

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Arthur Augusto Voelz

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA A
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Santa Cruz do Sul

2019

Arthur Augusto Voelz

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA A
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade de
Santa Cruz do Sul para a obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Eng. M.Sc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul

2019

Arthur Augusto Voelz

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS PARA A
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade de
Santa Cruz do Sul para a obtenção do título de
Engenheiro Civil.



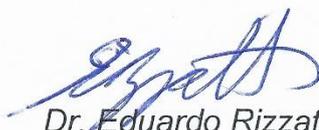
M.Sc. Christian Donin

Professor Orientador - UNISC



M.Sc. Henrique Luiz Rupp

Professor examinador - UNISC



Dr. Eduardo Rizzatti

Professor examinador - UFSM

Santa Cruz do Sul

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pela educação, exemplo, incentivo e suporte, mesmo nos momentos difíceis.

Devo um agradecimento especial ao meu orientador Eng. M.Sc. Christian Donin pela sugestão do tema do presente trabalho e pela troca de experiências nos últimos anos.

Inclusive quero agradecer aos amigos, aos colegas, aos professores e a todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira, não só na realização deste trabalho ou na minha jornada acadêmica, como também no meu crescimento pessoal.

RESUMO

Ainda um assunto pouco abordado nas universidades, a extensometria elétrica tem seu fundamento baseado na transformação de deformações mecânicas em variações equivalentes à resistência elétrica do dispositivo. Com a área da engenharia civil necessitando cada vez mais de métodos precisos nas medições de deformações de estruturas, sem que sejam realizados ensaios destrutivos, os *strain gauges*, pequenos sensores aderidos à superfície de materiais, são alternativas que possibilitam as medições dessas deformações. O foco deste trabalho é a aplicação dos *strain gauges* em estruturas de concreto armado, método construtivo mais utilizado no mundo. Desta forma, o estudo baseou-se na elaboração de três vigas instrumentadas com extensômetros elétricos, respeitando as especificações dos fornecedores, para realizar a análise das deformações nas estruturas de concreto armado através da solicitação de cargas verticais. Houve medição dos ângulos de deformação principal durante a compressão, além das deformações nas zonas de tração e compressão. Ensaios complementares também foram realizados, como resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto, que obtiveram resultados satisfatórios e coerentes com o modelo estudado. Duas das vigas foram carregadas até atingirem a ruptura, apresentando valores muito semelhantes de força cortante e momento fletor máximos. Foi constatado, através do estudo, que o modelo de medições via extensometria elétrica é viável e preciso, sendo, portanto, recomendado para medições em estruturas reais.

Palavras-chave: Análise de tensões. Análise de estruturas. Extensometria.

RESUMEN

Todavía un asunto poco abordado en las universidades, la extensometría eléctrica tiene su fundamento basado en la transformación de deformaciones mecánicas en variaciones equivalentes a la resistencia eléctrica del dispositivo. Con el área de la Ingeniería Civil necesitando cada vez más de métodos precisos en las mediciones de deformaciones de estructuras, sin que se realicen ensayos destructivos, los *strain gauges*, pequeños sensores adheridos a la superficie de materiales, son alternativas que posibilitan las mediciones de esas deformaciones. El enfoque de este trabajo ha sido la aplicación de los *strain gauges* en estructuras de hormigón armado, método constructivo más utilizado en el mundo. De esta forma, el estudio se ha basado en la elaboración de tres vigas de hormigón instrumentadas con extensómetros eléctricos, respetando las especificaciones de los proveedores, para realizar el análisis de las deformaciones en las estructuras de hormigón armado a través de la solicitud de cargas verticales. Se han medido los ángulos de deformación principal durante la compresión, además de las deformaciones en las zonas de tracción y compresión. Ensayos complementarios también han sido realizados, como resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón, que obtuvieron resultados satisfactorios y coherentes con el modelo estudiado. Dos de las vigas de hormigón han sido cargadas hasta alcanzar la ruptura, presentando valores muy similares de fuerza cortante y momento flector máximos. Se ha constatado, a través del estudio, que el modelo de mediciones vía extensometría eléctrica es viable y preciso, siendo, por lo tanto, recomendado para mediciones en estructuras reales.

Palabras clave: Análisis de tensiones. Análisis de estructuras. Extensometría.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um transdutor	22
Figura 2 - Diagrama do processamento da informação	23
Figura 3 - Representação esquemática de <i>clip gauge</i>	24
Figura 4 - Principais componentes do extensômetro	26
Figura 5 - Extensômetro axial único	29
Figura 6 - Extensômetro biaxial.....	30
Figura 7 - Extensômetro triaxial.....	31
Figura 8 - Extensômetro tipo diafragma	31
Figura 9 - Extensômetro para medida de tensão residual.....	32
Figura 10 - Extensômetro axial duplo.....	32
Figura 11 - Limpeza e instalação do <i>strain gauge</i>	33
Figura 12 - Sistema de Codificação Excel.....	36
Figura 13 - Sistema de Codificação Kyowa.....	37
Figura 14 - Sistema de Codificação HBM	37
Figura 15 - Esquema da Ponte de Wheatstone.....	39
Figura 16 - Esquema de ponte completa	41
Figura 17 - Esquema de meia ponte	41
Figura 18 - Esquema de um quarto de ponte.....	42
Figura 19 - Diagrama do sistema de medição de deformações.....	44
Figura 20 - Vigas de concreto simples (a) e armado (b)	45
Figura 21 - Representação esquemática do módulo de elasticidade	48
Figura 22 - Representação esquemática do módulo de deformação secante	49
Figura 23 - Diagrama tensão-deformação.....	50
Figura 24 - Formas dos modelos de vigas	53
Figura 25 - Dimensões dos estribos.....	54
Figura 26 - Armaduras transversais e longitudinais dos modelos	55
Figura 27 - Armaduras dispostas nas formas.....	56
Figura 28 - Barras após os ensaios de tração.....	57
Figura 29 - <i>Slump test</i> da segunda betonada	61
Figura 30 - <i>Slump test</i> da terceira betonada	61
Figura 31 - Corpo de prova devidamente identificado.....	62
Figura 32 - Vigas logo após a concretagem.....	64
Figura 33 - Vigas sendo desformadas.....	65
Figura 34 - Corpos de prova submersos	66
Figura 35 - Especificações dos <i>strain gauges</i> da Kyowa	67
Figura 36 - Disposição dos sensores na Viga 1 e Viga 2	68
Figura 37 - Disposição dos sensores na Viga 3	68
Figura 38 - Detalhe da disposição dos sensores.....	69
Figura 39 - Viga sendo lixada e limpa com compressor de ar.....	70
Figura 40 - Limpeza da superfície da viga com acetona	71
Figura 41 - Posicionamento e colagem de <i>strain gauges</i>	71

Figura 42 - Aplicação da lâmina plástica sobre os <i>strain gauges</i>	71
Figura 43 - Conclusão da instalação da roseta da Viga 2	72
Figura 44 - Instalação do <i>strain gauge</i> para a compressão	72
Figura 45 - Instalação do <i>strain gauge</i> para a tração	73
Figura 46 - Vigas com todos os extensômetros instalados	73
Figura 47 - Vigas prontas para serem ensaiadas.....	74
Figura 48 - Redução do vão entre os apoios e disposição das cargas	75
Figura 49 - Viga posicionada para a realização de ensaios	75
Figura 50 - Adaptador e aquisitor de dados QuantumX MX840B.....	76
Figura 51 - Aquisitor de dados conectado ao computador	77
Figura 52 - Os corpos de prova retirados do tanque de imersão	80
Figura 53 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V1C1	83
Figura 54 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V2C1	83
Figura 55 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V2C2	84
Figura 56 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V3C1	84
Figura 57 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V3C2	85
Figura 58 - Esquema comparativo entre os módulos de elasticidade da análise experimental com a análise teórica	86
Figura 59 - Esquema da resistência à compressão de cada corpo de prova	88
Figura 60 - Esquema da resistência à compressão média de cada viga	89
Figura 61 - Princípio de fissuração da Viga 2.....	91
Figura 62 - Visualização no Catman sobre as verificações analisadas.....	92
Figura 63 - Diagrama de força x deslocamento dos modelos em concreto armado ensaiados.....	94
Figura 64 - Diagrama de momento fletor x deslocamento dos modelos	95
Figura 65 - Viga 1 após a ruína com a aplicação das cargas.....	96
Figura 66 - Visualização do esmagamento da biela de compressão na Viga 1	96
Figura 67 - Detalhe das fissuras na zona de tração da Viga 1	97
Figura 68 - Viga 2 após a ruína do modelo	98
Figura 69 - Perspectiva da outra extremidade da Viga 2	98
Figura 70 - Viga 2 após a remoção dos equipamentos para aplicação de cargas	99
Figura 71 - Seção transversal da viga.....	104
Figura 72 - Diagramas de força cortante e momento fletor	106
Figura 73 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP1).....	111
Figura 74 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP2).....	111
Figura 75 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP3).....	112
Figura 76 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP1).....	112
Figura 77 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP2).....	113
Figura 78 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP3).....	113
Figura 79 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP1).....	114
Figura 80 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP2).....	114
Figura 81 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP3).....	115
Figura 82 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V1C1.....	116
Figura 83 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V1C2.....	116

Figura 84 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C1.....	117
Figura 85 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C2.....	117
Figura 86 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C3.....	118
Figura 87 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C4.....	118
Figura 88 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C1.....	119
Figura 89 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C2.....	119
Figura 90 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C3.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores estimados de módulo de elasticidade	49
Tabela 2 - Deformações-limites do concreto	51
Tabela 3 - Quantidade de barras e respectivos comprimentos	55
Tabela 4 - Definição do traço escolhido	58
Tabela 5 – Relação da quantidade de materiais	59
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 5,0 mm	78
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 6,3 mm	78
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 10,0 mm	79
Tabela 9 - Resultados fornecidos pela prensa	80
Tabela 10 - Tensão de escoamento e deformação de cada corpo de prova	81
Tabela 11 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova	82
Tabela 12 - Módulo de elasticidade médio entre os corpos de prova	85
Tabela 13 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 1	87
Tabela 14 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 2	87
Tabela 15 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 3	87
Tabela 16 - Valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova.....	88
Tabela 17 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 2	90
Tabela 18 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 3, com <i>strain gauges</i> da HBM.....	91
Tabela 19 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 3, com <i>strain gauges</i> da Kyowa.....	92
Tabela 20 - Força máxima resistida pelas vigas	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
GRANTE	Grupo de Análise e Projeto Mecânico
HBM	<i>Hottinger Baldwin Messtechnik</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação
Δ	Variação
R	Resistência elétrica
k	Fator de sensibilidade
°	Graus
mm	Milímetro
°C	Graus Celsius
μm	Micrometro
ppm	Parte por milhão
°F	Graus Fahrenheit
m	Metro
Ω	Ohm
R1 até R4	Resistores
a, b, c, d	Terminais
V_i	Tensão elétrica inicial
V_o	Tensão elétrica final
abc, adc	Ramos
I	Corrente elétrica
V	Tensão elétrica / Volts
r	Relação da ponte de Wheatstone
η	Fator de não linearidade
%	Porcentagem

σ	Tensão
E	Módulo de elasticidade
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
F	Força
A	Área
N	Newton
mm ²	Milímetro quadrado
L	Comprimento / Diâmetro
E _{ci}	Módulo de deformação tangente inicial
Arc tg	Arco tangente
C20 até C90	Classe do concreto
αE	Fator do material
f _{ck}	Resistência característica do concreto
E _{cs}	Módulo de deformação secante
≤	Menor ou igual
σ_c	Tensão de compressão
f _{cd}	Tensão de cálculo do concreto
ϵ_c	Deformação específica de encurtamento
n	Numeral
‰	Permilagem
cm	Centímetro
CA50	Tensão de escoamento do aço
kgf	Quilograma-força

Ø	Bitola da barra de aço
C	Comprimento total da barra de aço
L	Litro
kg	Quilograma
m ³	Metro cúbico
a/c	Relação água-cimento
kN	Quilonewton
CP1 até CP4	Corpos de prova
F máx	Força máxima
σ esc	Tensão de escoamento
σ máx	Tensão máxima
V1C1 até V3C3	Viga e o respectivo corpo de prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos da pesquisa	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Introdução.....	19
2.2	Histórico dos extensômetros	20
2.3	Aplicações do <i>strain gauge</i>	20
2.4	Princípios de funcionamento do <i>strain gauge</i>	21
2.5	Transdutor	22
2.6	<i>Clip gauge</i>	23
2.7	Medidas de deformação	25
2.7.1	Tipos de sensores.....	25
2.7.2	Tipos de extensômetros elétricos	26
2.7.2.1	Tamanho do extensômetro.....	26
2.7.2.2	Material resistivo	27
2.7.2.2.1	Extensômetro de fio.....	27
2.7.2.2.2	Extensômetro de lâmina	27
2.7.2.2.3	Extensômetro de semicondutor.....	28
2.7.2.3	Material base.....	28
2.7.2.4	Configuração da grade	29
2.8	Aplicação dos extensômetros.....	33
2.9	Sistemas de codificação.....	35
2.10	Ponte de Wheatstone	38
2.11	Sistema de medição.....	43
2.12	Aplicações para concreto e concreto armado	44
2.12.1	Definições e características do concreto.....	44
2.12.2	Estruturas de concreto armado	45
2.12.3	Módulo de Elasticidade	46

3	METODOLOGIA	52
3.1	Definição e confecção dos modelos de vigas	52
3.1.1	Materiais utilizados para a confecção dos modelos	52
3.1.1.1	Formas	52
3.1.1.2	Armaduras	53
3.1.1.2.1	Ensaio de tração do aço	56
3.1.1.3	Concreto.....	57
3.1.1.3.1	Traço e caracterização dos materiais.....	57
3.1.1.3.2	Quantidade de material necessária	58
3.1.2	Concretagem dos modelos	59
3.1.2.1	Preparação dos materiais e mistura.....	59
3.1.2.2	<i>Slump test</i>.....	60
3.1.2.3	Confecção dos corpos de prova.....	62
3.1.2.4	Confecção dos modelos	63
3.1.2.5	Cura e desforma	64
3.2	Instrumentação das vigas via extensometria elétrica.....	66
3.2.1	Informações e especificações dos extensômetros	66
3.2.2	Posicionamento e instalação dos extensômetros	67
3.3	Posicionamento das vigas para a realização dos ensaios	74
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	78
4.1	Ensaio de tração nas barras de aço utilizadas nos modelos ..	78
4.2	Módulo de Elasticidade dos corpos de prova	79
4.3	Ensaio de compressão dos corpos de prova confeccionados	86
4.4	Medições e aquisição de dados dos experimentos	89
4.4.1	Variação do ângulo de deformação principal de compressão	89
4.5	Ensaio das vigas de concreto armado à flexão.....	93
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
	REFERÊNCIAS.....	101

ANEXO A – Pré-dimensionamento dos modelos de vigas de concreto armado para análise estrutural	103
ANEXO B – Diagramas de tensão x deformação das barras de aço submetidas a ensaios de tração	111
B.1 – Barra de 5,0 mm (CP1).....	111
B.2 – Barra de 5,0 mm (CP2).....	111
B.3 – Barra de 5,0 mm (CP3).....	112
B.4 – Barra de 6,3 mm (CP1).....	112
B.5 – Barra de 6,3 mm (CP2).....	113
B.6 – Barra de 6,3 mm (CP3).....	113
B.7 – Barra de 10,0 mm (CP1).....	114
B.8 – Barra de 10,0 mm (CP2).....	114
B.9 – Barra de 10,0 mm (CP3).....	115
ANEXO C – Diagramas de tensão x tempo de realização dos ensaios de compressão dos corpos de prova.....	116
C.1 – Corpo de prova V1C1	116
C.2 – Corpo de prova V1C2	116
C.3 – Corpo de prova V2C1	117
C.4 – Corpo de prova V2C2	117
C.5 – Corpo de prova V2C3	118
C.6 – Corpo de prova V2C4	118
C.7 – Corpo de prova V3C1	119
C.8 – Corpo de prova V3C2	119
C.9 – Corpo de prova V3C3	120

1 INTRODUÇÃO

A construção civil sempre teve como objetivo principal o equilíbrio entre segurança das estruturas e viabilidade econômica. Desta forma, no momento da elaboração de projetos estruturais, são considerados coeficientes de segurança quanto aos estados limites de ruptura e estados limites de serviço, com base em previsões de carregamentos.

Essas estimativas podem possuir imprecisões, sendo insuficientes em relação ao modelo real de carregamento e gerando uma diminuição da vida útil da edificação ou, inclusive, ser superdimensionada, causando uma elevação dos custos de execução e desperdício de materiais e mão de obra.

Quando a preservação dos recursos naturais ganhou representatividade, houve um incentivo na busca de soluções para a otimização de custos na construção civil, que gerou investimento em técnicas para um controle nas deformações das estruturas cada vez mais preciso e confiável.

Foi então que vários métodos e aparelhos para medição de deformações foram desenvolvidos. Inicialmente, esses equipamentos eram mecânicos e possuíam utilização limitada e imprecisões nas suas medições.

Com o aprimoramento da eletroeletrônica foram desenvolvidos os primeiros extensômetros elétricos, ou *strain gauges* (“medidores de tensão”, traduzindo para o português), que convertem o movimento mecânico em um sinal elétrico, proporcionando confiabilidade nas medições de tensões e deformações ocasionadas tanto por carregamentos quanto por grandes variações de temperatura.

Os sensores *strain gauges* possuem as mais variadas funcionalidades e estão disponíveis no mercado em uma gama de opções, com valores acessíveis.

1.1 Justificativa

Mesmo com o incentivo ao estudo do tema extensometria elétrica e o avanço na tecnologia dos *strain gauges*, esta técnica não é muito difundida no cotidiano profissional e é pouco conhecida no âmbito acadêmico. Isso se dá pela falta de conhecimento sobre o assunto e sobre sua importância na redução de custos na engenharia civil e outras áreas. Desta forma, o presente trabalho visa esclarecer a

facilidade de implementação dessa técnica que pode ser encontrada a preços competitivos no mercado.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho de conclusão de curso é demonstrar a aplicação de sensores de deformações mecânicas convertidas em variações da resistência elétrica, também conhecidos como *strain gauges*, na análise de estruturas da construção civil com ênfase em concreto armado.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são listados a seguir:

- Estudar os aspectos teóricos e práticos quanto ao uso de *strain gauges* na análise experimental de tensões e deformações de estruturas de concreto armado;
- Apresentar um breve histórico sobre o uso da extensometria elétrica na construção civil, bem como os equipamentos necessários e técnicas de utilização;
- Demonstrar a aplicabilidade dos extensômetros elétricos na análise de elementos estruturais de concreto armado;
- Confeccionar vigas de concreto armado para aplicação do estudo realizado;
- Confeccionar corpos de provas para a realização de verificações quanto à resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Realizar a instalação de extensômetros elétricos nos modelos elaborados;
- Fazer leituras das deformações e dos ângulos da biela de compressão dos modelos desenvolvidos através da aplicação de carga;
- Encontrar as tensões de ruptura das vigas;
- Comparar os resultados obtidos com fundamentos teóricos;
- Realizar comparativos entre os modelos desenvolvidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Como é exposto por Weber (2008), os dispositivos de deformações chamados de extensômetros elétricos são medidores que transformam pequenas deformações do corpo de prova carregado em variações equivalentes em sua resistência elétrica.

São vários os métodos não destrutivos explorados e desenvolvidos que controlam a medição de tensões. No entanto, devido à sua aplicabilidade, os extensômetros são os dispositivos mais difundidos devido à precisão nas medições, facilidade de manipulação e capacidade de inspeção de cargas últimas em ensaios não destrutivos (WEBER, 2008).

Como é descrito por Weber (2008, p. 2),

a medida é realizada colando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica.

De acordo com Barreto Júnior (1998), as características do extensômetro elétrico são definidas da seguinte maneira:

- Alta precisão de medida;
- Dimensões pequenas e baixo peso;
- Baixo custo;
- Excelente resposta dinâmica;
- Excelente linearidade;
- Facilidade na instalação;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Pode ser utilizado imerso em água ou em atmosfera de gás corrosivo;
- Possibilidade de medições a longas distâncias.

2.2 Histórico dos extensômetros

O princípio de operação dos extensômetros de resistência elétrica surgiu em 1856, quando o físico e matemático britânico William Thomson, também conhecido como Lord Kelvin, realizou experiências com o cobre e o ferro e constatou que havia variação na resistividade dos fios metálicos quando os mesmos apresentavam deformações. Ele demonstrou, através da utilização da Ponte de Wheatstone e de um galvanômetro, que a variação relativa da resistência se relaciona linearmente com a variação relativa do comprimento (BARRETO JÚNIOR, 1998; GALLINA, 2003; WEBER, 2008).

Como é descrito por Gallina (2003), os estudos de Thomson ganharam prosseguimento somente no século seguinte, pois, além de terem sido utilizados galvanômetros muito sensíveis e impróprios para aplicações técnicas comuns, eles inclusive são recomendados apenas para controle de processos estáticos.

Somente com a evolução de amplificadores eletrônicos que a descoberta de Thomson teve sua aplicação em medição de deformações graças às experiências do norte americano Percy Williams Bridgman, em 1923 (BARRETO JÚNIOR, 1998; GALLINA, 2003).

No entanto, o desenvolvimento dos primeiros extensômetros de resistência elétrica, como são conhecidos no presente, foram elaborados somente em 1939, pelos engenheiros Arthur Ruge e Edward Simmons, de maneira independente (BARRETO JÚNIOR, 1998; WEBER, 2008).

Esses engenheiros utilizaram pela primeira vez fios metálicos aderidos à superfície de um corpo de prova para medição de deformações. Esta experiência proporcionou o aprimoramento da tecnologia para o surgimento dos extensômetros conhecidos atualmente (BARRETO JÚNIOR, 1998; WEBER, 2008).

2.3 Aplicações do *strain gauge*

De acordo com o *site* da empresa alemã *HBM Test and Measurement (Hottinger Baldwin Messtechnik)*, responsável pela fabricação de extensômetros e equipamentos de medição desde a década de 1950, a aplicação dos *strain gauges* na análise experimental de tensão está relacionado com a determinação do valor

absoluto e direção de tensões mecânicas bem como análise de fadiga e tensão residual.

A tensão é usada para descrever a medição da deformação de um material e sua variação ocorre devido aos seguintes fatores:

- O efeito de uma força externa aplicada (tensão mecânica);
- A influência do calor e do frio (tensão térmica);
- As forças internas do resfriamento não uniforme de componentes fundidos, forja ou solda (tensão residual).

