

4

Ensaio Principais: Descrição e Apresentação dos Resultados

4.1.

Introdução

Neste capítulo é feita a descrição e a apresentação dos ensaios referentes às vigas hiperestáticas. Na descrição dos ensaios realizados são mostradas as características das vigas, o detalhe das armaduras, as propriedades dos materiais, a operação de protensão, a montagem dos ensaios e sua instrumentação. Na apresentação dos resultados são mostrados os gráficos referentes aos deslocamentos, às deformações no aço e no concreto, à abertura das juntas, às reações de apoios e às forças nos cabos.

4.2.

Características Geométricas das Vigas

As vigas são hiperestáticas com dois vãos iguais e protendidas com dois cabos sintéticos externos com traçado poligonal. Foram ensaiadas quatro vigas, sendo uma monolítica e três construídas a partir de aduelas pré-moldadas. A viga monolítica tem dois vãos de 4,5 metros cada (figura 4.1a). Nas vigas em aduelas os vãos variam entre 3,0 e 6,0 metros (figura 4.1b e 4.2). Todas as vigas têm a mesma seção transversal (tipo I).

Nas extremidades das vigas foram feitos alargamentos na seção de concreto, com a finalidade de melhorar a distribuição de tensões nas zonas de ancoragem. Foram utilizadas também placas de aço para facilitar a ancoragem dos cabos.

Os desviadores, constituídos de peças de aço, foram colocados nos terços dos vãos e no apoio central das vigas. No caso das vigas em aduelas, os desviadores têm curvaturas diferentes, devido à variação da relação l/d_p . A figura 4.3 fornece os detalhes dos desviadores. As vigas construídas em aduelas têm “dentes” de cisalhamento cuja finalidade é transmitir força cortante (figura 4.4 e figura 4.5).

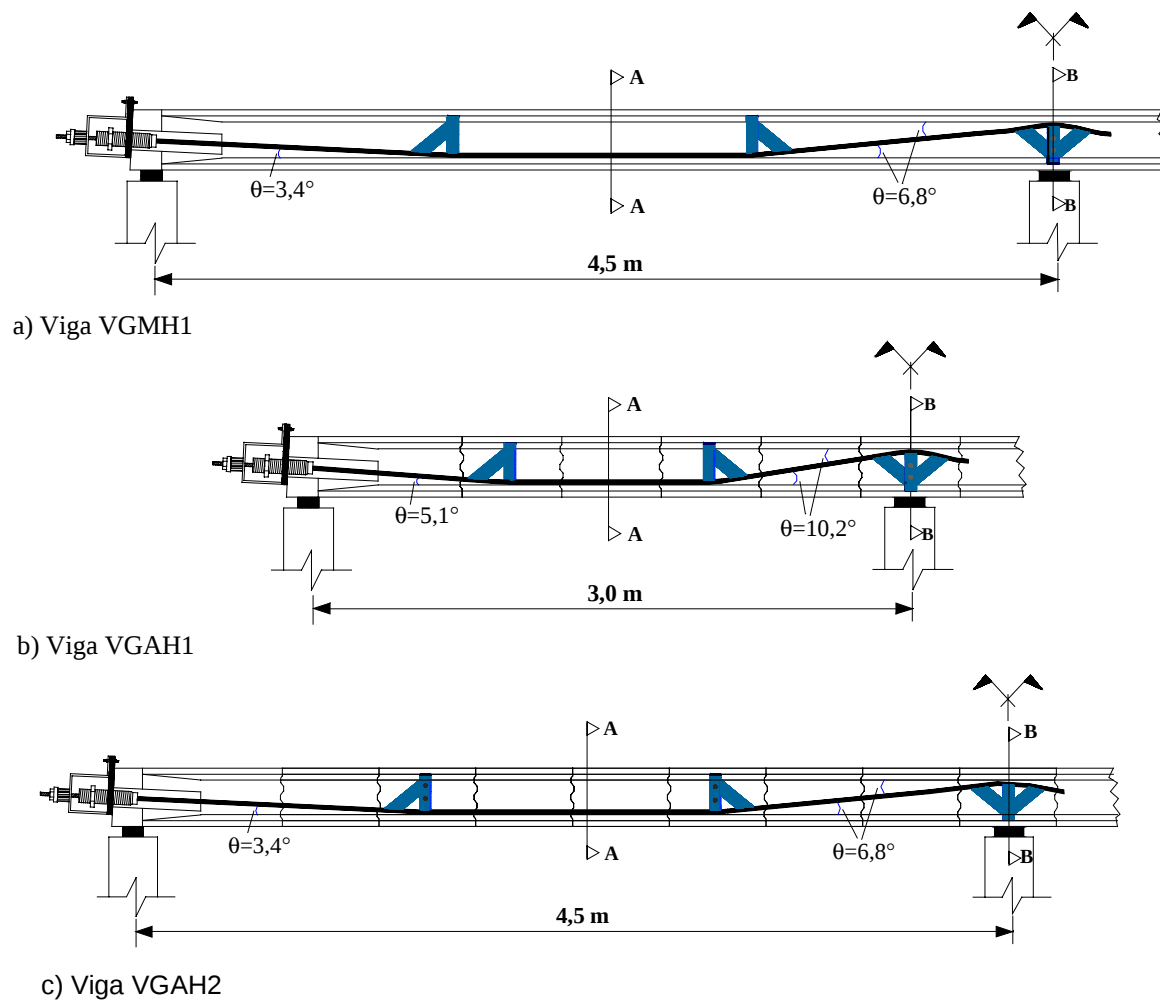
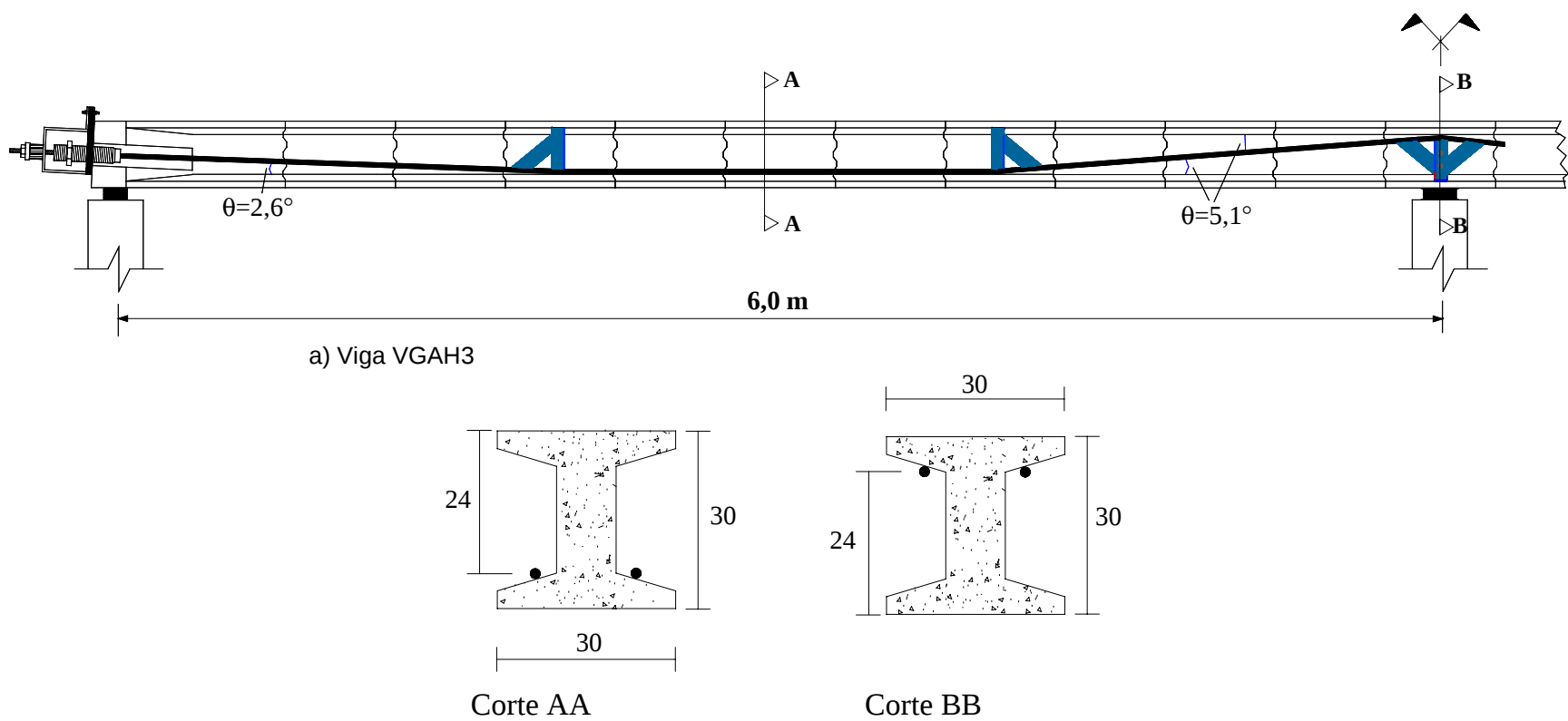


Figura 4.1 - Dimensões das vigas VGMH1, VGAH1, VGAH2.



b) seção transversal

Figura 4.2 - Dimensões da viga VGAH3.



a) detalhe do desviador do apoio central.



b) detalhe do desviador nos pontos de aplicação de carga

Figura 4.3 – Detalhe dos desviadores das vigas.



Figura 4.4 – Detalhe dos “dentes” de cisalhamentos

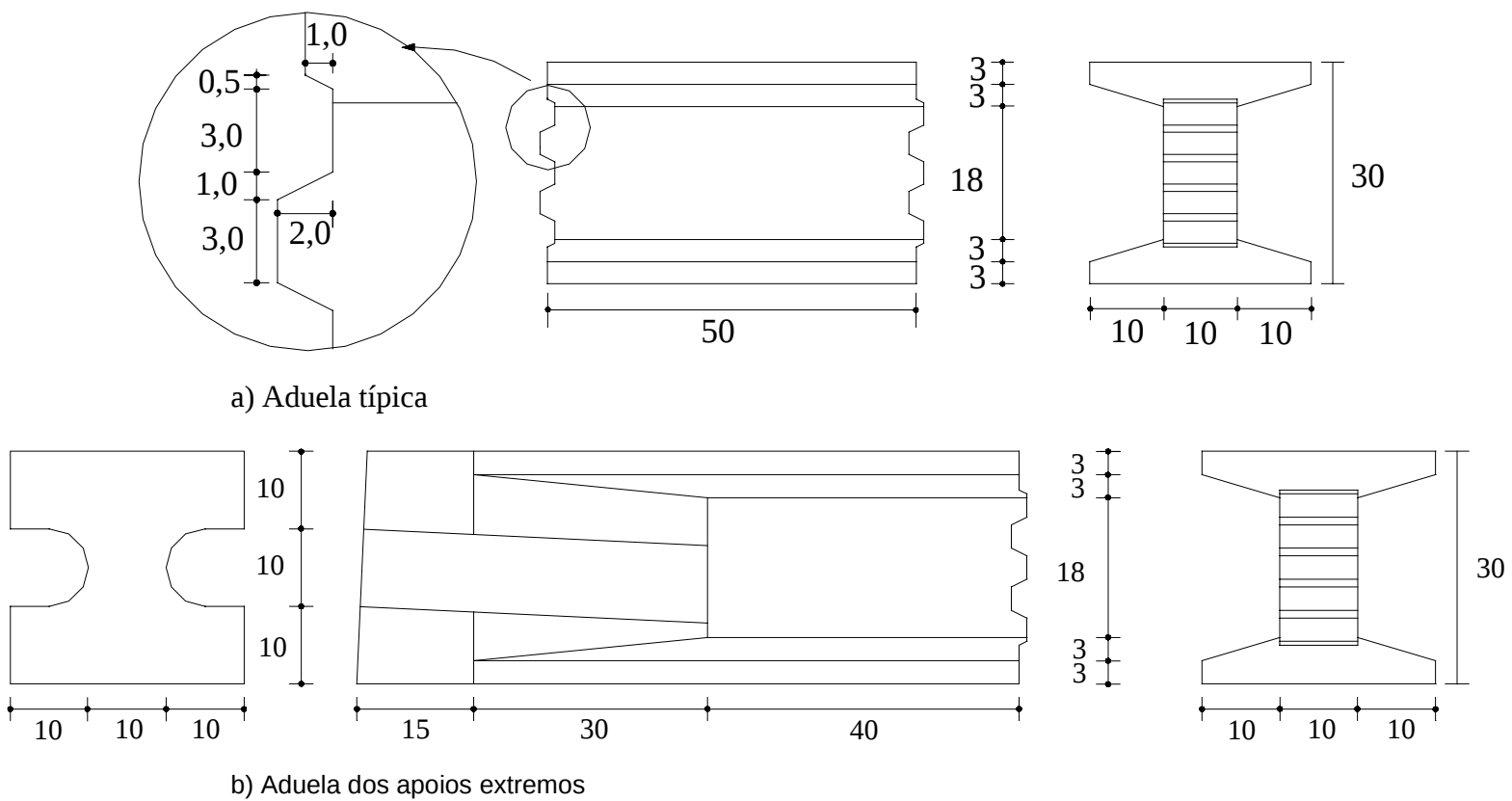


Figura 4.5 - Dimensões das aduelas (cm).

4.3.

Detalhe das Armaduras

A armadura longitudinal é composta por barras de aço com diâmetro nominal de 6,3 mm, e a armadura transversal por barras de aço de 5,0 e 6,3 mm. As propriedades mecânicas dos aços são apresentadas no item 4.5.2.

A distribuição da armadura longitudinal é a mesma em todas as vigas, sendo constituída de 4 ϕ 6,3 tanto na parte superior quanto na parte inferior. A única diferença entre as armaduras consiste no fato de que, nas vigas construídas em aduelas, a armadura é interrompida na junta.

Já a distribuição da armadura transversal das vigas em aduelas difere da distribuição adotada para a viga monolítica. A armadura transversal das vigas em aduelas é composta por estribos com espaçamento variável, que se concentram mais nas proximidades das juntas. A finalidade dessa disposição de armaduras é combater a força cortante nesta região por ser esta uma região crítica após a abertura da junta. A disposição das armaduras é mostrada nas figuras 4.6 a 4.7.

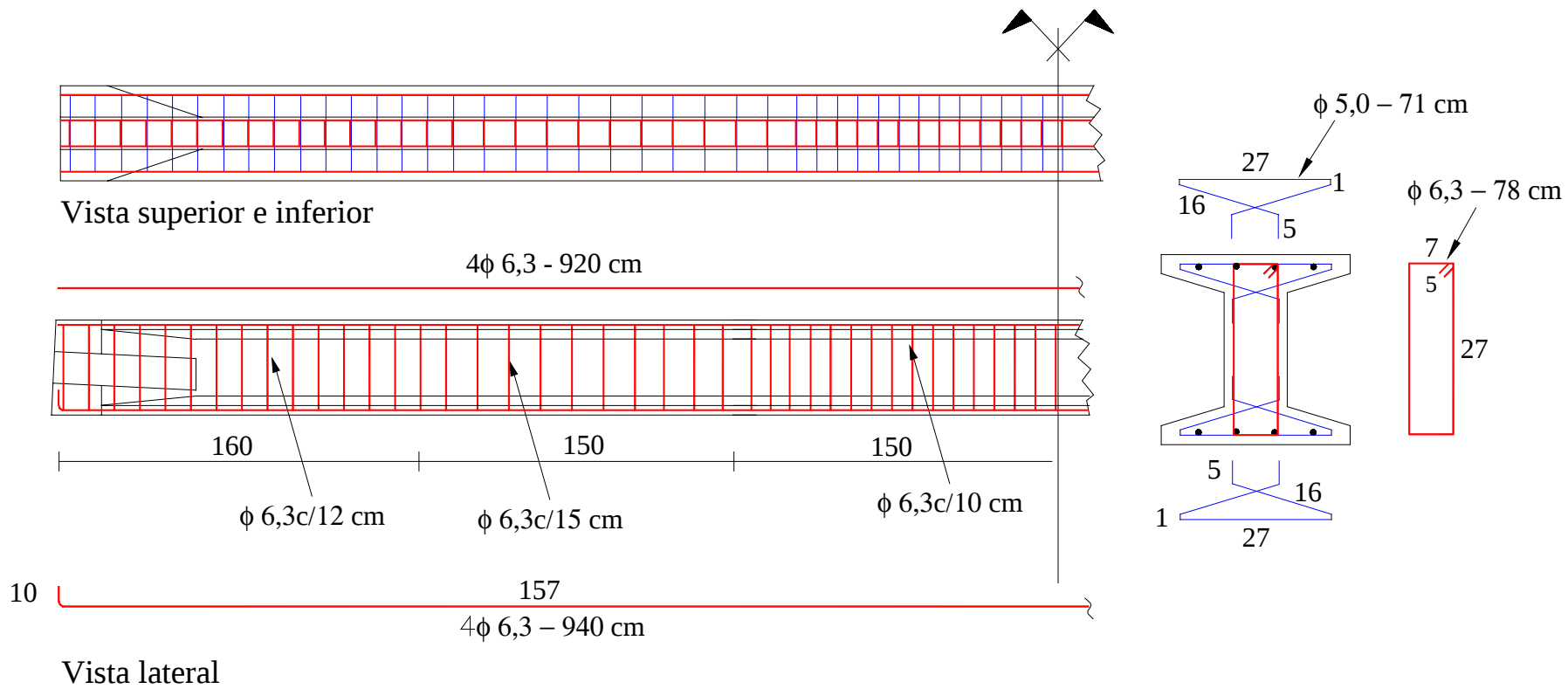


Figura 4.6 - Detalhe da armadura da viga monolítica.

