

6 Análise dos Resultados

6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das sete vigas e a determinação dos seus índices de ductilidade. As resistências das vigas são analisadas por meio da relação entre as cargas máximas teóricas e as cargas obtidas experimentalmente.

Os gráficos de carga x deformação específica dos aços, carga x deformação específica das fibras e os gráficos de carga x flecha das sete vigas, constam do Anexo D.

Os resultados dos índices de ductilidade de flecha, os índices de ductilidade de curvatura, os índices de ductilidade energética de flecha e os índices de ductilidade energética de curvatura são calculados e apresentados neste capítulo. O estudo para cada índice de ductilidade é realizado separadamente e, posteriormente, elabora-se uma análise comparativa de todos os índices de ductilidade obtidos.

Os resultados encontrados para a rotação plástica das vigas são apresentados e analisados.

6.2. Capacidade Resistente das Vigas

As vigas são analisadas em relação às cargas máximas teóricas e as cargas obtidas nos ensaios. A Tabela 6.1 mostra os valores teóricos das cargas, os valores experimentais e os tipos de ruptura ocorridos. Na determinação dos valores teóricos das cargas são utilizados os valores experimentais obtidos no ensaio de resistência à tração do compósito de fibra de carbono, como está descrito no item 5.2.5, e apresentados na Tabela 5.8. Esses valores teóricos foram obtidos por meio da sistemática apresentada no capítulo 2 (item 2.5.1). A Figura 6.1 mostra um gráfico comparativo entre as cargas teórica e experimental.

Tabela 6.1 – Valores das cargas e modos de ruptura das vigas ensaiadas.

Viga	Tipo de Ruptura	$P_{Teórica}$ (kN)	P_{exp} (kN)	$\frac{P_{Experimental}}{P_{Teórica}}$	Variação (%)	Varição de P_{exp} das vigas em relação à VR
VR	Esmagamento do concreto na zona de compressão	120,25	143,55	1,194	19,40	-
AI	Ruptura do CFC entre o apoio e aplicação de carga	169,31	187,34	1,107	10,70	1,31
AII	Ruptura do CFC	169,31	191,09	1,129	12,90	1,33
BI-1	Ruptura do CFC	170,28	199,13	1,169	16,90	1,37
BI-2	Ruptura do CFC na parte central da viga	170,28	145,33	0,853	-14,65	1,01
BII-1	Ruptura por flexão seguida do descolamento do CFC	171,50	165,86	0,967	-3,289	1,16
BII-2	Ruptura do CFC	171,50	152,16	0,887	-11,28	1,06

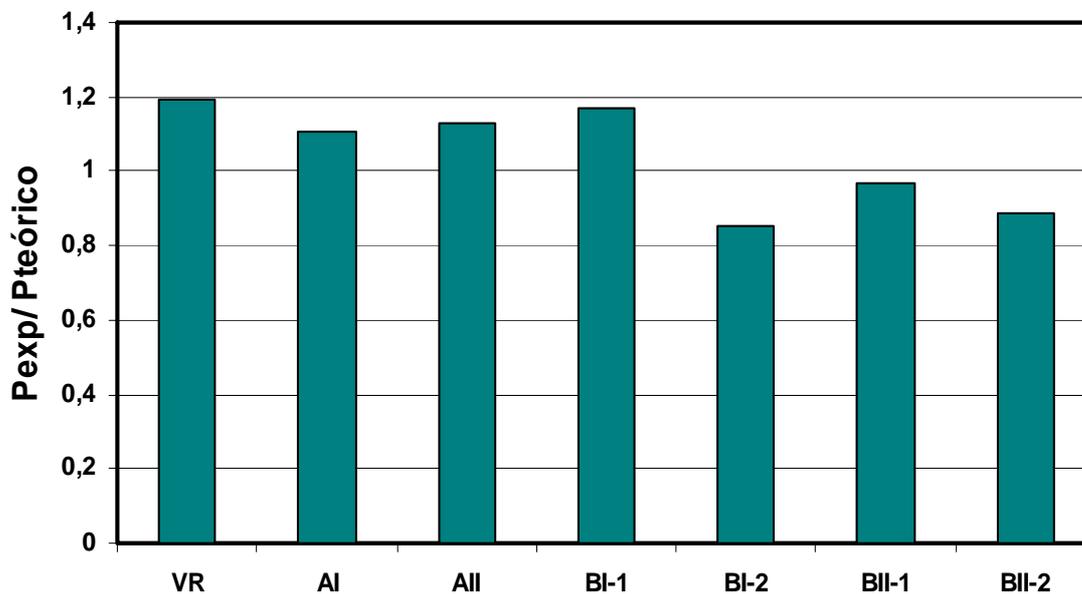


Figura 6.1 – Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas ensaiadas.

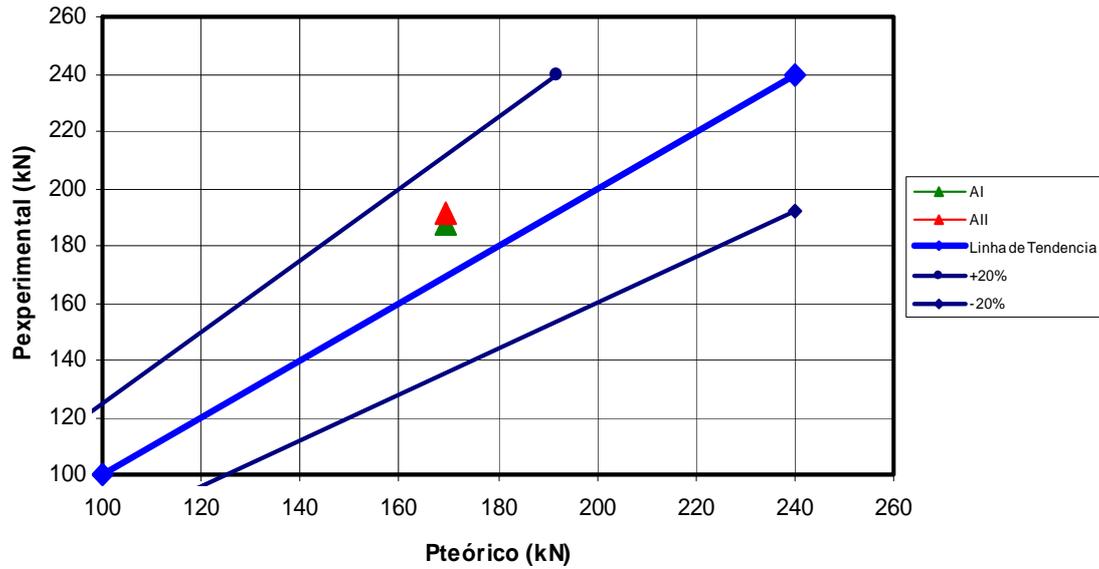


Figura 6.2 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura teórica e experimental para as vigas do grupo A.

A Figura 6.2 compara as cargas de ruptura teórica e experimental para as vigas do grupo A, marcando o limite de $\pm 20\%$ de diferença entre essas cargas.

