

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

VIGAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ABERTURA NA ALMA EM REGIÃO DE APOIO

André Roberto de Albergaria Arantes

Orientador : Prof. Dr. Gilson Battiston Fernandes

2003 28789

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Estruturas.

Campinas
2001

UNICAMP

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.	
20,05,03	
Prof. Dr.	
Matrícula:	03982-9

UNIDADE	Be
Nº CHAMADA	I/Vn:camp.
	Ar 14v
V	EX
TOMBO BC/	55496
PROC.	16-124103
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	02/09/03
Nº CPD	

CM00188453-9

Bib id 298607

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar14v

Arantes, André Roberto de Albergaria
Vigas de concreto de alta resistência com abertura na
alma em região de apoio / André Roberto de Albergaria
Arantes. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Gilson Battiston Fernandes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Concreto armado. 2. Concreto de alta resistência. 3.
Vigas de concreto. I. Fernandes, Gilson Battiston. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**TÍTULO:
VIGAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ABERTURA NA
ALMA EM REGIÃO DE APOIO**

**Tese de Mestrado defendida por André Roberto de Albergaria Arantes
e aprovada em 29 de agosto de 2001 pela banca examinadora
constituída pelos seguintes doutores:**



Prof. Dr. Gilson Battiston Fernandes

(Orientador)



Prof. Dr. José Samuel Giongo

(EESC - USP)



Prof. Dr. Luiz Roberto Sobreira de Agostini

(FEC - UNICAMP)

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**TÍTULO:
VIGAS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM ABERTURA NA
ALMA EM REGIÃO DE APOIO**

Este exemplar corresponde a versão final da Tese de Mestrado em Engenharia Civil.



Prof. Dr. Gilson Battiston Fernandes

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Admar Arantes e Carmen Lígia por todo apoio e pela minha formação pessoal, sem os quais não seria possível a realização deste sonho.

Ao Prof. Dr. Gilson Battiston Fernandes pela orientação, dedicação e pelo conhecimento transmitido, fundamentais para o alcance destes objetivos.

À João Carlos Rupp pelo convívio e o apoio a todos os momentos deste trabalho.

À minha sobrinha Lízia e meus irmãos Andréa e William e a minha avó Maria.

À minha querida Darci.

Aos amigos Carlinhos, Pecci, Rogério, Zé Roberto, Ricardo, Fabiano, Márcio, Sasqua, Daniel, Netão, Gustavo, Eduardo, Luíz, André e Massatoshi.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP

Aos colegas de pós-graduação.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

A pesquisa contou com apoio do acervo da Biblioteca da Área de Engenharia da UNICAMP, do setor de computação da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP e com as instalações, equipamentos e pessoal técnico do seu Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção

As empresas Holdercim Brasil S.A. (Cimento CIMINAS), à Camargo Corrêa Cimentos (Divisão SILMIX) e à REAX Indústria e Comercio Ltda. pelo fornecimento de materiais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIMBOLOS	XVI
RESUMO	XVIII
INTRODUÇÃO	I -1
 CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 1-1
1.1 LEONHARDT E MÖNNIG	1-1
1.2 SÜSSEKIND	1-4
1.3 NBR	1-7
1.4 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS	1-8
1.4.1 NASSER, ACAVALOS E DANIEL	1-8
1.4.2 MANSUR, TAN E LEE	1-15
1.4.3 FERNANDES	1-29
1.5 DIMENSIONAMENTO DA REGIÃO DA ABERTURA	1-34
1.5.1 ANÁLISE DO PROBLEMA	1-34
1.5.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA	1-36
 CAPÍTULO 2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	 2-1
2.1 DETALHES DAS VIGAS	2-2
2.2 INSTRUMENTAÇÃO, EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E SISTEMA DE APOIO	2-4
2.2.1 POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS	2-6
2.2.1.1 VR-3	2-6
2.2.1.2 VR-4	2-8
2.2.1.3 VR-5	2-9

2.3 CARREGAMENTO	2-10
2.4 DETALHES DAS ARMADURAS	2-10
2.4.1 VR-3	2-10
2.4.2 VR-4	2-12
2.4.3 VR-5	2-13
2.5 MATERIAIS UTILIZADOS	2-13
2.5.1 CURVAS GRANULOMÉTRICAS	2-14
2.5.2 DIAGRAMAS TENSÃO DEFORMAÇÃO	2-16
 CAPÍTULO 3 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	 3-1
3.1 RESULTADOS DA VIGA VR-3	3-1
3.2 RESULTADOS DA VIGA VR-4	3-24
3.3 RESULTADOS DA VIGA VR-5	3-39
3.3 IMAGENS DE ISOTENSÃO	3-56
 CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	 4-1
 CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	 5-1
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 B-1
 ABSTRACT	 A-1

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Viga com abertura na alma ^[3]	1-1
1.2	Viga com abertura em região com menor força cortante ^[3]	1-1
1.3	Armadura de alma com abertura retangular ^[3]	1-3
1.4	Armadura adicional em vigas com aberturas retangulares ^[3]	1-3
1.5	Dimensões limites na região de aberturas em vigas ^T ^[4]	1-4
1.6	Quadro plano multicelular fechado, considerado no cálculo, por Sussekund ^[8]	1-4
1.7	Diagrama de corpo livre para análise da região do furo ^[8]	1-5
1.8	Esforços nas seções região S1-S1 e S2-S2 ^[8]	1-6
1.9	Detalhamento da armadura de reforço no nó ^[8]	1-6
1.10	Limitações para localização e dimensões mínimas de aberturas na região da alma ^[2]	1-7
1.11	Esquema de esforços internos em uma viga com abertura ^[6]	1-9
1.12.1	Detalhes de armadura da viga A1 ^[6]	1-9
1.12.2	Detalhes de armadura da viga B1 ^[6]	1-10
1.12.3	Detalhes de armadura da viga B2 ^[6]	1-10
1.12.4	Detalhes de armadura da viga C1 ^[6]	1-10
1.12.5	Detalhes de armadura da viga C2 e C3 ^[6]	1-11
1.12.6	Detalhes de armadura da viga D1 ^[6]	1-11
1.12.7	Detalhes de armadura da viga D2 ^[6]	1-11
1.12.8	Detalhes de armadura da viga D3 ^[6]	1-12
1.12.9	Detalhes de armadura da viga D4 ^[6]	1-12
1.13	Mecanismo de funcionamento de uma viga com abertura ^[5]	1-16
1.14	Diagrama de corpo livre dos banzos superior e inferior ^[5]	1-17
1.15	Diagrama de interação do banzo superior, inferior e gráfico $NxM^{\#}/h$ ^[7]	1-18
1.16	Detalhes da armadura das vigas experimentadas por Mansur ^[5]	1-21
1.17a	Influência do comprimento da abertura na fissuração das vigas ^[5]	1-23
1.17b	Influência da altura da abertura na fissuração das vigas ^[5]	1-24

Figura		Página
		1-24
1.17c	Influência da excentricidade da abertura na fissuração das vigas ^[5]	
1.17d	Influência da posição da abertura na fissuração das vigas ^[5]	1-25
1.18a	Influência do comprimento da abertura na flecha das vigas ^[5]	1-25
1.18b	Influência da altura da abertura na flecha das vigas ^[5]	1-26
1.18c	Influência da excentricidade da abertura na flecha das vigas ^[5]	1-26
1.18d	Influência da posição da abertura na flecha das vigas ^[5]	1-27
1.19a	Influência do comprimento da abertura na distribuição da cortante entre os banzos superior e inferior da abertura ^[5]	1-28
1.19b	Influência da altura na distribuição da cortante entre os banzos superior e inferior da abertura ^[5]	1-28
1.19c	Influência da excentricidade da abertura na distribuição da cortante entre os banzos superior e inferior da abertura ^[5]	1-28
1.19d	Influência da localização da abertura na distribuição da cortante entre os banzos superior e inferior da abertura ^[5]	1-28
1.20	Dimensões das vigas ensaiadas ^[2]	1-29
1.21	Detalhe das armaduras e esquema de carregamento das vigas ^[2]	1-30
1.22	Componentes de V suspensas pelas armaduras na viga VR-1 ^[2]	1-31
1.23	Componentes de V suspensas pelas armaduras na viga VR-2 ^[2]	1-32
1.24a	Trajatória das tensões principais de compressão ^[2]	1-34
1.24b	Trajatória das tensões principais de tração ^[2]	1-34
1.25	Panorama de fissuração das vigas VR-1 e VR-2 ^[2]	1-35
1.26	Diagrama de corpo livre e limitações de abertura na alma ^[2]	1-36
1.27	Modelo de bielas e tirantes ^[2]	1-38
2.1	Dimensões da viga VR-3	2-2
2.2	Dimensões da viga VR-4	2-3
2.3	Dimensões da viga VR-5	2-3
2.4	Pórtico onde as vigas VR-3, VR-4 e VR-5 foram ensaiadas	2-4
2.5	Sistema de apoio utilizado nos ensaios	2-5
2.6	Defletômetro instalado no meio do vão das vigas para leitura das flechas	2-6

Figura		Página
2.7	Posicionamentos dos extensômetros instalados na viga VR-3	2-7
2.8	Bases de medidas das deformações do concreto na viga VR-3	2-7
2.9	Posicionamentos dos extensômetros instalados na viga VR-4	2-8
2.10	Posicionamentos dos extensômetros instalados na viga VR-5	2-9
2.11	Detalhes da viga VR-2 ensaiada por Simões ⁷	2-11
2.12	Detalhes da armadura da viga VR-3	2-12
2.13	Detalhes da armadura da viga VR-4	2-12
2.14	Detalhes da armadura da viga VR-5	2-13
2.15	Curva granulométrica da areia	2-14
2.16	Curva granulométrica do pedrisco	2-15
2.17	Curva granulométrica da pedra 1	2-15
2.18	Diagrama tensão-deformação ϕ 20,0 mm VR-3 / VR-4 / VR-5	2-16
2.19	Diagrama tensão-deformação ϕ 8,0 mm VR-3 / VR-4 / VR-5	2-17
2.20	Diagrama tensão-deformação ϕ 5,0 mm VR-3	2-17
2.21	Diagrama tensão-deformação ϕ 5,0 mm VR-4 / VR-5	2-18
2.22	Diagrama tensão-deformação ϕ 4,2 mm VR-3	2-18
2.23	Diagrama tensão-deformação ϕ 4,2 mm VR-4 / VR-5	2-19
3.1	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 1 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-3
3.2	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 2 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-4
3.3	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 4 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-5
3.4	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 5 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-6
3.5	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 6 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-7
3.6	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 7 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-8
3.7	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 8 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-9
3.8	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 9 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-10
3.9	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 11 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-11
3.10	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 12 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-12

Figura		Página
3.11	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 13 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-13
3.12	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 14 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-14
3.13	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 15 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-15
3.14	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 16 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-16
3.15	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 17 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-17
3.16	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 18 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-18
3.17	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 18 (MPa) x V (kN) – viga VR-3	3-19
3.18	Deformação do concreto no banzo superior da abertura – viga VR-3	3-20
3.19	Deformação do concreto no banzo inferior da abertura – viga VR-3	3-21
3.20	Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm) – viga VR-3	3-22
3.21a	Fissuras na região da abertura – viga VR-3	3-23
3.21b	Vista geral da viga VR-3 fissurada	3-23
3.21c	Local da ruptura da viga VR-3	3-23
3.22	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 1 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-25
3.23	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 2 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	2-26
3.24	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 3 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-27
3.25	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 4 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-28
3.26	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 5 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-29
3.27	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 6 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-30
3.28	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 7 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-31
3.29	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 8 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-32
3.30	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 9 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-33
3.31	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 10 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-34
3.32	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 11 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-35

Figura		Página
3.33	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 13 (MPa) x V (kN) – viga VR-4	3-36
3.34	Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm) – viga VR-4	3-37
3.35a	Início das fissuras na região da abertura na viga VR-4	3-38
3.35b	Fissuração da viga VR-4 na região da abertura	3-38
3.35c	Ruptura da viga VR-4 sobre a abertura	3-38
3.36	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 1 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-40
3.37	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 2 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-41
3.38	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 3 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-42
3.39	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 4 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-43
3.40	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 5 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-44
3.41	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 6 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-45
3.42	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 7 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-46
3.43	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 8 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-47
3.44	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 9 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-48
3.45	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 10 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-49
3.46	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 11 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-50
3.47	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 12 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-51
3.48	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 13 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-52
3.49	Gráfico tensão na barra do extensômetro da posição 14 (MPa) x V (kN) – viga VR-5	3-53
3.50	Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm) – viga VR-5	3-54
3.51a	Fissuras na região da abertura na viga VR-5	3-55
3.51b	Vista geral da viga VR-5 fissurada	3-55
3.51c	Local da ruptura da viga VR-5	3-55
3.52	Imagens das isotensões de compressão da viga VR-3	3-56
3.53	Imagens das isotensões de tração da viga VR-3	3-56
3.54	Imagens das isotensões de compressão da viga VR-4	3-56
3.55	Imagens das isotensões de tração da viga VR-4	3-57
3.56	Imagens das isotensões de compressão da viga VR-5	3-57

Figura		Página
3.57	Imagens das isotensões de tração da viga VR-5	3-57
4.1	Gráfico de forças suspensas do lado do apoio em VR-3 pelos estribos 4+5+6 (kN) x V (kN)	4-4
4.2	Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-3 pelos estribos 7+8+9 (kN) x V (kN)	4-5
4.3	Gráfico de forças suspensas do lado do apoio em VR-4 pelos estribos 1+2+3 (kN) x V (kN)	4-6
4.4	Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-4 pelos estribos 4+5+6 (kN) x V (kN)	4-7
4.5	Gráfico de forças suspensas do lado do apoio em VR-5 pelos estribos 1+2+3+13 (kN) x V (kN)	4-8
4.6	Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-5 pelos estribos 4+5+6+14 (kN) x V (kN)	4-9
4.7	Gráfico de $V_{90} / V \times V$ – viga VR-3	4-10
4.8	Gráfico de $V_{90} / V \times V / V_U$ – viga VR-3	4-10
4.9	Gráfico de $V_{90} / V \times V$ – viga VR-4	4-11
4.10	Gráfico de $V_{90} / V \times V / V_U$ – viga VR-4	4-11
4.11	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V$ – viga VR-5	4-12
4.12	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V / V_U$ – viga VR-5	4-12
4.13	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) \times V$ – lado esquerdo, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5	4-13
4.14	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) \times V$ – lado direito, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5	4-13
4.15	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V$ - lado esquerdo, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5	4-14
4.16	Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V$ - lado direito, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5	4-14
4.17	Gráfico das tensões na armadura longitudinal superior do banzo sobre a abertura das vigas ensaiadas	4-15
4.18	Gráfico das tensões na armadura longitudinal inferior do banzo sobre a abertura das vigas ensaiadas	4-15
4.19	Gráfico comparativa da flecha das vigas ensaiadas	4-16

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1.1	Modos de ruína e posições das cargas das vigas ^[6]	1-13
1.2	Detalhe das vigas Mansur ^[5]	1-20
1.3	Detalhe das armaduras de reforço nas extremidades da abertura ^[5]	1-22
1.4	Resultados dos ensaios de Mansur ^[5]	1-27
1.5	Resistência do concreto e propriedades da armadura ^[2]	1-30
1.6	Componentes de V suspensas pelos estribos verticais e barras inclinadas – VR-2 ^[2]	1-32
4.1	Componentes de V suspensas pelas armaduras $A_{s,90}$ e $A_{s,45}$, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5	4-1
4.2	Força cortante suspensa pelos estribos da viga VR-3	4-10
4.3	Força cortante suspensa pelos estribos da viga VR-4	4-11
4.4	Força cortante suspensa pelos estribos e barras inclinadas da viga VR-5	4-12

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{sl}		= área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada
A_{sw}		= área da seção transversal dos estribos
$A_{s,inc}$	$A_{s,45}$	= área da seção transversal das barras inclinadas
$A_{s,susp}$	$A_{s,90}$	= área da seção transversal dos estribos de suspensão
E_s		= módulo de deformação longitudinal do aço
F		= força concentrada
F_u		= valor ultimo de F
M		= momento fletor
M_d		= momento fletor de cálculo
M_b	M_1d	M^{sup} = momento fletor do banzo superior da abertura
M_{bd}		= momento fletor de cálculo do banzo superior da abertura
M_t	M_2d	M^{inf} = momento no banzo inferior da abertura
M_{td}		= momento fletor de cálculo no banzo inferior da abertura
M_u		= valor último de M
N_t	N^{sup}	= esforço normal resultante no banzo superior
N_{td}		= esforço normal de cálculo resultante no banzo superior
N_b	N^{inf}	= esforço normal resultante no banzo inferior
R_c	C	D_d = resultante das tensões de compressão no concreto
R_{cd}		= resultante de cálculo das tensões de compressão no concreto
R_s	T	Z_d = resultante das tensões de tração na armadura longitudinal
R_{sd}		= resultante de cálculo das tensões de tração na armadura longitudinal
V		= força cortante
V_d	Q_d	= força cortante de cálculo
V_c		= parcela de força cortante resistida pelo concreto
V_{rv}	V_{90}	= parcela de força cortante resistida por estribos verticais
V_{ri}	V_{45}	= parcela de força cortante resistida por barras inclinadas
V_r		= parcela total da força cortante resistida = $V_{rv} + V_{ri}$

V_s		= parcela da força cortante resistida pela armadura transversal
V_t	Q_{1d}	V^{sup} = parcela da força cortante atuante no banzo superior
V_{td}		= parcela da força cortante de cálculo atuante no banzo superior
V_b	Q_{2d}	V^{inf} = parcela da força cortante atuante no banzo inferior
V_{tb}		= parcela da força cortante de cálculo atuante no banzo inferior
V_u		= valor último de V
$V_{u,f}$		= valor último de V , correspondente à ruína por flexão
X_a		= distância entre o apoio mais próximo e o centro da abertura
a		= distância entre o apoio e a carga concentrada aplicada (vão de cisalhamento)
a'		= distância entre o apoio e a extremidade mais próxima da abertura
b_r		= largura da mesa das vigas com seção T ou I
b_w		= largura da alma das vigas com seção T ou I
c		= distância da face da abertura até o apoio
c'		= distância horizontal entre o centro da abertura e o ponto de intersecção das barras longitudinais com reta de 45° que passa pelo centro da abertura
d		= altura útil da seção transversal
e_a		= excentricidade da abertura em relação ao eixo longitudinal da viga
f_c		= resistência do concreto a compressão, referida a corpos-de-prova cilíndricos
f_{cd}		= resistência de cálculo do concreto a compressão
f_{ck}		= resistência característica do concreto a compressão
f_y		= limite de escoamento do aço a tração
f_{yd}		= resistência de cálculo aço a tração
f_{yl}		= limite de escoamento à tração do aço da armadura longitudinal
f_{yw}		= limite de escoamento à tração do aço da armadura transversal
f_{ywd}		= resistência de cálculo à tração do aço da armadura transversal
h		= altura total da seção transversal
h_a		= altura da abertura na alma

h_t	= altura do banzo superior à abertura na alma
h_b	= altura do banzo inferior à abertura na alma
k	= fator de concentração de esforço cortante no contorno da abertura = V_r / V
β	= ângulo de inclinação das barras com o eixo da viga
l_a	= comprimento da abertura na alma
s	= espaçamento dos estribos
z	= distância entre R_c e R_s
α	= parcela de esforço cortante absorvido pelo banzo superior da abertura
ϕ	= diâmetro das barras das armaduras
ε_c	= deformação específica do concreto à compressão na borda comprimida das vigas
ε_y	= deformação específica do aço à tração correspondente ao limite escoamento f_y
η	= grau de armação ao cisalhamento = $\rho_w / \rho_{w,M}$
θ	= ângulo entre as diagonais comprimidas da alma e as barras longitudinais nas vigas
ρ_l	= taxa geométrica de armadura longitudinal = $A_{sl} / b_w h$
ρ_w	= taxa geométrica de armadura transversal
σ_c	= tensão normal de compressão no concreto
$\sigma_{c\theta}$	= tensão normal de compressão nas diagonais de concreto que formam ângulo de θ com as barras longitudinais
σ_s	= tensão normal de tração no aço
σ_{sl}	= tensão normal de tração na armadura longitudinal
σ_{sw}	= tensão normal de tração na armadura transversal
$\sigma_{s,90}$	= tensão normal de tração resistida pelos estribos de suspensão
$\sigma_{s,45}$	= tensão normal de tração resistida pelas barras inclinadas
τ_u	= tensão tangencial ultima

τ_c	= parcela da tensão tangencial absorvida pelo banzo comprimido de concreto
τ_s	= parcela da tensão tangencial absorvida pela armadura transversal
τ_u	= tensão tangencial ultima
τ_w	= tensão convencional de cisalhamento
τ_{wd}	= valor de cálculo de τ_w
τ_{wu}	= valor último de τ_w
esp	= experimental
teor	= teórico

RESUMO

Este trabalho trata da resistência a flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto com abertura na alma na região de apoio. Discute os efeitos causados pela presença da abertura e a solução do problema. Apresenta resultados de investigação experimental realizada com vigas de concreto de alta resistência e sua interpretação pela aplicação do método do equilíbrio e dos modelos bielas e tirantes. No final mostra que com armaduras adequadas no banzo comprimido e armaduras constituídas por estribos de suspensão e barras inclinadas nos lados da abertura, é possível mobilizar a resistência das vigas a flexão sem que ocorra antes a ruptura por cisalhamento.

Palavras Chave : concreto armado, concreto de alta resistência, vigas de concreto com abertura na alma.

INTRODUÇÃO

Aberturas na alma das vigas são usadas para passagem de canalizações hidráulicas, cabos elétricos e dutos para sistemas de refrigeração e calefação que são posicionadas em várias direções nos pavimentos de alguns edifícios. Executar essas aberturas sem planejamento pode enfraquecer a alma dessas vigas e criar uma situação de desconhecimento do seu grau de segurança.

Quando as vigas possuem abertura na alma em situação de ausência de força cortante, a sua capacidade resistente à flexão não sofre prejuízo desde que a abertura não intercepte o banzo comprimido. A presença de aberturas na região de cisalhamento causa interrupção da continuidade da alma, que perturba localmente o fluxo dos esforços de compressão e tração, e modifica o mecanismo resistente ao cisalhamento, quando comparado com o das vigas de alma cheia.

Este trabalho trata do estudo experimental do cisalhamento em vigas de concreto de alta resistência com abertura na alma na região de apoio. Pretende-se analisar a influência da abertura e o comportamento das armaduras de suspensão na resistência ao cisalhamento. O trabalho dá continuidade a outro já realizado, que abordou a presença de abertura longe do apoio.

O capítulo 1 apresenta a revisão bibliográfica e resultados experimentais de outros pesquisadores sobre vigas de concreto armado com abertura na alma. Aborda também métodos de cálculo da região com abertura, descrevendo o dimensionamento e detalhamento da armadura naquela região

O capítulo 2 descreve o programa experimental, abordando materiais utilizados, sistema de carregamento das vigas, concepção geométrica dos modelos e instrumentação do ensaio.

O capítulo 3 contém os resultados experimentais, com os gráficos de tensões das armaduras, deformações do concreto, deslocamentos verticais e fotos da fissuração das vigas.

O capítulo 4 descreve a análise dos resultados apresentados no capítulo 3.

O capítulo 5 apresenta as conclusões sobre os resultados experimentais obtidos.

Capítulo 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 LEONHARDT, F., MÖNNIG, E. ³: *Construções de Concreto*, Rio de Janeiro, Interciência, 1978, V. 3. Cap. 9, p. 164-166.

Segundo Leonhardt e Mönnig³, aberturas em almas de vigas só podem ser realizadas se permanecerem as bielas de compressão importantes ou pórticos fechados suficientemente rígidos como mostra a figura 1.1.

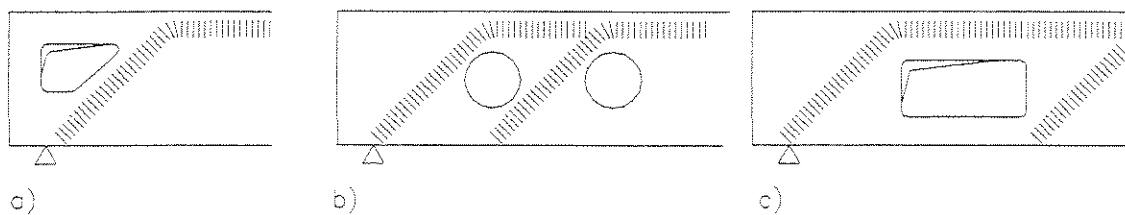


Figura 1.1 – Viga com abertura na alma

Nos trechos de menor força cortante, pode-se realizar maiores aberturas, conforme a figura 1.2. As aberturas circulares são mais favoráveis, devendo-se evitar ângulos reentrantes.

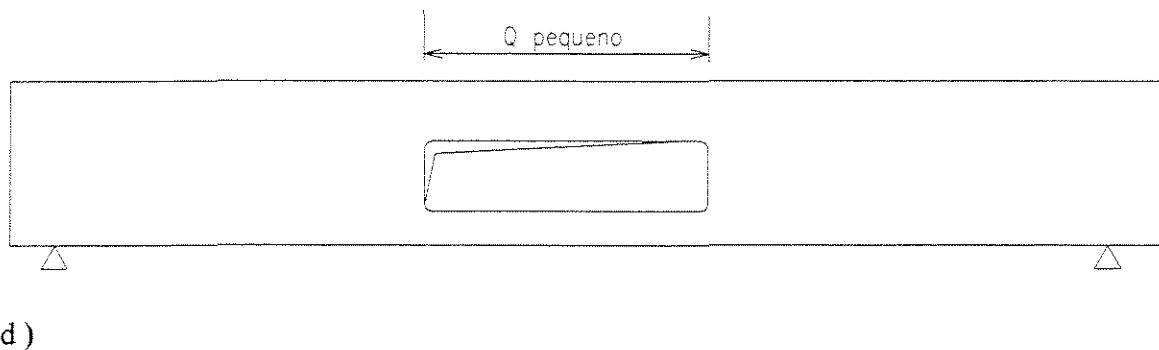


Figura 1.2 – Viga com abertura em região com menor força cortante

Nas regiões de grandes aberturas a viga se comporta como um pórtico, semelhante a uma viga Vierendeel.

Leonhardt e Mönig³ citam os ensaios realizados por Nasser⁶ em vigas de seções retangulares. Esses ensaios mostraram que se for utilizada armadura adequada a carga de ruptura por flexão poderá ser atingida e indicam os seguintes critérios para dimensionamento, conforme figura 1.3:

1- Dimensionamento à flexão, na seção m-m. considerando a seção cheia;

2- Forças normais nos banzos acima e abaixo da abertura:

$$(-)D = Z = \frac{M_m}{z}, \text{ em que } Z \text{ é a distância entre os eixos dos banzos};$$

3- Forças cortantes nos banzos:

$$Q^{(\text{sup})} = (0,8 \text{ a } 0,9) Q_m \quad Q^{(\text{inf})} = (0,1 \text{ a } 0,2) Q_m$$

Prever estribos de acordo com a distribuição de Q_m

4- Os banzos devem ser dimensionados à flexão composta para:

$$M_{\text{banzo max}}^{(\text{sup})} = \pm Q^{(\text{sup})} \cdot \frac{l}{2};$$

$$M_{\text{banzo max}}^{(\text{inf})} = \pm Q^{(\text{inf})} \cdot \frac{l}{2};$$

$$N^{(\text{inf})} = Z$$

5- Prever armadura de suspensão junto à abertura: no lado mais afastado do apoio dimensionar para cerca de $0,8 Q_m$ e do lado mais próximo ao apoio colocar de 1 a 3 estribos como na figura 1.3

6- Em vigas grandes dispor barras inclinadas nos vértices dos cantos reentrantes, como as indicadas em traço interrompido na figura 1.3.

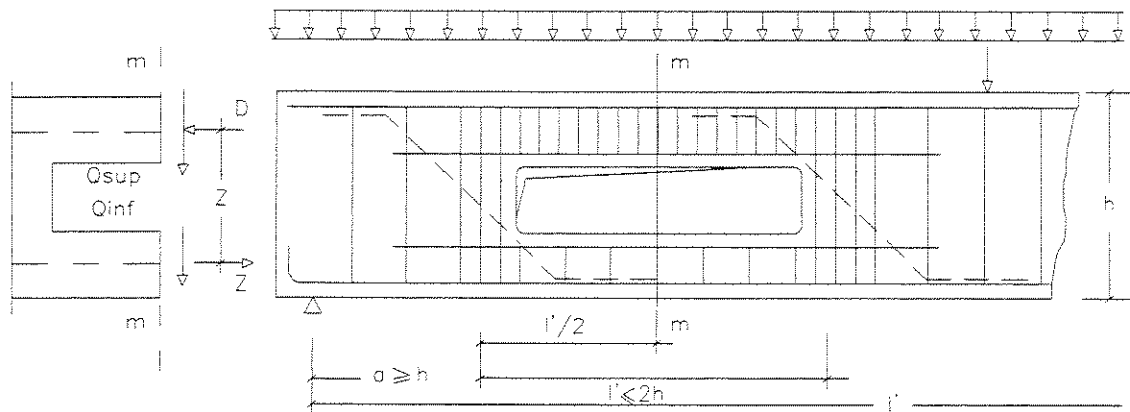


Figura 1.3 – Armadura de alma com abertura retangular

Para vigas com várias aberturas circulares próximas umas as outras, Leonhardt e Mönning³ recomendam o uso de armaduras que se assemelham a uma treliça e barras em forma de V como armadura adicional ao cisalhamento, como mostra a figura 1.4.

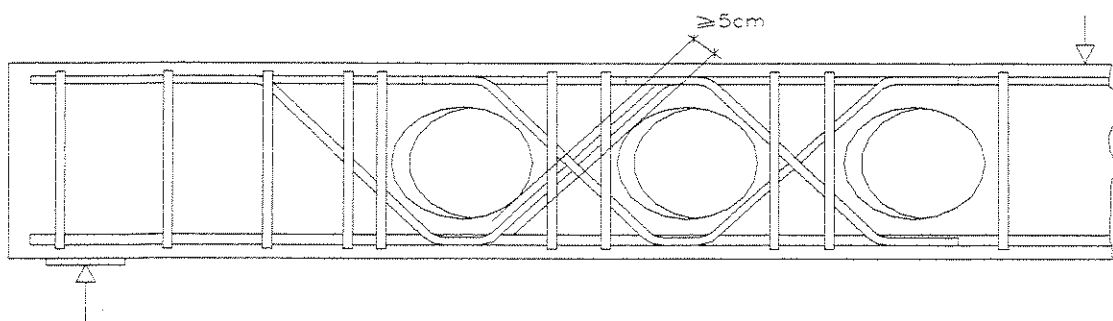


Figura 1.4 – Armadura adicional em vigas com aberturas circulares

1.2 SÜSSEKIND⁸, J. C. – *Curso de Concreto*. São Paulo, Globo, 1991, Vol. 2, Cap. 2, p. 160-166.

A figura 1.5 mostra as recomendações de Sússekink⁸ para as vigas com abertura na alma para que no cálculo a viga possa ser considerada maciça. Se esses limites forem ultrapassados, no cálculo deverá ser considerado um quadro plano, multicelular, fechado conforme figura 1.6.

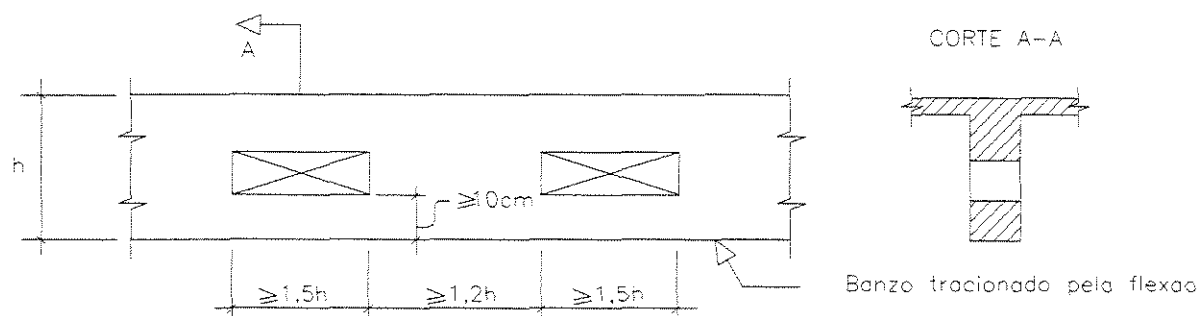


Figura 1.5 – Dimensões limites na região de aberturas em vigas com seção T

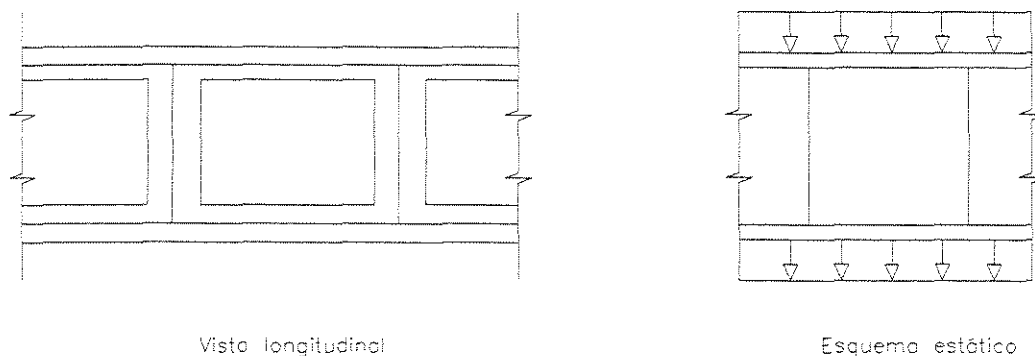


Figura 1.6 – Quadro plano multicelular fechado

Sússekink⁸ recomenda interceptar a viga num plano que atravessa o eixo da abertura, como na figura 1.7, obtendo o equilíbrio aplicando nesta seção as resultantes dos esforços atuantes:

1. O momento fletor será transmitido pelas resultantes D_d e Z_d no concreto e no aço, respectivamente.
2. O esforço cortante total Q_d se dividirá em Q_{1d} e Q_{2d} proporcionais à rigidez à flexão de cada banzo. No banzo superior tem-se a rigidez de uma peça comprimida de concreto e no inferior tracionado (fissurado) somente da armadura existente. Como a rigidez no banzo superior é muito maior considera-se $Q_{1d} = Q_d$ e $Q_{2d} = 0,1Q_d$ para limitar a fissuração no banzo inferior.

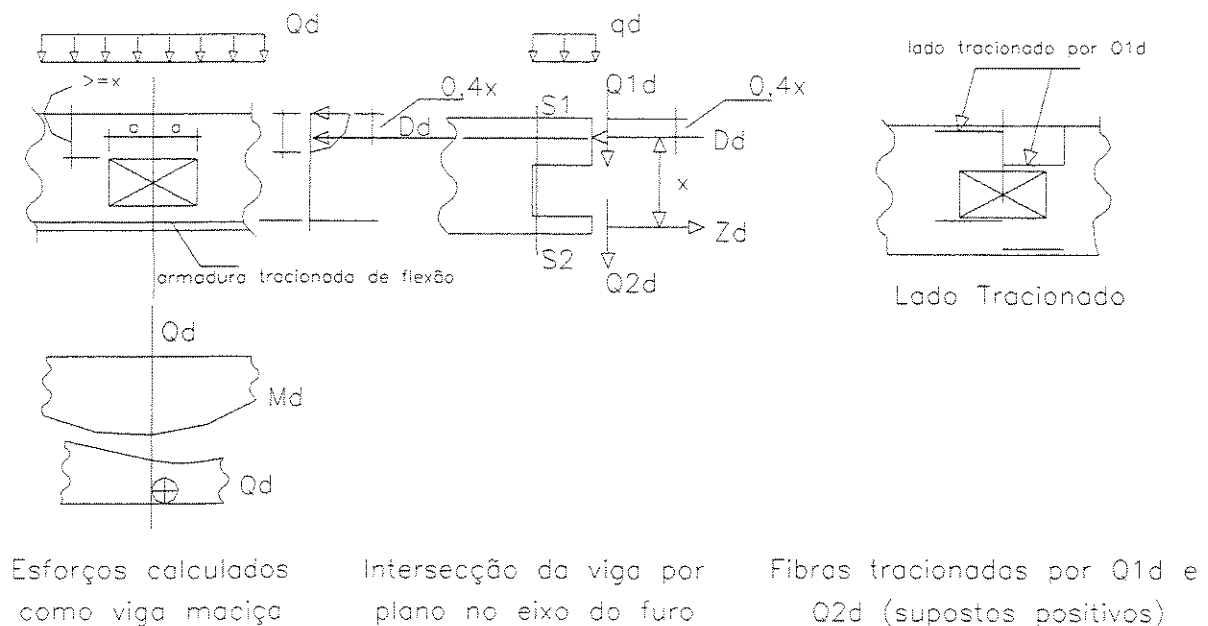


Figura 1.7 – Análise da região do furo

Para o dimensionamento considera-se na seção S1–S1, figura 1.8, atuando um esforço $N_d = D_d$ (a $0,4x$ da borda mais comprimida) e um momento fletor $M_{1d} = Q_d \cdot a$, e na seção S2–S2, $M_{2d} = 0,1Q_d \cdot a$ e $N_d = Z_d$, aplicada no nível da armadura de flexão tracionada, onde a é a altura da região comprimida.

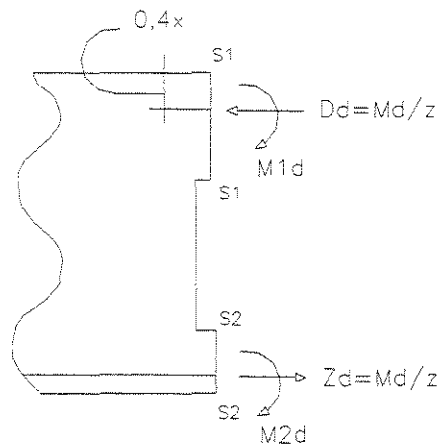


Figura 1.8 – Esforços nas seções S1 – S1 e S2 – S2.

No detalhamento da armadura na região do furo considera-se uma armadura simétrica para evitar enganos figura 1.9.

Süssekind⁸ sugere que o furo deve ser próximo a regiões de cortante nula, para que não seja atingida a espessura do concreto comprimido pela flexão, e assegurar um “tirante” mínimo de 10 cm para conter a armadura de flexão. É usual buscar valores bem baixos para h_2 , para que a cortante seja transmitida pelo banzo superior. Se for necessário que a abertura intercepte a região comprimida por M_d , deve-se adotar armadura de compressão na região do furo para que a linha neutra suba, e não seja interceptada pela abertura.

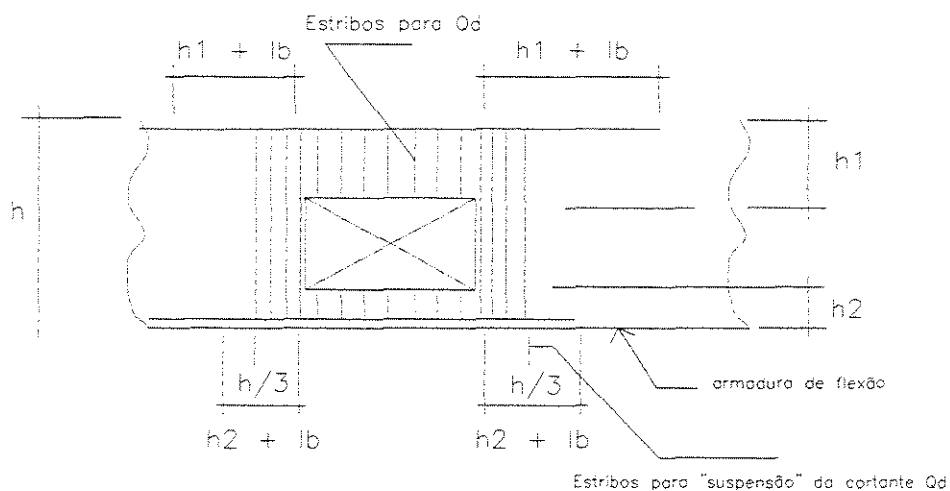


Figura 1.9 – Detalhamento da armadura de reforço do nó

1.3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS¹, NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978, 76p.

Quando forem previstas aberturas na alma das vigas de concreto ficam dispensadas verificações especiais se não forem ultrapassados os limites indicados na figura 1.10. Para comparação foram colocados os limites considerados por Leonhardt e Mönig³ e Süsskind⁸

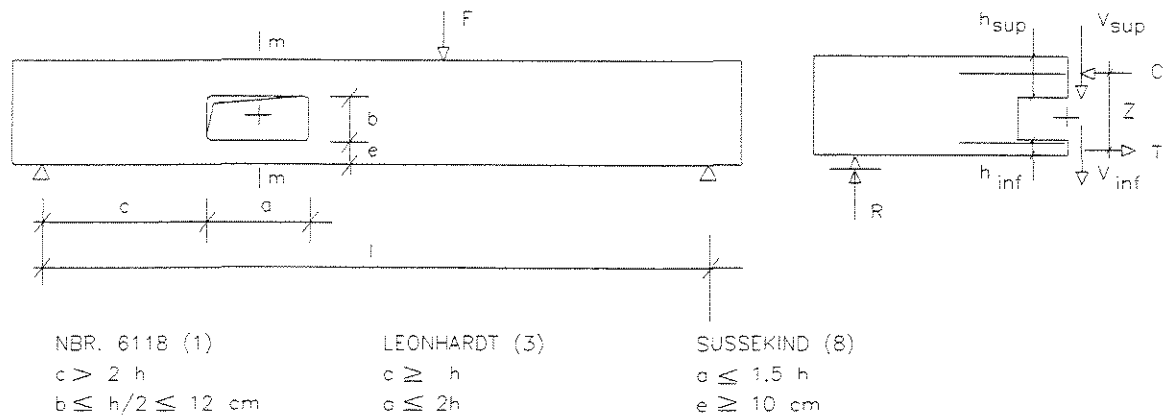


Figura 1.10 Limitações para localização e dimensões de aberturas na alma ^[2].

1.4 INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS

1.4.1 NASSER, K. W., ACAVALOS, A., DANIEL, H. R.⁶ : Behavior and design of large openings in reinforced concrete beams. ACI Journal, V. 64, N. 1, January, 1967

Estes pesquisadores efetuaram estudo de vigas de concreto armado com “grandes aberturas” na alma, com dois objetivos:

- 1º) determinar um arranjo de armaduras adequado para as regiões que contornam a abertura;
- 2º) verificar a possibilidade de alcançar uma carga última para vigas furadas igual à de vigas maciças.

Para tal pesquisa, foram assumidas algumas hipóteses básicas sobre o comportamento de vigas com grandes aberturas, com o intuito de simplificar a análise do problema:

- 1) A seção transversal dos banzos superior e inferior da abertura se comportam de modo idêntico aos banzos de uma viga Vierendeel.
- 2) Os banzos, quando não estão sujeitos a cargas transversais, apresentam pontos de inflexão aproximadamente no ponto médio de seu comprimento.
- 3) Quando possuírem estribos adequados, os banzos, absorvem os esforços cortantes em proporção à área de sua seção transversal.
- 4) Nos cantos diagonalmente opostos das aberturas há uma concentração de tensões induzida pelo cisalhamento dos banzos e seu efeito é equivalente ao produzido pelo dobro da força de cisalhamento correspondente à mesma viga com alma sem abertura.

Baseando-se nas hipóteses anteriores, os esforços internos que atuam na seção média da abertura de uma viga típica desses ensaios são iguais aos da figura 1.1.

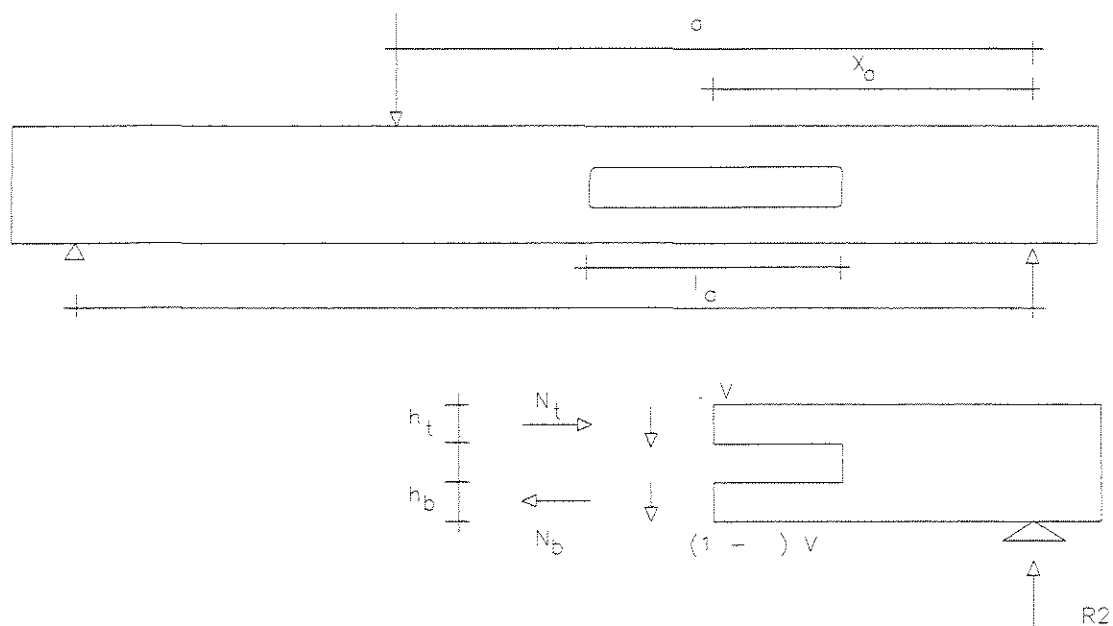


Figura 1.11 – Esquema de esforços internos

Para experimentação foram preparadas e ensaiadas conforme as hipóteses feitas anteriormente 10 vigas biapoiadas com 365cm de vão e seção transversal com 22,9 cm de largura e 45,7 cm de altura. A posição e as dimensões das aberturas, o esquema das armaduras e a posição e o tipo de carregamento são apresentados na figura 1.12.

Para se efetuar a medida das deformações foram usados extensômetros elétricos nas armaduras e extensômetros mecânicos e elétricos (em forma de roseta) na superfície do concreto.

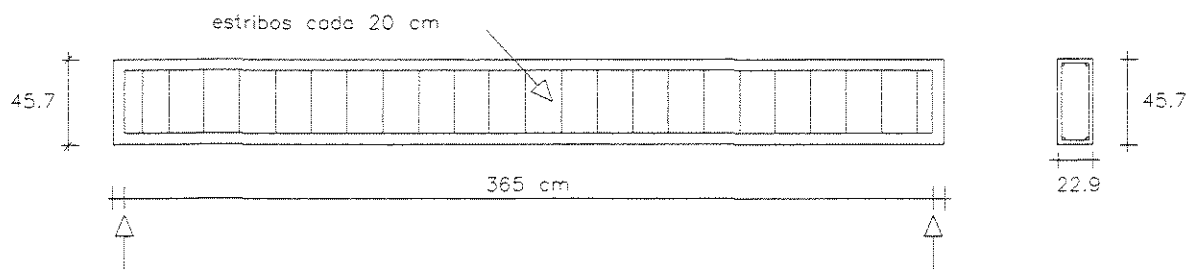


Figura 1.12.1 – Viga A1

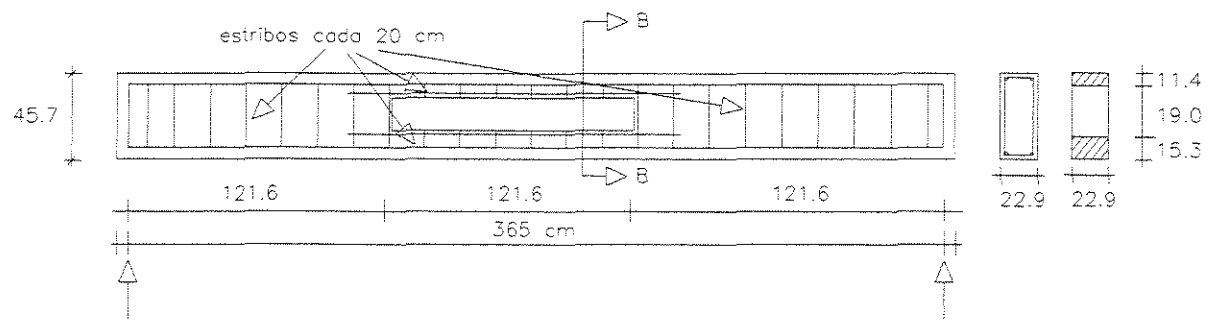


Figura 1.12.2 – Viga B1

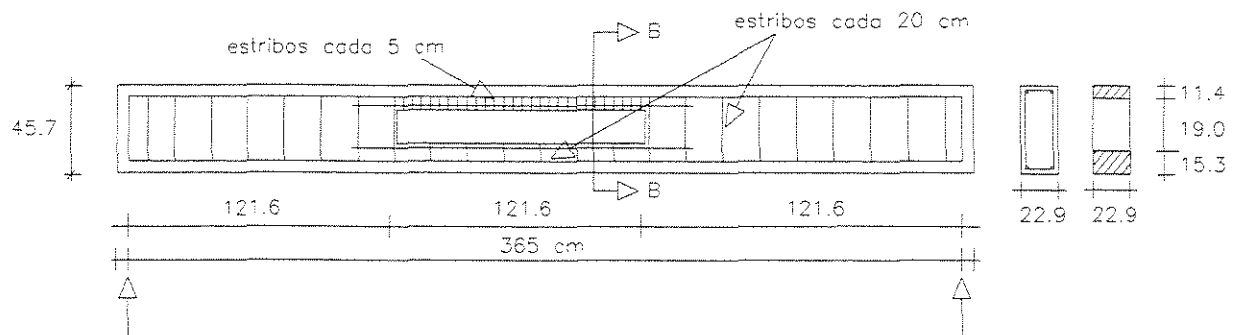


Figura 1.12.3 – Viga B2

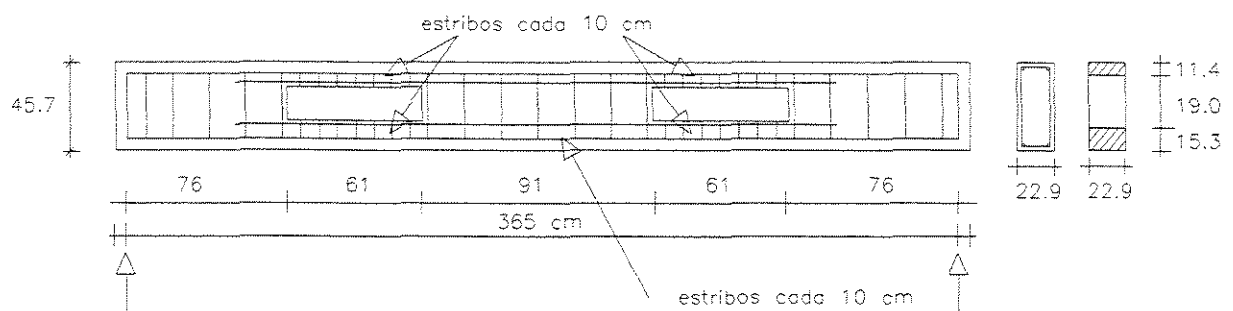


Figura 1.12.4 – Viga C1

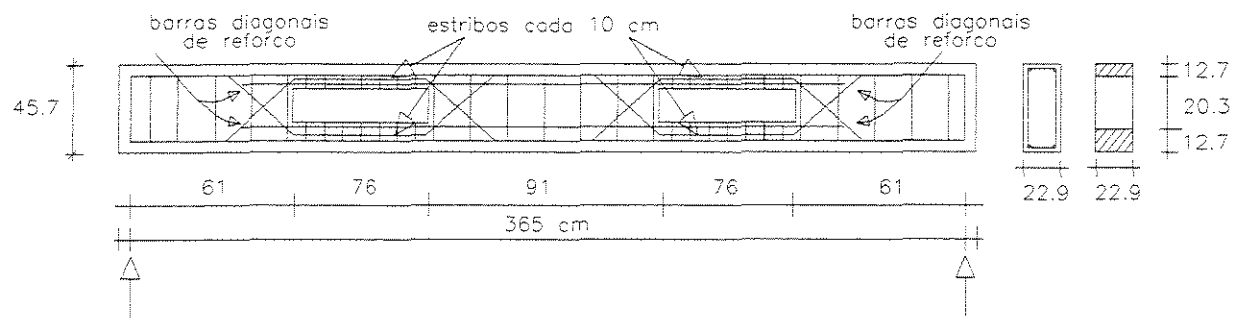


Figura 1.12.5 – Viga C2 e C3

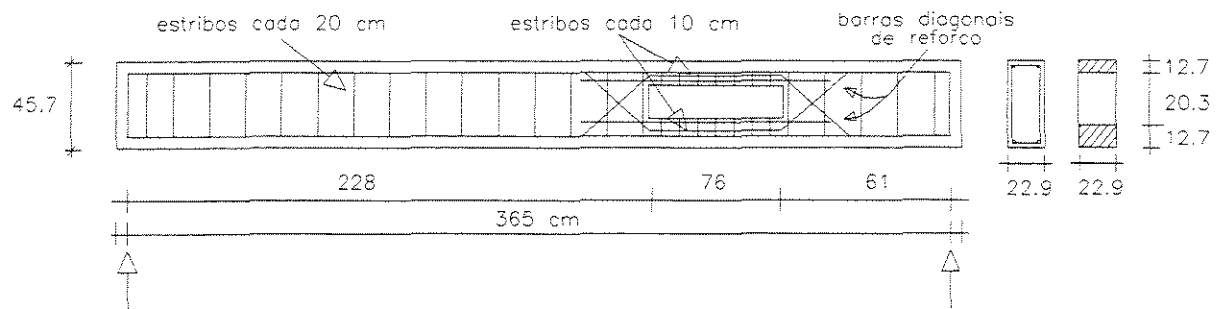


Figura 1.12.6 – Viga D1

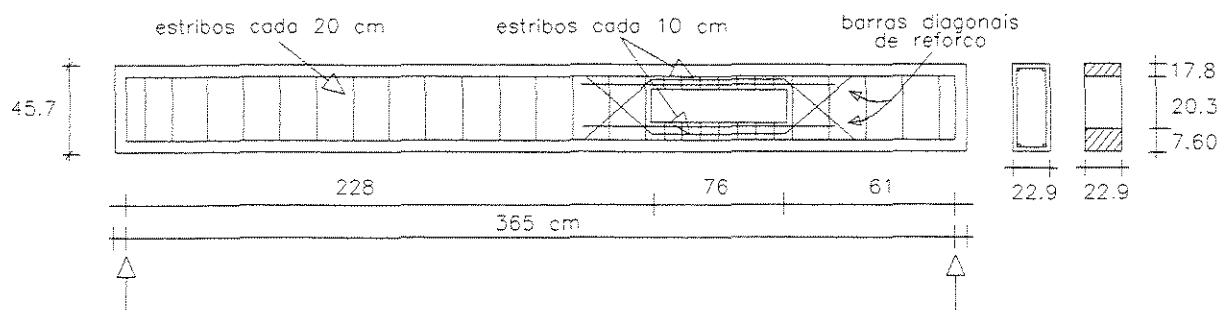


Figura 1.12.7 – Viga D2

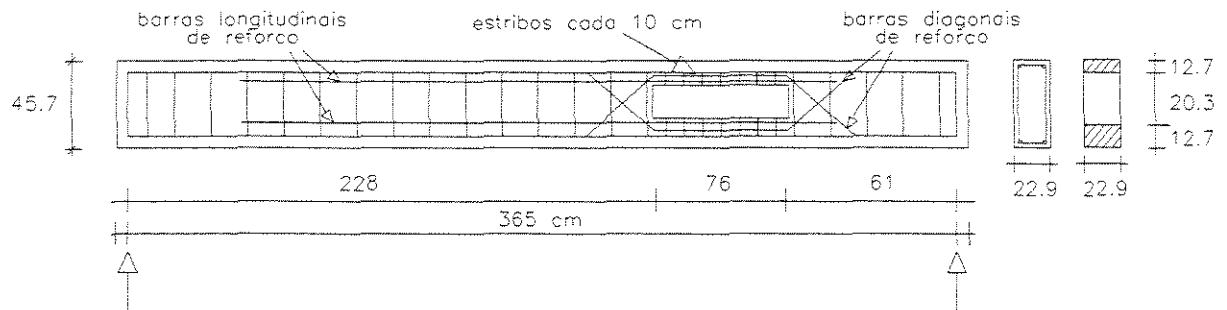


Figura 1.12.8 – Viga D3

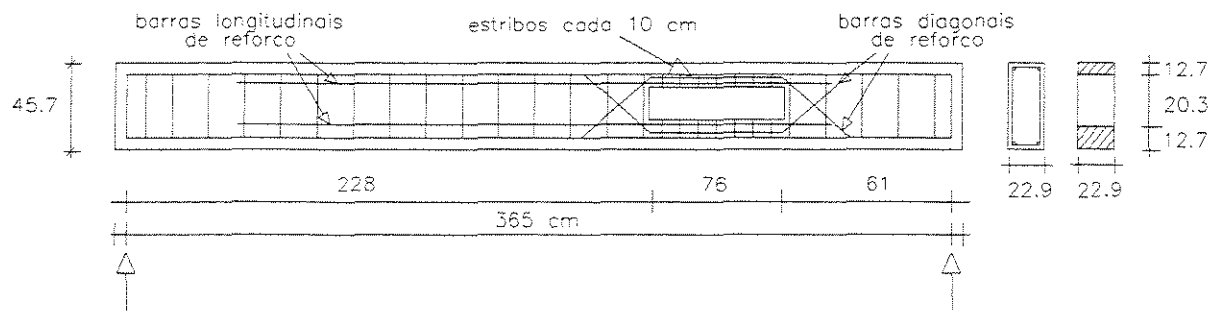
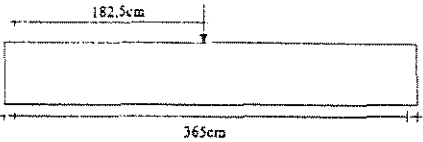
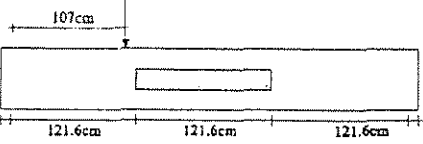
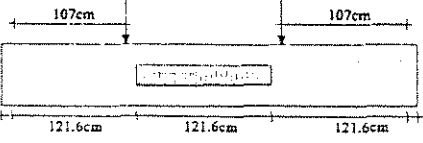
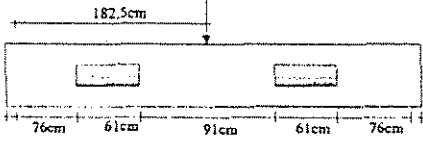
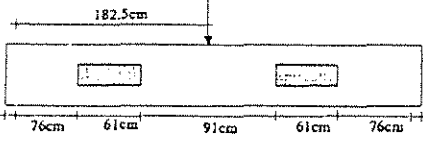
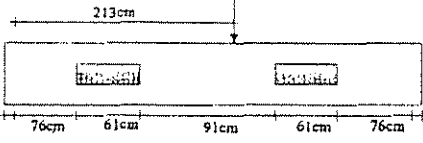
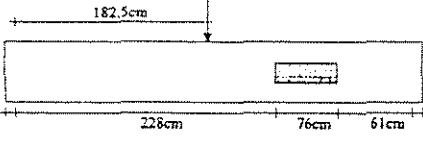
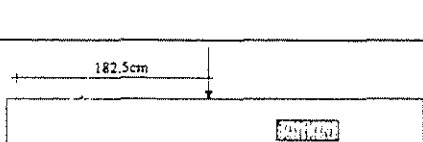
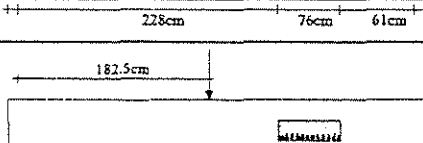
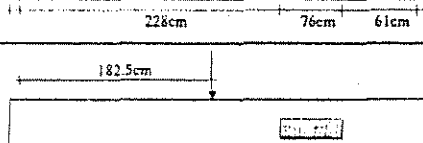


Figura 1.12.9 – Viga D4

Tabela 1.1 – Modos de ruína e posições das cargas das vigas ensaiadas

Identificação	Posição da carga	Modos de ruína	$\frac{F_{U,macica}}{F_{U,furada}}$
A - 1		flexão	1,00
B - 1		fissuração dos cantos	0,76
B - 2		cisalhamento	0,50
C - 1		fissuração dos cantos	0,82
C - 2		flexão	0,96
C - 3		flexão	1,06
D - 1		tensão de tração nos banzos superior e inferior da abertura	0,81
D - 2		flexão	1,20
D - 3		flexão	1,12
D - 4		flexão	1,18

Como resultado observou-se que:

As vigas C2, C3, D2, D3 e D4 (ver tabela 1.1), tiveram o mesmo mecanismo de ruptura (flexão), e aproximadamente igual capacidade última que a viga maciça. Portanto, se forem adequadamente armadas, as vigas com aberturas, conseguem atingir a mesma carga última que as vigas maciças similares.