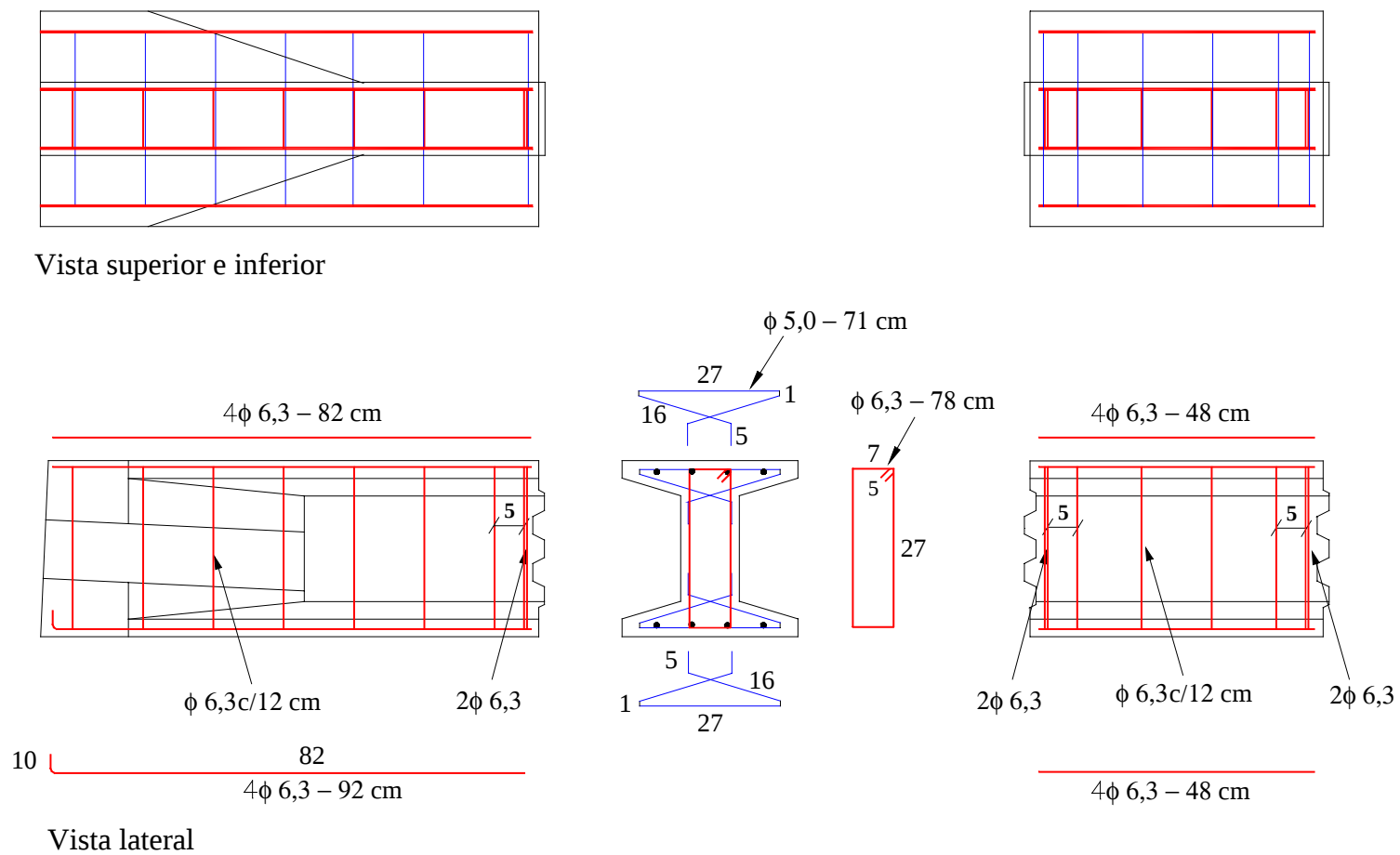


Figura 4.7 - Detalhe da armadura das vigas em aduelas.

4.4.

Concretagem

4.4.1. Viga monolítica

A viga monolítica foi concretada na posição de ensaio, sobre os três apoios. Para tanto, foi construído o escoramento e, posteriormente, feita a montagem da fôrma sobre a mesma. A fôrma foi confeccionada com madeirite na parte inferior e nas laterais foram utilizadas chapas de aço responsáveis pelo formato I da viga. Em seguida, foi colocada a armadura e concretada a viga.

O volume total de concreto foi dividido em quatro betonadas. O concreto foi vibrado mecanicamente com um vibrador de imersão.

4.4.2.

Vigas em Aduelas

A mesma fôrma foi utilizada na construção das vigas em aduelas. A concretagem das aduelas foi executada de tal forma que as aduelas já concretadas serviam de fôrma para as aduelas a serem concretadas.. A figura 4.8 mostra o esquema da concretagem das aduelas.

Algumas aduelas da viga VGAH2 foram reutilizadas na viga VGAH1. As mesmas são identificadas no item 4.5.

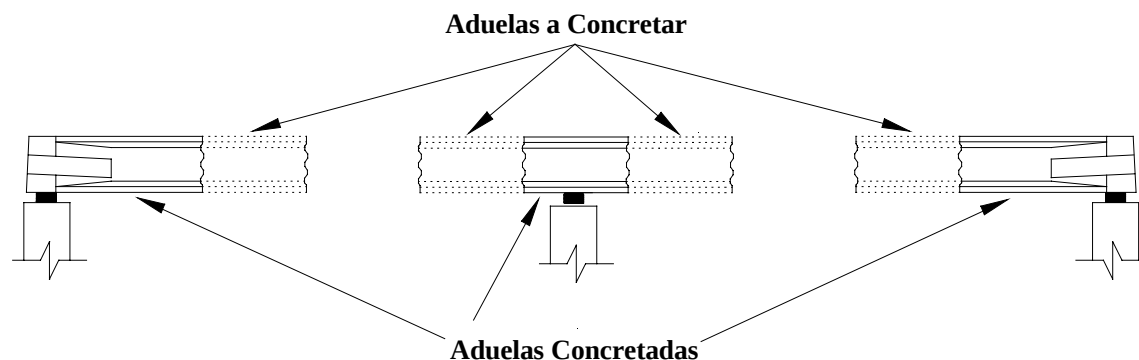


Figura 4.8 - Esquema da concretagem das vigas em aduelas.

4.5.

Propriedades dos Materiais

4.5.1.

Concreto

A tabela 4.1 mostra os valores da resistência média e desvio padrão do concreto, obtidas em ensaios de compressão em corpos de provas cilíndricos com dimensões 15 x 30 (cm), realizadas no dia do ensaio. O concreto usado na

fabricação das vigas foi dosado com areia média, brita Nº 1 e cimento do tipo CP II - 32. O abatimento ficou em torno de 8 cm, com a utilização de 0,7% de superplastificante em relação ao peso do cimento. O consumo de materiais por m³ foi o mesmo dos ensaios preliminares, ou seja: cimento - 426 kg; areia – 733 kg; brita – 1011 kg e água – 192 litros.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão do concreto.

Viga		Nº C.P.	f _{cm} (MPa)	s (MPa)
VGMH1	1º Betonada	3	48,0	2,4
	2º Betonada	3	43,3	0,8
	3º Betonada	3	44,6	1,6
	4º Betonada	3	45,5	1,5
VGAH1	Aduelas 1 (1*) e 11 (17*)	2	52,0	0,6
	Aduelas 2, 6 e 9	5	44,9	1,1
	Aduelas 3 (5*)	3	50,0	0,3
	Aduelas 4(6*) e 8 (12*)	2	51,1	0,4
	Aduelas 5 (7*)	2	52,3	1,1
	Aduelas 7 e 10	5	45,1	1,1
VGAH2	Aduelas 1, 9 e 17	3	48,4	0,3
	Aduelas 2, 8, 10 e 16	3	45,8	0,4
	Aduelas 3, 7, 11 e 15	3	46,3	1,2
	Aduelas 4, 6, 12 e 14	3	47,8	1,2
	Aduelas 5 e 13	3	46,2	0,8
VGAH3	Aduelas 1, 12 e 23	3	45,1	0,8
	Aduelas 2, 11, 13, 22	3	45,4	0,4
	Aduelas 3, 10, 14, 21	3	44,2	0,6
	Aduelas 4, 9, 15, 20	3	46,6	0,4
	Aduelas 5, 8, 16, 19	3	44,0	1,1
	Aduelas 6, 18	3	43,8	0,8
	Aduelas 7, 17	3	42,0	0,6

*Aduelas reutilizadas da viga VGAH2.

4.5.2.

Características do aço

A tabela 4.2 apresenta as propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração simples das barras utilizadas como armadura. Estes ensaios foram realizados com o auxílio de um clipgauge de modo a permitir a construção das

curvas que relacionam tensão vs. deformação (Figura 4.9 e Figura 4.10). Todos os valores constantes na tabela 4.2 são resultantes de uma média de três amostras.

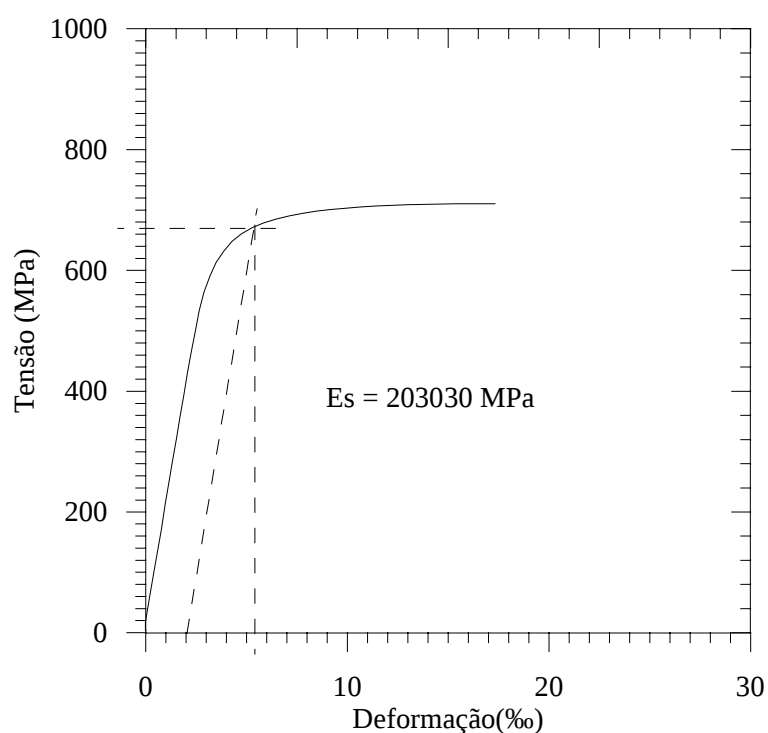


Figura 4.9 - Diagrama tensão vs. deformação da barra de diâmetro 5,0 mm.

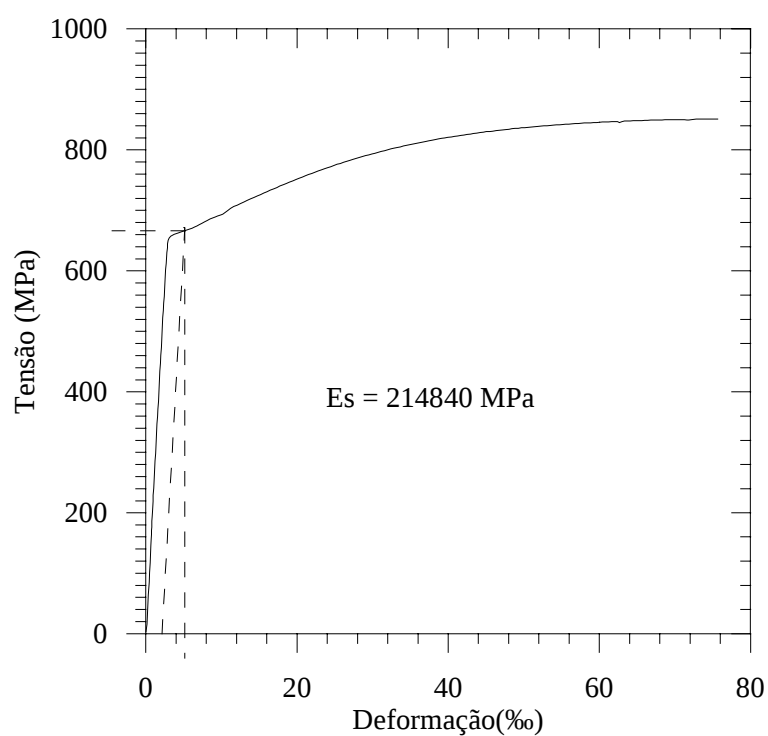


Figura 4.10 - Diagrama tensão vs. deformação da barra de diâmetro 6,3 mm.

Tabela 4.2 – Propriedades da armadura passiva.

Aço	ϕ (mm)	A_s (cm ²)	f_y (MPa)	E_s (MPa)
CA-60A	5,0	0,196	670	203030
CA-60B	6,3	0,312	666	214840

 ϕ - Diâmetro da barra A_s - Área da seção transversal da barra f_y - Tensão de escoamento E_s - Módulo de elasticidade

4.5.3. Características dos cabos de protensão

As quatro vigas foram protendidas com o mesmo tipo de cabo utilizado nos ensaios preliminares, ou seja, *Parafil* Tipo G, cujo núcleo é constituído de fibras *Kevlar* 49. Maiores detalhes podem ser obtidos no item 3.4.3 ou no apêndice A deste trabalho, onde se apresenta um resumo das principais características e propriedades dos cabos *Parafil*.

4.6. Montagem dos ensaios

4.6.1. Operação de Protensão

Com relação a operação de protensão, adotou-se nas vigas hiperestáticas o mesmo procedimento utilizado nos ensaios preliminares. A figura 4.11 mostra os detalhes da ancoragem morta e da ancoragem ativa.



a) ancoragem morta na extremidade esquerda direita



b) ancoragem ativa na extremidade

Figura 4.11 - Detalhes das ancoragens morta e ativa.

4.6.2. Instrumentação

As figuras 4.12 a 4.15 mostram os detalhes da instrumentação utilizada nos ensaios das vigas. Os deslocamentos verticais e aberturas das juntas foram medidos com transdutores de deslocamento tipo LVDT. Para medir a força nos cabos na extremidade esquerda, ou seja, na ancoragem morta, foram utilizadas duas células de carga com capacidade de carga de 20 tf (200 kN) cada. Já na extremidade direita, onde se encontrava a ancoragem ativa, foi utilizada, uma célula de carga, em um dos cabos, com capacidade de 50 tf (500 kN).

