# 3 Ensaios Preliminares sobre Concentração de Deformações nas Juntas

# 3.1. Introdução

Neste capítulo é feita a descrição, apresentação e análise dos resultados dos ensaios preliminares. O objetivo é investigar os efeitos da armadura passiva de tração passando através da junta sobre a concentração de deformação nas juntas e as implicações sobre a resistência à flexão de vigas em aduelas de concreto protendidas com cabos sintéticos externos. Com este propósito foram ensaiadas duas vigas com uma única junta central, simplesmente apoiadas, com vão de 3 m e pós-tensionadas com dois cabos *parafil*. Uma das vigas tem a armadura passiva de tração passando através da junta, enquanto que na outra a armadura foi interrompida na junta.

# 3.2. Características das vigas

As vigas são simplesmente apoiadas e protendidas com dois cabos externos sintéticos com traçado poligonal. Foram construídas a partir de duas aduelas prémoldadas que formam uma junta no meio do vão (figura 3.1 a). As juntas possuem "dentes de cisalhamento" para o combate a eventuais forças cortante. As duas vigas têm o mesmo comprimento (L = 300 cm) e mesma seção transversal, conforme mostra a figura 3.2.

Nos terços dos vãos das vigas foram colocadas peças metálicas (desviadores) cuja função é permitir o traçado poligonal. A figura 3.1b mostra o detalhe de um desviador.

Descrição, apresentação e análise dos resultados.





b) desviador

Figura 3.1 – Detalhe do desviador e da junta.



Figura 3.2 – Dimensões das vigas (cm).

# 3.3. Detalhe das armaduras

A armadura longitudinal das aduelas pré-fabricadas é constituída de  $2 \phi 6,3 \text{ mm}$  na parte superior e  $4 \phi 6,3 \text{ mm}$  na parte inferior. A viga VGAI2 tem a armadura passiva de tração passando através da junta, enquanto que a viga VGAI1 a armadura é interrompida na junta.

A armadura transversal de combate ao cisalhamento é constituída de estribos de diâmetro nominal 6,3 mm, dispostos a cada 15 cm na região de flexão pura e a cada 12 cm na região entre as cargas aplicadas e os apoios. A Figura 3.3 mostra a distribuição das armaduras passivas longitudinais e transversais.



Figura 3.3 – Detalhe das armaduras.

# 3.4. Propriedades dos Materiais

# 3.4.1. Concreto

A Tabela 3.1 mostra os valores médios e correspondente desvio padrão da resistência do concreto (no dia do ensaio da viga), obtidos em ensaios de compressão em corpos de provas cilíndricos com dimensões 10 x 20 cm. O concreto usado na fabricação das vigas foi dosado com areia média, Brita N<sup>o</sup> 1 (VIGNE) e cimento CP V ARI. O material utilizado foi fornecido pela empresa BRASIL BETON S.A.. O abatimento foi de 14 cm e o consumo de materiais por m<sup>3</sup> foi de:

Cimento - 426 kg; Areia – 733 kg; Brita – 1011 kg; Água – 192 litros.

			$f_{cm}$	S
Viga		N <sup>⁰</sup> C.P.	(MPa)	(MPa)
VGAI1	aduela 1	4	58,6	2,3
	aduela 2	4	52,4	2,2
VGAI2	aduela 1	6	57,2	1,7
	aduela 2	4	50,5	2,3

Tabela 3.1 - Resistência à compressão do concreto.

# 3.4.2. Armadura

A tabela 3.2 apresenta as propriedades mecânicas da armadura passiva, obtidas em ensaios de tração simples, realizados com o auxílio de um clipgauge, de modo a permitir a construção da curva tensão vs. deformação (Figura 3.4). Todos os valores constantes na tabela 3.2 são resultantes de uma média de três amostras.



Figura 3.4 - Diagrama tensão - deformação da barra de diâmetro 6.3 mm.

 Tabela 3.2 - Propriedades da barra da armadura passiva.