As vigas com grandes aberturas retangulares comportam-se como uma viga Vierendeel.

Devido à presença de aberturas, ocorre uma diminuição da rigidez da viga, ocasionando maiores deslocamentos. Portanto, atenção especial deve ser dada a vigas com furo, no que diz respeito a deslocamentos.

A armadura diagonal colocada junto aos cantos das aberturas não permitiu o desenvolvimento de fissuras inclinadas que normalmente surgiriam nesta região, devido à alta concentração de tensões naquele ponto.

1.4.2 - MANSUR, M. A., TAN, K. H., LEE, S. L.⁵ : design method for reinforced concrete beams with large openings. ACI Journal. V. 82, N. 4. p. 517-524, July-August, 1985

Mansur, Tan e Lee⁵ desenvolveram um modelo para determinar a resistência de vigas de concreto armado com grandes aberturas. De acordo com seu modelo as seguintes variáveis foram consideradas:

a) Comprimento, altura, excentricidade e localização da abertura ao longo da viga, pois todos estes parâmetros influenciam na parcela de força cortante absorvida por cada banzo (acima e abaixo da abertura);

b) Quantidade e arranjo de armaduras compostas por estribos nos banzos superior e inferior da abertura e reforço dos cantos constituído só por estribos e por estribos combinados com barras diagonais a 45° (as barras inclinadas se justificam pelo fato da concentração de tensões nos cantos da abertura devido à redução da seção transversal da viga).

A proposta de cálculo foi desenvolvida para vigas com aberturas retangular sujeitas a flexão simples, sendo que as cargas não eram aplicadas diretamente sobre a abertura. O modelo baseou-se na análise da carga de ruptura, satisfazendo-se as condições de equilíbrio, escoamento e o mecanismo de funcionamento.

O mecanismo assumido consistia de banzos articulados nas extremidades (parte superior e inferior da abertura), em cada canto da abertura, conforme figura 1.13, com a hipótese de força cortante constante ao longo da abertura.

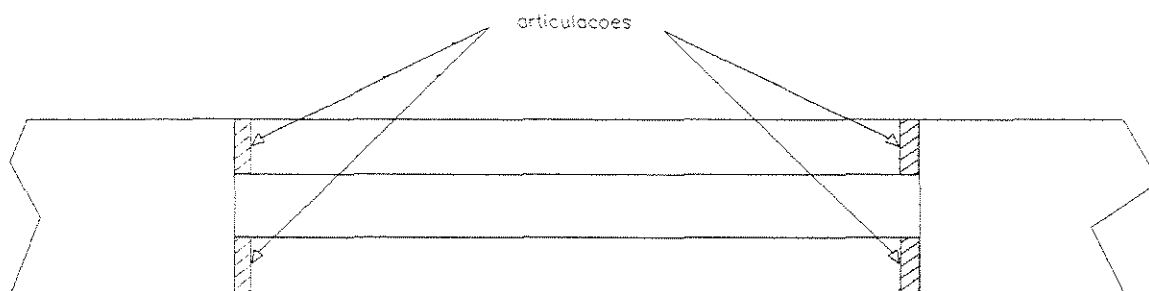


Figura 1.13 – Mecanismo de funcionamento assumido

No método de cálculo proposto, as forças axiais que agem nos banzos são calculadas em função do momento fletor que atua na seção, considerando os banzos como colunas não contraventadas. Baseado na solução exata para a carga de ruptura, pois foi admitida a condição de escoamento, o método foi formulado de acordo com os seguintes passos:

Passo 1- Considerar a viga como um todo e calcular os valores do momento M e da força cortante V no centro da abertura.

Passo 2- Assumir uma quantidade e um arranjo de armaduras para os banzos. Construir um diagrama de interação entre momento fletor e força normal usando método do equilíbrio e satisfazendo a compatibilidade de deformações.

Passo 3- Determinar as forças axiais N que atuam nos banzos superior e inferior da abertura, sendo que as seções críticas são as extremidades. Admitir-se que nenhuma força externa atue no banzo superior e que a força cortante permaneça constante ao longo do comprimento da abertura. As forças axiais e os momentos atuantes nestas extremidades são mostradas no diagrama de corpo livre, figura 1.14. Desse diagrama obtém-se:

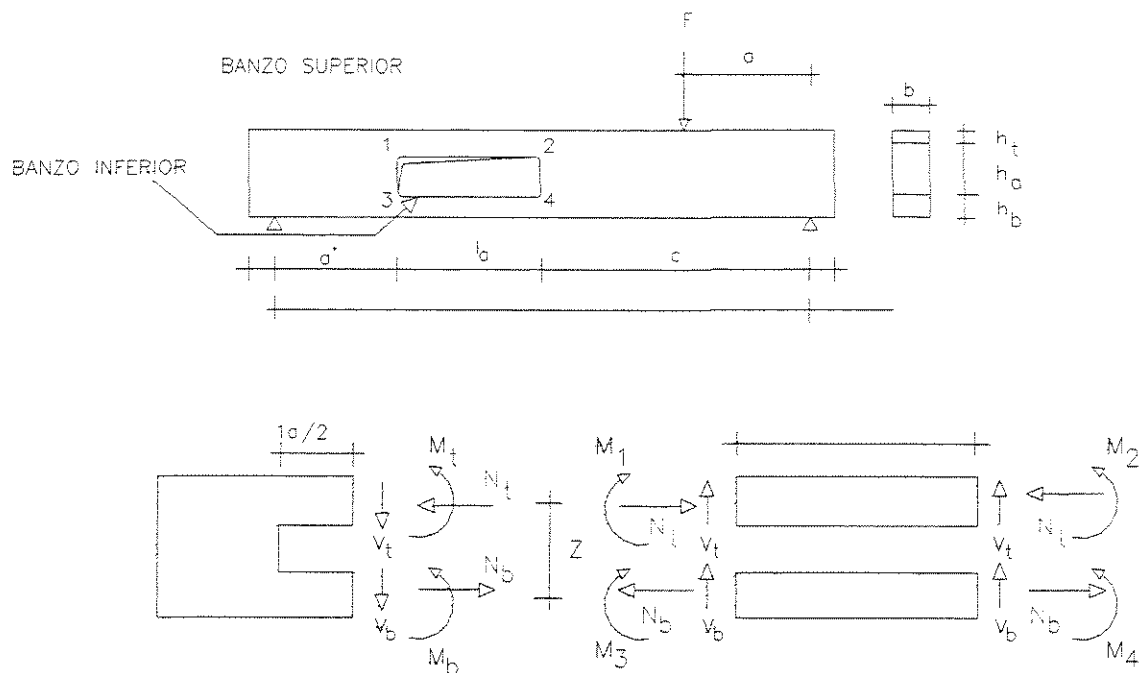


Figura 1.14 – Diagrama de corpo livre do banzo inferior e superior

$$V_t = (|M_2| - |M_3|) / l_a \quad (1.1)$$

$$V_b = (|M_4| - |M_3|) / l_a \quad (1.2)$$

V_t e V_b são forças cortantes atuantes nos banzos superior e inferior respectivamente, **M1**, **M2**, **M3** e **M4** são os momentos fletores nos pontos 1, 2, 3 e 4 respectivamente e l_a é comprimento da abertura. Os momentos secundários **M_t**, e **M_b** atuando nos banzos superior e inferior no centro da abertura são respectivamente:

$$M_t = (|M_2| - |M_1|) / 2 \quad (1.3)$$

$$M_b = (|M_4| - |M_3|) / 2 \quad (1.4)$$

No centro da abertura, o momento **M** externo é resistido pelo par de forças axiais **N** nos banzos e pelos momentos secundários **M_t** e **M_b**, assim:

$$M = N.z + M_t + M_b \quad (1.5)$$

Onde z é a distância entre os centros de gravidade dos banzos. Das equações (1.3) e (1.5) determina-se

$$(z/h).N = \{ M + \frac{1}{2} (|M_1| - |M_2| + |M_3| - |M_4|) \} / h \quad (1.6)$$

Onde h é a altura total da viga.

Introduzindo

$$M^{\#} = \left\{ M + \frac{1}{2} (|M_1| - |M_2| + |M_3| - |M_4|) \right\} \quad (1.6.1)$$

$$z/h = \operatorname{tg} \theta \quad (1.6.2)$$

Destas relações determina-se que

$$\operatorname{tg} \theta \cdot N = M^{\#} / h \quad (1.6.3)$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} z/h = \operatorname{tg}^{-1} M^{\#} / (N \cdot h) \quad (1.7)$$

Assim o colapso da viga ocorrerá pela formação de 4 rótulas nos banzos, nas posições 1, 2, 3 e 4 em função dos momentos **M1**, **M2**, **M3** e **M4** cujos valores devem estar contidos na superfície de interação. O correspondente valor de **N** que deve satisfazer a equação (1.6) pode ser obtido pela construção gráfica como mostra a figura 1.15. Os valores de **M1**, **M2**, **M3** e **M4** que correspondem a qualquer valor de **N** podem ser obtidos destes diagramas de interação. E, portanto do diagrama **N – M[#] / h**. Assim, o ponto de intersecção desse gráfico com a linha cheia representada pela equação (1.7) dá o valor de **N**.

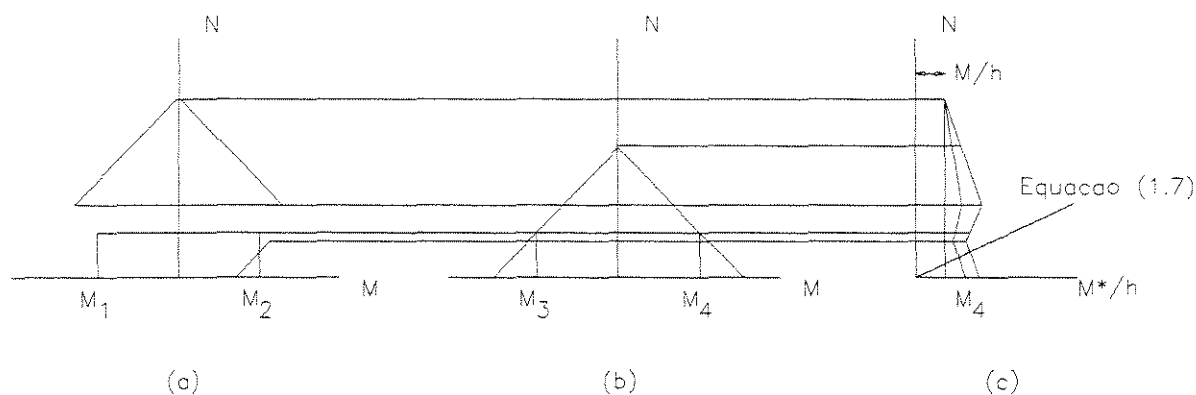


Figura 1.15 – (a) diagrama de interação do banzo superior (b) diagrama de interação do banzo inferior (c) gráfico de $N \times M^{\#} / h$ [7]

Se os banzos superior e inferior forem simetricamente armados, então os correspondentes diagramas de interação são simétricos em relação ao eixo de **N** e assim, os pontos de inflexão ocorrem no ponto médio dos banzos e a equação (1.5) fica então:

$$M = N.z \quad (1.8)$$

Na prática, quantidades aproximadamente iguais de armaduras são adotadas em ambos os banzos, conseqüentemente os valores de $\frac{1}{2} (|M1| - |M2|)$ e $\frac{1}{2} (|M3| - |M4|)$ são muito pequenos quando comparados com **M**. Assim **N** pode ser diretamente determinado a partir de equação (1.8) sem erros significativos.

Passo 4- Determinar os valores **M1**, **M2**, **M3** e **M4** que correspondem a um valor de **N** como mostra a figura 1.15. Se algum destes valores não puder ser obtido, a armadura longitudinal deve ser aumentada e o Passo 3 repetido.

Passo 5- Obtidos os valores de força cortante atuantes nos banzos superior e inferior, verifica-se:

- se $(V_t + V_{b,}) < V$, a seção não é satisfatória, então a armadura longitudinal deve ser aumentada.

- se $(V_t + V_{b,}) > V$, então a armadura longitudinal deverá ser reduzida.

Este processo é repetido até que se tenha $(V_t + V_{b,}) \sim V$. Assim ficam determinados **V_t** e **V_b**

Passo 6- Determinar a armadura adicional em forma de estribos verticais com ou sem a adição de barras inclinadas. No caso do uso único de estribos, a área de aço necessária para cada canto (**A_{s, susp}**) é dada por:

$$A_{s, susp} = k (V_d / f_{ywd} \cdot \text{sen}\beta)$$

Nestas expressões

k = fator de concentração de cisalhamento

f_{ywd} = valor de cálculo da tensão de escoamento da armadura usada como estribo e ou barras diagonais

β = ângulo de inclinação das barras diagonais com eixo axial da viga

V_d = força cortante no meio da abertura

Passo 7- Para cálculo da região maciça usar os métodos tradicionais de cálculo.

Doze vigas, denominadas de R1\R2\...\R12, com seção retangular, calculadas por este método, foram ensaiadas. Cada viga tinha 330cm de comprimento com uma seção transversal com 20cm de largura e 40cm de altura. Os detalhes das armaduras dessas vigas são mostrados na figura 1.16 e nas tabelas 1.2 e 1.3 apresentam-se as características geométricas.

Tabela 1.2 – Detalhe das vigas

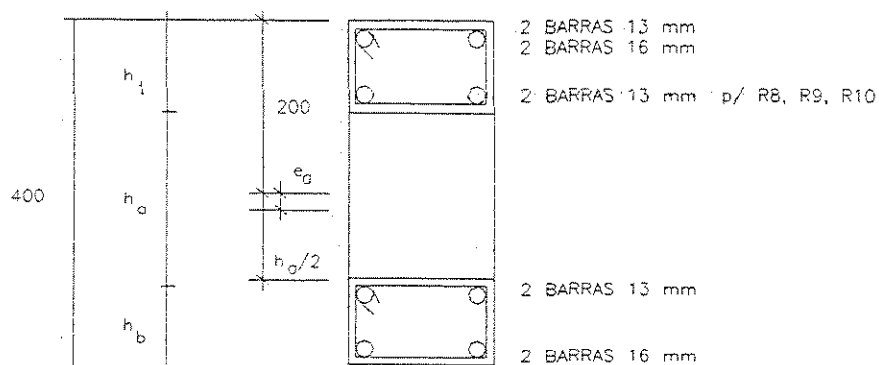
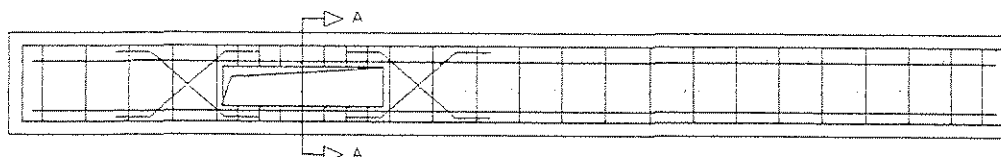
Viga	Carga Última (kN)	l_a (mm)	h_t (mm)	h_d (mm)	h_b (mm)	e_d (mm)	$a'+l_d/2$ (mm)	Espaçam. estribos banzo sup. (mm)	Espaçam. estribos banzo inf. (mm)
R1	204	400	110	180	110	0	1000	40	40
R2	162	600	110	180	110	0	1000	40	40
R3	132	800	110	180	110	0	1000	40	40
R4	107	1000	110	180	110	0	1000	40	40
R5	89	1200	110	180	110	0	1000	40	40
R6	164	800	130	140	130	0	1000	50	50
R7	92	800	90	220	90	0	1000	30	30
R8	138	800	120	180	100	10	1000	45	35
R9	144	800	130	180	90	20	1000	50	30
R10	137	800	110	180	110	0	800	40	40
R11	131	800	110	180	110	0	1000	40	40
R12	127	800	110	180	110	0	1200	40	40

Tabela 1.3 – Detalhe das armaduras de reforço nas extremidades da abertura

Viga	Armadura de reforço		Cortante resistida por		cortante total resist. V_r	$\frac{V_{ri}}{V_r}$	Esforço cortante $V = \frac{F_{ud} \cdot a}{l}$	Fator de concentração $K = \frac{V_r}{V}$
	estribos fechados	barras inclinadas	estribos $(V_{rv})^{*1}$	barras inclinadas $(V_{ri})^{*2}$				
-	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	-	(kN)	-
R1	1 - 13	-	111.5	-	111.5	-	68.0	1.64
R2	1 - 10	-	70.2	-	70.2	-	54.0	1.30
R3	1 - 10	-	70.2	-	70.2	-	44.0	1.60
R4	1 - 16	2 - 10	20.1	49.6	69.7	0.71	35.7	1.96
R5	1 - 16	2 - 10	20.1	49.6	69.7	0.71	29.8	2.34
R6	1 - 10	-	70.2	-	70.2	-	54.7	1.28
R7	1 - 10	-	70.2	-	70.2	-	30.7	2.30
R8	2 - 06	4 - 06	40.2	28.4	68.6	0.41	46.0	1.49
R9	1 - 06	2 - 10	20.1	49.6	69.7	0.71	48.0	1.45
R10	1 - 06	2 - 10	20.1	49.6	69.7	0.71	45.7	1.53
R11	1 - 10	-	70.2	-	70.2	-	43.7	1.60
R12	1 - 06	4 - 04	20.1	28.4	48.5	0.59	42.3	1.15

$$^{*1} V_{rv} = A_{rv} \cdot f_{ywd}$$

$$^{*2} V_{ri} = A_{ri} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha$$



CORTE A-A

Figura 1.16 – Detalhe da armadura das vigas ensaiadas [7]

As conclusões obtidas com essa investigação foram:

- Para uma carga em particular, tanto a abertura das fissuras como a flecha máxima da viga aumentam com o aumento do comprimento e da altura da abertura ou da relação momento/força cortante (M/V) no centro da abertura, figuras 1.17 e 1.18). A influência da excentricidade da abertura mostrou-se insignificante para as pequenas excentricidades usadas nesse programa de ensaio;

- As barras diagonais nos cantos são mais eficientes no controle da fissuração e reduzem a flecha da viga, figuras 1.18a a 1.18d. Usando uma combinação adequada de barras inclinadas e estribos a fissuração pode ser controlada. Com um fator de concentração de cisalhamento $k=2$, as barras diagonais resistirão aproximadamente 75% da força cortante. Portanto, seu uso foi mais do que satisfatório e então pode ser recomendado para projeto (ver tabela 1.4).

- A posição do ponto de inflexão nos banzos depende da disposição da armadura longitudinal. Para um arranjo simétrico, ele ocorre aproximadamente no meio do vão do respectivo banzo.

- Estando as seções maciças adequadamente armadas, a viga rompe pela formação de um mecanismo com 4 articulações nas extremidades dos banzos, situadas uma em cada canto da abertura.

- O método proposto mostrou-se seguro e satisfatório e aplicável para vigas quando os banzos não são diretamente carregados.

- As parcelas da força cortante absorvidas pelos banzos superior e inferior à abertura, na ruptura, dependem não somente das propriedades de suas seções transversais, mas também do tamanho (comprimento e altura) e localização (com relação ao eixo longitudinal e aos apoios) da abertura, conforme ilustra os gráficos da figura 1.19. No caso de pequenas aberturas o banzo superior absorveu quase que 100% da força cortante, mas no caso de grandes aberturas o banzo inferior absorve parcela significativa da força cortante.

- Verificando os resultados das vigas R1 a R5 fica claro que a resistência da viga diminui com o aumento do comprimento da abertura.

- Observou-se também que a resistência das vigas diminui com o aumento da

altura da abertura.

- Quando se aumenta a excentricidade da abertura a resistência da viga também cresce (quando a abertura esta posicionada abaixo da linha neutra).

- O efeito da localização da abertura interfere na resistência última da viga, pois, com o aumento na relação momento/força cortante (M/V) no centro da abertura, ocorre uma diminuição na resistência última da viga.

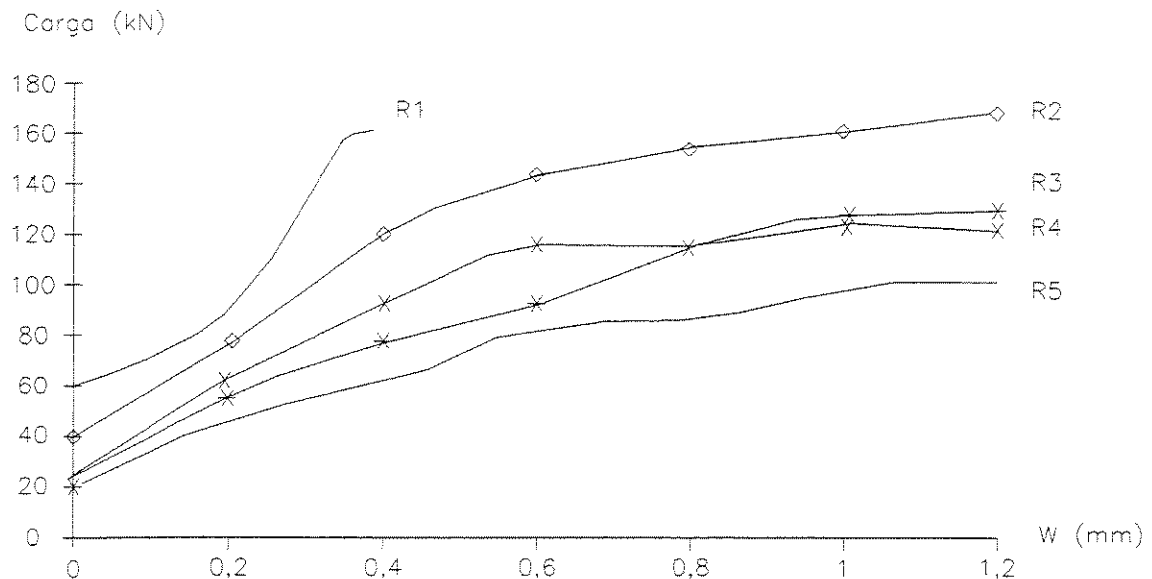


Figura 1.17a – Vigas R2, R3, R4 e R5 gráfico de carga X máxima abertura das fissuras (W) – Influência do comprimento da abertura na viga.

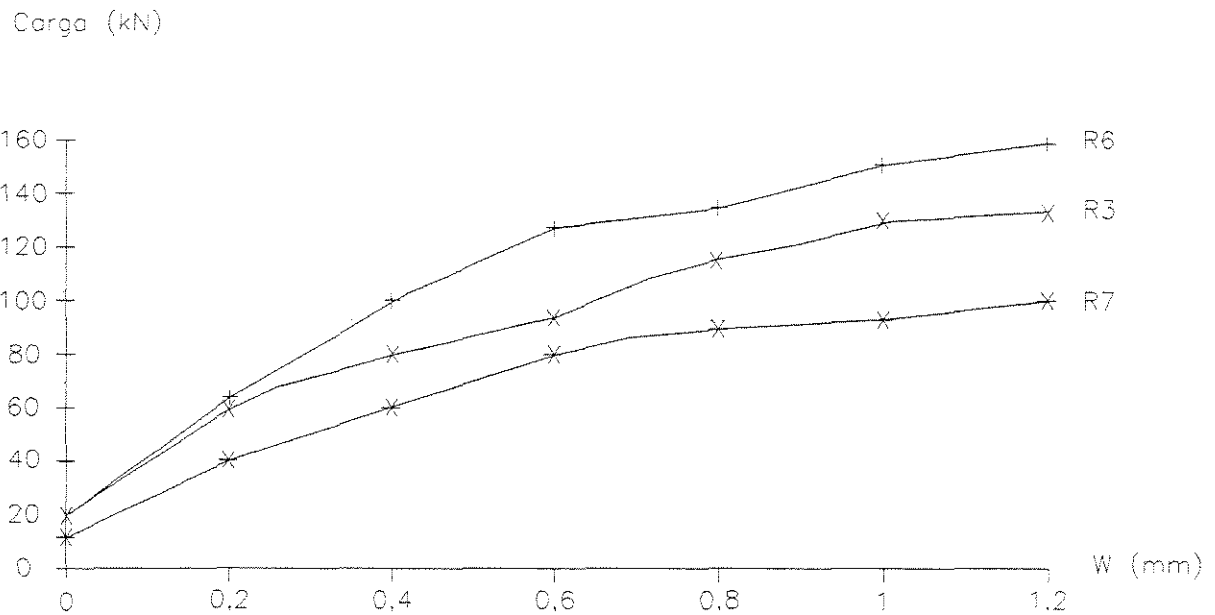


Figura 1.17b – Vigas R6, R7, e R3 gráfico de carga X máxima abertura das fissuras (W) – Influência da altura da abertura na viga.

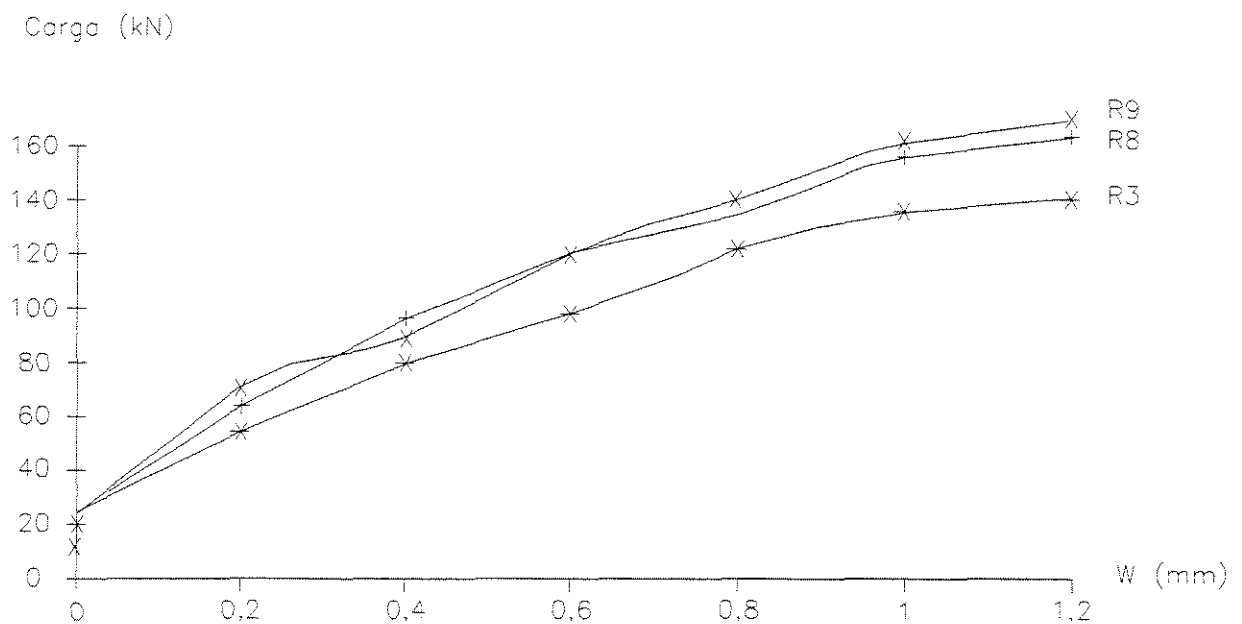


Figura 1.17c – Vigas R8, R9 R3 gráfico de carga X máxima abertura das fissuras (W) – Influência da excentricidade da abertura

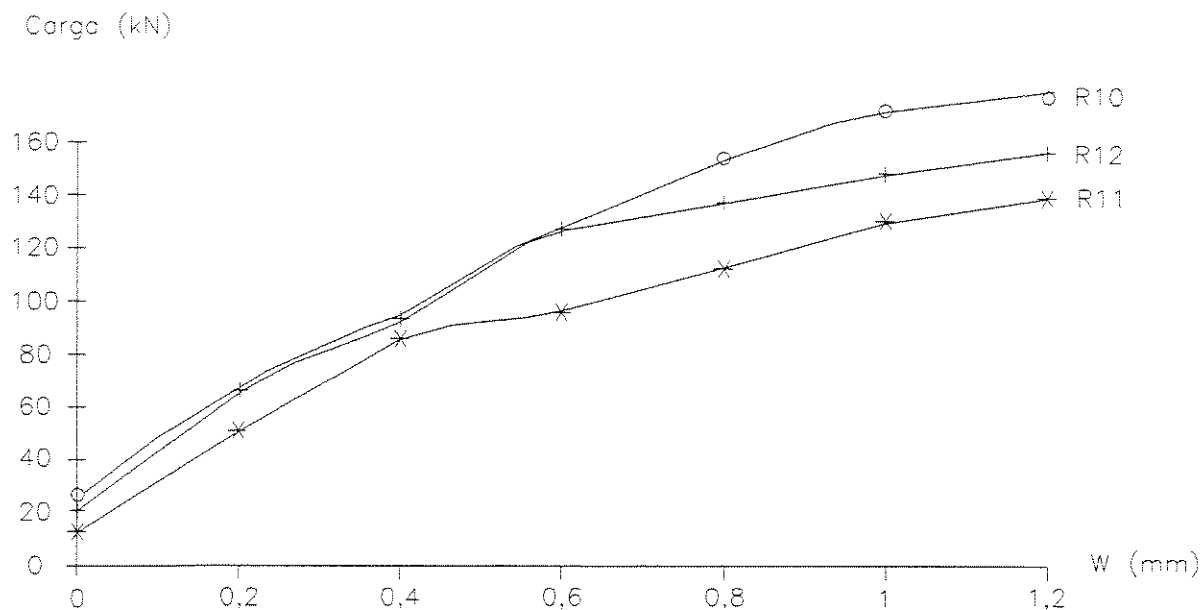


Figura 1.17d – Vigas R10, R11, e R12 gráfico de carga X máxima abertura das fissuras (W) – Influência da posição da abertura ao longo da viga

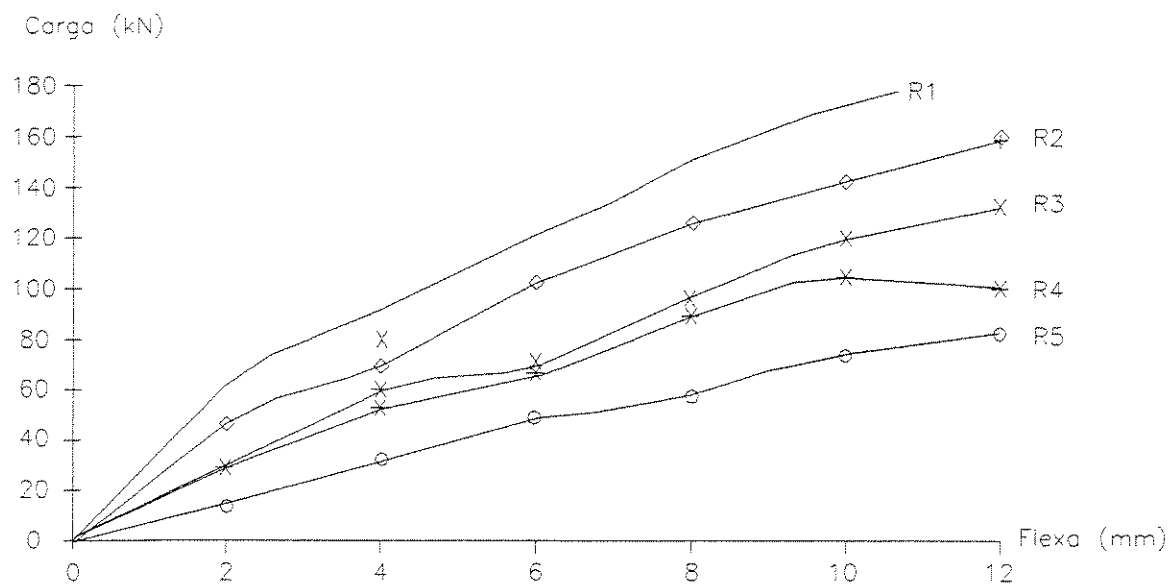


Figura 1.18a – Vigas R1, R2, R3 , R4 e R5 flechas máximas – Influência do comprimento da abertura.

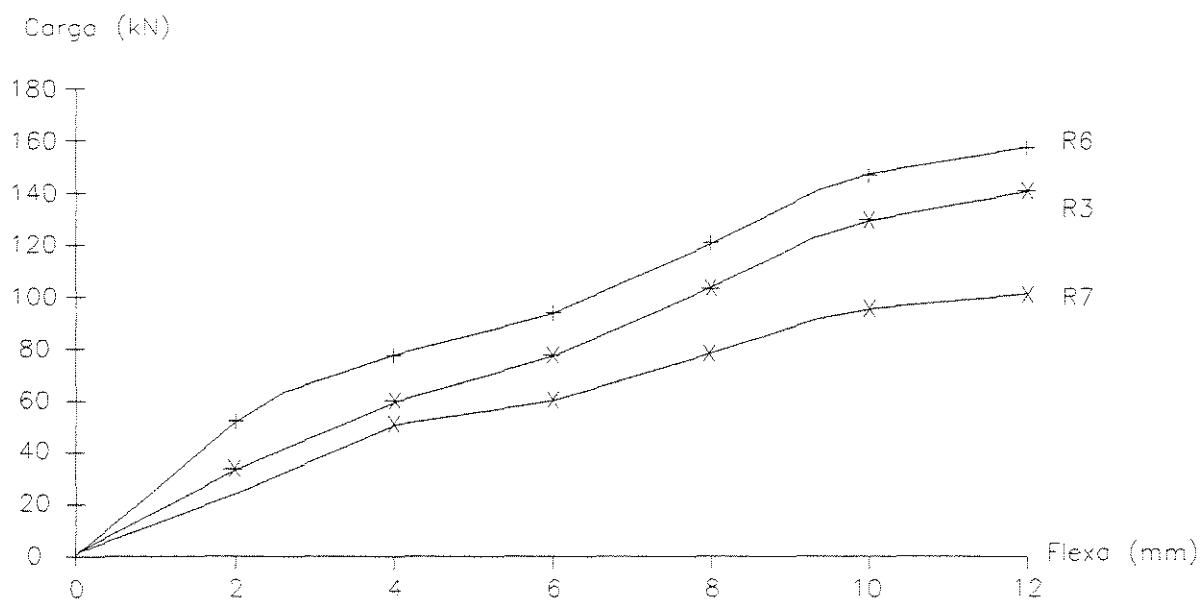


Figura 1.18b – Vigas R6, R7 e R3 flechas máximas – Influência da altura da abertura

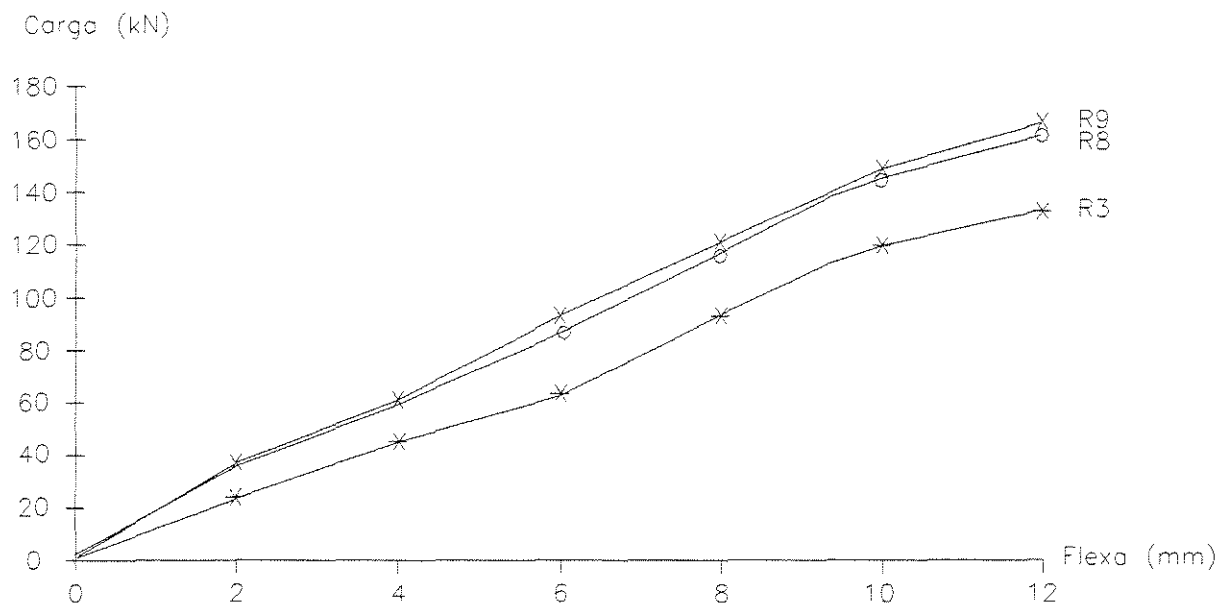


Figura 1.18c – Vigas R8, R9 e R3 flechas máximas – Influência da excentricidade da abertura

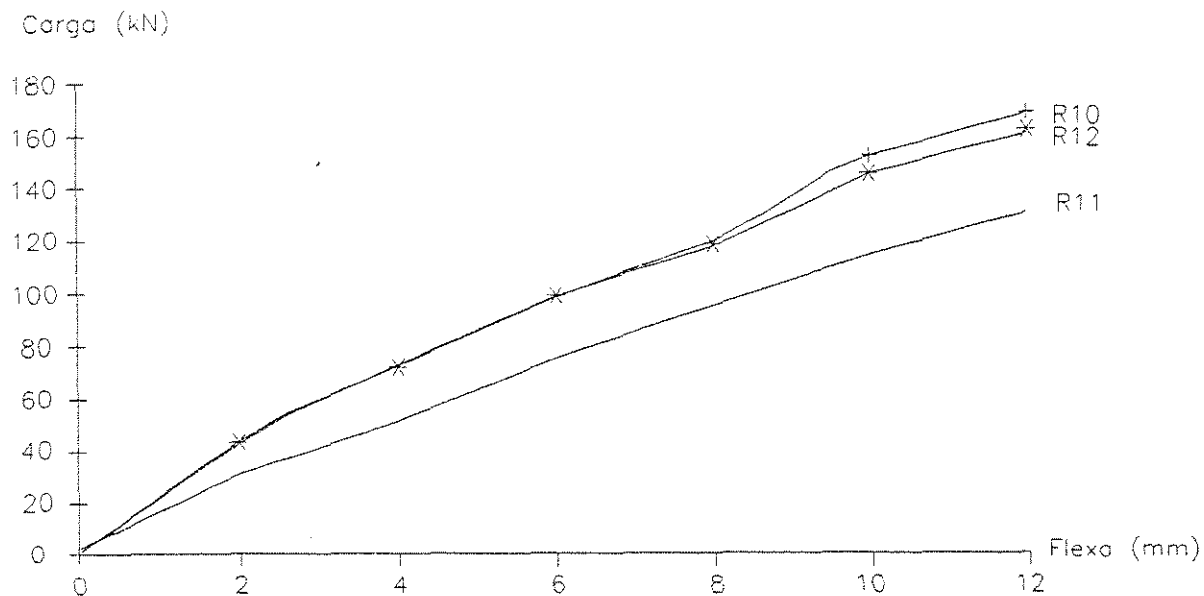
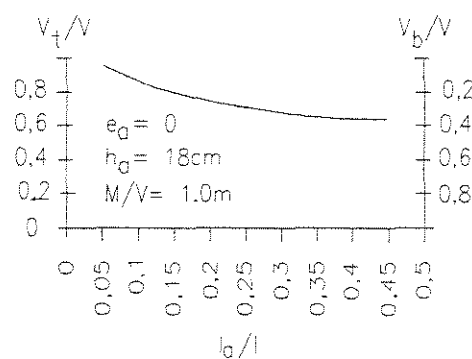


Figura 1.18d – Vigas R10, R11 e R12 flechas máximas – Influência da posição da abertura

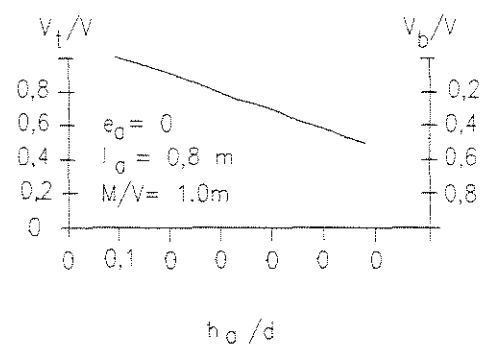
Tabela 1.4 – Resultados dos ensaios

VIGA	Resistência do cilindro (N/mm ²)	Carga Ultima experimental (F _{u,exp} - kN)	Carga Ultima teórica (F _{u,teor} - kN)	Máxima abertura das fissuras (mm)	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,teor}}$
R1	30.4	223.9	204	0.26	1.10
R2	30.4	182.5	162	0.29	1.13
R3	33.5	144.1	132	0.43	1.09
* R4	33.5	133.4	107	0.23	1.25
* R5	29.8	104.1	89	0.23	1.17
R6	29.8	180.0	164	0.37	1.10
R7	35.1	102.9	92	0.33	1.12
* R8	35.1	159.3	138	0.35	1.15
* R9	34.8	174.0	144	0.39	1.21
* R10	34.8	177.4	137	0.31	1.29
R11	28.8	133.5	131	0.45	1.02
* R12	28.8	154.3	127	0.05	1.21

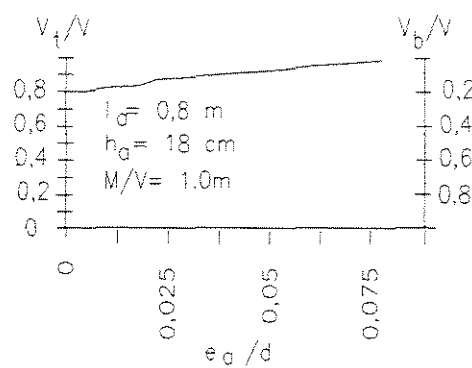
*vigas com barras inclinadas de reforço



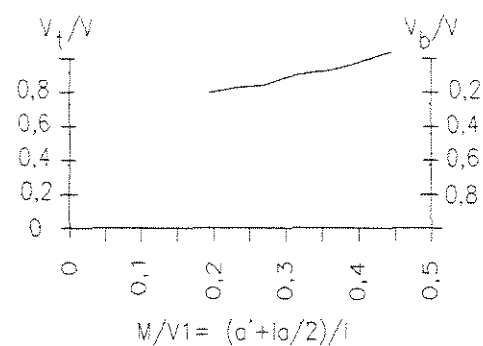
(a) efeito do comprimento da abertura



(b) efeito da altura da abertura



(c) efeito da excentricidade da abertura



(d) efeito da localização da abertura

Figura 1.19 – Distribuição da cortante entre os banzos superior e inferior

1.4.3 - FERNANDES, G. B.², Flexão e cisalhamento em vigas de concreto de alta resistência com aberturas na alma, XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, São Carlos-SP, Brasil, 1 a 05 de setembro de 1997, V.3 – Estruturas e Fundações, p. 1061-1070.

Esse trabalho discute os efeitos causados pela presença da abertura e a solução do problema. Apresenta resultados de investigação experimental realizada por Simões⁷ na Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP e sua interpretação pela aplicação do método do equilíbrio e dos modelos de bielas e tirantes. Ensaaios realizados por Simões⁷ em vigas com abertura na alma permitiram estudar as perturbações no fluxo dos esforços internos e a geometria do mecanismo resistente na proximidade da abertura existente na alma de vigas de concreto de alta resistência.

As vigas ensaiadas VR-1 e VR-2 tinham vão de 300 cm, seção I e alma com abertura retangular com mostra a figura 1.20

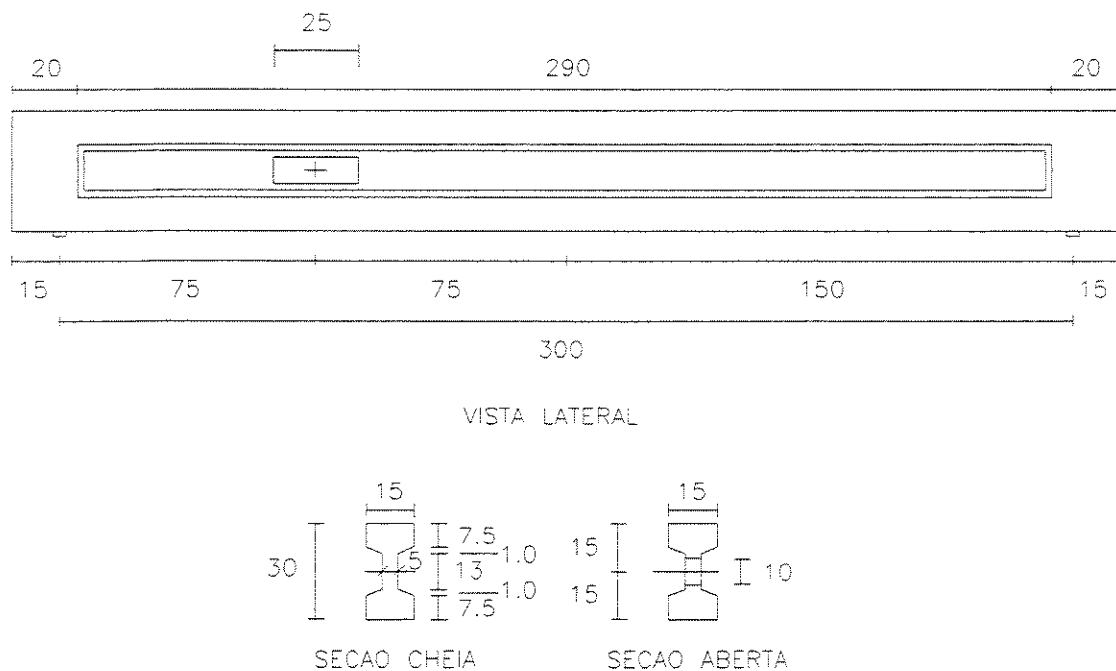
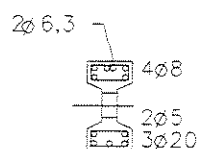
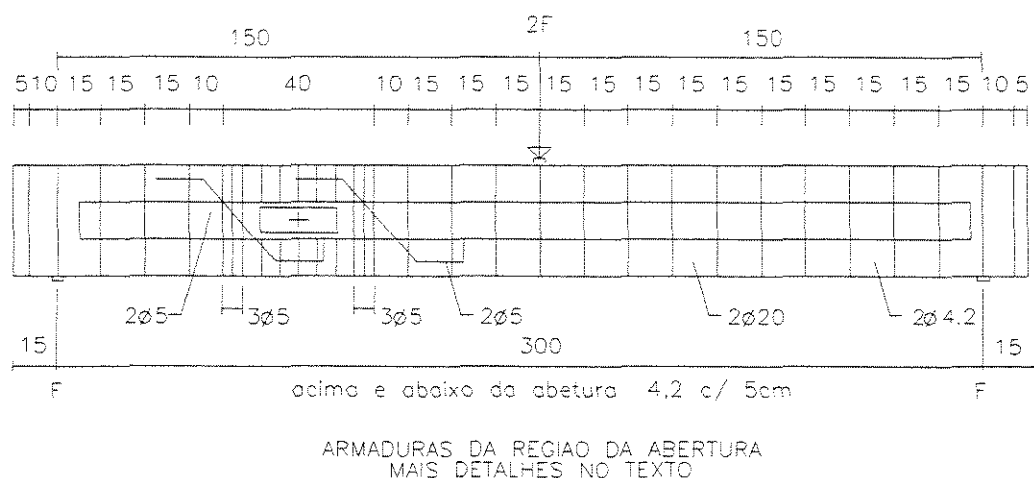


Figura 1.20 – Dimensões das vigas

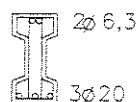
As características geométricas e mecânicas estão na tabela 1.5 e os detalhes das armaduras e esquema de carregamento, estão representados na figura 1.21. O concreto atingiu resistência média de 80 MPa aos 28 dias, o traço do concreto utilizado foi 1:1,12:1,71, em peso referido à soma de cimento e sílica ativa, com relação água/material cimentício igual a 0,31.