A medição do carregamento aplicado às vigas foi feita por meio de células de carga, com capacidade de 25 tf (250 kN). Foram utilizadas duas células de carga para cada viga, colocadas no centro dos vãos (sobre um perfil de aço que distribuía a carga para os terços dos vãos). Já as reações nos apoios foram medidas com células de 10 tf (kN) e 25 tf (kN) nas extremidades direita e esquerda, respectivamente.

As deformações na armadura passiva e no concreto foram medidas com extensômetros elétricos de 5 mm e 70 mm de comprimento, respectivamente. Na viga VGMH1 foram colocados 78 extensômetros, sendo 24 no concreto e os demais na armadura passiva. Nas vigas VGAH1 e VGAH3 foram usados 30 extensômetros, sendo 24 no concreto e os demais na armadura passiva. Na viga VGAH2 foram empregadas 21 extensômetros, sendo 15 no concreto e os demais na armadura passiva. O posicionamento dos extensômetros em cada viga é visto nas figuras 4.12 a 4.14.

Assim como nos ensaios preliminares, os resultados dos extensômetros, defletômetros e células de carga foram registrados automaticamente por um computador conectado a um sistema de aquisição de dados ao qual os instrumentos estavam ligados.

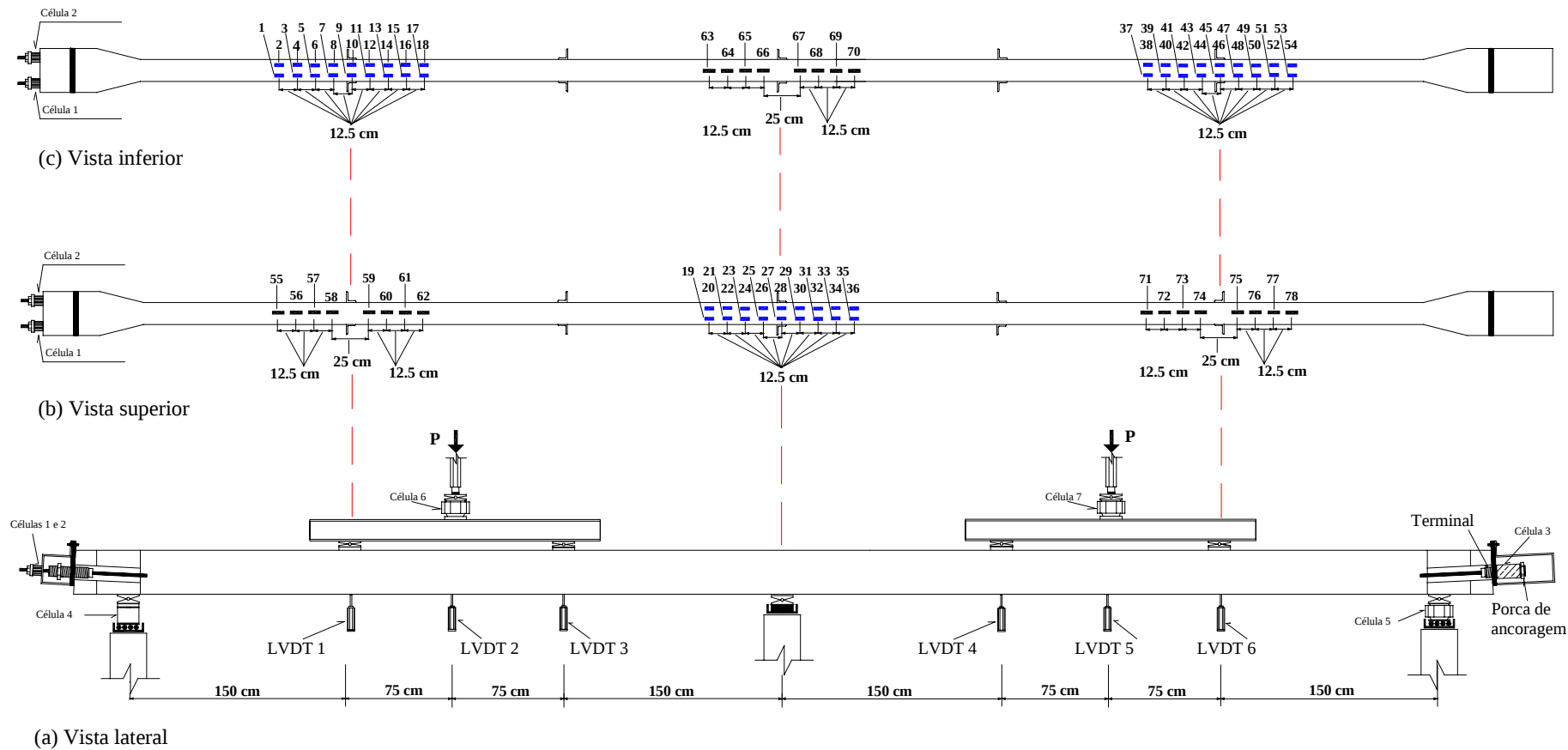


Figura 4.12 - Localização dos instrumentos de medição da Viga monolítica (VGMH1).

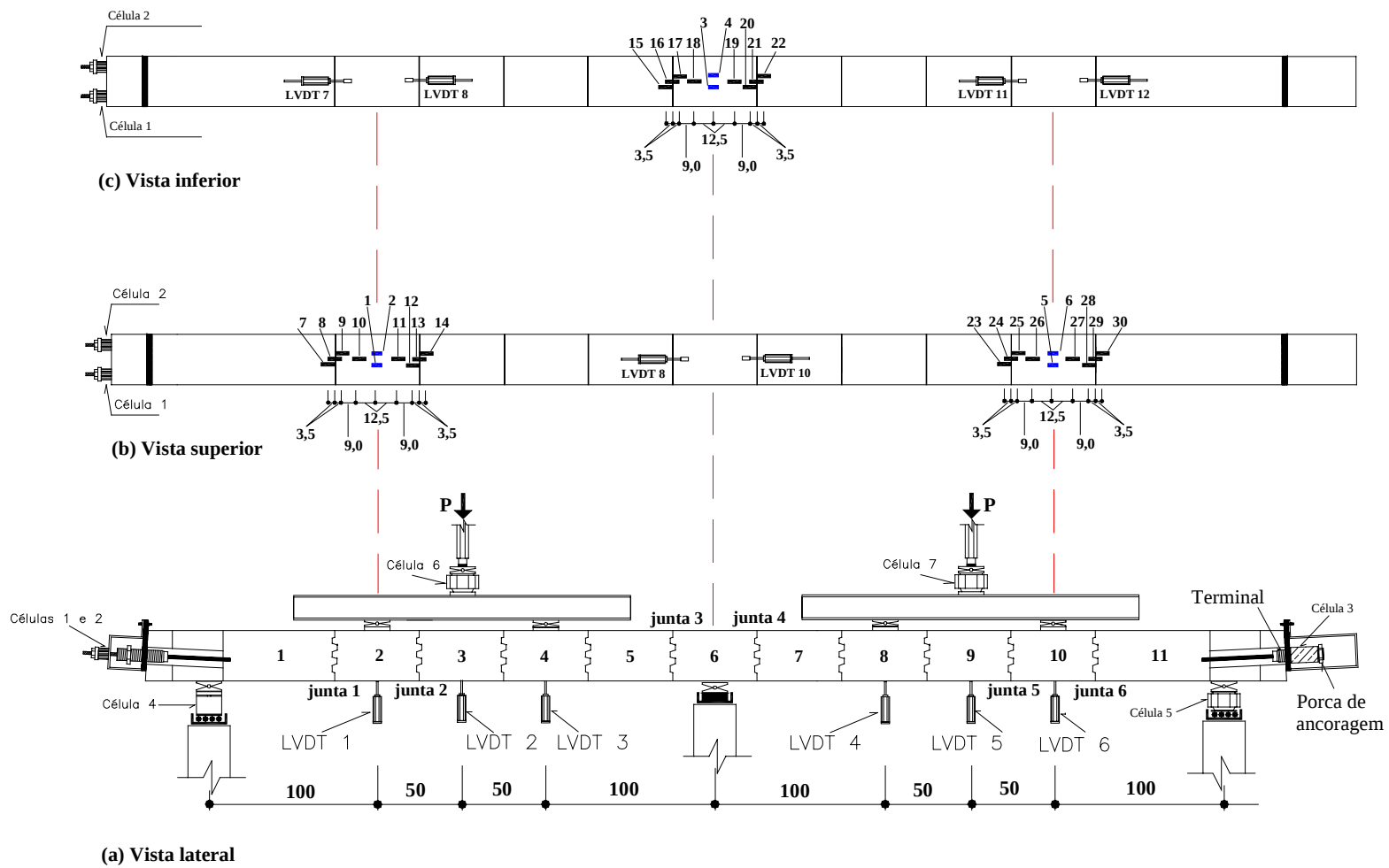


Figura 4.13 - Localização dos instrumentos de medição da viga VGAH1

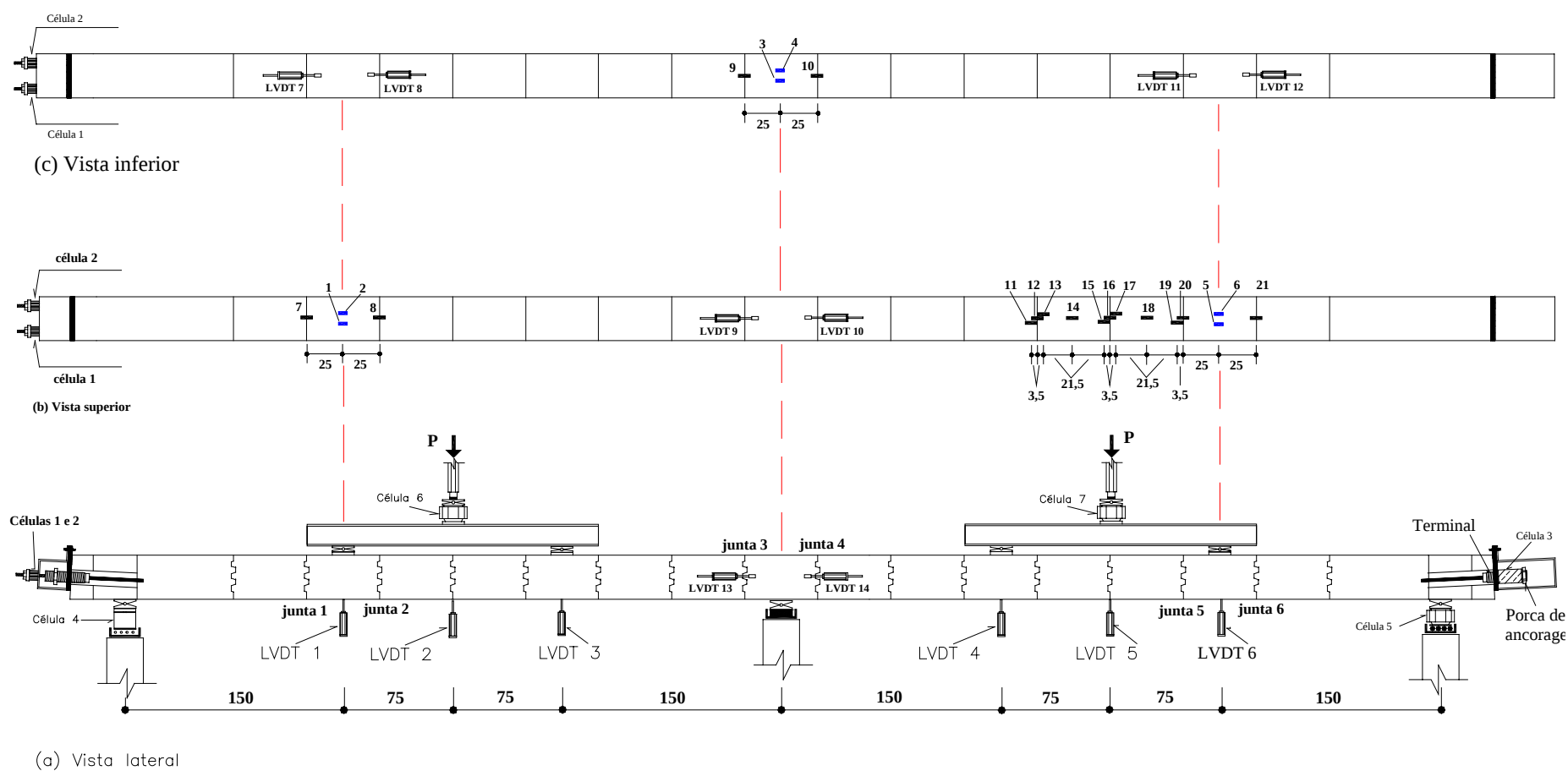


Figura 4.14 - Localização dos instrumentos de medição da viga VGAH2

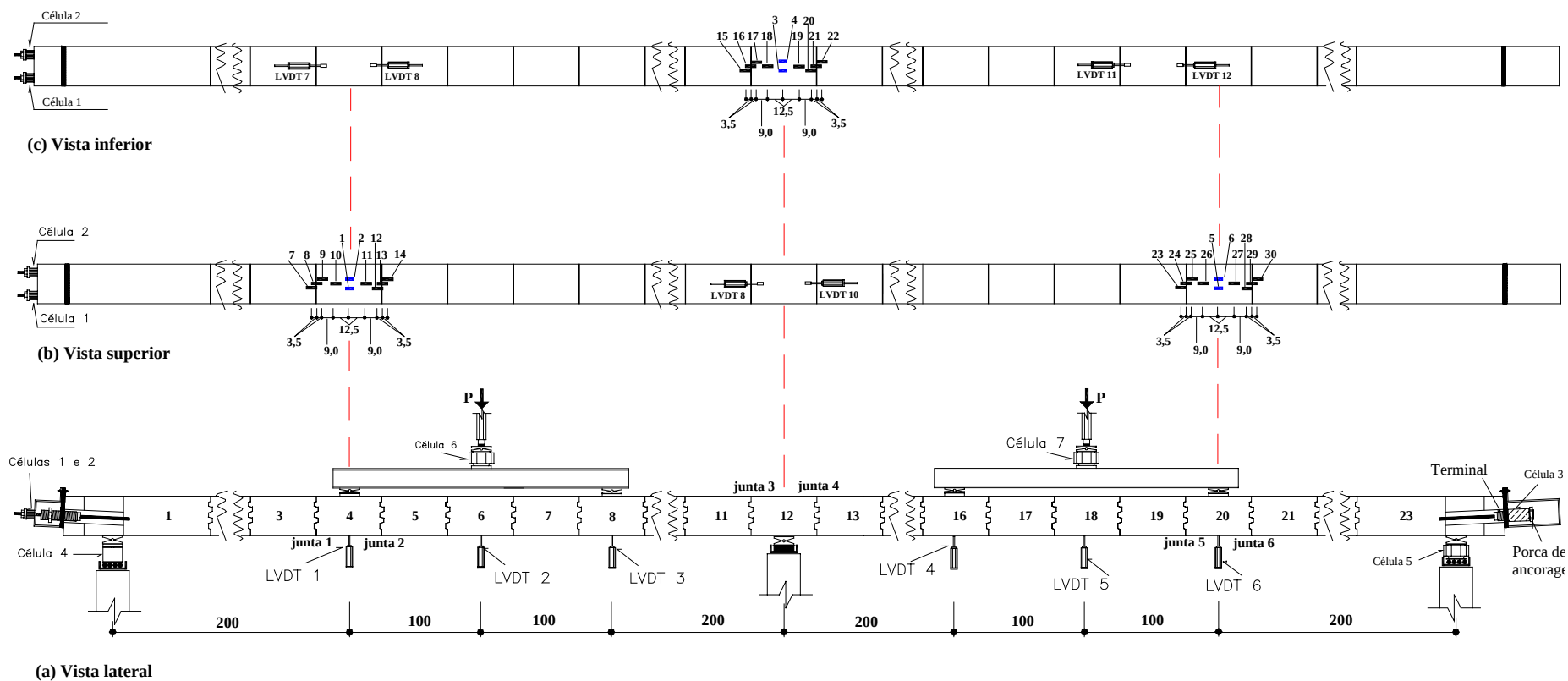


Figura 4.15 - Localização dos instrumentos de medição da Viga VGAH3

4.6.3. Procedimento do ensaio

Após a fase final de protensão (ver item 4.6.1), deu-se início ao ensaio. Foram aplicados quatro ciclos de carga em todas as vigas. Cada ciclo consistiu no carregamento e descarregamento da viga com intervalos fixos de carga (tanto para carregamento como para descarregamento) com exceção do último ciclo, no qual o carregamento foi aplicado até a ruptura (por razões de segurança, as vigas VGAH1 e VGAH2 não foram levadas ao colapso total, pois havia o temor de que as aduelas pudessem desalinhar-se de forma descontrolada). No primeiro ciclo a carga atingiu um valor correspondente ao estado de descompressão; no segundo a carga atingiu o valor correspondente ao início das fissuras do concreto ou abertura das juntas; no terceiro ciclo a carga atingiu um valor correspondente às deformações no concreto entre 1‰ e 2‰ e no último ciclo a carga foi aplicada até a ruptura. As figuras 4.16 a 4.18 mostram uma das vigas nas várias etapas de carregamento.