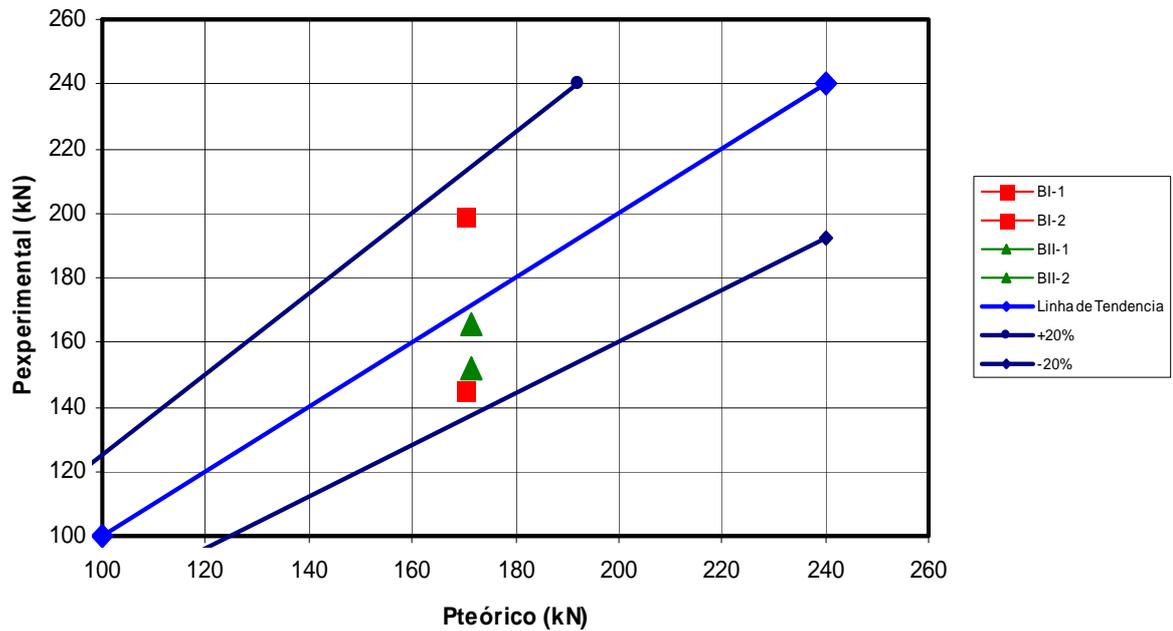


Figura 6.3 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura teórica e experimental para as vigas do grupo B.

A Figura 6.3 compara as cargas de ruptura teórica e experimental para as vigas do grupo B, marcando o limite de $\pm 20\%$ de diferença entre essas cargas.

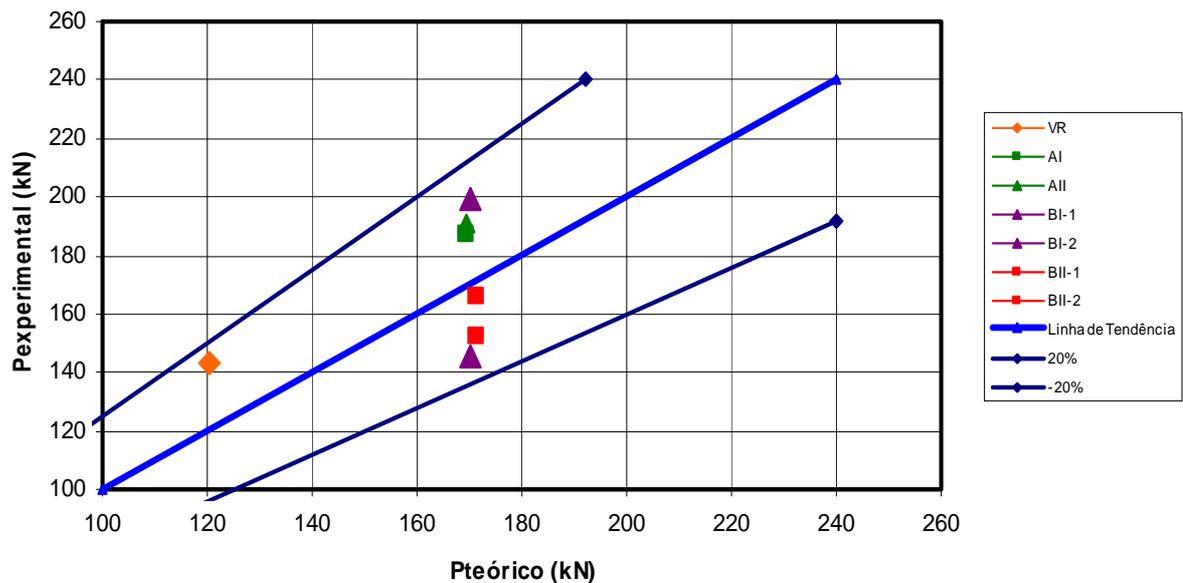


Figura 6.4 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura e experimentais das vigas reforçadas e da viga de referência.

- i. O resultado teórico para a carga de ruptura da VR foi 19 % inferior ao valor experimental.
- ii. Os valores teóricos das vigas do grupo A foram inferiores aos valores experimentais. As variações ficaram entre 10 e 13 %.
- iii. Para a viga AI a variação foi de 10,70 % e para a viga AII foi de 12,9 %, tendo como base a viga de referência.
- iv. Os valores teóricos das vigas do grupo BI apresentaram maior discrepância em relação aos valores experimentais:
 - a carga experimental de ruptura da viga BI-1 foi 199,13 kN e a teórica foi de 170,28 kN, o que resulta numa variação de 16,9 %;
 - a carga experimental de ruptura da viga BI-2 foi de 145,33 kN e a carga teórica foi de 170,28 kN, o que resulta numa variação de - 14,65 %.
- v. As cargas de ruptura experimentais das vigas do grupo BII foram inferiores às cargas teóricas. Para a BII-1 a variação entre o valor teórico e o experimental foi de - 3,89 % e para a viga BII-2 foi de -11,28 %.
- vi. A discrepância entre os valores teóricos e experimentais para as vigas do grupo B pode ser atribuída ao fato de que os valores teóricos mostrados na Tabela 5.8 não consideram a deformação inicial da viga.

- vii. Analisando-se os dois grupos, A e B, verifica-se que a relação entre a carga teórica e experimental não ultrapassa 20 %. Esse limite para a variação da relação entre essas cargas é aceitável, o que mostra que os valores obtidos estão consistentes.
- viii. As vigas do grupo A tiveram acréscimo de cerca de 30 % nas cargas experimentais de ruptura em relação à carga experimental de ruptura da VR.
- ix. As vigas do grupo B, com exceção da viga BI-1, não tiveram acréscimo significativo na carga experimental de ruptura em relação à carga de ruptura experimental da VR.

6.3. Gráficos Obtidos nos Ensaio

No Anexo D são apresentados os diagramas de carga x deformação específica dos aços, carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono e as cargas x flechas das vigas ensaiadas. O posicionamento dos extensômetro elétrico e dos deflectômetros são mostrados na Figura 5.10.

Nas vigas VR, AI, AII as leituras dos deflectômetros não foram realizadas até o final do ensaio, visando preservar o equipamento utilizado. Portanto, as leituras das flechas dessas vigas foram interrompidas para cargas em torno de 160 kN. Para o ensaio das vigas do grupo B, mudou-se o posicionamento dos deflectômetros, permitindo que estes pudessem efetuar as leituras das flechas até o término do ensaio.

6.4. Índices de Ductilidade

Os índices de ductilidade foram calculados a partir dos dados obtidos nos ensaios das vigas. A Tabela 6.2 mostra os valores das cargas e das flechas para as situações de fissuração, escoamento e ruptura, para o deflectômetro posicionado no meio do vão. Foram calculados os índices que permitem analisar a ductilidade das vigas reforçadas.

Tabela 6.2 – Valores das cargas e flechas para as vigas ensaiadas.

VIGA	P_{CR} (kN)	δ_{CR} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)
VR	15,39	0,80	96,05	14,14	143,55	42,74
AI	21,88	1,81	80,70	11,98	187,34	52,61
AII	15,35	0,77	89,88	12,53	191,09	36,63
BI-1	20,59	1,43	74,25	11,27	199,13	77,50
BI-2	16,67	1,15	75,47	13,12	145,33	68,78
BII-1	15,86	0,81	75,38	12,27	165,86	66,87
BII-2	20,16	0,94	60,23	12,25	152,16	67,53

Com os valores das cargas e flechas obtidos diretamente dos ensaios foram calculados os momentos e as curvaturas de cada viga, pela metodologia apresentada no capítulo 3. Os cálculos realizados para a determinação dos momentos e curvaturas de fissuração, escoamento da armadura longitudinal e de ruptura, são apresentados no Anexo E. Na tabela 6.3 são mostrados todos os valores de momentos e curvaturas calculados.

Tabela 6.3 – Valores de momento e curvatura calculados.