Tabela 1.5 – Resistência do concreto e propriedades da armadura

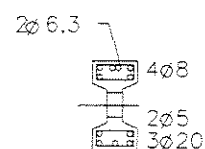
Vigas	f_c MPa	A_{sl} mm ²	f_{yl} MPa	ρ_1 %	$A_{sw/s}$ mm ² /mm	ϕ mm	s mm	f_{yw} MPa	ρ_w %
VR-1	84,4	9,32	510	6,22	0,373	4,2	150	750	0,746
VR-2	77,2	8,32	510	6,22	0,373	4,2	150	750	0,746



VIGA VR-1



SECAO CHEIA



VIGA VR-2

Figura 1.21 – Detalhe das armaduras e esquema de carregamento

Nesse experimento as vigas VR-1 e VR-2 atingiram o modo de ruptura esperado: flexão. Assim a armadura de suspensão adotada combinada com a complementar inclinada, foram eficientes para mobilizar a resistência das vigas a flexão. A fissuração foi a esperada. O banzo superior comprimido permaneceu sem fissuras e o inferior tracionado apresentou fissuras usuais de flexão. Foi relatado que o banzo superior também sofreu flexão.

Foi verificado que os estribos do lado abertura mais próximos a carga aplicada, foram os que alcançaram maiores tensões. Estes estribos mais a armadura complementar suspenderam na viga VR1 0,59V e na VR2 0,78V. No lado mais próximo ao apoio os estribos mais a armadura complementar suspenderam na viga VR1 0,33V e na VR2 0,41V.

Os gráficos abaixo mostram a evolução das componentes V_{90} e V_{45} , para as duas vigas nos dois lados da abertura. Figura 1.22 e 1.23.

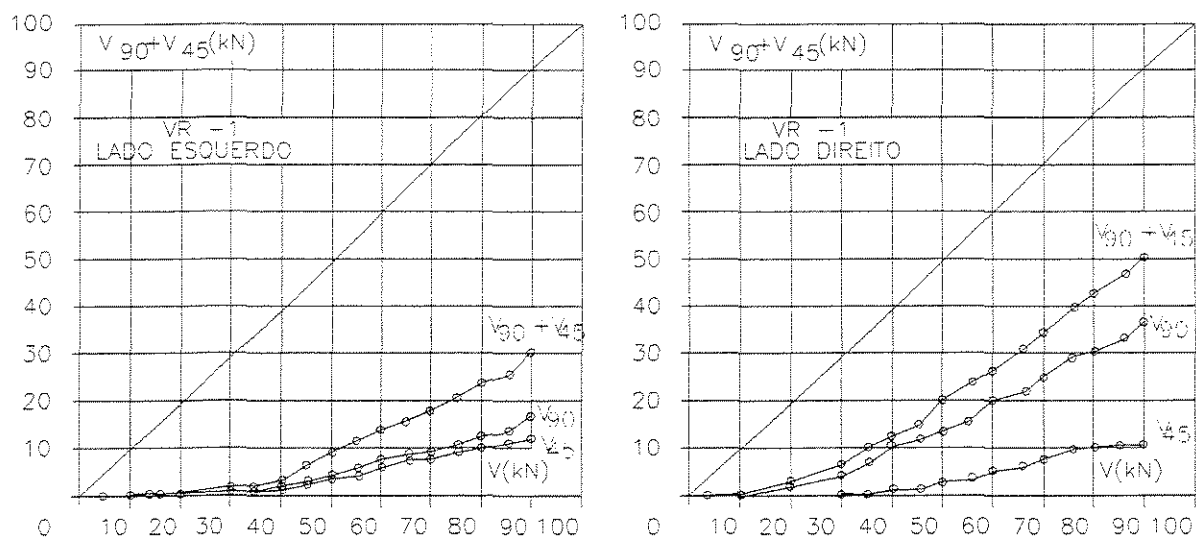


Figura 1.22-Componentes de V suspensas pelas armaduras na viga VR-1

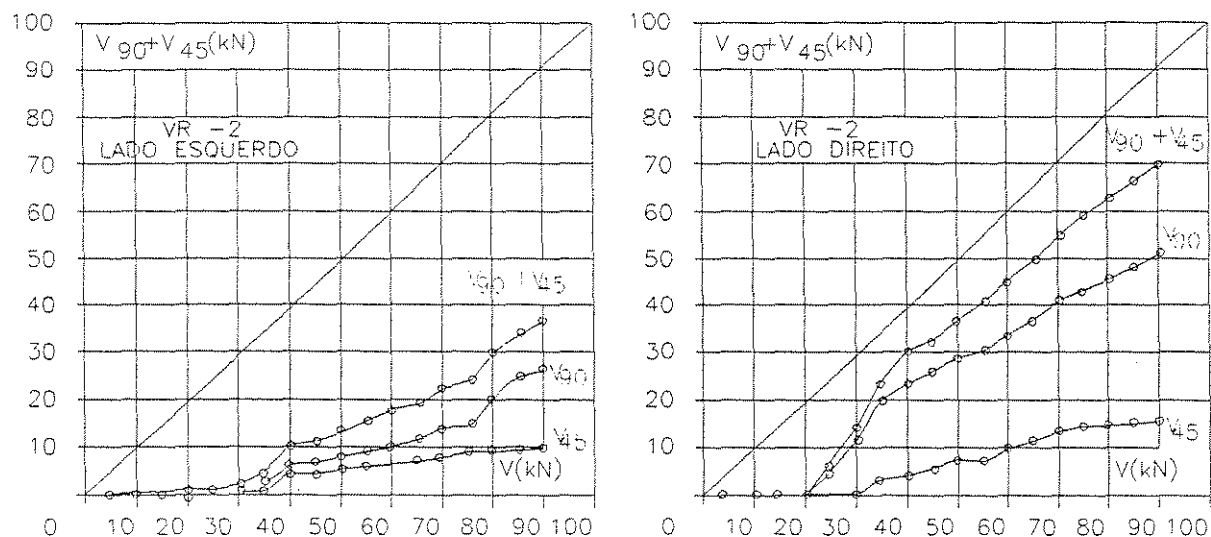


Figura 1.23-Componentes de V suspensas pelas armaduras na viga VR-2

Observa-se que $V_{90} + V_{45} < V$. Isto ocorre porque uma parcela de V atua nos banzos que limitam a abertura e não exige armadura de suspensão.

A tabela 1.6 abaixo apresenta as componentes de V transferidas pelas armaduras de suspensão no estado limite de utilização, para $V_k = 55$ kN, e no estado limite ultimo, para $V_u = 90$ kN.

Tabela 1.6 – Componentes de V suspensas pelas armaduras $A_{s,90}$ e $A_{s,45}$

VIGAS $V(kN)$	LADO DO APOIO					LADO DA CARGA				
	V_{90}	V_{45}	ΣV	$V_{90}/\Sigma V$	$V_{45}/\Sigma V$	V_{90}	V_{45}	ΣV	$V_{90}/\Sigma V$	$V_{45}/\Sigma V$
VR-1 $V_k=55$ $V_u=90$	0,09V	0,12V	0,21V	0,43	0,57	0,34V	0,10V	0,44V	0,77	0,23
	0,19V	0,14V	0,33V	0,58	0,42	0,44V	0,15V	0,59V	0,75	0,25
VR-2 $V_k=55$ $V_u=90$	0,17V	0,12V	0,29V	0,59	0,41	0,60V	0,18V	0,78V	0,77	0,23
	0,30V	0,11V	0,41V	0,73	0,27	0,59V	0,19V	0,78V	0,76	0,24

Com essa tabela observa-se que os resultados obtidos em VR-2 estão próximos das recomendações de Leonhardt e Mönig³, em que os estribos devem suspender 0,8V. Na viga VR-1 a situação foi mais amena pois esta possuía maior rigidez no banzo superior, porque sua armadura longitudinal era quatro vezes maior, atraindo uma maior parcela de V.

Os estribos do lado do apoio suspenderam a metade do esforço da armadura principal.

As armaduras inclinadas apesar de suspenderem uma parcela dos esforços, tinham o objetivo de diminuir as deformações e a concentração de tensões nos cantos da abertura.

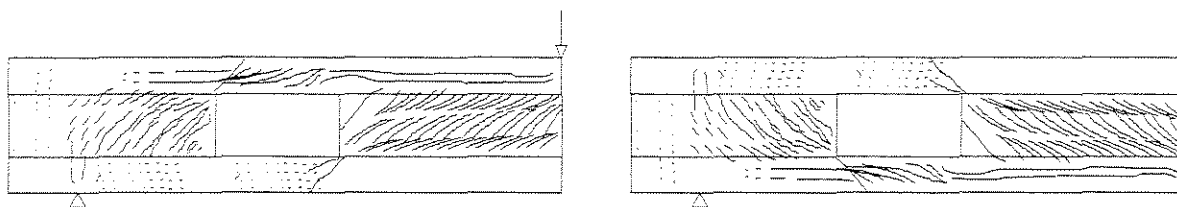
Nesse experimento concluiu-se que os estribos do lado oposto ao apoio devem suspender no mínimo 0,8V, e as barras inclinadas devem ter área de armadura superior a um terço dos estribos de suspensão. Os estribos próximos ao apoio podem ter sua área reduzida à metade em relação aos primeiros, mantida as barras inclinadas. Ao banzo superior cabe $V_{SUP} = V$ e ao inferior $V_{INF} = 0$. Nessas vigas o banzo superior tinha uma relação $a/h_{SUP}=2,5$ por isso atuou mais como chapa do que como barra, o que permitiu a redução da sua armadura em VR-2 em relação a VR-1. No caso de aberturas alongadas esta situação talvez não se verifique.

1.5 – DIMENSIONAMENTO DA REGIÃO DA ABERTURA

Em seu trabalho, Fernandes² faz uma análise do problema e apresenta uma solução para ele. O exposto a seguir é uma transcrição parcial do texto de Fernandes², com as adaptações para que as figuras e as citações respeitem a ordem de apresentação neste trabalho.

1.5.1 – ANÁLISE DO PROBLEMA

As vigas desta discussão são bi-apoiadas e seu carregamento é constituído por uma carga concentrada aplicada no meio do vão. Possuem seção I e uma abertura na alma em um dos vãos de cisalhamento. Uma análise numérica realizada com emprego do MEF, assumindo as hipóteses de material homogêneo, isótropo e elástico, permitiu a obtenção das trajetórias das tensões principais de compressão e de tração como as que se apresentam nas Figuras 1.24a e 1.24b, respectivamente.



(a) Trajetória das tensões de compressão (b) Trajetória das tensões de tração

Figura 1.24 – Trajetórias das tensões principais de compressão e tração

Essa configuração das trajetórias das tensões principais permite algumas observações. Primeiro, parte dos esforços de compressão originários da carga introduzida passa pelo banzo comprimido sobre a abertura e atinge o outro lado, concentrando tensões no vértice superior externo da abertura. A outra parte desses esforços se inclina na alma em direção ao talão e concentra tensões no vértice inferior interno da abertura. Esse andamento dos esforços exige, na viga de concreto, uma

armadura que suspenda essa parcela dos esforços para o banzo comprimido. Segundo, parte dos esforços de tração se inclina na alma antes da abertura em direção à mesa e concentra tensões no vértice superior interno. A outra parte desses esforços percorre o banzo tracionado sob a abertura e entra na alma em direção inclinada, concentrando tensões no canto inferior externo. Na viga de concreto uma outra armadura de suspensão é necessária na região da abertura no lado do apoio depois da abertura.

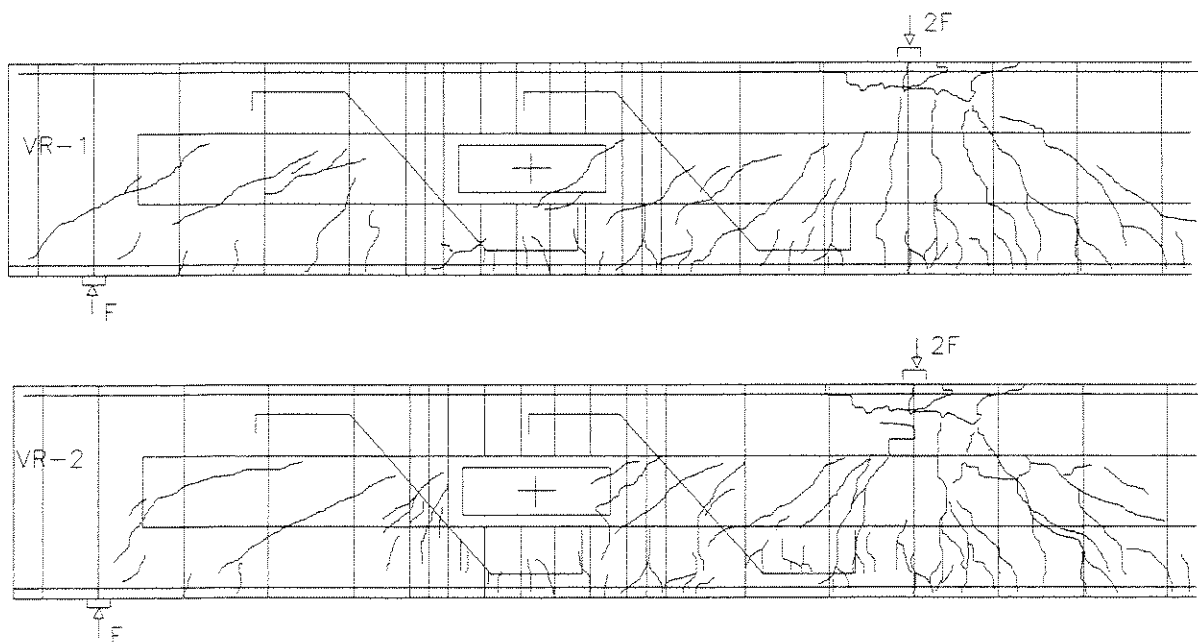


Figura 1.25 – Panorama da fissuração das vigas ensaiadas

Nas vigas de concreto ensaiadas, o panorama de fissuração mostrou boa concordância com o andamento das tensões em regime elástico. Com a evolução da fissuração, nas regiões situadas longe da abertura, o processo de definição dos elementos que devem resistir compressão e tração se mostrou análogo ao das vigas de alma cheia. Por outro lado, algumas fissuras partiam inclinadas das duas bordas verticais da abertura em direção à mesa e ao talão e acompanhavam as outras da parte cheia da alma. Nos banzos situados acima e abaixo da abertura, as tensões principais de tração e compressão que surgem nas bordas superior e inferior, em cada uma das extremidades, indicam que esses elementos sofrem flexão. Apesar disso, no banzo

sobre a abertura há predominância de compressão e no banzo abaixo da abertura predomina tração. O banzo sobre a abertura, apesar de sofrer flexão, manteve-se comprimido e sem fissuras. O banzo sob a abertura esteve tracionado e apresentou fissuras verticais próprias dessa situação. A Figura 1.25 apresenta o panorama de fissuração das vigas ensaiadas.

1.5.2 - SOLUÇÃO DO PROBLEMA

Aberturas na alma das vigas só podem ser executadas se, após a fissuração do concreto, nela permanecerem as bielas de compressão ou se for possível a formação de pórticos rígidos.

Limitações a respeito da localização e das dimensões das aberturas são encontradas em NBR 6118¹, Leonhardt e Mönning³ e Süsskind⁸ e estão indicadas na Figura 1.26

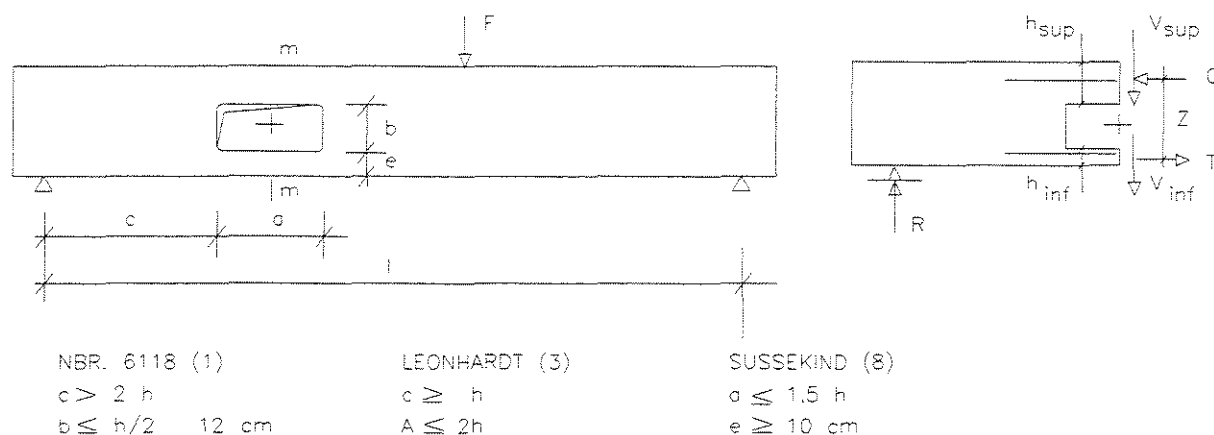


Figura 1.26 – Diagrama de corpo livre e limitações de aberturas na alma

Na região da abertura, os banzos que a limitam superior e inferiormente se comportam de modo semelhante aos banzos de uma viga Vierendeel, podendo admitir-

se para eles a validade da hipótese de permanência de seção plana durante a deformação. Os banzos, quando não recebem carga transversal, apresentam ponto de inflexão a meio comprimento, conforme Nasser e Acavalos e Daniel⁶, Mansur, Tan e Lee⁵. As partes da alma que fazem limite com a abertura são regiões de descontinuidade, onde aquela hipótese não é mais válida, e o mecanismo resistente que se forma pode ser representado por modelos de bielas e tirantes. A Figura 1.27 apresenta os mecanismos constituídos por treliças e por modelos de bielas e tirantes propostos para as vigas desta discussão, que são decorrentes da análise numérica apresentada na seção anterior.

Os ensaios mostram que, com amadureza adequada, uma viga com abertura na alma pode atingir a mesma carga de ruína por flexão da viga equivalente de alma cheia. No entanto, por causa da menor rigidez decorrente da presença da abertura, em igualdade de cargas, a primeira sofre deslocamentos maiores que a segunda Leonhardt e Mönig³, Nasser e Acavalos e Daniel⁶, Mansur, Tan e Lee⁵ e Simões⁷.

Os critérios que se apresentam a seguir, para o dimensionamento da região da abertura, são apoiados em observações experimentais e representam uma síntese das recomendações encontradas na literatura que trata do assunto. Para acompanhamento da exposição, considere-se a Figura 1.26, que representa uma parte de uma viga com abertura na alma e o diagrama de corpo livre limitado pela seção *m-m* que passa pelo centro da abertura.

Determinam-se os esforços internos e as reações externas como se a viga tivesse alma cheia. Na seção *m-m*, consideram-se o momento fletor M e a força cortante V .

Na seção *m-m*, o momento M é substituído pelo binário composto pela resultante de compressão $C = M/z$, atuando ao longo do eixo do banzo comprimido, e pela resultante de tração $T = M/z$, atuando ao longo do eixo do banzo tracionado. O braço interno de alavanca z é a distância entre os eixos desses banzos.

Na seção *m-m*, a força cortante V se divide em V_{sup} e V_{inf} que são resistidas pelos banzos superior e inferior, respectivamente, na proporção da rigidez de cada um. Contudo, a rigidez do banzo superior comprimido é muito maior que a rigidez do banzo inferior tracionado, onde o concreto acha-se fissurado e sobra somente a armadura. Por

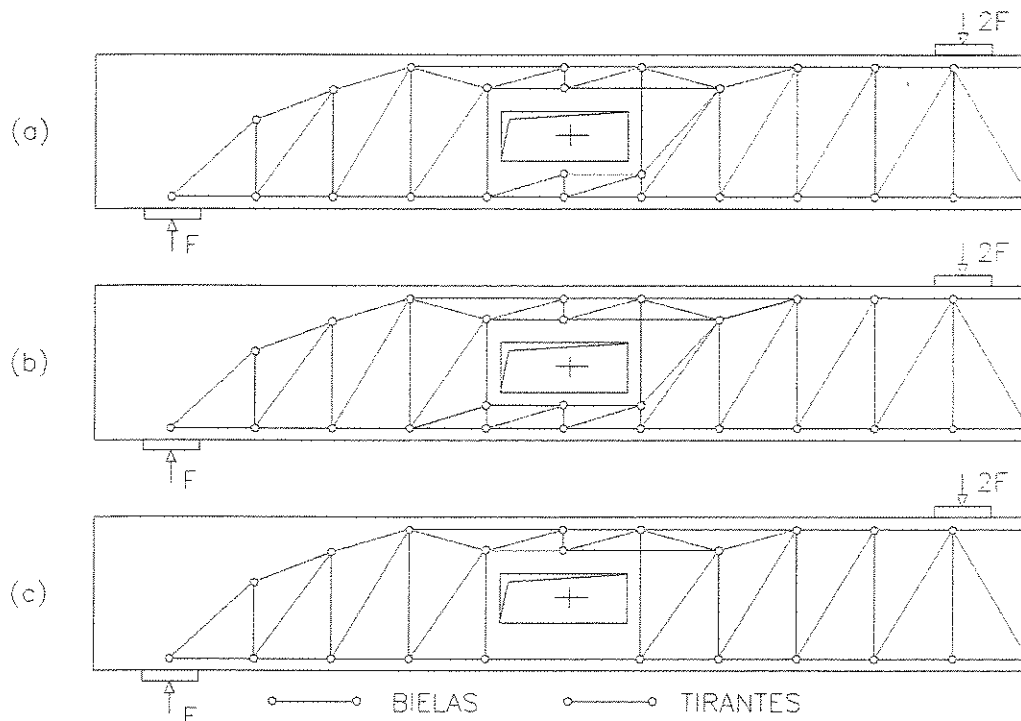


Figura 1.27 – Modelos bielas e tirantes

essa razão, pode-se admitir que somente o banco superior comprimido resista o esforço cortante e a armadura atue como um tirante. Assim, pode-se adotar $V_{sup} = V$ e $V_{inf} = 0$. Mansur, Tan e Lee⁵ recomendam dividir V em V_{sup} e V_{inf} na proporção das áreas das seções transversais dos bancos superior e inferior, respectivamente. Leonhardt e Mönig³ recomendam adotar $V_{sup} = (0,8 \text{ a } 0,9) V$ e $V_{inf} = (0,2 \text{ a } 0,1) V$. Estas situações correspondem aos modelos bielas e tirantes mostrados nas Figuras 1.27a e 1.27b. Süssekind⁸ sugere adotar $V_{sup} = V$ e $V_{inf} = 0,1V$ unicamente com a finalidade de conduzir, com esta última indicação, a uma armadura suplementar que assegure, indiretamente, limitação da fissuração do tirante. Lorentsen⁴ recomenda adotar $V_{sup} = V$ e $V_{inf} = 0$. Esta situação corresponde ao modelo bielas e tirantes mostrado na Figura 1.27c

O banco comprimido é dimensionado à flexo-compressão, na junção com a alma, para $M_{sup} = V_{sup} (a / 2)$ e $N_{sup} = C$. O banco tracionado é dimensionado à flexo-tração, na junção com a alma, para $M_{inf} = V_{inf} (a / 2)$ e $N_{inf} = T$.

No caso de admitir-se $V_{inf} = 0$, pode-se fazer $C = M/z$, atuando ao longo do eixo

do banzo comprimido, e $T = M/z$, aplicada ao nível da armadura longitudinal, com $z = d - h_{sup}/2$. Desta forma, o banzo superior comprimido deve ser dimensionado para $M_{sup} = V(a/2)$ e $N_{sup} = C$ e o banzo inferior tracionado deve ser dimensionado como um tirante para $M_{inf} = 0$ e $N_{inf} = T$.

Os banzos superior e inferior devem ter armaduras de cisalhamento dimensionadas em situação de flexão composta para V_{sup} e V_{inf} respectivamente. No caso de admitir-se $V_{inf} = 0$ a armadura transversal do banzo inferior será apenas construtiva e terá como finalidade àquela já comentada anteriormente.

Na alma, junto da abertura no lado afastado do apoio, deve ser colocada uma armadura de suspensão constituída por estribos. Leonhardt e Mönig³ recomendam que essa armadura suspenda $0,8V$. Süsskind⁸ sugere que ela suspenda V . A força cortante V aqui considerada é aquela determinada na seção $m-m$ que passa pelo centro da abertura. Junto da abertura, no lado do apoio, Leonhardt e Mönig³ aconselham o emprego de uma armadura construtiva formada por apenas um ou três estribos.

O uso de barras inclinadas de 45° junto dos cantos da abertura é recomendado por Leonhardt e Mönig³ para vigas grandes. Essas barras são recomendadas por Mansur, Tan e Lee⁵ e Nasser, Acavalos e Daniel⁶, para atenuar o efeito prejudicial da concentração de tensões na proximidade dos cantos da abertura ou para atuarem como armadura de suspensão inclinada em combinação com os estribos. Neste último caso, o esforço cortante a ser suspenso é dividido em duas partes, V_{90} e V_{45} , correspondentes aos estribos e às barras inclinadas, respectivamente. Em situação de projeto, as áreas das seções transversais dessas armaduras são $A_{s,90} = V_{90}/\sigma_{s,90}$ e $A_{s,45} = V_{45}/\sigma_{s,45}$, onde os valores de V_{90} , V_{45} , σ_{90} e σ_{45} são aqueles de cálculo. Para aplicação aos resultados desta Investigação, onde as armaduras são conhecidas, $V_{90} = A_{s,90} \sigma_{s,90}$ e $V_{45} = A_{s,45} \sigma_{s,45} / 2$.

Capítulo 2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho consiste no ensaio em laboratório de três vigas de concreto de alta resistência, uma com abertura longe do apoio e outras duas com abertura na região próxima ao apoio e carregamento constituído por uma força concentrada no meio do tramo.

O objetivo principal é analisar a influência da abertura e o comportamento das armaduras de suspensão e dos banzos comprimido e tracionado, na resistência ao cisalhamento, quando a abertura se aproxima do apoio, dando continuidade a outro trabalho já realizado, *Simões*⁷, na mesma linha sob mesma orientação, que abordou a presença de abertura longe do apoio. Espera-se que os resultados desta pesquisa se somem aos de outras investigações realizadas com objetivos semelhantes e possam contribuir com subsídios para orientação de como proceder diante do problema.

2.1 - DETALHES DAS VIGAS

Para os ensaios foram confeccionadas três vigas, denominadas de: VR-3, VR-4 e VR-5. As vigas tinham vão de 300 cm, seção I e alma com abertura retangular com as dimensões indicadas nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3. Em um dos semi tramos, as vigas tinham abertura retangular com 10 cm de altura e 25 cm de comprimento. Aproximou-se a abertura do apoio ficando o centro desta a 75 cm do apoio na viga VR-3, 45 cm na viga VR-4 e 30 cm na viga VR-5. As distâncias escolhidas são múltiplas de 15 cm em função do espaçamento entre os estribos.

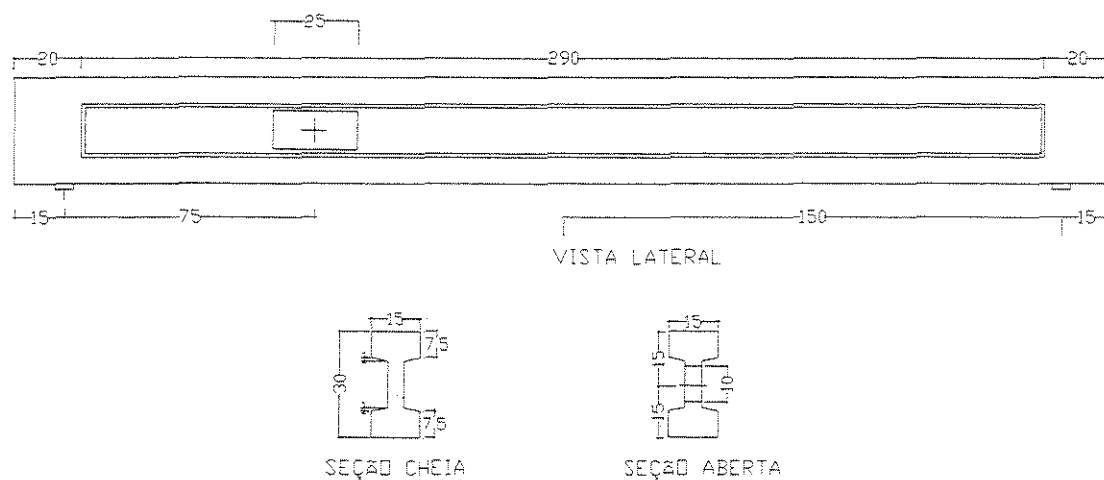


Figura 2.1 – Dimensões da viga VR-3 com centro da abertura a 75 cm ($> 2h$) do apoio

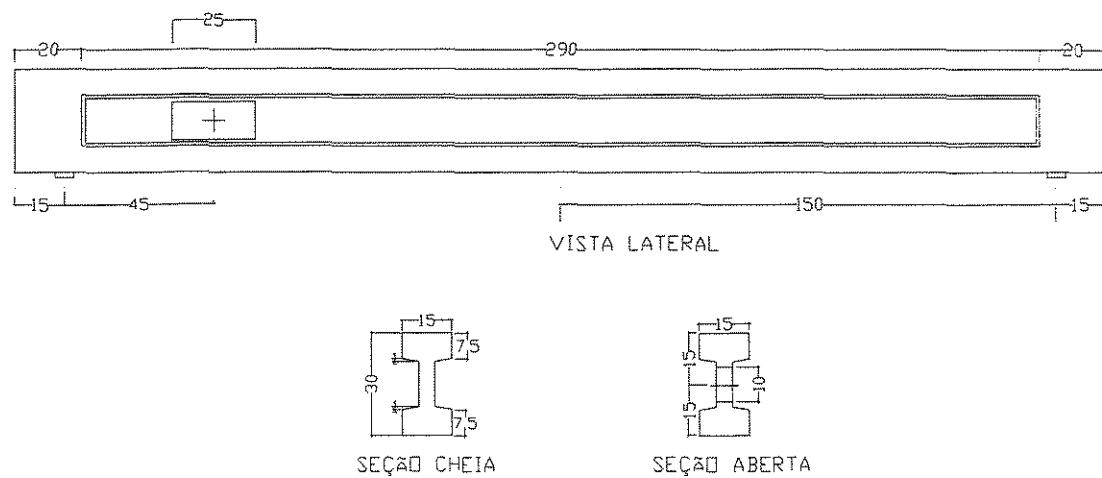


Figura 2.2 – Dimensões da viga VR-4 com centro da abertura a 45 cm ($< 2h$) do apoio

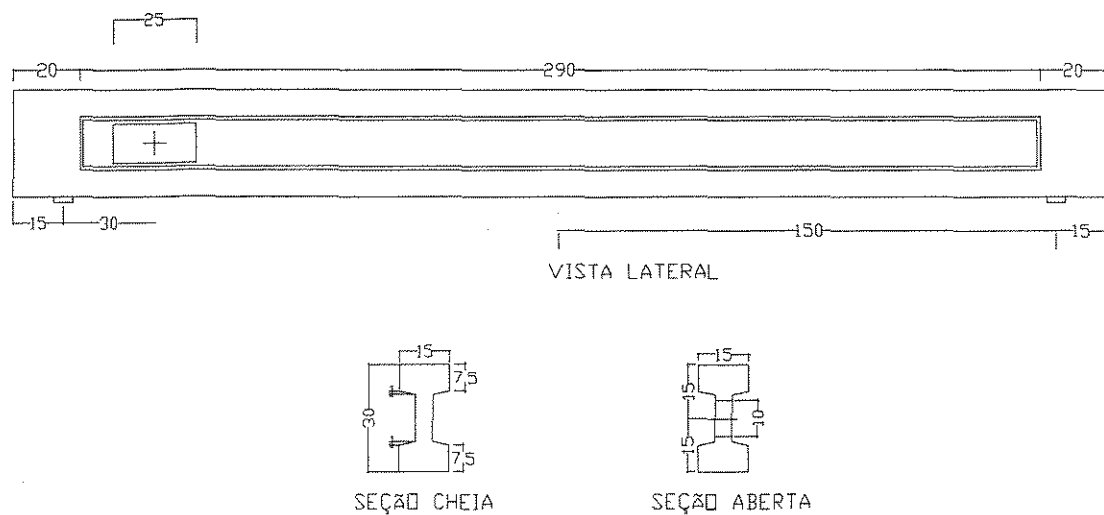


Figura 2.3 – Dimensões da viga VR-5 com centro da abertura a 30 cm ($= h$) do apoio

2.2 – INSTRUMENTAÇÃO, EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E SISTEMA DE APOIO

O sistema de aplicação de carga utilizado, foi um pórtico metálico fixado à laje de reação do Laboratório de Estruturas da UNICAMP, como mostra a figura 2.4.

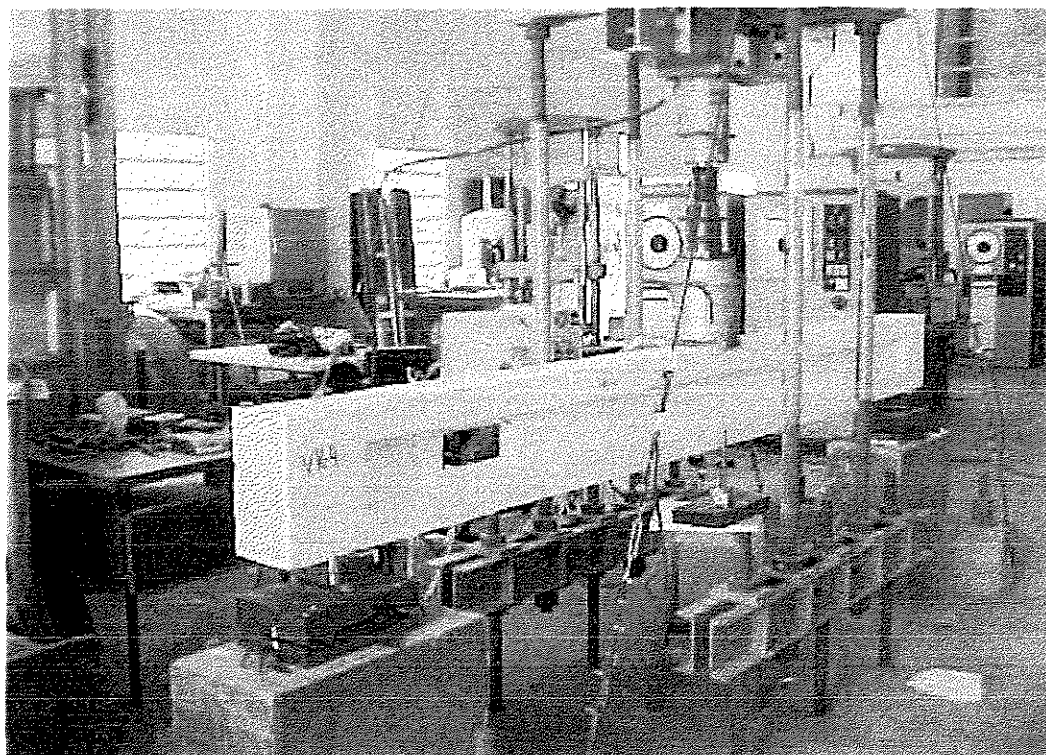


Figura 2.4 – Pórtico onde as vigas foram ensaiadas

Para os apoios foram usados dois blocos de concreto, fixados à laje de reação por porcas e parafusos.

O controle de cargas aplicadas durante o ensaio era feito por aquisitor de dados, conectada a uma célula de carga, pelo qual era controlada a operação manual de bombeamento de óleo no cilindro hidráulico.

Sobre cada um dos blocos de concreto, estava colocado um aparelho de apoio, constituído por um conjunto de chapas de aço e roletes, que permitiam rotação e translação somente no sentido de se afastarem um do outro, figura 2.5. Esses apoios

foram usados pelo fato de serem esperadas deformações relativamente grandes nas vigas.

Essa montagem permitia que o alongamento da viga, se repartisse entre os dois apoios, e que o macaco hidráulico permanecesse sempre na vertical

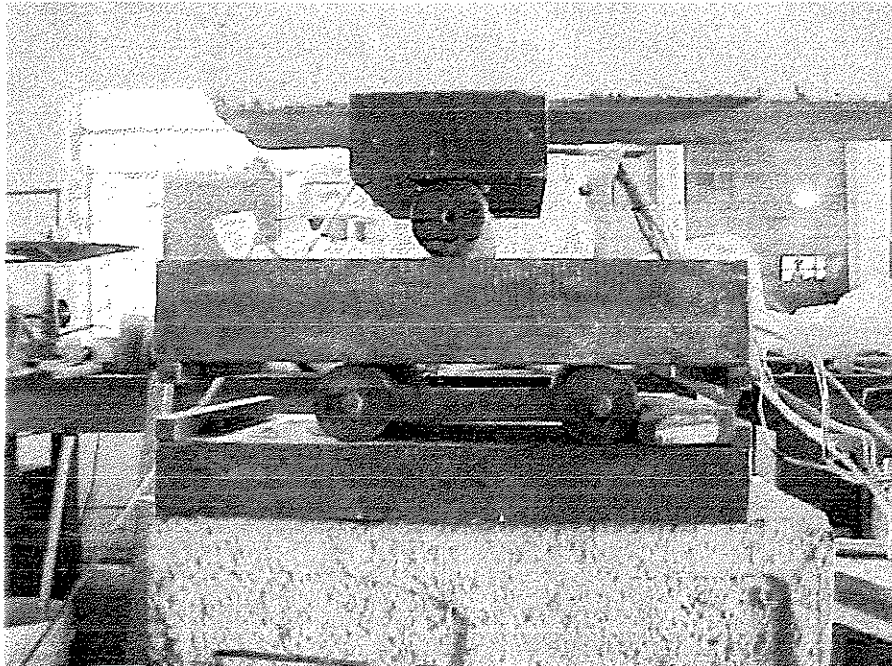


Figura 2.5 – Sistema de apoio utilizado nos ensaios

Para medição das deformações nas armaduras foram utilizados extensômetros elétricos conectados ao aquisitor de dados.

As deformações no concreto foram medidas com extensômetro mecânico Tensotast-Huggenberger com sensibilidade de 0,001 mm e base de medida de 50 mm.

Os deslocamentos foram medidos por defletômetro mecânico, instalado no meio do vão das vigas, como mostra a figura 2.6

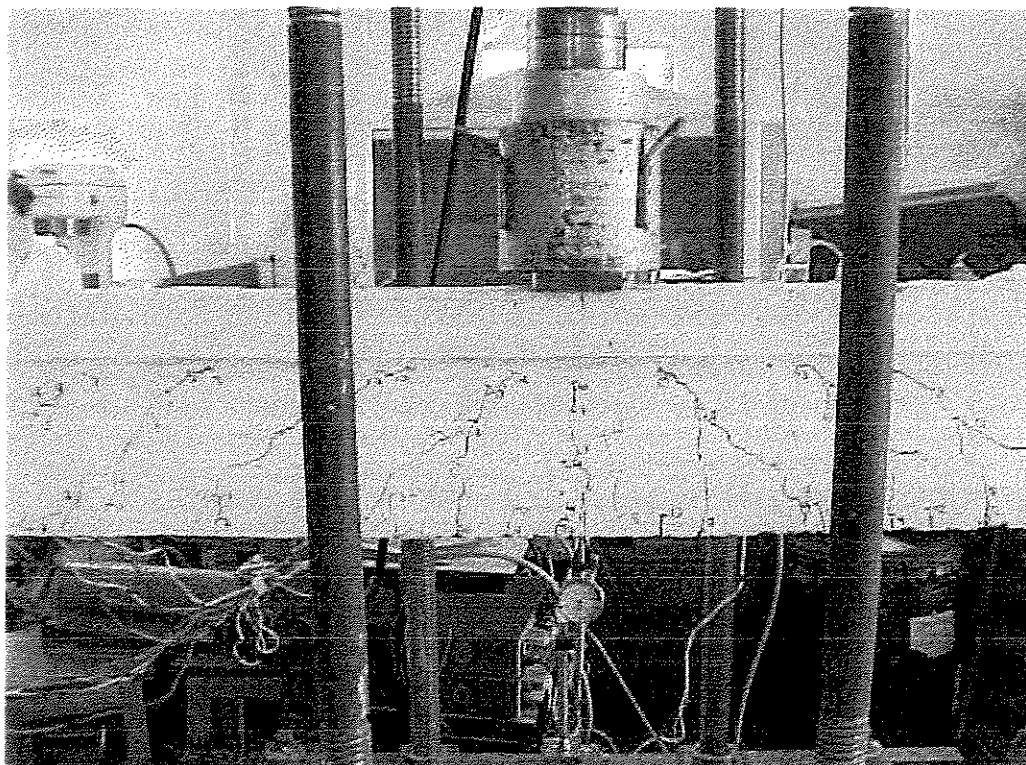


Figura 2.6 – Defletômetro instalado no meio do vão para medida da flecha

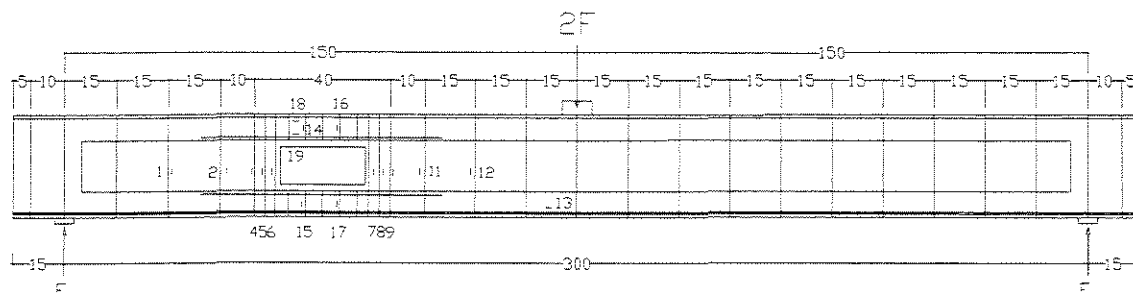
2.2.1 POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS

2.2.1.1 – VR-3

Na viga VR-3 foram instalados 17 extensômetros ao longo da armadura da viga nas seguintes posições :

- 4, 5 e 6 na armadura de suspensão da abertura próxima ao apoio;
- 7, 8 e 9 na armadura de suspensão da abertura próxima à carga;
- 14 e 16 na armadura de cisalhamento sobre a abertura;
- 15 e 17 na armadura de cisalhamento sob a abertura;
- 1 e 2 nos estribos do lado da abertura próximo ao apoio;

A figura 2.7 mostra os posicionamentos dos extensômetros na viga VR – 3.



As bases de medidas das deformações no concreto da viga VR-3 estão apresentadas na figura 2.8

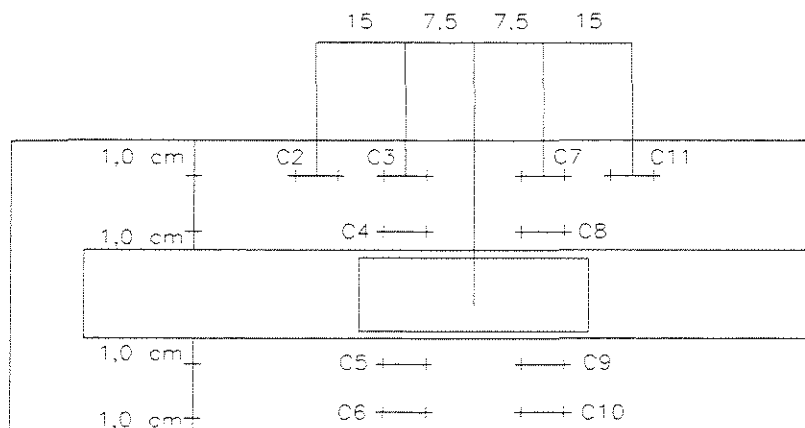


Figura 2.8 Bases de medidas para as deformações no concreto na viga VR-3

2.2.1.2 – VR-4

Na viga VR-4 foram instalados 12 extensômetros ao longo da armadura da viga, nas seguintes posições :

- 1, 2 e 3 na armadura de suspensão da abertura próxima ao apoio;
- 4, 5 e 6 na armadura de suspensão da abertura próxima à carga;
- 13 no estribo do lado da abertura próximo ao apoio;
- 10 no estribo do lado da abertura próximo a carga aplicada;
- 11 e 12 na armadura de flexão principal sob a aplicação da carga;
- 7 e 8 na armadura longitudinal sobre a abertura;
- 9 na armadura longitudinal sob a abertura.

A figura 2.9 mostra os posicionamentos dos extensômetros na viga VR – 4.

Para as vigas VR-4 e VR-5 a quantidade de extensômetros utilizados foi menor que na viga VR-3, pois a armadura de cisalhamento situada acima e abaixo da abertura e os estribos mais afastados da abertura eram pouco solicitados dispensando instrumentação.

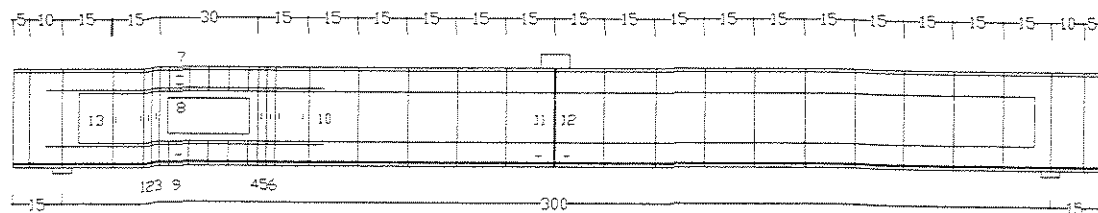


Figura 2.9 – Posições dos extensômetros na viga VR-4

2.2.1.3 – VR-5

Na viga VR-5 foram instalados 14 extensômetros ao longo da armadura da viga, nas seguintes posições :

- 1, 2 e 3 na armadura de suspensão da abertura próxima ao apoio;
- 4, 5 e 6 na armadura de suspensão da abertura próxima à carga;
- 10 no estribo do lado da abertura próximo a carga aplicada;
- 13 na barra inclina próxima ao apoio;
- 14 na barra inclina próxima a carga aplicada;
- 11 e 12 na armadura de flexão principal sob a aplicação da carga;
- 7 e 8 na armadura longitudinal sobre a abertura;
- 9 na armadura longitudinal sob a abertura.

A figura 2.10 mostra os posicionamentos dos extensômetros na viga VR – 5.

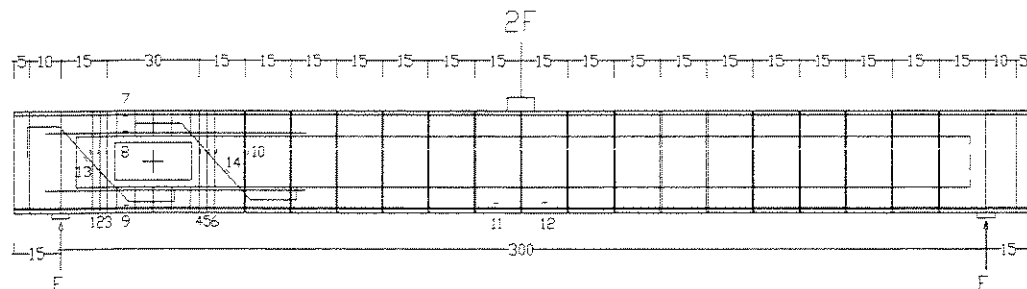


Figura 2.10 – Posições dos extensômetros na viga VR-4

2.3 – CARREGAMENTO

O carregamento foi constituído por uma força concentrada aplicada no meio do tramo. Essa força foi aplicada com um macaco hidráulico ligado a uma célula de carga, que se apoiava sobre uma placa de aço de 100 mm de largura, situada sobre a face superior da viga. A carga era aplicada em incrementos de 10kN. Para cada estágio de carga eram feitas leituras das deformações e dos deslocamentos verticais. A fissuração era observada a cada incremento e marcada com tinta sobre a superfície do concreto.

2.4 – DETALHES DAS ARMADURAS

As armaduras de suspensão adotadas na região da abertura nas vigas VR-3 e VR-4 foram constituídas por três estribos de 4,2 mm de diâmetro, em cada lado da abertura. Na viga VR-5 foram adicionadas duas barras de 5,0 mm de diâmetro dispostas a 45 °, de cada lado da abertura, mais detalhes serão apresentados nos itens 2.4.1 a 2.4.3.

2.4.1- VR-3

A primeira viga ensaiada teve como finalidade a continuidade de outro trabalho já desenvolvido nesta Universidade. No outro trabalho uma viga similar a esta foi ensaiada, e nela foi utilizada uma armadura complementar, constituída por barras inclinadas, em cada lado da abertura, a fim de conter as deformações nos cantos da abertura. Essa armadura era constituída de duas barras inclinadas de cada lado, de aço CA-60, de 5,00 mm de diâmetro dispostas a 45° com o banzo tracionado na direção da

tração. Os detalhes das armaduras e esquema carregamento da viga ensaiada por Simões⁷, VR-2, encontram-se na figura 2.11.

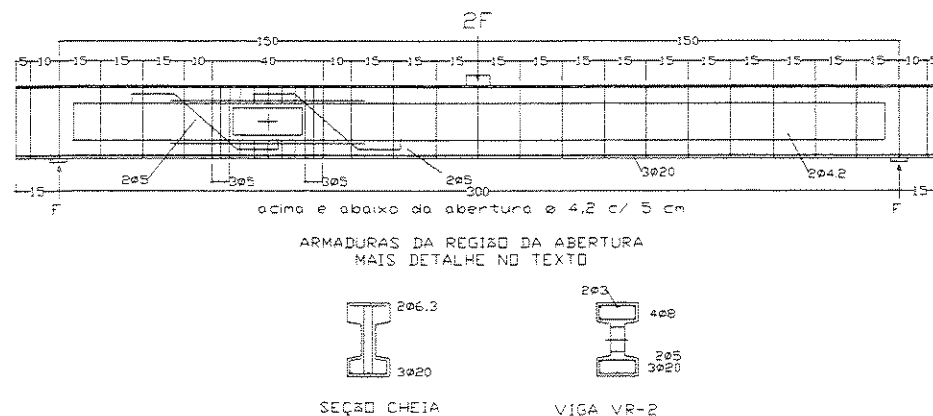


Figura 2.11 – Detalhes da viga VR-2 ensaiada por Simões⁷

Neste novo experimento as barras inclinadas foram retiradas, a fim de se verificar se somente os estribos de suspensão são suficientes para que a ruptura se dê por flexão. A armadura longitudinal da viga VR-3 era composta por três barras de aço CA-50 com 20 mm de diâmetro. A armadura transversal era formada por estribos de aço CA-60 com diâmetro de 4,2 mm e 15 cm de espaçamento. Em cada lado da abertura havia uma armadura de suspensão composta por três estribos de dois ramos, de aço CA-60, com 5,0 mm de diâmetro e 2,5 cm de espaçamento, com finalidade de suspender a totalidade de V, figura 2.12. O centro da abertura encontra-se a 75 cm do apoio mais próximo, figura 2.12.

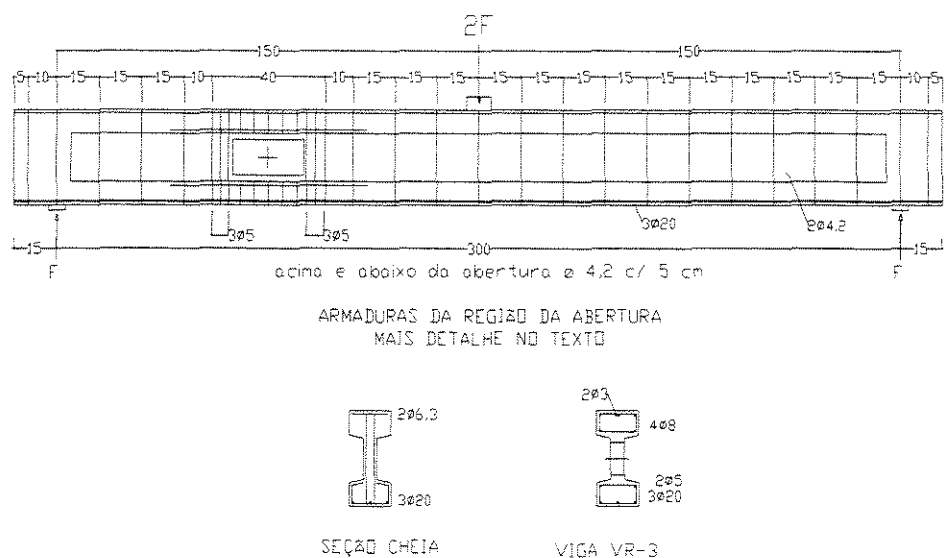


Figura 2.12 – Detalhes da armadura da viga VR-3

2.4.2- VR-4

Na segunda viga ensaiada, VR-4, a abertura foi colocada mais próxima ao apoio, estando o centro da abertura a 45 cm do apoio mais próximo. Foi mantida a mesma armadura da viga VR-3. A figura 2.13 mostra detalhes da armadura.