Figura 4.16 - Viga pronta para ser carregada



Figura 4.17 - Viga submetida a um determinado carregamento



Figura 4.18 - Viga próxima à ruptura.

4.7.

Apresentação dos Resultados

4.7.1.

Deslocamentos

Para efeito de apresentação, serão mostrados os resultados em alguns pontos das vigas, com relação à deformação, ao deslocamento e à abertura de junta. Os demais resultados encontram-se no Apêndice C.

As figuras 4.19 a 4.22 mostram as curvas que relacionam carga aplicada vs. deslocamento do LVDT 1 posicionado conforme mostra cada figura referente à instrumentação da viga ensaiada. Observa-se que todas elas apresentam uma flecha inicial negativa devido à protensão. Sob a carga máxima do primeiro ciclo, as vigas deslocam-se seguindo uma certa proporcionalidade entre carga e deslocamento por encontrarem-se no estado não fissurado ou de não abertura das juntas. Nos demais ciclos, nos quais as vigas atingem o estado de fissuração ou abertura das juntas, os deslocamentos passam a apresentar grandes acréscimos para pequenos incrementos de carga até a perda total da rigidez das vigas, ocasionando desta forma a ruptura. Essa perda é observada nos gráficos pela mudança de inclinação das curvas.

São observados também deslocamentos residuais nas vigas ao final de cada ciclo de carga, com exceção da viga VGAH1, que possui uma maior rigidez ($l/d_p = 12,5$), como pode ser visto na figura 4.20.

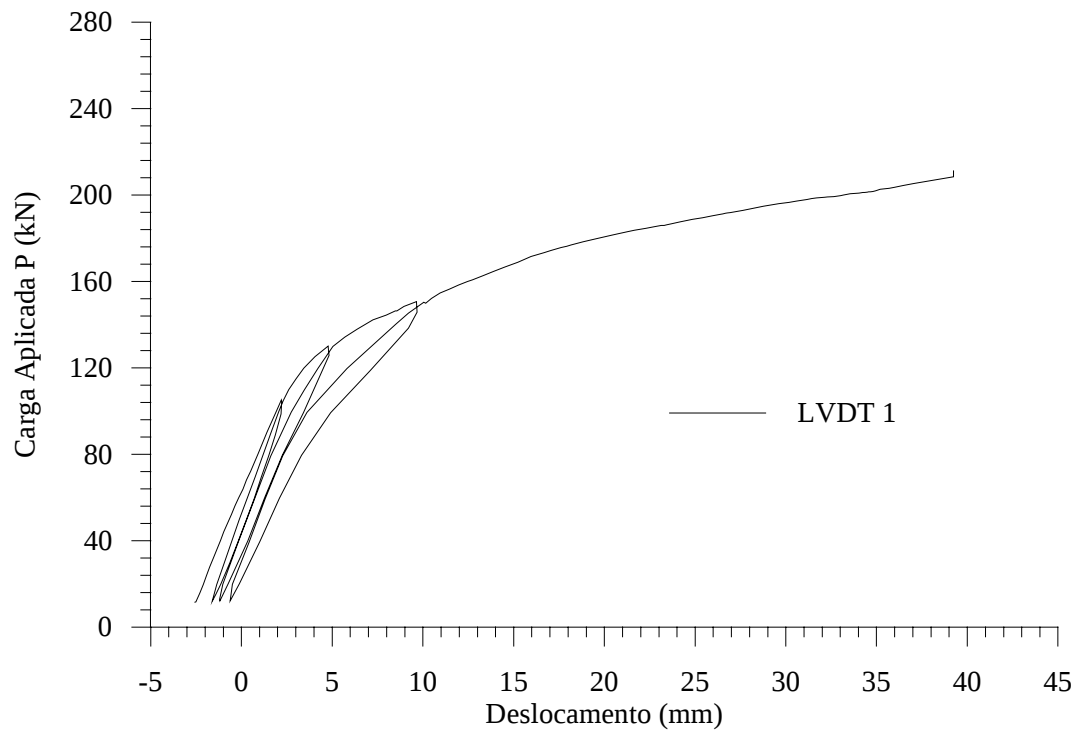


Figura 4.19 – Curva carga vs. deslocamento para a viga VGMH1 (monolítica).

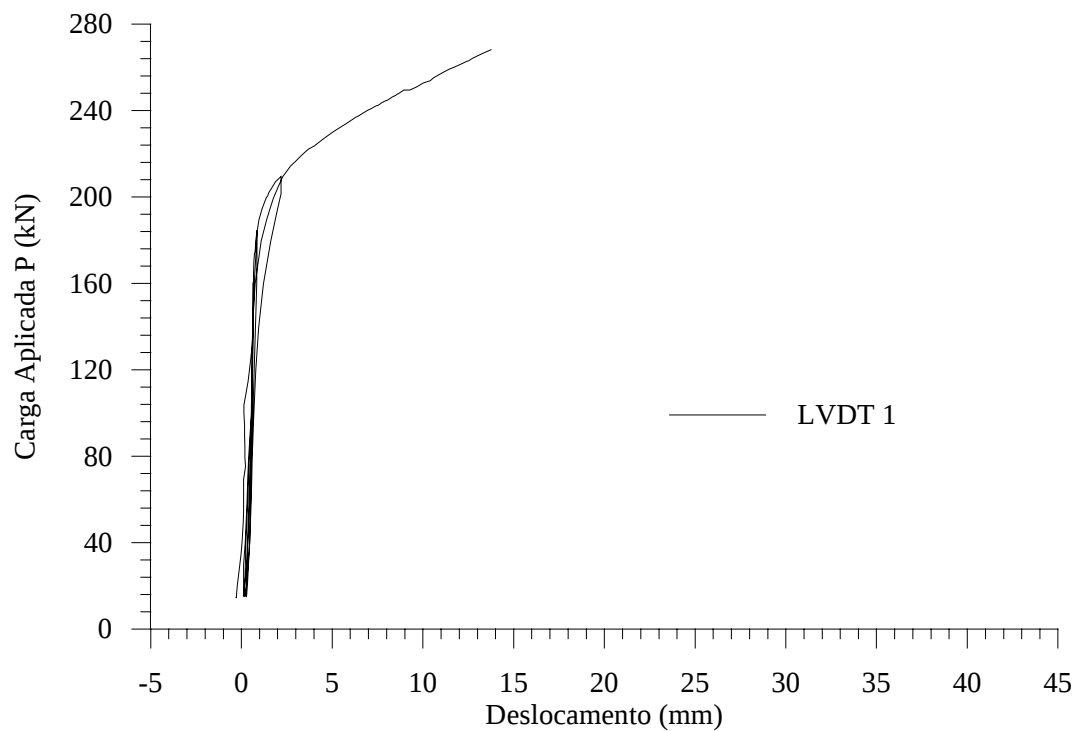


Figura 4.20 – Curva carga vs. deslocamento para a viga VGAH1 ($l/d_p = 12,5$).

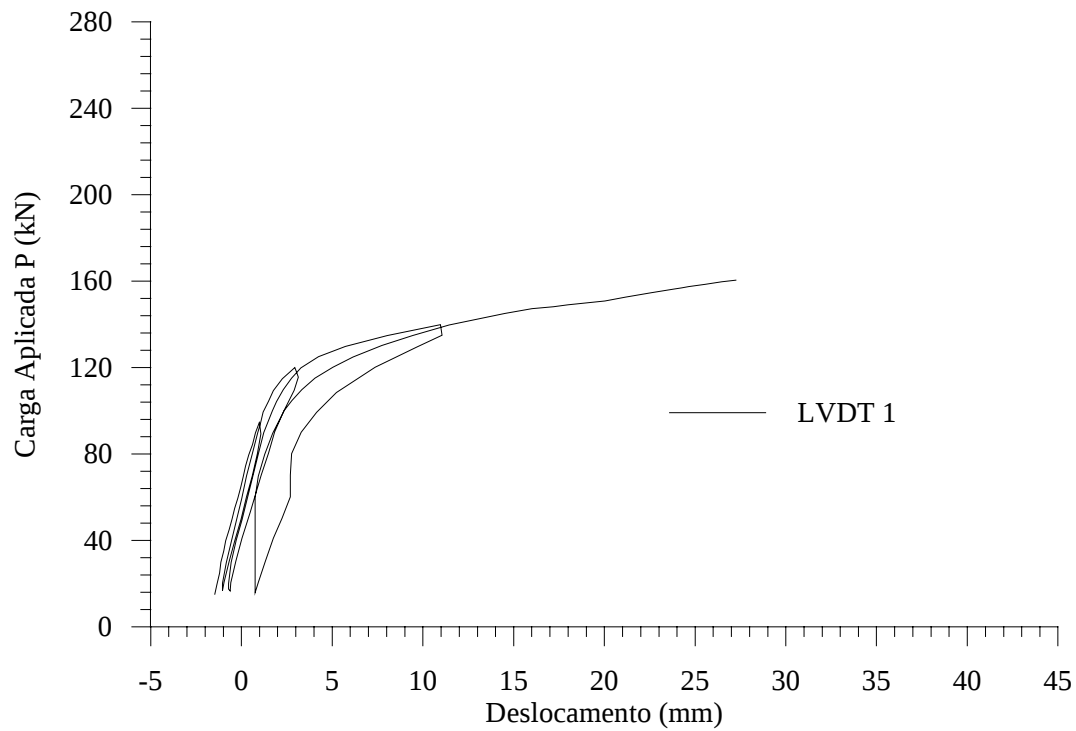


Figura 4.21 – Curva carga vs. deslocamento para a viga VGAH2 ($l/d_p = 18,75$).

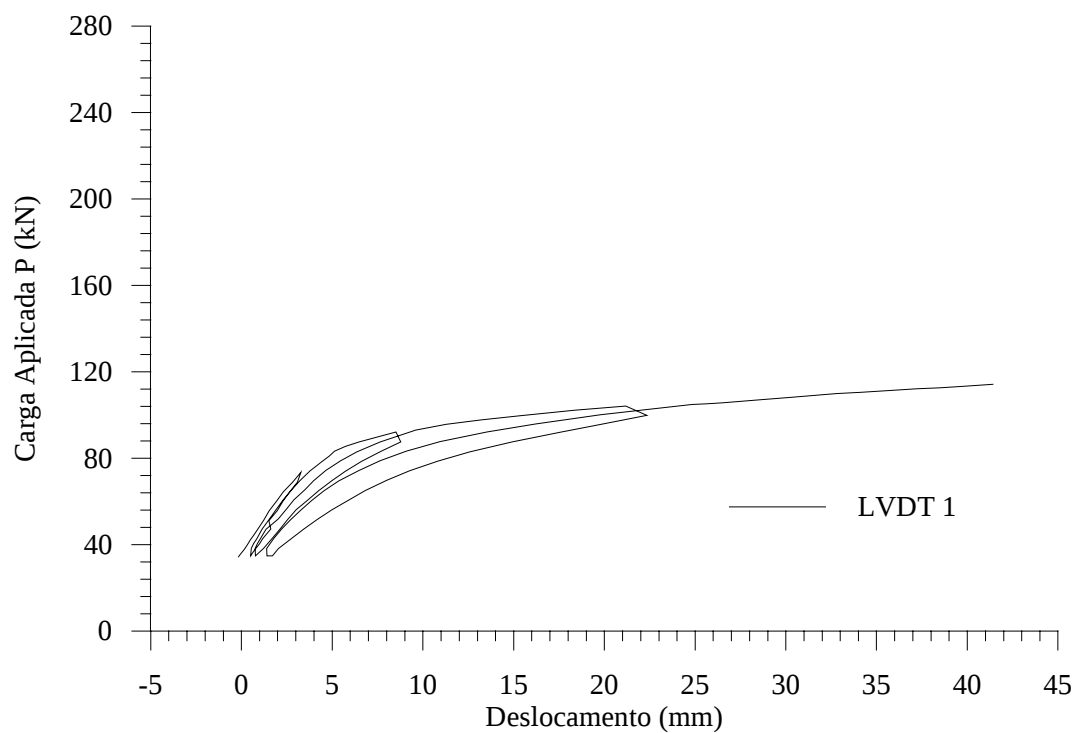


Figura 4.22 – Curva carga vs. deslocamento para a viga VGAH3 ($l/d_p = 25$).

4.7.2. Deformações

A figura 4.23 mostra que relaciona a curva carga aplicada vs. deformação no aço para a viga monolítica, e as figuras 4.24 a 4.27 mostram as curvas que relacionam carga aplicada vs. deformação no concreto para cada viga ensaiada. A medição da deformação na armadura passiva das vigas em aduelas não foi feita em virtude da mesma ser pouco solicitada, como visto no capítulo anterior.

Na figura 4.23 é observado que a curva está caracterizada pela apresentação de três trechos distintos: o primeiro, de maior inclinação, corresponde ao estágio elástico não fissurado; o segundo, o estado elástico fissurado; e o terceiro estado, o plástico, caracterizado pelo início do escoamento da armadura passiva. Nas vigas em aduelas dois estados são definidos: o primeiro, de maior inclinação, corresponde ao estado de não abertura das juntas; o segundo estado é o de abertura da juntas e fissuração das aduelas (figuras 4.25 a 4.27). É observado a presença de deformações residuais no concreto das vigas em aduelas, com maior intensidade nas viga com maior relação l/d_p (igual a 25). Esse comportamento ocorre, provavelmente, devido a pequenas acomodações sofridas pelas juntas após a abertura das mesmas.

As curvas que relacionam carga aplicada vs. deformação no concreto apresentam o mesmo comportamento observado para curvas que relacionam carga aplicada vs. deslocamento.