2.4 Princípios de funcionamento do *strain gauge*

É citado na página virtual da empresa HBM que, quando o *strain gauge* é contraído (comprimido), há uma redução da sua resistência elétrica e o contrário acontece quando o mesmo é alongado (tracionado). É possível determinar a deformação através desta variação na resistência, como é demonstrado na equação a seguir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \times k} \quad (1)$$

Sendo:

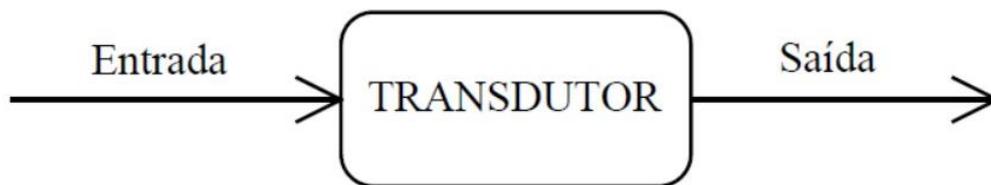
- ε = deformação a ser medida;
- ΔR = variação de resistência do *strain gauge* devido à deformação;
- R = resistência nominal do *strain gauge*;
- k = fator de sensibilidade do *strain gauge*.

Conforme a linha de extensômetros elétricos da empresa Excel, de Taboão da Serra, SP, quando a utilização dos extensômetros elétricos está relacionada à extensometria, o valor do fator de sensibilidade (*gage factor*) pode variar na segunda casa decimal, de acordo com cada lote, por isso, este valor está devidamente identificado na embalagem.

2.5 Transdutor

Transdutores são dispositivos que têm a capacidade de converter um tipo de energia em outra, através de um estímulo ou por uma reação de uma grandeza física, conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática de um transdutor



Fonte: Weber (2008).

Segundo Weber (2008), em termos de instrumentação, um transdutor ideal deve apresentar as características abaixo:

- Medir com precisão a intensidade do fenômeno físico;
- Reproduzir com confiabilidade o evento físico em tempo real;
- Reproduzir precisamente toda a faixa de frequência do fenômeno físico sem alteração ou perda em qualquer parte do espectro a ser medido;
- Funcionar sob efeito de umidade, temperatura, choques e vibrações, entre outras grandezas indesejáveis;
- Ser capaz de fornecer uma resposta de saída que seja compatível com o equipamento de condicionamento do sinal, com alterações desprezíveis nas características originais do evento;
- Ser de construção robusta e de fácil utilização, ou seja, que possa ser manejado por pessoas sem experiência, sem que haja danos ou alterações nas características do sinal de saída.

Como é apresentado por Weber (2008), o estímulo na entrada, compressão e/ou torque, aplicado sobre um corpo de prova, pode ser verificado por diversos

tipos de sensores. A Figura 2 apresenta a esquematização dos estágios do processamento da informação desde a excitação até a resposta.

Figura 2 - Diagrama do processamento da informação



Fonte: Weber (2008), adaptada pelo autor.

No primeiro estágio, a força aplicada sobre o elemento gera deformações elásticas. Essas deformações variam conforme o tipo de material e geometria do elemento elástico (WEBER, 2008).

No próximo estágio, essas deformações elásticas se transformam em variações da resistência elétrica, através de extensômetros elétricos fixos no elemento elástico. Estas resistências são conectadas a um circuito tipo ponte que fornece o sinal elétrico (WEBER, 2008).

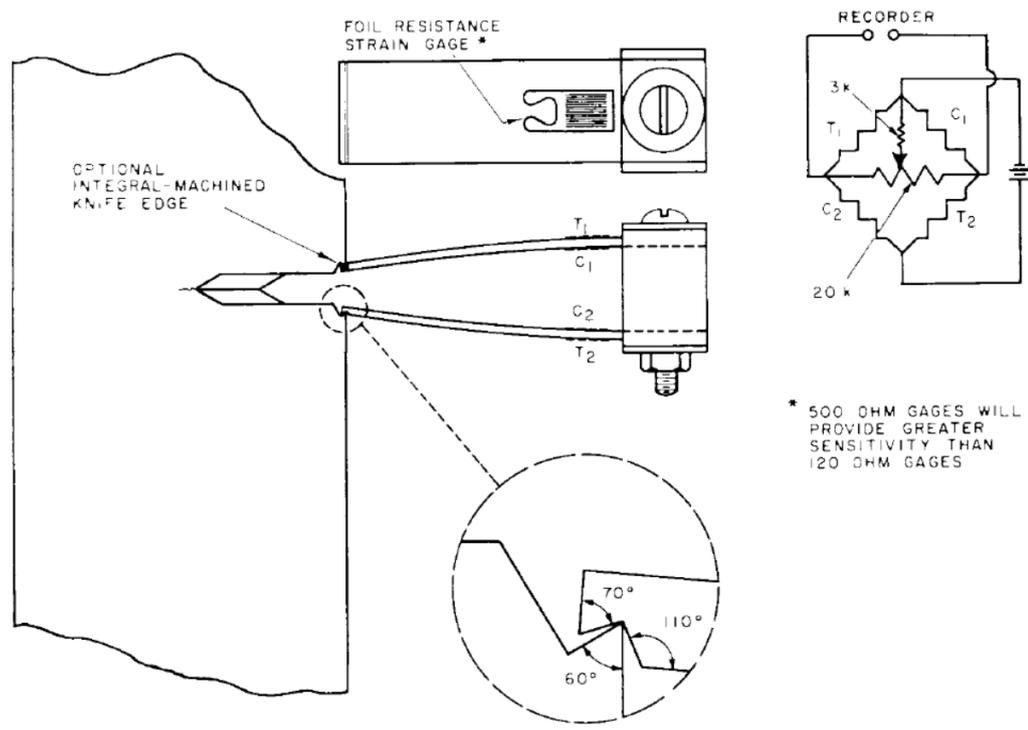
Como as deformações elásticas e os sinais elétricos são pequenos, é necessário o auxílio de um amplificador para medir a variação de tensão elétrica. É usual a utilização de condicionadores de sinais especiais para extensômetros e transdutores com baixo ruído. Estes dispositivos completam o processamento do terceiro estágio de informação (WEBER, 2008).

2.6 *Clip gauge*

Para medir os deslocamentos em ambientes com presença de fissuras, se torna importante a utilização de *clip gauge*, que é um transdutor de deformação. O *clip gauge* consiste em duas vigas em balanço e um bloco espaçador conectadas através de uma única porca e parafuso, conforme mostrado na Figura 3. As vigas necessitam ser de um material de boa qualidade e módulo de elasticidade elevado, normalmente ligas de titânio (ASTM E 399-90, 1997).

Cabe ressaltar que a figura abaixo também apresenta um detalhamento da ponta da viga de titânio e o local adequado para a colagem do *strain gauge* sobre a viga, com o intuito de medir os deslocamentos.

Figura 3 - Representação esquemática de *clip gauge*



Fonte: ASTM E 399-90 (1997).

A norma americana ainda recomenda um comprimento de *clip gauge* na faixa entre 5,1 e 6,3 mm. A precisão do instrumento de medição deve corresponder a um desvio máximo de 0,0025 mm (ASTM E 399-90, 1997).

Os *clip gauges* podem variar conforme as necessidades de medições e os fabricantes e os modelos de transdutores de deslocamentos pelos esforços axial e diametral são os mais empregados (ROSA, 2009).

2.7 Medidas de deformação

2.7.1 Tipos de sensores

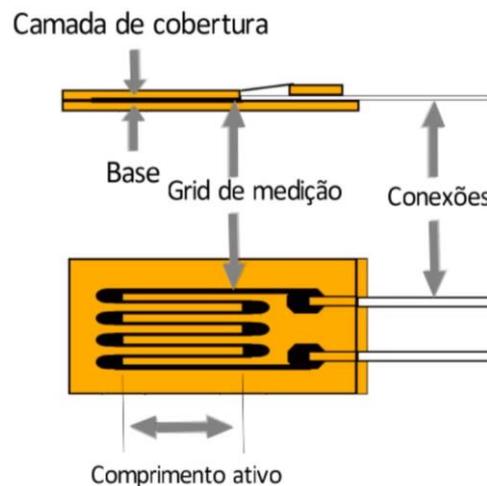
De acordo com o estudo do Grupo de Análise e Projeto Mecânico – GRANTE (2004), há uma grande variedade em relação aos tipos de extensômetros para medição de deslocamento através de deformações. Muitos dos sensores foram testados, mas não possuem grande receptividade no mercado por apresentarem precisões insatisfatórias, custos elevados ou dificuldade de utilização. Alguns dos sensores possuem uso muito específico, conforme é apresentado abaixo:

- Sensores mecânicos: os medidores de deslocamentos mecânicos foram os primeiros a serem desenvolvidos e fazem uso de princípios mecânicos, desta forma, possuem pouca precisão e difícil utilização (GRANTE, 2004).
- Extensômetros elétricos: são aplicados para medir pequenas deformações, como é o caso de transdutores específicos, devido à alta sensibilidade dos semicondutores em relação à resistência elétrica (GRANTE, 2004).
- Metais depositados: o material de medição é depositado diretamente na estrutura do transdutor. Os transdutores realizados com esta técnica fornecem respostas com pouca precisão, porém, em contraponto, apresentam baixo custo de implementação, alto volume de produção e eliminação da cola orgânica (GRANTE, 2004).
- Extensômetros capacitivos: usualmente são soldados à peça e possuem embasamento na variação da capacitância. Apresentam ótimo desempenho em temperaturas elevadas, na faixa de 500°C e 800°C (GRANTE, 2004).
- Sensores de fibra ótica: são baseados nos princípios de transmissão por fibra óptica. De acordo com o *site* da empresa HBM, são comumente utilizados para o monitoramento estrutural e para testes de materiais, onde estão presentes limites de alta tensão e alta fadiga. É possível constatar que esta técnica apresenta alta confiabilidade, mesmo em transmissões de longas distâncias.

2.7.2 Tipos de extensômetros elétricos

O foco do presente trabalho está voltado aos extensômetros elétricos resistivos, sendo seus principais componentes ilustrados conforme a Figura 4.

Figura 4 - Principais componentes do extensômetro



Fonte: Site da empresa HBM.

Desta forma, é conveniente ressaltar que estes tipos de sensores são geralmente classificados da seguinte maneira, conforme Barreto Júnior (1998):

- Classificação de acordo com o material resistivo: fio, lâmina, semicondutor e semicondutor por difusão;
- Classificação de acordo com o material de base: papel, baquelita, poliéster, poliamida, epóxica e fibra de vidro reforçada com resina fenólica;
- Classificação de acordo com a configuração da grade: uniaxial, multiaxial e modelos específicos.

2.7.2.1 Tamanho do extensômetro

O catálogo de informações técnicas da Excel (2013) orienta a respeito da escolha do tipo de sensor ideal para as necessidades de cada projeto frente à grande diversidade de tamanhos e formas geométricas disponíveis no mercado.

Quanto ao tamanho, a empresa informa que, supondo-se que em diferentes pontos da área da grade do sensor haja diferentes deformações, a variação da resistência elétrica irá corresponder à deformação média nela ocorrida.

Excel (2013) ressalta, ainda, que a heterogeneidade dos materiais influencia na escolha do tipo de sensor. No caso da rocha e do concreto, exemplo mais comum de materiais utilizados nos ensaios na construção civil, extensômetros muito pequenos não possuem representatividade nos resultados obtidos, desta forma, extensômetros grandes são necessários para informar as deformações do conjunto.

Cabe ressaltar que extensômetros com dimensões muito pequenas dificultam a manipulação do mesmo e exigem que sua disposição no corpo de prova seja rigorosa para evitar resultados imprecisos (EXCEL, 2013).

2.7.2.2 Material resistivo

2.7.2.2.1 Extensômetro de fio

Este tipo de extensômetro elétrico é composto de um fio resistivo colado a um suporte, o qual tem a função de transmitir as deformações da peça em questão para o fio, que constitui um elemento sensível que deve servir de isolante elétrico para o mesmo fio (BARRETO JÚNIOR, 1998).

2.7.2.2.2 Extensômetro de lâmina

Os extensômetros de lâmina, inicialmente, são idênticos aos de fio. A diferença fundamental está no processo de fabricação que corresponde ao uso de uma finíssima lâmina de liga resistiva, em torno de 3 a 10 μm . Esse tipo de extensômetro é mais utilizado do que os de fio, devido às vantagens competitivas. Além da versatilidade na sua fabricação, os extensômetros elétricos de lâminas possuem uma diminuição da tensão no adesivo, pois possuem uma área de colagem maior, com isso obtém-se uma deformação lenta e histerese bem menores. Outro diferencial está na melhor dissipação térmica, sendo possível circuitos mais sensíveis, uma vez que o nível de excitação do extensômetro depende da sua dissipação térmica (BARRETO JÚNIOR, 1998).

2.7.2.2.3 Extensômetro de semicondutor

O extensômetro de material semicondutor é formado de um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício que é montado em uma base epóxica ou fenólica.

As principais vantagens deste tipo de extensômetro, de acordo com Barreto Júnior (1998), são: “sua grande capacidade de variação da resistência em função da deformação e seu alto valor do fator de extensômetro, que é de aproximadamente 150, podendo ser negativo ou positivo”. Este fator de extensômetro varia de acordo com a deformação, numa relação não linear, portanto, para a interpretação da leitura desses dispositivos, deve haver a linearização desses efeitos através do uso de circuitos eletrônicos.

Atualmente, o uso de extensômetros semicondutores está voltado principalmente quando há necessidade de uma saída em nível mais alto, como em células de cargas, acelerômetros e outros transdutores (BARRETO JÚNIOR, 1998).

2.7.2.3 Material base

Os primeiros extensômetros consistiam em suportes feitos basicamente de papel. Com a evolução do conhecimento da tecnologia dos materiais, as opções de material para a base foram crescendo e sendo aprimoradas, conforme citado anteriormente. No entanto, alguns fabricantes ainda têm em seus catálogos bases de extensômetros feitas de papel, apesar da pouca procura e desvantagens quando comparado com outros materiais com tecnologia mais avançada (BARRETO JÚNIOR, 1998).

O tipo de material de base associado com a escolha do material resistivo estabelece uma aplicação específica para cada extensômetro, podendo ser medição estática, medição dinâmica ou utilização em grandes variações de temperatura. Os fabricantes possuem à disposição uma significativa variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, com as mais variadas funcionalidades, sendo de responsabilidade do engenheiro a escolha correta dos mesmos de acordo com suas necessidades (BARRETO JÚNIOR, 1998).

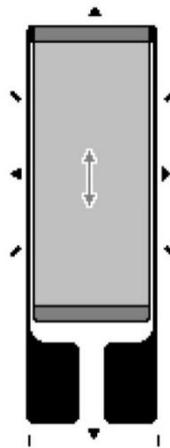
2.7.2.4 Configuração da grade

É mencionado nas Informações Técnicas do catálogo da empresa Excel Sensores (2013, p. 4) que

o extensômetro é feito para medir só as deformações que ocorrem ao longo de seu eixo principal, isto é, no sentido longitudinal da grade. Assim sendo, ele é seletivo na indicação das deformações. Esta propriedade nos obriga a identificar previamente em que sentido deverão ocorrer as deformações no local em estudo. E a utilização deverá ser, em princípio, de um extensômetro unidirecional.

Conclui-se que, quando não se tem conhecimento sobre as direções de deformações ou a deformação não possui apenas um único sentido, o extensômetro axial único (Figura 5) não é aplicável. Diante disso, outros modelos de sensores são necessários, conforme é mostrado a seguir.

Figura 5 - Extensômetro axial único



Fonte: Barreto Júnior (1998).

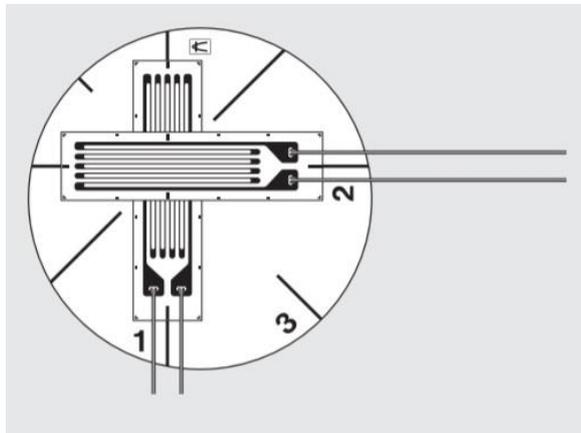
- Extensômetro axial múltiplo:

Como é abordado por Barreto Júnior (1998), para conhecer as direções das deformações e a direção da tensão máxima de um corpo de prova de forma complexa ou que esteja sujeito a tensões desconhecidas, é necessário que seja recorrido ao uso de extensômetros do tipo roseta, que podem ser constituídos de dois ou mais sensores sobre uma única base, dispostos entre si com ângulos de 45°, 60°, 90°, 120° e 240°.

Os modelos mais comuns de extensômetros do tipo roseta são demonstrados a seguir:

- a) Roseta de duas direções: utilizada quando existem duas direções de deformações e ambas são conhecidas. A medição é feita com o auxílio de dois extensômetros sobre uma mesma base, situados a 90° . Desta forma, podem-se determinar as deformações principal e secundária de uma peça. Este tipo de extensômetro é apresentado na Figura 6 (BARRETO JÚNIOR, 1998; EXCEL, 2013).

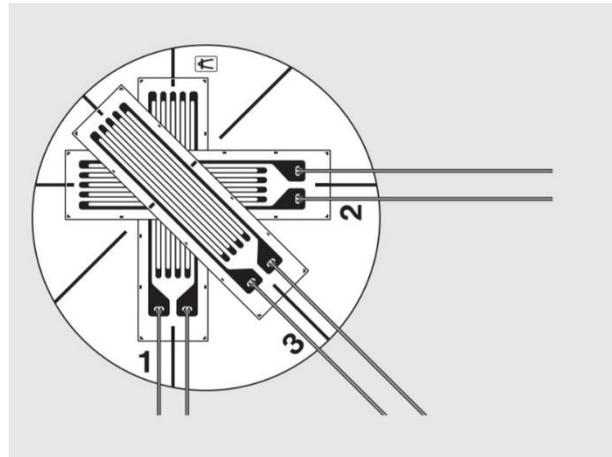
Figura 6 - Extensômetro biaxial



Fonte: Kyowa (2018).

- b) Roseta de três direções: é usada quando não se conhece os eixos de deformações principais. Baseia-se no uso de três extensômetros sobrepostos em um mesmo suporte, em ângulos pré-definidos entre si, extraindo-se a resultante através do Círculo de Mohr. Um exemplo de extensômetro elétrico triaxial é apresentado na figura abaixo (BARRETO JÚNIOR, 1998; EXCEL, 2013).

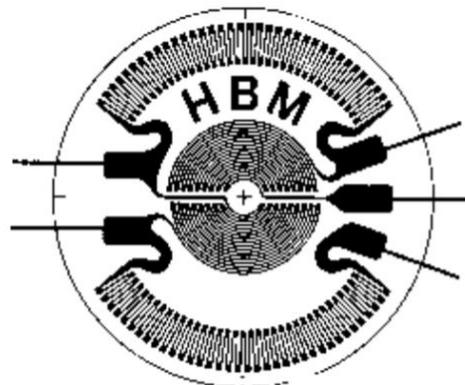
Figura 7 - Extensômetro triaxial



Fonte: Kyowa (2018).

- Extensômetro com modelos especiais:
 - a) Extensômetro tipo diafragma: geralmente utilizado em transdutores de pressão. São quatro extensômetros sobre um mesmo suporte, sensíveis a deformações em duas direções diferentes, conforme figura abaixo (BARRETO JÚNIOR, 1998).

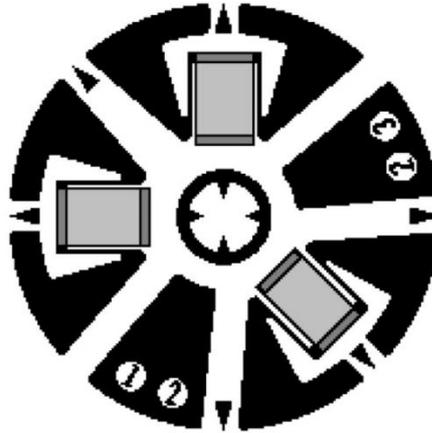
Figura 8 - Extensômetro tipo diafragma



Fonte: Catálogo HBM.

- b) Extensômetro para medida de tensão residual: consiste em três extensômetros sobre uma mesma base, estrategicamente posicionados para utilização em método de medida de tensão residual, vide Figura 9 (BARRETO JÚNIOR, 1998).

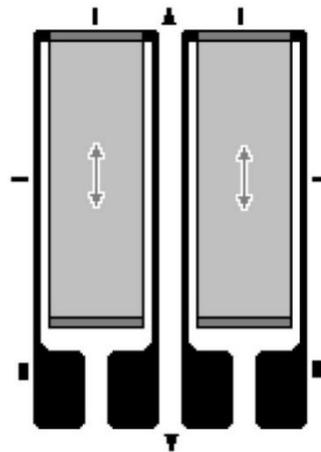
Figura 9 - Extensômetro para medida de tensão residual



Fonte: Barreto Júnior (1998).

- c) Extensômetro para transdutores de carga: este extensômetro é utilizado em células de carga e correspondem a dois extensômetros dispostos lado a lado, sobre uma mesma base, como é ilustrado na Figura 10 (BARRETO JÚNIOR, 1998).