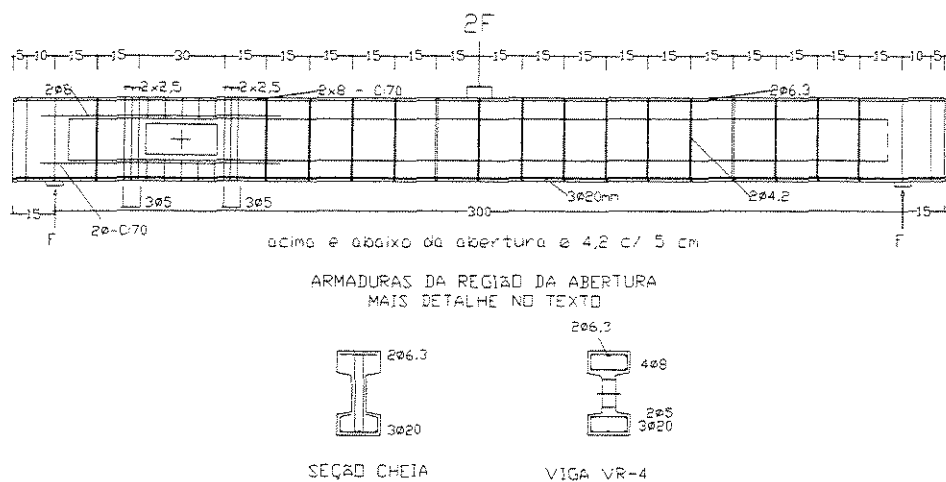


Figura 2.13 – Detalhes da armadura da viga VR-4

2.4.3- VR-5

Na terceira viga ensaiada, VR-5, a abertura foi colocada ainda mais próxima ao apoio, estando o centro da abertura a 30 cm do apoio mais próximo. À armadura da viga anterior (VR-4), foram adicionadas duas barras inclinadas de cada lado da abertura, de aço CA-60 de 5,00 mm de diâmetro dispostas a 45° e sobre a abertura os estribos simples foram trocados por estribos duplos de mesmo diâmetro que os anteriores. A figura 2.14 mostra detalhes da armadura.

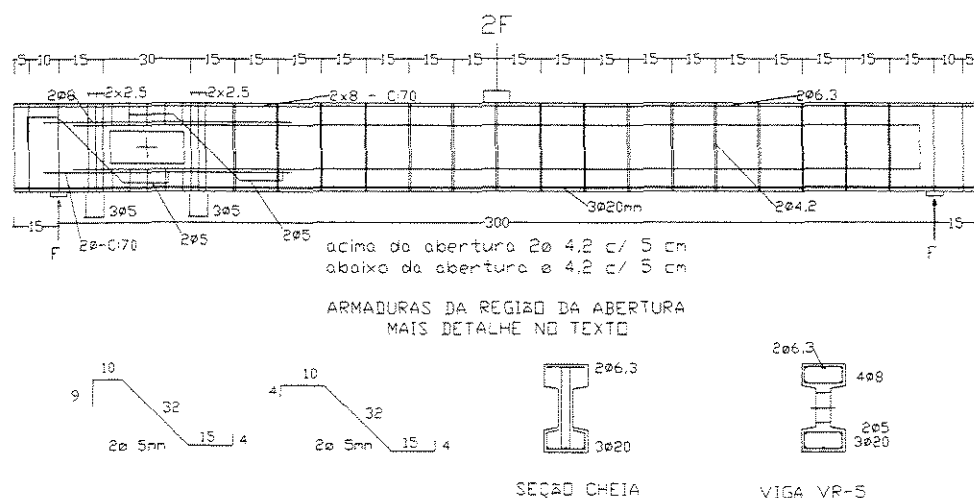


Figura 2.14 – Detalhes da armadura da viga VR-5

2.5 - MATERIAIS UTILIZADOS

O concreto empregado nesta investigação era composto por cimento CPV-ARI-Plus, sílica ativa (10% em peso em relação ao cimento), areia, pedrisco (10% do agregado graúdo), brita 1 (90% do agregado graúdo), água e superplastificante.

A dosagem do concreto usado foi 1:1,12:1,71 em peso, referido à soma de cimento e sílica ativa, com relação água/material cimentício igual a 0,31.

A resistência média à compressão aos 28 dias foi em torno de 80 MPa.

Durante a execução das vigas foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura que foram curados nas mesmas condições das vigas.

2.5.1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS

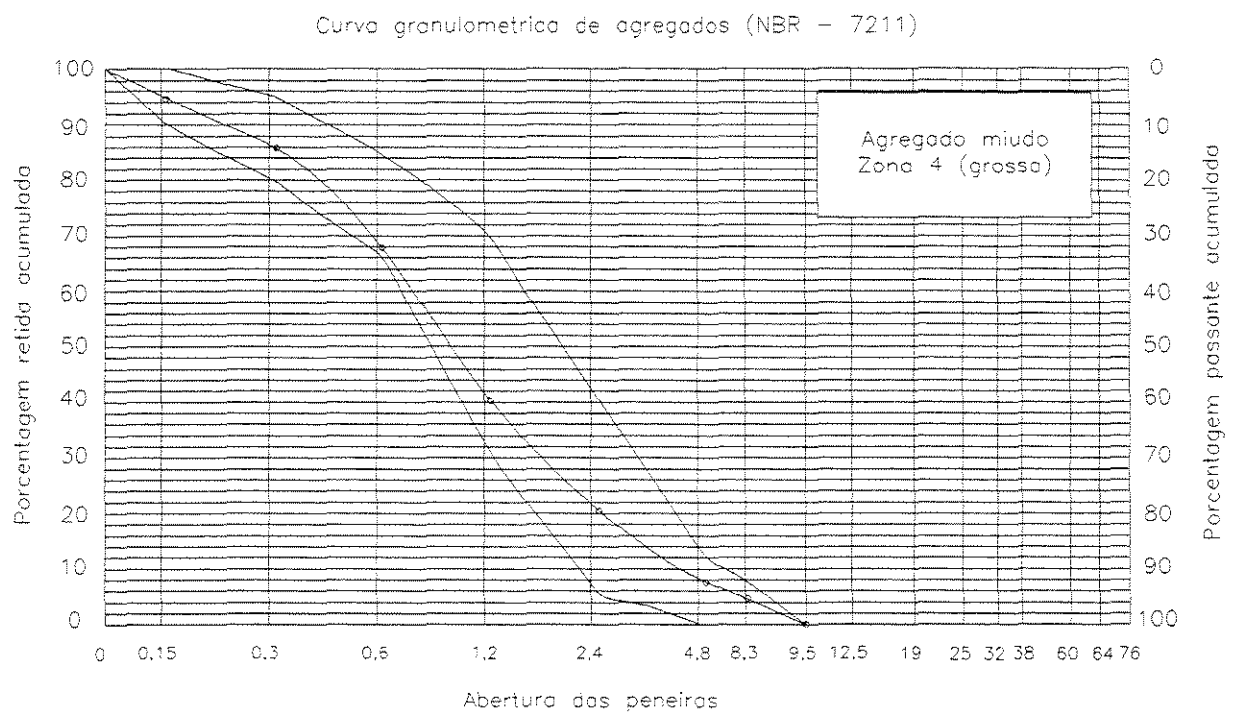


Figura 2.15 Curva granulométrica areia

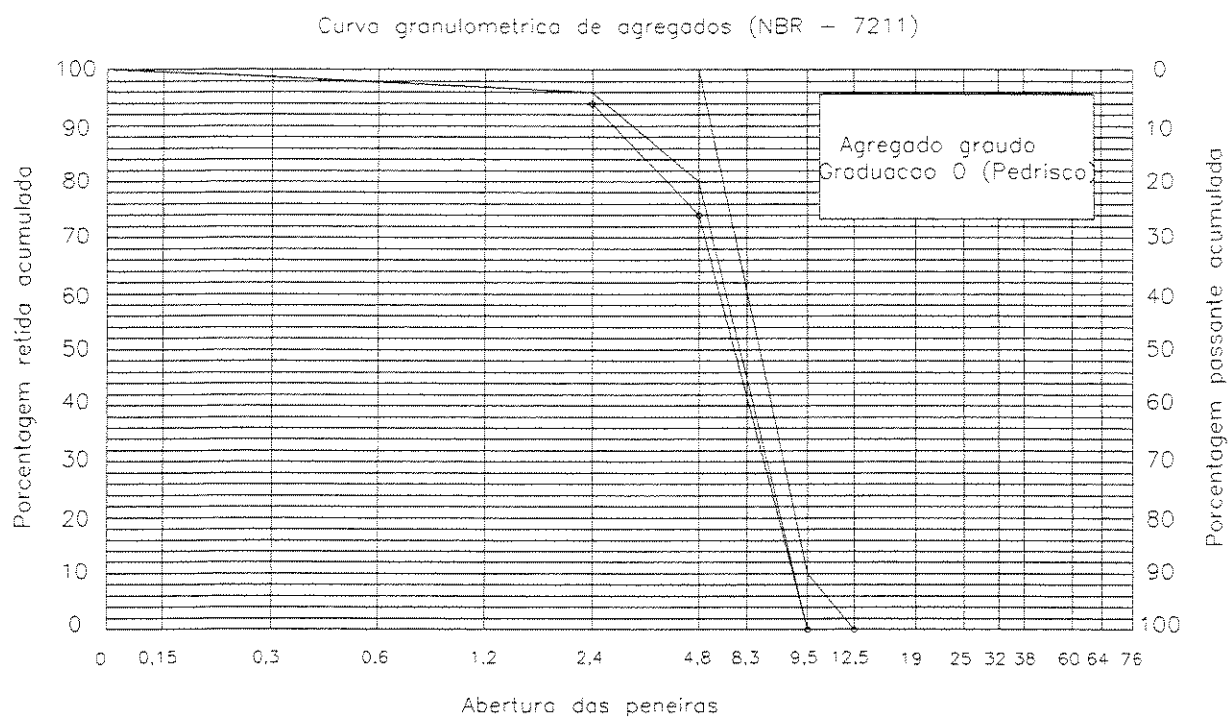


Figura 2.16 Curva granulométrica pedrisco

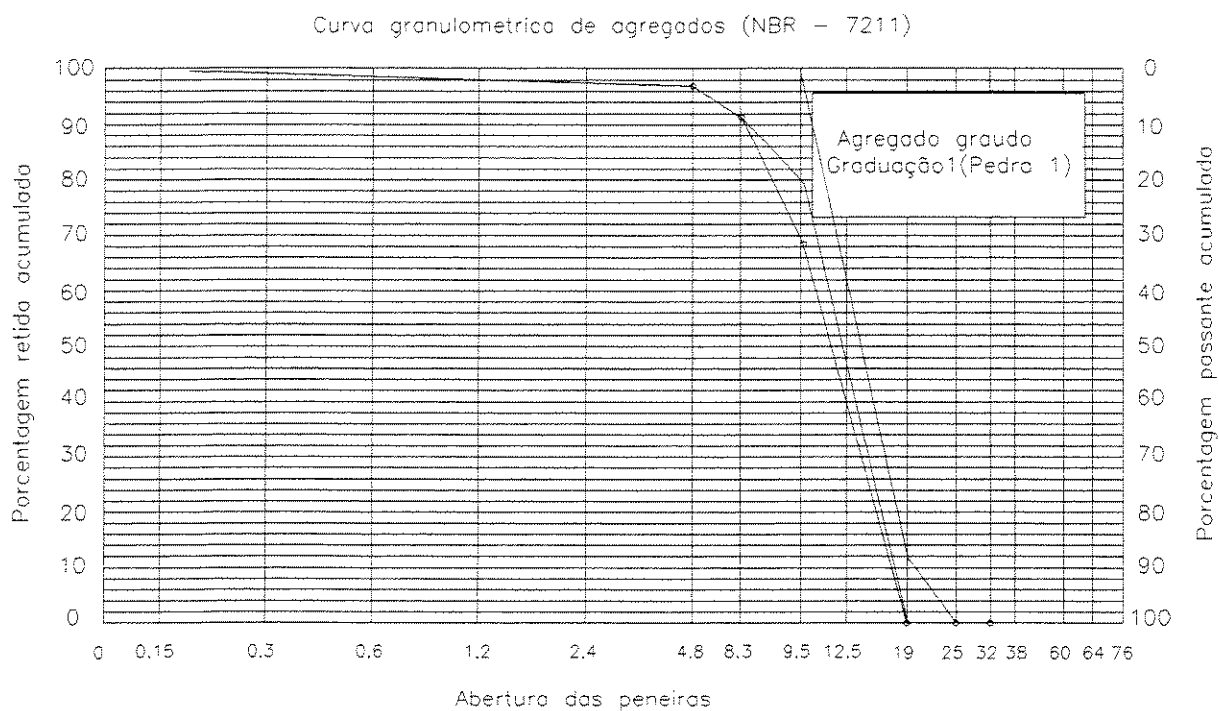


Figura 2.17 Curva granulométrica pedra 1

2.5.2 – DIAGRAMAS TENSÃO x DEFORMAÇÃO

Os diagramas tensão-deformação das barras de 8,0 e 20,0 mm são os mesmos para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5. As barras de 4,2 e 5,0 mm foram retiradas de lotes diferentes para a viga VR-4 e VR-5, não possuindo o mesmo diagrama tensão-deformação da viga VR-3.

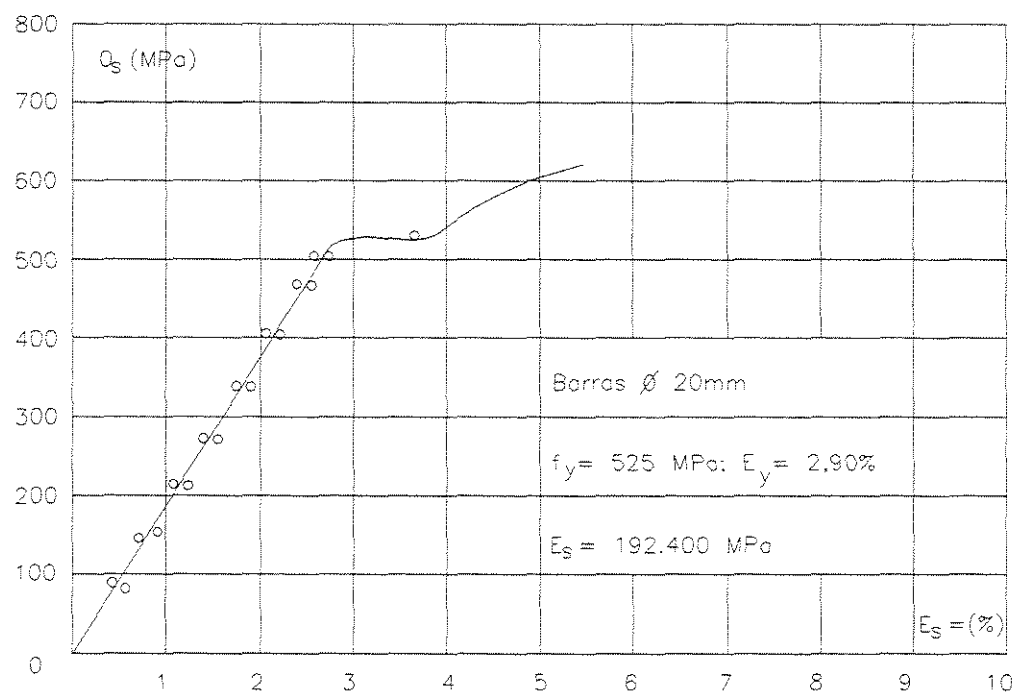


Figura 2.18 Diagrama tensão-deformação ϕ 20,0 mm VR-3/VR- 4/VR-5

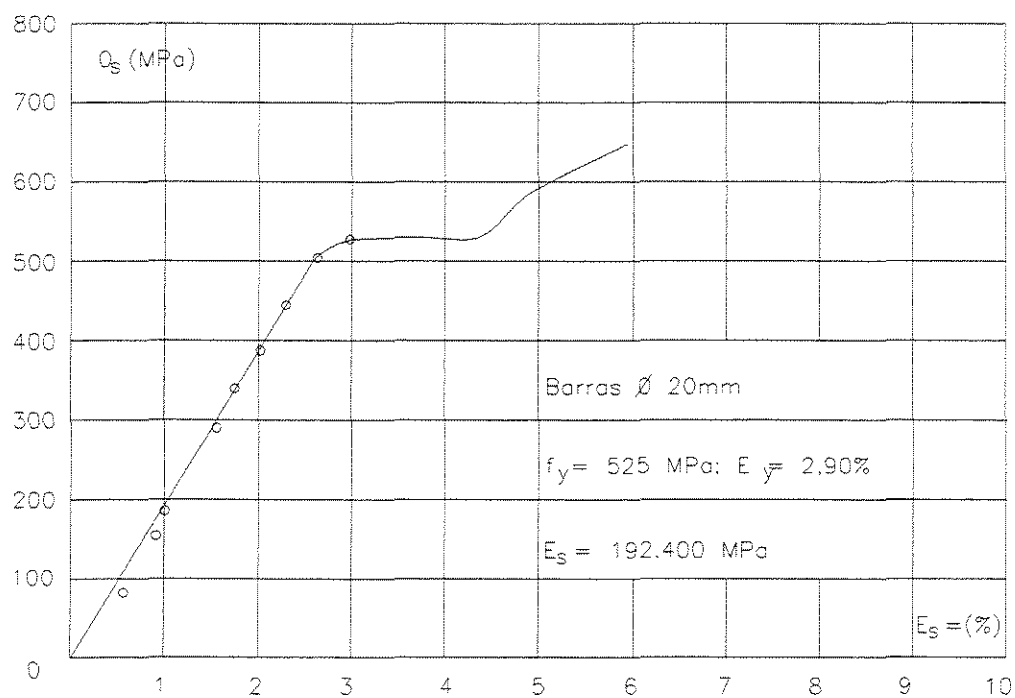


Figura 2.19 Diagrama tensão-deformação ϕ 8,0 mm VR-3/VR-4/VR-5

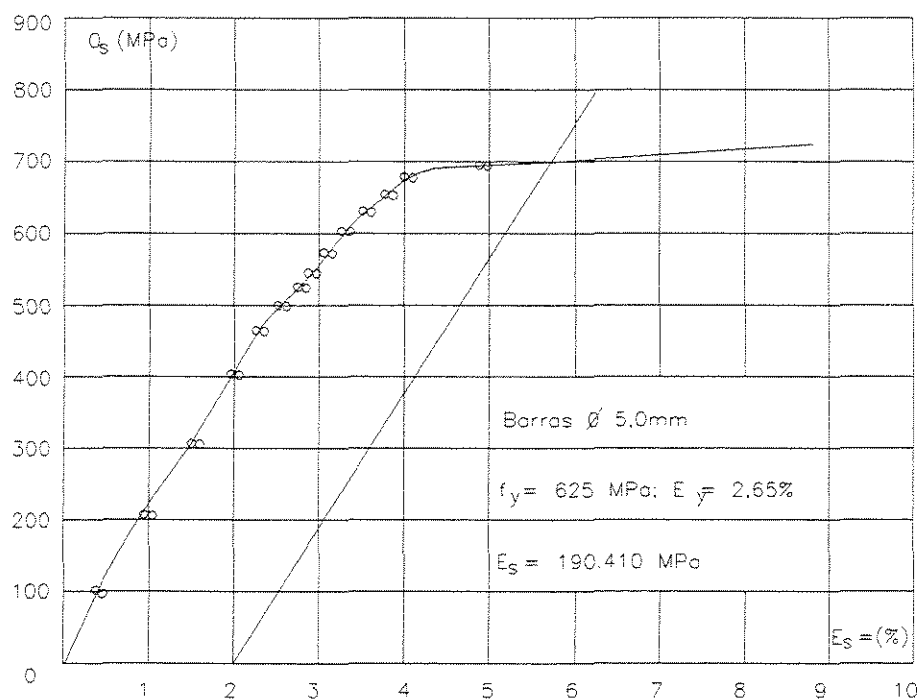


Figura 2.20 Diagrama tensão-deformação ϕ 5,0 mm VR-3

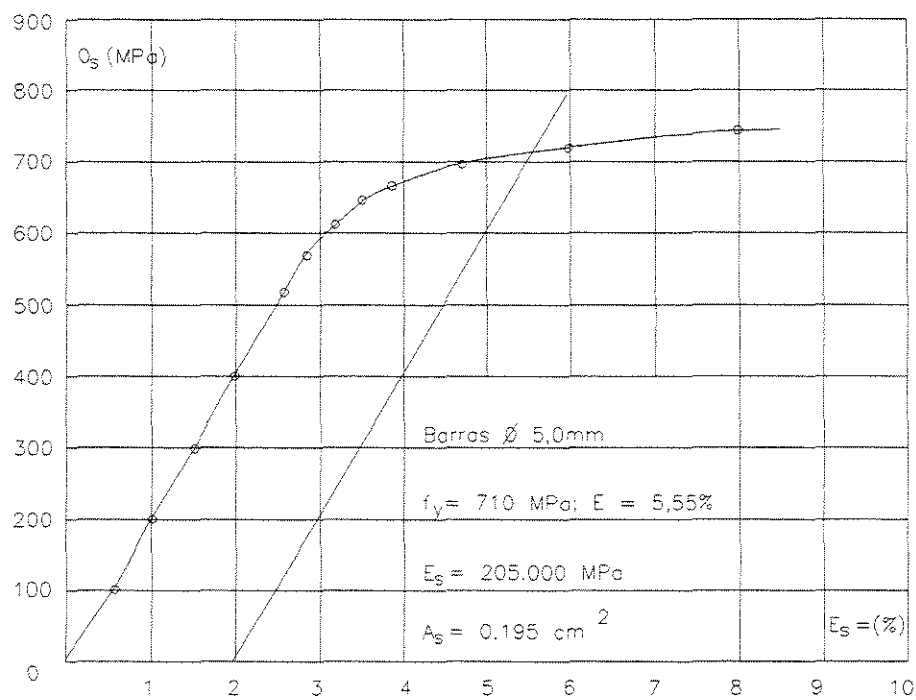


Figura 2.21 Diagrama tensão-deformação ϕ 5,0 mm VR-4 / VR-5

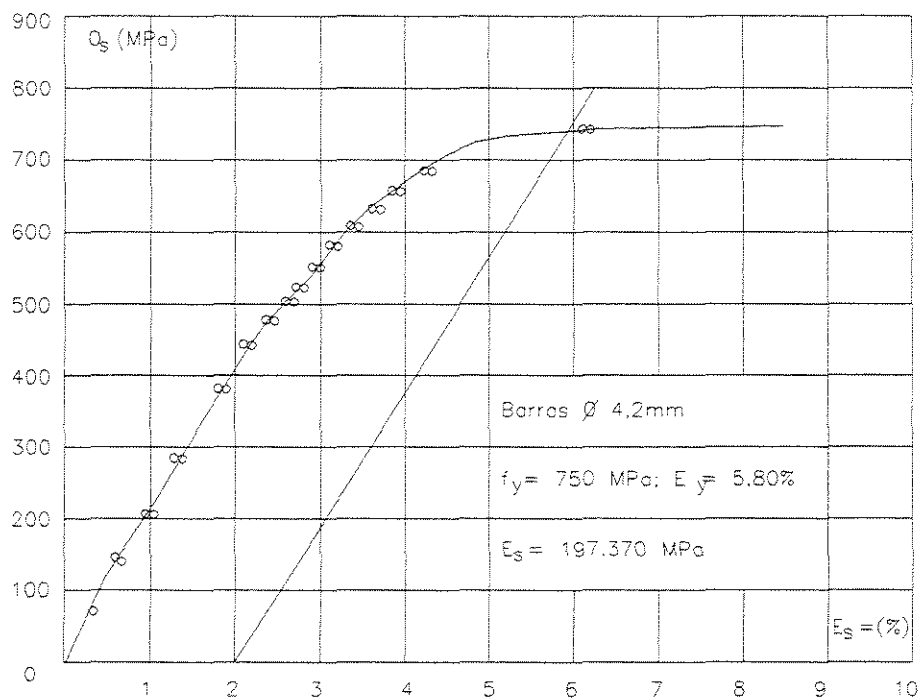


Figura 2.22 Diagrama tensão-deformação ϕ 4,2 mm VR-3

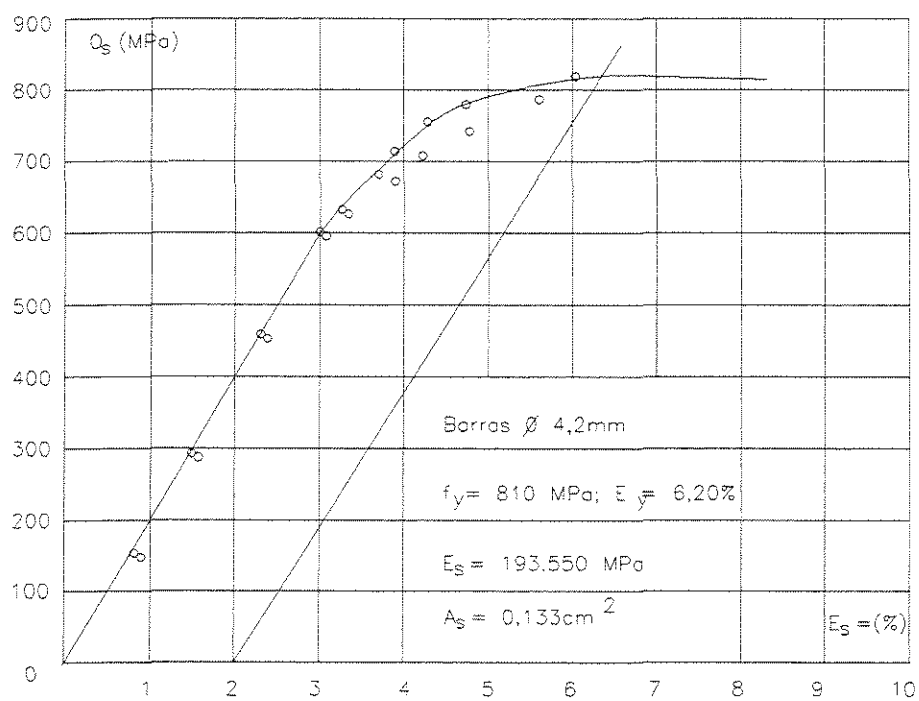


Figura 2.23 Diagrama tensão-deformação $\phi 4,2\text{ mm}$ VR-4 / VR-5

Capítulo 3 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais das vigas ensaiadas.

3.1 – RESULTADOS DA VIGA VR-3

Na viga VR-3 o escoamento da armadura longitudinal se deu com carga total igual a 170 kN e a ruptura do concreto com 190 kN.

Na região da abertura a armadura de suspensão mais solicitada foi aquela situada junto da abertura no lado da carga. Na carga ultima as tensões nos estribos 7, 8 e 9 foram de 640 MPa, 625 MPa e 498 MPa, respectivamente e as deformações foram de 3,36 ‰, 3,28 ‰ e 2,62 ‰, respectivamente.

A armadura de suspensão no lado do apoio foi menos solicitada, ou seja, no lado onde acontece a dissipação do fluxo dos esforços que ultrapassam a abertura pelos banzos superior e inferior. Na carga ultima as tensões nos estribos 4, 5 e 6 foram de 453 MPa, 532 MPa e 323 MPa, respectivamente e as deformações foram de 2,38 ‰, 2,79 ‰ e 1,70 ‰, respectivamente.

O banzo sobre a abertura esteve comprimido e sob flexão. As deformações medidas no concreto revelaram menor encurtamento nas extremidades esquerda superior e direita inferior e maior encurtamento nas extremidades esquerda inferior e direita superior. Neste banzo, o encurtamento da armadura longitudinal foi menor nas barras superiores, com tensão de -50 MPa e deformação de -0,26 ‰, e maior nas barras inferiores, com tensão de -144 MPa e deformação de -0,75 ‰ ao ser atingida a carga última. Os estribos desse banzo estiveram o tempo todo tracionados e a tensão máxima foi de 13 MPa para a carga final.

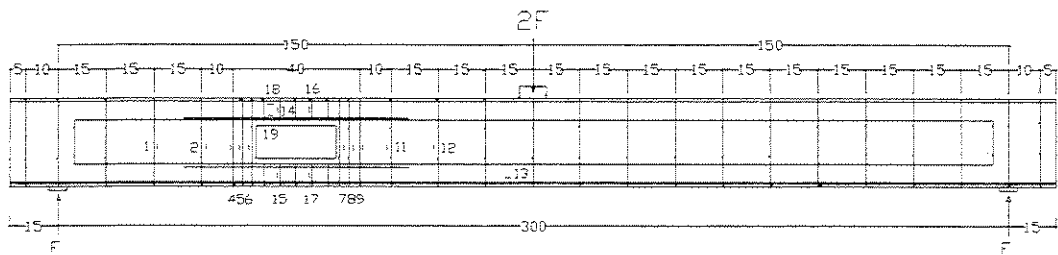
No banzo sob a abertura, as medidas de deformação do concreto em alguns momentos registraram encurtamento. Nos estribos, o extensômetro 15 não funcionou e o 17 indicou tensão de 79 MPa.

Os gráficos de tensão x deformação das armaduras estão nas figuras de 3.1 a 3.17 e as deformações no concreto nas figuras 3.18 e 3.19.

A determinação da resistência à compressão do concreto foi feita ensaiando três corpos-de-prova submetidos a compressão axial. A resistência média à compressão encontrada foi $f_c = 71,7$ MPa.

Para a carga de 170 MPa, a flecha no meio do vão foi de 18,54 mm. A evolução da flecha em função da carga encontra-se na figura 3.20.

As figuras 3.21a, 3.21b e 3.21c mostram panoramas da fissuração da viga VR-3 ensaiada.



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	1	1	2	2	4	10	10	12	45	255	318	387	577	660	695	720	750	760

$f_{yw} = 750 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 1

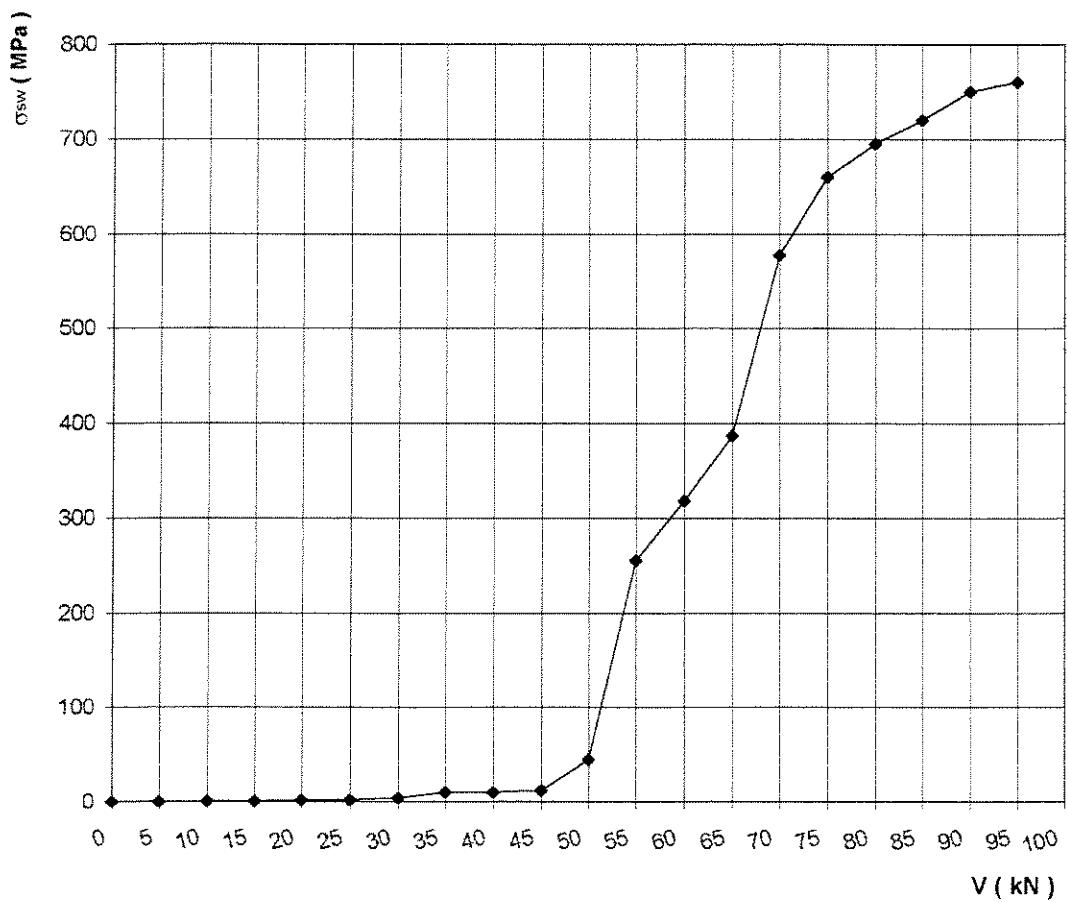
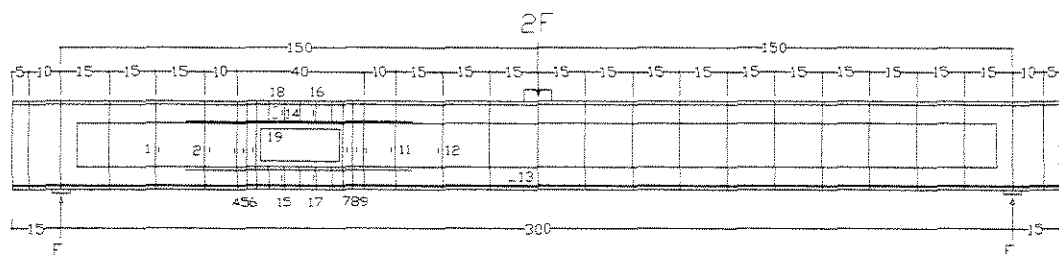


Figura 3.1 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 1 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	4	5	7	10	13	52	102	161	342	452	508	562	570	580	615	635	660	680

$f_{yw} = 750 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 2

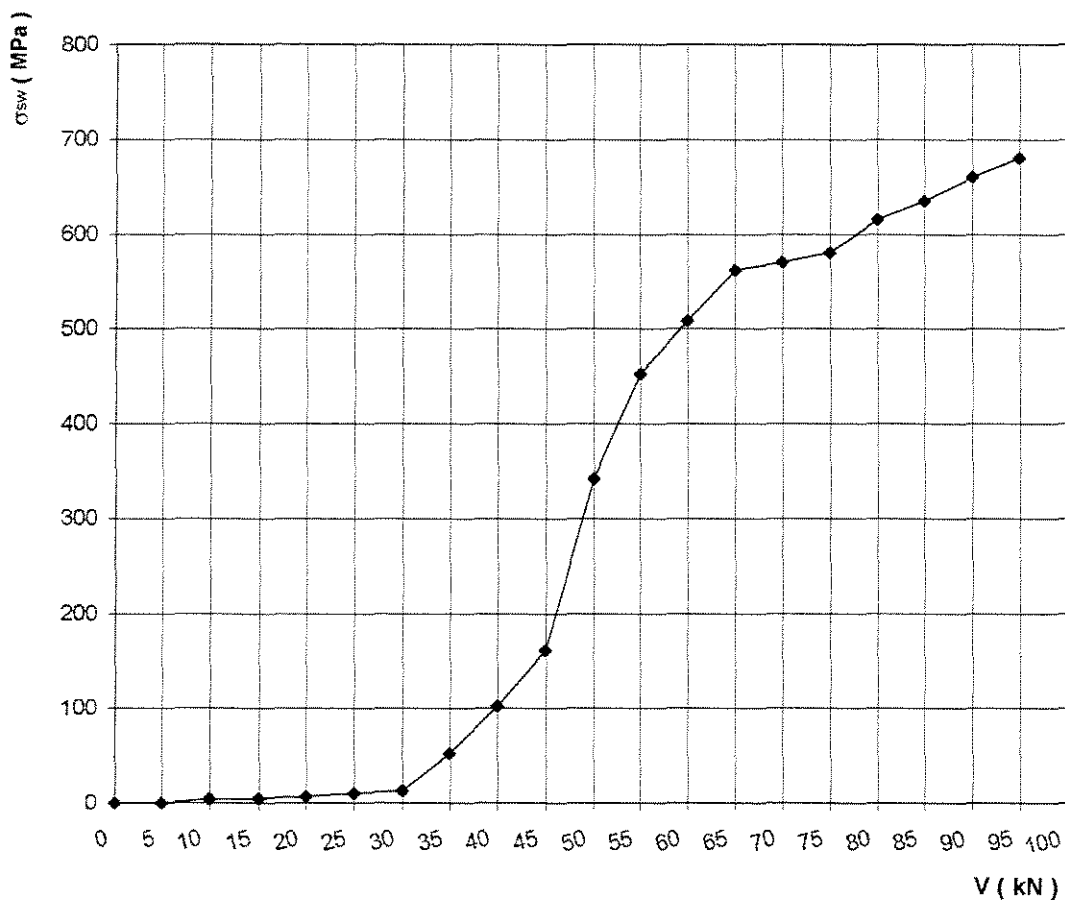
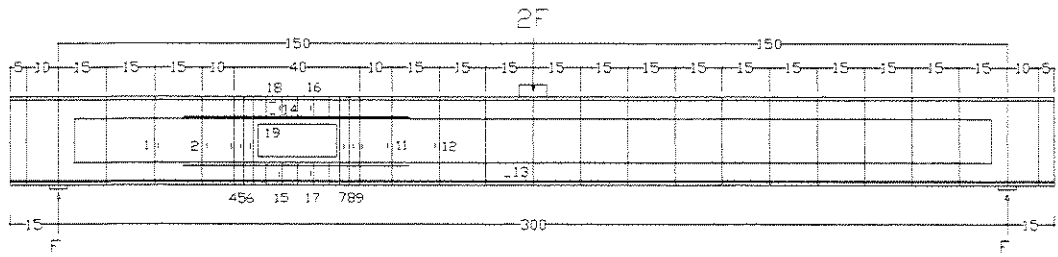


Figura 3.2 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 2 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	1	-1	-1	0	1	6	107	157	193	202	225	246	271	302	325	351	375	413	453

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 4

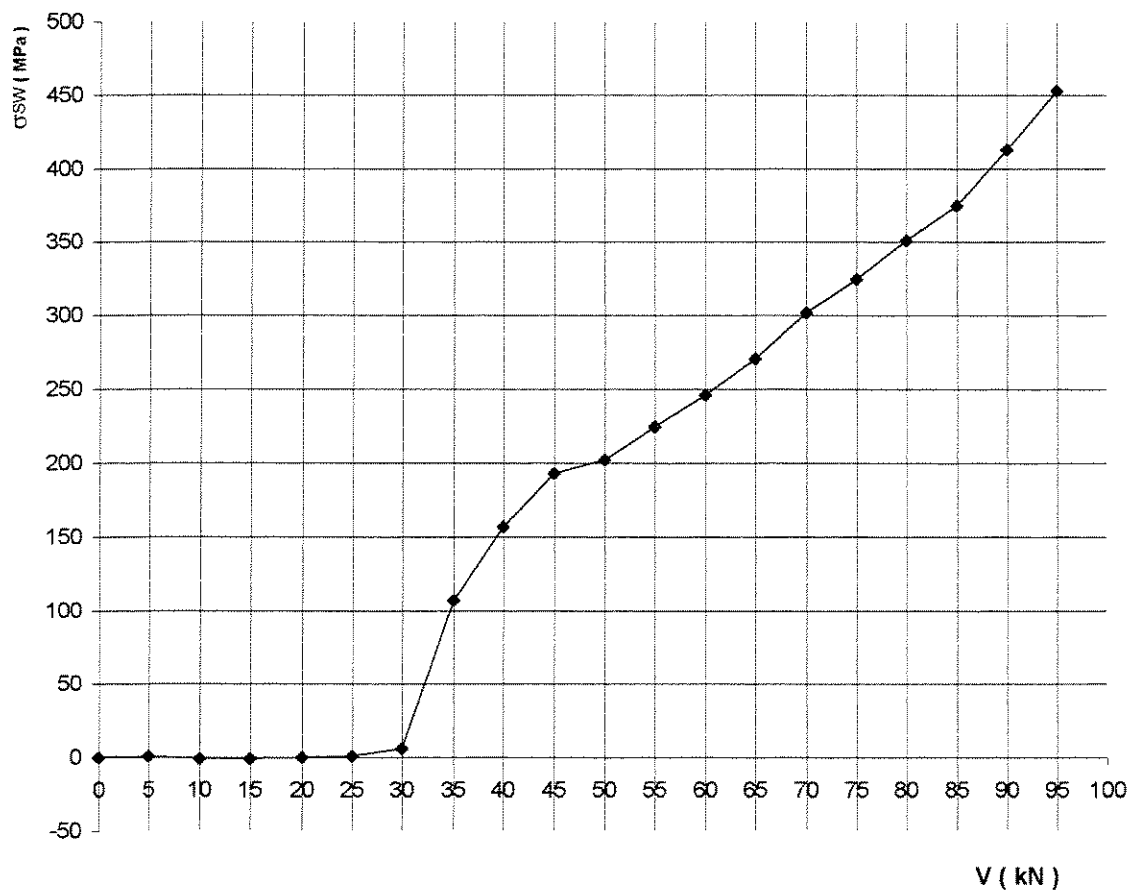
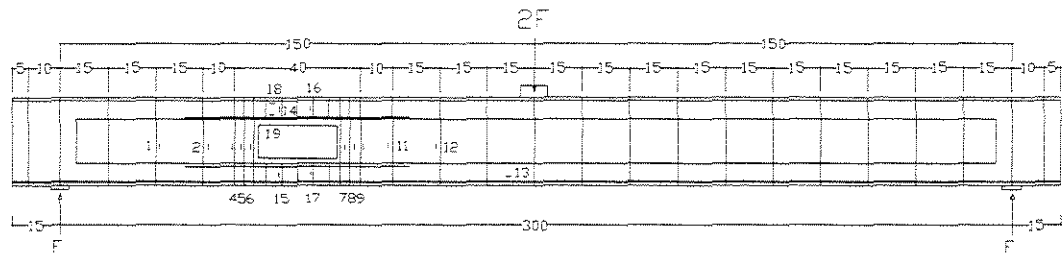


Figura 3.3 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 4 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	-7	-10	-12	-14	-14	146	199	204	211	217	213	256	292	317	352	382	459	532

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 5

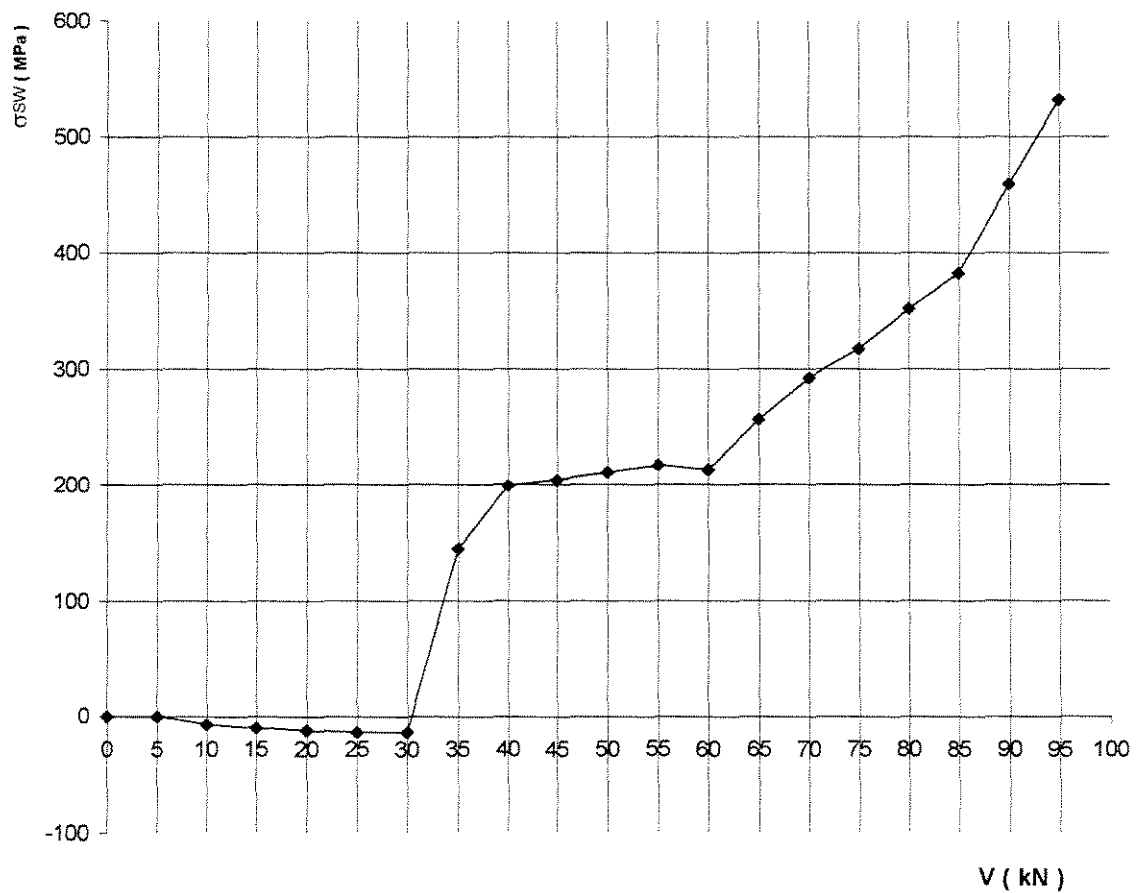
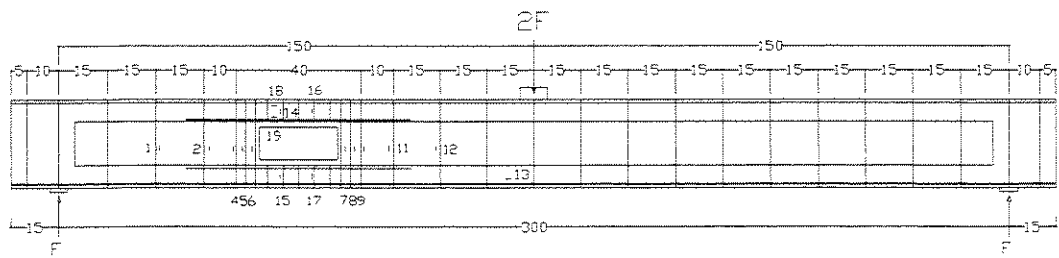


Figura 3.4 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 5 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	-1	-12	-17	-22	-26	-29	12	31	52	82	97	116	147	185	211	239	265	294	323

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 6

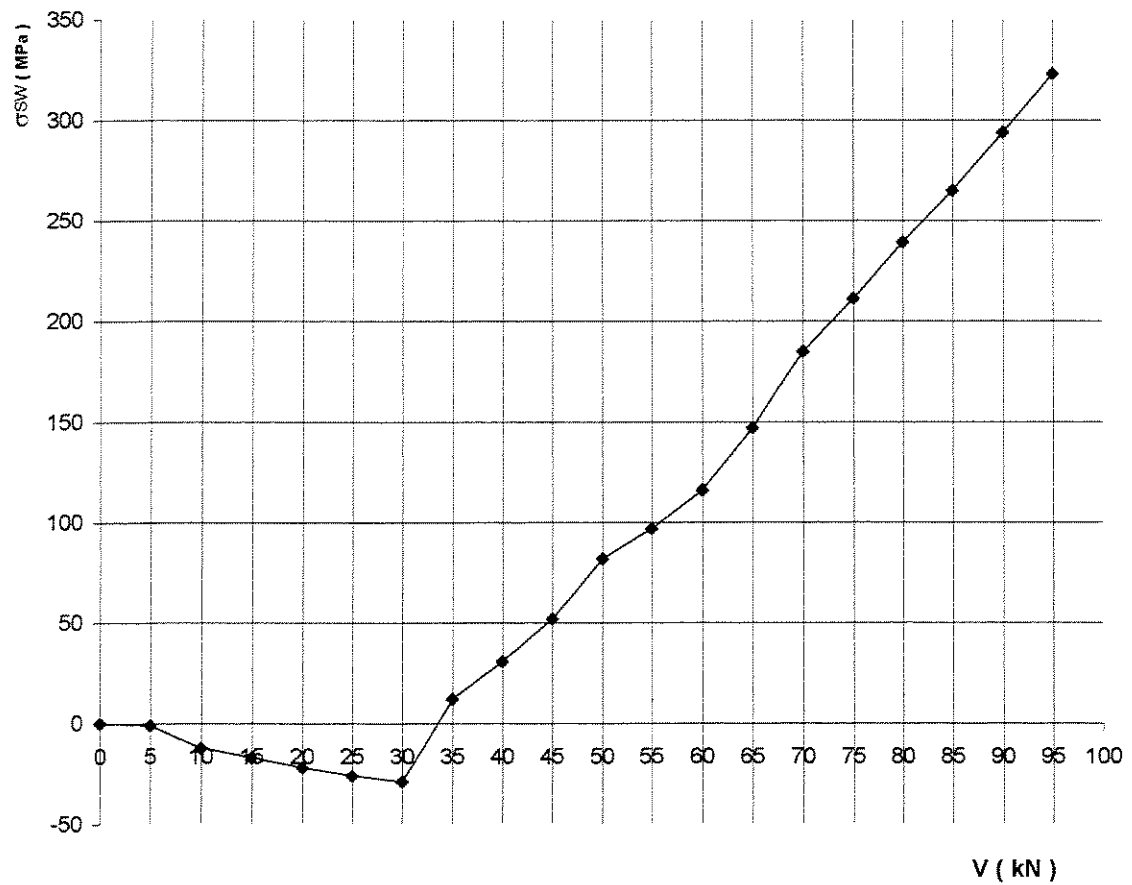
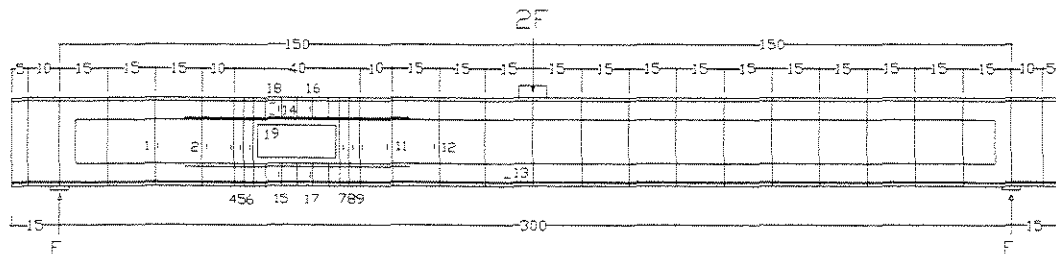


Figura 3.5 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 6 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	2	6	10	38	85	127	184	235	289	332	383	432	482	524	558	580	610	625	640

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 7

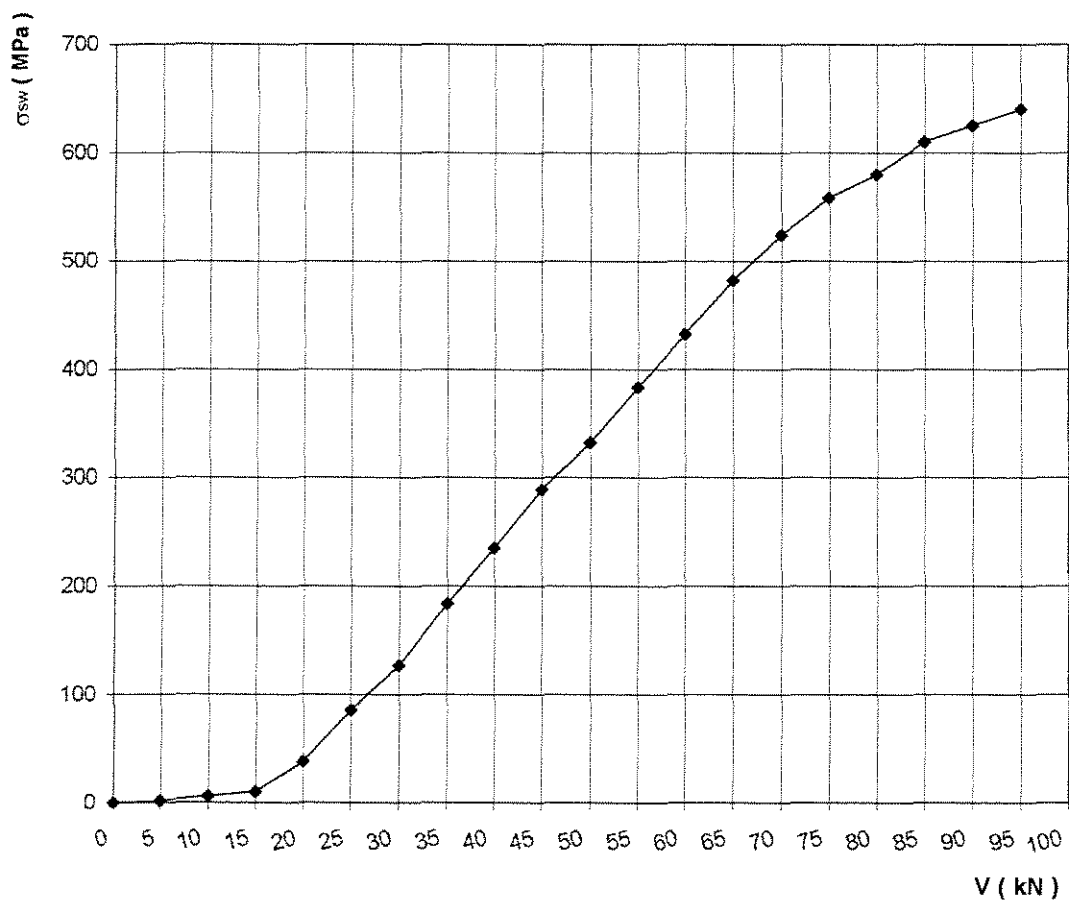
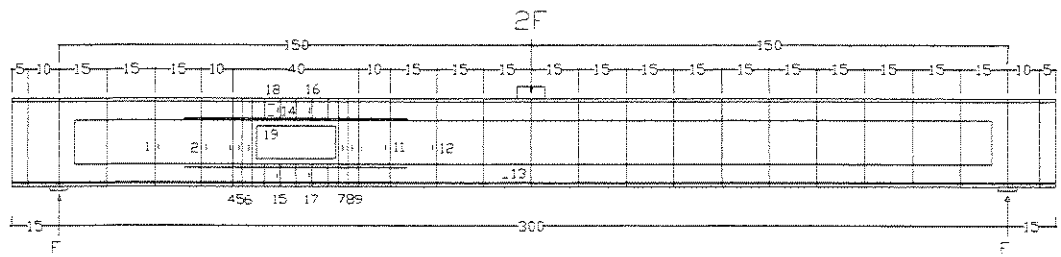