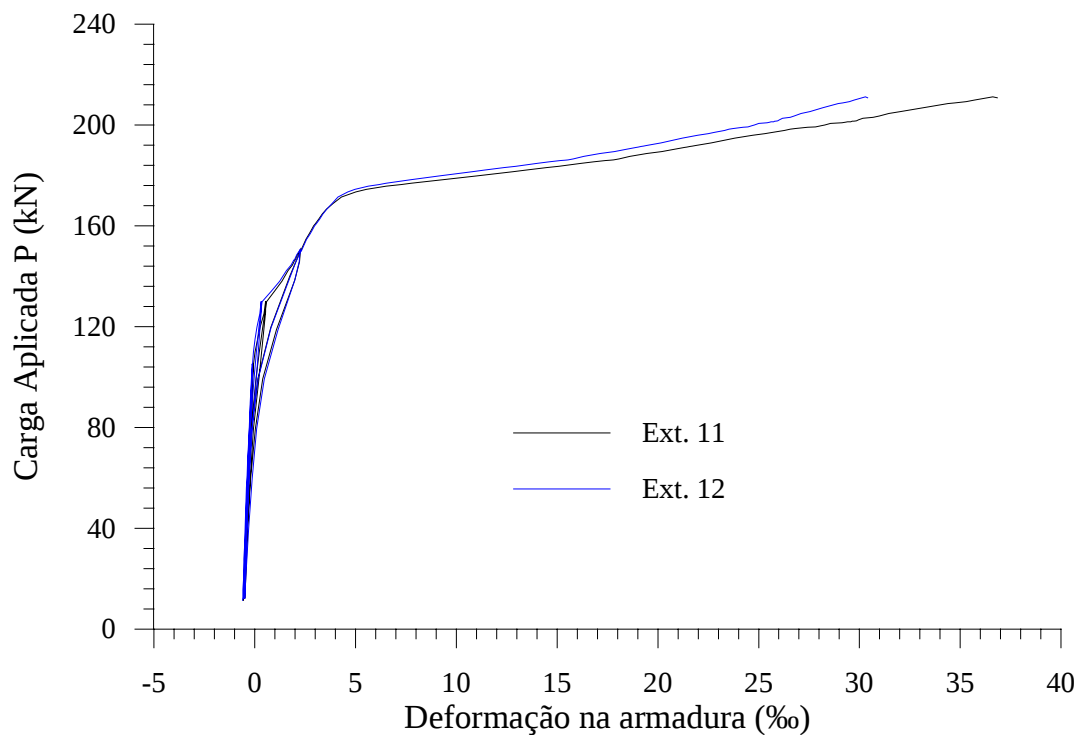


Figura 4.23 – Curva carga vs. deformação no armadura passiva da viga VGMH1 (monolítica com $l/d_p = 18,75$) .

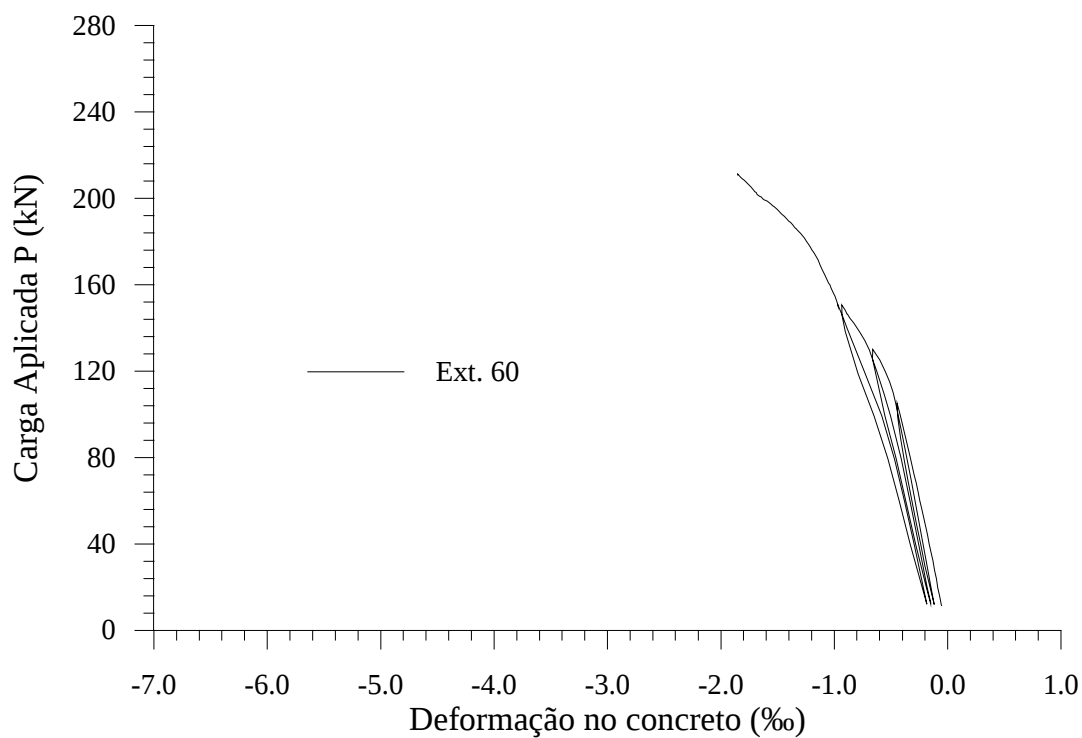


Figura 4.24 – Curva carga vs. deformação no concreto para a viga VGMH1 (monolítica) no bordo superior da seção localizada na posição equivalente a junta 2 nas vigas em aduelas.

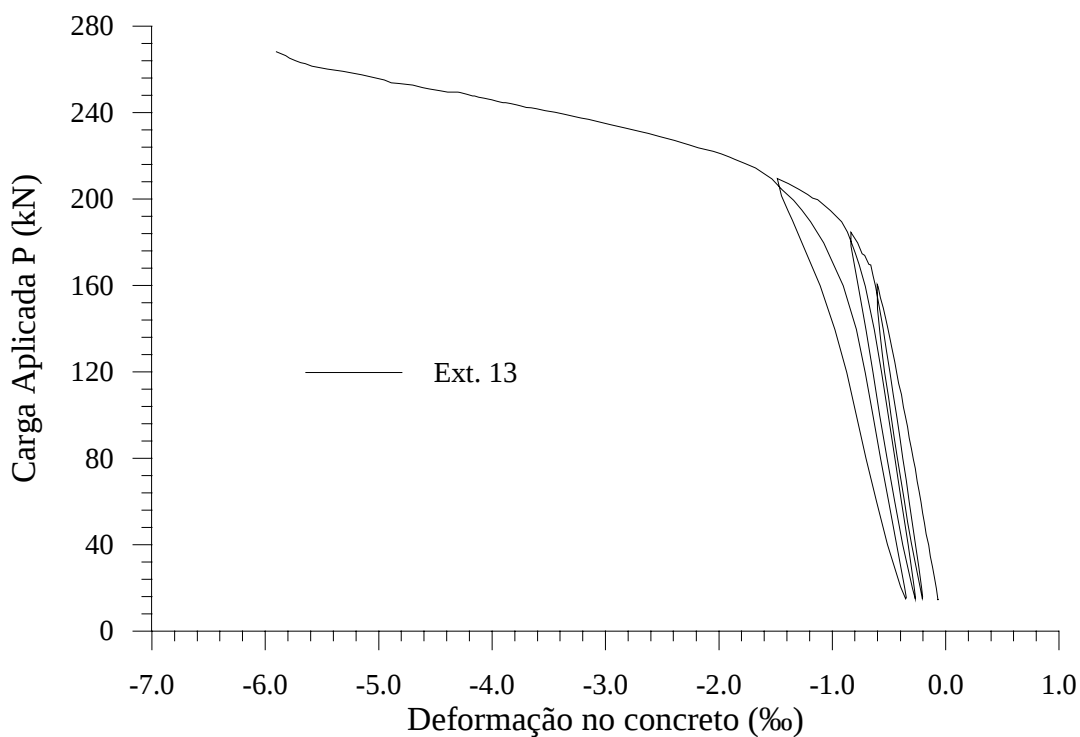


Figura 4.25 – Curva carga vs. deformação no concreto para a viga VGAH1 (relação $l/d_p = 12,5$) no bordo superior da junta 2.

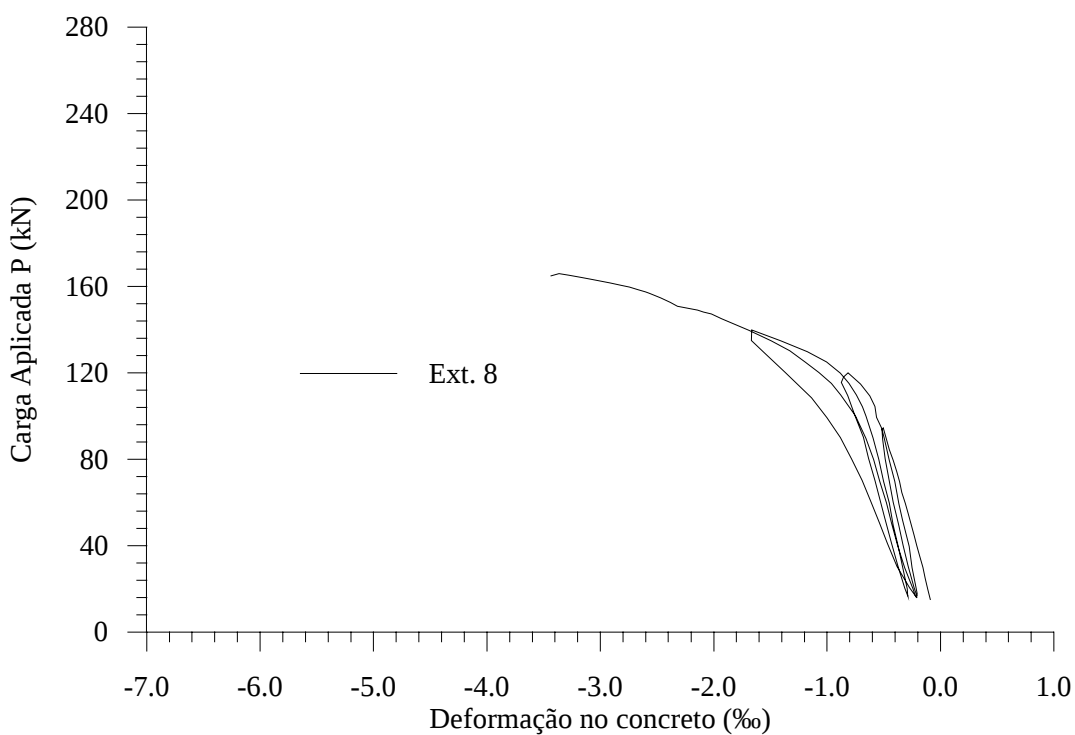


Figura 4.26 – Curva carga vs. deformação no concreto para a viga VGAH2 (relação $l/d_p = 18,75$) no bordo superior da junta 2.

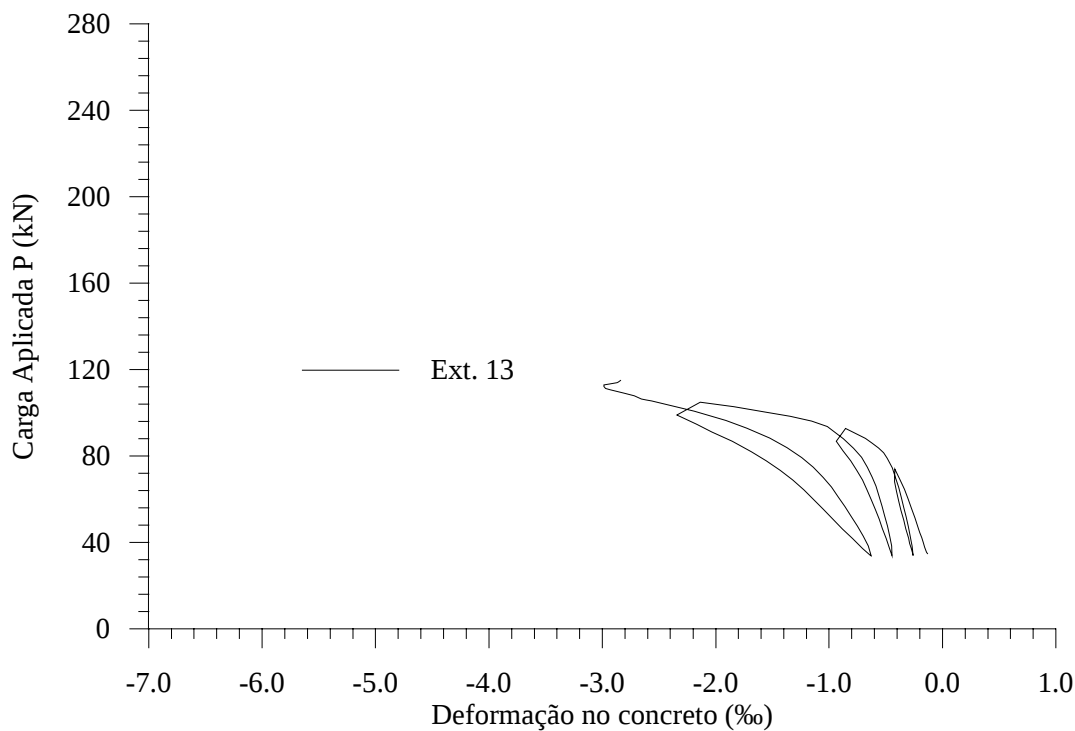


Figura 4.27 – Curva carga vs. deformação no concreto para a viga VGAH3 (relação $l/d_p = 25$) no bordo superior da junta 2.

4.7.3. Variação da força nos cabos

As figuras 4.28 a 4.31, 4.32 a 4.35 mostram as curvas que relacionam carga aplicada vs. força nos cabos medida na ancoragem morta e na ancoragem ativa, respectivamente. Estas curvas apresentam formas semelhantes às anteriores. Observa-se que as forças nas armaduras protendidas permanecem praticamente constantes até o início da fissuração (viga monolítica) ou abertura das juntas (no caso de vigas em aduelas), aumentando bruscamente em seguida.

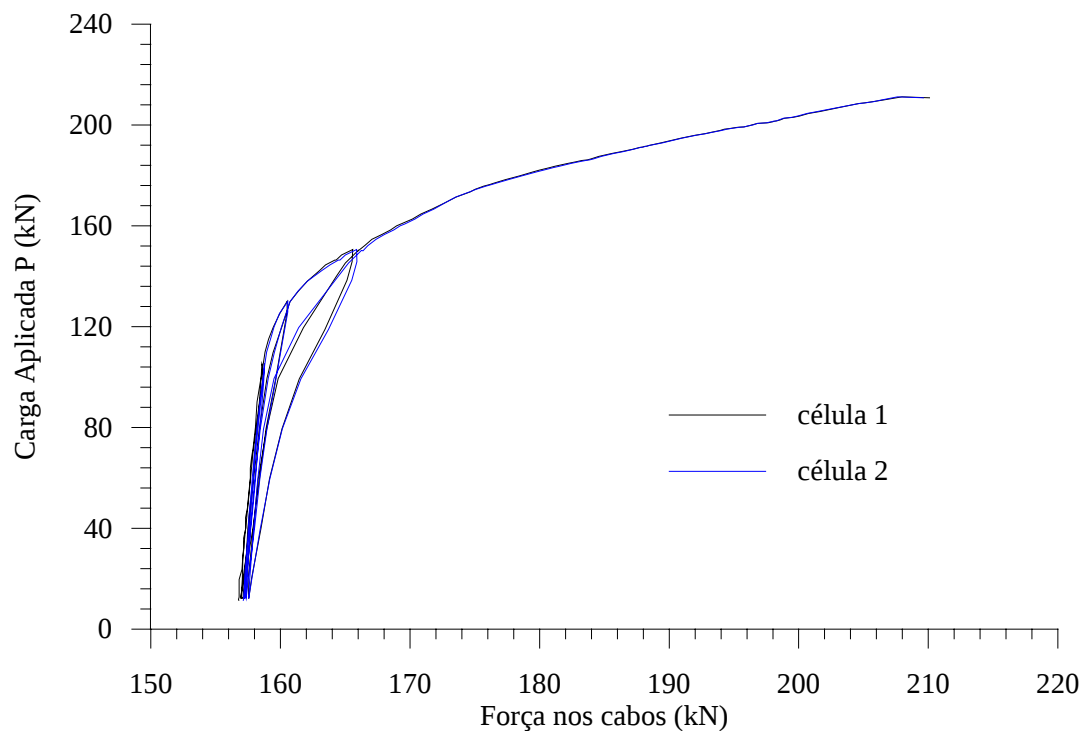


Figura 4.28 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem morta para a viga VGMH1 (monolítica).