Figura 10 - Extensômetro axial duplo



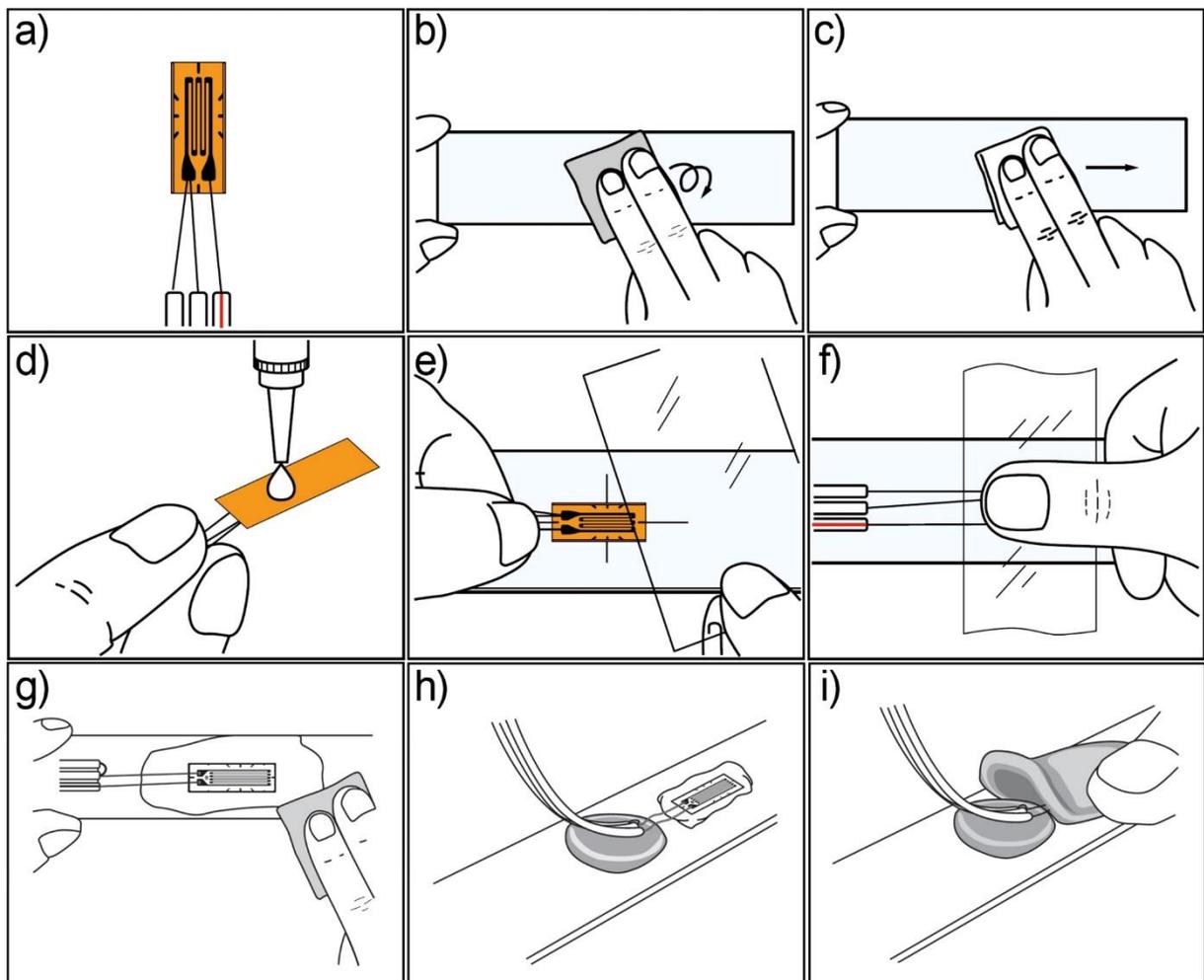
Fonte: Barreto Júnior (1998).

2.8 Aplicação dos extensômetros

De acordo com as Informações Técnicas da Excel (2013), é fundamental que o extensômetro esteja firmemente aderido à superfície da peça para reproduzir fielmente todas as microdeformações que ocorrem na peça.

Desta maneira, deve-se haver uma preparação da superfície e correta colagem do extensômetro, como é ilustrado na Figura 11. Logo a seguir é feita a descrição detalhada do passo-a-passo de como é feita a aplicação do *strain gauge* na base a ser ensaiada, bem como os cuidados necessários para evitar possíveis divergências nos resultados.

Figura 11 - Limpeza e instalação do *strain gauge*



Fonte: Kyowa (2014, 2018), adaptada pelo autor.

De acordo com Kyowa (2014, 2018), após a escolha do modelo de extensômetro ideal que atenda à finalidade desejada e aos requisitos de medição do objeto (Figura 11a), deve-se limpar o material que servirá de suporte ao extensômetro. Esta limpeza consiste no uso de uma lixa em uma área superior à que será ocupada pelo extensômetro. Deve-se lixar com movimento circulares para remoção das camadas de tinta, oxidação e chapeamento (Figura 11b).

Cabe frisar que a preparação da superfície não se restringe apenas à remoção das impurezas grosseiras, mas também de micro impurezas, como poeira, películas de gordura e umidade, que muitas vezes não são perceptíveis visualmente (EXCEL, 2013).

É através da utilização de um algodão ou um lenço de papel mergulhado em um solvente volátil, como a acetona, que é feita a limpeza dessas substâncias presentes na superfície, realizando movimentos unidirecionais (Figura 11c). A realização de movimentos circulares propiciaria apenas o transporte da sujeira e não a limpeza efetiva do objeto (KYOWA, 2014, 2018).

A Excel (2013) recomenda que a colagem do extensômetro seja feita até 20 ou 30 minutos após a limpeza das impurezas, conforme o material da superfície, e que a manipulação do extensômetro seja feita com pinça previamente desengordurada.

Ainda de acordo com Kyowa (2018), depois da definição do local que será instalado o extensômetro e também da identificação das partes frontal e traseira do *strain gauge*, deve-se aplicar uma cola adesiva específica na parte de trás do extensômetro (Figura 11d) e imediatamente colocá-lo no local de ligação (Figura 11e). Não é recomendado que se espalhe a cola na traseira do *strain gauge*, pois pode favorecer uma cura acelerada e não haver a aderência adequada.

As duas etapas citadas anteriormente devem ser executadas de maneira rápida e precisa, porque, uma vez o *strain gauge* colado na base, não pode ser levantado para ajustar a posição.

Depois do extensômetro ser colado no suporte, recomenda-se utilizar uma lâmina de polietileno para cobri-lo. Logo após, deve-se pressionar fortemente a lâmina com o auxílio do polegar (Figura 11f) por um tempo mínimo de 1 minuto.

Quando for certificado de que a cola adesiva estiver completamente curada e o sensor bem preso ao objeto, pode-se remover a lâmina de polietileno. O ideal é que o adesivo se saliente ligeiramente em torno do *strain gauge*. No entanto, caso

haja excesso de adesivo, o mesmo pode ser removido com o auxílio de uma lixa (Figura 11g) (KYOWA, 2018).

As informações fornecidas no catálogo da empresa Kyowa (2014), demonstram que bons resultados de medições estão disponíveis a partir de uma hora de cura do adesivo.

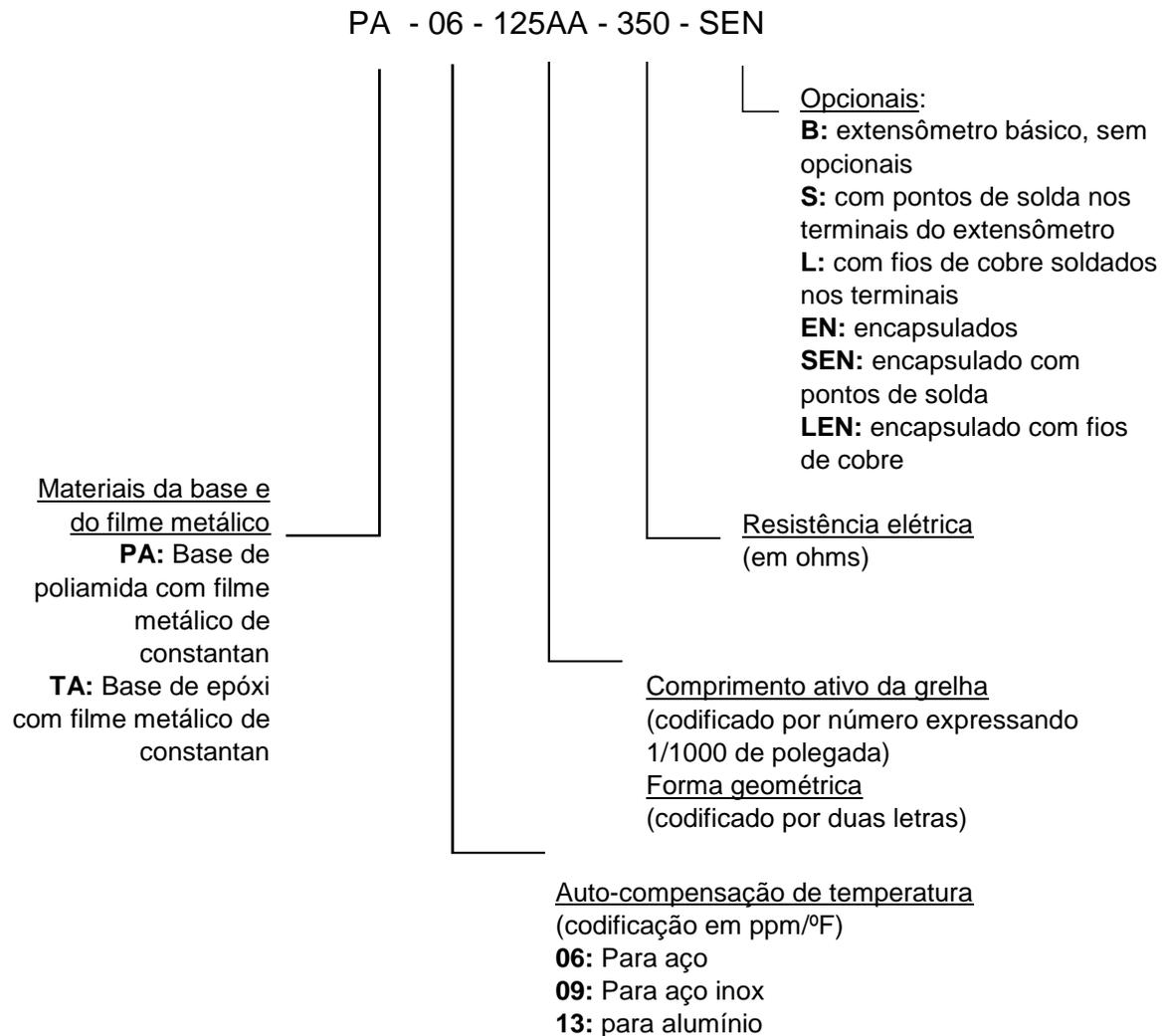
Como é descrito por Kyowa (2018), o passo seguinte é realizado em casos especiais de medição, onde é necessário que haja uma impermeabilização do extensômetro. Portanto, é necessário levantar o fio de chumbo e aplicar um revestimento de borracha butílica sob o mesmo (Figura 11h).

Por fim, o *strain gauge*, a cola adesiva sobressalente e parte dos fios são completamente cobertos pelo mesmo revestimento de borracha butílica (Figura 11i), que deve ser pressionado levemente com um dedo, sem gerar danificação do revestimento (KYOWA, 2018).

2.9 Sistemas de codificação

O sistema de codificação dos extensômetros elétricos apresenta um conjunto de letras e números que podem variar, conforme a determinação feita pelo fabricante. Logo abaixo é demonstrada detalhadamente a codificação da empresa Excel, que é uma empresa brasileira.

Figura 12 - Sistema de Codificação Excel

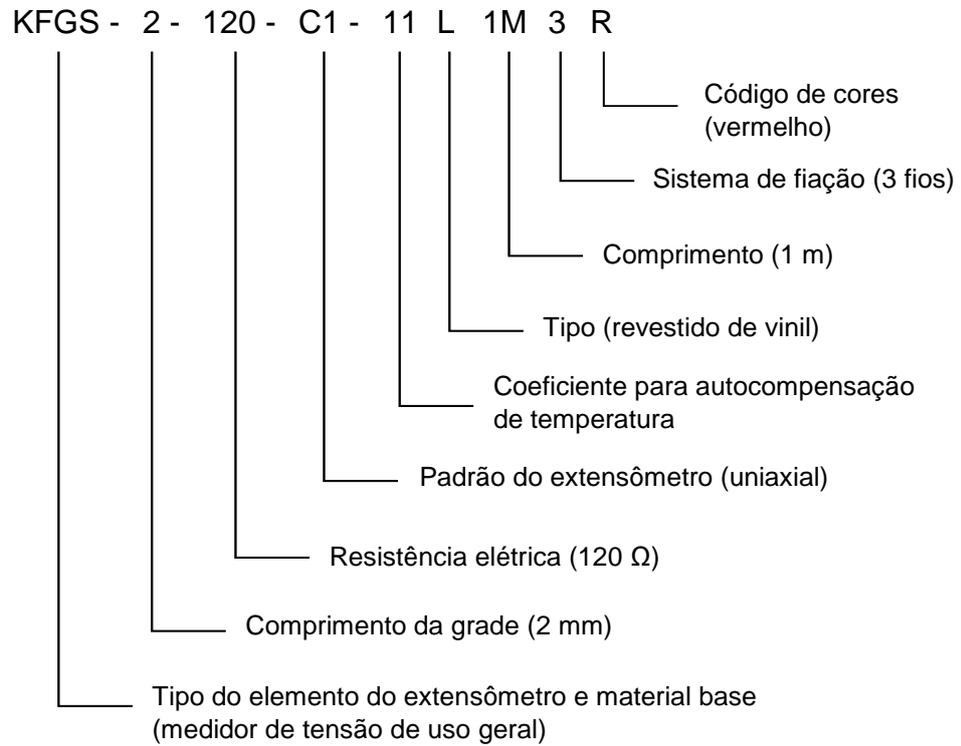


Fonte: Excel (2013), adaptada pelo autor.

A última etapa da identificação de um extensômetro elétrico, que se refere aos complementos, pode ser associada com outras opções com o intuito de tornar o extensômetro mais adequado a determinadas aplicações (EXCEL, 2013).

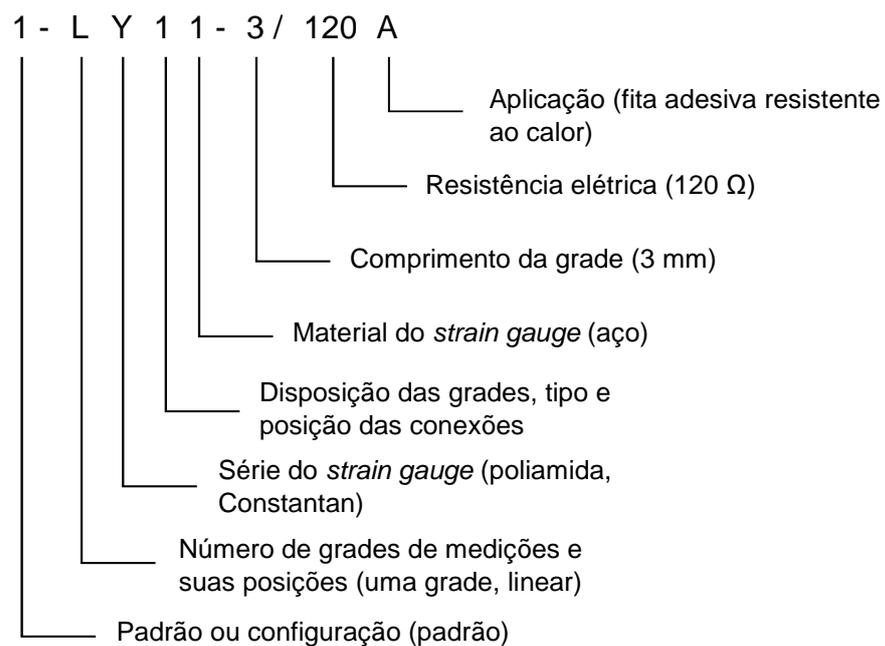
Alguns exemplos das codificações dos modelos de extensômetros das empresas HBM (alemã) e Kyowa (japonesa) são demonstrados nas figuras a seguir.

Figura 13 - Sistema de Codificação Kyowa



Fonte: Kyowa (2018), adaptada pelo autor.

Figura 14 - Sistema de Codificação HBM



Fonte: Catálogo HBM, adaptada pelo autor.

Ao se fazer uma comparação entre as três empresas mencionadas, é nítida as variações nas suas codificações, porém, todos os fabricantes fornecem as informações necessárias para a escolha do melhor tipo de extensômetro para cada aplicabilidade.

Inclusive, as empresas disponibilizam legendas em seus catálogos para identificação das informações dos produtos e as possíveis variações, o que muda são as letras das etapas da codificação, mas ambos os fabricantes procuram seguir a mesma lógica.

2.10 Ponte de Wheatstone

O cientista inglês *sir* Charles Wheatstone (1802-1875) criou em 1843 um circuito que possibilitou uma medição precisa das resistências elétricas (GALLINA, 2003).

Gallina (2003) aborda que o circuito da ponte de Wheatstone pode ser usado de diversas maneiras na medição das resistências elétricas, como é mencionado abaixo:

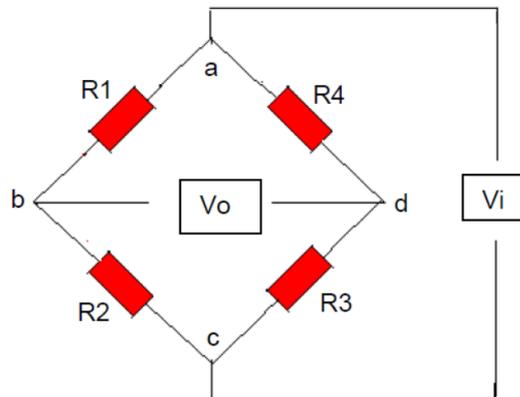
- Através da determinação do valor absoluto de uma resistência baseada em uma resistência conhecida;
- Para a determinação das mudanças relativas na resistência.

De acordo com Barreto Júnior (1998), a ponte de Wheatstone é o circuito com maior uso na extensometria, não apenas para medições de deformações estáticas, como também dinâmicas. Este tipo de circuito elimina facilmente a influência da variação de temperatura no extensômetro.

A ponte de Wheatstone pode ser montada de várias maneiras (um quarto de ponte, meia ponte, três quartos de ponte e ponte completa) dependendo do número de extensômetros usados e da aplicação a que se destina (GALLINA, 2003; GRANTE, 2004).

O esquema na Figura 15 demonstra uma ponte formada por resistores R1, R2, R3 e R4 onde as impedâncias são iguais aos resistores, alimentadas nos terminais “a” e “c” por uma tensão constante V_i , de corrente contínua por simplicidade, e a tensão de saída V_o obtida nos terminais “b” e “d” (WEBER, 2008).

Figura 15 - Esquema da Ponte de Wheatstone



Fonte: Weber (2008).

Este conjunto representa dois pares de divisores independentes, sendo um com a função de medir as variações e o outro de comparar os valores. É possível identificar que há dois ramos, sendo um formado pelas ligações “abc” e o outro “adc” (WEBER, 2008).

De acordo com Weber (2008), partindo-se do pressuposto de que a tensão elétrica inicial é igual nos dois ramos e que a mesma é definida pela multiplicação da corrente elétrica (I) com a resistência elétrica (R), seguem as seguintes deduções:

$$V_i = V_{abc} = V_{adc} \quad (2)$$

$$V = R \times I \quad (3)$$

$$V_{abc} = R_1 \times I_{abc} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_i \quad (4)$$

$$V_{adc} = R_4 \times I_{adc} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \times V_i \quad (5)$$

Weber (2008) informa que, sendo V_{abc} e V_{adc} as tensões iniciais de cada ramo, chega-se na equação geral da tensão de saída V_o .

$$V_o = \frac{R_1 \times R_3 - R_2 \times R_4}{(R_1 + R_2) \times (R_4 + R_3)} \times V_i \quad (6)$$

Ainda conforme Weber (2008), supondo-se que V_o sofra uma pequena variação ΔV_o , é possível reescrever a equação obtendo-se:

$$V_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1) \times (R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2) \times (R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) \times (R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_3)} \times V_i \quad (7)$$

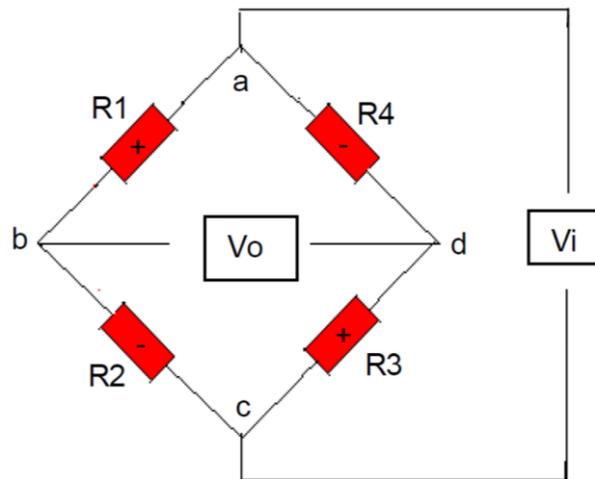
No caso de todas as resistências serem iguais, a relação “r” da ponte se define conforme é mostrado na equação a seguir (WEBER, 2008):

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (8)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{r} \quad (9)$$

Para adquirir o máximo valor para V_o , o resistor R_1 deve ser submetido à tensão trativa (positiva) e R_2 tensão compressiva (negativa), conseqüentemente, R_3 será positivo e R_4 negativo. Isso configura um sistema que opera em ponte completa, onde todos os sensores são ativos, como é exemplificado na Figura 16 (WEBER, 2008).

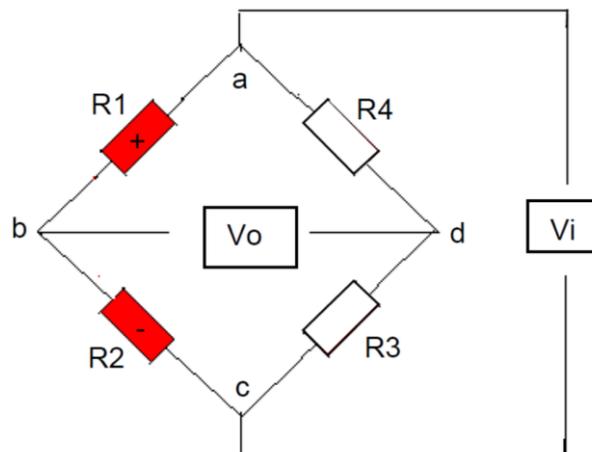
Figura 16 - Esquema de ponte completa



Fonte: Weber (2008).

É possível operar com meia ponte, ou seja, apenas com um dos braços de ponte ativo e os outros dois resistores em equilíbrio, sem variação de resistência, vide Figura 17 (WEBER, 2008).