VIGA	M_{CR} (kN.m)	k_{CR} (mm)	M_y (kN.m)	k_y (mm)	M_u (kN.m)	k_u (mm)
VR	9,62	0,0002	60,03	0,0041	89,72	0,0123
AI	13,68	0,0005	50,44	0,0034	117,09	0,0151
AII	9,59	0,0002	56,18	0,0036	119,43	0,0105
BI-1	12,87	0,0004	46,41	0,0032	124,46	0,022
BI-2	10,42	0,0003	47,17	0,0038	90,83	0,0198
BII-1	9,912	0,0002	47,11	0,0035	103,66	0,019
BII-2	12,60	0,0003	37,64	0,0035	95,10	0,0194

6.4.1. Índices de Ductilidade de Flecha

O índice de ductilidade de flecha corresponde à relação entre a flecha de ruptura e a flecha de escoamento. Analisando-se o deflectômetro posicionado no meio do vão, tem-se o índice de ductilidade de flecha para todas as vigas (Tabela 6.4). A Figura 6.5 apresenta um gráfico comparativo dos índices de ductilidades das vigas reforçadas em relação à VR.

Tabela 6.4 – Índices de ductilidade de flecha.

VIGA	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$
VR	96,05	14,14	143,55	42,74	3,02
AI	80,70	11,98	187,34	52,61	4,39
AII	89,88	12,53	191,09	36,63	2,92
BI-1	74,25	11,27	199,13	77,50	6,87
BI-2	75,47	13,12	145,33	68,78	5,24
BII-1	75,38	12,27	165,86	66,87	5,44
BII-2	60,23	12,25	152,16	67,53	5,51

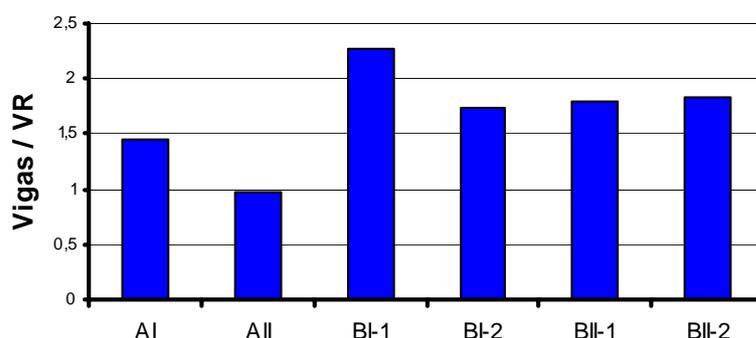


Figura 6.5 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade de flecha das vigas reforçadas em relação à VR.

- As vigas do grupo B, ou seja, aquelas que receberam reforço após a aplicação de um carregamento inicial tiveram índices de ductilidade de flecha maiores que as vigas do grupo A, que receberam reforço inicialmente;
- Todos os índices de ductilidade de flecha das vigas do grupo B foram consideravelmente maiores que o índice de ductilidade de flecha da viga VR.

6.4.2. Índices de Ductilidade de Curvatura

O índice de ductilidade de curvatura corresponde à relação entre a curvatura de ruptura e a curvatura correspondente ao escoamento da armadura longitudinal. Considerando-se o deflectômetro posicionado no meio do vão, os dados de

escoamento, de ruptura e o índice de ductilidade de curvatura, são mostrados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Índices de ductilidade de curvatura.

VIGA	M_y (kN.m)	k_y (m ⁻¹)	M_u (kN)	k_u (m ⁻¹)	$\frac{k_u}{k_y}$
VR	60,03	0,0041	89,72	0,0123	3,02
AI	50,44	0,0034	117,09	0,0151	4,44
AII	56,18	0,0036	119,43	0,0105	2,92
BI-1	46,41	0,0032	124,46	0,022	6,87
BI-2	47,17	0,0038	90,83	0,0198	5,21
BII-1	47,11	0,0035	103,66	0,019	5,75
BII-2	37,64	0,0035	95,10	0,0194	5,43

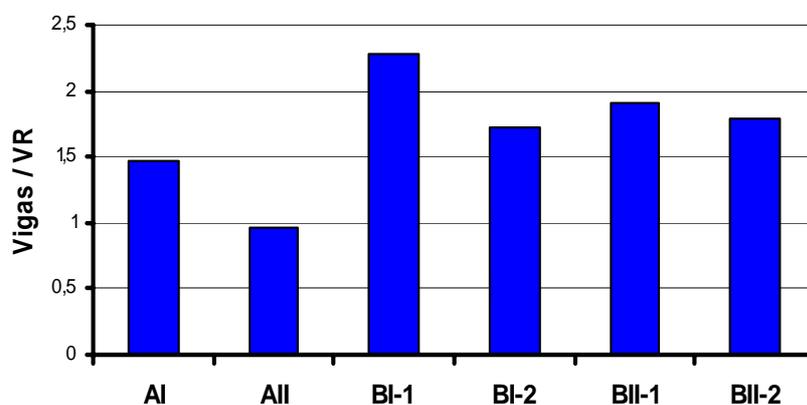


Figura 6.6 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade de curvatura das vigas reforçadas em relação à VR.

- Para as vigas grupo B, reforçadas após carregamento inicial, os índices de ductilidade de curvatura foram maiores que os índices de ductilidade das vigas do grupo A, nas quais foi aplicado o reforço antes do carregamento;
- Todos os índices de ductilidade de curvatura das vigas do grupo B foram maiores que o índice de ductilidade da viga VR.

6.5. Índices de Ductilidade Energética

Os índices de ductilidade energética foram obtidos por meio da análise das energias total e elástica. A energia total foi obtida por meio da área sob a curva

correspondente. Os cálculos dos momentos e curvaturas, e a determinação das energias elásticas encontram-se nos Anexos E e F, respectivamente.

Os gráficos de carga x flecha, e momento x curvatura para determinação da área sob a curva encontram-se no Anexo D.

6.5.1. Índices de Ductilidade Energética de Flecha

Os índices de ductilidade energética de flecha foram obtidos por meio da análise dos gráficos de carga x flecha experimental. A Tabela 6.6 apresenta os valores das energias total e elástica e os índices de ductilidade energéticos de flecha de cada viga. Os cálculos das energias e a determinação dos índices de ductilidade energética de flecha encontram-se nos Anexos F e G, respectivamente.

Tabela 6.6 - Índices de ductilidade energética de flecha.

VIGA	Energia Total E_{Total}	Energia Elástica $E_{ELÁSTICA}$	μ_{δ}
VR	4466,16	535,58	4,67
AI	6278,73	1451,65	2,66
AII	3897,72	915,86	2,63
BI-1	10958,40	1376,96	4,48
BI-2	7337,15	728,52	5,54
BII-1	7883,33	698,15	6,17
BII-2	7232,27	541,28	7,18

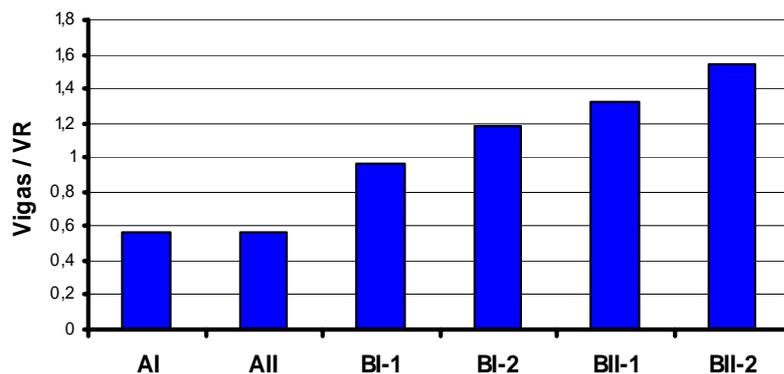


Figura 6.7– Gráfico comparativo do índice de ductilidade energética de flecha das vigas reforçadas em relação à VR.

- Os índices de ductilidade energética de flecha das vigas do grupo A, reforçadas inicialmente, foram menores que o índice de ductilidade energética de flecha da viga de referência;
- Três vigas do grupo B tiveram índices de ductilidade energética de flecha consideravelmente maiores que o índice de ductilidade da viga VR. Esse índice foi menor para a viga BI-1 em relação à VR, mas da mesma ordem de grandeza.