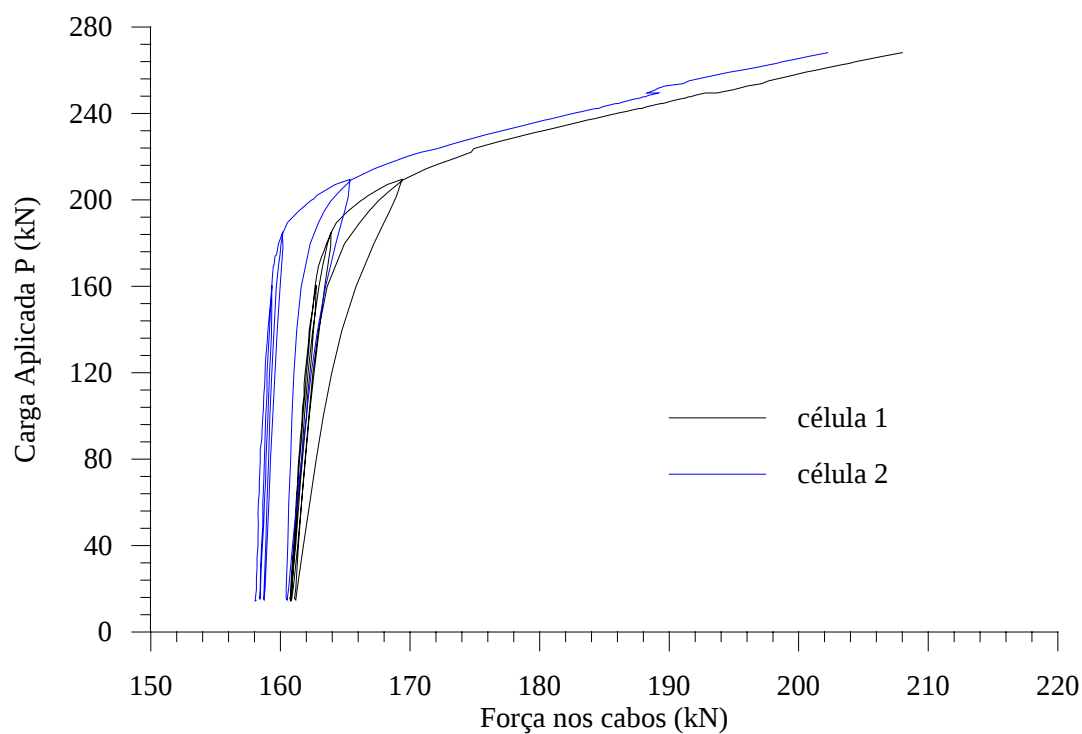


Figura 4.29 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem morta para a viga VGAH1 (relação $l/d_p = 12,5$).

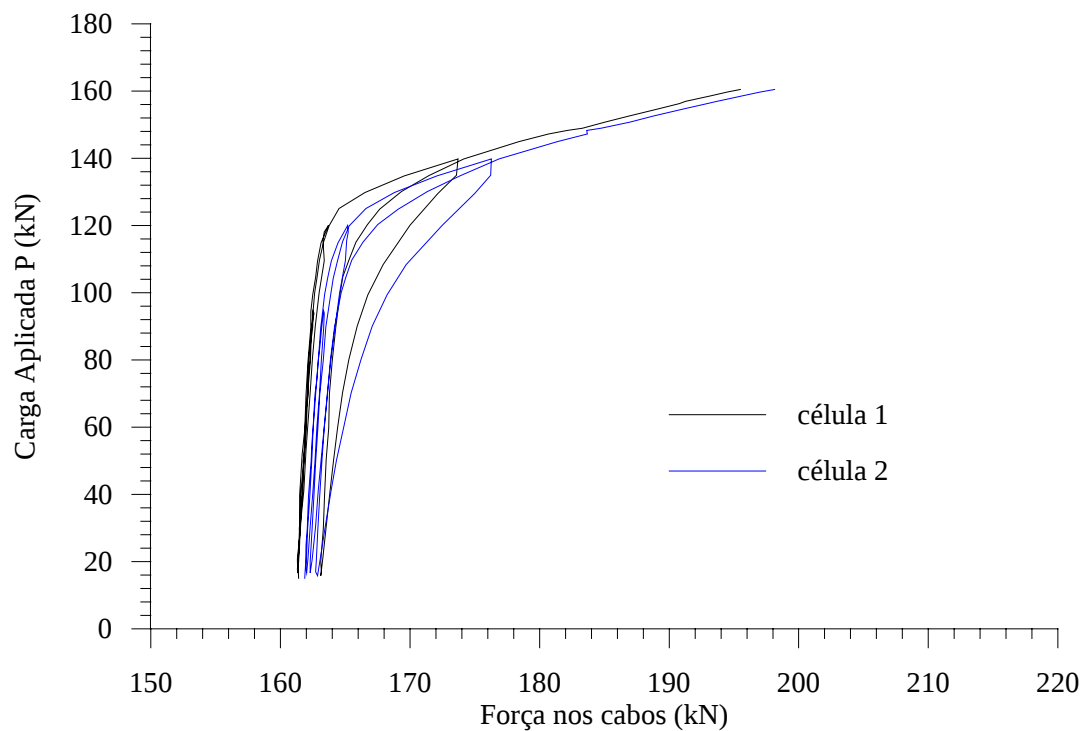


Figura 4.30 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem morta para a viga VGAH2 (relação $l/d_p = 18,75$).

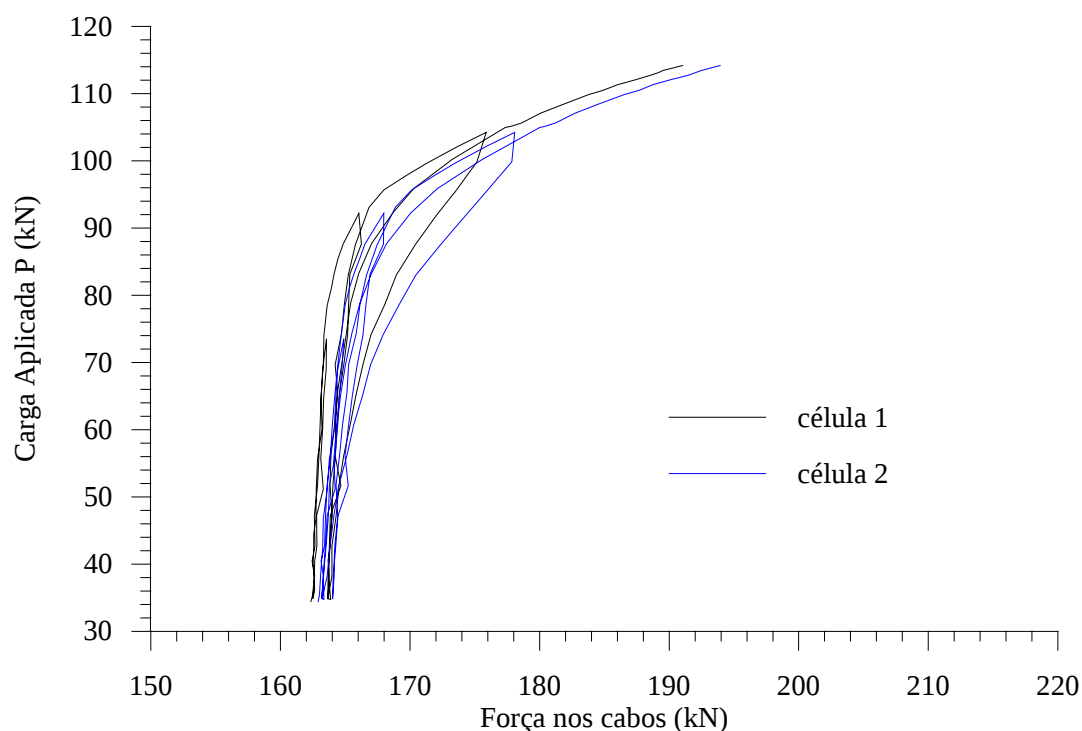


Figura 4.31 – Curva carga vs. variação da força nos cabos na ancoragem morta para a viga VGAH3 (relação $l/d_p = 25$).

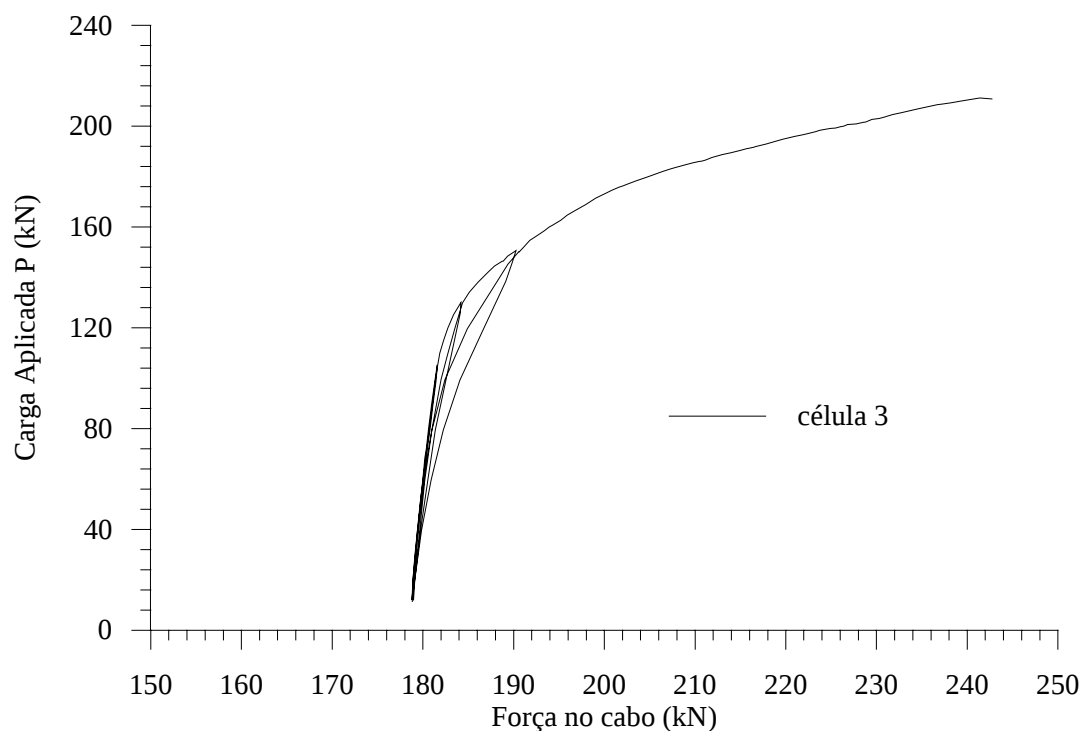


Figura 4.32 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem ativa para a viga VGMH1 (monolítica).

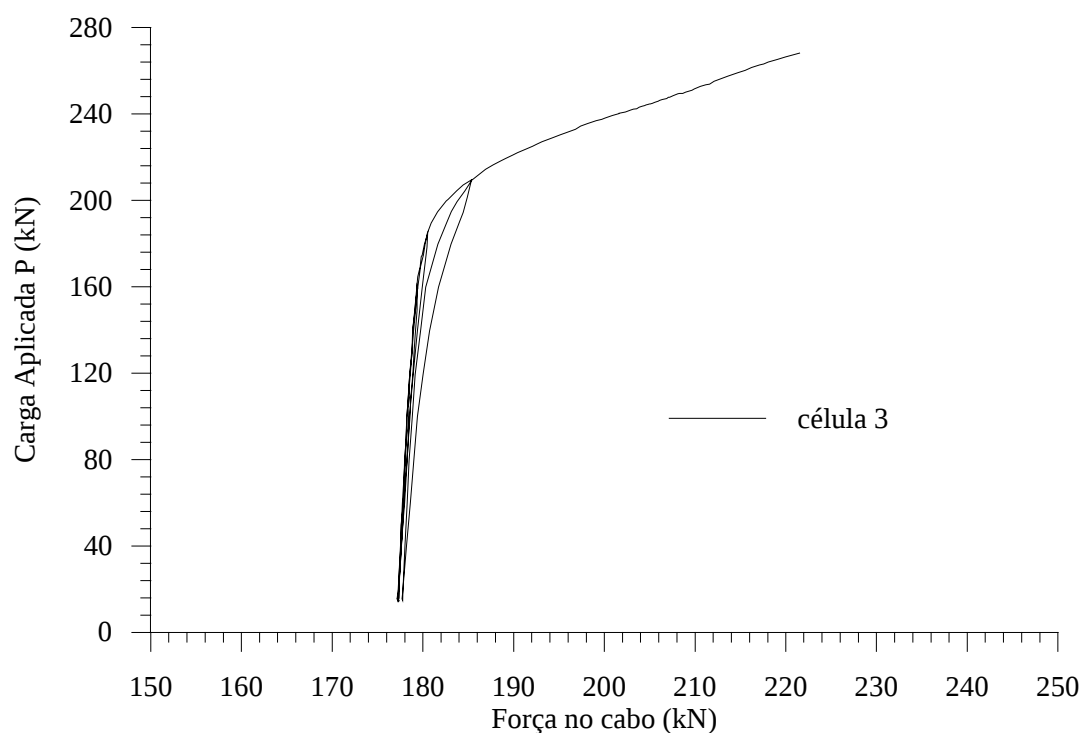


Figura 4.33 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem ativa para a viga VGAH1 (relação $l/d_p = 12,5$).

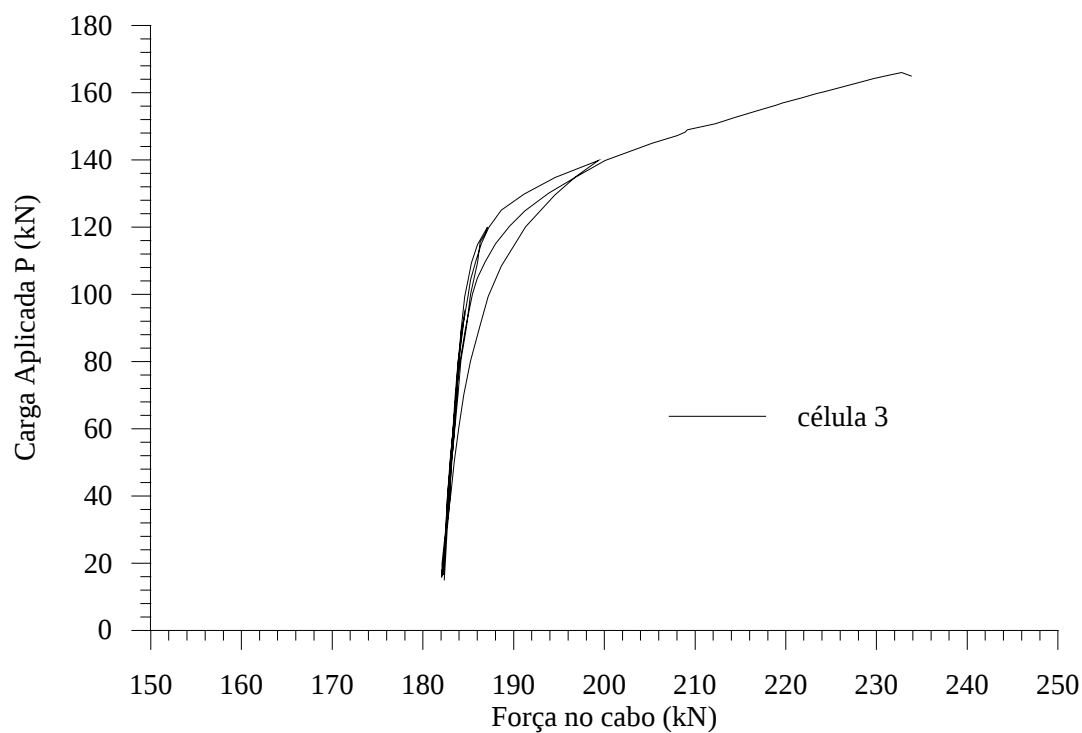


Figura 4.34 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem ativa para a viga VGAH2 (relação $l/d_p = 18,75$).