Figura 3.6 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 7 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	1	7	10	11	14	105	180	229	278	315	358	396	431	468	503	543	570	605	625

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 8

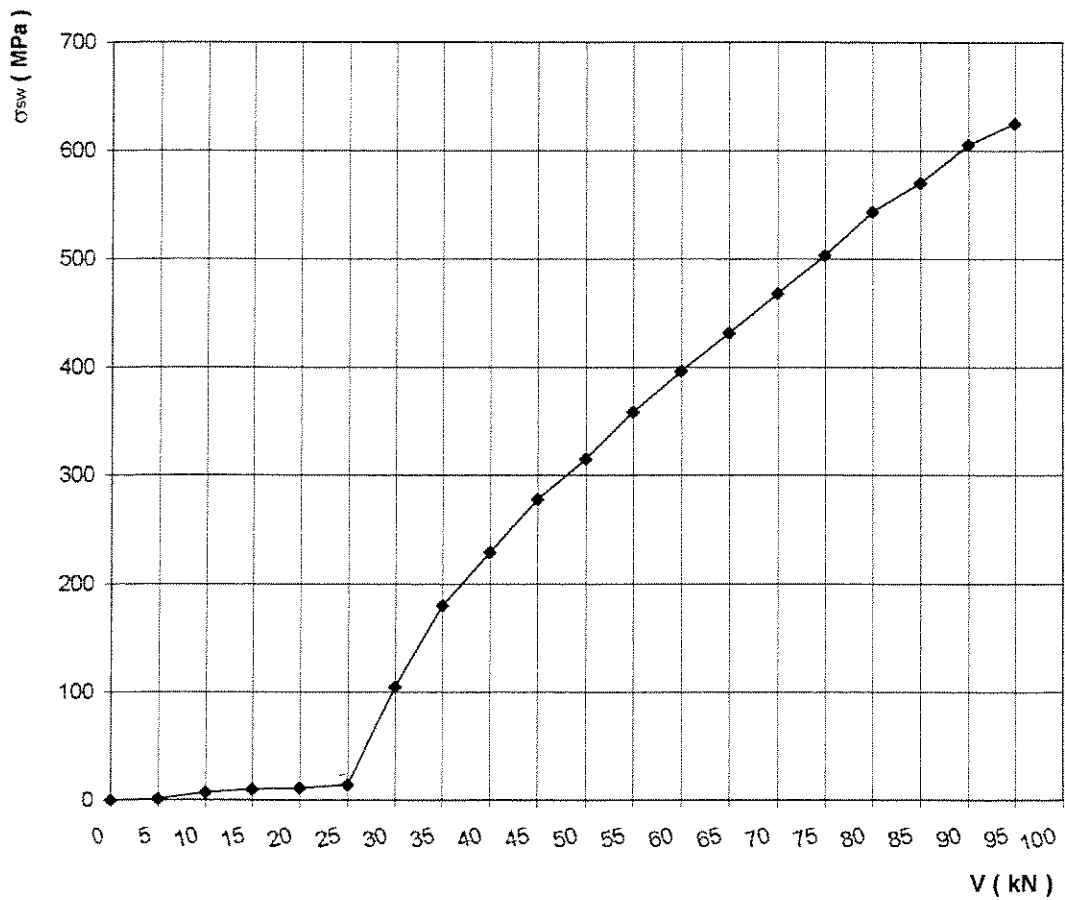
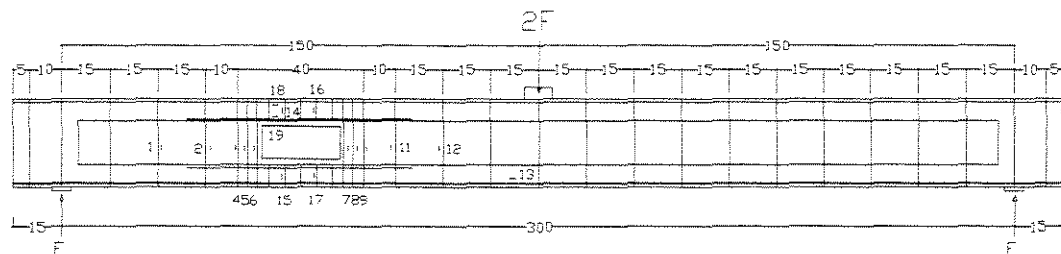


Figura 3.7 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 8 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	4	7	12	14	90	170	214	245	262	299	325	357	374	402	436	453	480	498

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 9

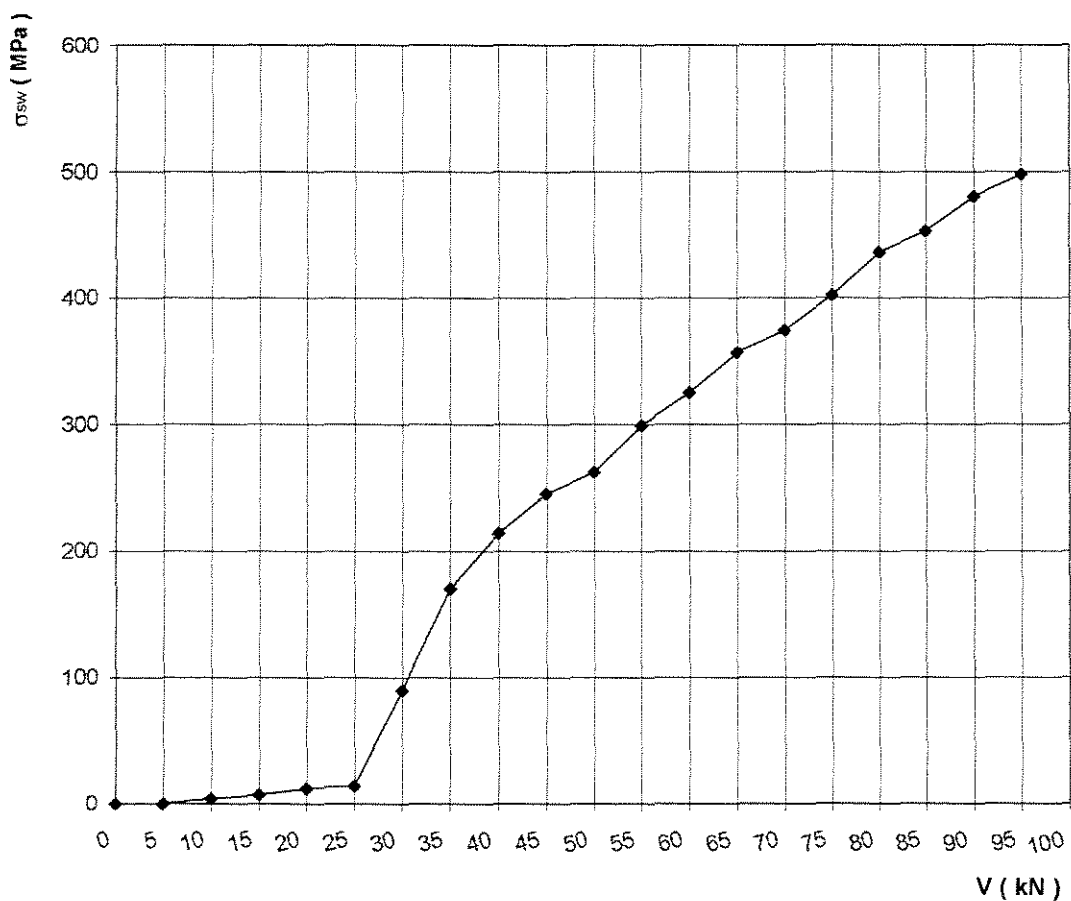
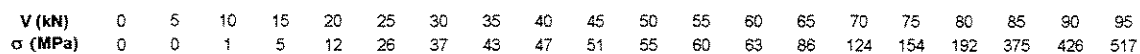
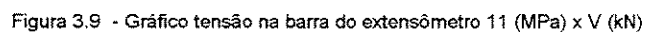
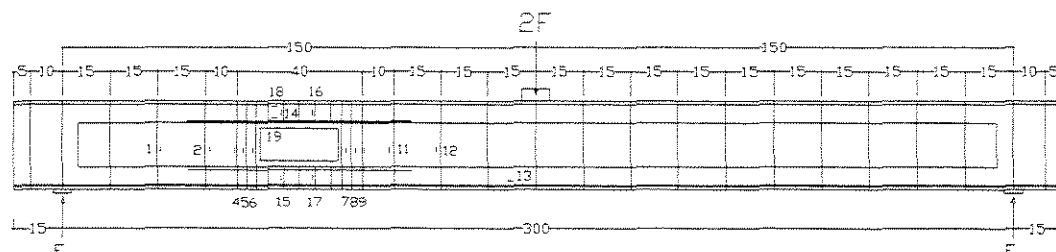


Figura 3.8 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 9 (MPa) x V (kN)



Tensão na barra do extensometro 11





V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	-1	4	15	27	46	77	98	120	139	160	178	230	257	284	302	328	345	392

$f_{yw} = 750 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 12

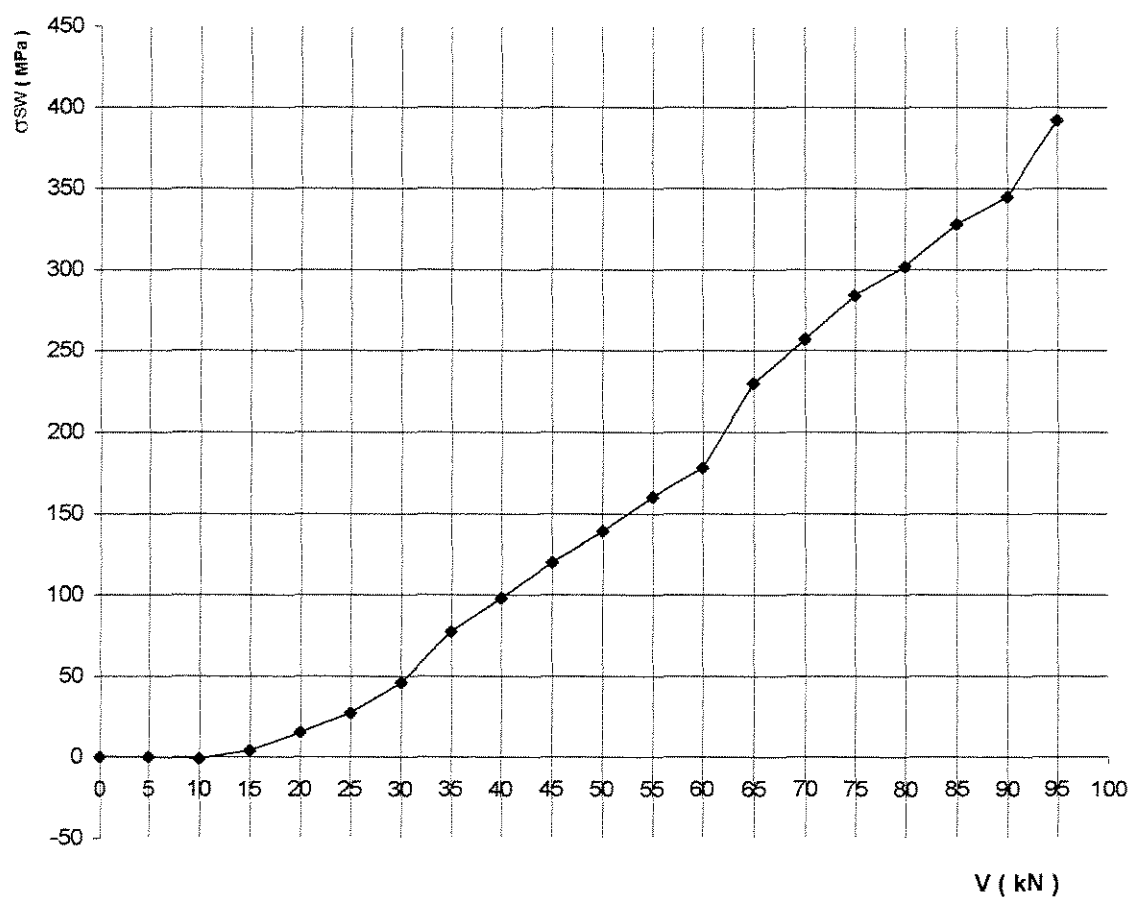
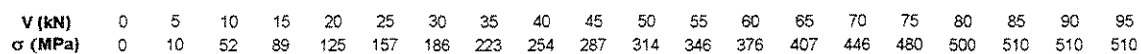
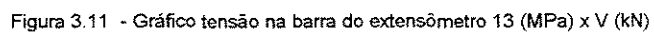
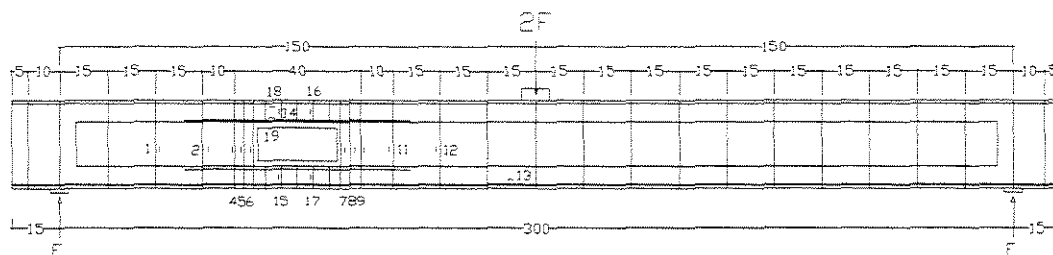


Figura 3.10 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 12 (MPa) x V (kN)



Tensão na barra do extensômetro 13





V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	1	2	3	3	4	4	5	6	7	7	8	8	9	10	10	11	11	12	13

$f_{yw} = 750 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 14

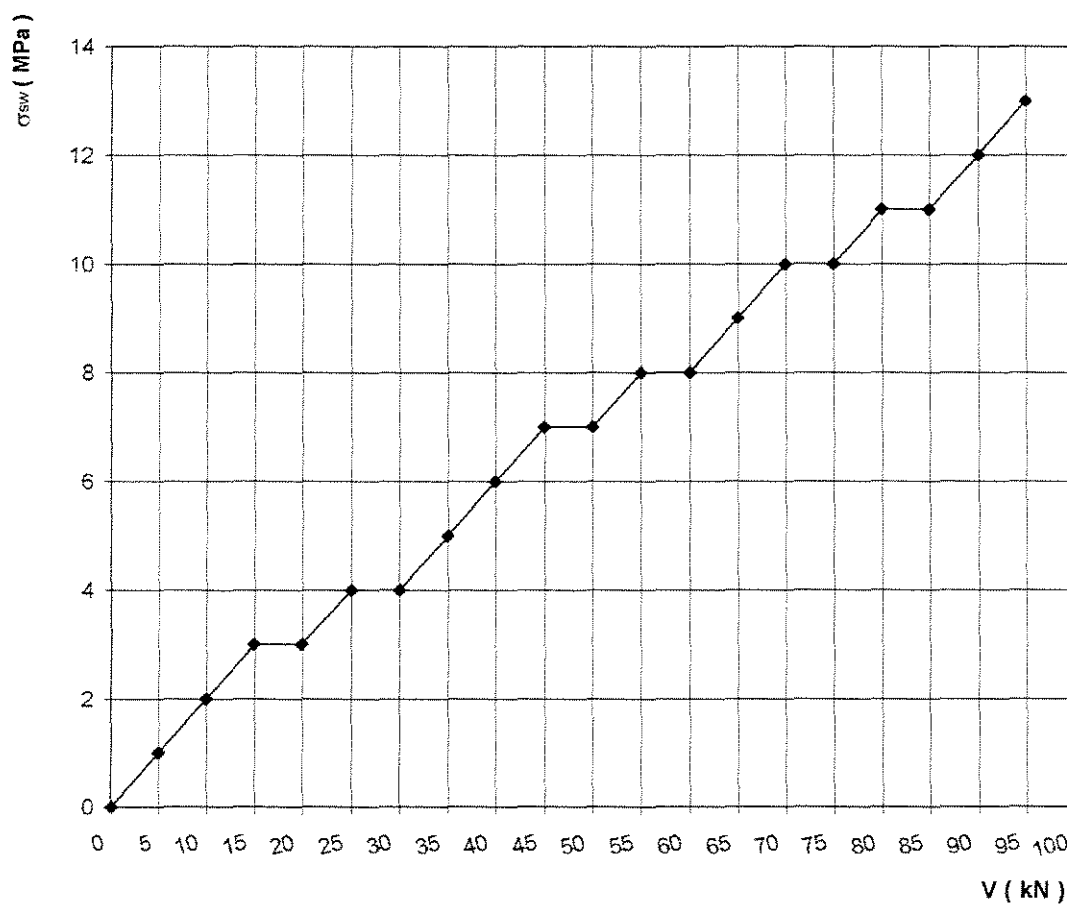
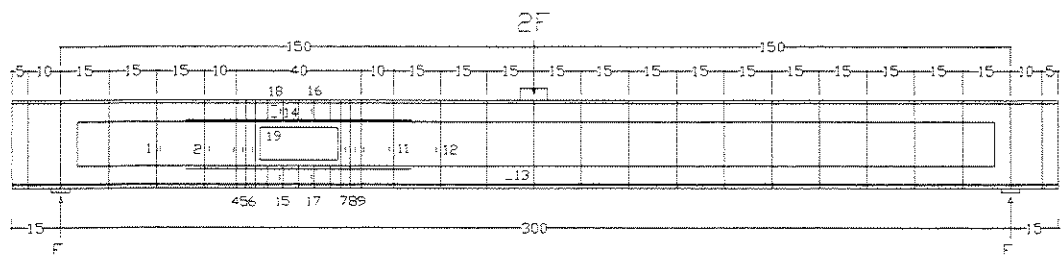


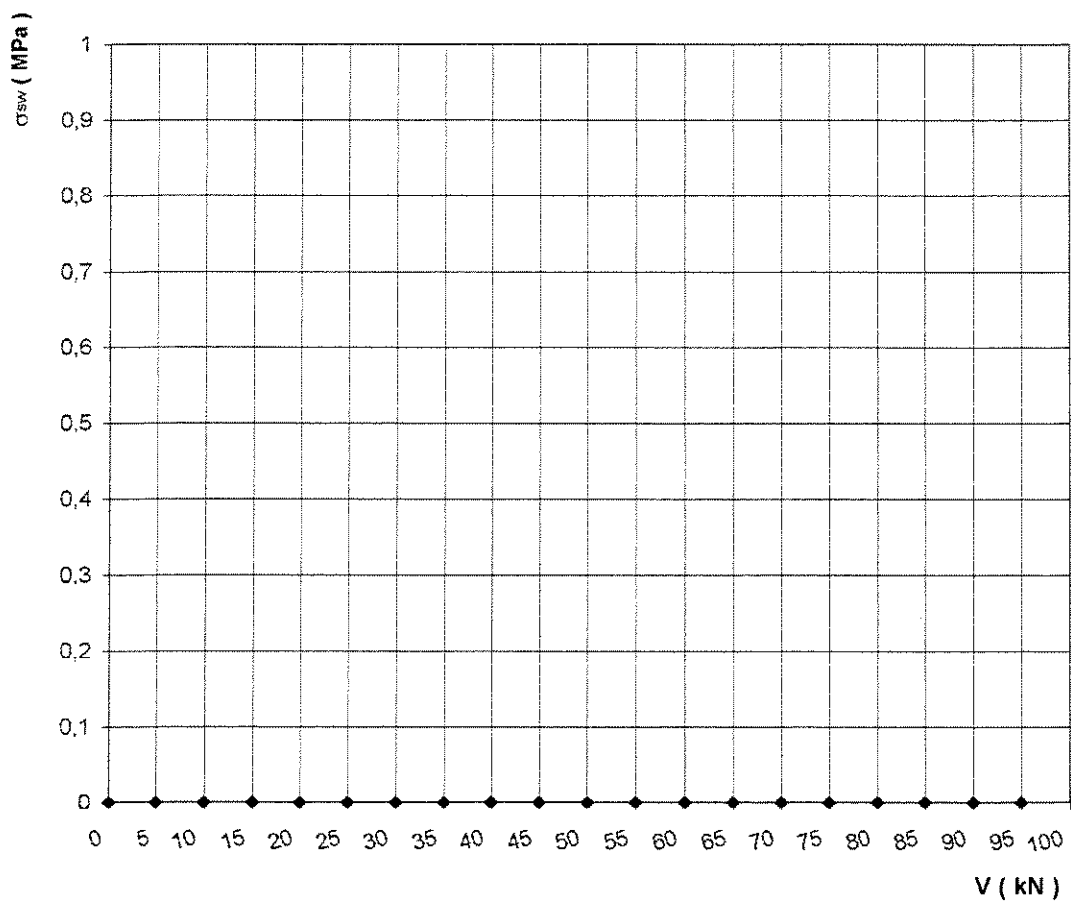
Figura 3.12 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 14 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

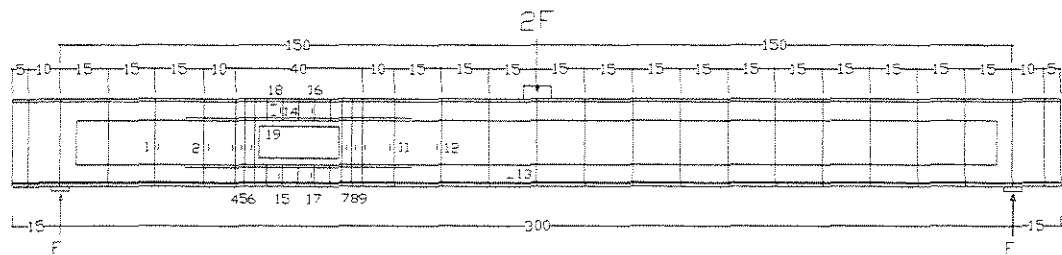
$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 15



Obs. Este extensômetro não funcionou

Figura 3.13 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 15 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	0	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	12	13

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 16

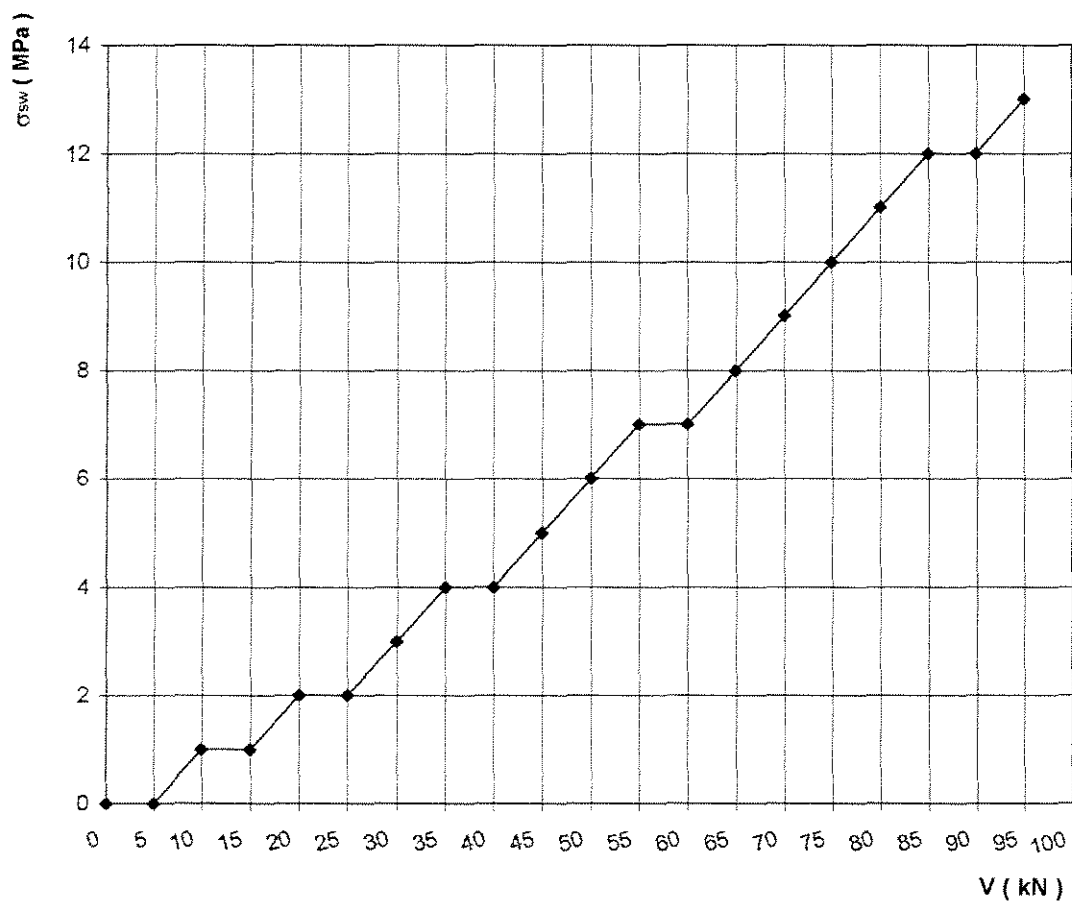
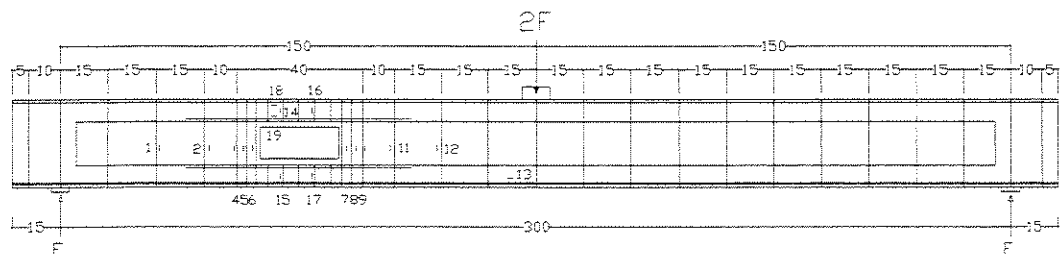


Figura 3.14 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 16 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	-1	0	5	12	15	18	23	27	31	35	40	45	49	53	56	61	66	75	79

$f_{yw} = 695 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 17

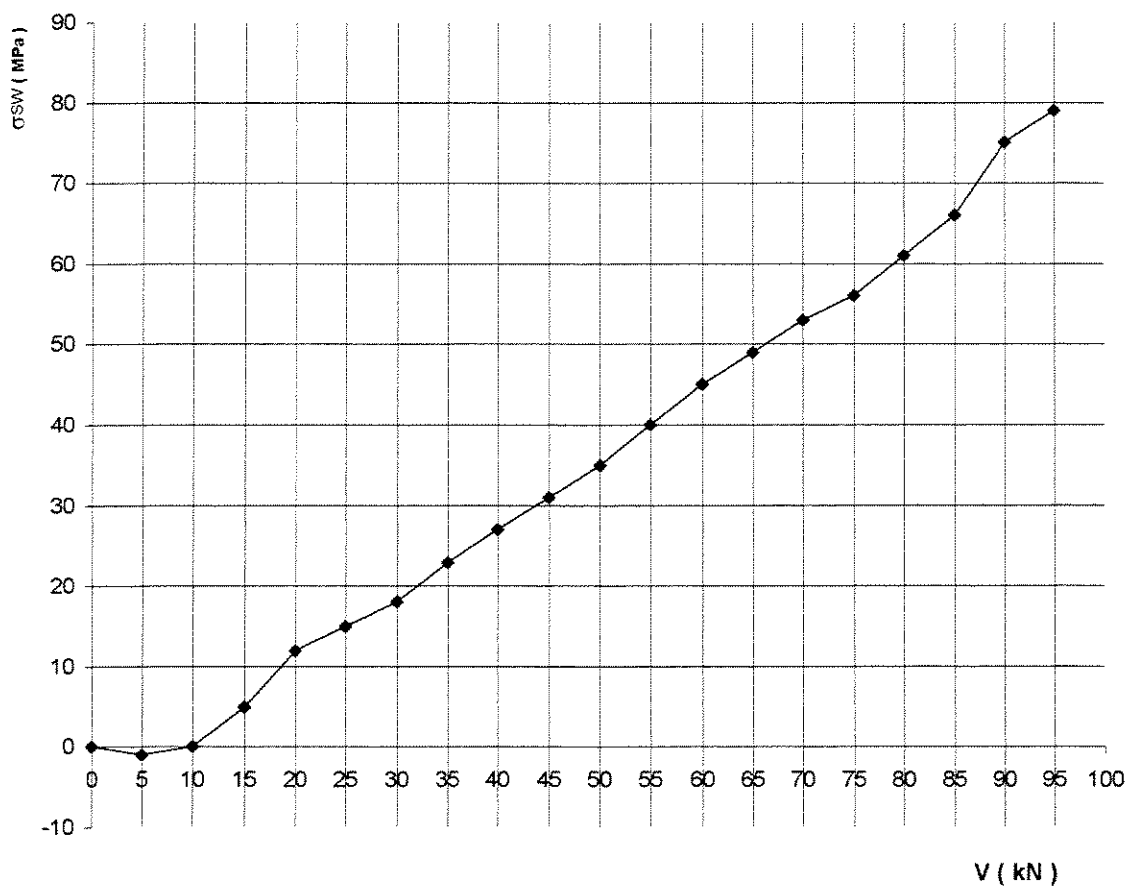
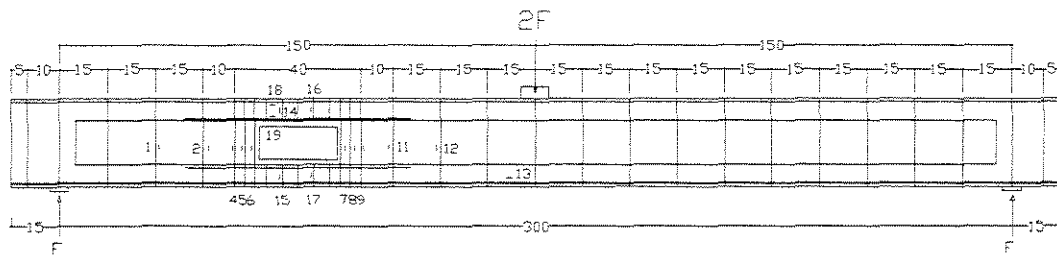


Figura 3.15 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 17 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	-5	-5	-7	-9	-11	-13	-16	-18	-21	-23	-27	-28	-31	-35	-37	-40	-42	-44	-50

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 18

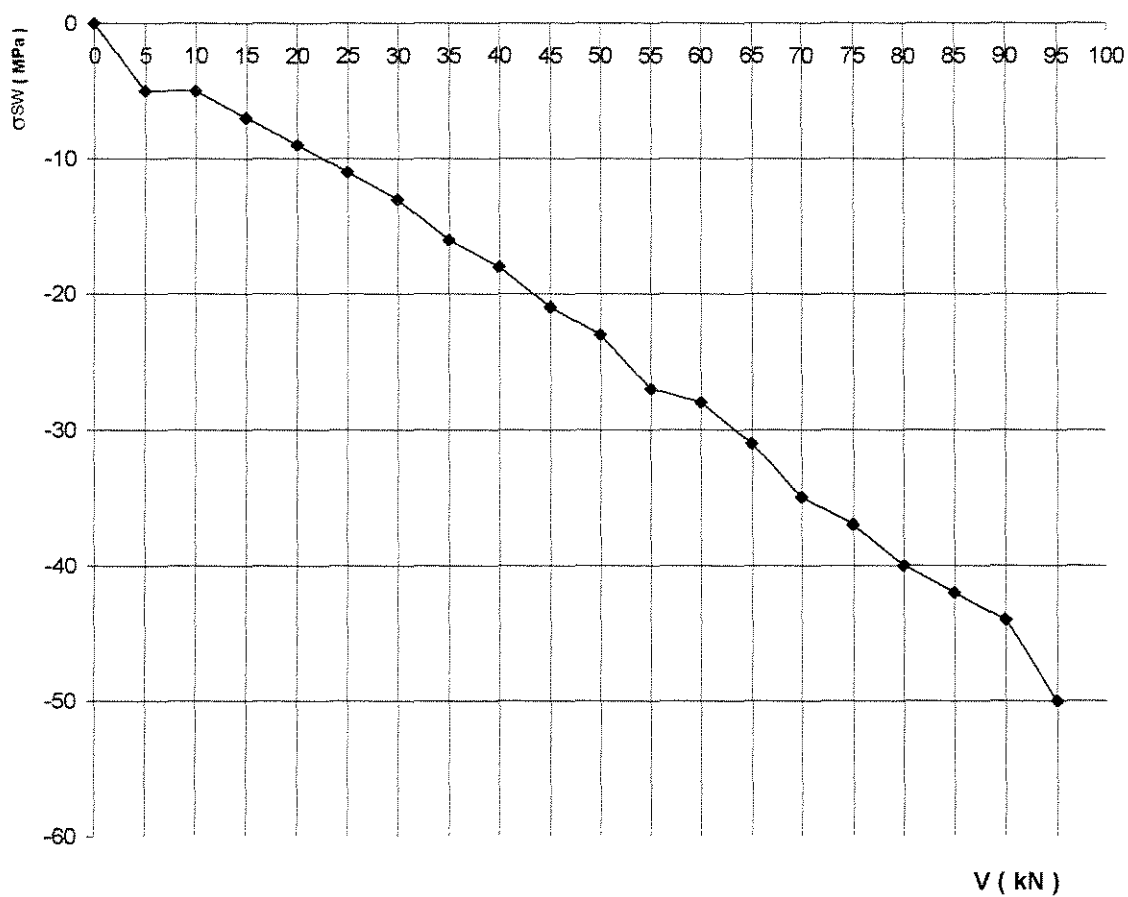
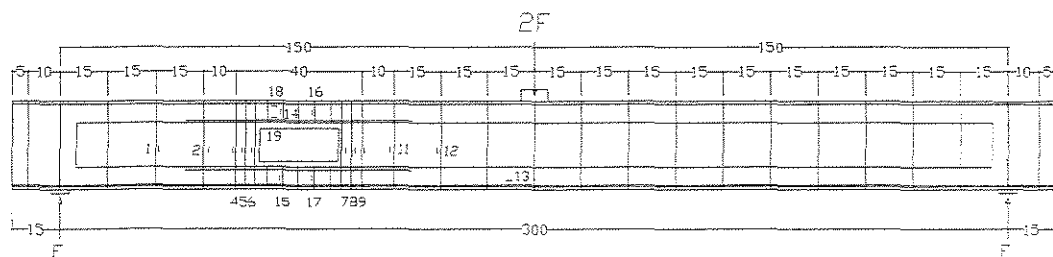


Figura 3.16 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 18 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
σ (MPa)	0	-6	-14	-23	-31	-39	-48	-54	-62	-70	-76	-83	-90	-97	-104	-110	-118	-125	-134	-144

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 19

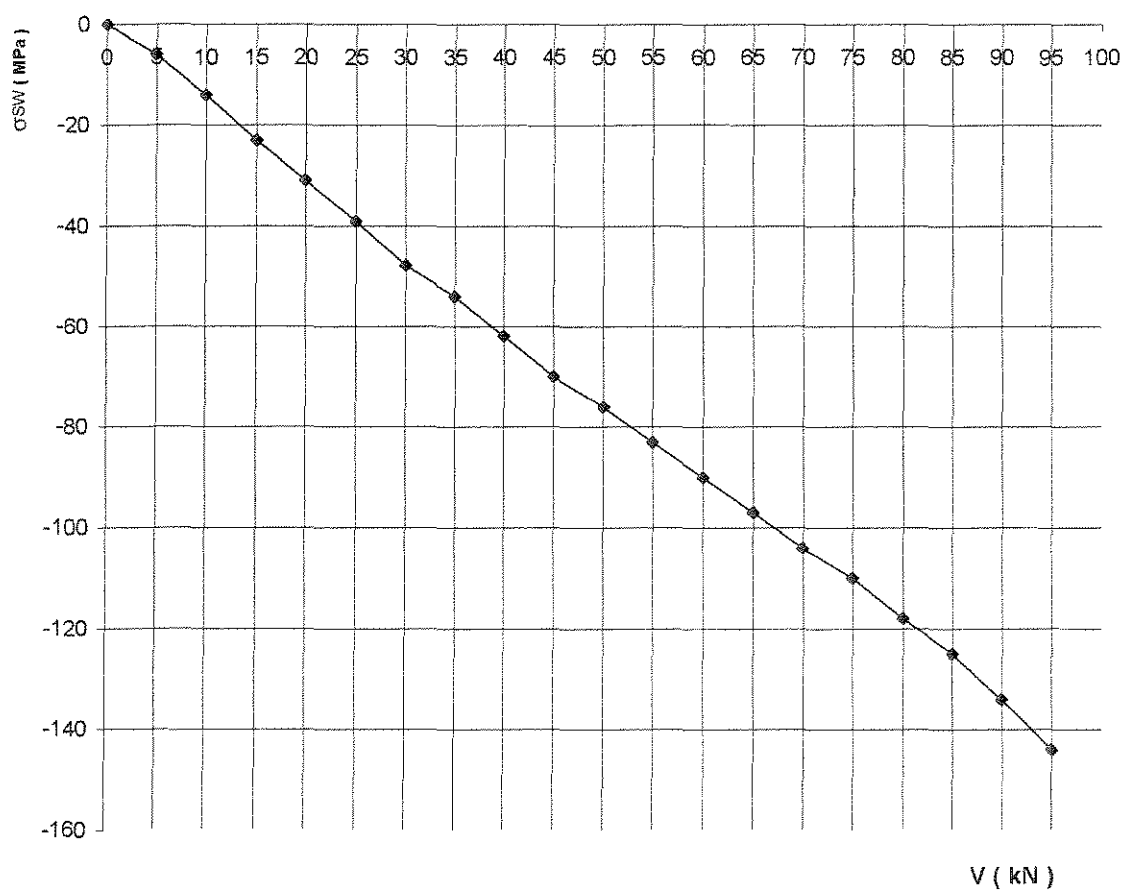


Figura 3.17 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 19 (MPa) x V (kN)

Carga 2F (kN)	Deformação do Concreto ϵ_c (%); $\epsilon_c > 0$ alongamento; $\epsilon_c < 0$ encurtamento					
	C2	C3	C4	C7	C8	C11
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	-0,040	-0,060	-0,060	-0,120	-0,100	0,100
20	-0,100	-0,120	-0,120	-0,160	-0,200	-0,160
30	-0,100	0,040	-0,140	-0,220	-0,320	0,300
40	-0,100	-0,040	-0,160	-0,300	0,100	-0,400
50	-0,100	0,020	-0,220	-0,320	0,000	-0,460
60	-0,040	0,000	-0,260	-0,320	-0,080	-0,520
70	-0,080	0,040	-0,300	-0,380	0,060	-0,600
80	-0,040	0,060	-0,340	-0,420	-0,060	-0,620
90	-0,040	0,060	-0,360	-0,440	-0,100	-0,720
100	-0,140	0,040	-0,420	-0,540	-0,660	-0,760
110	-0,100	0,000	-0,400	-0,580	-0,720	-0,860
120	-0,140	0,040	-0,460	-0,640	-0,720	-0,900
130	-0,040	0,040	-0,480	-0,660	-0,700	-0,940
140	-0,140	-0,040	-0,520	-0,740	-0,760	-1,020
150	-0,140	0,040	-0,560	-0,780	-0,760	-1,100
160	-0,140	-0,040	-0,620	-0,840	-0,780	-1,140
170	-0,140	0,040	-0,620	-0,880	0,000	-1,200

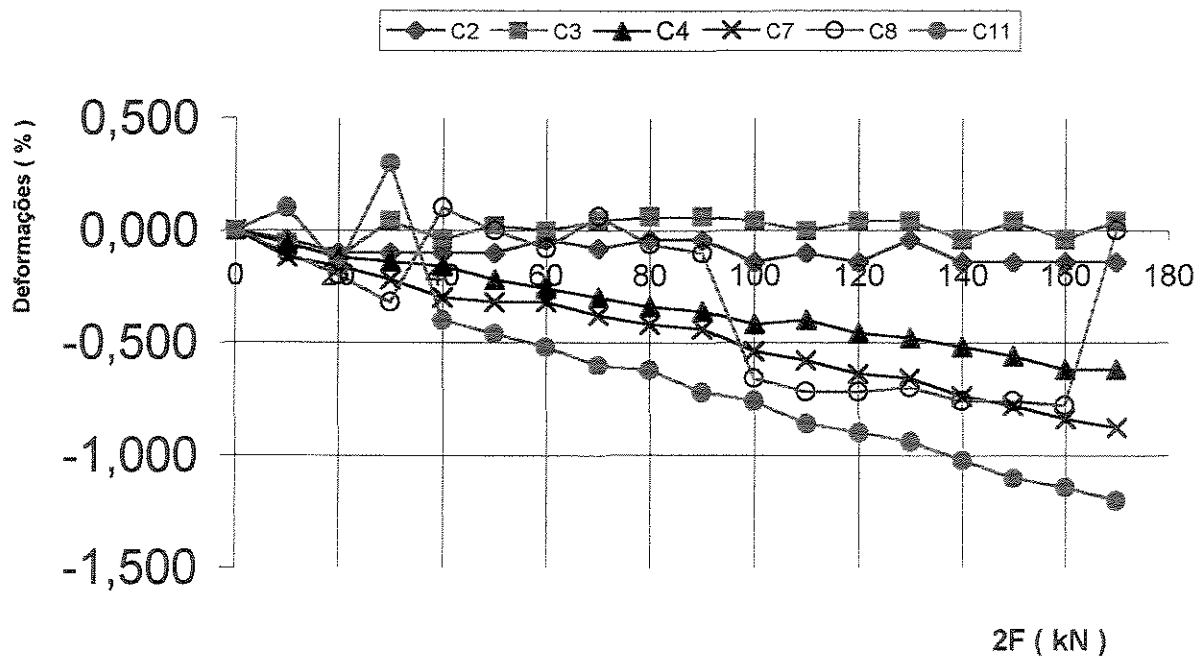


Figura 3.18 - Deformações no concreto na banzo superior da abertura

Carga 2F (kN)	Deformação do Concreto ϵ_c (%); $\epsilon_c > 0$ alongamento; $\epsilon_c < 0$ encurtamento			
	C5	C6	C9	C10
0	0,000	0,000	0,000	0,000
10	-0,020	0,000	0,240	-0,040
20	-0,060	0,100	0,000	-0,040
30	-0,020	-0,020	0,040	0,020
40	-0,040	0,020	0,020	-0,080
50	-0,120	-0,140	0,040	-0,140
60	-0,120	-0,100	0,100	-0,160
70	-0,200	0,000	0,080	-0,240
80	0,020	0,120	0,140	-0,240
90	-0,020	0,300	0,200	-0,220
100	-0,220	0,396	0,400	-0,180
110	0,020	0,600	0,200	-0,280
120	-0,020	0,800	0,220	-0,280
130	0,000	0,900	0,240	-0,280
140	0,080	1,040	0,200	-0,280
150	0,080	1,200	0,800	-0,340
160	0,080	1,300	0,400	-0,380
170	0,120	1,500	0,600	-0,340

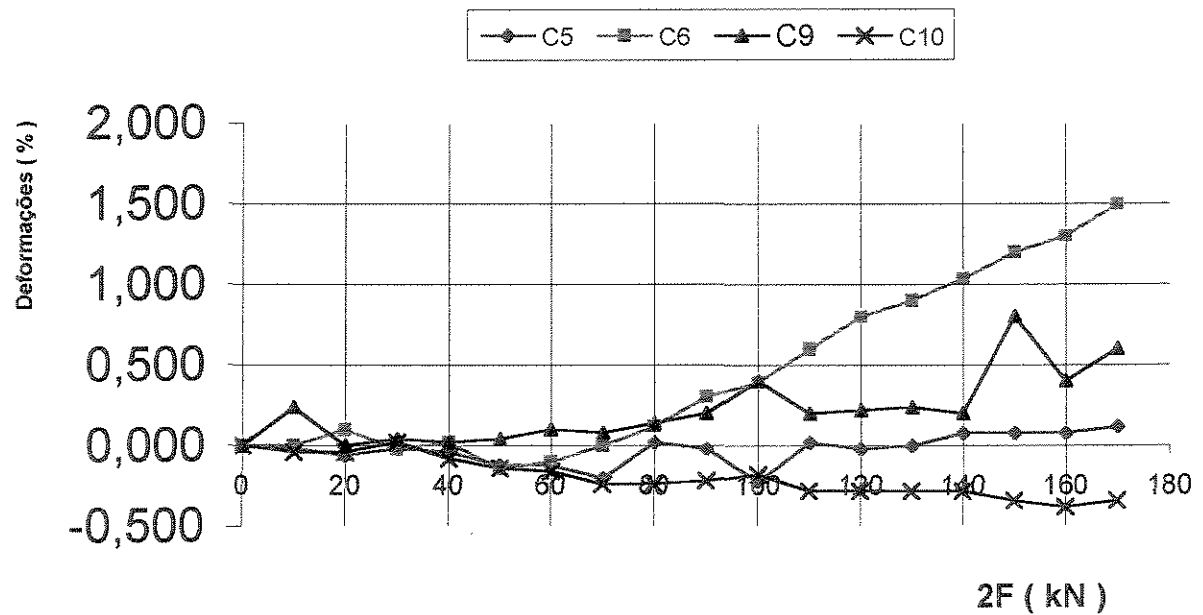


Figura 3.19 - Deformações no concreto no banco inferior da abertura

2F (kN)	Flecha meio vão (mm)
0	0,00
10	0,78
20	1,50
30	2,47
40	3,42
50	4,46
60	5,53
70	6,59
80	7,55
90	8,66
100	9,88
110	10,48
120	12,12
130	13,34
140	14,84
150	16,05
160	17,19
170	18,54

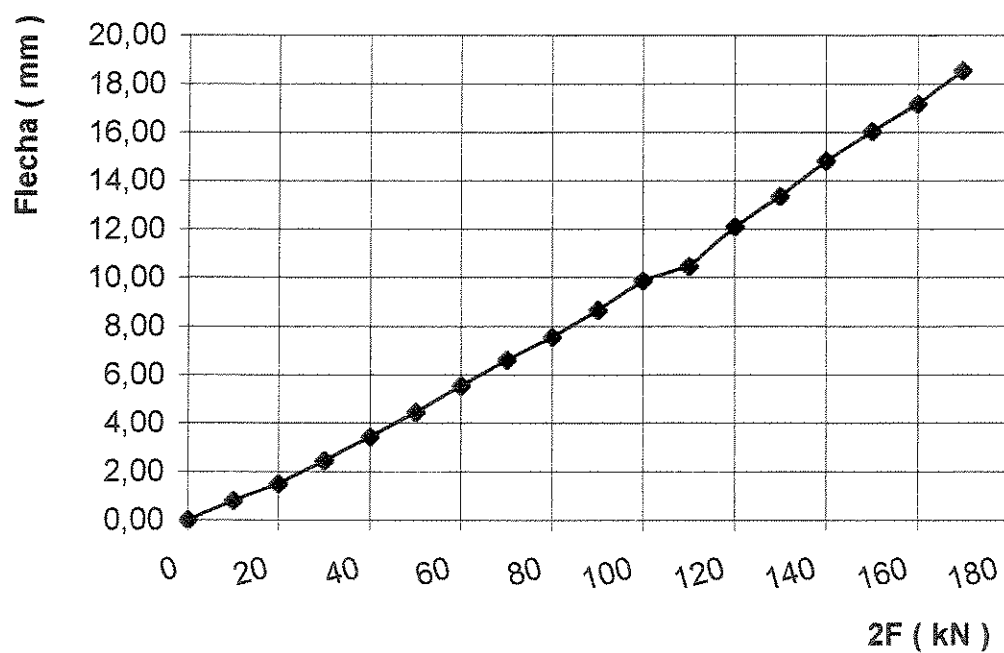


Figura 3.20 - Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm)

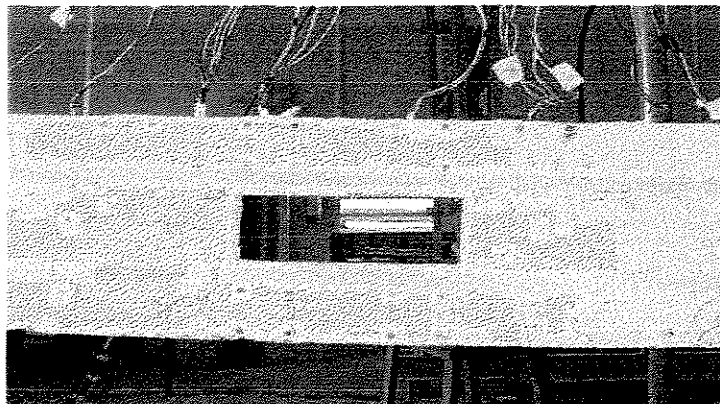


Figura 3.21a – Fissuras na região da abertura da viga VR-3

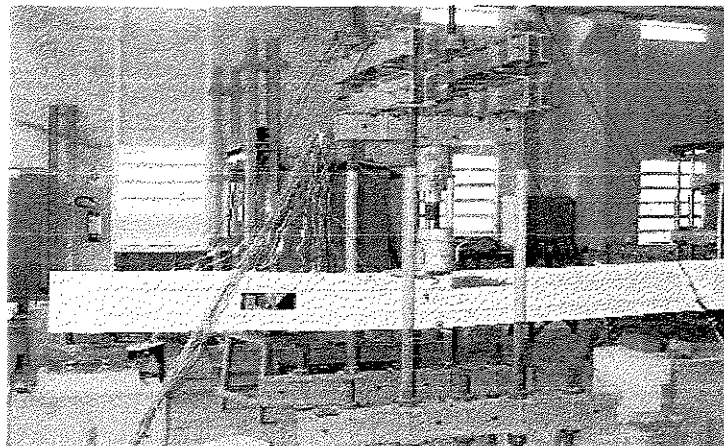


Figura 2.21 b – Vista geral da viga VR-3 fissurada.

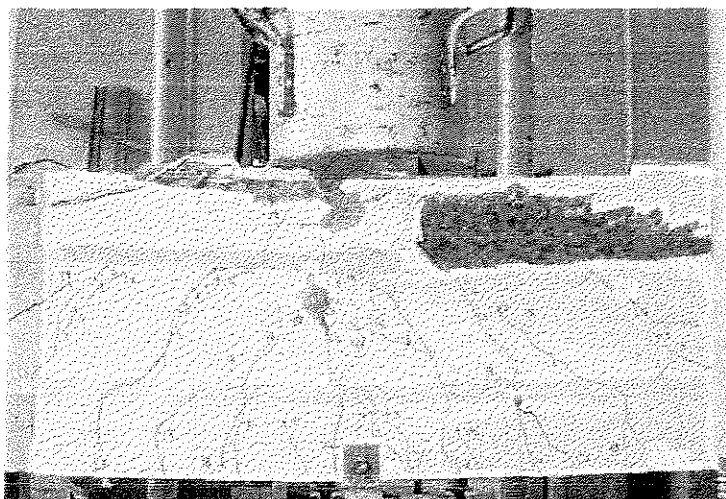


Figura 3.21c – Ruptura da viga VR-3 no meio do vão .

3.2 – RESULTADOS DA VIGA VR-4

Na viga VR-4 o escoamento da armadura longitudinal se deu com carga total igual a 150 kN e a ruptura do concreto com 170 kN.

Na região da abertura a armadura de suspensão mais solicitada foi aquela situada junto da abertura no lado da carga. Na carga ultima as tensões nos estribos 4, 5 e 6 foram de 580 MPa, 499 MPa e 504 MPa, respectivamente e as deformações foram de 2,82 ‰, 2,43 ‰ e 2,46 ‰, respectivamente.

A armadura de suspensão no lado do apoio foi a menos solicitada, ou seja, no lado onde acontece a dissipação do fluxo dos esforços que ultrapassam a abertura pelos banzos superior e inferior. Na carga ultima as tensões nos estribos 1, 2 e 3 foram de 445 MPa, 550 MPa e 680 MPa, respectivamente e as deformações foram de 2,17 ‰, 2,68 ‰ e 3,32 ‰, respectivamente.

O banzo sobre a abertura esteve comprimido e sob flexão. Na carga última houve alongamento da barra longitudinal superior, com tensão de 137 MPa e deformação de 0,71 ‰ e de encurtamento nas barras inferiores com tensão de – 157 MPa e deformação de –0,82 ‰.

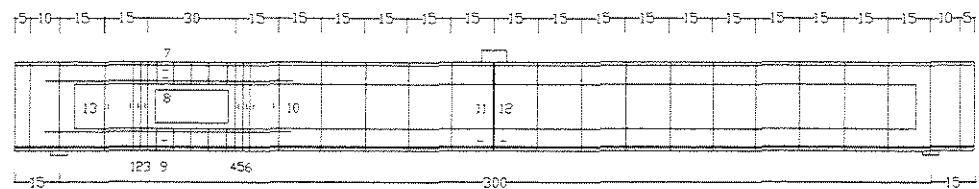
No banzo sob a abertura, o extensômetro 9 indicou tensão de 298 MPa na armadura longitudinal para carga final.

Os gráficos de tensão x deformação das armaduras estão nas figuras de 3.22 a 3.33.