Aço	ф (mm)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	$\frac{E_s}{(kN/cm^2)}$
CA-50B	6,3	0,312	51	19615,4

A<sub>s</sub> - Área da seção transversal da barra

 $f_v$  - Tensão de escoamento

É<sub>s</sub> - Módulo de elasticidade

### 3.4.3. Cabo de Protensão

As duas vigas foram protendidas com cabos externos de fibras sintéticas, conhecidas comercialmente como *Parafil* Tipo G, cujo núcleo é constituído de fibras *Kevlar* 49.

Esses cabos têm diâmetro externo de 22 mm, área da seção transversal (fibras) de 153 mm<sup>2</sup>, resistência à tração em torno de 1950 MPa, módulo de elasticidade (tipo G) de 123520 MPa e relação tensão vs. deformação linear até a ruptura (Guimarães, 1988; Branco,1993). No apêndice A é mostrado um resumo das principais características e propriedades dos cabos *Parafil*.

# 3.5. Montagem dos ensaios e Instrumentação 3.5.1. Operação de Protensão

Para a força de protensão inicial a ser aplicada nas vigas, a tensão no concreto na parte superior seria de tração, o que causaria uma grande abertura das juntas. Foi aplicado então um carregamento inicial de forma a evitar tensões de tração no bordo superior das vigas. Isto foi feito vinculando as etapas de protensão às cargas externas aplicadas, o que balanceava o efeito da força instalada nos cabos.

Após um determinado nível de protensão aplicado, suficiente para suportar o peso próprio das vigas, as fôrmas que inicialmente apoiavam as aduelas foram retiradas.

A figura 3.5 mostra esquematicamente a operação de protensão com cabos *Parafil*. Os cabos são colocados nos desviadores já cortados no comprimento desejado, logo depois os terminais são instalados, resultando na configuração da figura 3.5a. Em seguida, os macacos são fixados sobre o suporte, como mostrado na figura 3.5b e a força de protensão é aplicada através de uma barra que passa no interior do macaco vazado e é conectada ao terminal (Figura 3.5c). Quando a força atinge o valor desejado, a porca de ancoragem é apertada (Figura 3.5d). No caso dos ensaios deste trabalho, a aplicação da protensão se deu em uma das extremidades da viga, sendo a outra uma ancoragem morta.



Figura 3.5 - Operação de protensão usando cabos Parafil.

# 3.5.2. Instrumentação

A medição das flechas se deu por meio de transdutores de deslocamentos tipo LVDT, colocados no centro e nas proximidades dos terços dos vãos das vigas. A abertura das juntas também foi medida com LVDT.

Para medir a força nos cabos foram utilizadas duas células de carga, uma para cada cabo, que foram posicionadas na extremidade da ancoragem morta (Figura 3.6a). A capacidade máxima de carga das células é de 20 tf (200 kN).

A medição do carregamento aplicado às vigas foi feita com células de carga, com capacidade máxima de 25 tf (250 kN) colocadas nos terços dos vãos (Figura 3.6a).

As deformações na armadura passiva e no concreto foram medidas com extensômetros elétricos de 5 mm e 70 mm de comprimento, respectivamente. Foram colocados 31 extensômetros, sendo 11 no concreto na parte superior e os demais na armadura passiva. O posicionamento dos extensômetros dos ensaios pode ser visto nas figuras 3.6b e 3.6c.

Todos os resultados dos extensômetros, transdutores de deslocamentos e células de carga foram registrados automaticamente por um computador conectado a um sistema de aquisição de dados ao qual os instrumentos estavam ligados.

### Extensômetros no aço



Figura 3.6 - Localização dos instrumentos de medição das vigas

5

# 3.5.3. Procedimento do ensaio

Um dia antes do ensaio aplicou-se a força de protensão, como também a carga externa inicial (em torno de 40 kN) para minimizar a abertura da junta (ver item 3.5.1). A protensão foi feita um dia antes com o objetivo de se realizar o ensaio após todas as perdas iniciais devido à protensão.

O início do ensaio se deu vinte e quatro horas após a aplicação da protensão. Foram aplicados três ciclos de carga em todas as vigas. O primeiro ciclo foi planejado de forma a permitir o estudo da viga no estado não fissurado, garantindo-se que não ocorresse a abertura da junta. Os demais ciclos foram planejados de forma a permitir o estudo do comportamento da viga após a abertura da junta e fissuração das aduelas até a ruptura. A figura 3.7 mostra uma das vigas durante o ensaio.