6.5.2. Índices de Ductilidade Energética de Curvatura

Os índices de ductilidade energética de curvatura das vigas ensaiadas foram obtidos por meio da análise dos gráficos de momento x curvatura experimentais. Os valores de momento e curvatura encontrados são apresentados no Anexo E. Na Tabela 6.7 estão os valores das energias total e elástica e os índices de ductilidade energética de curvatura de cada viga ensaiada. Os cálculos das energias e o cálculo dos índices de ductilidade energético de curvatura encontram-se no Anexo F e G, respectivamente.

Tabela 6. 7- Índice de ductilidade energética de curvatura.

VIGA	Energia Total E_{Total}	Energia Elástica $E_{ELÁSTICA}$	μ_k
VR	0,751	0,084	4,98
AI	1,076	0,251	2,65
AII	0,718	0,149	2,91
BI-1	1,692	0,241	4,02
BI-2	1,206	0,119	5,57
BII-1	1,339	0,108	6,67
BII-2	1,129	0,108	5,74

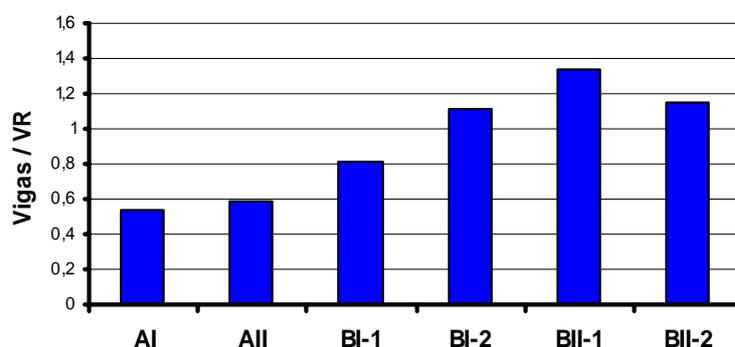


Figura 6.8 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade energética de curvatura das vigas reforçadas em relação à VR.

- As vigas do grupo A, reforçadas inicialmente, tiveram índices de ductilidade energética de curvatura menores que o índice de ductilidade energética de curvatura da viga de referência;
- Três das vigas do grupo B, reforçadas após carregamento inicial, tiveram índices de ductilidade energética de curvatura superiores ao índice de ductilidade energética de curvatura da viga VR, com exceção da viga BI-1, que teve um valor para esse índice inferior ao da VR, mas da mesma ordem de grandeza.

6.6. Análise das Cargas

Neste item são analisados os valores das cargas atuantes nas vigas em cada um dos três estágios: fissuração, escoamento e ruptura.

6.6.1. Cargas de Fissuração

Tabela 6.8 – Dados experimentais relativos à fissuração das vigas ensaiadas.

VIGA	Carga de Fissuração P_{CR} (kN)	Variação da Carga
VR	15,39	-
AI	21,88	1,42
AII	15,35	0,99
BI-1	20,59	1,34
BI-2	16,67	1,08
BII-1	15,86	1,03
BII-2	20,16	1,31

- Todas as cargas de fissuração das vigas do grupo B foram superiores à carga de fissuração da viga VR.
- Para a viga AI, reforçada inicialmente com uma camada de tecido, obteve-se uma carga consideravelmente maior que a carga da VR, enquanto para a viga AII, obteve uma carga de fissuração da mesma ordem de grandeza da carga de fissuração da VR.

6.6.2. Cargas de Escoamento

Tabela 6.9 – Dados experimentais relativos ao escoamento da armadura longitudinal das vigas.

VIGA	Carga de Escoamento P_y (kN)	Variação da Carga
VR	96,05	-
AI	80,70	0,84
AII	89,88	0,94
BI-1	74,25	0,77
BI-2	75,47	0,78
BII-1	75,38	0,78
BII-2	60,23	0,63

- As cargas relativas ao escoamento da armadura longitudinal de todas as vigas reforçadas foram inferiores à carga de escoamento da VR, tal como mostram os resultados obtidos durante o ensaio.

- As cargas de escoamento das vigas do grupo A foram próximas da carga de escoamento da VR, o que mostra que a execução do reforço sem pré-carregamento não influencia de maneira acentuada o comportamento da viga até o escoamento.
- As cargas de escoamento das vigas do grupo B foram significativamente inferiores à carga de escoamento da VR.

6.6.3. Cargas de Ruptura

Tabela 6.10 – Dados experimentais relativos à ruptura das vigas

VIGA	Carga de Ruptura P_u (kN)	Variação da Carga
VR	143,55	-
AI	187,34	1,31
AII	191,09	1,33
BI-1	199,13	1,39
BI-2	145,33	1,01
BII-1	165,86	1,56
BII-2	152,16	1,06

- Os valores experimentais das cargas de ruptura das vigas reforçadas foram superiores ao valor da carga de ruptura da VR. Isto mostra a eficácia desse sistema de reforço.
- As vigas do grupo A apresentaram valores de carga de ruptura experimentais cerca de 30 % superiores ao valor da carga de ruptura da VR, o que mostra que o comportamento das vigas reforçadas sem pré-carregamento independe do arranjo do reforço: uma camada com 20 cm de largura (viga AI) ou duas camadas com 10 cm de largura (viga AII).
- As vigas do grupo B apresentaram cargas de ruptura com maior discrepância em relação à carga de ruptura da VR. As cargas de ruptura das vigas BI-2 e BII-2 foram praticamente iguais à carga de ruptura da VR. As vigas BI-1 e BII-1 tiveram valores superiores aos da VR, sendo a relação entre a carga de ruptura dessas vigas e a carga de ruptura da VR, 39 % e 56 %, respectivamente.

6.7. Análise das Flechas

Os valores das flechas experimentais são mostrados na Tabela 6.11. Os valores de flecha apresentados são os referentes ao defletoômetro posicionado no meio do vão. A Figura 6.9 ilustra os diagramas carga x flecha para todas as vigas.

Tabela 6.11 – Dados experimentais de carga e flecha para o LVDT2.

VIGA	P_{CR} (kN)	δ_{CR} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)
VR	15,39	0,80	96,05	14,14	143,55	42,74
AI	21,88	1,81	80,70	11,98	187,34	52,61
AII	15,35	0,77	89,88	12,53	191,09	36,63
BI-1	20,59	1,43	74,25	11,27	199,13	77,50
BI-2	16,67	1,15	75,47	13,12	145,33	68,78
BII-1	15,86	0,81	75,38	12,27	165,86	66,87
BII-2	20,16	0,94	60,23	12,25	152,16	67,53

- As flechas de ruptura das vigas do grupo B, que foram carregadas inicialmente antes da aplicação do reforço, são todas maiores que a flecha de ruptura da viga VR.
- As flechas de escoamento δ_y de todas as vigas reforçadas são menores que a flecha de escoamento δ_y da viga VR.
- A flecha de ruptura da viga AII foi inferior à flecha da VR. Tal fato pode ser explicado porque o LVDT foi retirado quando da leitura da carga de 160 kN. Tal procedimento foi também efetuado para a viga AI, que teve uma flecha de ruptura superior à flecha de ruptura da VR. Esse comportamento diferenciado poderia ser explicado pelo efeito de rigidez originado pelas duas camadas de reforço (viga AII).

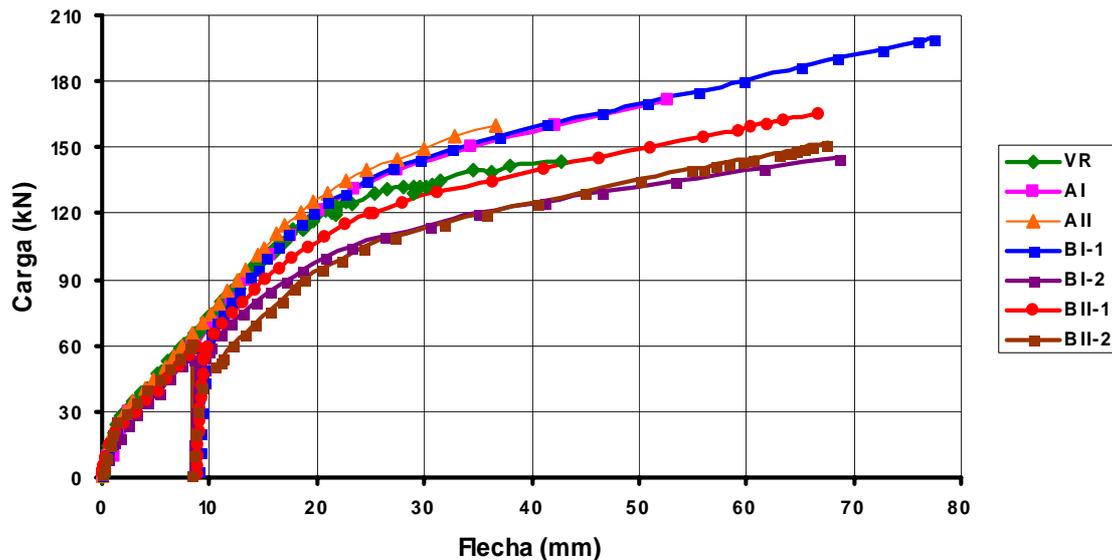


Figura 6.9 – Gráfico carga x flecha de todas as vigas ensaiadas.

