estudadas – entre 0,0625 Hz e 4 Hz. A adição de fibras melhorou o desempenho à fadiga nas menores frequências estudadas, porém, nenhuma melhora representativa foi observada na maior frequência 4 Hz.