Figura 17 - Esquema de meia ponte

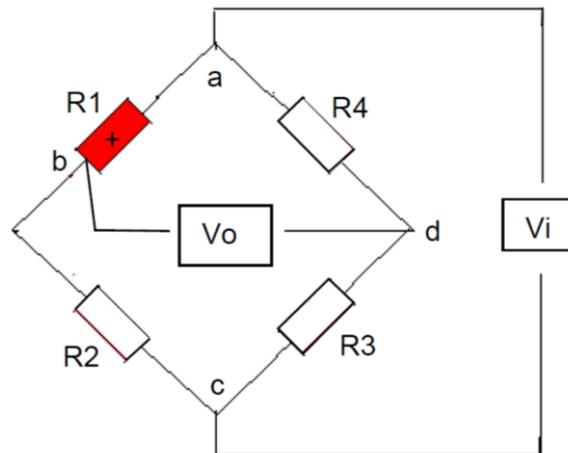


Fonte: Weber (2008).

De acordo com Barreto Júnior (1998), é comum o emprego de extensômetros ligados em meia ponte ou ponte completa, visando eliminar o efeito da temperatura sobre os extensômetros. É evidente que, para o balanceamento da ponte, é preciso o uso de extensômetros idênticos na formação da referida ponte de Wheatstone.

Além disso, é possível operar com apenas um quarto de ponte ativa, onde um dos sensores será ativo e os demais ficam em equilíbrio, sem variar as suas resistências. Obviamente que o sinal transmitido será menor e haverá necessidade de mais amplificação, mas isso não impede o seu funcionamento. A Figura 18 ilustra este modelo de ponte (WEBER, 2008).

Figura 18 - Esquema de um quarto de ponte



Fonte: Weber (2008).

No entanto, para este tipo de ponte, é necessária uma atenção especial em relação à ligação deste sensor, que deve ser a três fios, para anular o efeito da temperatura. Inclusive, a parcela de não linearidade (equação a seguir) tende a ser mais expressiva que outras formas (WEBER, 2008).

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1+r}{\frac{\Delta R1}{R1} + \frac{\Delta R4}{R4} + r \times \left(\frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} \right)}} \quad (10)$$

Ainda conforme Weber (2008), ao considerar $r=1$ para um quarto de ponte com $(\Delta R1/R1)$ ativo, os demais valores se anulam, gerando a equação a seguir.

$$\eta = 1 + \frac{1}{2 \times R1} \quad (11)$$

O fator de não linearidade resulta em um valor muito pequeno, sendo irrelevante para medidas comerciais, desta maneira, pode ser desconsiderado (WEBER, 2008).

2.11 Sistema de medição

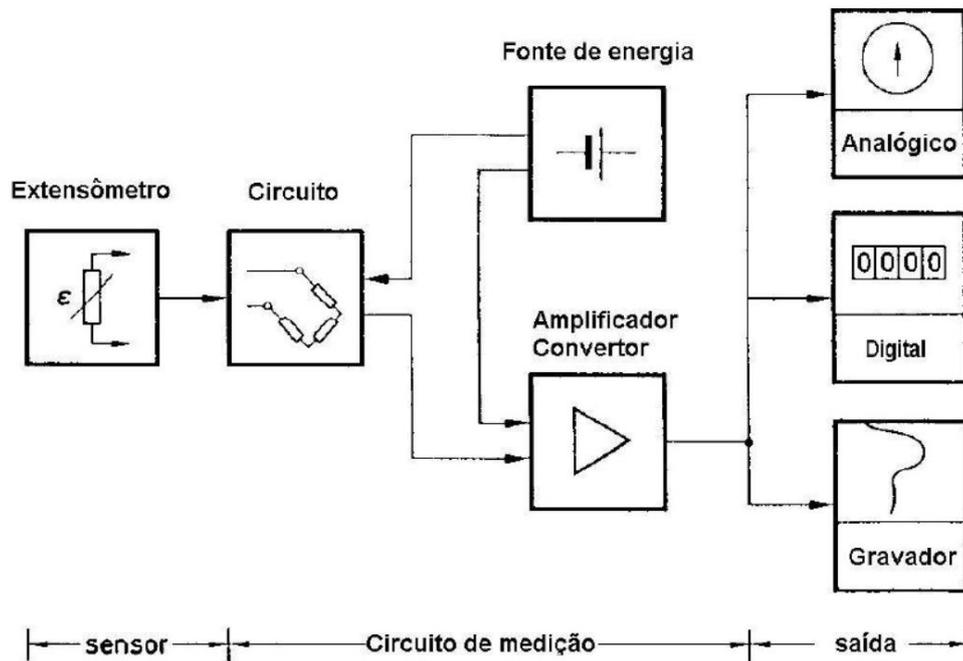
Como é descrito por Gallina (2003), o primeiro componente do sistema é o extensômetro, que converte a deformação mecânica em variação da resistência elétrica. Logo a seguir, está o circuito de medição (ponte de Wheatstone), sendo ambos componentes passivos. O circuito é alimentado por uma corrente elétrica, proveniente de uma fonte de energia.

Quando há uma modificação da resistência do extensômetro por causa da deformação da estrutura, o circuito da ponte perde a sua simetria. Desta forma, é necessária a inclusão de um amplificador, cuja finalidade é aumentar a tensão de saída da ponte a um nível adequado para instrumentos de indicação (GALLINA, 2003).

O quarto componente do sistema é o monitor, que converte o sinal de saída do amplificador numa forma que possa ser facilmente identificada. Normalmente as medidas indicadas estão na escala de voltímetro (V) ou demonstradas por figuras em um equipamento de medição digital (GALLINA, 2003).

A descrição do sistema de medição apresenta apenas os elementos principais, pois ainda são necessários equipamentos auxiliares como *scanners* e filtros. Os componentes do sistema são demonstrados na figura abaixo.

Figura 19 - Diagrama do sistema de medição de deformações



Fonte: Gallina (2003) apud Hoffmann (1989).

2.12 Aplicações para concreto e concreto armado

2.12.1 Definições e características do concreto

Por definição de Araújo (2014) e Porto e Fernandes (2015), o concreto é um material resultante da mistura homogênea de agregados miúdos (areia natural ou artificial), agregados graúdos (pedras britadas, seixos rolados), aglomerantes (cimento) e água. Podendo ser acrescentados, ainda, aditivos químicos, que melhoram as características do concreto fresco ou endurecido, como aceleradores, retardadores, fibras e corantes.

Conforme Araújo (2014), a resistência do concreto está relacionada a vários fatores, como a relação água-cimento, o grau de adensamento, as características dos agregados e os aditivos utilizados. Quanto maior é a quantidade de cimento na mistura e menor a relação água-cimento, mais rígida será a pasta de cimento endurecida, ou seja, menos porosa. Diante disso, conclui-se que a resistência à compressão do concreto será maior.

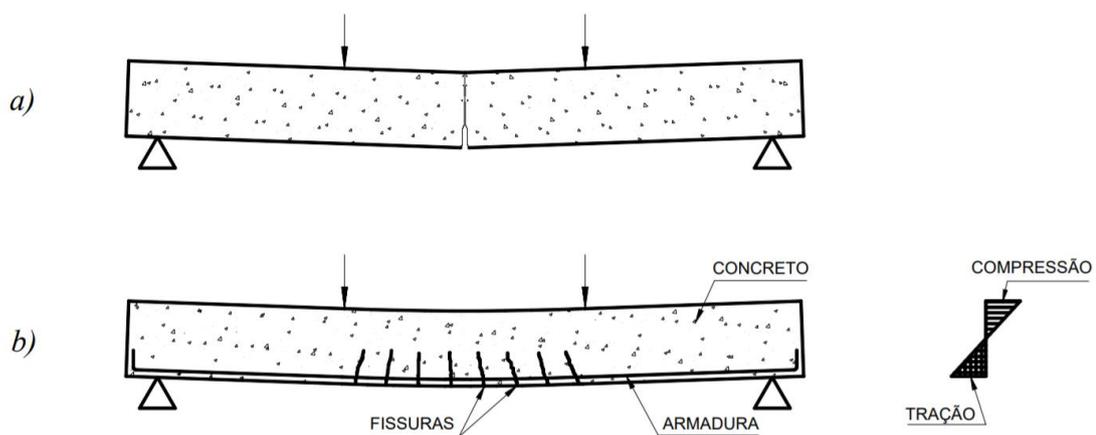
Outro aspecto que influencia diretamente na resistência do concreto é o tipo de agregado, caso seja de seixos arredondados e lisos, apresenta menor resistência do que concretos feitos com agregados britados, pois faces lisas não permitem uma aderência adequada (ARAÚJO, 2014).

2.12.2 Estruturas de concreto armado

O concreto é um material que resiste satisfatoriamente às tensões de compressão, porém apresenta baixa resistência à tração, com cerca de 10% da resistência à compressão, o que favorece o surgimento de fissuras no elemento estrutural (ARAÚJO, 2014).

Ainda conforme Araújo (2014), em função desta característica, são adicionadas ao sistema barras de aço, pois as mesmas cumprem a função de absorver os esforços de tração na estrutura e permitir o aumento da capacidade de carga das peças comprimidas. A armadura impede a ruína brusca da estrutura, o que não ocorreria em elementos de concreto simples, como é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Vigas de concreto simples (a) e armado (b)



Fonte: Bastos (2006) apud Pfeil (1989).

De acordo com Bastos (2006, p. 8),

o trabalho conjunto do concreto e do aço é possível porque os coeficientes de dilatação térmica dos dois materiais são praticamente iguais. Outro aspecto positivo é que o concreto protege o aço da oxidação (corrosão), garantindo a durabilidade do conjunto. Porém, a proteção da armadura contra a corrosão só é garantida com a existência de uma espessura de concreto entre a barra de aço e a superfície externa da peça (denominado cobrimento), entre outros fatores também importantes relativos à durabilidade, como a qualidade do concreto, por exemplo.

Conforme Porto e Fernandes (2015), o concreto armado é o material construtivo mais utilizado do mundo, devido ao seu ótimo desempenho, facilidade de execução e economia. Em complementação, Bastos (2006) cita outras vantagens relacionadas ao uso do concreto armado como material construtivo, quando executado corretamente:

- Insumos disponíveis em larga escala;
- Boa durabilidade das estruturas;
- Elevada resistência ao fogo;
- Impermeabilidade, evitando corrosão das armaduras;
- Resistência a choques e vibrações;
- Dispensa de mão de obra especializada;
- Uso de equipamentos simples.

2.12.3 Módulo de Elasticidade

Conforme Bastos (2006), o módulo de elasticidade é um parâmetro numérico que se relaciona com a medida da deformação que o concreto sofre sob a ação de tensões de compressão.

Ainda de acordo com Bastos (2006), os concretos com maiores resistências à compressão normalmente possuem módulos de elasticidade maiores, pois deformam-se menos que os concretos com pouca resistência. O módulo de elasticidade está diretamente relacionado com as características e os materiais componentes dos concretos.

Através do estudo da Resistência dos Materiais, sabe-se que a relação entre tensão e deformação pode ser considerada linear em determinados intervalos, conforme a Lei de Hooke, com é demonstrado na equação abaixo.

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (12)$$

Sendo:

- σ = tensão, em MPa;
- ε = deformação específica, em mm;
- E = módulo de elasticidade, em GPa.

A tensão é obtida no ensaio de compressão através da relação da força aplicada pela prensa com as dimensões do corpo de prova ensaiado, conforme expressão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13)$$

Onde:

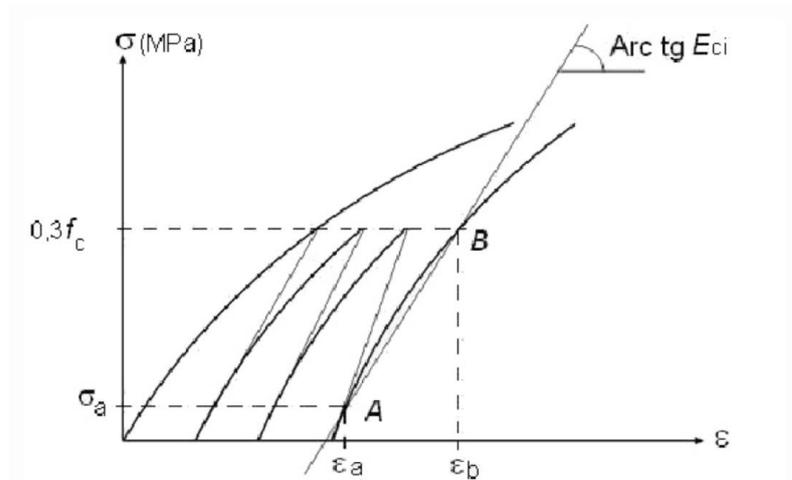
- F é a força, em N;
- A é a área, em mm².

A deformação é determinada através da equação abaixo, onde L é o diâmetro do corpo de prova e ΔL a sua variação.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (14)$$

O módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido pelo ensaio descrito na NBR 8522:2017, sendo considerado um módulo de deformação tangente inicial obtido aos 28 dias, conforme Figura 21 (PORTO e FERNANDES, 2015).

Figura 21 - Representação esquemática do módulo de elasticidade



Fonte: ABNT NBR 8522:2017

O valor deste módulo poder ser, inclusive, calculado através das equações a seguir (PORTO e FERNANDES, 2015).

- Para concretos de classes C20 até C50:

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (15)$$

- Para concretos de classes C55 até C90, sendo f_{ck} expresso em MPa:

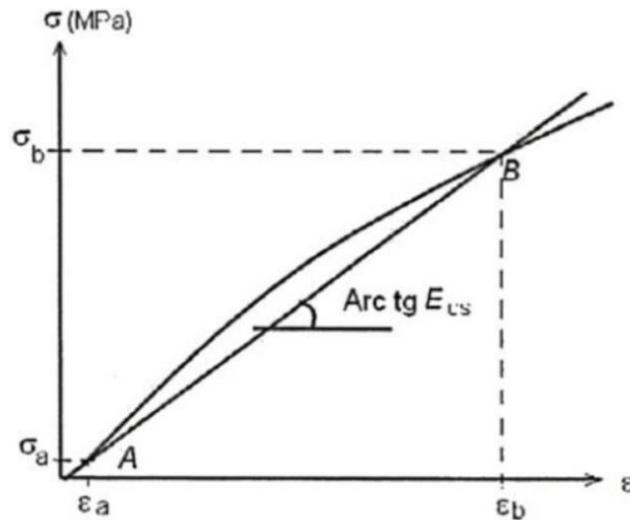
$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Sendo que:

- $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;
- $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;
- $\alpha_E = 0,9$ para calcário;
- $\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Já o módulo de deformação secante (E_{cs}), tendo sua representação esquemática mostrada na figura a seguir, é dado pela Equação 17.

Figura 22 - Representação esquemática do módulo de deformação secante



Fonte: ABNT NBR 8522:2017

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (17)$$

Sendo α_i informado pela equação abaixo, com f_{ck} expresso em MPa:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (18)$$

Os valores dos módulos de elasticidade e deformação secante podem ser encontrados através da Tabela 1, com valores arredondados, baseados nas equações citadas anteriormente. Os valores são estimados considerando o granito como agregado graúdo (PORTO e FERNANDES, 2015).

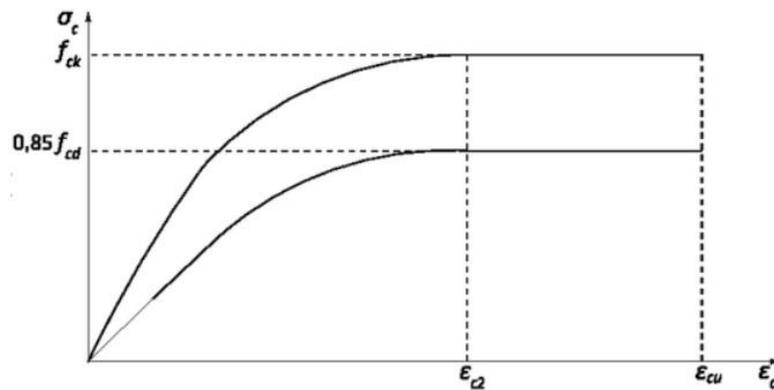
Tabela 1 - Valores estimados de módulo de elasticidade

Classe	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

De acordo com Porto e Fernandes (2015), é possível obter o diagrama tensão-deformação através da compressão do concreto, como é demonstrado na Figura 23. Logo a seguir são demonstradas as equações pertinentes.

Figura 23 - Diagrama tensão-deformação



Fonte: ABNT NBR 6118:2014

$$\sigma_c = 0,85 \times f_{cd} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (19)$$

Sendo:

- ϵ_c = deformação específica de encurtamento do concreto.

E o valor de “n” variando de como f_{ck} do concreto, sendo o valor de 2 para f_{ck} inferior ou igual a 50 MPa e, quando valores maiores do que a resistência do concreto citado, variando de acordo com a equação abaixo (PORTO e FERNANDES, 2015).

$$n = 1,4 + 23,4 \times \left[\frac{(90 - f_{ck})}{100} \right]^4 \quad (20)$$

Os valores de ϵ_{c2} (deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico) e ϵ_{cu} (deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura) são descritos posteriormente (PORTO e FERNANDES, 2015).

Para concretos de classes de até C50, os valores das deformações específicas são listados abaixo.

- $\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰}$
- $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$

Para classes de C55 até C90, os valores das deformações específicas são apresentados nas equações que seguem.

$$\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} \times (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (21)$$

$$\epsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 35\text{‰} \times \left[\left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right) \right]^4 \quad (22)$$

Utilizando as equações citadas, chega-se aos valores de deformações-limite do concreto expressos na Tabela 2 (PORTO e FERNANDES, 2015).

Tabela 2 - Deformações-limite do concreto

Classe	≤C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80	C85	C90
ϵ_{c2} (‰)	2,000	2,199	2,288	2,357	2,416	2,468	2,516	2,559	2,600
ϵ_{cu} (‰)	3,500	3,125	2,884	2,737	2,656	2,618	2,604	2,600	2,600

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

3 METODOLOGIA

Após a fundamentação teórica, optou-se em realizar a simulação do estudo desenvolvido através da análise de três modelos de vigas biapoiadas de concreto armado, com a utilização de extensômetros elétricos lineares (uniaxiais). Ambas as vigas com o mesmo traço de concreto e mesma quantidade de armaduras.

O experimento possui o objetivo de praticar a instalação dos *strain gauges* e operar os equipamentos e *softwares* de transmissão de dados para medir as deformações das vigas quando submetidas a cargas de compressão, além de analisar a viabilidade do uso de *strain gauges* na área de engenharia civil.

3.1 Definição e confecção dos modelos de vigas

Devido às limitações geométricas dos equipamentos para ensaios no Laboratório de Estruturas da UNISC, optou-se em elaborar três vigas de concreto armado nas seguintes dimensões: 14 cm de largura, 25 cm de altura de 150 cm de comprimento.

3.1.1 Materiais utilizados para a confecção dos modelos

Os itens deste tópico apresentam os materiais utilizados para a confecção das três vigas que foram submetidas aos ensaios laboratoriais para as análises mencionadas.

3.1.1.1 Formas

As formas utilizadas para a confecção das vigas com as dimensões citadas eram formadas de chapas de compensado resinado de 1,4 cm de espessura, unidas por parafusos para facilitar o posterior processo de desforma.

Optou-se em realizar a confecção das formas das três vigas lado a lado, em um único elemento, para otimizar espaço no laboratório e economizar material, como é demonstrado na fotografia a seguir.

Figura 24 - Formas dos modelos de vigas



Fonte: O autor.

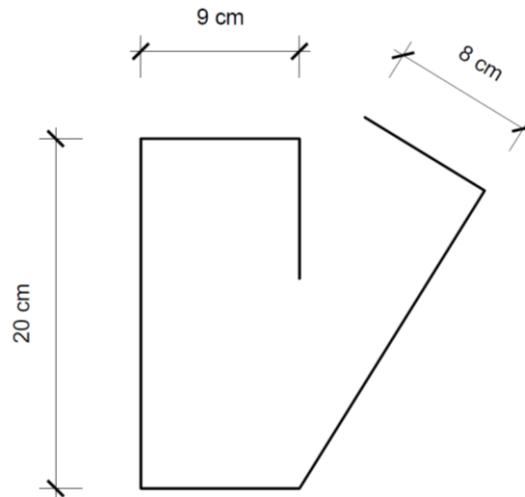
3.1.1.2 Armaduras

O aço escolhido para a elaboração dos modelos foi o CA50, com tensão de escoamento de 50 kgf/mm² (500 MPa) e os cálculos referentes à quantidade de aço necessária são apresentados detalhadamente no Anexo A.

Em relação às armaduras, primeiramente houve o corte de todos os estribos, que auxiliariam na resistência ao cortante, ambos com \varnothing 5,0 mm e comprimento tal que, quando fosse realizado o processo de dobra, as medidas finais ficassem como as demonstradas na Figura 25.

As dimensões dos estribos ficaram com esta configuração devido ao desconto do cobrimento de 2,5 cm em ambos os lados, gerando um total de 74 cm de comprimento.

Figura 25 - Dimensões dos estribos

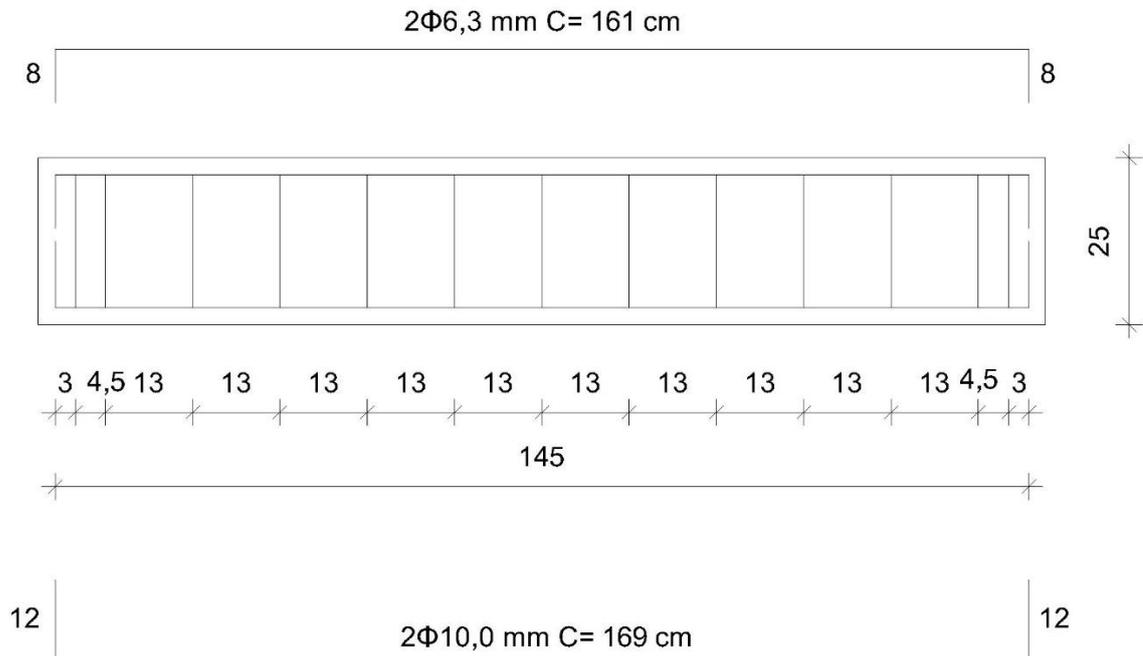


Fonte: O autor.