A Tabela 6.12 apresenta as flechas em todos os estágios analisados, bem como sua variação em relação à viga de referência.

Tabela 6.12 - Dados das flechas obtidas nos ensaios e suas respectivas variações em relação à VR.

VIGA	Flecha de Fissuração δ_{CR} (mm)	Variação das Flechas	Flecha de Escoamento δ_y (mm)	Variação das Flechas	Flecha de Ruptura δ_u (mm)	Variação das Flechas
VR	0,80	-	14,14	-	42,74	-
AI	1,81	2,26	11,98	0,85	52,61	1,23
AII	0,77	0,96	12,53	0,89	36,63	0,86
BI-1	1,43	1,79	11,27	0,79	77,50	1,81
BI-2	1,15	1,44	13,12	0,93	68,78	1,61
BII-1	0,81	1,01	12,27	0,87	66,87	1,56
BII-2	0,94	1,17	12,25	0,86	67,53	1,58

- A flecha de fissuração da viga AII foi inferior à da VR enquanto as demais vigas tiveram valores superiores.
- As flechas de escoamento de todas as vigas reforçadas foram superiores à flecha de escoamento da VR.
- As variações das flechas de escoamento dos grupos A e B em relação à flecha de escoamento da VR são pouco afetadas pelo tipo de arranjo de

reforço, ou pela maneira na qual o carregamento é aplicado. Os limites superior e inferior dessas variações são próximos.

- A flecha de ruptura da viga AII foi inferior e as demais vigas tiveram valores superiores à flecha de ruptura da VR.
- Os dados da Tabela 6.12 mostram que a viga AII teve um comportamento diferenciado das demais.
- As vigas do grupo B tiveram uma maior variação de flecha de ruptura em relação à flecha da VR, o que mostra que o pré-carregamento modifica acentuadamente a rigidez das vigas, visto a existência de uma deformação inicial das mesmas.

6.8. Curvas Experimentais Momento x Curvatura

A Tabela 6.13 apresenta os valores dos momentos e curvaturas obtidos por meio das cargas e das flechas experimentais. A Figura 6.10 ilustra os diagramas momento x curvatura para todas as vigas.

Tabela 6.13 – Momentos e curvaturas das vigas.

VIGA	M_{CR} (kN.m)	k_{CR} (mm)	M_y (kN.m)	k_y (mm)	M_u (kN)	k_u (mm)
VR	9,62	0,0002	60,03	0,0041	89,72	0,0123
AI	13,68	0,0005	50,44	0,0034	117,09	0,0151
AII	9,59	0,0002	56,18	0,0036	119,43	0,0105
BI-1	12,87	0,0004	46,41	0,0032	124,46	0,022
BI-2	10,42	0,0003	47,17	0,0038	90,83	0,0198
BII-1	9,912	0,0002	47,11	0,0035	103,66	0,019
BII-2	12,60	0,0003	37,64	0,0035	95,10	0,0194

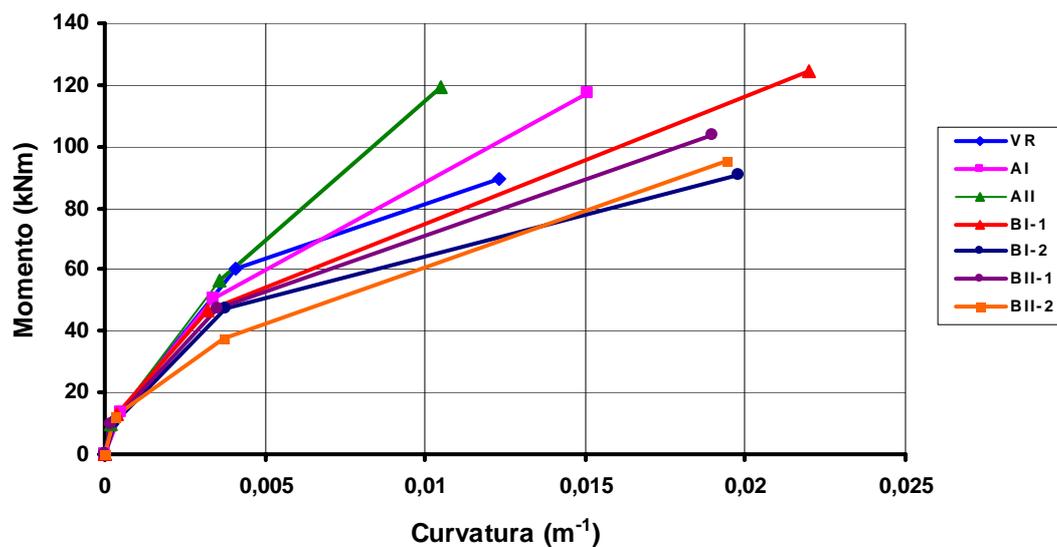


Figura 6.10 – Gráfico momento x curvatura das vigas ensaiadas.

Tabela 6.14 - Dados das curvaturas obtidas e suas respectivas variações em relação à VR.

VIGA	Curvatura de Fissuração k_{CR} (mm)	Variação das Curvatura (%)	Curvatura de Escoamento k_y (mm)	Variação das Curvatura (%)	Curvatura de Ruptura k_u (mm)	Variação das Curvatura (%)
VR	0,0002	-	0,0041	-	0,0123	-
AI	0,0005	2,5	0,0034	0,82	0,0151	1,23
AII	0,0002	1,0	0,0036	0,88	0,0105	0,85
BI-1	0,0004	2,0	0,0032	0,78	0,022	1,79
BI-2	0,0003	1,5	0,0038	0,93	0,0198	1,61
BII-1	0,0002	1,0	0,0035	0,85	0,019	1,54
BII-2	0,0003	1,5	0,0035	0,85	0,0194	1,58

- A viga AI apresenta a maior variação da curvatura de fissuração em relação à curvatura de fissuração da viga VR.
- O tipo de arranjo dos reforços utilizados não influenciam a variação das curvaturas de fissuração das vigas AI e AII em relação à curvatura de fissuração da VR.
- As variações da curvatura de escoamento para as vigas do grupo A são praticamente iguais. O reforço inicial não influencia de forma considerável na curvatura de escoamento destas em relação à viga VR.

- Os valores das variações das curvaturas de rupturas das vigas do grupo B são superiores aos mesmos valores para as vigas do grupo A, verificando-se que a presença do carregamento inicial nas vigas do grupo B, aumentam as curvaturas destas.
- Os valores de curvatura de ruptura das vigas do grupo A são próximos. A viga AII teve uma menor variação da curvatura de ruptura em relação à curvatura de ruptura da VR. Isto indica que a execução de duas camadas de reforço torna a viga mais rígida.
- Duas vigas do grupo B, BII-1 e BII-2, tiveram variações das curvaturas de escoamento e de ruptura, praticamente iguais. Isto indica que a execução do reforço em duas camadas leva a valores das curvaturas mais uniformes na fase pós-fissuração.

6.9. Análise da Rigidez das Vigas

Neste item são analisadas as rigidezes das vigas na fissuração, quando do escoamento da armadura longitudinal e quando da ruptura. O cálculo da rigidez da viga em cada estágio está apresentado no Anexo E. Na Tabela 6.15 é mostrado um resumo dos valores de rigidez encontrados para as sete vigas. As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 apresentam gráficos comparativos das rigidezes de fissuração, quando do escoamento da armadura longitudinal e quando da ruptura das vigas reforçadas, em relação à VR.