Figura 3.7 – Vista geral de uma das vigas durante o ensaio.

# 3.6. Apresentação e discussão dos resultados 3.6.1. Apresentação dos resultados 3.6.1.1. Deslocamento, deformação, força nos cabos e abertura das juntas

As figuras 3.8 e 3.9 mostram as curvas carga aplicada vs. deslocamento no meio do vão das vigas ensaiadas. Observa-se que todas elas apresentam uma flecha inicial negativa devido à protensão. Isto porque, após a protensão, a seção média da viga encontra-se toda comprimida, com uma tensão mínima na parte superior e uma tensão máxima na parte inferior.

Sob a carga máxima do primeiro ciclo, as fibras inferiores ficaram na iminência de serem tracionadas sem que houvesse abertura da junta, ou seja, as fibras superiores apresentaram tensões máximas de compressão e as fibras inferiores tensões mínimas. No primeiro ciclo de carga a trajetória do deslocamento foi praticamente linear para as duas vigas por encontrarem-se no regime elástico.

No segundo ciclo de carga as fibras passaram a ser tracionadas, causando a abertura e o surgimento das primeiras fissuras no trecho de flexão pura. Observouse que as curvas apresentaram uma leve mudança em sua direção.

No terceiro ciclo de carga, houve uma maior abertura da junta e as fissuras progrediram em direção ao bordo superior. Com um aumento da abertura da junta e da propagação das fissuras, houve uma perda acentuada da rigidez da viga ocasionando a ruptura. Essa perda pode ser observada nos gráficos pela mudança de inclinação da curva.

As curvas que relacionam carga vs. deformação no concreto e no aço (figuras 3.10 a 3.15), carga vs. força nos cabos (figuras 3.16 e 3.17) e carga vs. abertura da junta (figuras 3.18 e 3.19) apresentam comportamento similar às curvas que relacionam carga vs. deslocamento, com exceção das curvas apresentadas nas figuras 3.12 e 3.13, onde a armadura não foi solicitada. Apenas na viga com a armadura passante na junta (VGAI2) houve o escoamento da armadura passiva. As curvas referentes aos demais extensômetros indicados na figura 3.6 encontram-se no apêndice B.



Figura 3.8 - Curva Carga aplicada vs. deslocamento no meio do vão da viga VGAI1.



Figura 3.9 - Curva Carga aplicada vs. deslocamento no meio do vão da viga VGAI2.



**Figura 3.10** - Curva carga aplicada vs. deformação no concreto no topo da seção da junta para a viga VGAI1(sem armadura passante na junta).



**Figura 3.11** - Curva carga aplicada vs. deformação no concreto no topo da seção da junta referente à viga VGAI2(com armadura passante na junta).



**Figura 3.12** - Curva carga aplicada vs. deformação na armadura passiva a 3.5 cm da junta na aduela 1 para viga VGAI1.



Figura 3.13 - Curva carga aplicada vs. deformação a 3.5 cm da junta na aduela 2 para viga VGAI1.



**Figura 3.14** - Curva carga aplicada vs. deformação na armadura passiva a 3,5 cm da junta na aduela 1 para viga VGAI2.



**Figura 3.15** - Curva carga aplicada vs. deformação na armadura passiva a 3,5 cm da junta na aduela 2 para viga VGAI2.



Figura 3.16 - Curva carga aplicada vs. força total nos cabos para a viga VGAI1.



Figura 3.17 - Curva carga aplicada vs. força total nos cabos para a viga VGAI2.



Figura 3.18 - Curva carga aplicada vs. abertura da junta para a viga VGAI1.



Figura 3.19 - Curva carga aplicada vs. abertura da junta para a viga VGAI2.

### 3.6.1.2. Modo de ruptura

A ruptura das vigas VGAI1 (sem armadura passante na junta) e VGAI2 (com armadura passante na junta) ocorreu por esmagamento do concreto na junta, sob cargas de 163 kN e 196 kN, respectivamente.