Mais tarde foram realizados os cortes e as dobras das armaduras longitudinais, sendo que as armaduras inferiores possuíam barras de bitola de \varnothing 10,0 mm, com ganchos de 12 cm a 90° , gerando um total de 169 cm de comprimento das barras. E as armaduras superiores de \varnothing 6,3 mm, com ganchos em ângulo reto de 8 cm, totalizando 161 cm de comprimento de cada barra.

Cada viga foi composta de duas armaduras positivas de \varnothing 10,0 mm, duas armaduras negativas de \varnothing 6,3 mm e 13 estribos de \varnothing 5,0 mm, com 4,5 cm de espaçamento entre os dois primeiros estribos de cada extremidade e 13 cm de espaçamento no restante dos estribos, como é demonstrado no esquema abaixo.

Figura 26 - Armaduras transversais e longitudinais dos modelos



Fonte: O autor.

A Tabela 3 foi elaborada para facilitar o entendimento da quantidade de barras de aço necessárias para a elaboração dos três modelos, bem como os seus respectivos comprimentos.

Tabela 3 - Quantidade de barras e respectivos comprimentos

Armadura	Bitola (mm)	Comprimento total (cm)	Comprimento gancho (cm)	Barras por viga	Total de barras
Superior	Ø 6,3	161,0	8,0	2	6
Inferior	Ø 10,0	169,0	12,0	2	6
Estribo	Ø 5,0	74,0	8,0	13	39

Fonte: O autor.

Cabe ressaltar que o processo de amarração foi realizado com arame recozido. Após a conferência do espaçamento das armaduras, as mesmas foram dispostas nas formas, respeitando o cobrimento especificado anteriormente, como é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Armaduras dispostas nas formas



Fonte: O autor.

3.1.1.2.1 Ensaios de tração do aço

Foram cortadas três barras de 30 cm de cada bitola utilizada, com a intenção de realizar ensaios de tração do aço. A Figura 28 mostra as barras de aço após a realização dos ensaios de tração, sendo apresentadas em ordem crescente a partir do menor diâmetro.

Figura 28 - Barras após os ensaios de tração



Fonte: O autor.

Os resultados dos ensaios de laboratório utilizando a prensa EMIC GR048, com célula de carga do modelo DL-30000 (capacidade de 30 toneladas), podem ser consultados no Item 4.1 do presente trabalho.

3.1.1.3 Concreto

3.1.1.3.1 Traço e caracterização dos materiais

Para que o concreto tivesse a resistência à compressão mínima de 25 MPa, optou-se pela utilização do traço demonstrado na Tabela 4, com a caracterização dos materiais descrita logo em seguida.

Tabela 4 - Definição do traço escolhido

Materiais	Proporção
Cimento CP V ARI RS	1,0
Agregado miúdo (areia média)	2,5
Agregado graúdo (brita 1)	3,33
Água	0,61

Fonte: O autor.

- Cimento CP V ARI RS: É classificado, de acordo com a NBR 16697:2018, como sendo um cimento de alta resistência inicial, onde é possível adquirir uma resistência à compressão igual ou superior a 14 MPa já no primeiro dia de idade. Sua máxima resistência é adquirida até o sétimo dia. O sufixo “RS” determina a propriedade de resistência a sulfatos;
- Areia média natural: é considerada como sendo o material miúdo que passa na peneira de abertura de 2 mm e fica retido na peneira de malha 0,42 mm (NBR 7211:2009);
- Brita 1: de acordo com a NBR 6211:2009, este material é classificado como o agregado graúdo que passa na peneira de 19 mm e fica retido na peneira de 9,5 mm.

É conveniente destacar que a escolha do cimento utilizado se deu por causa da necessidade na agilidade do ganho de resistência, para que os ensaios laboratoriais e as análises necessárias fossem realizados em tempo hábil para a finalização do presente trabalho.

3.1.1.3.2 Quantidade de material necessária

Para se ter conhecimento da quantidade de concreto necessária para a elaboração das três vigas de 14 x 25 x 150 cm, foi feito o cálculo do volume de concreto que, por se tratar de um prisma retangular, é obtido pela multiplicação de todos os lados, gerando um volume aproximado de 160L.

Tendo em vista que a betoneira de 250L presente no canteiro do Laboratório de Estruturas da Universidade tem a sua capacidade reduzida com a inclinação necessária para mistura, optou-se em realizar a concretagem das vigas em três betonadas, uma para cada modelo.

Inclusive, para verificar a resistência média do concreto, bem como o módulo de elasticidade, teve-se em mente a realização de três corpos de prova cilíndricos por betonada, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

O volume de concreto necessário para a confecção das vigas e os nove corpos de prova gerou um total de aproximadamente 180L (60L por betonada). Multiplicando-se este valor por 2500 kg/m^3 , que é o peso específico do concreto armado, resultou em um peso total de 450 kg.

Abaixo segue a relação da quantidade dos materiais necessária para a elaboração dos modelos e corpos de prova, sendo a relação água/cimento (a/c) igual a 0,61.

Tabela 5 - Relação da quantidade de materiais

Material	Traço	Quantidade de material por betonada	Quantidade total de material
Cimento CP V ARI RS	1	20,16 kg	60,48 kg
Areia média	2,5	50,40 kg	151,20 kg
Brita 1	3,33	67,14 kg	201,42 kg
Água	0,61	12,30 kg	36,9 kg
Somatório	7,44	150 kg	450 kg

Fonte: O autor.

3.1.2 Concretagem dos modelos

3.1.2.1 Preparação dos materiais e mistura

A brita teve que ser lavada repetidas vezes na betoneira para remoção de impurezas com o intuito de evitar variações da resistência do concreto. Após este processo, o agregado graúdo foi disposto sobre lonas para secar à temperatura ambiente.

A areia foi seca da mesma maneira e após foi realizado o peneiramento para que folhas e materiais mais grosseiros não fossem junto na mistura. Houve a separação e pesagem de todos os materiais, incluindo o cimento e a água.

Inicialmente a betoneira foi lavada com água corrente para limpar impurezas e também umedecer as paredes internas com o objetivo de evitar a aderência dos materiais. Logo foi feita a retirada do excesso da água e teve início a colocação dos materiais. Após alguns minutos de mistura, foi feita a remoção do concreto retido nas paredes internas, com o uso de colher de pedreiro.

3.1.2.2 *Slump test*

Depois da mistura foi realizado o ensaio da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*) obedecendo as recomendações da NBR NM 67:1998.

Toda a aparelhagem foi umedecida, evitando que houvesse a presença de água acumulada para não influenciar no teste.

Como a NBR NM 67:1998 recomenda, o tronco de cone foi colocado sobre uma base metálica e o operador se posicionou com os pés sobre as aletas do molde com o objetivo de não movimentar o molde durante a elaboração do teste. Sobre o tronco de cone foi colocado um funil para evitar queda de concreto.

Com o uso de uma concha pá medidora, o molde foi preenchido de concreto respeitando as três camadas necessárias, cada uma sendo compactada com 25 golpes com a haste de socamento. Depois da última camada ser compactada, o funil foi retirado, houve a remoção do concreto que sobrou e a camada de concreto foi rasada com uma colher de pedreiro.

Logo após, o tronco de cone foi retirado calmamente com movimento vertical e imediatamente o *slump test* pode ser medido com uma trena, tendo a haste sobre o molde como ponto de referência, resultando um abatimento de 160 mm para a primeira e terceira betonadas e 140 mm para a segunda, como é demonstrado nas figuras a seguir.

Figura 29 - *Slump test* da segunda betonada



Fonte: O autor.

Figura 30 - *Slump test* da terceira betonada



Fonte: O autor.

3.1.2.3 Confeção dos corpos de prova

Houve a confecção dos corpos de prova obedecendo os procedimentos indicados na versão corrigida da NBR 5738:2015.

A preparação dos moldes dos corpos de prova foi iniciada antes mesmo da mistura do concreto na betoneira, onde foi realizada uma verificação da estanqueidade dos corpos cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com o intuito de identificar se havia alguma abertura que pudesse favorecer a perda de concreto durante o processo.

Foi utilizado desmoldante nas paredes internas dos cilindros para facilitar o desmolde dos corpos de prova.

Com o concreto pronto, os corpos cilíndricos foram preenchidos até a superfície com duas camadas de concreto, sendo ambas compactadas com 12 golpes, utilizando uma haste metálica, como é especificado na NBR 5738:2015, já que se tratava de um ensaio manual.

Realizou-se o rasamento da última camada de cada corpo de prova da superfície com a borda do molde e os cilindros foram devidamente identificados com um pedaço de papel que continha o nome do operador, a betonada realizada e a especificação de qual corpo de prova se tratava, como é possível perceber na Figura 31.

Figura 31 - Corpo de prova devidamente identificado



Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram armazenados em local onde não haveria risco de vibrações, quedas, exposição solar e respingos d'água até que fosse realizada a imersão em água (Item 3.1.2.5) para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade e de compressão.

3.1.2.4 Confeção dos modelos

Em paralelo à execução dos corpos de prova, o material homogeneizado presente na betoneira foi colocado em um carrinho de mão para facilitar o transporte do concreto do canteiro de obras para o laboratório, onde estavam as formas devidamente limpas, com as armaduras nas posições especificadas.

A colocação do concreto na forma foi realizada com a ajuda de uma concha pá medidora. Logo depois houve a vibração do concreto com o uso de um vibrador elétrico com mangote para reduzir a quantidade de vazios do concreto.

Após a colocação da quantidade necessária de concreto, foi realizado o alisamento superficial para acabamento final da viga. E, por fim, foi colocado um ganho de bitola \emptyset 5,0 mm no centro de cada uma das vigas para facilitar o transporte dentro do laboratório. O mesmo foi feito para as demais vigas e a Figura 32 demonstra os modelos finalizados.

Figura 32 - Vigas logo após a concretagem



Fonte: O autor.

Houveram alguns imprevistos durante a concretagem dos modelos e foi feita a confecção de dois corpos de prova para a primeira betonada, quatro corpos de prova para a segunda betonada e, por fim, três corpos de prova para a última betonada, gerando um total de nove corpos de prova a serem ensaiados.

3.1.2.5 Cura e desforma

Nos primeiros dias após a concretagem, foi feita a cura úmida das vigas, com a adição periódica de água sobre a superfície dos modelos, com o objetivo de evitar o surgimento de fissuras devido à perda de água com o calor de hidratação do concreto. Mais tarde foi realizada a desforma das vigas, através da retirada dos parafusos e das chapas compensadas, como é apresentado na imagem abaixo.

Figura 33 - Vigas sendo desformadas



Fonte: O autor.

Quanto aos corpos de prova cilíndricos, após retirá-los cuidadosamente dos moldes, eles foram submetidos ao processo de cura com a total imersão em um tanque de água com solução de hidróxido de cálcio até o dia que foram submetidos aos ensaios de laboratório. A NBR 5738:2015 solicita que se evite a ocorrência da secagem das superfícies dos corpos de prova entre o momento em que são retirados do tanque de imersão até a realização dos ensaios.

A norma ressalta também que os corpos de prova não devem ser submetidos ao gotejamento nem à ação da água em movimento. Outro cuidado que se teve foi o de não empilhar os corpos de prova, já que a norma recomenda que isso seja evitado, como é apresentado na fotografia abaixo.

Figura 34 - Corpos de prova submersos



Fonte: O autor.

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade e de compressão dos corpos de prova podem ser consultados, respectivamente, nos Itens 4.2 e 4.3.

3.2 Instrumentação das vigas via extensometria elétrica

3.2.1 Informações e especificações dos extensômetros

Foram utilizados 14 sensores lineares (uniaxiais) nos modelos de concreto elaborados. Sendo três deles adquiridos pelo fabricante HBM e os demais extensômetros elétricos da empresa japonesa Kyowa.

O modelo escolhido da empresa HBM foi 1-LY41-20/120 e da Kyowa foi KFG-20-120-C1-11, este último possui especificações demonstradas na Figura 35.

Figura 35 - Especificações dos *strain gauges* da Kyowa

KYOWA		MADE IN JAPAN	
TYPE	KFG-20-120-C1-11		
GAGE FACTOR (24°C,50%RH)	2.08 ± 1.0%	LOT No.	Y4287S BATCH 482A Q06
GAGE LENGTH	20 mm	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	+0.008 %/°C
GAGE RESISTANCE(24°C,50%RH)	120.2 ± 0.2 Ω	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A, PC-6
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C	QUANTITY	10
KYOWA STRAIN GAGES			

Fonte: O autor.

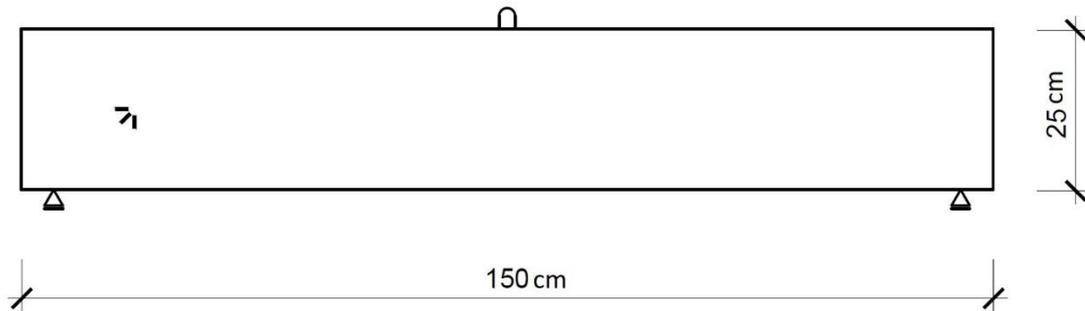
Diferentemente dos sensores da Kyowa, que continham um *gage factor* no valor de 2,08, os extensômetros da empresa HBM possuíam um *gage factor* de 2,06. Este valor varia conforme o fabricante escolhido e o lote adquirido, inclusive deve-se alterar esta informação no momento de processar os dados no *software* de aquisição de dados (DAQ) Catman. A versão do programa utilizada para as análises foi Catman Easy V5.2.2

É importante ressaltar que os *strain gauges* utilizados possuíam 20 mm por terem sido utilizados na medição de deformações em estruturas de concreto, pois necessitavam de um comprimento de base superior devido aos agregados utilizados na mistura do concreto, para que a medição das deformações fosse do conjunto e não de um único elemento.

3.2.2 Posicionamento e instalação dos extensômetros

Na Viga 1 e na Viga 2 foram utilizados três extensômetros elétricos da marca Kyowa, dispostos de maneira a formar uma roseta de três direções (triaxial) na parte lateral das vigas, com o intuito de medir os ângulos de deformações principais, conforme Figura 36.

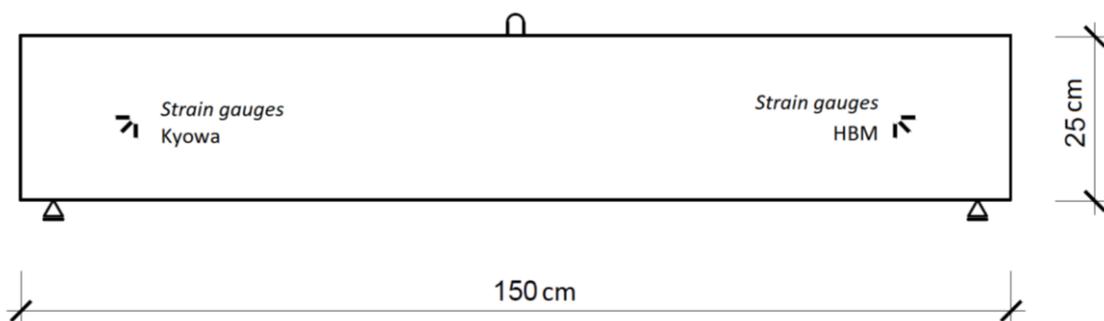
Figura 36 - Disposição dos sensores na Viga 1 e Viga 2



Fonte: O autor.

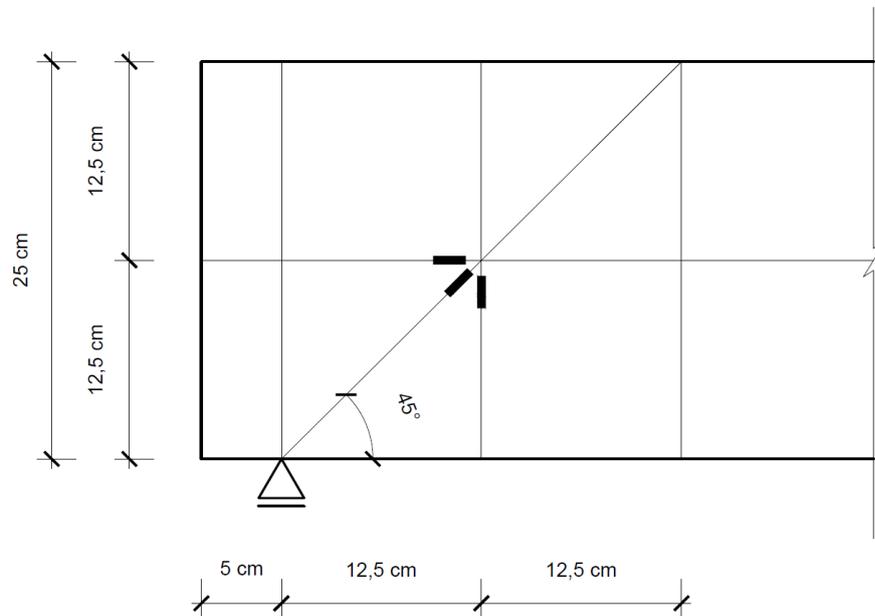
Já na Viga 3, além da roseta com três *strain gauges* da marca Kyowa, foram colocados três extensômetros da HBM, também formando uma roseta no mesmo lado, porém na outra extremidade da viga, conforme Figura 37 e detalhamento na Figura 38. Inclusive foram instalados um *strain gauge* no centro da face superior e outro na parte inferior da viga, ambos do fabricante Kyowa, com a intenção de medir as deformações de compressão e tração, respectivamente.

Figura 37 - Disposição dos sensores na Viga 3



Fonte: O autor.

Figura 38 - Detalhe da disposição dos sensores



Fonte: O autor.

A colocação de mais sensores na Viga 3 em comparação com as demais vigas se deu pelo objetivo de não aplicar carga até a ruptura e manter o modelo no Laboratório de Estruturas para futuras medições e auxiliar em outros trabalhos acadêmicos.

Cabe ressaltar que os procedimentos de limpeza da superfície e colagem dos extensômetros elétricos nos modelos, presente neste tópico, baseou-se no que foi abordado detalhadamente no Item 2.8.

Inicialmente as vigas foram viradas para que a lateral ficasse na parte superior e apoiadas sobre estruturas de concreto, com o objetivo de facilitar a colocação dos extensômetros. Então, mediu-se as distâncias especificadas anteriormente e marcou-se as posições finais dos *strain gauges*.

Foi realizado o desencapamento de ambos os lados dos fios de estanho que iriam transmitir as leituras das deformações dos extensômetros elétricos para o *software* em computador. Em um dos lados, estes fios foram soldados com os fios dos extensômetros, com cuidado para não os danificar.

Com a utilização de uma lixa, foram realizados movimentos circulares em uma área maior do que a ocupada pelos extensômetros, até que a superfície estivesse lisa o suficiente. Usou-se, então, uma pistola com ar comprimido para eliminar a poeira presente neste local (Figura 39).

Através do uso de algodões umedecidos com acetona, foram realizados movimentos unidirecionais repetidas vezes sobre a superfície lixada, trocando-se o algodão até que o mesmo não apresentasse mais sinal de sujeira (Figura 40).

Após a secagem completa da acetona, que demorou alguns minutos, os *strain gauges* já soldados aos cabos, foram colocados próximos da posição final e os cabos foram fixados na lateral das vigas com o uso de fitas. Também foram postas fitas abaixo das soldas, para evitar que as mesmas ficassem em contato com o concreto. Para a colagem dos sensores, foi utilizado cianoacrilato, um adesivo líquido que endurece após alguns segundos em contato com o ar, com cuidado para preencher os poros contidos no concreto (Figura 41).

Sobre os extensômetros, colocou-se lâminas plásticas que acompanham os *strain gauges* adquiridos pelos fabricantes. Os extensômetros foram pressionados com o polegar por cerca de 1 minuto e posteriormente houve a remoção das lâminas plásticas. Realizadas estas atividades, aguardou-se o término da cura do adesivo (Figura 42).

Mais tarde houve a identificação de cada sensor com seu respectivo cabo para transmissão das informações para o *software*.

Figura 39 - Viga sendo lixada e limpa com compressor de ar



Fonte: O autor.

Figura 40 - Limpeza da superfície da viga com acetona



Fonte: O autor.

Figura 41 - Posicionamento e colagem de *strain gauges*



Fonte: O autor.

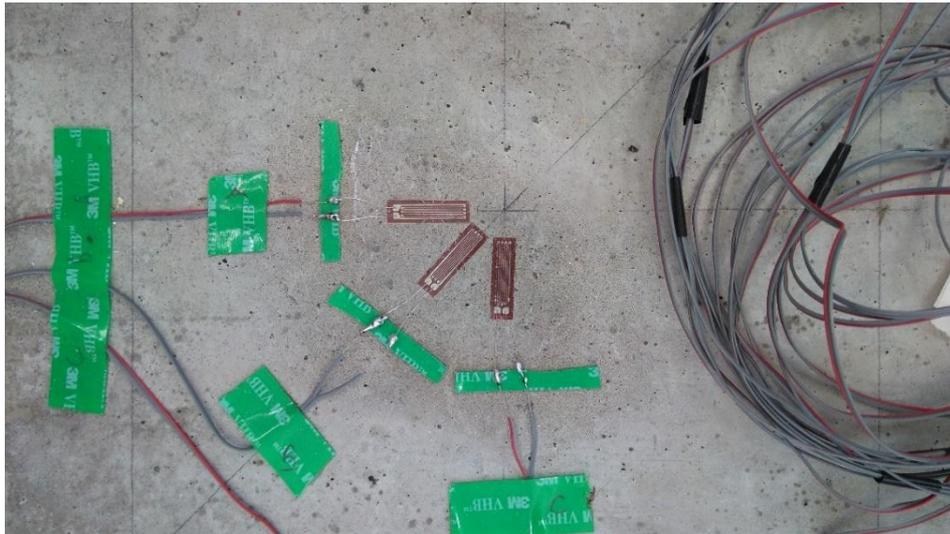
Figura 42 - Aplicação da lâmina plástica sobre os *strain gauges*



Fonte: O autor.