Tabela 6.15 – Rigidezes das vigas.

VIGA	Rigidez de Fissuração $(EJ)_{CR}$ (kN.m ²)	Varição da Rigidez de Fissuração	Rigidez de Escoamento $(EJ)_y$ (kN.m ²)	Varição da Rigidez de Escoamento	Rigidez de Ruptura $(EJ)_u$ (kN.m ²)	Varição da Rigidez de Ruptura
VR	41.815	-	14.774	-	7.305	-
AI	26.292	0,63	14.651	0,99	7.745	1,06
AII	43.358	1,04	15.602	1,06	11.346	1,55
BI-1	31.317	0,75	14.329	0,97	5.588	0,76
BI-2	31.528	0,75	12.511	0,85	4.596	0,63
BII-1	42.851	1,03	13.362	0,90	5.395	0,74
BII-2	46.498	0,97	10.694	0,72	4.901	0,67

- A viga AII teve todos os valores de rigidez superiores aos valores de rigidez da viga VR.
- As vigas do grupo B tiveram valores das rigidezes de escoamento e de ruptura inferiores aos valores de rigidez de escoamento e de ruptura da VR. Isto mostra que o pré-carregamento influencia a variação da rigidez na fase pós-fissuração.

6.9.1. Rigidez de fissuração

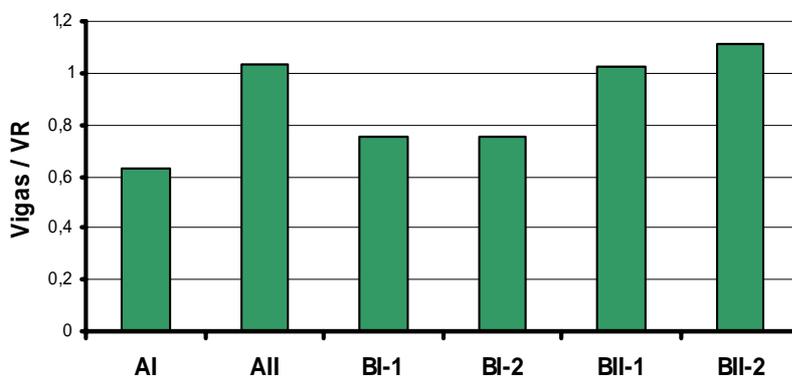


Figura 6.11 – Gráfico comparativo da rigidez de fissuração entre as vigas reforçadas e a viga VR.

- Os valores de rigidez à fissuração não apresentam um comportamento regular. A metade das vigas teve um valor de rigidez de fissuração superior ao da VR, e as outras três vigas tiveram valores inferiores. Isto se deve a aleatoriedade da formação de fissuras, que depende primordialmente da resistência à tração do concreto.
- As vigas AI, BI-1 e BI-2, todas com o reforço em uma camada, apresentaram valores de rigidez à fissuração inferiores aos das vigas reforçadas com duas camadas de compósito de fibra de carbono. Isto mostra que o reforço em duas camadas aumenta a rigidez inicial das vigas.

6.9.2. Rigidez de escoamento

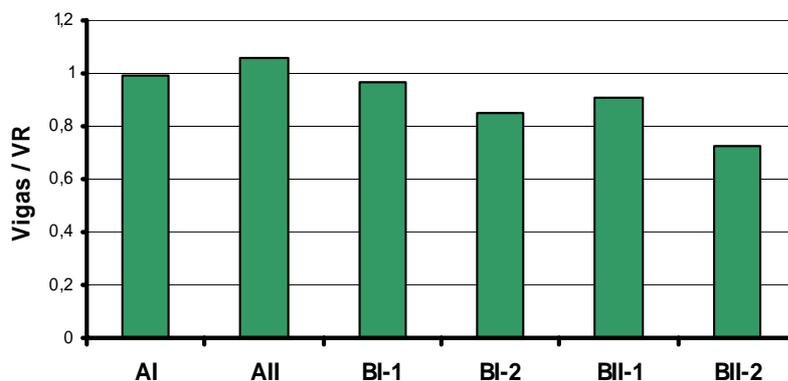


Figura 6.12 – Gráfico comparativo da rigidez de escoamento entre as vigas reforçadas e a viga VR.

- Somente a viga AII teve um valor de rigidez de escoamento superior ao da VR.
- A viga AI teve um valor da ordem de grandeza do valor da rigidez de escoamento da VR.
- As vigas do grupo B tiveram valores de rigidez de escoamento inferiores ao da VR. Isto mostra que o pré-carregamento diminuiu acentuadamente o valor deste parâmetro.

6.9.3. Rigidez de ruptura

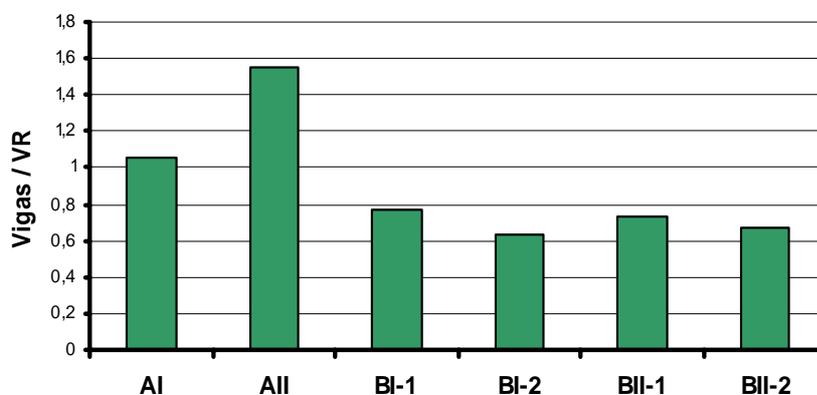


Figura 6.13 – Gráfico comparativo da rigidez de ruptura entre as vigas reforçadas e a viga VR.

- Os valores de rigidez de ruptura para as vigas do grupo A foram superiores ao valor da rigidez de ruptura da viga VR. As vigas reforçadas inicialmente apresentam um aumento de rigidez.
- As vigas do grupo B tiveram os valores de rigidez de ruptura inferiores ao valor da rigidez de ruptura da VR, o que permite concluir que as vigas reforçadas após um carregamento inicial (grupo B), que já estão fissuradas quando da execução do reforço têm sua rigidez de ruptura reduzida.

6.10. Análise Comparativa dos Índices de Ductilidade

A Tabela 6.16 mostra os diversos índices de ductilidade obtidos para as sete vigas e as Figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20 apresentam gráficos comparativos de todos os índices de ductilidade calculados para cada uma das vigas. As análises para cada viga são descritas após cada gráfico.

Tabela 6.16 - Índices de ductilidade calculados.

Viga	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$	$\frac{k_u}{k_y}$	μ_δ	μ_k
VR	3,02	3,02	4,67	4,98
AI	4,39	4,44	2,66	2,65
AII	2,92	2,92	2,63	2,91
BI-1	6,87	6,87	4,48	4,02
BI-2	5,24	5,21	5,54	5,57
BII-1	5,44	5,75	6,17	6,67
BII-2	5,51	5,43	7,18	5,74

Viga Referência

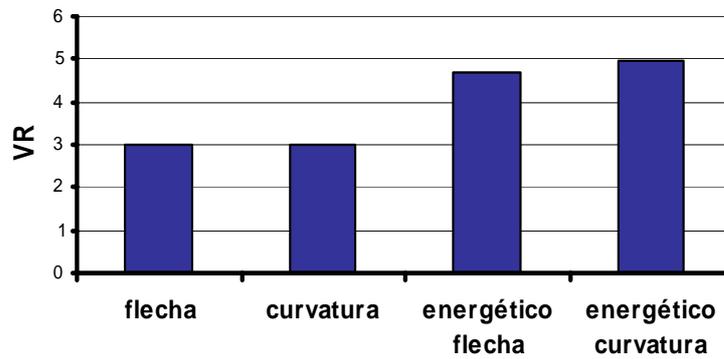


Figura 6.14 – Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga VR.