As fissuras surgiram no segundo ciclo de carregamento para valores de cargas ligeiramente superiores às cargas de abertura das juntas. Na viga VGAI1 as fissuras foram pequenas e concentraram-se próximas aos pontos de aplicação do carregamento. As fissuras mais próximas da junta ficaram a 25 cm à esquerda e a 28 cm à direita da mesma, aproximadamente. Observou-se (ver figura 3.21) uma fissura de fendilhamento à direita.

Devido à presença da armadura passiva na viga VGAI2 (com armadura passante na junta ) as fissuras que surgiram foram bem distribuídas ao longo da região de flexão pura, como também, foram maiores em comparação com as fissuras da viga sem armadura passante na junta (VGAI1). No segundo ciclo de carga as fissuras mais próximas da junta ficaram a 18 cm aproximadamente tanto à direita quanto à esquerda da mesma. No final do último ciclo de carga foram observadas fissuras a 3,5 cm da junta, aproximadamente. A tabela 3.3 mostra os resultados gerais dos ensaios. As figuras 3.20 e 3.21 mostram os detalhes da ruptura e distribuição das fissuras nas vigas VGAI1 e VGAI2, respectivamente.

	VGAI1	VGAI2
Força de protensão inicial, F <sub>o</sub> (kN)	308,5	299,6
Força de protensão inicial do ciclo 3, $F_3$ (kN)	313,5	303,8
Força de protensão na ruptura, $F_r$ (kN)	340,5	345,1
Variação da força de protensão $F_r/F_3$	1,086	1,136
Carga total última, P <sub>u</sub> (kN)	163,6	196,8
Momento de ruptura (kN.m)	81,8	98,4
Flecha no meio do vão na ruptura (cm)	1,26	1,71
Abertura da junta na ruptura (mm)	2,20	1,08

Tabela 3.3 - Resultados gerais dos ensaios



Figura 3.20 – Detalhe da ruptura e distribuição das fissuras da viga VGAI1.



Figura 3.21 – Detalhe da ruptura e distribuição das fissuras da viga VGAI2.

# 3.6.2. Discussão dos resultados

# 3.6.2.1. Momento atuante vs. Abertura da junta

A figura 3.22 mostra as curvas que relacionam momento atuante vs. abertura da junta para as vigas VGAI1 e VGAI2. Para efeito de comparação entre as curvas, apenas a envoltória dos três ciclos de carga será considerada. Essa figura mostra que, antes da abertura da junta, o comportamento é praticamente o mesmo para ambas as vigas. Entretanto, após a abertura da junta, observa-se que, para um mesmo momento atuante, a abertura da junta na viga VGAI2 é menor que na viga VGAI1, como era de se esperar. A abertura final da junta na viga VGAI1, com armadura passiva interrompida na junta, é praticamente o dobro da observada na viga VGAI2, com armadura passiva atravessando a junta.



**Figura 3.22** – Curva momento atuante vs. abertura da junta para as vigas VGAI1 e VGAI2.

# 3.6.2.2. Momento atuante vs. Deformação

A figura 3.23 mostra uma comparação entre as curvas que relacionam momento atuante vs. deformação no concreto no meio do vão para as vigas VGAI1 (sem armadura passante) e VGAI2 (com armadura passante). Essa figura mostra que as deformações no concreto no bordo superior, antes da abertura da junta, são praticamente as mesmas. Após a abertura da junta as deformações na viga VGAI2 são menores que as deformações da viga VGAI1. Isto indica, portanto, que a linha neutra desce com o acréscimo da armadura passante na junta e, consequentemente, o braço de alavanca entre as resultantes de tração e compressão diminui.



Figura 3.23 – Curva momento atuante vs. deformação no concreto no meio do vão para as vigas VGAI1 e VGAI2.

As figuras 3.24 a 3.27 mostram a distribuição de deformações no concreto e no aço, na região que abrange 60 cm para ambos os lados da junta central (que vai além da região de flexão pura), para diferentes níveis de carga (nestas figuras, os pequenos ciclos indicam as localizações onde os valores de deformações foram medidos). A deformação no concreto foi medida no bordo superior da vigas.