A seguir são apresentadas as imagens da finalização da instalação dos *strain gauges*, tanto da roseta da Viga 2 para medições à flexão, quanto os extensômetros elétricos para monitoramento das deformações durante a tração e a compressão da Viga 3.

Figura 43 - Conclusão da instalação da roseta da Viga 2



Fonte: O autor.

Figura 44 - Instalação do *strain gauge* para a compressão



Fonte: O autor.

Figura 45 - Instalação do *strain gauge* para a tração



Fonte: O autor.

Abaixo seguem algumas fotografias dos modelos após o processo de instalação de todos os *strain gauges* e prontos para serem ensaiados. As vigas são mostradas em ordem decrescente, sendo que a primeira viga concretada está à direita da imagem.

Figura 46 - Vigas com todos os extensômetros instalados



Fonte: O autor.

Figura 47 - Vigas prontas para serem ensaiadas



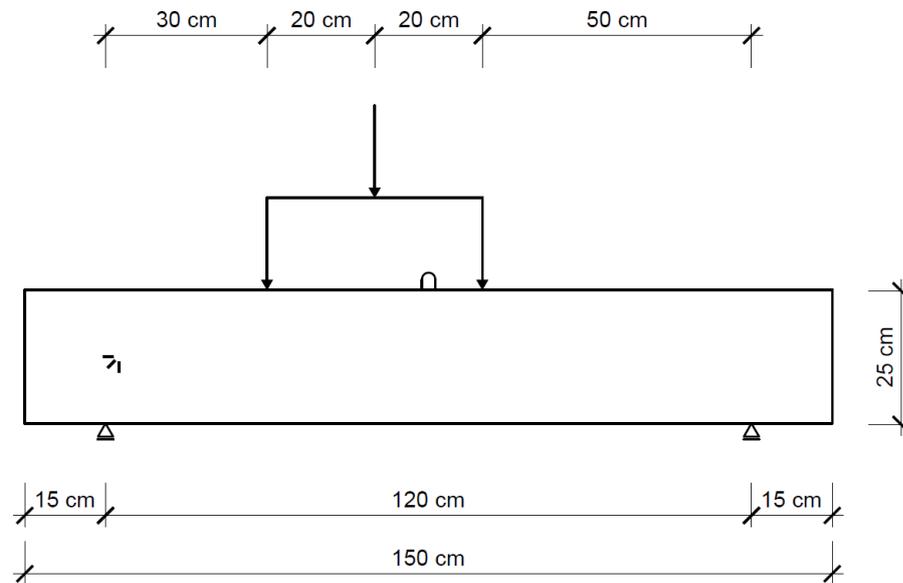
Fonte: O autor.

3.3 Posicionamento das vigas para a realização dos ensaios

Inicialmente, com o uso de um macaco hidráulico tipo jacaré, as vigas foram erguidas individualmente e colocadas sobre apoios metálicos, em um suporte na máquina EMIC GR048, que tem capacidade máxima de 300 kN (30000 kgf). Devido às limitações dimensionais do suporte, o vão entre os apoios das vigas teve que ser reduzido para 1,20 m.

Desta forma, a carga foi aplicada sobre um suporte metálico e transferida para dois apoios cilíndricos dispostos na face superior a cada 40 cm em relação ao vão das vigas, conforme o esquema e fotografia que seguem abaixo.

Figura 48 - Redução do vão entre os apoios e disposição das cargas



Fonte: O autor.

Figura 49 - Viga posicionada para a realização de ensaios



Fonte: O autor.

Com a viga posicionada sobre os apoios, iniciou-se a conexão dos cabos com fios de estanho, que haviam sido soldados aos fios dos *strain gauges*, com um adaptador SCM SG120 (de 120 Ω), adquirido do fornecedor HBM, que permite medições com *strain gauges* únicos em um circuito de um quarto de ponte. Cada adaptador foi responsável pela transmissão dos dados de um extensômetro elétrico,

devidamente identificado, que foi ligado a um aparelho de aquisição de dados QuantumX MX840B, do mesmo fornecedor, mostrado na Figura 50. O aparelho é um aquisitor de dados universal, que possui 8 canais de entrada que podem ser configurados de maneira individual, de acordo com o tipo de sensor.

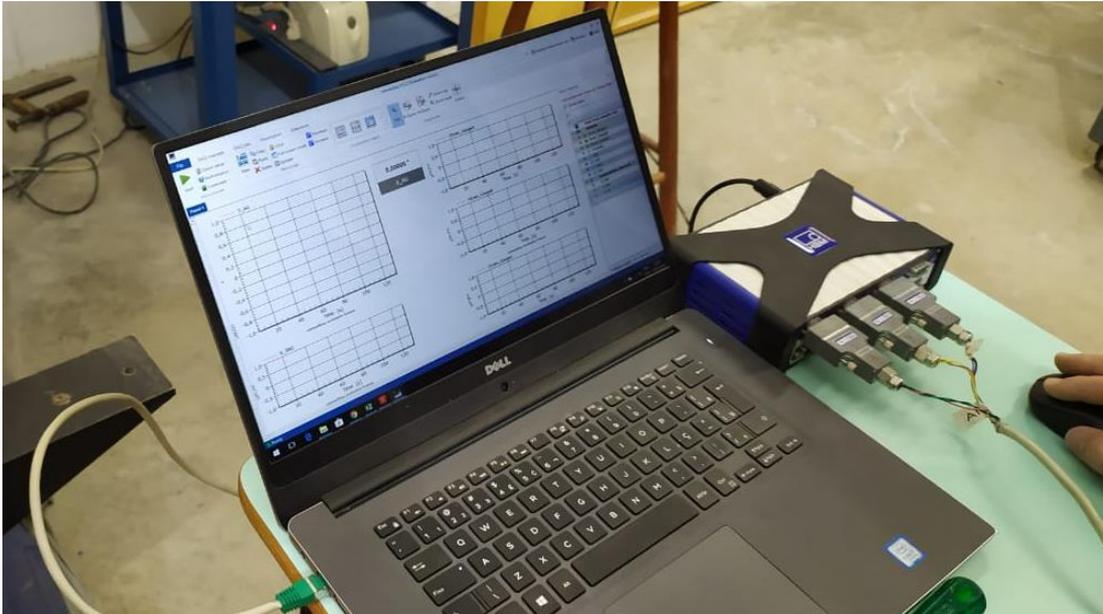
Figura 50 - Adaptador e aquisitor de dados QuantumX MX840B



Fonte: O autor.

Com o aquisitor de dados conectado a um computador (Figura 51), foi feita a configuração de visualização do software Catman V5.2.2, onde pôs-se a opção de aparecer o ângulo da biela de compressão no monitor, que variava em tempo real, conforme a carga aplicada pela máquina.

Figura 51 - Aquisitor de dados conectado ao computador



Fonte: O autor.

Os Itens 4.4 e 4.5 apresentam os resultados obtidos através dos ensaios e análises realizados nos modelos de viga.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

As subdivisões deste capítulo se referem aos resultados e discussões de todos os ensaios realizados com a aplicação de cargas pela máquina EMIC GR048, tanto nas barras de aço utilizadas na confecção dos modelos, como os ensaios nas vigas de concreto armado e nos corpos de prova confeccionados.

4.1 Ensaio de tração nas barras de aço utilizadas nos modelos

As Tabelas 6 a 8 apresentam os resultados de força máxima, tensão de escoamento e tensão máxima, obtidos pela máquina durante o ensaio de tração de amostras de 30 cm das barras de aço CA50 que foram utilizadas nas armaduras longitudinais e estribos dos modelos de concreto armado confeccionados.

Os diagramas de tensão-deformação de cada barra podem ser consultados no Anexo B.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 5,0 mm

Amostras	F máx (kgf)	σ esc (MPa)	σ máx (MPa)
CP1	1515,05	748,74	756,69
CP2	1504,51	733,55	751,42
CP3	1492,91	727,71	745,63
Média	1504,16	736,67	751,25

Fonte: O autor.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 6,3 mm

Amostras	F máx (kgf)	σ esc (MPa)	σ máx (MPa)
CP1	2237,26	659,19	703,83
CP2	2198,25	661,99	691,55
CP3	2254,13	668,66	709,13
Média	2229,88	663,28	701,50

Fonte: O autor.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de tração do aço Ø 10,0 mm

Amostras	F máx (kgf)	σ esc (MPa)	σ máx (MPa)
CP1	5207,27	558,83	650,19
CP2	5206,22	558,26	650,06
CP3	5178,81	555,25	646,63
Média	5197,43	557,45	648,96

Fonte: O autor.

É possível constatar a confiabilidade dos resultados obtidos através dos ensaios de tração das barras de aço, devido à baixa variação dos valores apresentados nas tabelas anteriores.

Os menores valores de tensão de escoamento foram obtidos pelas barras de Ø 10,0 mm, no entanto, apresentaram resultados satisfatórios, já que foram superiores à 500 MPa, que é a tensão de escoamento do aço CA50. Para as demais barras, a resistência à tração do aço foi superior a 600 MPa, referente ao aço CA60.

4.2 Módulo de Elasticidade dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade e compressão nos corpos de prova das vigas, os mesmos foram retirados do tanque onde estavam submersos para que ocorresse a cura úmida das amostras (Figura 52) e foram retificados em ambos os lados para remover a camada superficial que poderia influenciar na variação dos resultados, conforme recomenda a versão corrigida da NBR 5738:2015.

Figura 52 - Os corpos de prova retirados do tanque de imersão



Fonte: O autor.

Para o ensaio do módulo de elasticidade foram pegos um corpo de prova da Viga 1 e dois corpos de provas da Viga 2 e da Viga 3. A Tabela 9 apresenta as informações das forças aplicadas sobre os corpos de prova individualmente, com seus respectivos deslocamentos provocados, fornecidos através do equipamento de aplicação de cargas do laboratório.

Tabela 9 - Resultados fornecidos pela prensa

Amostras	Força máxima (kN)	Deslocamento (mm)
V1C1	76,18	0,031242
Média	76,18	0,031242
V2C1	76,53	0,028475
V2C2	76,11	0,030617
Média	76,32	0,029546
V3C1	76,04	0,030795
V3C2	76,11	0,030528
Média	76,08	0,030662

Fonte: O autor.

Para encontrar a tensão de escoamento de cada corpo de prova estudado, foi utilizada a Equação 13, onde a força aplicada foi dividida pela área dos corpos de prova cilíndricos, que possuem 10 cm de diâmetro, gerando uma área aproximada de 7854 mm².

Para transformar o deslocamento em deformação, usou-se a Equação 14, onde ΔL é o deslocamento de cada corpo de prova, informado na tabela anterior, e L é o diâmetro dos corpos de prova, que equivale a 100 mm.

Através destes cálculos, foram encontrados os seguintes valores para as tensões de escoamento e deformações.

Tabela 10 - Tensão de escoamento e deformação de cada corpo de prova

Amostras	Tensão de escoamento (MPa)	Deformação específica (mm/mm)
V1C1	9,70	0,00031242
Média	9,70	0,00031242
V2C1	9,74	0,00028475
V2C2	9,69	0,00030617
Média	9,72	0,00029546
V3C1	9,68	0,00030795
V3C2	9,69	0,00030528
Média	9,69	0,00030662

Fonte: O autor.

Com as informações da tensão de escoamento e da deformação específica, foi possível gerar o diagrama de cada corpo de prova e, após feito isso, marcou-se no diagrama o valor referente a 30% do fck do corpo de prova em questão (esta informação foi obtida pelo ensaio de compressão presente do Item 4.3) e pego o valor aproximado da deformação neste ponto de tensão.

Portanto, pode-se calcular o módulo de elasticidade de cada corpo de prova através da Lei de Hooke, mostrada na Equação 12, fornecendo resultados em GPa.

A Tabela 11 apresenta os dados relevantes para o cálculo do módulo de elasticidade dos corpos de prova.

Tabela 11 - Módulo de elasticidade dos corpos de prova

Amostras	fck (MPa)	0,3.fck (MPa)	Deformação (mm/mm)	Módulo de elasticidade (GPa)
V1C1	33,08	9,700*	0,000312	31,09
Média	33,08	9,700	0,000312	31,09
V2C1	29,35	8,805	0,000252	34,94
V2C2	29,65	8,895	0,000277	32,11
Média	29,50	8,850	0,000265	33,40
V3C1	30,94	9,282	0,000290	32,01
V3C2	29,37	8,811	0,000276	31,92
Média	30,16	9,047	0,000283	31,97

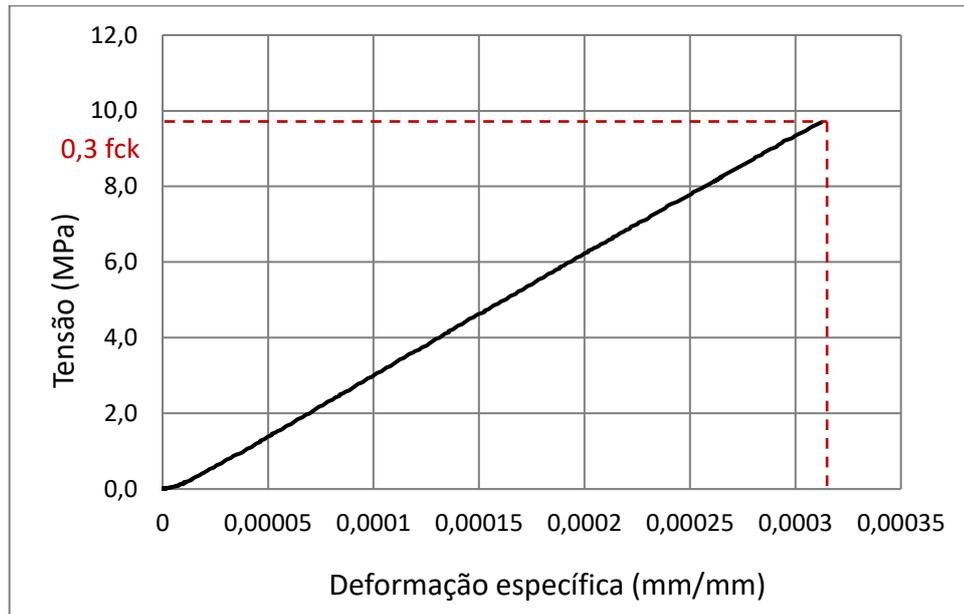
* Adotado valor da tensão de escoamento.

Fonte: O autor.

No caso da amostra V1C1, percebeu-se que a resistência à compressão do concreto (fck) multiplicada por 0,3 gerou um valor de 9,924 MPa, sendo, portanto, superior à tensão de escoamento. Desta maneira, adotou-se o valor da tensão máxima de 9,70 MPa e a deformação provocada neste ponto para o cálculo do módulo de elasticidade.

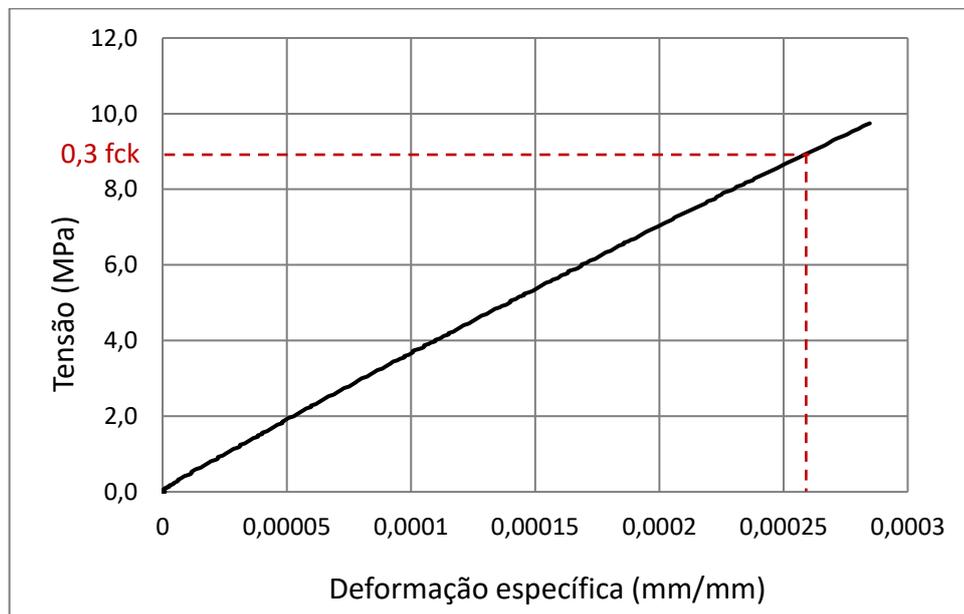
A seguir são apresentados os diagramas de tensão pela deformação das amostras estudadas, onde foram identificados com linha tracejada vermelha a localização das tensões dos corpos de prova multiplicadas por 30%, bem como a as suas respectivas deformações.

Figura 53 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V1C1

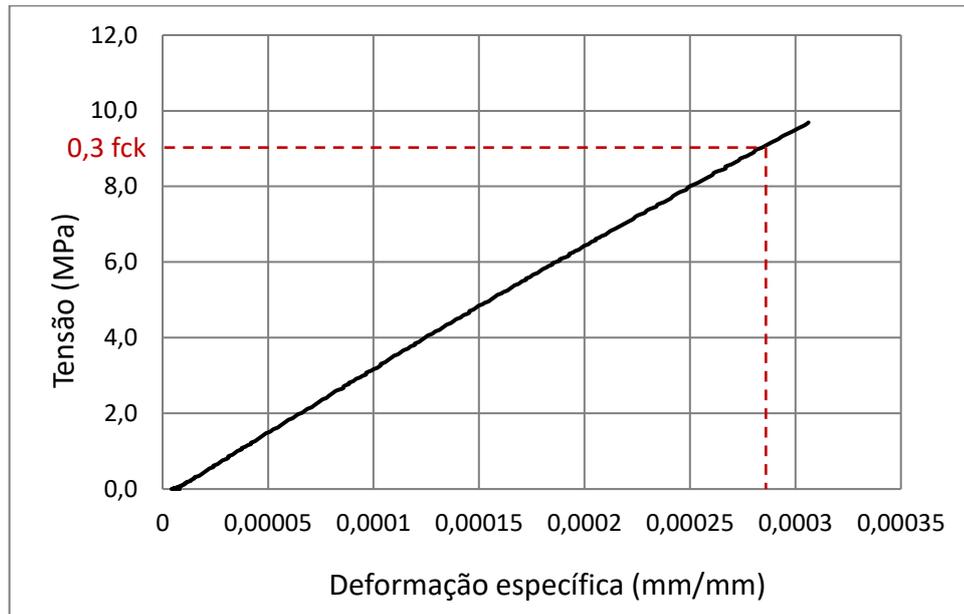


Fonte: O autor.

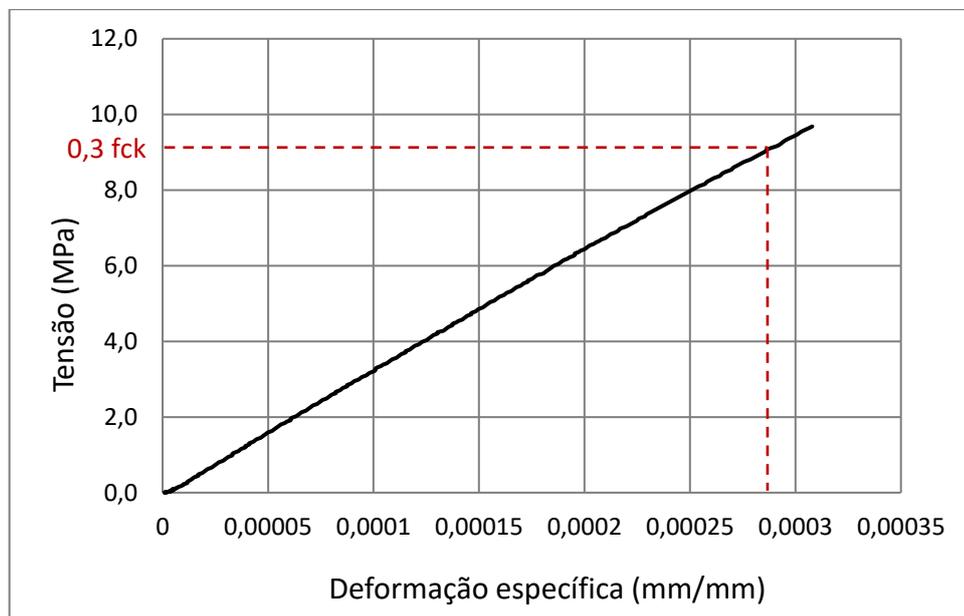
Figura 54 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V2C1



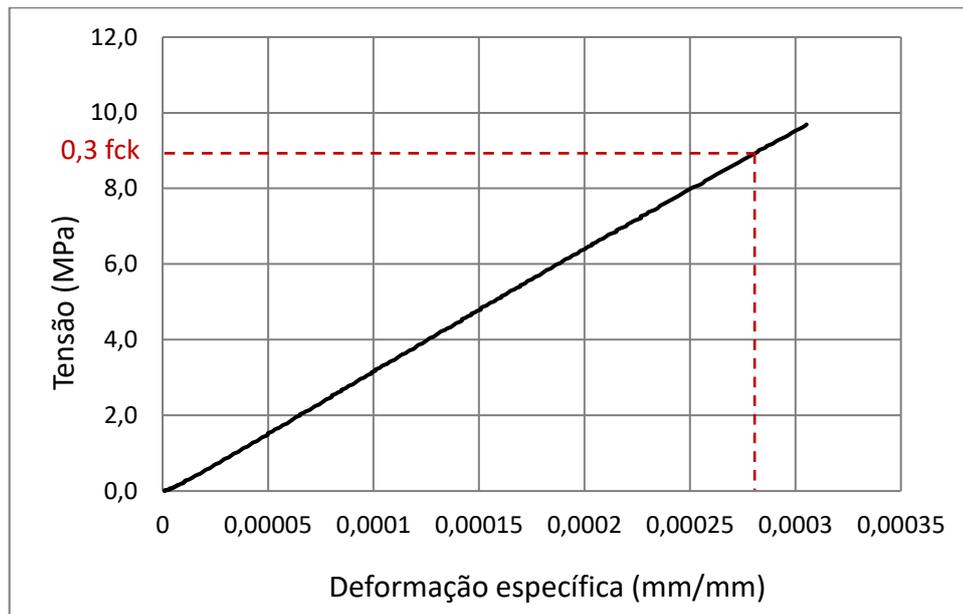
Fonte: O autor.