A determinação da resistência à compressão do concreto foi feita ensaiando três corpos-de-prova submetidos a compressão axial. A resistência média à compressão encontrada foi $f_c = 78$ MPa.

Para a carga de 170 MPa, a flecha no meio do vão foi de 18,50 mm. A evolução da flecha em função da carga encontra-se na figura 3.34.

As figuras 3.35a, 3.35b e 3.35c mostram panoramas da fissuração da viga VR-4 ensaiada.



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	0	-2	-2	0	3	15	107	145	184	203	222	242	266	292	319	357	445

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 1

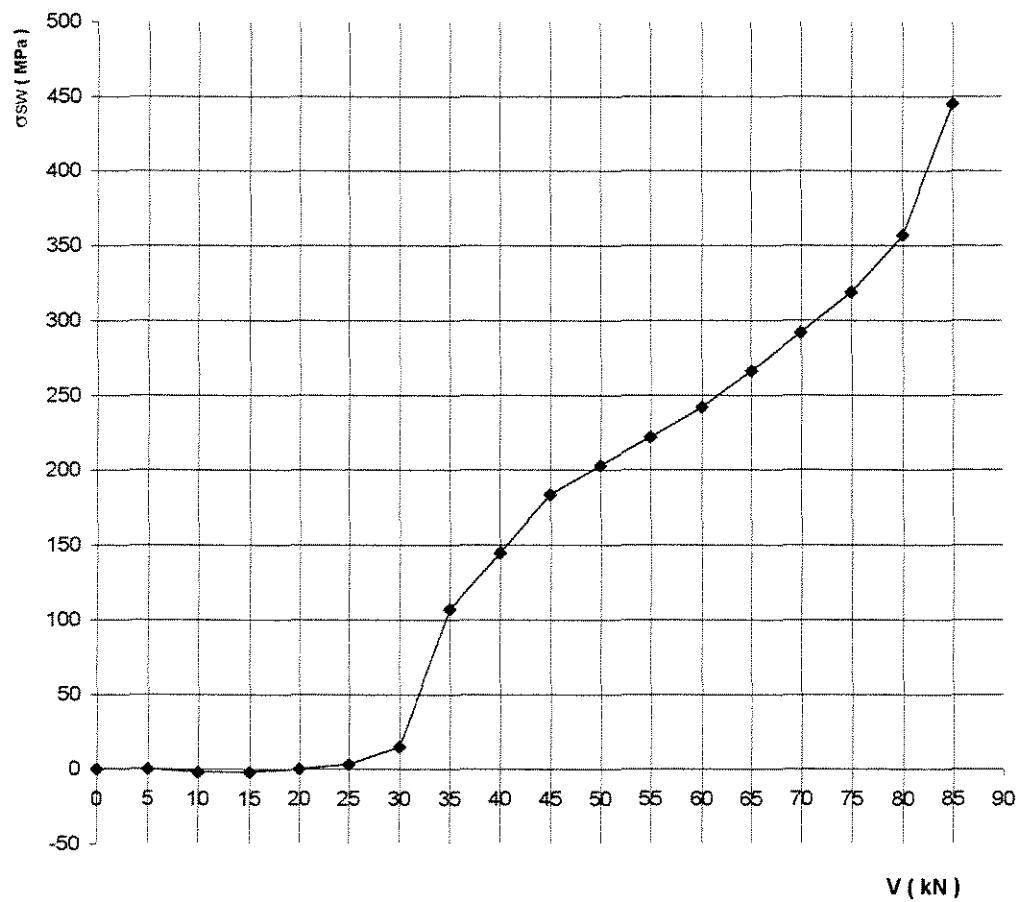
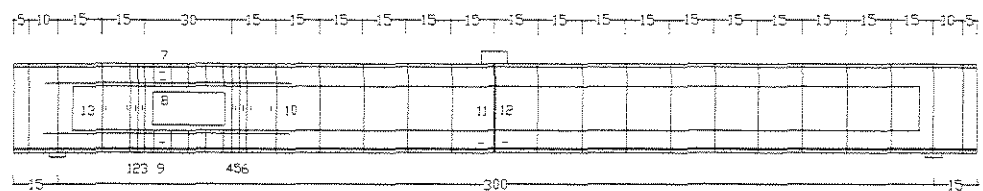


Figura 3.22 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 1 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-2	-7	-10	-11	-11	5	129	181	233	262	287	318	349	377	404	435	550

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 2

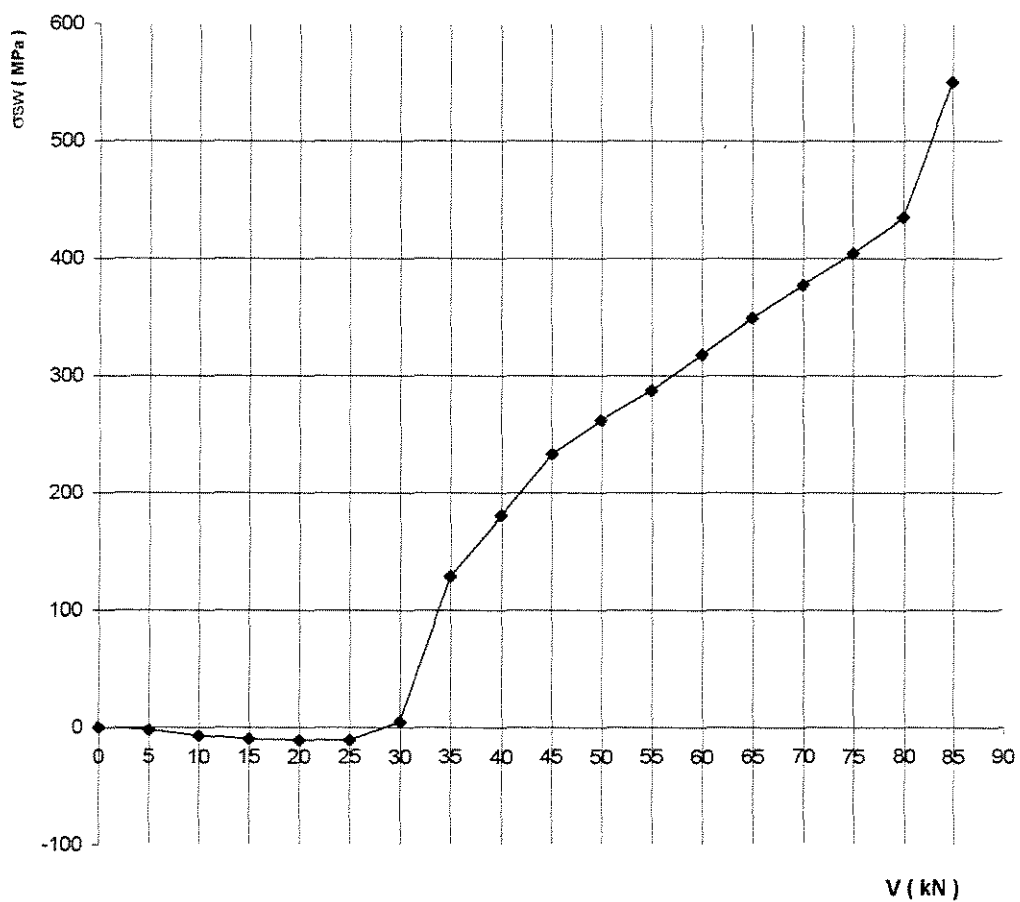
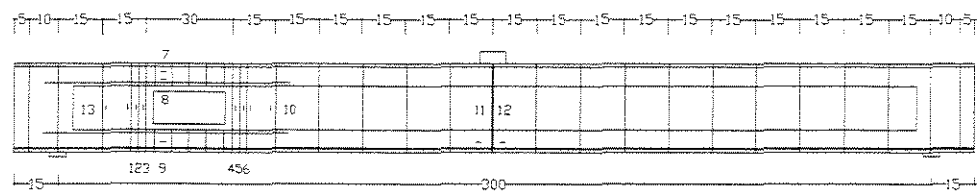


Figura 3.23 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 2 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-2	-11	-17	-22	-24	-16	166	235	294	341	388	435	483	531	560	590	680

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 3

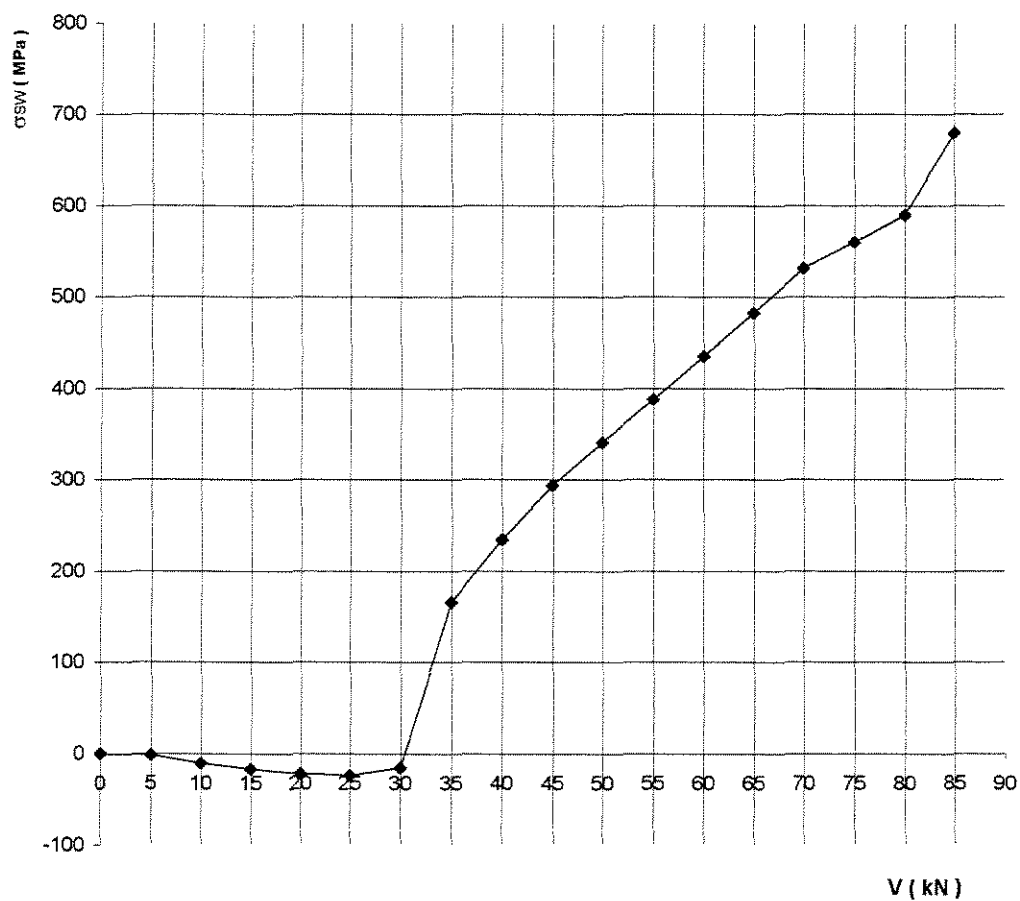
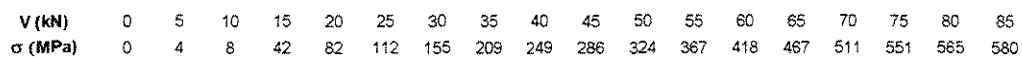


Figura 3.24 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 3 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	1	3	28	58	81	110	166	207	238	268	297	329	369	416	448	475	499

 $f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensometro 5

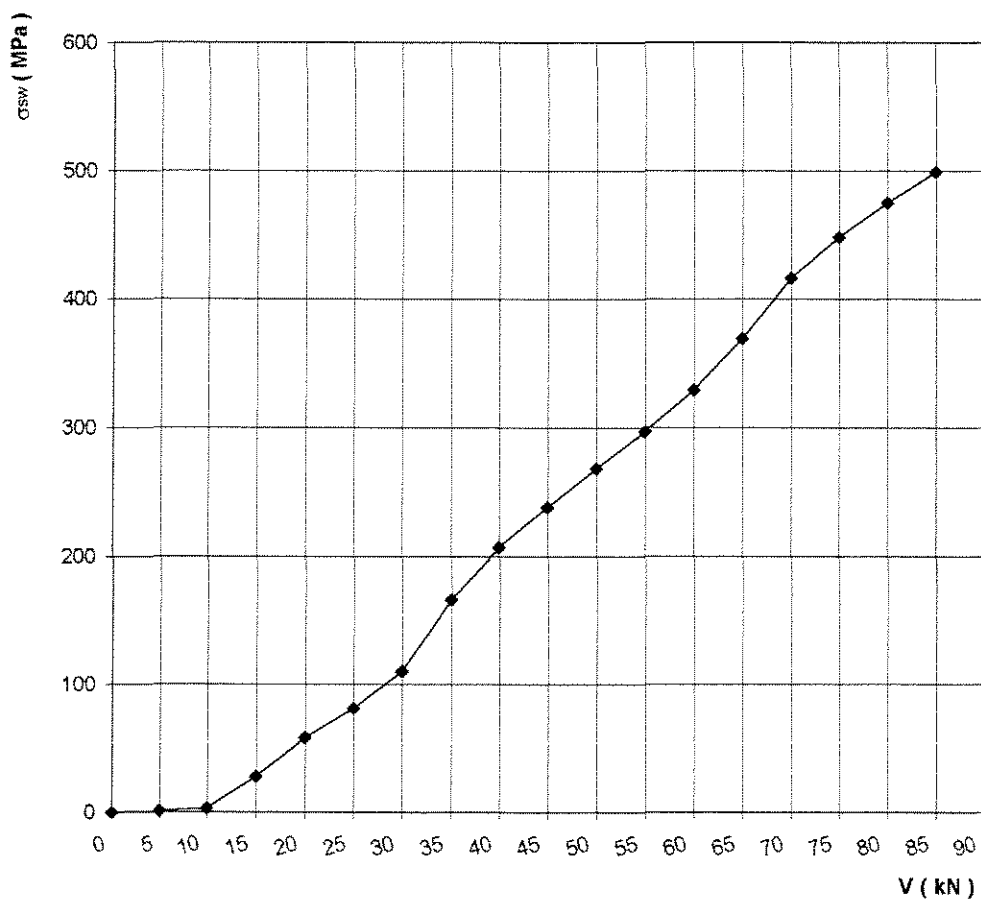
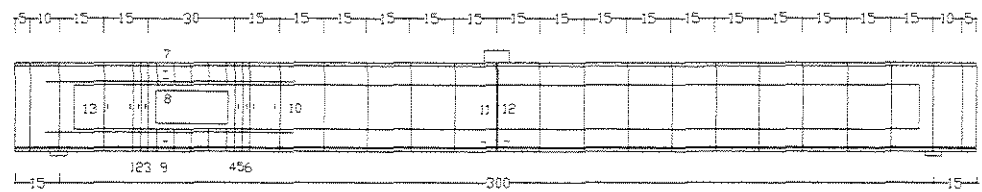


Figura 3.26 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 5 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	1	3	2	4	7	70	142	190	228	264	300	349	387	424	454	480	504

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 6

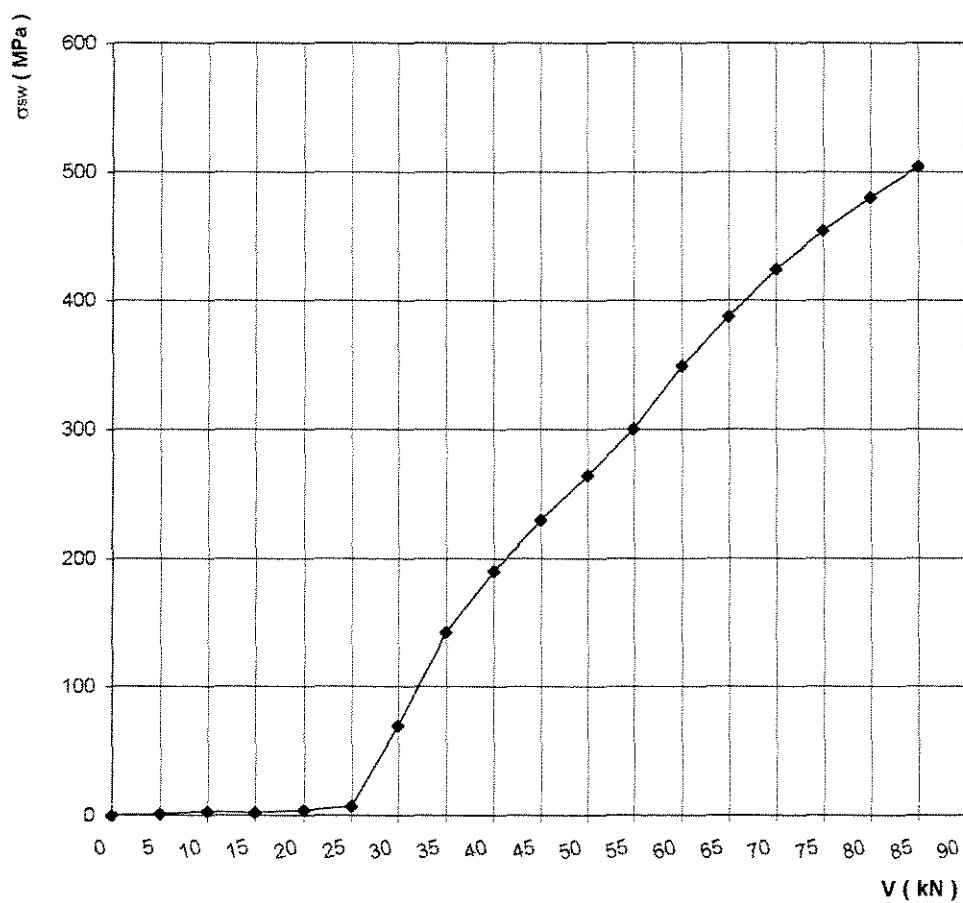
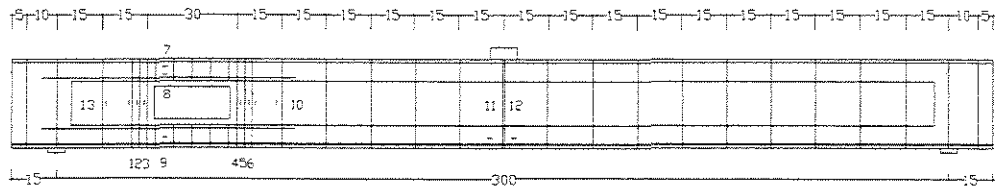


Figura 3.27 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 6 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-2	1	6	9	11	17	30	40	49	57	69	80	91	104	118	129	137

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 7

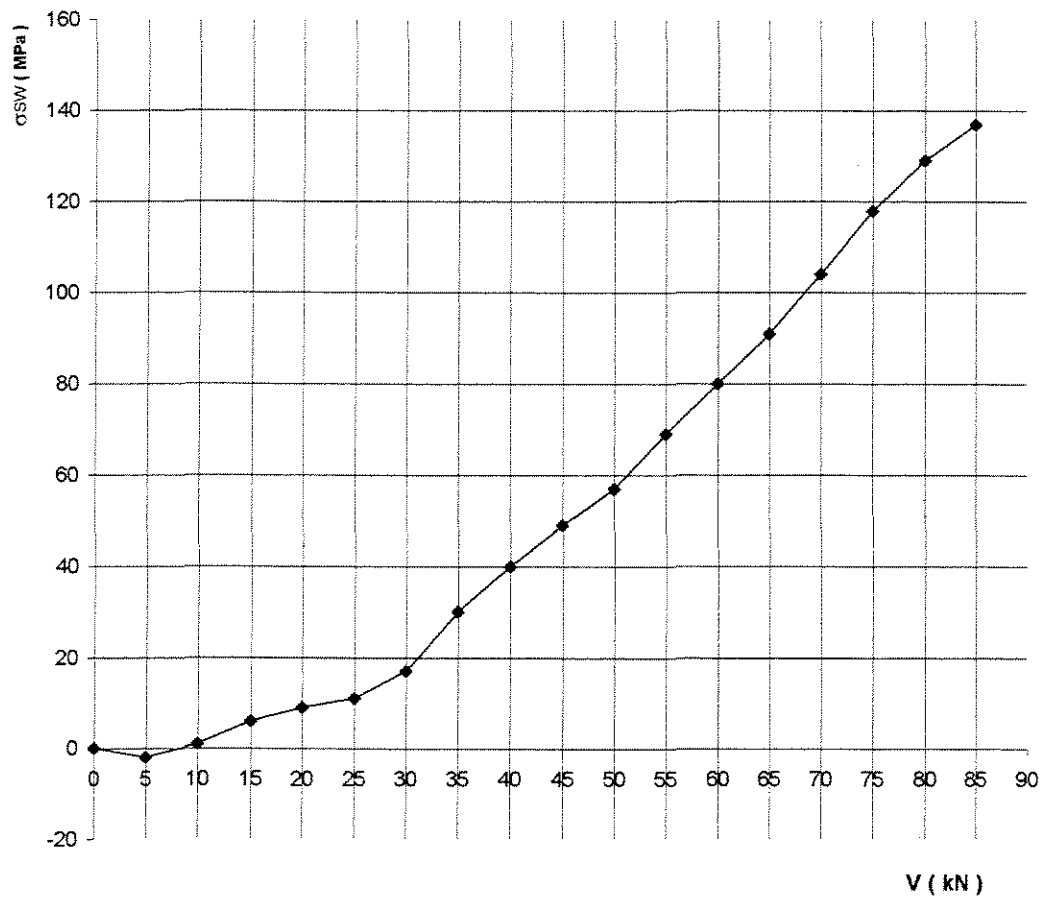
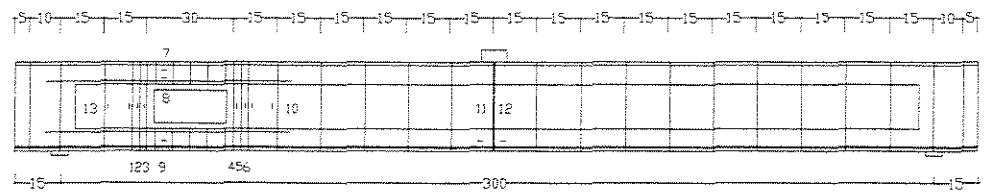


Figura 3.28 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 7 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-8	-20	-34	-43	-51	-61	-70	-78	-86	-94	-103	-112	-122	-131	-141	-149	-157

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 8

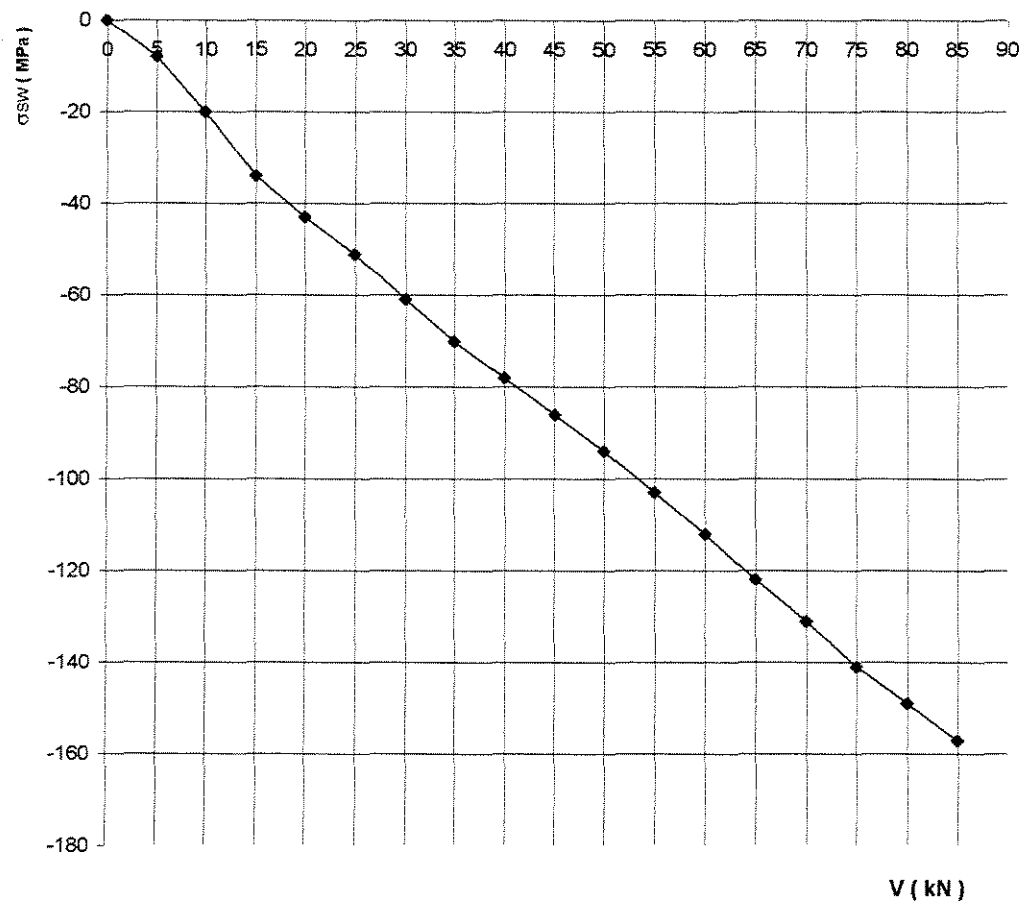
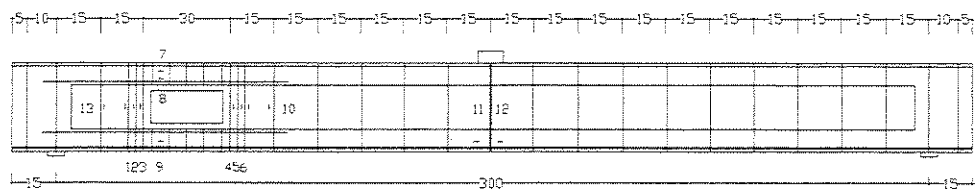


Figura 3.29 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 8 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	5	15	29	42	56	71	91	105	120	133	148	163	180	191	218	236	298

$f_{yw} = 510 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 9

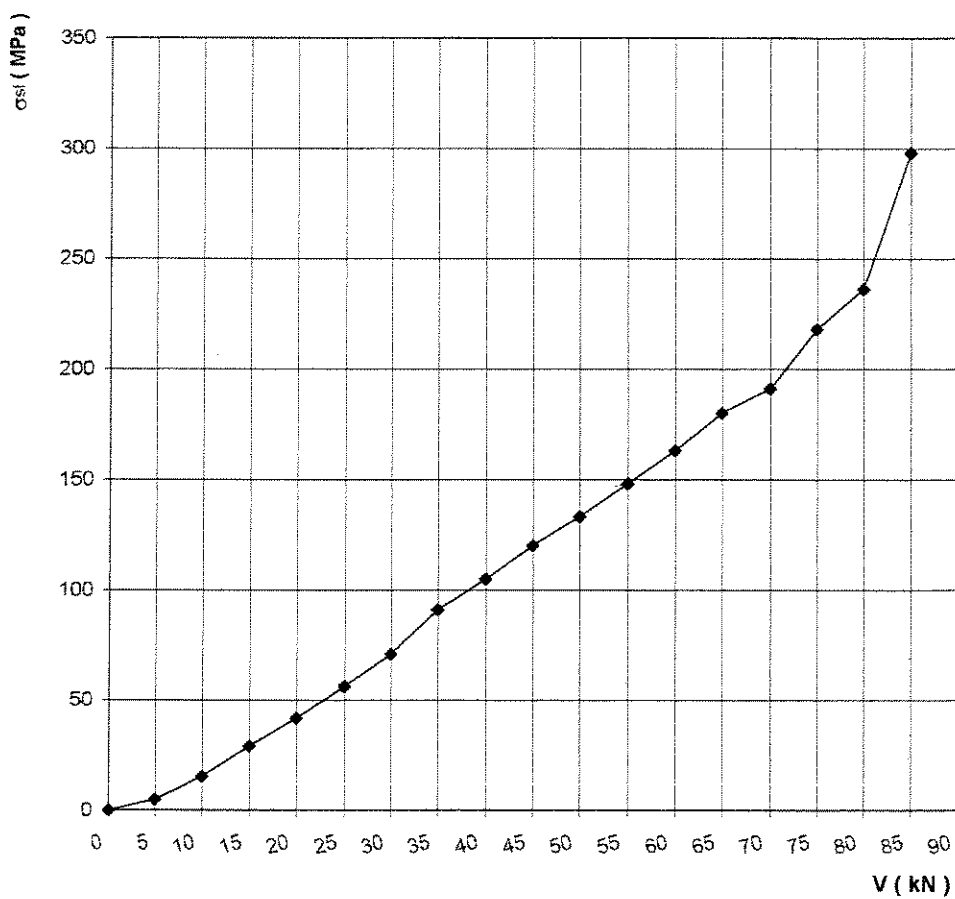
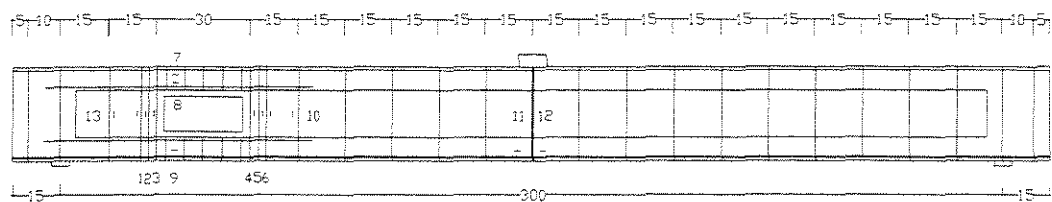


Figura 3.30 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 9 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	0	2	5	9	12	51	133	184	220	253	285	312	334	364	395	425	550

$f_{yw} = 810 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 10

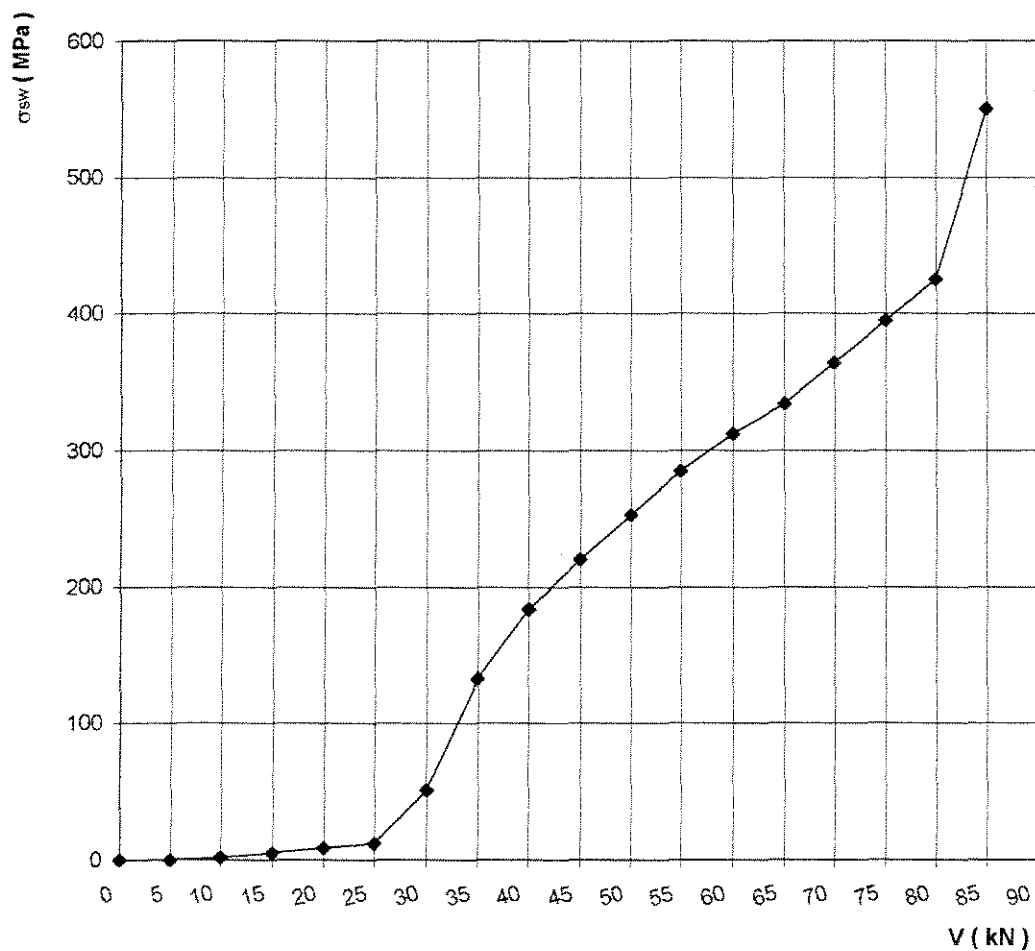
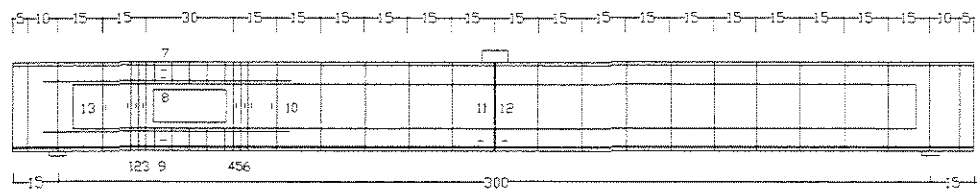


Figura 3.31 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 10 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	18	53	101	139	191	216	253	290	327	364	403	440	482	500	510	510	510

$f_{yw} = 510 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 11

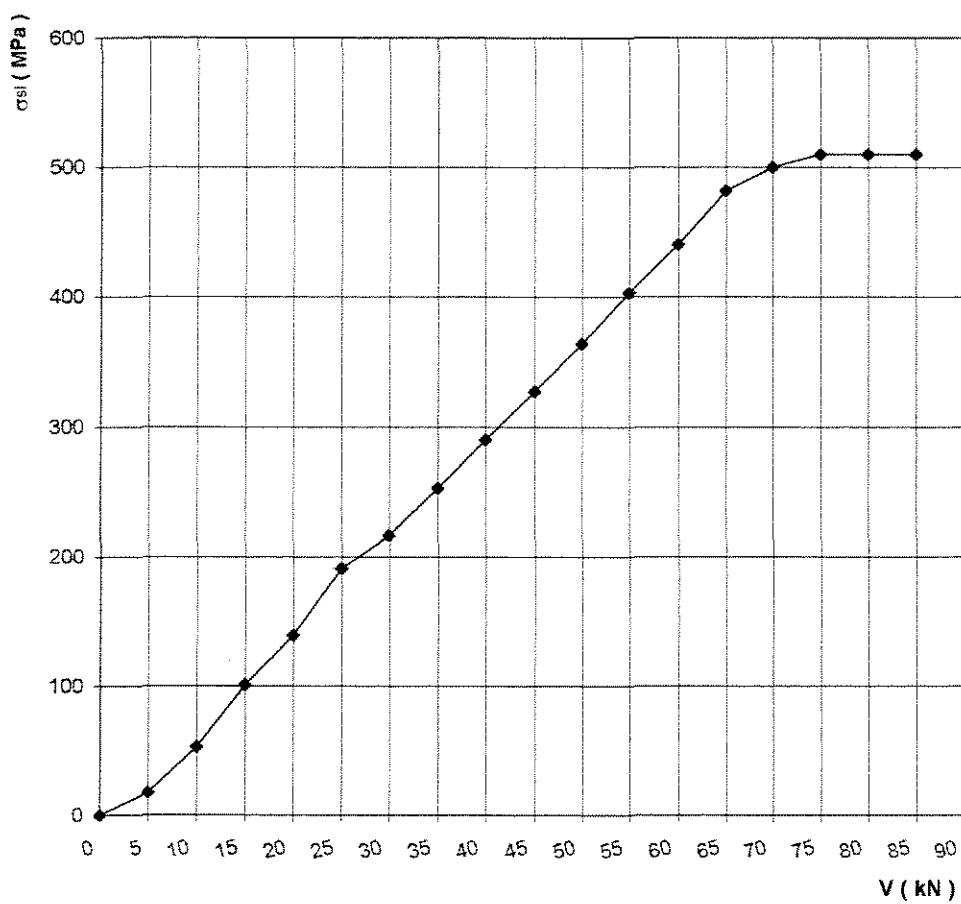
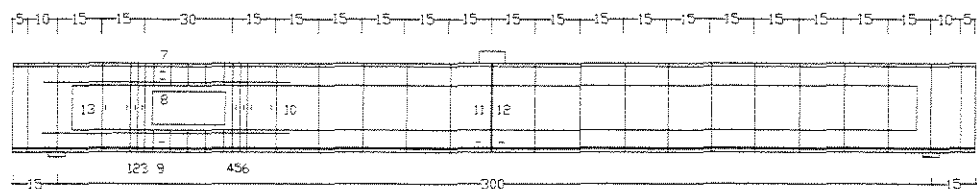


Figura 3.32 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 11 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-1	2	4	6	9	14	14	15	102	196	242	278	312	347	381	419	449

$f_{yw} = 810 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 13

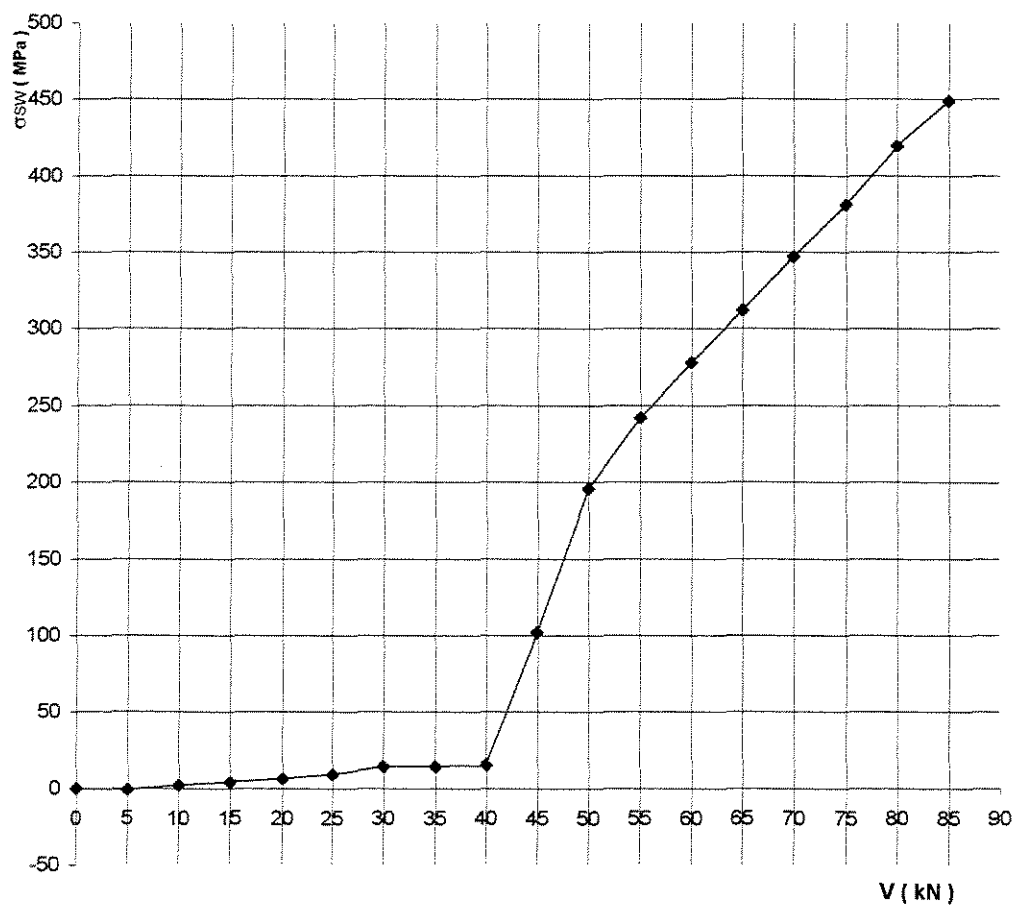


Figura 3.33 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 13 (MPa) x V (kN)

2F (kN)	Flecha meio vão (mm)
0	0,00
10	0,55
20	1,47
30	2,38
40	3,40
50	4,37
60	5,39
70	6,52
80	7,60
90	8,80
100	9,93
110	11,08
120	12,25
130	13,35
140	14,60
150	15,87
160	17,10
170	18,50

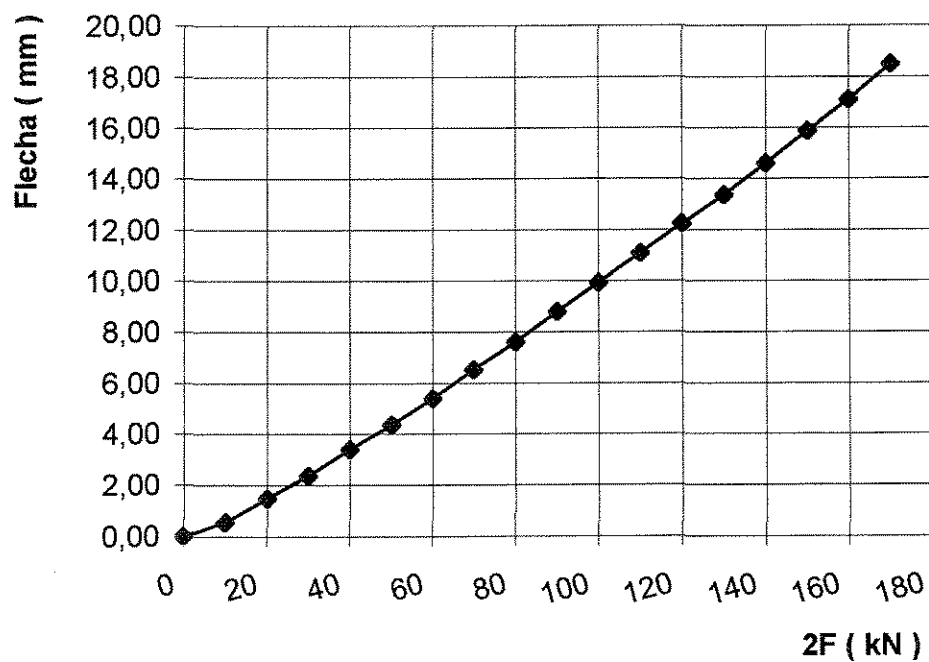


Figura 3.34 - Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm) da viga VR-4

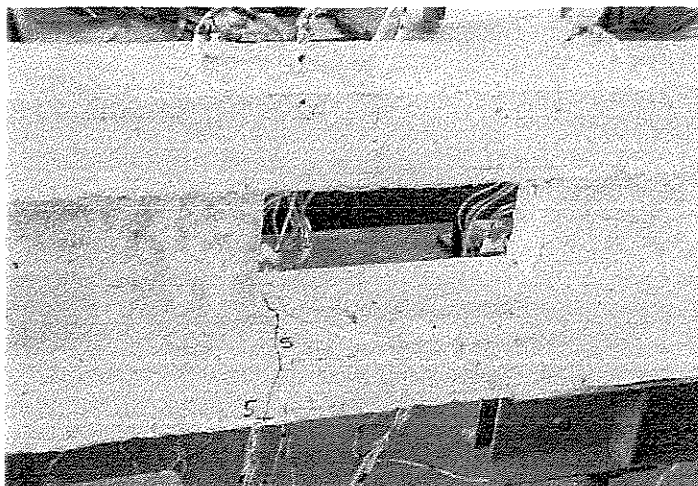


Figura 3.35a – Início das fissuras na região da abertura na viga VR-4

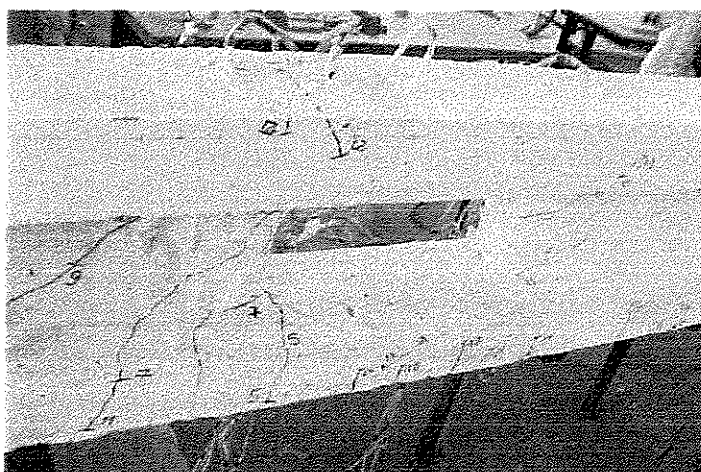


Figura 3.35b – Fissuração da viga VR-4 na região da abertura

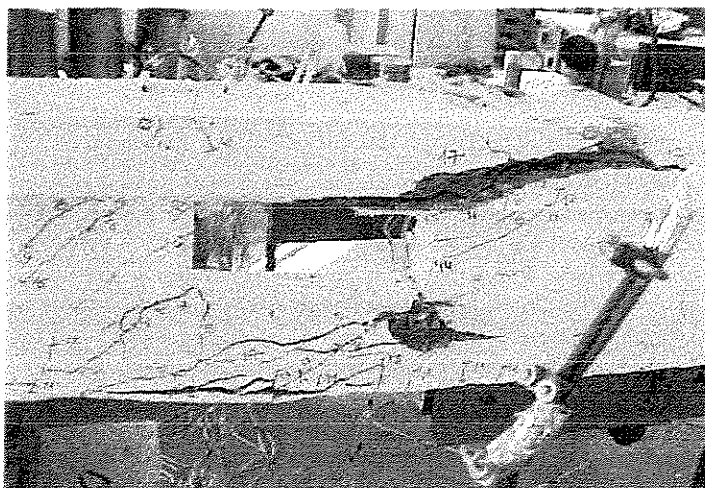


Figura 3.35c – Ruptura da viga VR-4 sobre a abertura.

3.3 – RESULTADOS DA VIGA VR-5

Na viga VR-5 o escoamento da armadura longitudinal se deu com carga total igual a 150 kN e a ruptura do concreto com 173 kN.

Na região da abertura a armadura de suspensão mais solicitada foi aquela situada junto da abertura no lado da carga. Na carga ultima as tensões nos estribos 4, 5 e 6 foram de 409 MPa, 352 MPa e 372 MPa, respectivamente e as deformações foram de 1,99 ‰, 1,91 ‰ e 1,81 ‰, respectivamente. Na barra inclinada a tensão foi de 625 MPa, maior que nos estribos verticais, e a deformação foi de 2.98 ‰.

A armadura de suspensão no lado do apoio foi a menos solicitada, ou seja, no lado onde acontece a dissipação do fluxo dos esforços que ultrapassam a abertura pelos banzos superior e inferior. Na carga ultima as tensões nos estribos 1, 2 e 3 foram de 244 MPa, 205 MPa e 246 MPa, respectivamente e as deformações foram de 1,19 ‰, 1,00 ‰ e 1,20 ‰, respectivamente. Na barra inclinada a tensão foi de 625 MPa, maior que nos estribos verticais, e a deformação foi de 3.30 ‰.

O banzo sobre a abertura esteve comprimido e sob flexão. Na carga última houve alongamento da barra longitudinal superior, com tensão de 234 MPa e deformação de 1,19 ‰ e de encurtamento nas barras inferiores com tensão de -94 MPa e deformação de -0,48 ‰.

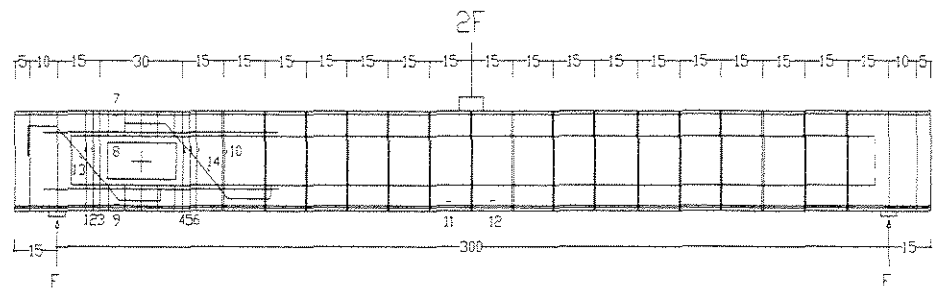
No banzo sob a abertura, o extensômetro 9 indicou tensão de 177 MPa na armadura longitudinal para a carga final.

Os gráficos de tensão x deformação das armaduras estão nas figuras de 3.36 a 3.49.

A determinação da resistência à compressão do concreto foi feita ensaiando três corpos-de-prova submetidos a compressão axial. A resistência média a compressão encontrada foi $f_c = 74,5$ MPa.

Para a carga de 170 MPa, a flecha no meio do vão foi de 25,03 mm. A evolução da flecha em função da carga encontra-se na figura 3.50.

As figuras 3.51a, 3.51b e 3.51c mostram panoramas da fissuração da viga VR-5 ensaiada.