Pode ser observado nas figuras 3.24 e 3.25 que, em ambas as vigas, os valores de deformações no concreto ao longo da região de flexão pura (comprimento entre os pontos de cargas) permanecem praticamente o mesmo para níveis de carregamento menores que a carga de descompressão (em torno de 121 kN para ambas as vigas). Para níveis mais altos de carga, os valores de deformação do concreto crescem nas proximidades da junta. O crescimento é notado a uma distância de 1,5 vezes a altura da aduela (h = 30 cm) em ambos os lados das juntas. As deformações máximas ocorrem na junta.

Em comparação a uma viga monolítica, onde as deformações na região de flexão pura são constantes, observa-se que o comportamento da viga VGAI1, após a abertura da junta, é bem diferente. Além da concentração de deformação na junta, as deformações nas seções próximas são afetadas. Próximo à ruptura, a deformação na junta chega a ser 3,5 vezes maior do que nas seções fora desta região, apesar do momento aplicado ser o mesmo.

O comportamento da viga VGAI2 aproxima-se mais do comportamento de uma viga monolítica. Após a abertura da junta, até um carregamento que atinge 80% da carga de ruptura ( $P_u$ ) as deformações na região de flexão pura são uniformes. A exceção se dá para uma pequena concentração de deformação na junta. Para cargas superiores a 80% de  $P_u$  as deformações nas seções próximas à junta passam a ser afetadas. Próximo à ruptura, a região afetada atinge 20 cm de distância para ambos os lados da junta. Valor este menor do que o observado na viga VGAI1. Isto ocorre por causa da presença da armadura passante na junta (VIGA2), que permite uma melhor distribuição de fissuras ao longo da viga.



Figura 3.24- Distribuição de deformações de compressão no concreto ao longo do bordo superior da viga VGAI1.



**Figura 3.25** – Distribuição de deformações de compressão no concreto ao longo do bordo superior da viga VGAI2.

O comportamento das deformações nas armaduras passivas das vigas VGAI1 e VGAI2 é bem diferente, como mostram as figuras 3.26 e 3.27, respectivamente. A deformação na armadura passiva da viga VGAI1 cresce de zero na junta para 1‰ aproximadamente, a uma distância de 45 cm da junta, para uma carga aplicada de 163 kN. Já na viga VGAI2 (Figura 4.27) as deformações crescem de 3‰ aproximadamente, num ponto localizado à distância de 45 cm da junta, para mais de 8‰ na junta, com uma carga aplicada em torno de196 kN.



Figura 3.26- Distribuição de deformações na armadura inferior ao longo da viga VGAI1



Figura 3.27 - Distribuição de deformações na armadura inferior ao longo da viga VGAI2.

# 3.6.2.3. Variação da Força nos cabos de protensão

A figura 3.28 mostra as curvas que relacionam momento atuante vs. variação da força nos cabos de protensão, para as vigas com e sem armadura passante na junta. A variação da força é dada pela relação F/F3, onde F é a força nos cabos, para um determinado momento atuante no último ciclo de carga, e F3 é a força nos cabos no início do último ciclo de carga. Pode ser obervado que antes da abertura da junta, para ambas as vigas, as forças nos cabos sofrem pequenas variações para um mesmo momento atuante. A variação de tensão é maior na viga VGAI2 por ter a protensão inicial ligeiramente menor do que na viga VGAI1.

Após a abertura da junta, o aumento das forças nos cabos tende a ser maior em ambas as vigas. Porém, a diferença do aumento de forças nos cabos entre as vigas tende a diminuir, chegando ao ponto onde há uma inversão de valores, ou seja, a viga VGAI2 passa a ter um menor aumento de força nos cabos. De fato, com o acréscimo da armadura passiva na junta a rigidez da viga VGAI2 torna-se maior e, consequentemente, a parcela devido à variação de tensão no cabo na resultante de tração torna-se menor. Portanto, com o acréscimo da armadura na junta o cabo de protensão passa a ser menos solicitado.

O aumento da força nos cabos de protensão, entre o início e o final do ciclo 3, foi de 8,4% na viga VGAI1 e 13,6% na VGAI2.



**Figura 3.28** – Curva momento atuante vs. variação das forças dos cabos de protensão das vigas ensaiadas VGAI1 e VGAI2.