Figura 55 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V2C2

Fonte: O autor.

Figura 56 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V3C1

Fonte: O autor.

Figura 57 - Diagrama de tensão x deformação do corpo de prova V3C2

Fonte: O autor.

Com base nas informações apresentadas anteriormente, pode-se chegar em um valor médio do módulo de elasticidade de 32,15 GPa, como é mostrado na tabela que segue.

Tabela 12 - Módulo de elasticidade médio entre os corpos de prova

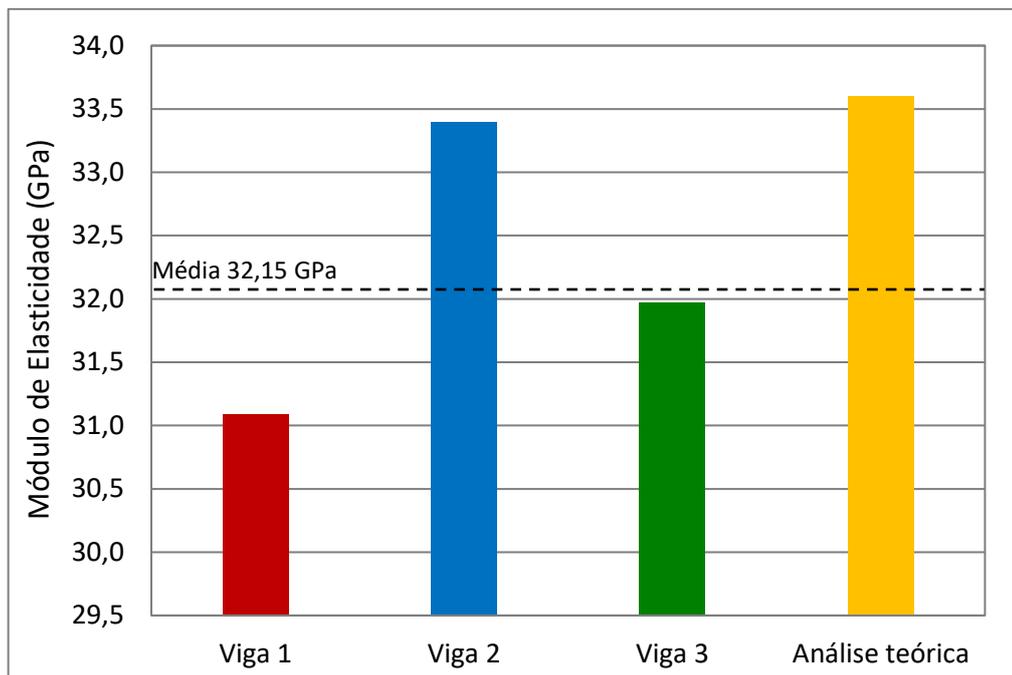
Modelo	Módulo de elasticidade (GPa)
Viga 1	31,09
Viga 2	33,40
Viga 3	31,97
Média	32,15

Fonte: O autor.

Utilizando a Equação 15, e adotando-se 25 MPa como f_{ck} e 1,2 o fator do material, por ter sido utilizado agregado graúdo de basalto, chega-se a um valor de 33600 MPa (33,60 GPa) de módulo de elasticidade. Este resultado possui uma variação de 4,35% em relação à média calculada na tabela anterior.

O esquema a seguir demonstra um comparativo entre os módulos de elasticidade da análise experimental, tanto os valores individuais quanto o médio, com a análise teórica. São apresentados, inclusive, as variações em porcentagem dos valores dos módulos de elasticidade das vigas quando comparados com o modelo calculado anteriormente.

Figura 58 - Esquema comparativo entre os módulos de elasticidade da análise experimental com a análise teórica



Fonte: O autor.

É possível perceber que a Viga 1 possui maior distanciamento do valor do módulo de elasticidade teórico, com uma variação de 8,07%. Já as Vigas 2 e 3 possuem variações de 0,61% e 5,1%, respectivamente.

4.3 Ensaio de compressão dos corpos de prova confeccionados

Após a colocação dos corpos de prova na prensa com célula de carga de modelo DL-30000, na mesma posição que foram moldados, foram aplicadas cargas de compressão, que resultou nos valores de força máxima suportados. Considerando que a área dos corpos de prova é aproximadamente 7854 mm², por

serem cilíndricos, o resultado da resistência à compressão (f_{ck}) de cada corpo de prova foi encontrado dividindo-se a força máxima por essa área, conforme a Equação 13 e apresentados nas tabelas que seguem.

Tabela 13 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 1

Amostras	Força máxima (kN)	Resistência à compressão (MPa)
V1 C1	259,8	33,08
V1 C2	253,1	32,23
Média	256,45	32,66

Fonte: O autor.

Tabela 14 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 2

Amostras	Força máxima (kN)	Resistência à compressão (MPa)
V2 C1	230,5	29,35
V2 C2	232,9	29,65
V2 C3	246,7	31,42
V2 C4	241,8	30,79
Média	237,98	30,30

Fonte: O autor.

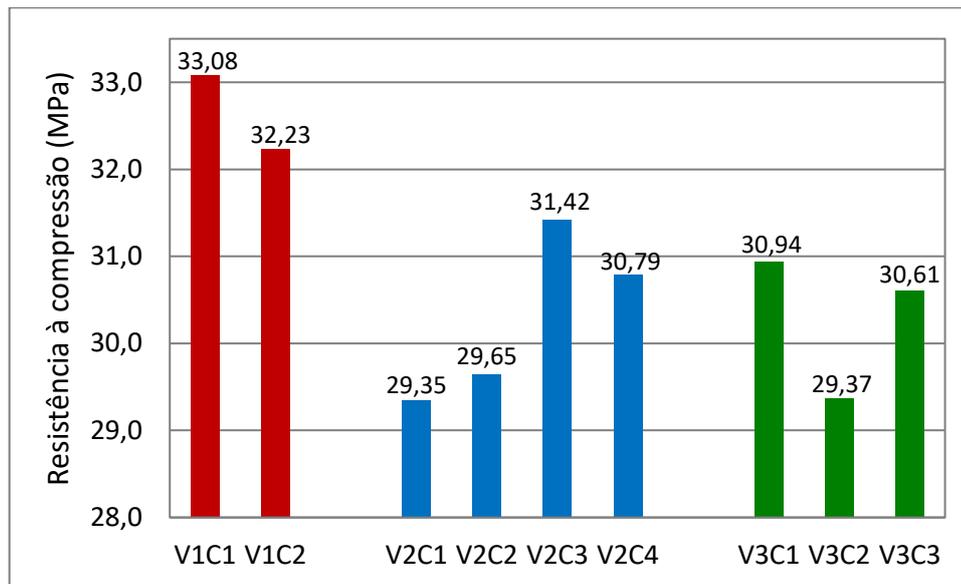
Tabela 15 - Resultados do ensaio dos corpos de prova da Viga 3

Amostras	Força máxima (kN)	Resistência à compressão (MPa)
V3 C1	243,0	30,94
V3 C2	230,6	29,37
V3 C3	240,4	30,61
Média	238,00	30,31

Fonte: O autor.

O esquema abaixo apresenta a comparação entre os resultados de resistência à compressão de todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão.

Figura 59 - Esquema da resistência à compressão de cada corpo de prova



Fonte: O autor.

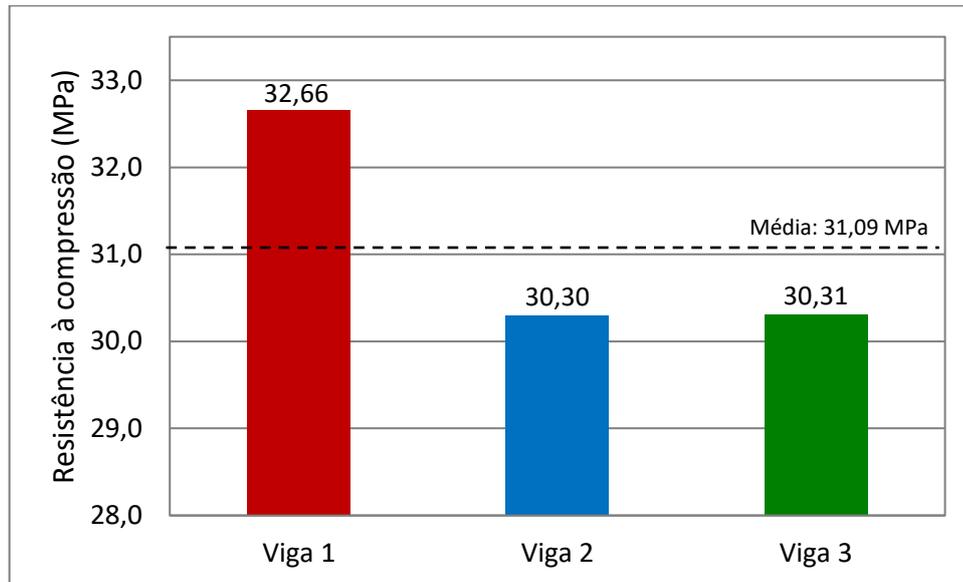
Baseando-se nas informações acima, fez-se a média dos valores de resistência à compressão de cada viga e, inclusive, a média geral, como é mostrado na Tabela 16 e no esquema da Figura 60.

Tabela 16 - Valores médios de resistência à compressão dos corpos de prova

Modelos	Resistência à compressão média (MPa)
Viga 1	32,66
Viga 2	30,30
Viga 3	30,31
Média geral	31,09

Fonte: O autor.

Figura 60 - Esquema da resistência à compressão média de cada viga



Fonte: O autor.

Cabe ressaltar que os resultados das resistências à compressão de todas as amostras foram satisfatórios, pois apresentaram valores superiores a 25 MPa, conforme havia sido esperado.

Pode-se constatar que a Viga 1 possui valor médio de resistência à compressão do concreto superior às demais vigas, possuindo um resultado 5,05% superior em relação à média geral das resistências.

Por outro lado, os valores de f_{ck} das Vigas 2 e 3 possuíram respectivamente resultados de variação de 2,61% e 2,57%, menores do que a média geral mencionada.

Os diagramas das tensões geradas pelo tempo de realização dos ensaios podem ser consultados no Anexo C.

4.4 Medições e aquisição de dados dos experimentos

4.4.1 Variação do ângulo de deformação principal de compressão

Após o posicionamento das vigas já instrumentadas sobre os apoios e depois terem sido realizadas as modificações desejadas nas configurações do *software* Catman, foi possível iniciar o processo de aplicação de cargas para monitoramento

remoto das deformações ocorridas e as variações dos ângulos de deformações principais.

Cabe ressaltar que não foram realizadas as medições dos *strain gauges* da Viga 1, pois um dos extensômetros possuía uma falha que impossibilitava a conexão com o aquisitor de dados, por este motivo houve a análise de deformações e variação dos ângulos de deformações principais somente nas Vigas 2 e 3.

Os valores referentes às medições na roseta da Viga 2, com *strain gauges* da empresa Kyowa, estão na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 2

Carga aplicada	Ângulo
2000 kgf	45°
4000 kgf	40°
6000 kgf	43°
8000 kgf	44°
10000 kgf	41°

Fonte: O autor.

A primeira trinca na Viga 2 pode ser observada com a aplicação da carga de compressão de 8000 kgf (aproximadamente 80 kN). Foi então que houve um registro fotográfico, como é mostrado na Figura

Figura 61 - Princípio de fissuração da Viga 2



Fonte: O autor.

Já na Viga 3, onde foi acompanhada a variação dos ângulos, conforme a aplicação de cargas, em duas rosetas formadas por sensores de fabricantes diferentes, possui valores na Tabela 18, que se referem aos *strain gauges* da HBM. E os ângulos de deformação medidos na roseta com sensores da empresa Kyowa podem ser consultados na Tabela 19.

Tabela 18 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 3, com *strain gauges* da HBM

Carga aplicada	Ângulo
2000 kgf	48°
4000 kgf	47°
6000 kgf	44°
8000 kgf	41°

Fonte: O autor.

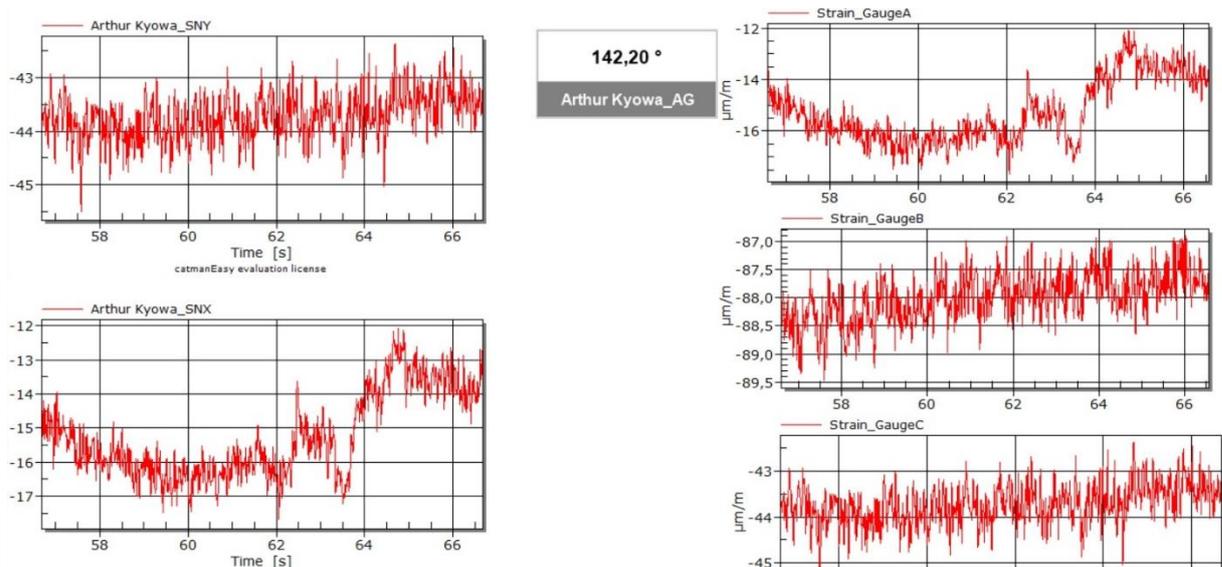
Tabela 19 - Resultados medidos de ângulos de deformação na Viga 3, com *strain gauges* da Kyowa

Carga aplicada	Ângulo
2000 kgf	40°
4000 kgf	45°
6000 kgf	52°
8000 kgf	40°
9000 kgf	39°

Fonte: O autor.

Na visualização do Catman aparecia a oscilação dos ângulos e as variações das deformações dos *strain gauges*, em $\mu\text{m}/\text{m}$, como exemplifica a imagem abaixo.

Figura 62 - Visualização no Catman sobre as verificações analisadas



Fonte: O autor.

Após se perceber a presença de trincas na zona de esmagamento da biela, as medições nos extensômetros elétricos foram finalizadas, gerando-se as planilhas sobre as informações medidas onde demonstrava as verificações em relação ao tempo de ensaio.

As cargas foram aliviadas e iniciou-se novamente a aplicação de força vertical na Viga 2, desta vez até a ruptura do modelo de concreto armado, como será descrito no próximo item.

4.5 Ensaio das vigas de concreto armado à flexão

Como mencionado anteriormente, somente duas das três vigas confeccionadas foram submetidas a ensaios até a ruptura à flexão dos modelos, sendo elas a Viga 1 e 2. As forças máximas são apresentadas na seguinte tabela, que gerou uma média entre os valores de 106,2 kN e uma variação muito baixa de 0,76% entre os resultados.

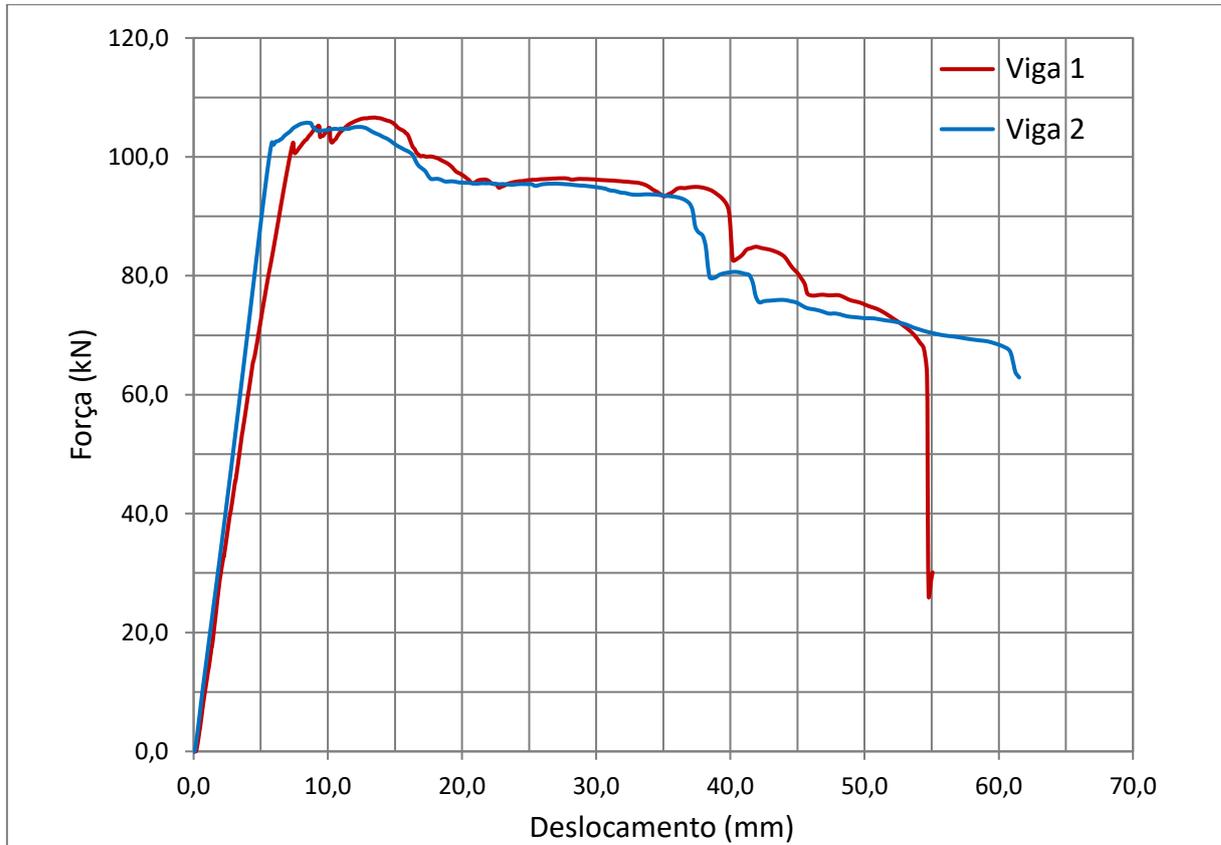
Tabela 20 - Força máxima resistida pelas vigas

Modelos	Força máxima (kN)	Força máxima (kgf)
Viga 1	106,60	10660,0
Viga 2	105,80	10580,0
Média	106,20	10620,0

Fonte: O autor.

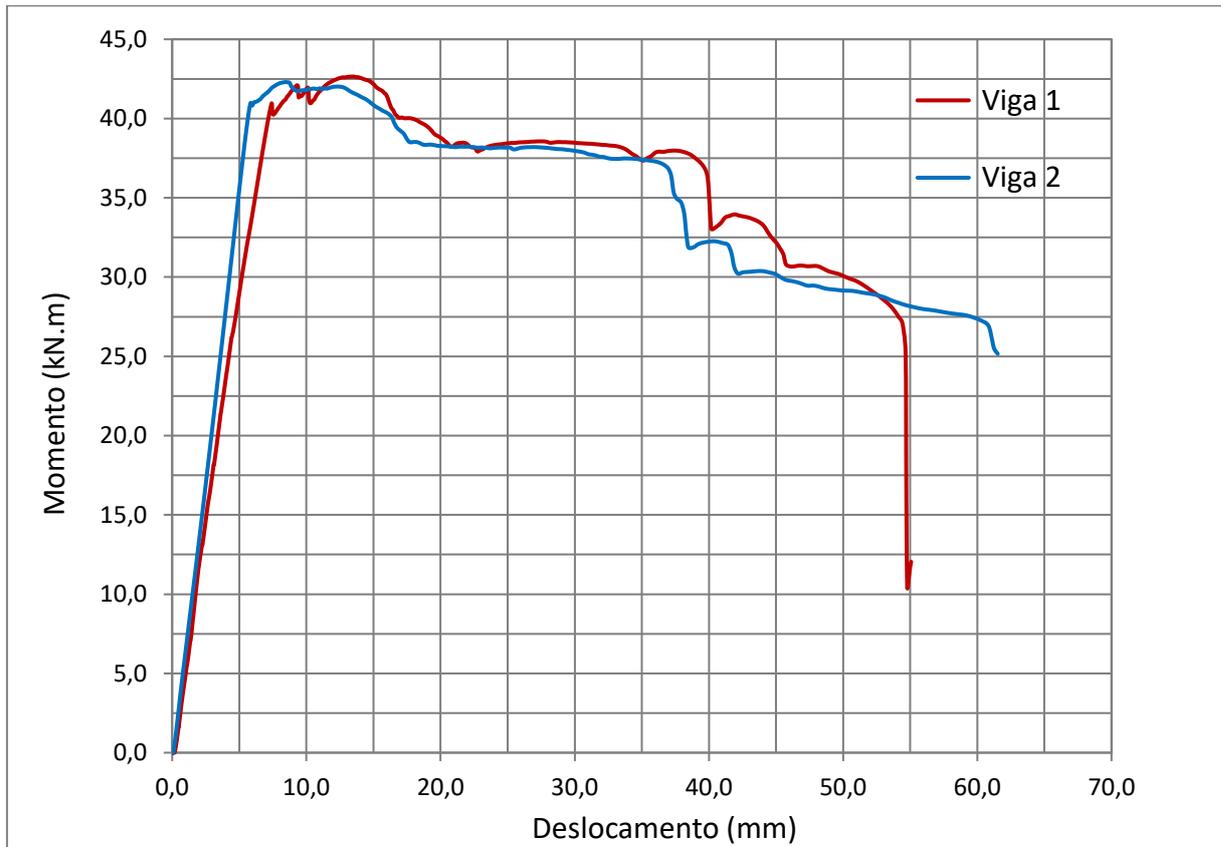
O diagrama da Figura 63 apresenta as forças aplicadas e os deslocamentos gerados, desde o início da aplicação das cargas até a ruptura dos modelos, ocorrida por flexão.