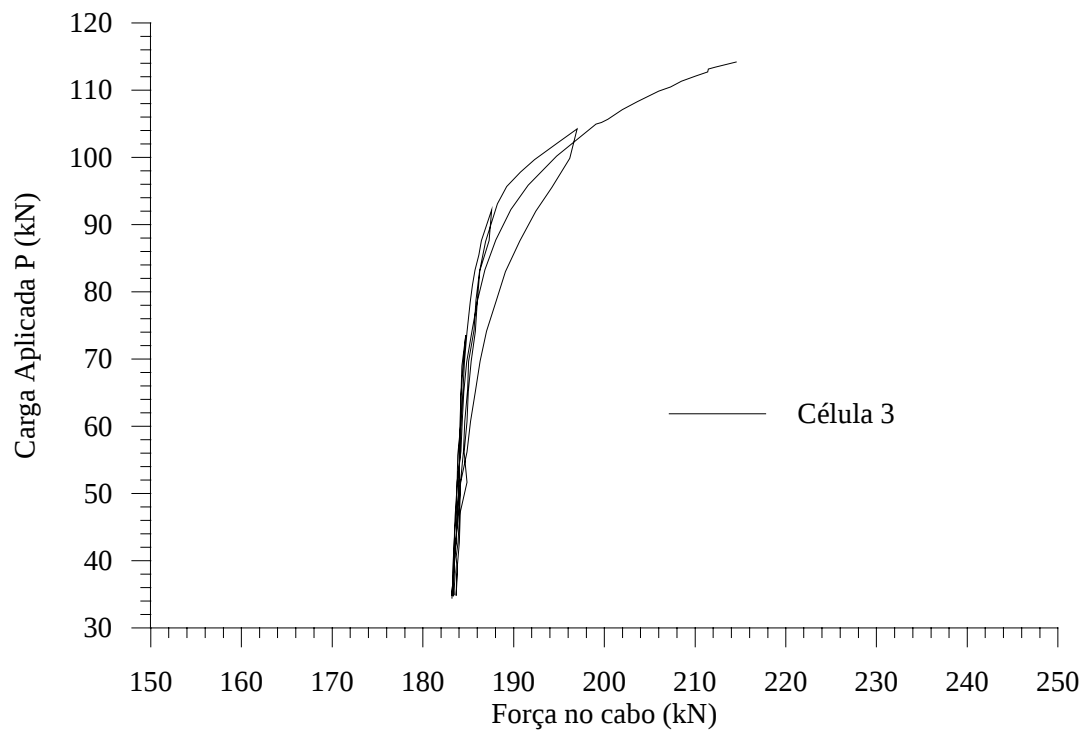


Figura 4.35 – Curva carga vs. força nos cabos na ancoragem ativa para a viga VGAH3 (relação $l/d_p = 25$).

4.7.4. Reações dos Apoios

As figuras 4.36 a 4.39 mostram as curvas carga aplicada vs. reações de apoio das vigas ensaiadas. Observa-se que as curvas mantêm o comportamento aproximadamente linear e que praticamente não existem diferenças entre as reações nos apoios extremos. A única exceção é observada para a viga monolítica (VGMH1). No ensaio desta viga foi deixado, por engano, um apoio secundário que servia de suporte para a ancoragem morta no início da protensão. Aplicada a protensão total, parte da reação que deveria ser registrada pela célula 5 (responsável pela mediação da reação de um dos apoios extremos) foi encaminhada para o apoio secundário. Após a descompressão, o apoio secundário perdeu contato com a viga e a célula 5 passou a registrar o valor correto da reação do apoio extremo.

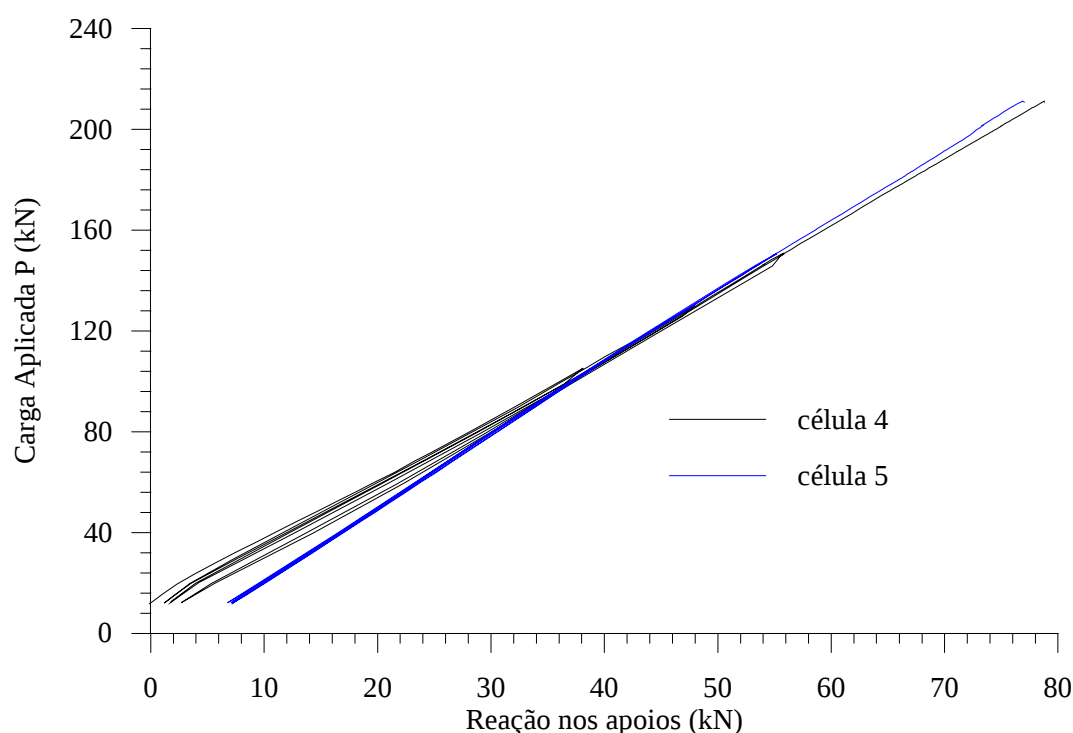


Figura 4.36 - Curva carga vs. reações dos apoios da viga VGMH1 (monolítica).

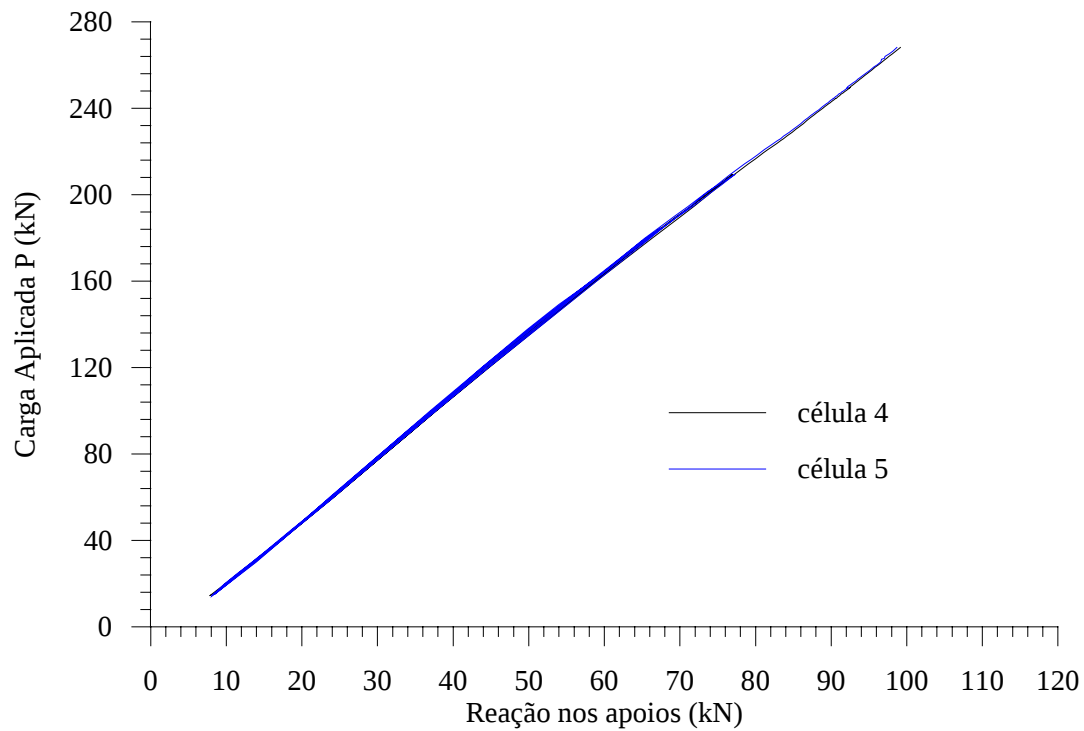


Figura 4.37 - Curva carga vs. reações dos apoios da viga VGAH1 (relação $l/d_p = 12,5$)

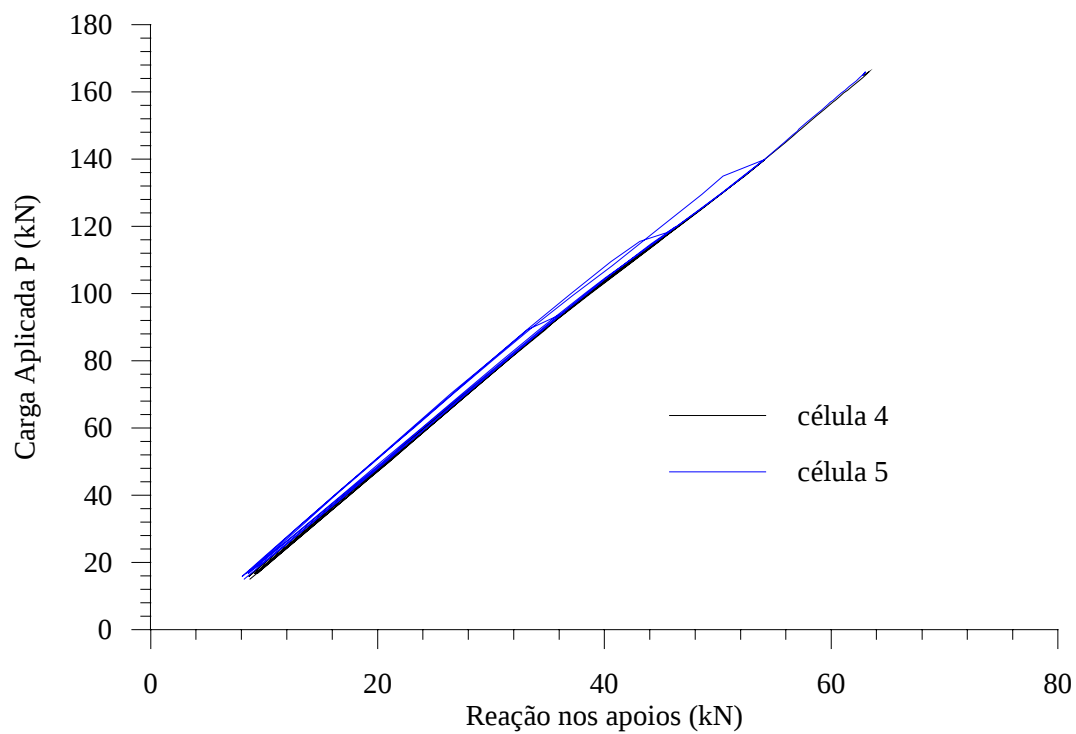


Figura 4.38 - Curva carga vs. reações dos apoios da viga VGMH1 ($l/d_p = 18,75$).

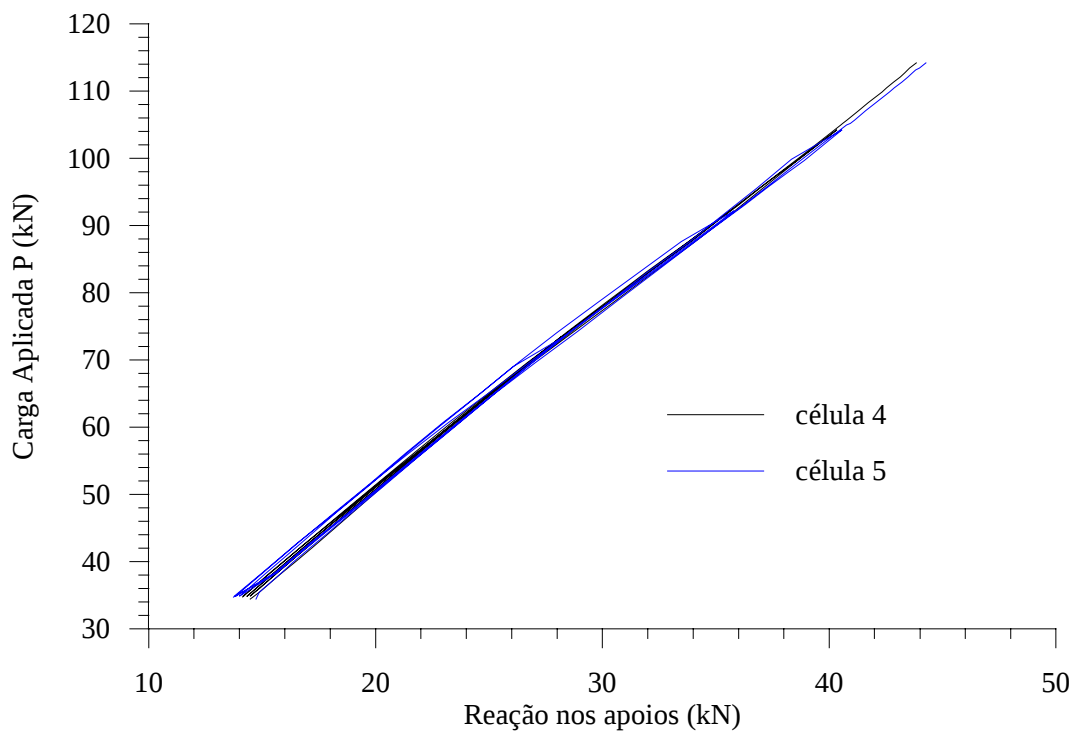


Figura 4.39- Curva carga vs. reações dos apoios da viga VGMH1($l/d_p = 25$).

4.7.5. Abertura das Juntas

As curvas que relacionam carga aplicada vs. abertura das juntas nas vigas em aduelas são mostradas nas figuras 4.40 a 4.42. Estas curvas apresentam o mesmo comportamento das curvas mostradas anteriormente. Observa-se, apenas na viga VGAH3, a existência de pequenas aberturas residuais na junta, após cada descarregamento da estrutura.

Na viga VGAH2 a abertura final da junta vista no gráfico da figura 4.41 não corresponde ao valor último de abertura da junta. Isto se dá antes do término do último ciclo de carga, todos os LVDT's foram retirados por medida de segurança desses instrumentos.

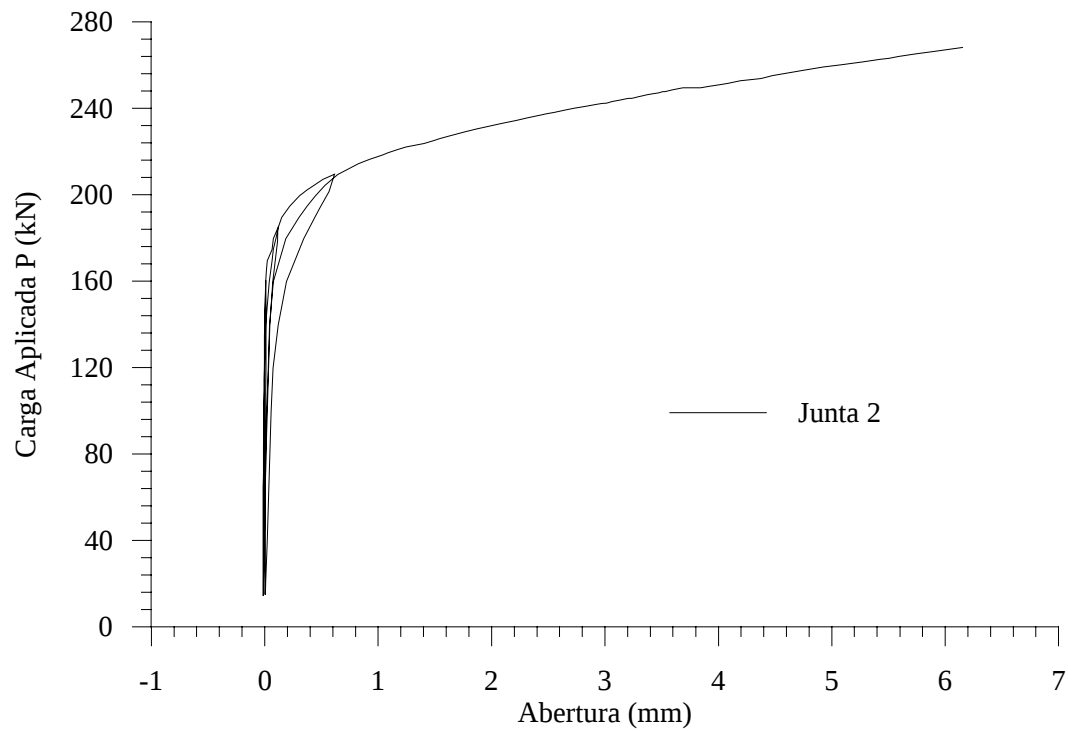


Figura 4.40 – Curva carga vs. abertura na junta 2 para a viga VGAH1 ($I/d_p = 12,5$).