# 3.6.2.4. Efeito da concentração de deformação no concreto sobre a resistência das vigas

O aumento da distância entre o ponto de aplicação da força de compressão interna  $R_c$  no concreto e o bordo inferior é mostrado na figura 3.29, para o último ciclo de carga, nas seções das juntas. O braço de alavanca z para a viga VGAI1 foi obtido de

$$M = R_p \cdot z \tag{3.1}$$

onde M é o momento aplicado e  $R_p$  é a força total medida nos cabos. Já para a viga VGAI2 tem-se que

$$M = R_p \cdot z + R_s \cdot (z+2,5) \tag{3.2}$$

onde  $R_s$  foi calculada com os valores das deformações medidas na armadura passiva e da relação tensão vs. deformação apresentada na figura 3.4. É observado um incremento linear na posição da força interna  $R_c$  (distância *a*) para momentos aplicados menores que o momento de descompressão. Com o aumento do momento aplicado, a distância *a* na viga VGAI1 continua a crescer linearmente, enquanto que para a viga VGAI2 a curva não mantém a linearidade. O braço de alavanca, depois da descompressão até a ruptura, foi maior na viga sem armadura atravessando a junta, do que na viga com armadura atravessando a mesma, para um mesmo momento aplicado.

Informações adicionais podem ser obtidas pela separação da contribuição do cabo e da armadura passiva para o momento resistente interno da viga VGAI2. O momento resistente  $M_R$  é composto de duas parcelas

$$M_p = R_p \cdot z_p \tag{3.3}$$

$$M_{s} = R_{s} \cdot z_{s} \tag{3.4}$$

onde  $z_p$  e  $z_s$  são os braços de alavanca em relação ao cabo de protensão e à armadura passiva, respectivamente. Antes da descompressão, o momento resistente é quase que exclusivamente devido a  $M_p$  como ilustrado na figura 3.31. Depois da descompressão é observado o início da contribuição de  $M_s$ . O valor final de  $M_p$  na viga VGAI2 (em torno de 82 kN.m na figura 3.31) é praticamente o mesmo da viga VGAI1 (81,8 kN.m de acordo com a tabela 3.4). Pode-se notar que o momento resistente total desta viga é  $M_p$ . Portanto, a ausência da armadura passiva atravessando a junta tem o efeito de aumentar a concentração de deformação na junta, mas o momento resistente interno devido às forças conjugadas  $R_c$  e  $R_p$  não é afetado.

e



**Figura 3.29** - Posição da força de compressão interna  $R_c$  no concreto vs. momento aplicado para o último ciclo de carga, nas seções das juntas.



Figura 3.30 - Carga aplicada vs. momento para o último ciclo de carga

# 3.7. Considerações Finais

- Para estágios de carregamento que antecedem a abertura da junta, praticamente não foram observadas diferenças entre as vigas ensaiadas. De um modo geral, o comportamento de ambas as vigas é linear e as deformações no concreto são praticamente as mesmas e uniformes ao longo do bordo superior;
  - Após a abertura da junta o comportamento passa a ser diferente. Verificou-se que:

    - surgiram fissuras nas aduelas após a abertura da junta em ambas as vigas, sendo mais distribuídas e maiores na viga VGAI2.
    - as deformações no concreto ao longo do bordo superior na região entre cargas, para a viga VGAI1, se concentram em torno da junta e afetam as seções vizinhas. Com o crescimento do carregamento o número de seções afetadas aumenta. Já para a vigaVGAI2 as deformações nesta região foram mais uniformes, ocorrendo uma maior concentração de deformação na junta e nas seções vizinhas a partir de uma carga de aproximadamente 80% da carga de ruptura;
    - as deformações ocorridas na armadura de tração para a viga VGAI1, foram pequenas e afastadas da junta. Enquanto que, para a viga VGAI2 as deformações foram uniformes até o início do escoamento da armadura de tração a partir do qual foi observada uma concentração de deformação nas seções próximas à junta;
    - a variação de forças nos cabos de protensão na ruptura das vigas foram 8,4% e 13,6 % para as vigas VGAI1 e VGAI2, respectivamente;
    - o maior momento resistido pela viga VGAI2, em relação à viga VGAI1, pode ser atribuído à introdução da armadura passiva atravessando a junta da mesma.