- Os valores dos índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da VR são iguais.
- Os índices de ductilidade energética de flecha e de curvatura foram da mesma ordem de grandeza, sendo $\mu_k > \mu_\delta$.

Viga AI

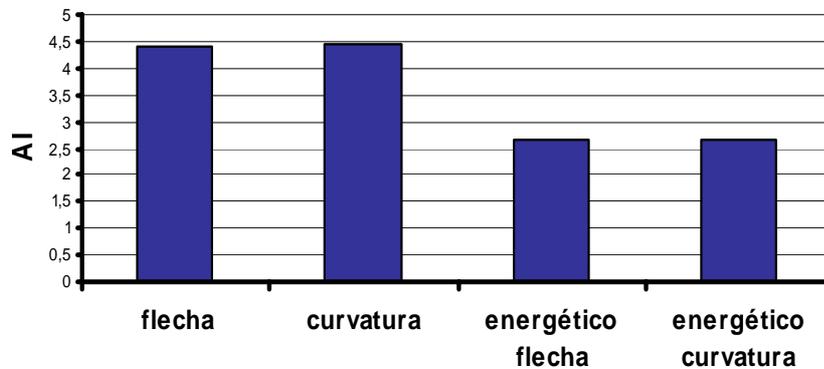


Figura 6.15 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga AI.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da viga AI são da mesma ordem de grandeza, sendo $\frac{k_u}{k_y} > \frac{\delta_u}{\delta_y}$, demonstrando não haver muita discrepância entre esses índices, devido à relação direta dos valores de flecha e curvatura, sendo estes últimos calculados diretamente com as flechas existentes.

- Os índices de ductilidade energética de flecha e de curvatura são da mesma ordem de grandeza, sendo $\mu_k < \mu_\delta$.

Viga AII

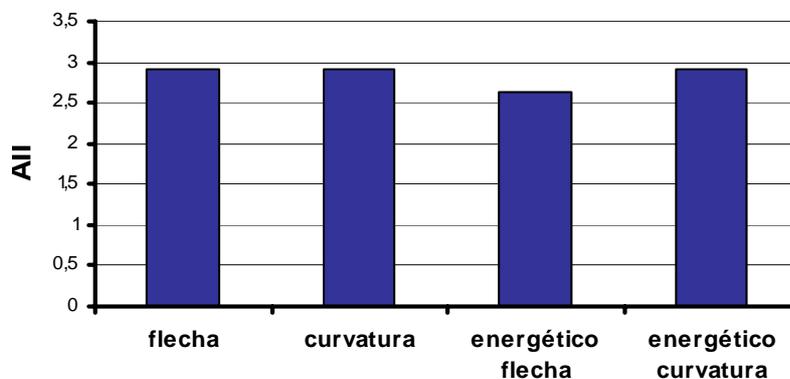


Figura 6.16 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga AII.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da viga AII são iguais.
- Os índices de ductilidade energética de flecha e de curvatura são da mesma ordem de grandeza sendo, $\mu_k > \mu_\delta$.
- Os índices de ductilidade energética da viga AII são consideravelmente inferiores aos valores dos índices de ductilidade energética da viga VR. Isto mostra que o reforço inicial diminui este parâmetro e que a estrutura reforçada inicialmente perde ductilidade e ganha rigidez.

Viga BI-1

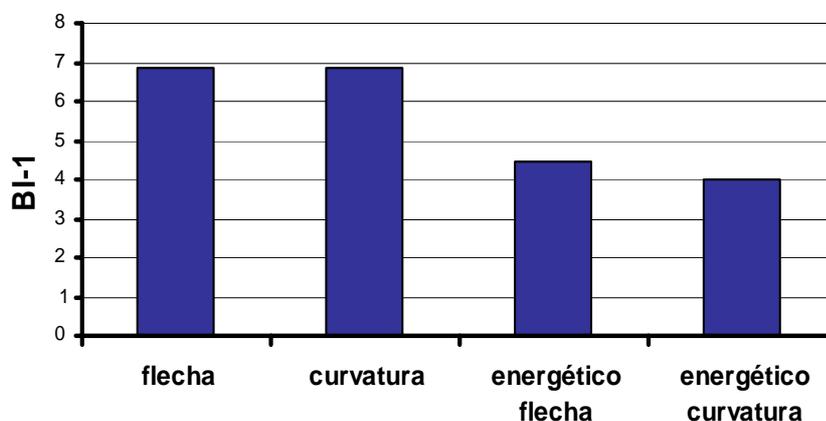


Figura 6.17 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BI-1.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da viga B-1 são iguais.
- Os índices de ductilidade energética de flecha e curvatura são da mesma ordem de grandeza, sendo $\mu_\delta > \mu_k$.

Viga BI-2

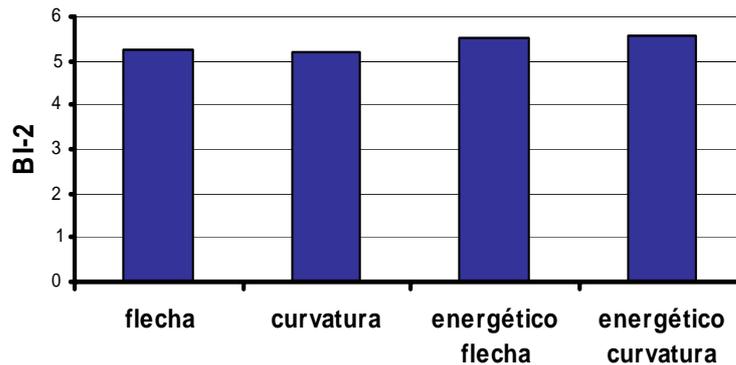


Figura 6.18 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BI-2.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da VBI-2 são praticamente iguais.
- Os índices de ductilidade energético de flecha e de curvatura foram praticamente iguais, sendo $\mu_k > \mu_\delta$.

Viga BII-1

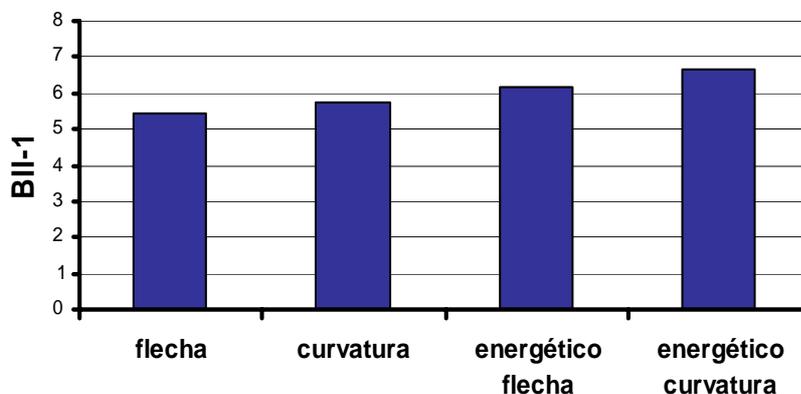


Figura 6.19 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BII-1.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da viga BII-1 são da mesma ordem de grandeza, sendo $\frac{k_u}{k_y} > \frac{\delta_u}{\delta_y}$.
- Os índices de ductilidade energético de flecha e de curvatura são da mesma ordem de grandeza, sendo, $\mu_k > \mu_\delta$.

Viga BII-2

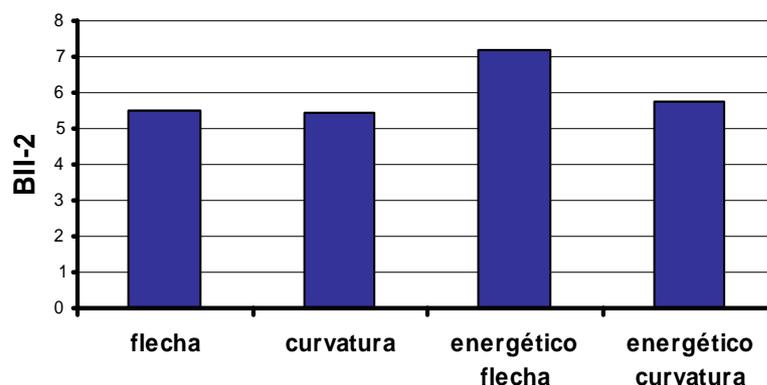


Figura 6.20 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BII-2.