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-1	-3	-5	-6	-5	-3	14	60	102	122	139	157	176	192	207	224	244

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 1

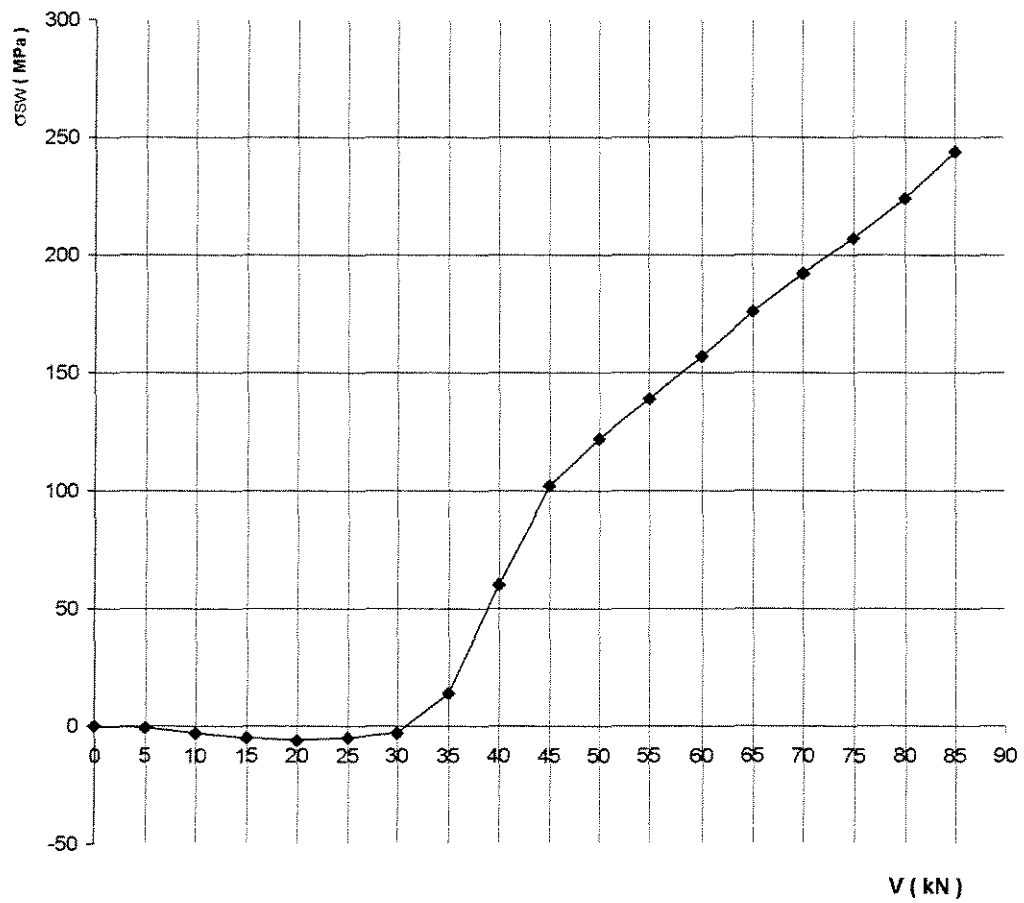


Figura 3.36 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 1 (MPa) x V (kN)

V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	2	0	-1	-1	7	19	41	86	106	122	140	159	178	194	207	224	246

 $f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensometro 3

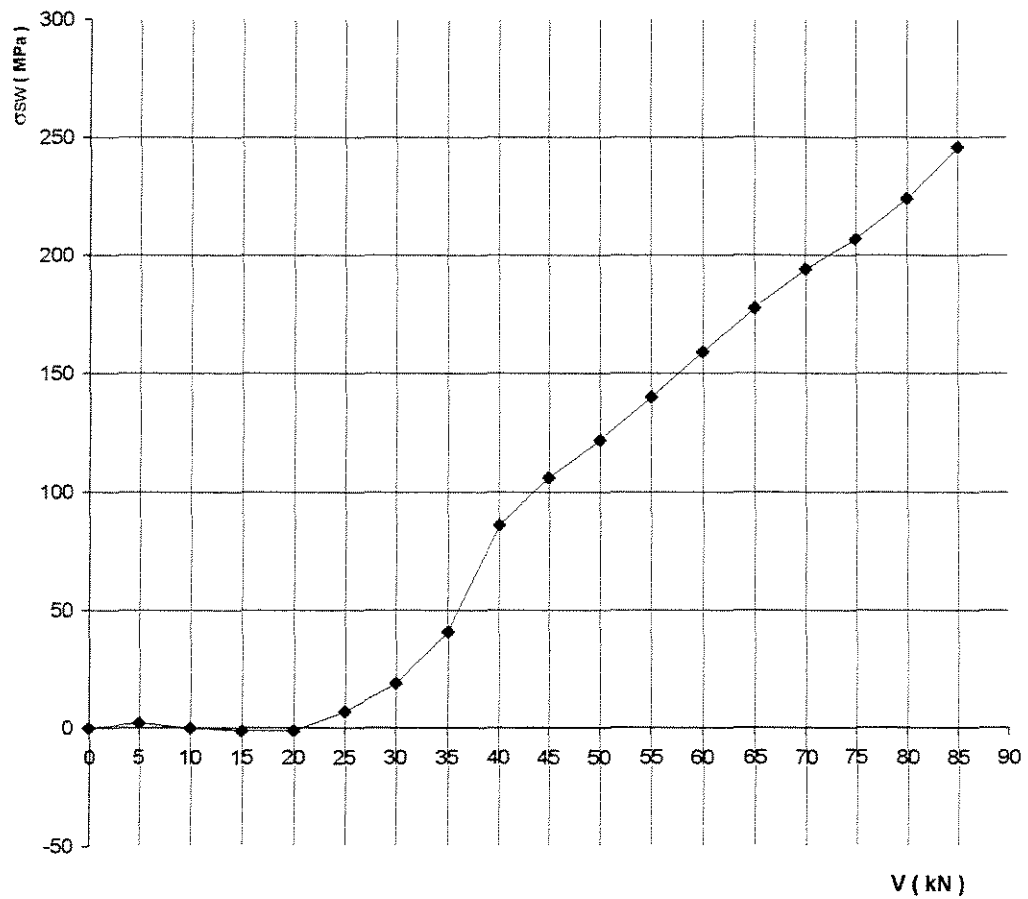
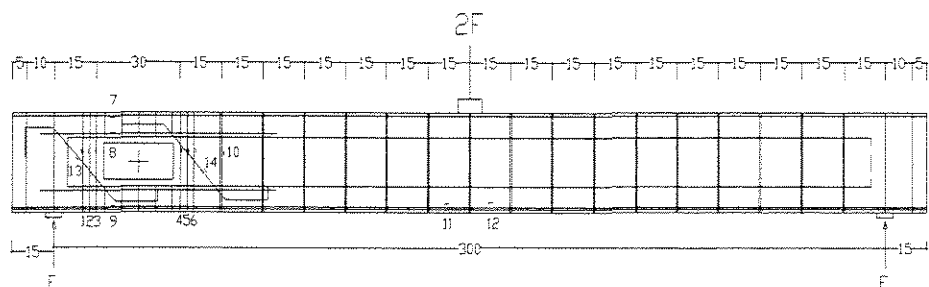


Figura 3.38 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 3 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	0	1	5	20	60	100	131	165	206	236	266	294	323	352	380	400	409

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 4

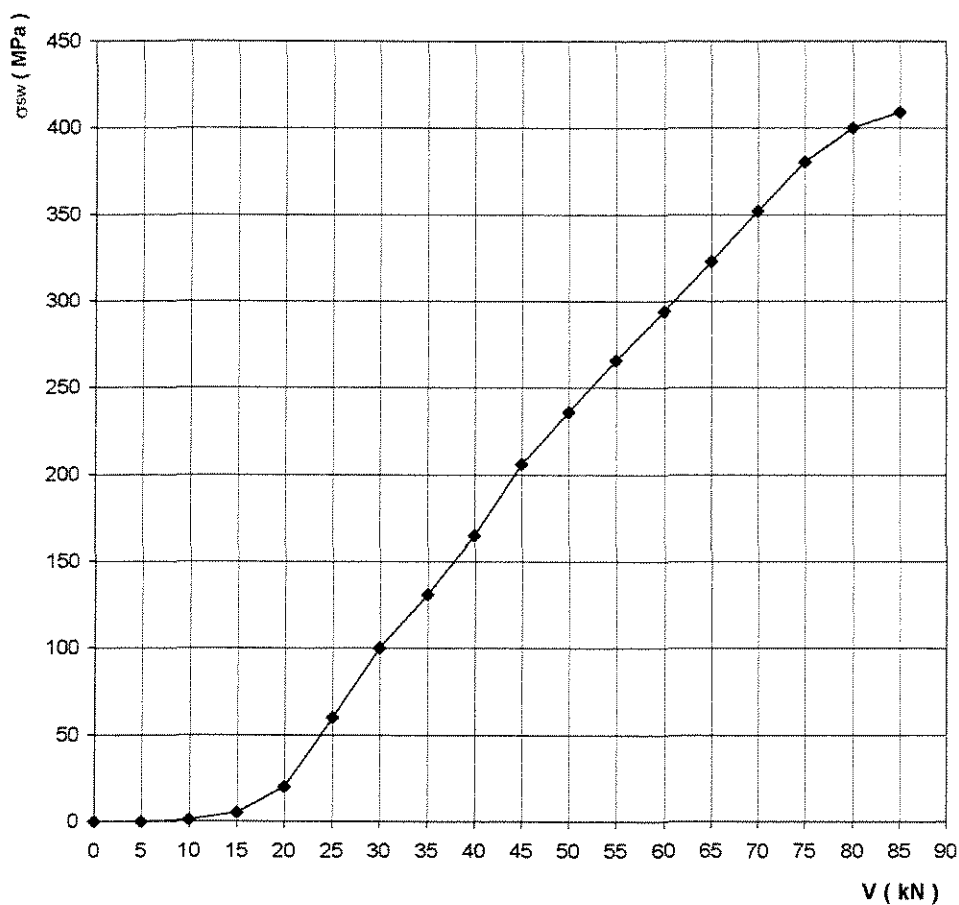


Figura 3.39 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 4 (MPa) x V (kN)

V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	1	4	9	22	62	101	133	164	193	214	233	256	281	306	333	358	372

fyw = 710 MPa

Tensão na barra do extensometro 6

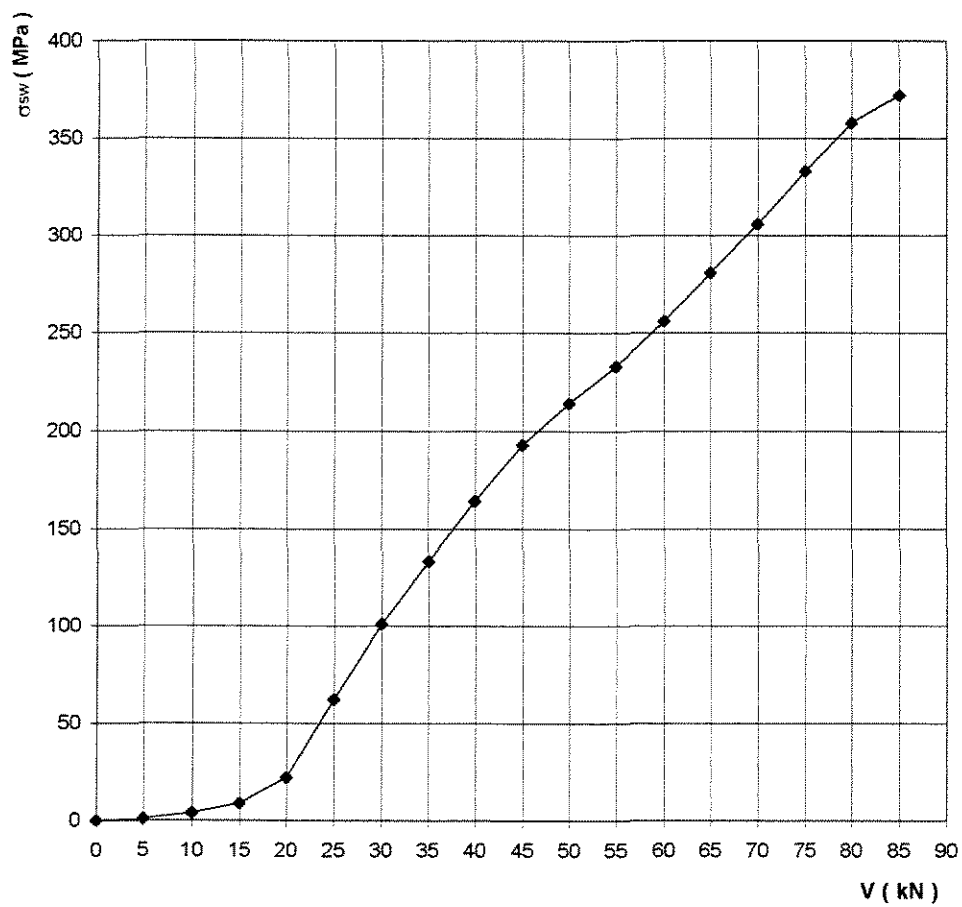
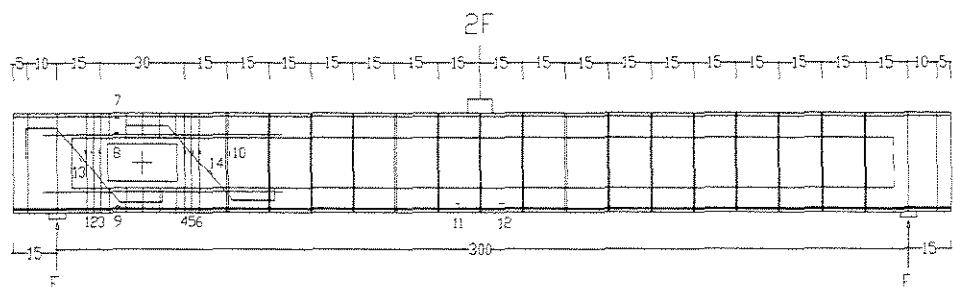


Figura 3.41 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 6 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	0	1	3	7	12	19	29	36	52	68	87	107	128	151	174	200	234

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 7

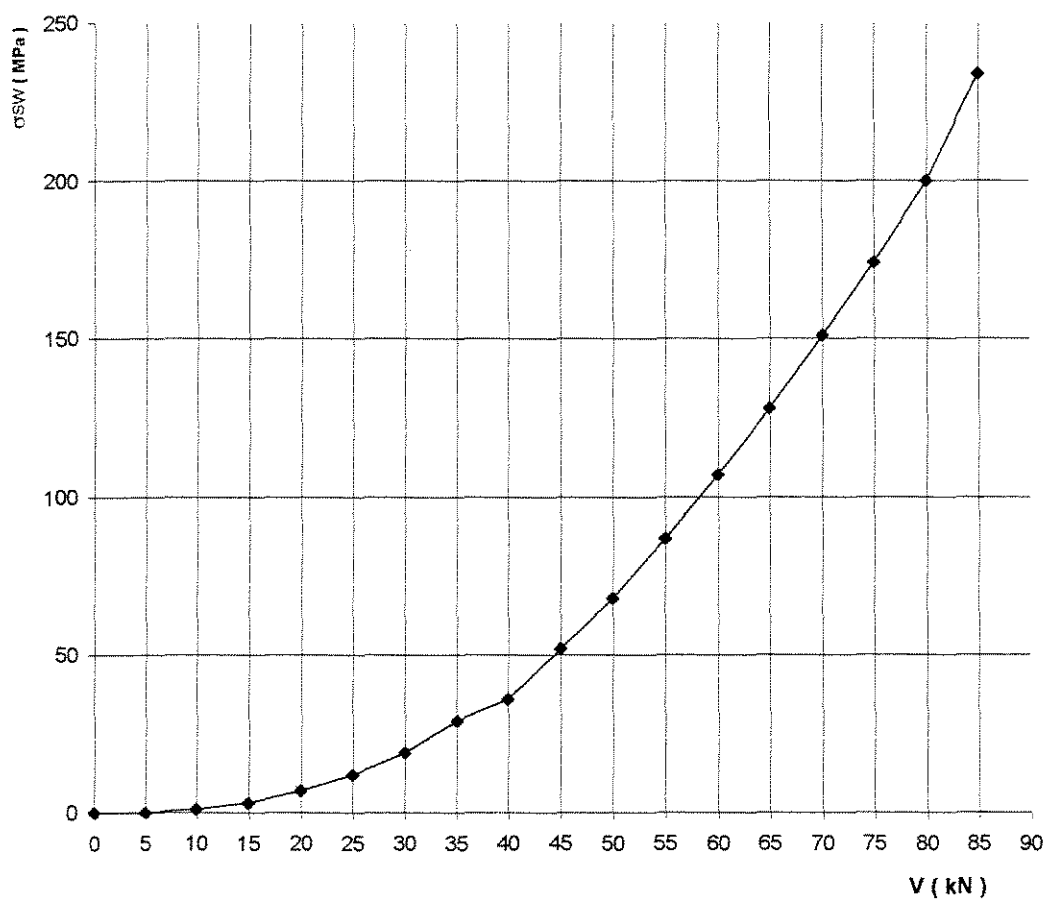
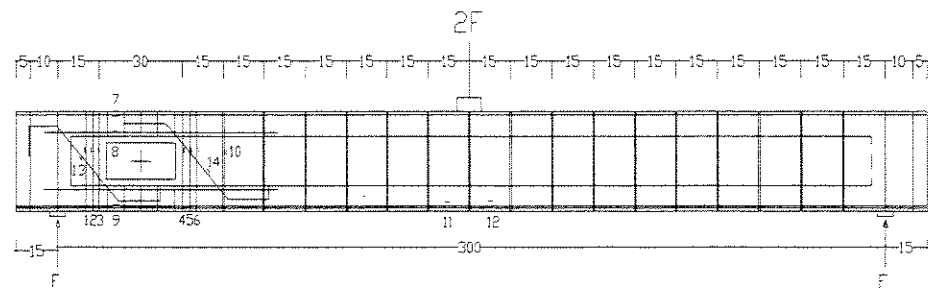


Figura 3.42 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 7 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	-5	-10	-16	-21	-26	-32	-38	-44	-49	-54	-59	-65	-71	-77	-83	-89	-94

$f_{yw} = 525 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 8

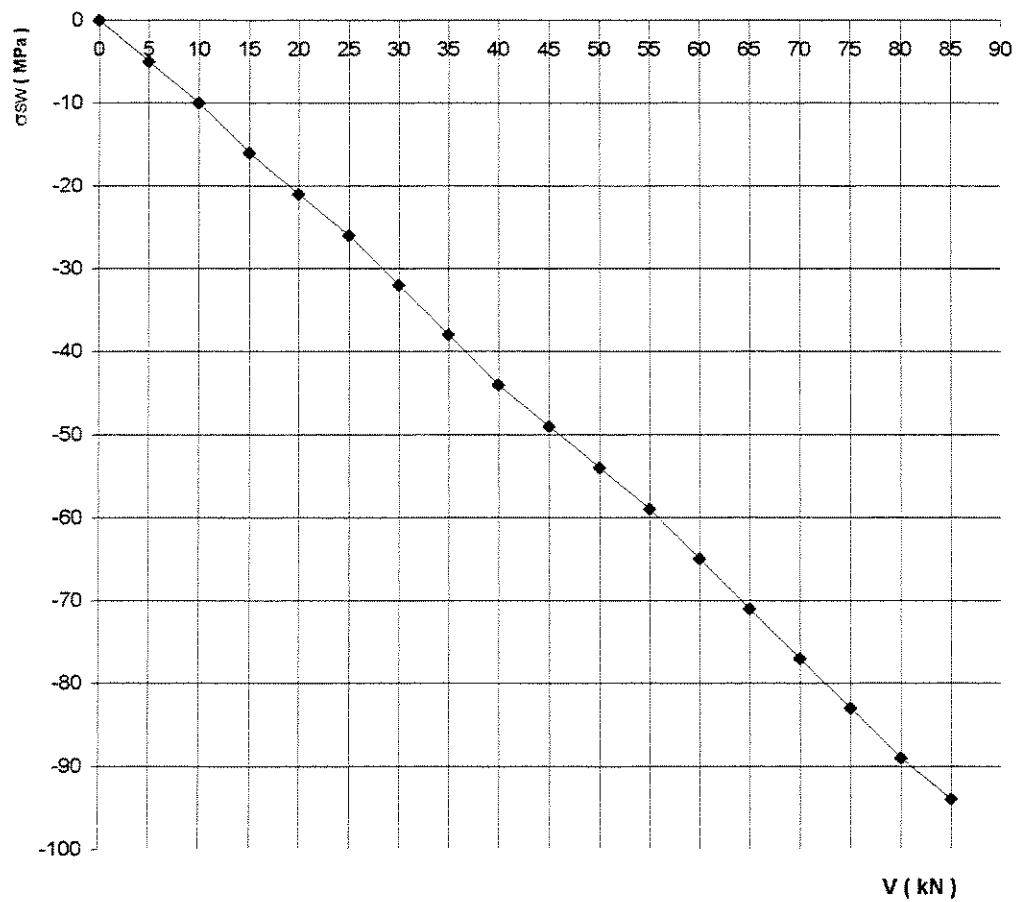
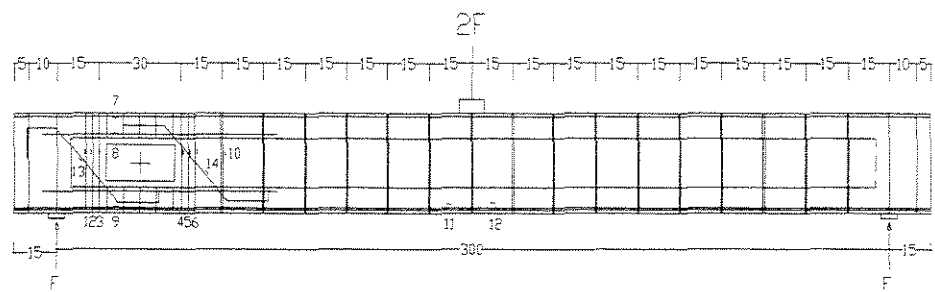


Figura 3.43 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 8 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	3	14	23	32	39	46	53	62	70	78	87	100	114	129	142	157	177

$f_{yw} = 510 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 9

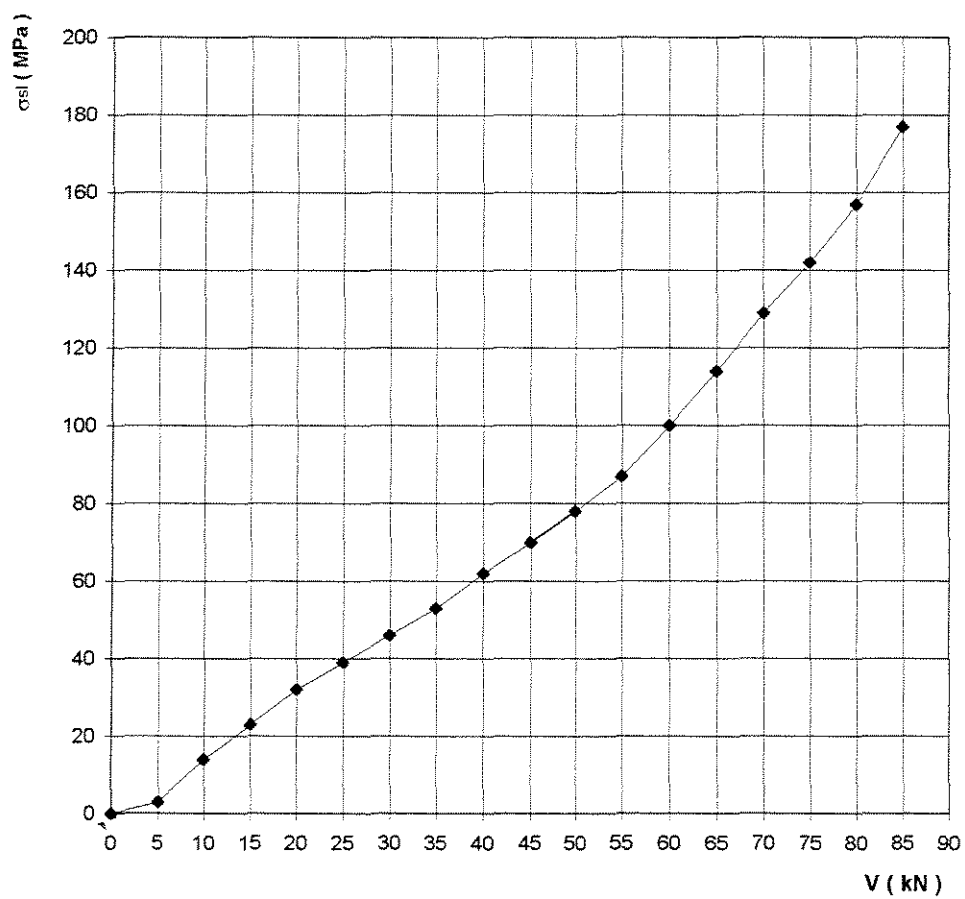
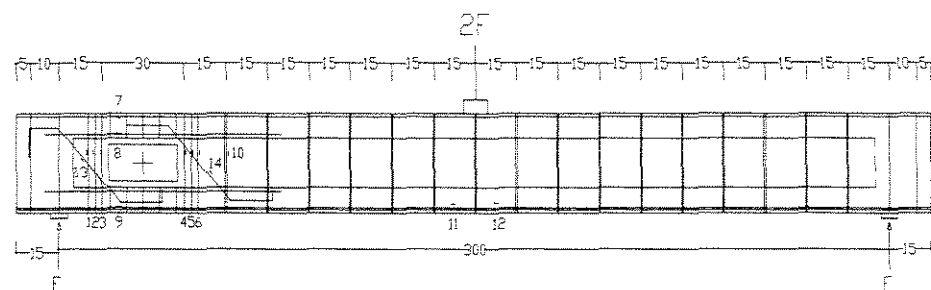


Figura 3.44 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 9 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	18	59	94	130	159	204	238	272	306	337	371	405	441	475	510	510	510

$f_{yw} = 510 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 11

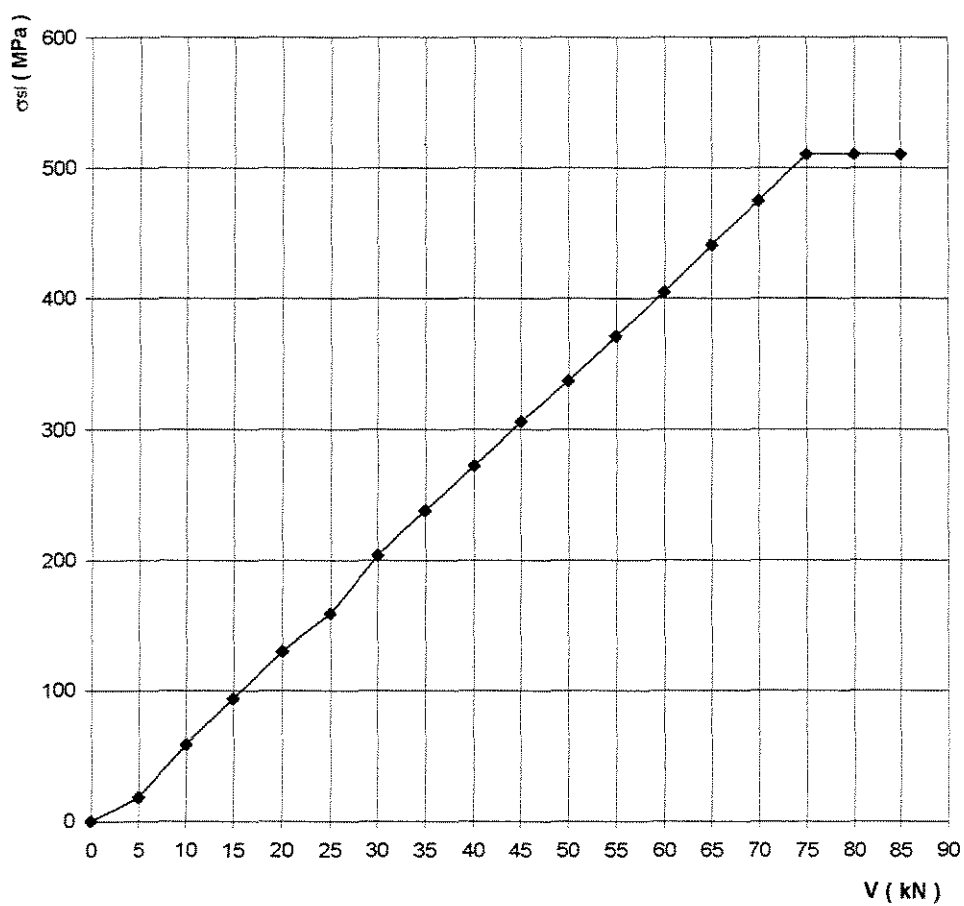
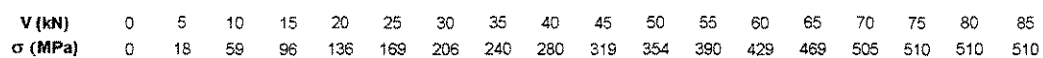


Figura 3.46 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 11 (MPa) x V (kN)



Tensão na barra do extensometro 12

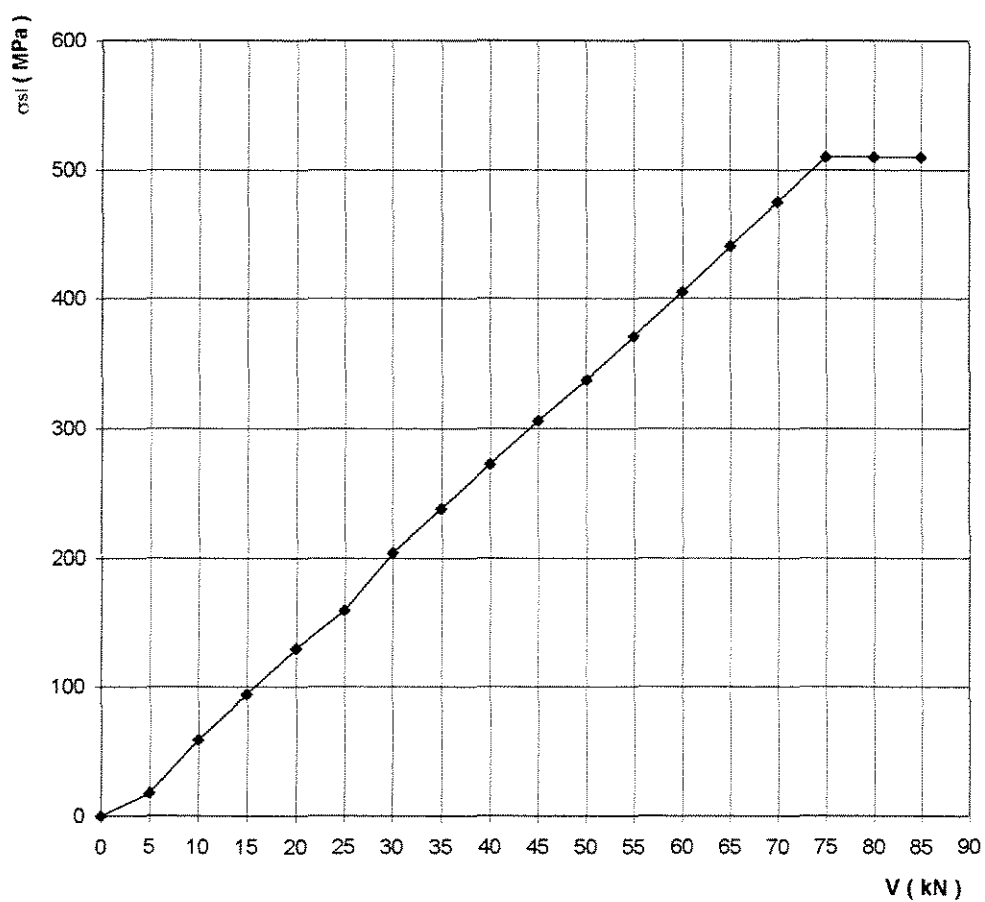
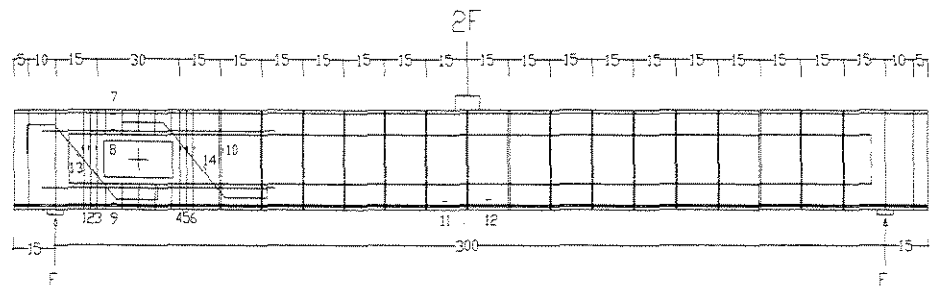


Figura 3.47 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 12 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	3	6	9	12	16	21	36	74	133	177	222	291	396	480	546	585	625

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 13

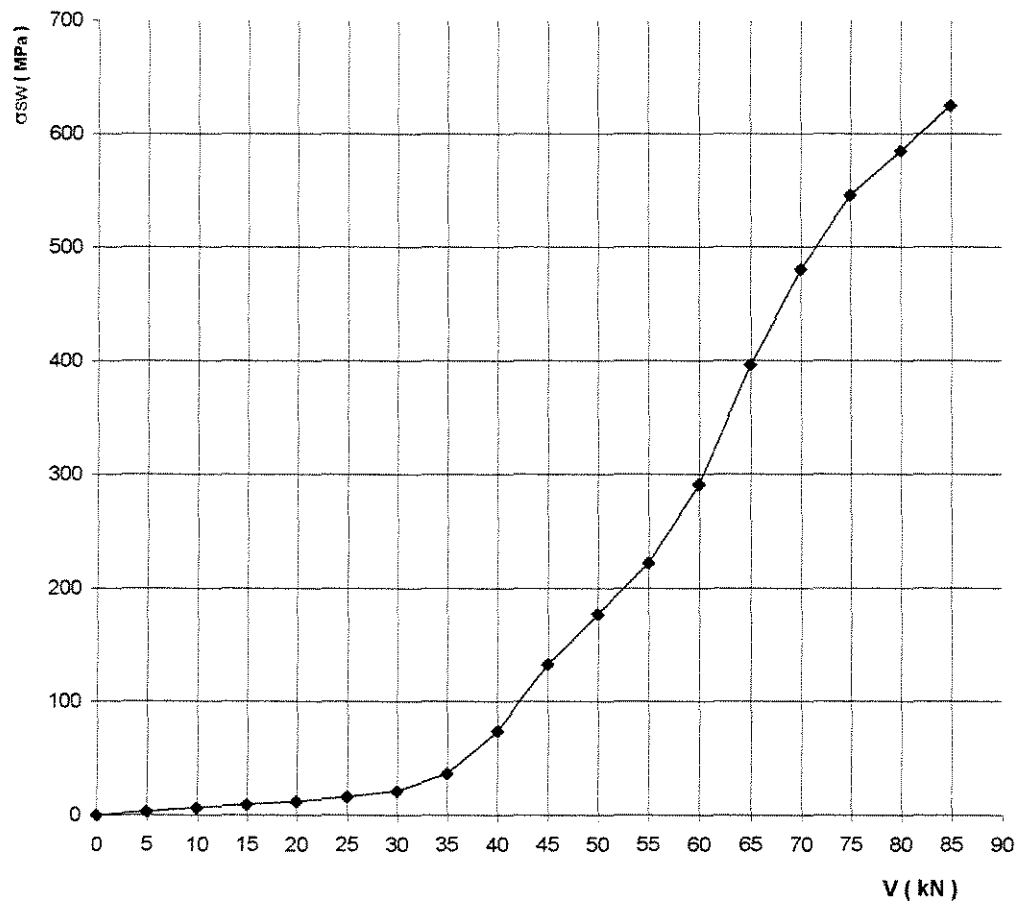
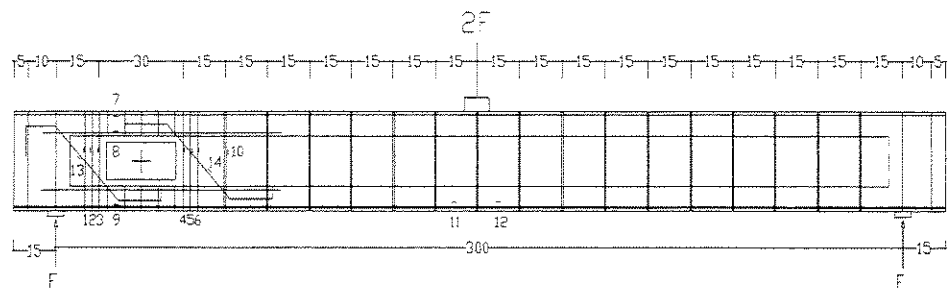


Figura 3.48 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 13 (MPa) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
σ (MPa)	0	6	14	26	51	112	179	236	288	322	355	389	426	467	506	547	585	625

$f_{yw} = 710 \text{ MPa}$

Tensão na barra do extensômetro 14

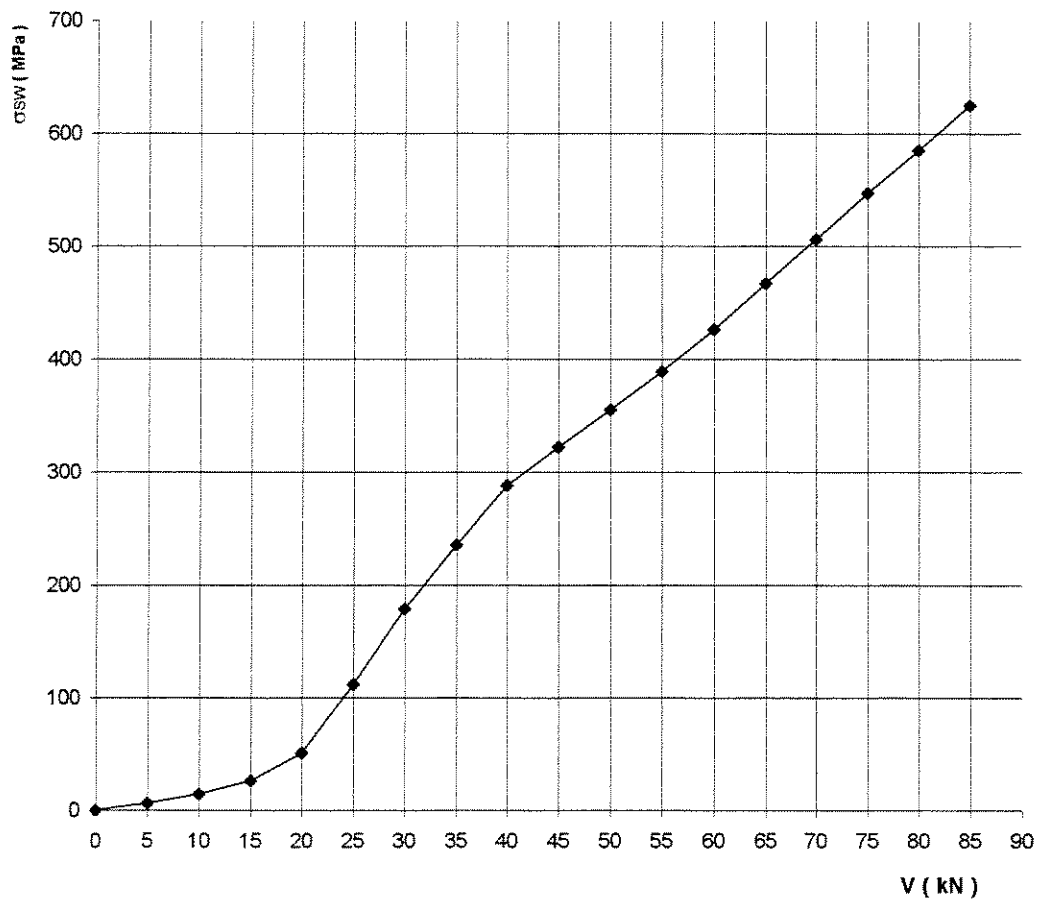


Figura 3.49 - Gráfico tensão na barra do extensômetro 14 (MPa) x V (kN)

2F (kN)	Flecha meio vão (mm)
0	0,00
10	0,51
20	1,45
30	2,45
40	3,46
50	4,42
60	5,66
70	6,63
80	7,77
90	8,98
100	10,23
110	11,42
120	12,70
130	13,83
140	15,03
150	16,33
160	18,00
170	25,03

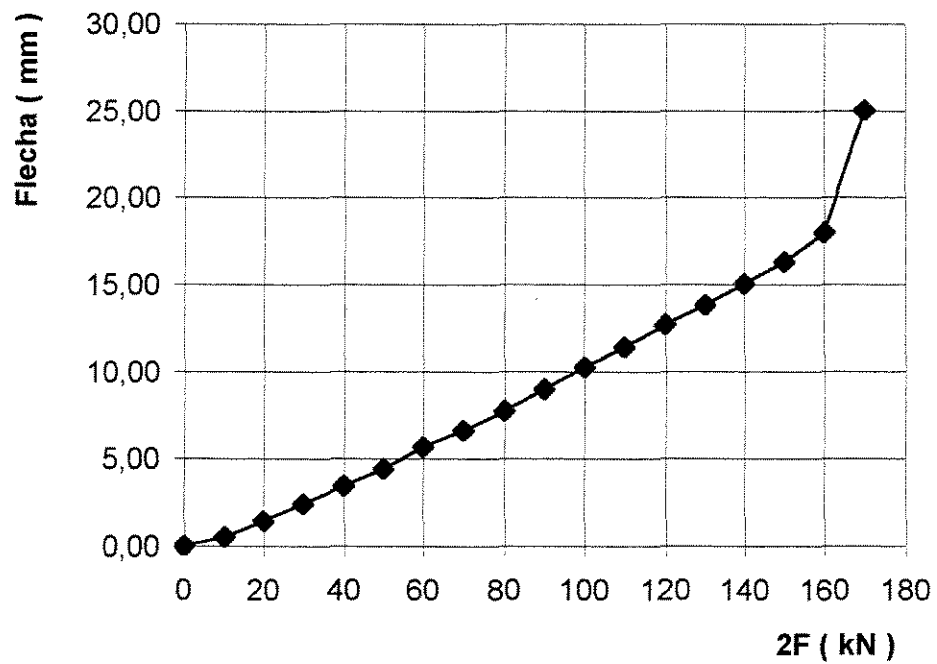


Figura 3.50 - Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm) da viga VR-5

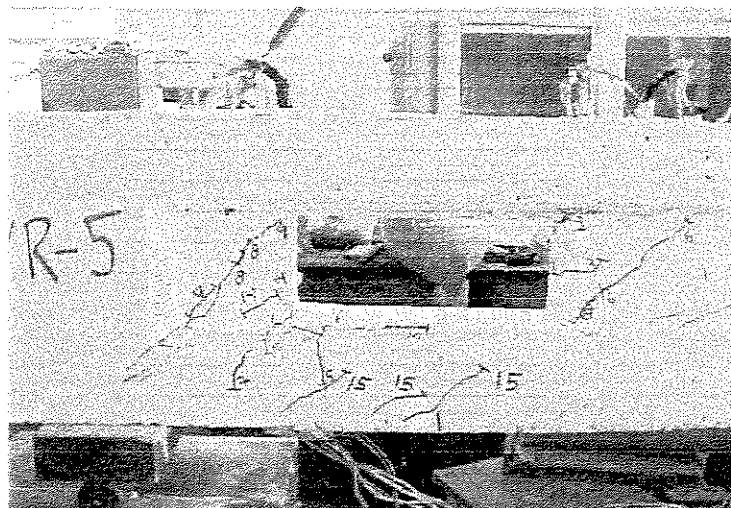


Figura 3.51a – Fissuras na região da abertura da viga VR-5

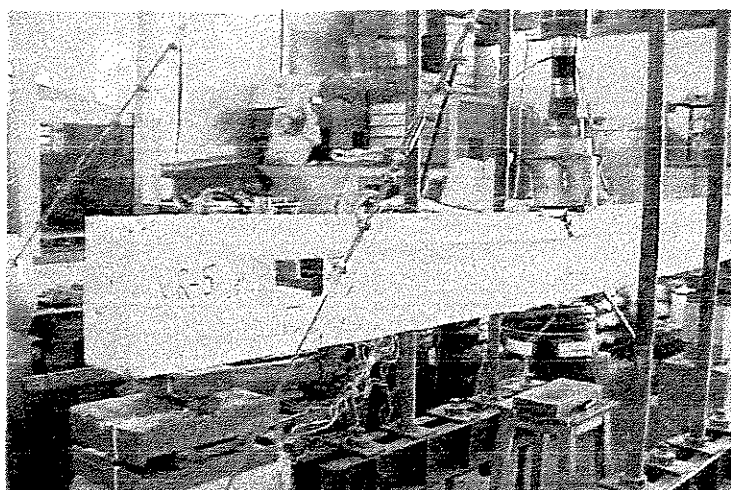


Figura 3.51b – Vista geral da viga VR-5 após ruptura

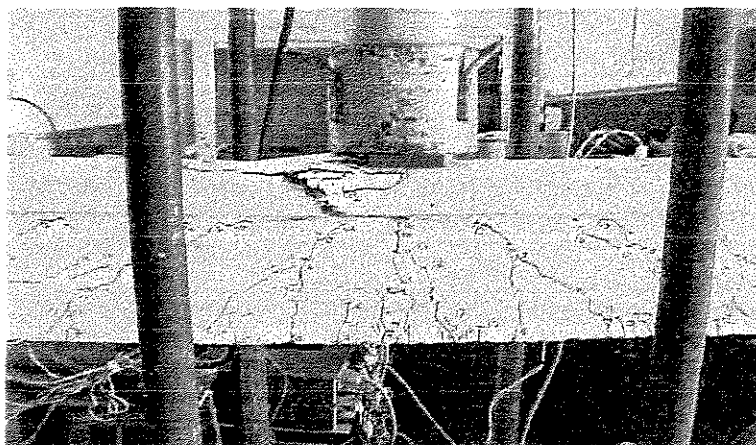


Figura 3.51c – Ruptura da viga VR-5 no meio do vão

3.4 – IMAGENS DE ISOTENSÃO

Para uma melhor análise das vigas, foi feita uma análise computacional das mesmas com a utilização do programa SAP 90. A modelagem foi feita por elementos de 12 x 50 mm. Na região da mesa a espessura da chapa adotada foi de 150 mm e na região da alma de 50 mm. As figuras 3.52 a 3.57 mostram estes gráficos.

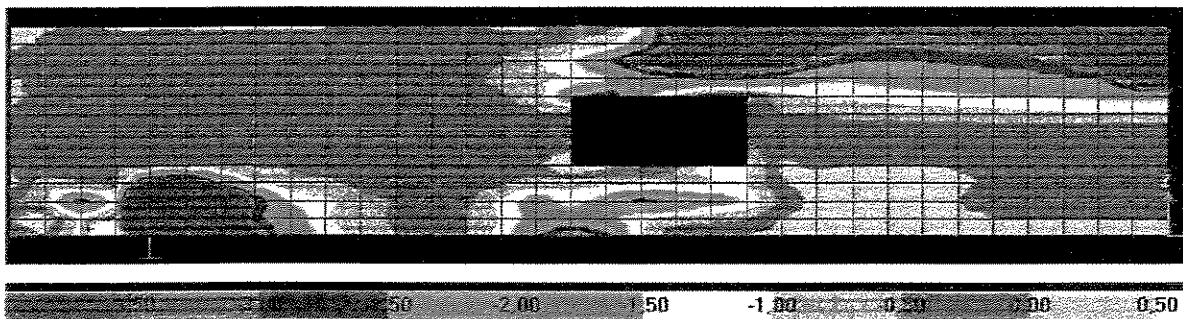


Figura 3.52 – Imagens das isotensões de compressão de VR-3

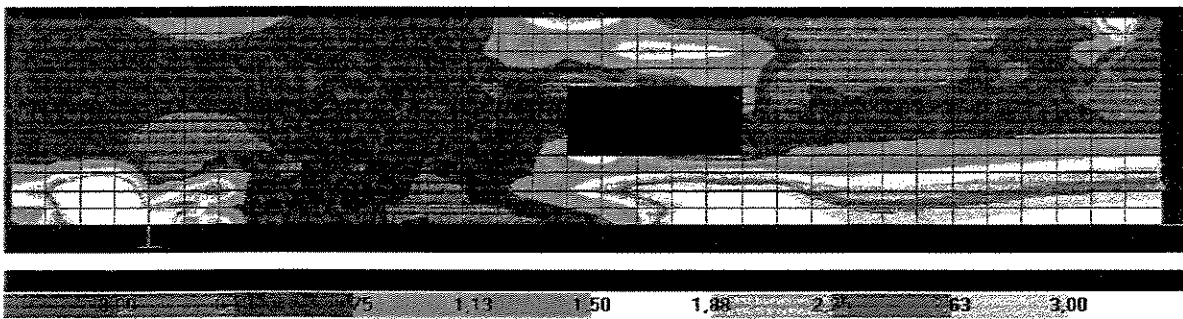


Figura 3.53 – Imagens das isotensões tração de VR-3

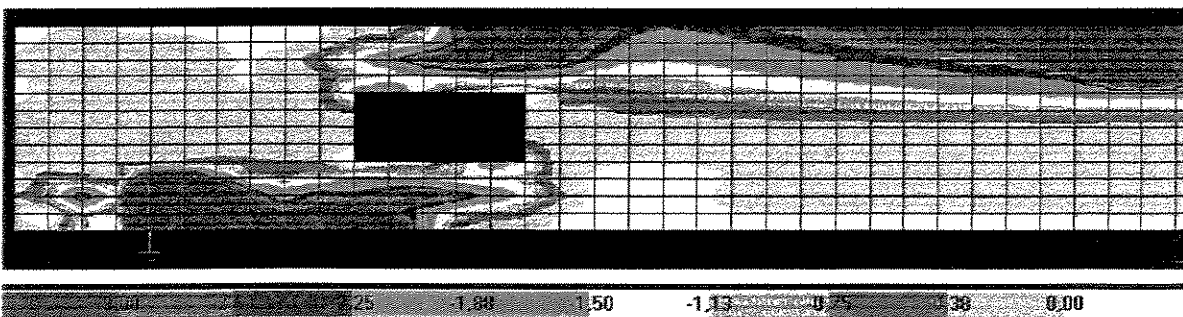


Figura 3.54 – Imagens das isotensões compressão de VR-4

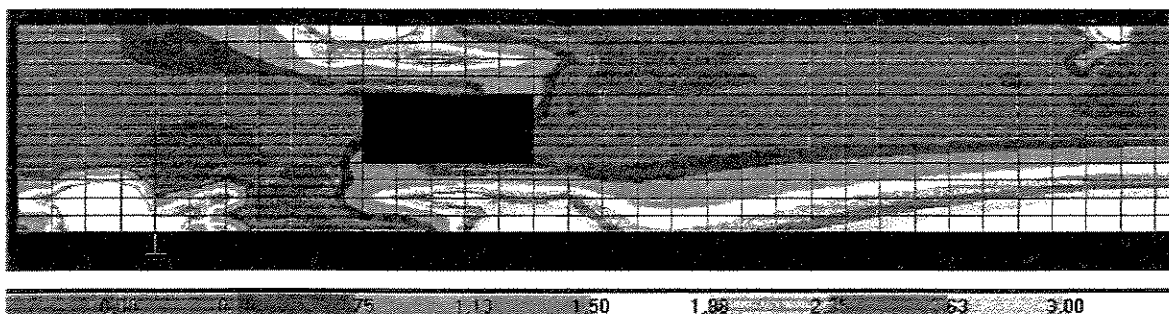


Figura 3.55 – Imagens das isotensões tração de VR-4

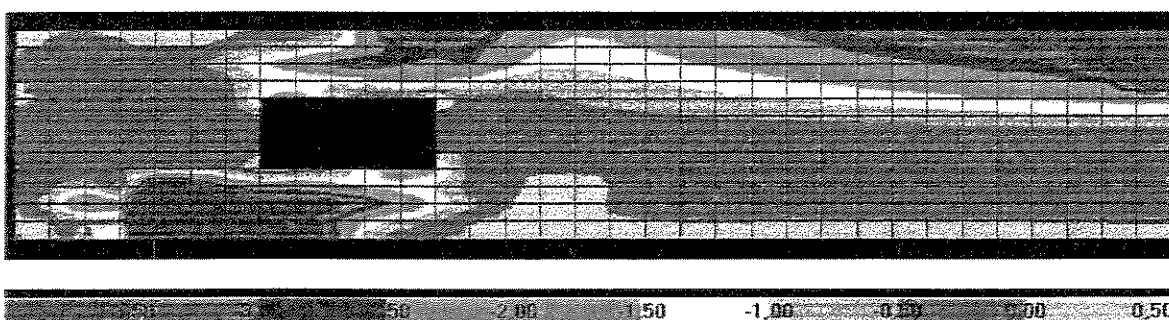


Figura 3.56 – Imagens das isotensões compressão de VR-5

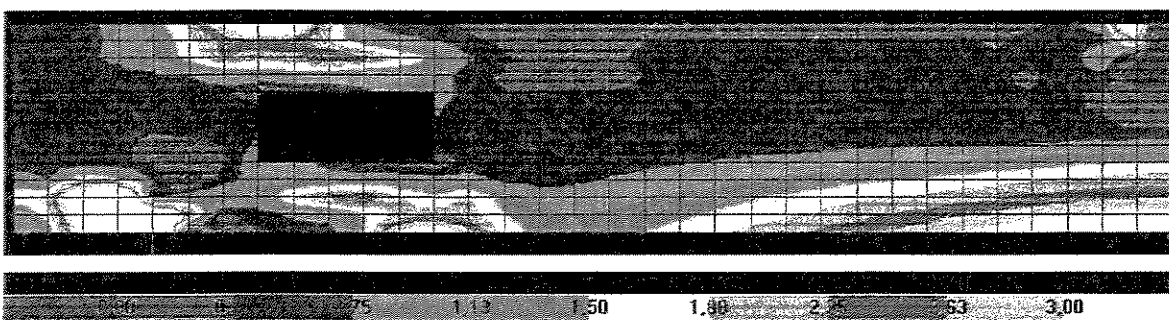


Figura 3.57 – Imagens das isotensões tração de VR-5

Percebe-se que as maiores tensões concentram-se nos cantos da abertura.

No lado da abertura próximo a aplicação das cargas o comportamento foi semelhante para as vigas ensaiadas.

No lado da abertura próximo ao apoio houve uma maior perturbação das tensões quando aproximou-se a abertura do apoio, de VR-3 para VR-5, gerando maiores tensões no canto inferior esquerdo.

Capítulo 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

As vigas VR-3, VR-4 e VR-5 foram dimensionadas de acordo com as hipóteses da NBR 6118¹, para que a ruína ocorresse por flexão, com escoamento da armadura longitudinal e que alcançasse a mesma carga de ruína de uma viga semelhante, porém sem abertura na alma.

No dimensionamento dessas vigas tinham-se como maior preocupação a concentração de tensões nos cantos da abertura. Outros autores já realizaram ensaios com uso de barras inclinadas e estribos verticais para absorver estes esforços.

Admite-se neste trabalho que somente os estribos atuem como armadura de suspensão e devam suspender a totalidade de V . As barras inclinadas constituem uma armadura complementar para limitar a deformação da alma e a concentração de tensões de tração nos cantos da abertura.

Neste trabalho as vigas VR-3 e VR-4 tiveram como armadura de suspensão apenas estribos verticais de cada lado da abertura. A viga VR-5, além dessa armadura, teve como armadura complementar duas barras inclinadas, de cada lado da abertura, com as mesmas características geométricas e mecânicas dos estribos. A necessidade de sua presença foi evidenciada depois do ensaio da viga VR-4.

A tabela 4.1 e as figuras 4.1 a 4.16 mostram as forças suspensas pelos estribos verticais e barras inclinadas nas vigas VR-3, VR-4 e VR-5.

Tabela 4.1 – Componentes de V suspensas pelas armaduras $A_{s,90}$ e $A_{s,45}$

Vigas	Lado do Apoio					Lado da Carga				
	V_{90}	V_{45}	ΣV	$V_{90}/\Sigma V$	$V_{45}/\Sigma V$	V_{90}	V_{45}	ΣV	$V_{90}/\Sigma V$	$V_{45}/\Sigma V$
VR-3 $V_U = 95 \text{ kN}$	0,54V	-	0,54V	1,00	-	0,72V	-	0,72V	1,00	-
VR-4 $V_U = 85 \text{ kN}$	0,77V	-	0,77V	1,00	-	0,73V	-	0,73V	1,00	-
VR-5 $V_U = 86,5 \text{ kN}$	0,32V	0,20V	0,52V	0,62	0,38	0,54V	0,20V	0,74V	0,73	0,27

Observa-se que na viga VR-3 a armadura de suspensão no lado da carga é mais solicitada e suspende 0,72 V, concordando com a recomendação de Leonhardt e Mönig³ comentada anteriormente. Nota-se também que nesta viga a armadura de suspensão do lado do apoio suspende 0,54 V. Nesta viga o modo de ruptura foi o esperado: flexão, no meio do vão.

Na viga VR-4 a armadura de suspensão do lado da carga suspende 0,73 V, comportando-se de modo equivalente à viga anterior, porém os estribos no lado do apoio são mais solicitados que na viga anterior suspendendo 0,77 V, pois há uma perturbação nas tensões devido à proximidade do apoio, como mostram as imagens de isotensão, figuras 3.52 a 3.57. O modo de ruptura desta viga foi força cortante - flexão. A figura 3.35c mostra que a ruptura ocorreu no banzo superior da abertura.

Este fato não deve ser interpretado como insucesso do ensaio, mas como um sinal de alerta. A armadura longitudinal da viga VR-4 já havia entrado em escoamento com a carga total de 150 kN, antes de ocorrer a ruptura do banzo comprimido com 170 kN. Essa ruptura já era iminente. O que houve foram grandes deformações na região superior do lado direito da abertura dando origem a uma fissura oblíqua crítica, passando por cima da abertura, que interceptou o banzo comprimido e deslocou a ruptura para perto da abertura. Este fato motivou o uso da armadura complementar constituída pelas barras inclinadas na viga seguinte, VR-5, na tentativa de atenuar essas deformações. Por sua vez, a viga VR-5 teve ruptura por flexão por esmagamento

do banzo comprimido com a carga total de 173 kN e sua armadura longitudinal já havia iniciado o escoamento com a mesma carga de 150 kN.

Como a força cortante é constante ao longo da viga, com o deslocamento da abertura na direção do apoio, da viga VR-3 para a viga VR-5, em igualdade de V , ocorre uma redução do momento fletor na seção da viga passando pelo centro da abertura e, conseqüentemente, uma redução da resultante de compressão no banzo superior, figuras de 4.17 e 4.18. Esta resultante de compressão é favorável ao banzo sobre a abertura pois aumenta sua resistência ao cisalhamento. Isto explica porque as vigas VR-3 e VR-5 comportam-se melhor que a viga VR-4. Observa-se nas figuras 4.17 e 4.18 que a barra longitudinal superior acusa, perto do canto superior esquerdo da abertura, compressão na viga VR-3, tração na viga VR-4 e muito mais tração na viga VR-5.