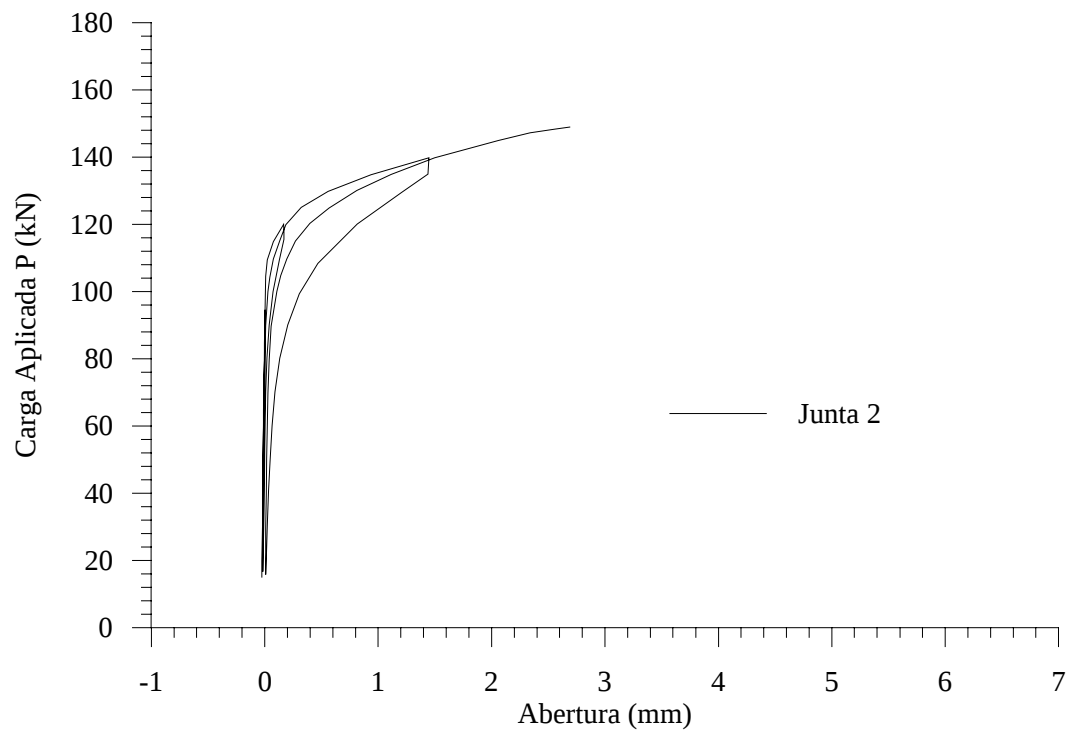


Figura 4.41 – Curva carga vs. abertura na junta 2 para a viga VGAH2 ($I/d_p = 18,75$).

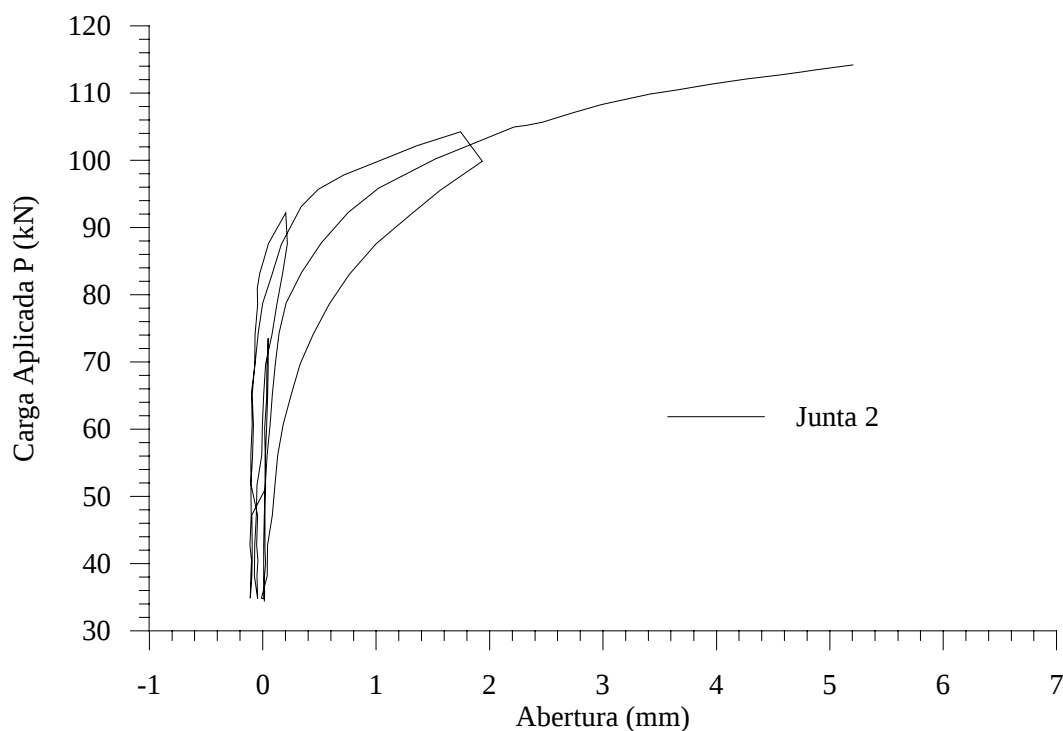


Figura 4.42– Curva carga vs. abertura na junta 2 para a viga VGAH3 ($l/d_p = 25$).

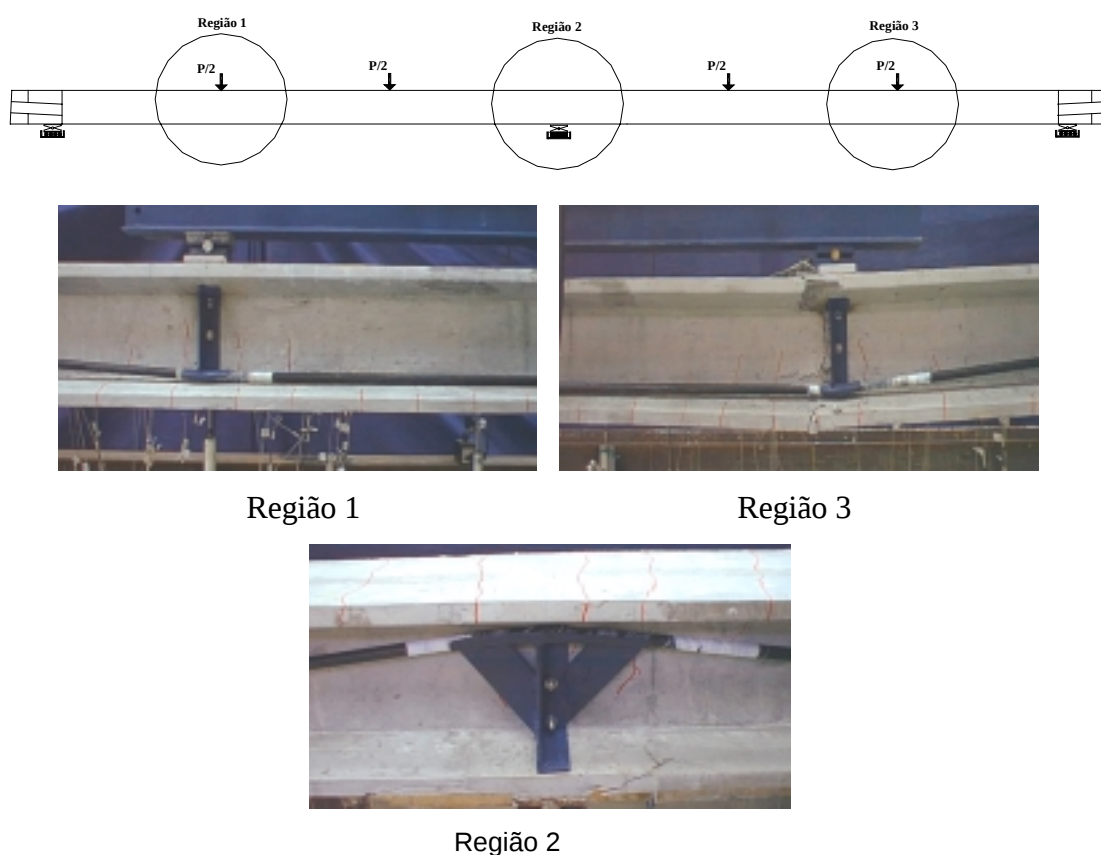
4.7.6. Resultados Gerais

Os resultados gerais dos ensaios estão mostrados na tabela 5.3. A viga monolítica rompeu por esmagamento do concreto na região 3 (figura 4.44). As vigas em aduelas VGAH1 e VGAH2 não foram levadas ao colapso total por razões de segurança, pois havia o temor de que as aduelas pudessem desalinhar-se de forma descontrolada. O tipo de ruptura característico em vigas construídas em aduelas é por esmagamento do concreto nas juntas entre aduelas.

Devido à presença da armadura passiva na viga monolítica, as fissuras que surgiram foram bem distribuídas ao longo das regiões 1, 2 e 3, como mostrada na figura 4.44. Nas vigas em aduelas as juntas abriram inicialmente nas regiões 1, 2 e 3 e após um determinado carregamento surgiram duas fissuras nestas regiões, que se iniciaram nas juntas em direção ao ponto de aplicação de carga (regiões 1 e 3) e ao apoio central (região 2), com inclinação de 45° aproximadamente.

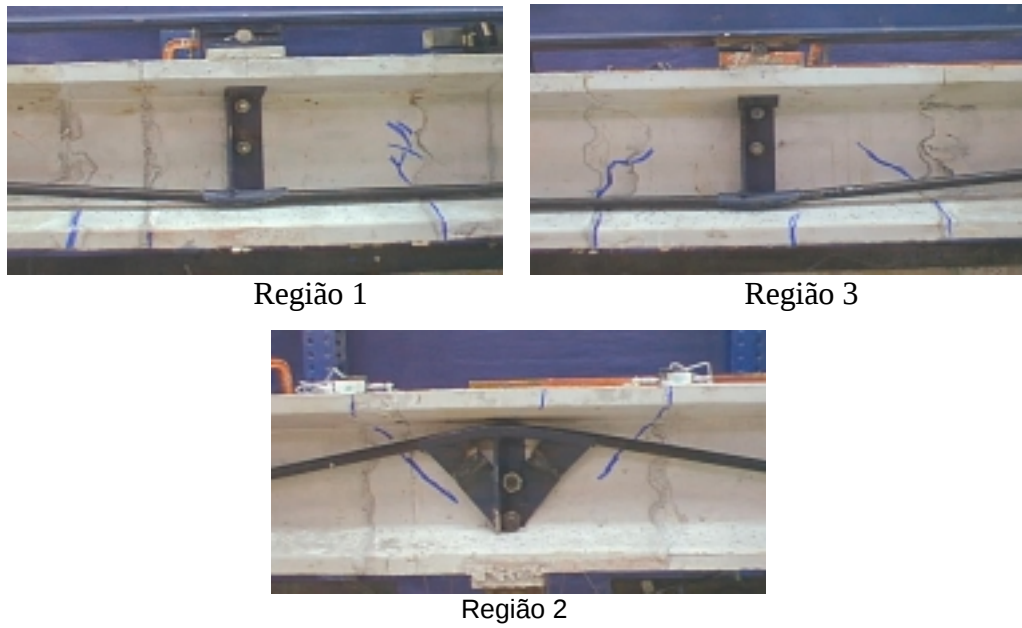
Tabela 4.3- Resultados gerais dos ensaios.

	VGMH1	VGAH1	VGAH2	VGAH3
Força de protensão inicial, F_o (kN) na ancoragem ativa	357,2	354,8	364,7	366,4
Força de protensão inicial, F_o (kN) na ancoragem morta	313,9	318,9	323,3	325,2
Força de protensão no início do ciclo 4, F_4 (kN) na ancoragem ativa	357,6	355,4	364,0	366,7
Força de protensão no início do ciclo 4, F_4 (kN) na ancoragem morta	315,1	321,7	326,0	327,23
Força de protensão na ruptura, F_r (kN) na ancoragem ativa	482,8	443,0	465,5	429,0
Força de protensão na ruptura, F_r (kN) na ancoragem morta	415,6	410,2	408,1	385,0
Carga de ruptura P (kN)	210,0	268,1	167,7	114,5
Flecha máxima na ruptura (mm)	49,1	13,4	34,6	42,5

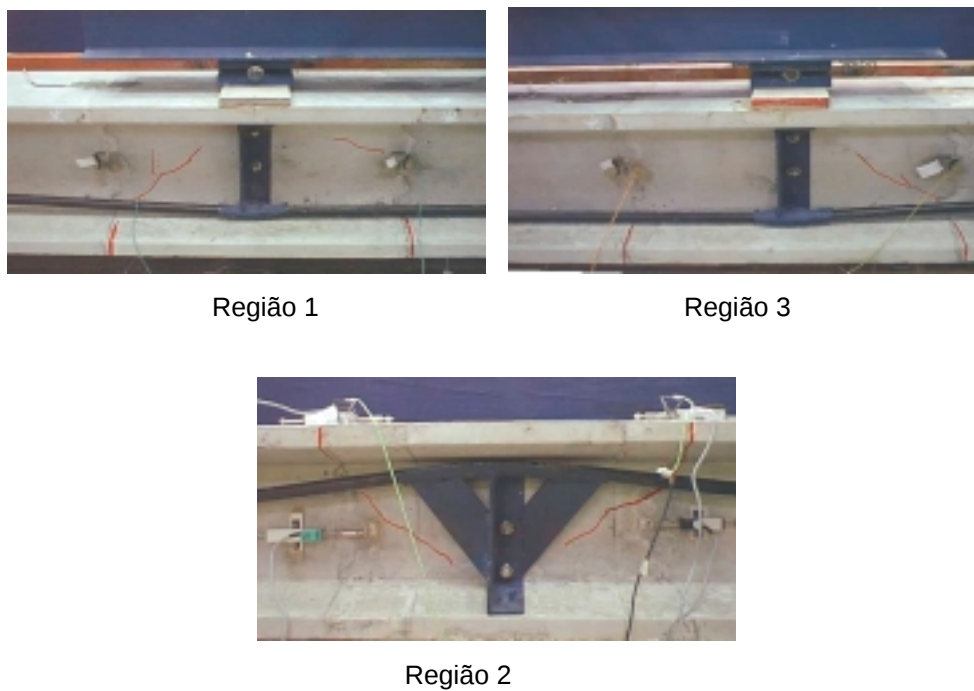


a) Viga monolítica

Figura 4.44 - Detalhe das fissuras nas regiões 1, 2 e 3 em todas as vigas.



b) Viga em aduelas com relação $l/d_p = 12,5$



c) Viga em aduelas com relação $l/d_p = 18,75$

Figura 4.44 (continuação) - Detalhe das fissuras nas regiões 1, 2 e 3 em todas as vigas.



Região 1



Região 3



Região 2

d) Viga em aduelas com relação $l/d_p = 25$

Figura 4.44 (continuação) - Detalhe das fissuras nas regiões 1, 2 e 3 em todas as vigas.