- Os índices de ductilidade de flecha $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e de curvatura $\frac{k_u}{k_y}$ da VBII-1 são da mesma ordem de grandeza, sendo $\frac{\delta_u}{\delta_y} > \frac{k_u}{k_y}$.
- O índice de ductilidade energética de flecha foi maior que o índice de ductilidade energética de curvatura $\mu_k < \mu_\delta$, sendo esta diferença cerca de 25 %.

As Tabelas 6.17, 6.18 e 6.19 apresentam uma análise estatística dos índices de ductilidade calculados para todas as vigas reforçadas em relação à VR, para as vigas do grupo A em relação à VR e para as vigas do grupo B em relação à VR, respectivamente. São calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação em cada uma das análises.

Tabela 6.17 - Análise estatística dos índices de ductilidade para todas as vigas reforçadas em relação à VR.

Viga	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$	Em relação à VR	$\frac{k_u}{k_y}$	Em relação à VR	μ_δ	Em relação à VR	μ_k	Em relação à VR
VR	3,02	-	3,02	-	4,67	-	4,98	-
AI	4,39	1,45	4,44	1,47	2,66	0,57	2,65	0,53
AII	2,92	0,97	2,92	0,97	2,63	0,56	2,91	0,58
BI-1	6,87	2,27	6,87	2,27	4,48	0,96	4,02	0,81
BI-2	5,24	1,73	5,21	1,72	5,54	1,19	5,57	1,12
BII-1	5,44	1,80	5,75	1,90	6,17	1,32	6,67	1,34
BII-2	5,51	1,82	5,43	1,79	7,18	1,54	5,74	1,15
Média	-	1,67	-	1,69	-	1,02	-	0,92
Desvio Padrão (DP)	-	0,434	-	0,1916	-	0,1614	-	0,1098
Coefficiente de variação (CV)	-	0,259	-	0,1134	-	0,158	-	0,1194

Tabela 6.18 - Análise estatística dos índices de ductilidade para as vigas do grupo A.

Viga	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$	Em relação à VR	$\frac{k_u}{k_y}$	Em relação à VR	μ_δ	Em relação à VR	μ_k	Em relação à VR
VR	3,02	-	3,02	-	4,67	-	4,98	-
AI	4,39	1,45	4,44	1,47	2,66	0,57	2,65	0,53
AII	2,92	0,97	2,92	0,97	2,63	0,56	2,91	0,58
Média	-	1,21	-	1,22	-	0,565	-	0,55
Desvio Padrão (DP)	-	0,34	-	0,353	-	0,007	-	0,036
Coefficiente de variação (CV)	-	0,280	-	0,289	-	0,0125	-	0,0655

Tabela 6.19 - Análise estatística dos índices de ductilidade para as vigas do grupo B.

Viga	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$	Em relação à VR	$\frac{k_u}{k_y}$	Em relação à VR	μ_δ	Em relação à VR	μ_k	Em relação à VR
VR	3,02	-	3,02	-	4,67	-	4,98	-
BI-1	6,87	2,27	6,87	2,27	4,48	0,96	4,02	0,81
BI-2	5,24	1,73	5,21	1,72	5,54	1,19	5,57	1,12
BII-1	5,44	1,80	5,75	1,90	6,17	1,32	6,67	1,34
BII-2	5,51	1,82	5,43	1,79	7,18	1,54	5,74	1,15
Média	-	1,91	-	1,92	-	1,25	-	1,105
Desvio Padrão (DP)	-	0,246	-	0,245	-	0,243	-	0,219
Coefficiente de variação (CV)	-	0,129	-	0,127	-	0,194	-	0,197

- O índice $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ apresenta DP = 43,40 % e CV = 25,90 % considerando-se todas as vigas. Esses valores dos índices de dispersão são elevados. Analisando-se apenas as vigas do grupo A tem-se DP = 34,40%, que é um valor muito elevado, mas é menor do que o desvio padrão considerando-se todas as vigas, e CV = 28,00 %. O grupo B apresenta DP = 24,60 % e CV = 12,90 %, que são valores menores do que os obtidos para as análises anteriores.
- o índice $\frac{k_u}{k_y}$ considerando-se todas as vigas apresenta DP = 19,61 % e CV = 11,34 %, que representam cerca de 50% dos valores dos índices de dispersão obtidos para os índices $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ relativos a este caso. Para o grupo A tem-se DP = 35,30 % e CV = 28,90 %, que são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para os índices $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ relativos a este caso. Para o grupo B tem-se DP = 24,50 % e CV = 12,70 %, que são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para os índices $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ relativos a este caso. A consideração de todas as vigas leva a maiores índices de dispersão para os parâmetros $\frac{\delta_u}{\delta_y}$ e $\frac{k_u}{k_y}$, o que indica que a análise estatística deve ser efetuada, preferencialmente, para os grupos A e B em separado.
- o índice μ_δ apresenta DP = 16,41 % e CV = 15,80 % considerando-se todas as vigas reforçadas. Considerando-se apenas as vigas do grupo A tem-se o DP = 0,70 % e o CV = 1,25 % . Considerando-se apenas as vigas do grupo B tem-se o DP = 24,30 % e CV = 19,40 %. Verifica-se que o grupo A é o que apresenta menor dispersão.
- o índice μ_k apresenta DP = 10,98 % e CV = 11,94 % para todas as vigas. Para as vigas do grupo A, μ_k apresenta DP = 3,60 % e CV = 6,55 % que correspondem a mais de 50 % de diferença quando comparados com a análise realizada para todas as vigas. As vigas do grupo B apresentam

DP = 21,90 % e CV = 19,70 %, representando um grande acréscimo. Isso permite concluir que em os dois grupos possuem uma dispersão aceitável.

- Para uma melhor avaliação estatística desses dados experimentais, recomenda-se a execução de uma maior número de ensaios.

6.11. Rotação Plástica

Os valores de carga e flecha obtidos nos ensaios permitiram a determinação dos momentos e curvaturas para os estágios de fissuração, quando do escoamento da armadura longitudinal e ruptura das vigas ensaiadas. Como foi descrita no Capítulo 3, a rotação plástica pode ser determinada por meio dos valores curvaturas de fissuração, de escoamento e de ruptura, seguindo-se os passos do item 3.5.4.

A Tabela 6.20 mostra os resultados obtidos para a rotação plástica das sete vigas, sendo apresentados os cálculos detalhados destes valores no Anexo H.

Tabela 6.20 – Rotação plástica das vigas.

Vigas	Rotação Plástica		Variação
	$\varphi_{plast.}$		
	Radianos (rad)	Graus (^o)	
VR	$2,279 \times 10^{-2}$	1,27	-
AI	$3,21 \times 10^{-2}$	1,78	1,40
AII	$1,89 \times 10^{-2}$	1,08	0,85
BI-1	$5,17 \times 10^{-2}$	2,87	2,26
BI-2	$4,39 \times 10^{-2}$	2,44	1,92
BII-1	$4,528 \times 10^{-2}$	2,59	2,04
BII-2	$4,37 \times 10^{-2}$	2,43	1,91

- A viga AII é a única viga que apresenta $\varphi_{plast.}$ inferior à da VR. Isto parece indicar que o arranjo em duas camadas de reforço leva a uma maior rigidez da viga.

- As demais vigas apresentam valores de $\varphi_{plast.}$ superiores ao da viga de referência.
- As vigas do grupo B tiveram valores de rotação plástica superiores em relação à rotação plástica da VR. Esses valores mostram que o pré-carregamento influencia a rotação plástica das vigas.
- Os valores de $\varphi_{plast.}$ das vigas do grupo A apresentam uma variação de 65 % entre si.
- As quatro vigas do grupo B apresentam uma variação máxima de 18 % entre si.
- A variação entre o valor máximo de rotação plástica $\varphi_{plast.}$, viga BI-1 ($2,87^0$) e o valor mínimo desse parâmetro, viga AII ($1,08^0$), foi 166 %.
- A variação máxima em relação à VR foi de 126 % e a mínima variação foi 15 %.