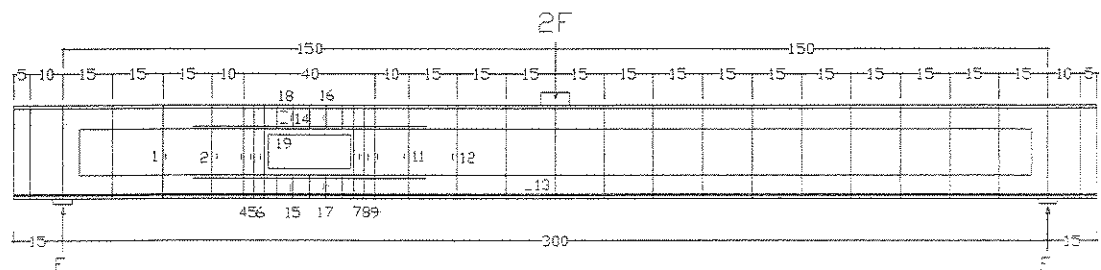
Na viga VR-5 os estribos combinados com as barras inclinadas suspenderam do lado da carga 0,74 V , valor próximo aos das vigas anteriores, e do lado da abertura 0,52 V .

A viga VR-5 mesmo estando numa situação mais desfavorável que as vigas anteriores, em função da menor força de compressão no banzo superior da abertura, a ruptura se deu por flexão, pois a presença das barras inclinadas, melhorou a aspecto geral de fissuração, combatendo a deformação transversal da alma e a concentração de tensões no canto da abertura, além de fazer com que os estribos verticais desta viga fossem menos solicitados que os de VR-3 e VR-4.

As figuras 4.13 e 4.15 mostram que a armadura de suspensão no lado do apoio foi mais solicitada quando a abertura esteve na posição intermediária entre as adotadas, isto é, na viga VR-4. Nas situações extremas, abertura muito perto ou longe do apoio, as armaduras foram igualmente solicitadas.

Por outro lado, as figuras 4.14 e 4.16 mostram que a solicitação da armadura de suspensão no lado da carga não é influenciada pela posição da abertura.

A figura 4.19 mostra que as vigas tiveram uma evolução dos deslocamentos no meio do vão semelhante durante o ensaio. A ultima flecha da viga VR-5, com carga de 170kN, foi medida após várias tentativas para aumentar a carga mas sem sucesso.



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
4 (kN)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,2	6,1	7,5	7,9	8,8	9,8	10,6	11,8	12,7	13,7	14,6	16,1	17,7
5 (kN)	0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	5,7	7,8	8,0	8,2	8,5	8,3	10,0	11,4	12,4	13,7	14,9	17,9	20,7
6 (kN)	0,0	0,0	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-1,1	0,5	1,2	2,0	3,2	3,8	4,5	5,7	7,2	8,2	9,3	10,3	11,5	12,6
4+5+6 (kN)	0,0	0,0	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,4	10,3	15,1	17,5	19,3	21,0	22,4	26,3	30,4	33,3	36,7	39,9	45,5	51,0
V ₉₀	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

FORÇAS SUSPENSAS PELOS ESTRIBOS 4+5+6

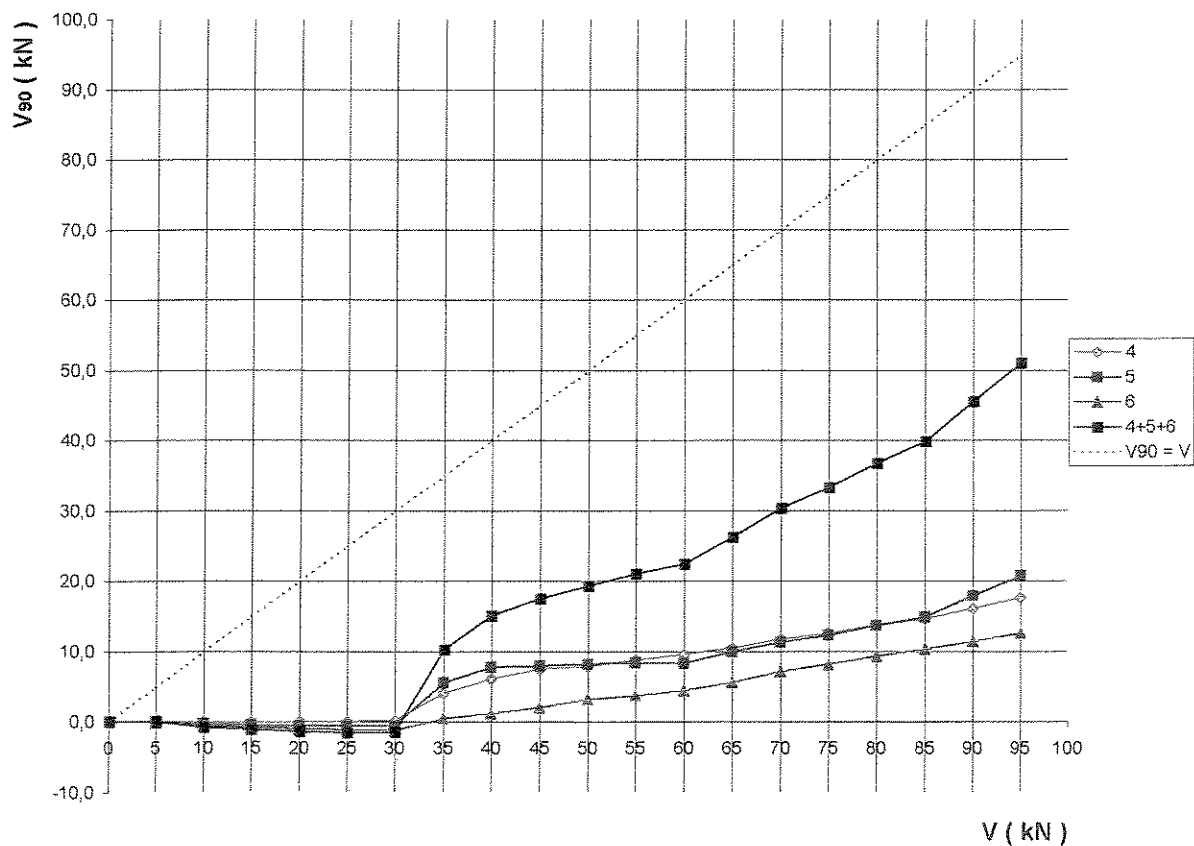
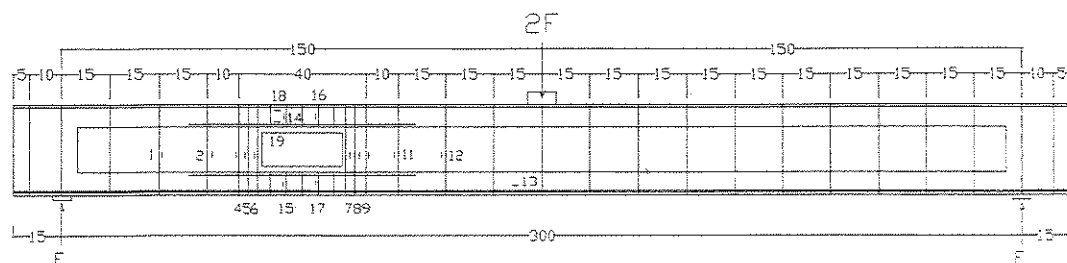


Figura 4.1 - Gráfico de forças suspensas do lado do apoio em VR-3 pelos estribos 4+5+6 (kN) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
7 (kN)	0,0	0,1	0,2	0,4	1,5	3,3	5,0	7,2	9,2	11,3	12,9	14,9	16,8	18,8	20,4	21,8	22,6	23,8	24,4	25,0
8 (kN)	0,0	0,0	0,3	0,4	0,4	0,5	4,1	7,0	8,9	10,8	12,3	14,0	15,4	16,8	18,3	19,6	21,2	22,2	23,6	24,4
9 (kN)	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,5	3,5	6,6	8,3	9,6	10,2	11,7	12,7	13,9	14,6	15,7	17,0	17,7	18,7	19,4
7+8+9 (kN)	0,0	0,1	0,7	1,1	2,4	4,4	12,6	20,8	26,4	31,7	35,5	40,6	45,0	49,5	53,3	57,1	60,8	63,7	66,7	68,8
V ₉₀	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

FORÇAS SUSPENSAS PELOS ESTRIBOS 7+8+9

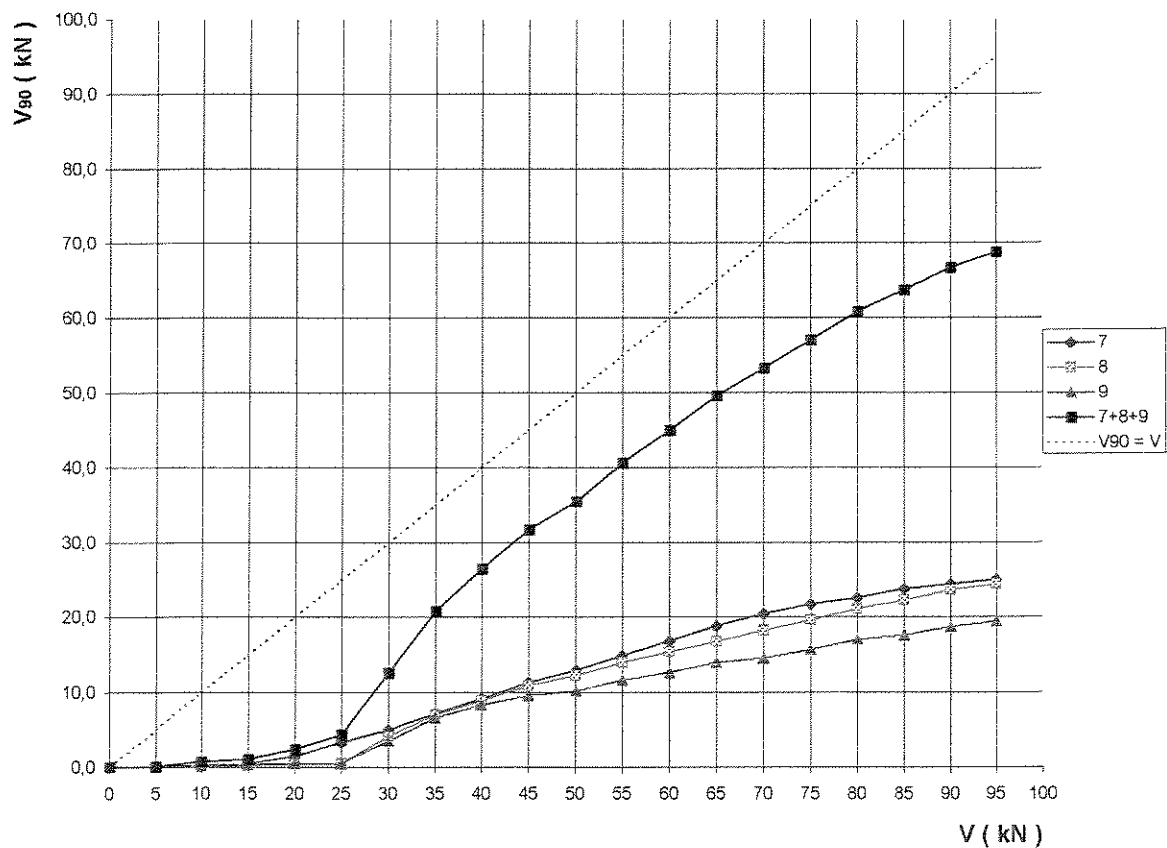
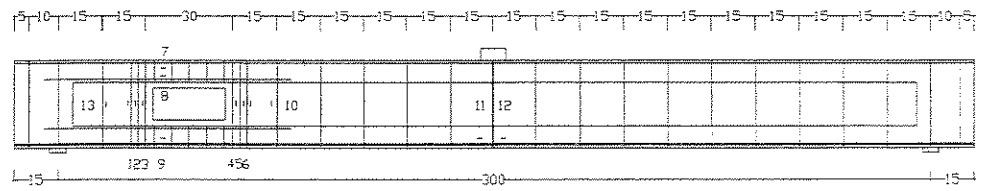


Figura 4.2 - Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-3 pelos estribos 7+8+9 (kN) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
1 (kN)	0	0	-0,08	-0,08	0	0,117	0,585	4,173	5,655	7,176	7,917	8,658	9,438	10,37	11,39	12,44	13,92	17,36
2 (kN)	0	-0,08	-0,27	-0,39	-0,43	-0,43	0,195	5,031	7,059	9,087	10,22	11,19	12,4	13,61	14,7	15,76	16,97	21,45
3 (kN)	0	-0,08	-0,43	-0,66	-0,86	-0,94	-0,62	6,474	9,165	11,47	13,3	15,13	16,97	18,84	20,71	21,84	23,01	26,52
1+2+3 (kN)	0	-0,16	-0,78	-1,13	-1,29	-1,25	0,156	15,68	21,88	27,73	31,43	34,98	38,81	42,82	46,8	50,04	53,9	65,33
V₉₀	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85

FORÇAS SUSPENSAS PELOS ESTRIBOS 1+2+3

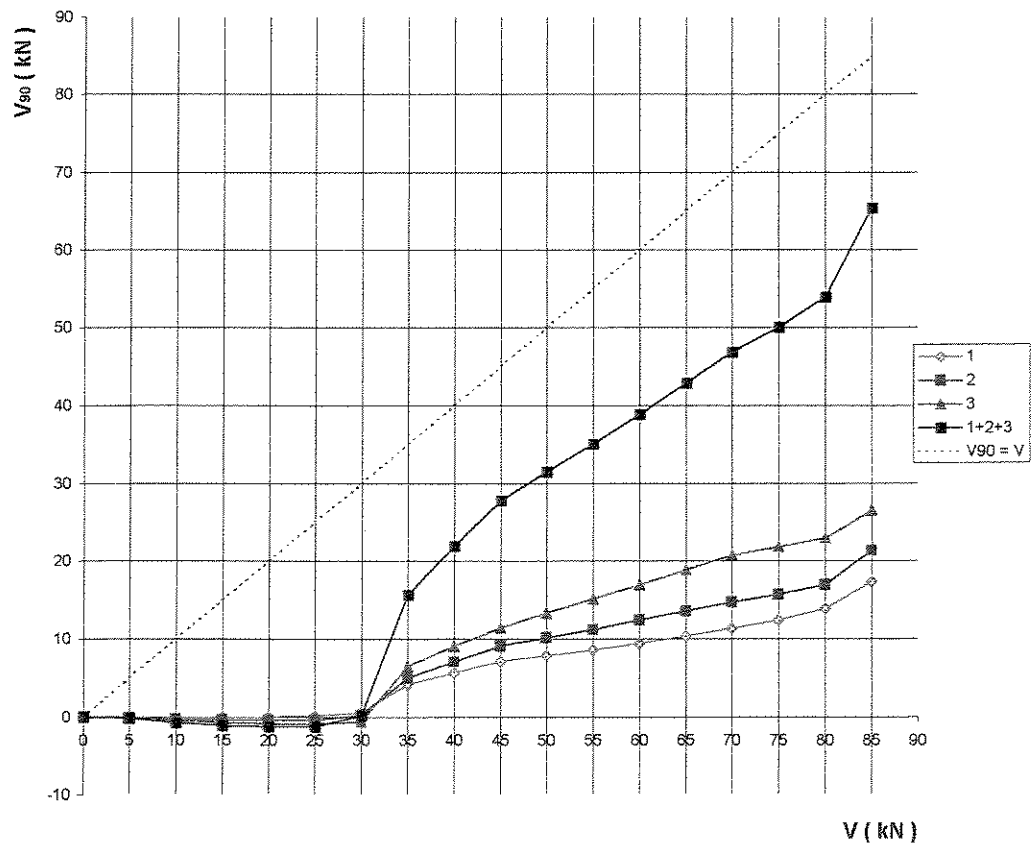
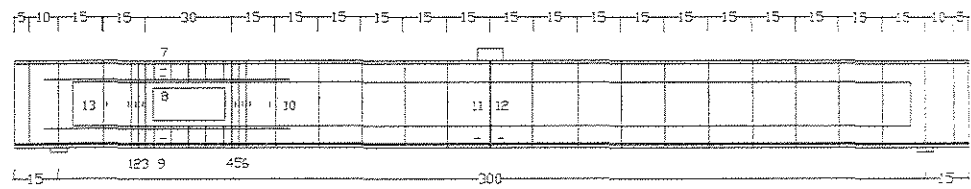


Figura 4.3 - Gráfico de forças suspensas do lado do apoio em VR-4 pelos estribos 1+2+3 (kN) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
4 (kN)	0	0,156	0,312	1,638	3,198	4,368	6,045	8,151	9,711	11,15	12,64	14,31	16,3	16,21	19,93	21,49	22,04	22,62
5 (kN)	0	0,039	0,117	1,092	2,262	3,159	4,29	6,474	8,073	9,282	10,45	11,58	12,83	14,39	16,22	17,47	18,53	19,46
6 (kN)	0	0,039	0,117	0,078	0,156	0,273	2,73	5,538	7,41	8,931	10,3	11,7	13,61	15,09	16,54	17,71	18,72	19,66
4+5+6 (kN)	0	0,234	0,546	2,808	5,616	7,8	13,07	20,16	25,19	29,37	33,38	37,6	42,74	47,7	52,69	56,67	59,28	61,74
V ₉₀	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85

FORÇAS SUSPENSAS PELOS ESTRIBOS 4+5+6

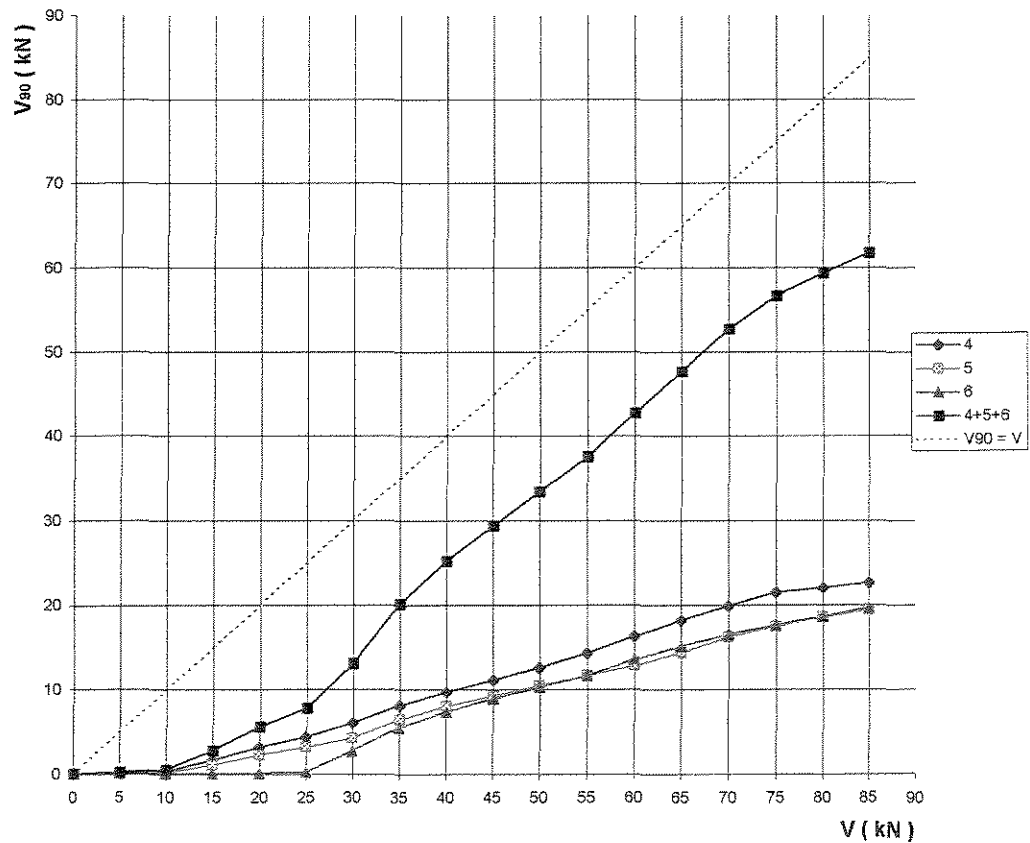
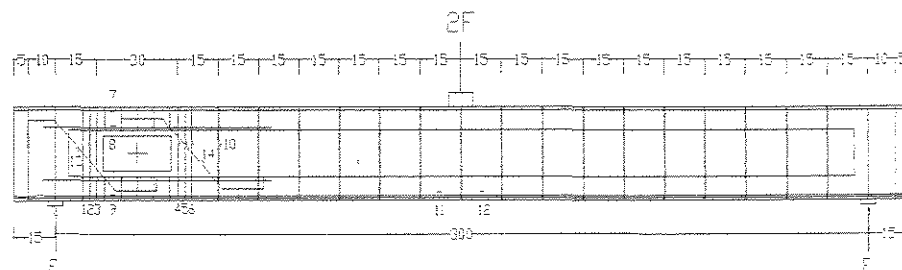


Figura 4.4 - Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-4 pelos estribos 4+5+6 (kN) x V (kN)



V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
4 (kN)	0,00	0,00	0,04	0,20	0,78	2,34	3,90	5,11	6,44	8,03	9,20	10,37	11,47	12,60	13,73	14,82	15,80	15,95
5 (kN)	0,00	0,00	0,04	0,16	0,59	1,83	3,74	5,38	6,86	8,39	9,44	10,45	11,43	12,44	13,42	14,39	15,13	15,29
6 (kN)	0,00	0,04	0,16	0,36	0,86	2,42	3,94	5,19	6,40	7,53	8,35	9,09	9,98	10,96	11,93	12,99	13,96	14,61
14 (kN)	0,00	0,17	0,39	0,72	1,41	3,09	4,94	6,51	7,94	8,88	9,79	10,73	11,75	12,88	13,95	15,08	16,13	17,24
4+5+6+14 (kN)	0,00	0,21	0,62	1,42	3,63	9,68	18,52	22,19	27,64	32,83	36,78	40,64	44,63	48,88	53,03	57,28	60,82	62,99
V90 + V45	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85

FORÇAS SUSPENSAS PELOS ESTRIBOS 4+5+6+14

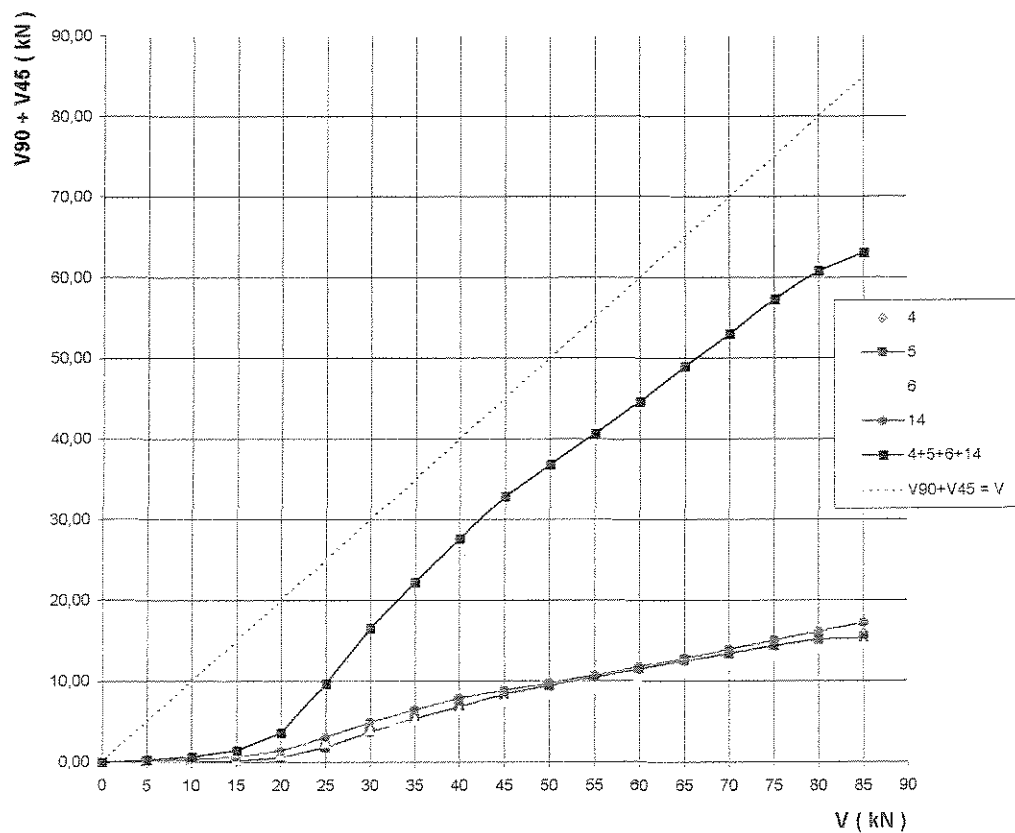


Figura 4.6 - Gráfico de forças suspensas do lado da carga em VR-5 pelos estribos e barras inclinadas 4+5+6+14 (kN) x V (kN)

Tabela 4.2 - Força cortante suspensa pelos estribos de suspensão de VR-3

V_{exp} (kN)	VR-3				
	Lado esquerdo		Lado Direito		$V_{exp} / V_{u,exp}$ (%)
	V_{90} (kN)	V_{90} / V_{exp} (%)	V_{90} (kN)	V_{90} / V_{exp} (%)	
0	0,0	0%	0,00	0%	0,00%
5	0,0	0%	0,12	2%	5,26%
10	-0,8	-8%	0,66	7%	10,53%
15	-1,1	-7%	1,05	7%	15,79%
20	-1,3	-7%	2,38	12%	21,05%
25	-1,5	-6%	4,41	18%	26,32%
30	-1,4	-5%	12,56	42%	31,58%
35	10,3	29%	20,83	60%	36,84%
40	15,1	38%	26,44	66%	42,11%
45	17,5	39%	31,67	70%	47,37%
50	19,3	39%	35,45	71%	52,63%
55	21,0	38%	40,56	74%	57,89%
60	22,4	37%	44,97	75%	63,16%
65	26,3	40%	49,53	76%	68,42%
70	30,4	43%	53,27	76%	73,68%
75	33,3	44%	57,06	76%	78,95%
80	36,7	46%	60,80	76%	84,21%
85	39,9	47%	63,69	75%	89,47%
90	45,5	51%	66,69	74%	94,74%
95	51,0	54%	68,76	72%	100,00%

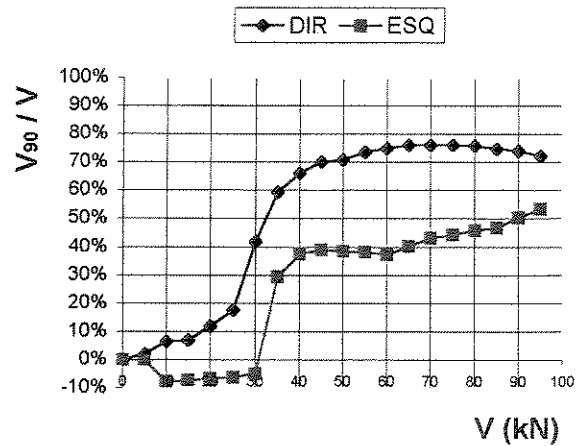


Figura 4.7 - Gráfico da viga VR-3 $V_{90} / V \times V$ (kN) para a viga VR-3

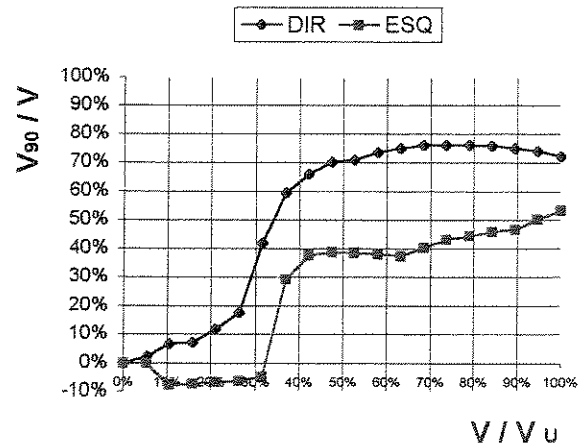


Figura 4.8 - Gráfico da viga VR-3 $V_{90} / V \times V / V_u$ para a viga VR-3

Tabela 4.3 - Força cortante suspensa pelos estribos de suspensão de VR-4

V_{exp}	V_{90}	V_{90} / V_{exp}	V_{90}	V_{90} / V_{exp}	$V_{exp} / V_{U,exp}$
(kN)	(kN)	(%)	(kN)	(%)	(%)
0	0,00	0%	0,00	0%	0,00%
5	-0,16	-3%	0,23	5%	5,88%
10	-0,78	-8%	0,55	5%	11,76%
15	-1,13	-8%	2,81	19%	17,65%
20	-1,29	-6%	5,62	28%	23,53%
25	-1,25	-5%	7,80	31%	29,41%
30	0,16	1%	13,07	44%	35,29%
35	15,68	45%	20,16	58%	41,18%
40	21,88	55%	25,19	63%	47,06%
45	27,73	62%	29,37	65%	52,94%
50	31,43	63%	33,38	67%	58,82%
55	34,98	64%	37,60	68%	64,71%
60	38,81	65%	42,74	71%	70,59%
65	42,82	66%	47,70	73%	76,47%
70	46,80	67%	52,69	75%	82,35%
75	50,04	67%	56,67	76%	88,24%
80	53,90	67%	59,28	74%	94,12%
85	65,33	77%	61,74	73%	100,00%

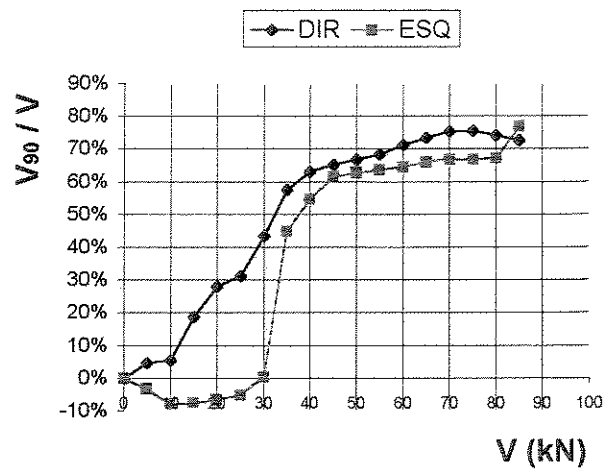


Figura 4.9 - Gráfico da viga VR-4 $V_{90} / V \times V$ (kN) para a viga VR-4

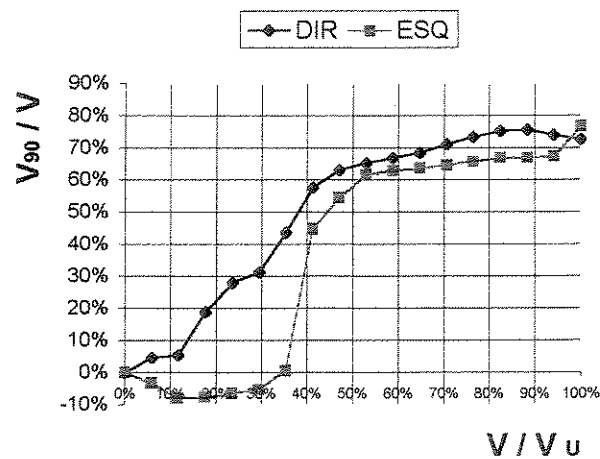


Figura 4.10 - Gráfico da viga VR-4 $V_{90} / V \times V / V_u$ para a viga VR-4

Tabela 4.4 - Força cortante suspensa pelos estribos e barras inclinadas da viga VR-5

V_{exp}	VR-5				
	Lado esquerdo		Lado Direito		$V_{exp} / V_{U,exp}$
	$V_{90} + V_{45}$	$(V_{90}+V_{45}) / V_{exp}$	$V_{90} + V_{45}$	$(V_{90}+V_{45}) / V_{exp}$	
(kN)	(kN)	(%)	(kN)	(%)	(%)
0	0,00	0%	0,00	0%	0,00%
5	0,12	2%	0,21	4%	5,78%
10	-0,03	0%	0,62	6%	11,56%
15	-0,14	-1%	1,42	9%	17,34%
20	-0,14	-1%	3,63	18%	23,12%
25	0,36	1%	9,68	39%	28,90%
30	1,17	4%	16,52	55%	34,68%
35	3,45	10%	22,19	63%	40,46%
40	9,57	24%	27,64	69%	46,24%
45	15,69	35%	32,83	73%	52,02%
50	19,19	38%	36,78	74%	57,80%
55	22,46	41%	40,64	74%	63,58%
60	26,40	44%	44,63	74%	69,36%
65	31,20	48%	48,88	75%	75,14%
70	35,08	50%	53,03	76%	80,92%
75	38,23	51%	57,28	76%	86,71%
80	40,97	51%	60,82	76%	92,49%
85	44,35	52%	62,99	74%	98,27%
86,5	Ruptura				

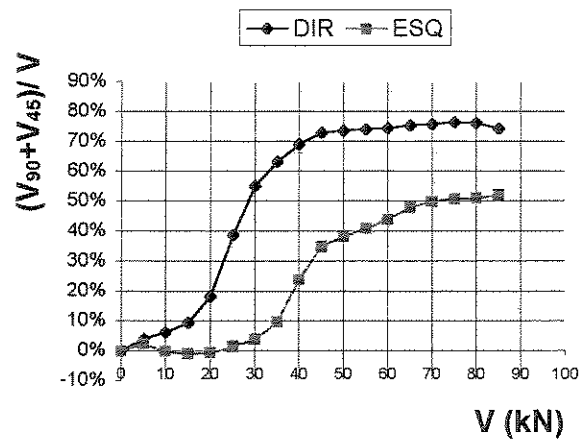


Figura 4.11 - Gráfico de $(V_{90}+V_{45}) / V \times V$ (kN) para a viga VR-5

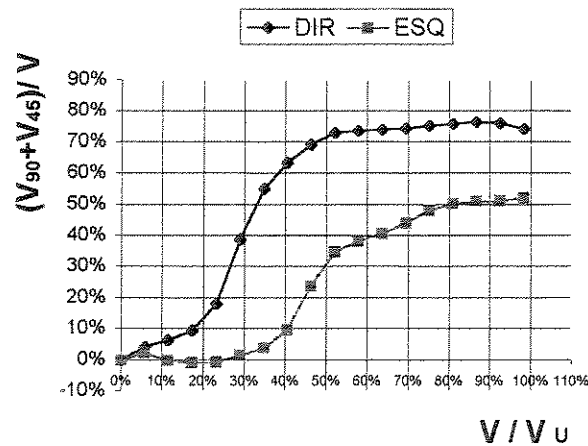


Figura 4.12 - Gráfico de $(V_{90}+V_{45}) / V \times V / V_u$ para a viga VR-5

Forças suspensas do lado esquerdo da abertura

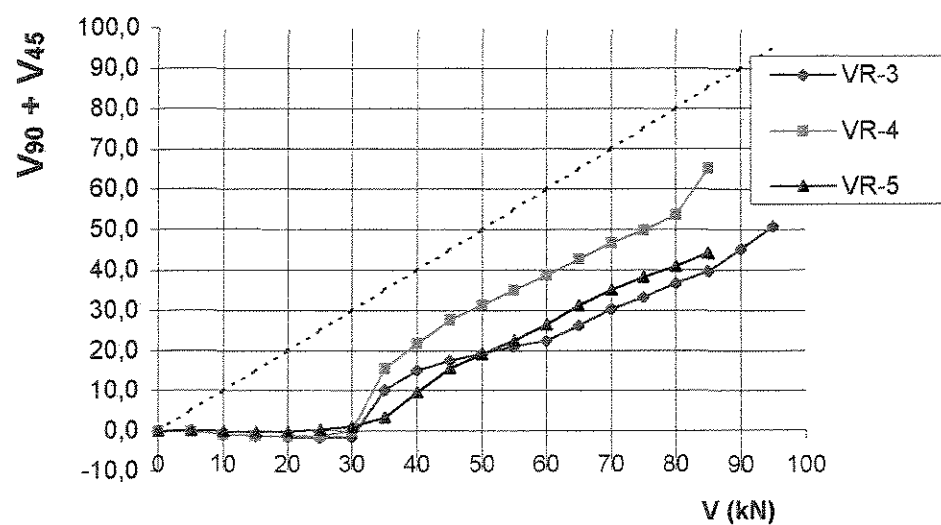


Figura 4.13 - Gráfico de $(V_{90}+V_{45}) \times V$ (kN) - lado esquerdo, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5

Forças suspensas do lado direito da abertura

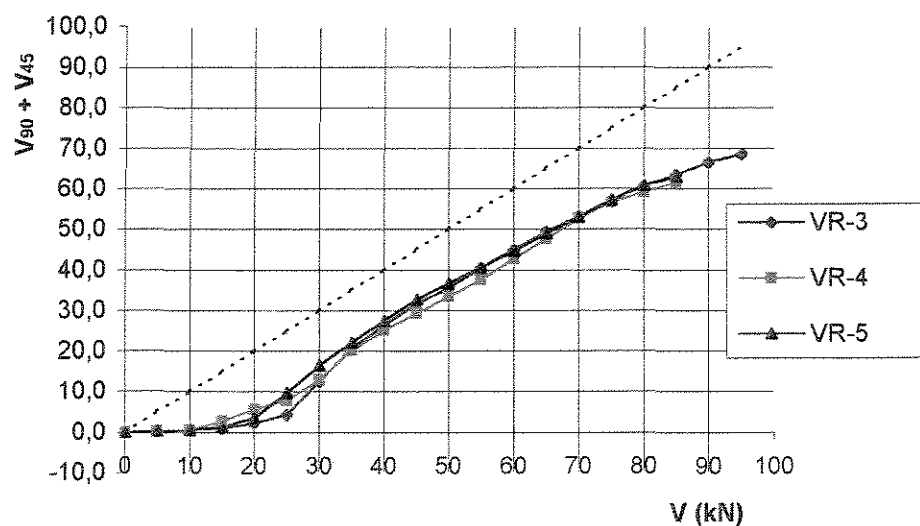


Figura 4.14 - Gráfico de $(V_{90}+V_{45}) \times V$ (kN) - lado direito, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5

Forças suspensas do lado esquerdo da abertura

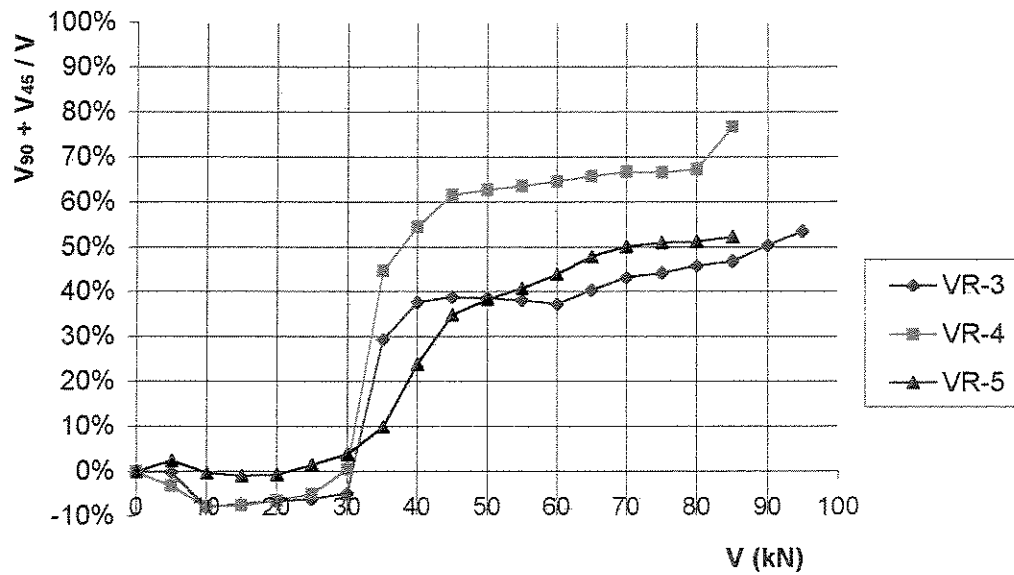


Figura 4.15 - Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V$ (kN) - lado esquerdo, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5

Forças suspensas do lado direito da abertura

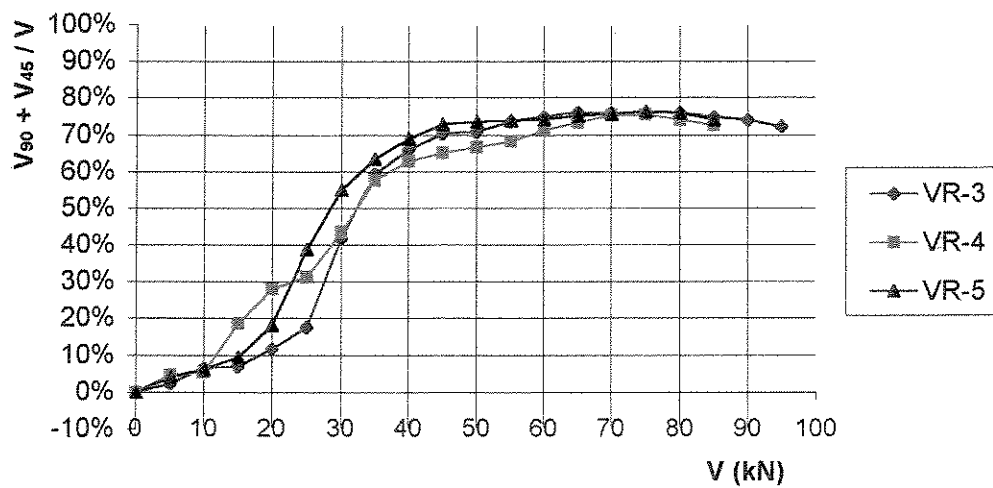


Figura 4.16 - Gráfico de $(V_{90} + V_{45}) / V \times V$ (kN) - lado direito, para as vigas VR-3, VR-4 e VR-5

V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
18 - VR-3	0	-5	-5	-7	-9	-11	-13	-16	-18	-21	-23	-27	-29	-31	-35	-37	-40	-42	-44	-50
7 - VR-4	0	-2	1	6	9	11	17	30	40	49	57	69	80	91	104	118	129	137		
7 - VR-5	0	0	1	3	7	12	19	29	36	52	68	87	107	128	151	174	200	234		

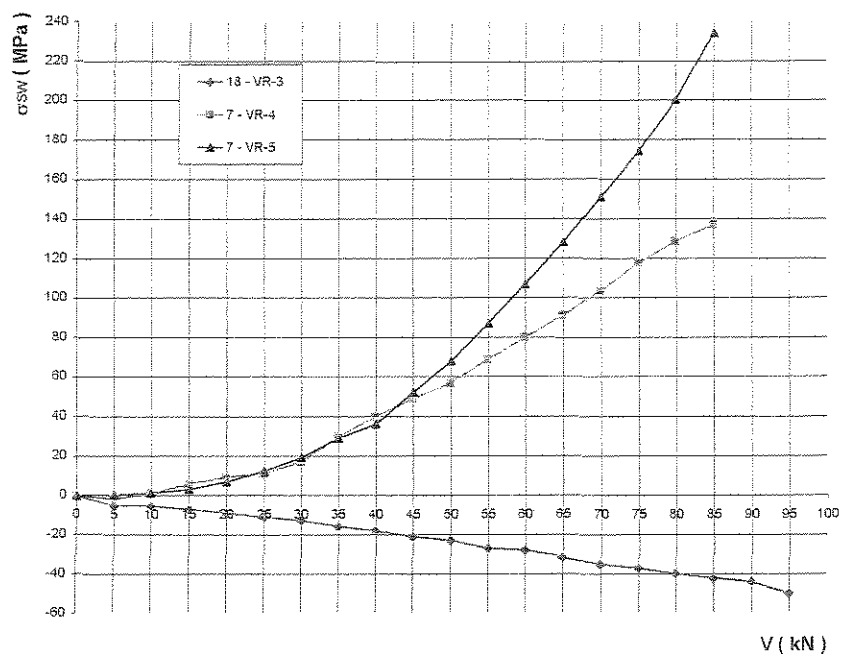


Figura 4.17 - Gráfico das tensões na armadura longitudinal superior do banzo sobre a abertura das vigas ensaiadas

V (kN)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
19 - VR-3	0	-6	-14	-23	-31	-39	-48	-54	-62	-70	-76	-83	-90	-97	-104	-110	-118	-125	-134	-144
8 - VR-4	0	-8	-20	-34	-43	-51	-61	-70	-78	-86	-94	-103	-112	-122	-131	-141	-149	-157		
8 - VR-5	0	-5	-10	-16	-21	-28	-32	-38	-44	-49	-54	-59	-65	-71	-77	-83	-89	-94		

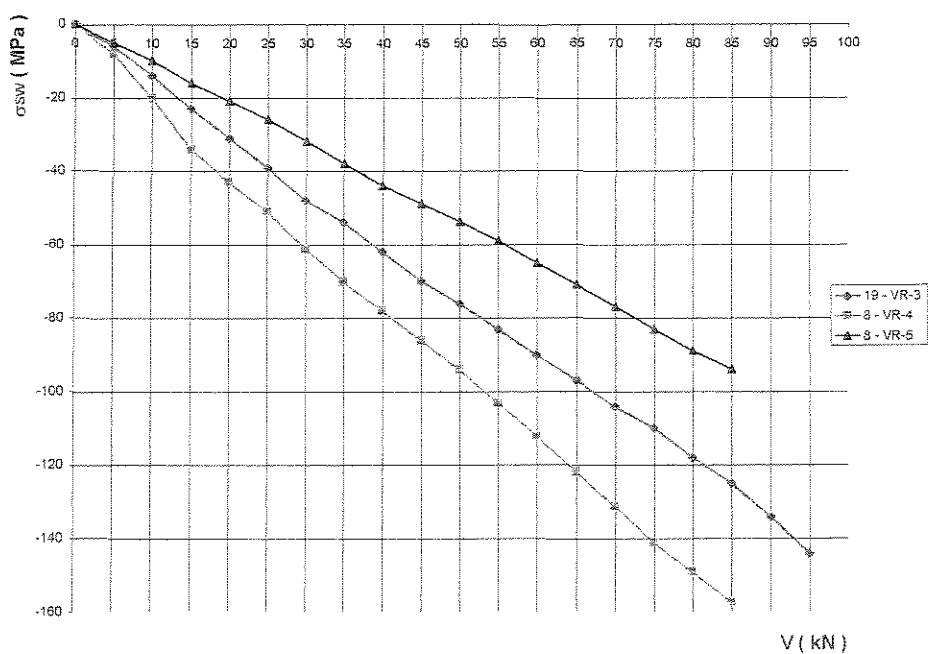


Figura 4.18 - Gráfico das tensões na armadura longitudinal inferior do banzo sobre a abertura das vigas ensaiadas

Tabela 4.5 - Evolução dos deslocamentos das vigas VR-3 VR-4 e VR-5

2F (kN)	Flecha VR-3 (mm)	2F (Kn)	Flecha VR-4 (mm)	2F (kN)	Flecha VR-5 (mm)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
10	0,78	10	0,55	10	0,51
20	1,50	20	1,47	20	1,45
30	2,47	30	2,38	30	2,45
40	3,42	40	3,40	40	3,46
50	4,46	50	4,37	50	4,42
60	5,53	60	5,39	60	5,66
70	6,59	70	6,52	70	6,63
80	7,55	80	7,60	80	7,77
90	8,66	90	8,80	90	8,98
100	9,88	100	9,93	100	10,23
110	10,48	110	11,08	110	11,42
120	12,12	120	12,25	120	12,70
130	13,34	130	13,35	130	13,83
140	14,84	140	14,60	140	15,03
150	16,05	150	15,87	150	16,33
160	17,19	160	17,10	160	18,00
170	18,54	170	18,50	170	25,03

Evolução da flecha

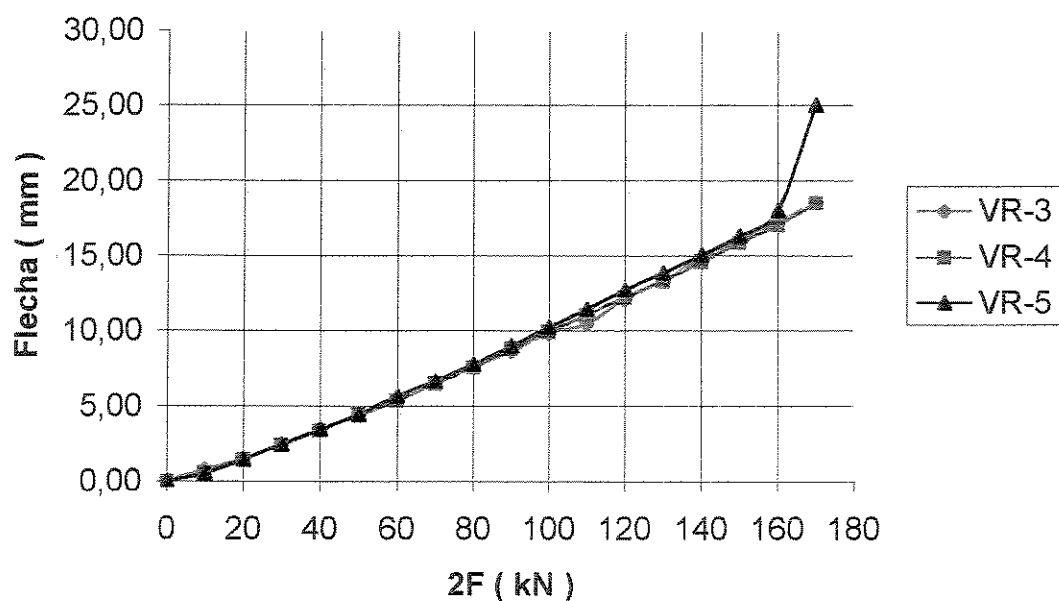


Figura 4.19 Gráfico de 2F (kN) x flecha (mm)

Capítulo 5 – CONCLUSÕES

Através dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa as principais conclusões que podem ser citadas são as seguintes :

- Com a introdução de aberturas nas vigas de concreto de alta resistência, houve mudanças no fluxo e na intensidade das tensões naquela região, modificando o seu comportamento. É necessário que se tomem cuidados especiais para que não haja uma diminuição na capacidade última da viga, quando comparada com a de uma viga sem abertura na alma.
- Quando dotadas de arranjo adequado de armaduras, as vigas podem alcançar a mesma carga última de uma viga semelhante sem abertura na alma com modo de ruína por flexão.
- Ao ser diminuída a distância entre a abertura e o apoio, o banzo acima da abertura sofreu menor influência da resultante de flexão (menor M) enquanto a influência de V foi a mesma nas três vigas, pois V é constante entre o ponto de aplicação da carga e o apoio.
- A presença de barras inclinadas fazem com que os estribos verticais sejam menos solicitados, combatem a deformação transversal da alma e a concentração de tensões de tração nos cantos da abertura, melhorando o aspecto global de fissuração. Assim a solução mais adequada é o uso de estribos e barras inclinadas na direção da tração.
- Comparando-se VR-3 com VR-4, sem uso de barras inclinadas, notou-se que quando a abertura se aproxima do apoio os estribos do lado do apoio passam

a ser mais solicitados, sendo necessário uma armadura de suspensão do lado do apoio igual a do lado da carga.

- Os limites recomendados por Leonhardt e Mönning³, não foram respeitados para a distância do apoio até o início da abertura, viga VR-5, mesmo assim esta viga manteve sua ruptura por flexão.

Finalmente, tem-se que as vigas de concreto com abertura na alma em região de cisalhamento exigem armadura de suspensão de cada lado da abertura. A solução recomendada é constituída por estribos e barras inclinadas na direção da tração. Na armadura situada do lado da carga, os estribos devem suspender $0,8V$ e as barras inclinadas de aço de mesma qualidade, devem ter área de armadura na direção inclinada igual a $1/3$ daquela dos estribos. Na armadura do lado do apoio deve-se utilizar uma armadura igual ao do lado da carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS : *NBR.6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1978, 76 p.*
- 2- FERNANDES, G. B., Flexão e cisalhamento em vigas de concreto de alta resistência com aberturas na alma, XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, São Carlos – SP, Brasil, 01 a 05 de setembro de 1997, V.3 – Estruturas e Fundações, p. 1061-1070.
- 3- LEONHARDT, F., MÖNNIG, E.: *Construções de Concreto*, Rio de Janeiro, Intermittência, 1978, V. 3, Cap. 9, p. 164-166.
- 4- LORENTSEN, M. : Holes in reinforced concrete girders. *Byggmastaren*, v. 41, N. 7, p. 141-152, July, 1972. Tradução do sueco para o inglês pela Portland Cement Association.
- 5- MANSUR, M. A., TAN, K. H., LEE, S. L. : design method for reinforced concrete beams with large openings. *ACI Journal*. V. 82, N. 4. P. 517-524, July-August, 1985.
- 6- NASSER, K. W., ACAVALOS, A., DANIEL, H. R. : Behavior and design of large openings of large openings in reinforced concrete beams. *ACI Journal*, V. 64, N. 1, January, 1967
- 7- SIMÕES, R. : *Vigas de concreto de alta resistência com abertura na alma*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP , Campinas, 1997
- 8- SÜSSEKIND, J. C. – *Curso de Concreto*. São Paulo, Globo, 1991, Vol. 2, Cap. 2, p. 160-166.

ABSTRACT

This work is concerned with bending and shear strength of concrete beams with web opening near the support. The effects of the existing opening and the solution for the problem are discussed. The results of experimental investigation conducted with high-strength concrete beams are presented and explanations for them are given by means of the equilibrium method and the strut-and-tie models. At the end it is shown that, when proper reinforcement in the compression chord is provided and hanging stirrups and inclined bars near the opening are used, the bending strength of the beams can be attained before shear failure can happen.

Key words : reinforced concrete, high-strength concrete, concrete beams with web opening.