Figura 63 - Diagrama de força x deslocamento dos modelos em concreto armado ensaiados



Fonte: O autor.

Para gerar o diagrama da Figura 64, que é a tensão pelo deslocamento das vigas, os valores de força apresentados anteriormente foram multiplicados por 40 cm, que é a distância da aplicação da carga até o apoio.

Figura 64 - Diagrama de momento fletor x deslocamento dos modelos

Fonte: O autor.

Desta forma, pode-se constatar que o momento fletor máximo suportado pela Viga 1 foi de 42,64 kN.m, com um valor de flecha máxima de 55,066 mm. E a Viga 2 resistiu a 42,32 kN.m de momento fletor, que provocou um deslocamento máximo de 61,522 mm.

A Figura 65 mostra como ficou a Viga 1 após a aplicação das cargas até a ruptura.

Figura 65 - Viga 1 após a ruína com a aplicação das cargas



Fonte: O autor.

É possível constatar que o tipo de ruptura foi de flexão, já que ocorreu o esmagamento da biela de compressão, no centro de aplicação das cargas, localizada na metade do vão da viga, conforme Figura 66.

Figura 66 - Visualização do esmagamento da biela de compressão na Viga 1



Fonte: O autor.

A fotografia a seguir apresenta o detalhe referente à abertura de fissuras ocorridas na zona de tração da Viga 1, localizadas na parte inferior do modelo ensaiado.

Figura 67 - Detalhe das fissuras na zona de tração da Viga 1



Fonte: O autor.

Em relação à segunda viga ensaiada, foi possível perceber que houve o início de fissuração com a aplicação de 8000 kgf, como já mencionado no Item 4.4. Após a continuação da aplicação de cargas sobre a viga, ocorreu a ruptura, como é constatado nas fotografias que seguem.

Figura 68 - Viga 2 após a ruína do modelo



Fonte: O autor.

Figura 69 - Perspectiva da outra extremidade da Viga 2



Fonte: O autor.

Houve a remoção dos perfis metálicos sobre o modelo e foi feita a desinstalação dos *strain gauges*, como mostra a Figura 70.

Figura 70 - Viga 2 após a remoção dos equipamentos para aplicação de cargas



Fonte: O autor.

Por fim, é possível afirmar que ocorreu o mesmo tipo de ruptura à flexão em ambas as vigas sujeitas às cargas verticais de compressão, onde surgiu a abertura de fissuras na parte central do vão até que houvesse a perda de estabilidade da estrutura feita em concreto armado. Os resultados foram satisfatórios e esperados, já que se tratavam de modelos confeccionados com as mesmas características, tanto dos materiais para a mistura do concreto como a quantidade de armaduras utilizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica de extensometria elétrica está cada vez mais sendo utilizada nas áreas de engenharia, em medições de deformações nos mais variados tipos de materiais, através da transformação de variações mecânicas em variações equivalentes da resistência elétrica dos sensores.

No mercado estão disponíveis vários fabricantes responsáveis pelo desenvolvimento dos *strain gauges* para medições diversas, além do aprimoramento de equipamentos e *softwares* especializados, que possibilitam monitoramento remoto ao longo do tempo e análise de vários sensores simultaneamente. Inclusive, as empresas divulgam tutoriais de manuseio dos programas e informativos com os cuidados necessários durante a instrumentação das estruturas a serem ensaiadas.

Através da pesquisa e da análise dos modelos de estruturas de concreto armado confeccionados utilizando *strain gauges*, constatou-se a importância do uso dos extensômetros elétricos na análise estrutural, por ser um método de medição de tensões não destrutivo e com alta precisão, mas que ainda possui potencial pouco explorado.

A elaboração do presente trabalho proporcionou o aprendizado sobre uma área não muito conhecida na engenharia civil, que reforça a importância da relação de outras áreas do conhecimento para o aperfeiçoamento contínuo de ambas.

Foi muito interessante realizar a confecção das vigas e ter conhecimento sobre a parte prática do trabalho, tendo a oportunidade de poder aplicar o conhecimento teórico obtido a partir das biografias disponíveis e das orientações dos fornecedores.

As medições realizadas nos modelos apresentaram bons resultados, assim como os ensaios complementares de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de provas, que obtiveram como média os valores de 31,09 MPa e 32,15 GPa, respectivamente. Aplicando-se a carga de compressão sobre duas das vigas, foram obtidos valores médios de 42,48 kN.m de momento fletor e 106,2 kN de força cortante.

Constatou-se que o modelo de confecção e ensaio das vigas empregadas para viabilizar o estudo proporcionou análises e resultados satisfatórios, sendo possível, portanto, a aplicação em medições reais de estruturas de concreto armado.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, José Milton de. Curso de concreto armado. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 303 p., v. 1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 2. ed., corr.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 8522: Concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformações à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 16697: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR NM 67: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro, 1998.

BARRETO JÚNIOR, Euler. Extensometria: manual prático. São Paulo: [s.n.], 1998. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAROQAK/extensometria-manual-pratico>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Notas de aula: fundamentos do concreto armado. São Paulo: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.

EXCEL. Extensômetros coláveis de resistência elétrica: acessórios para extensometria. São Paulo: Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda, 2013.

_____. Extensômetros: informações técnicas. São Paulo: Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda, 2013.

GALLINA, Renato. Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências. 2003. 75 f. Monografia (Pós-Graduação *Lato Sensu* em Mecatrônica) - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2003.

GRANTE. Apostila de Extensometria. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Disponível em: <<http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*) *Test and Measurement GmbH*. Disponível em: <<http://www.hbm.com/pt/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

_____. *Strain gauges: first choice for strain measurements*. São Paulo: *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, 2018.

KYOWA. *Strain gages*. Japão: *Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.*, 2018.

_____. *What's a strain gage? Introduction to strain gages*. Japão: *Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.*, 2014.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. Curso básico de concreto armado: conforme NBR 6118/2014. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2015.

ROSA, Edison da. Curso análise experimental de tensões: extensometria. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

WEBER, Albano Luiz. Metrologia e Instrumentação. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2008. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2018.

ANEXO A – Pré-dimensionamento dos modelos de vigas de concreto armado para análise estrutural

Os cálculos a seguir se referem ao pré-dimensionamento dos modelos de concreto.

a) Especificações para o pré-dimensionamento:

Concreto 25 MPa ($f_{ck} = 2,5 \text{ kN/cm}^2$)

Aço CA50 ($f_{yk} = 50 \text{ kN/cm}^2$)

$b_w = 14 \text{ cm}$

$h = 25 \text{ cm}$

$d_{\text{real}} = 22 \text{ cm}$

$c = 2,5 \text{ cm}$

$A_{s,\text{inf}} = 2 \text{ } \varnothing 10,0 \text{ mm}$

$A_{s,\text{sup}} = 2 \text{ } \varnothing 6,3 \text{ mm}$

$\gamma_c = 1,4$

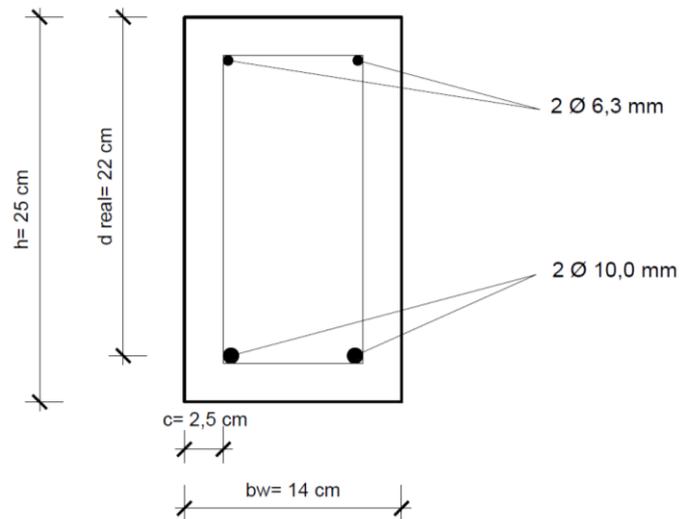
$\gamma_s = 1,15$

$A_s \text{ } \varnothing 10,0 \text{ mm} = 0,785 \text{ cm}^2$

$A_s \text{ } \varnothing 5,0 \text{ mm} = 0,196 \text{ cm}^2$

A imagem abaixo representa a seção transversal das vigas, com algumas das especificações citadas anteriormente para facilitar o entendimento.

Figura 71 - Seção transversal da viga



Fonte: O autor.

b) Equações pertinentes:

- Resistência à compressão do concreto:

$$R_{cc} = 0,68 \times X \times b_w \times f_{cd} \quad (23)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (24)$$

- Resistência à tração do aço:

$$R_{st} = f_{yd} \times A_s \quad (25)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (26)$$

- Equilíbrio de forças:

Considerando-se um equilíbrio de forças, R_{cc} é igual a R_{st} , e faz-se uma associação das equações acima, chegando-se na equação a seguir.

$$0,68 \times X \times b_w \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \times A_s \quad (27)$$

$$0,68 \times X \times 14 \text{ cm} \times \frac{2,5 \text{ kN/cm}^2}{1,4} = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} \times (2 \times 0,785 \text{ cm}^2)$$

$$X = 4,015 \text{ cm}$$

$$\frac{x}{d} = \frac{4,015 \text{ cm}}{22 \text{ cm}} = 0,1825 \leq 0,45$$

- Equilíbrio de momentos fletores:

Existem duas equações para o equilíbrio de momentos fletores, como é apresentado a seguir:

$$M_d = f_{yd} \times A_s \times (d - 0,4 \times X) \quad (28)$$

$$M_d = 0,68 \times b_w \times f_{cd} \times (d - 0,4 \times X) \quad (29)$$

Substituindo-se os valores na Equação 28, têm-se:

$$M_d = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} \times (2 \times 0,785) \times (22 - 0,4 \times 4,015) = 1392,1678 \text{ kN} \times \text{cm}$$

$$M_k = \frac{M_d}{\gamma_c} \quad (30)$$

$$M_k = \frac{1392,1678 \text{ kN} \times \text{cm}}{1,4} = 994,4056 \text{ kN} \times \text{cm}$$

A força cortante característica, encontra-se dividindo o momento característico pela distância entre as cargas aplicadas sobre a viga, que é 46,67 cm (um terço do vão de 1,40 m). Desta forma, chegam-se nos seguintes valores.

$$V_k = \frac{M_k}{d} \quad (31)$$

$$V_k = \frac{994,4056 \text{ kN} \times \text{cm}}{46,67 \text{ cm}} = 21,31 \text{ kN}$$

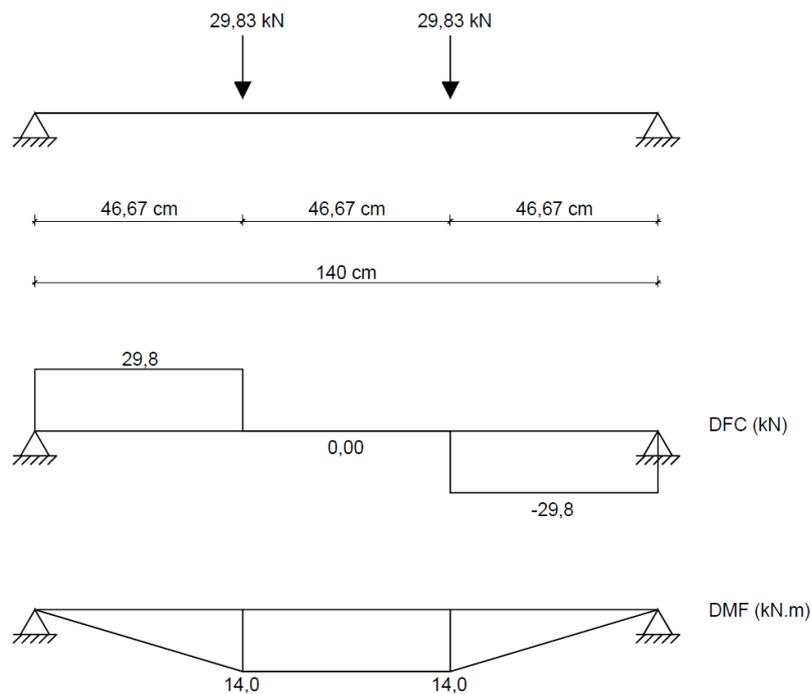
$$V_{sd} = V_k \times \gamma_c \quad (32)$$

$$V_{sd} = 21,31 \text{ kN} \times 1,4 = 29,83 \text{ kN}$$

c) Dimensionamento das armaduras:

Através dos cálculos realizados anteriormente, os diagramas de força cortante e momento fletor foram gerados, conforme a figura a seguir.

Figura 72 - Diagramas de força cortante e momento fletor



Fonte: O autor.

- Verificação do esmagamento da biela de compressão:

Para que não ocorra o esmagamento da biela de compressão, o seguinte critério deve ser obedecido.

$$V_{sd} \leq V_{rd2}$$

$$V_{rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \times f_{cd} \times b_w \times d \quad (33)$$

$$V_{rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{25 \text{ MPa}}{250}\right) \times \frac{2,5 \text{ kN/cm}^2}{1,4} \times 14 \text{ cm} \times 22 \text{ cm}$$

$$V_{rd2} = 133,65 \text{ kN}$$

É possível constatar que não há esmagamento da biela de compressão, pois a especificação exigida foi atendida.

- Área de aço para armadura transversal (estribos):

$$V_{sd} \leq V_{rd3}$$

$$V_{rd3} = V_c + V_{sw} \quad (34)$$

$$V_c = V_{co} = 0,6 \times f_{ctd} \times b_w \times d \quad (35)$$

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \times 0,3}{1,4} \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (36)$$

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \times 0,3}{1,4} \times (25)^{\frac{2}{3}} = 1,28 \text{ MPa} = 0,128 \text{ kN/cm}^2$$

$$V_c = 0,6 \times 0,128 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 14 \text{ cm} \times 22 \text{ cm} = 23,65 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (37)$$

$$V_{sw} = 29,83 \text{ kN} - 23,65 \text{ kN} = 6,18 \text{ kN}$$

$$\frac{A_{sw, 90}}{S} = \frac{V_{sw}}{39,2 \times d} \quad (38)$$

$$\frac{A_{sw, 90}}{S} = \frac{6,18 \text{ kN}}{39,2 \times 22 \text{ cm}} = 0,00717 \text{ cm}^2/\text{cm} = 0,717 \text{ cm}^2/\text{m}$$

- Armadura transversal mínima:

$$A_{sw, \text{mín}} = \frac{20 \times f_{ctm}}{f_{yk}} \times b_w \quad (39)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (40)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times (25)^{\frac{2}{3}} = 2,56 \text{ MPa} = 0,256 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{sw, \text{mín}} = \frac{20 \times 0,256 \text{ kN/cm}^2}{50} \times 14 \text{ cm} = 1,4336 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Utiliza-se o valor da área de aço mínima, pois foi o maior valor calculado. Foram escolhidos estribos com $\varnothing 5,0$ mm, mínimo estabelecido por norma e que atende à especificação de ser menor do que um décimo do valor de b_w .

$$n = \frac{A_{sw, \text{mín}}}{A_s \phi_t} \quad (41)$$

$$n = \frac{1,4336 \text{ cm}^2}{2 \times 0,196 \text{ cm}^2} = 3,66 \text{ estribos}$$

$$S = \frac{100}{n} \quad (42)$$

$$S = \frac{100}{n} = \frac{100}{3,66} = 27,35 \text{ cm} = 27 \text{ cm}$$

- Espaçamento entre estribos:

$$V_{sd} \leq 0,67 \times V_{rd2} \quad (43)$$

$$29,83 \text{ kN} \leq 0,67 \times 133,65 \text{ kN}$$

$$29,83 \text{ kN} < 89,54 \text{ kN}$$

Como a força cortante atende à especificação mostrada na Equação 43, a expressão a seguir se refere ao cálculo do espaçamento máximo entre os estribos.

$$S_{\text{máx}} = 0,6 \times d \leq 30 \text{ cm} \quad (44)$$

$$S_{\text{máx}} = 0,6 \times 22 \text{ cm} \leq 30 \text{ cm}$$

$$S_{\text{máx}} = 13,2 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$$

Sendo o espaçamento mínimo entre estribos 5 cm, para que seja possível o uso de vibrador durante a concretagem e o espaçamento máximo calculado de 13,2 cm, optou-se por adotar espaçamento de 13 cm em toda a extensão da viga, com

exceção dos dois primeiros estribos em ambas as extremidades, com 5 cm de espaçamento entre eles.

- Comprimento dos ganchos:

Para estribos a 90°, o comprimento mínimo dos ganchos segue a seguinte equação.

$$L_{\text{gancho}} = \frac{3 \times \varnothing t}{2} + \frac{\varnothing t}{2} + 7\text{cm} \quad (45)$$

$$L_{\text{gancho}} = \frac{3 \times 0,5 \text{ cm}}{2} + \frac{0,5 \text{ cm}}{2} + 7\text{cm} = 8 \text{ cm}$$

Já para as armaduras longitudinais, segue-se a Equação 46.

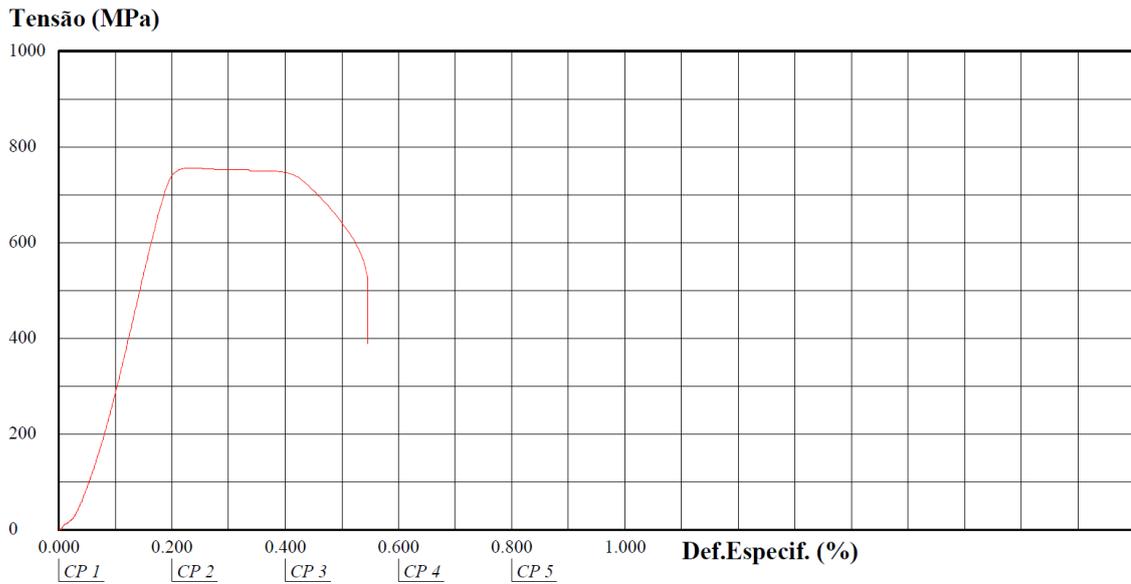
$$L_{\text{gancho}} = 12 \times \varnothing t \quad (46)$$

Os valores dos ganchos das barras longitudinais para as bitolas de Ø 6,3 mm e Ø 10,0 mm foi de 8 cm e 12 cm, respectivamente.

ANEXO B – Diagramas de tensão x deformação das barras de aço submetidas a ensaios de tração

B.1 – Barra de 5,0 mm (CP1)

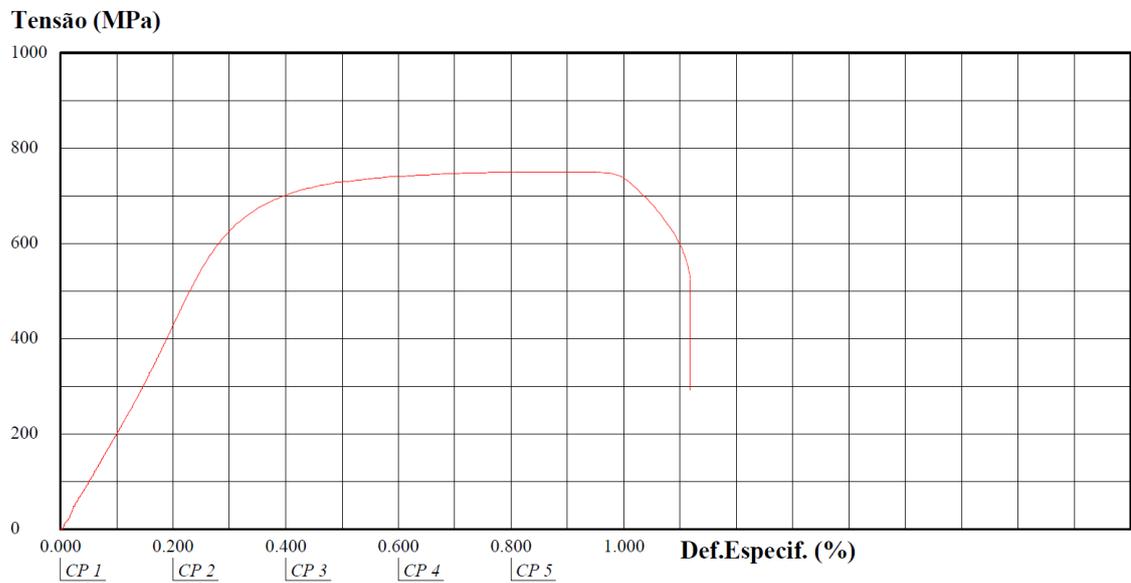
Figura 73 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP1)



Fonte: O autor.

B.2 – Barra de 5,0 mm (CP2)

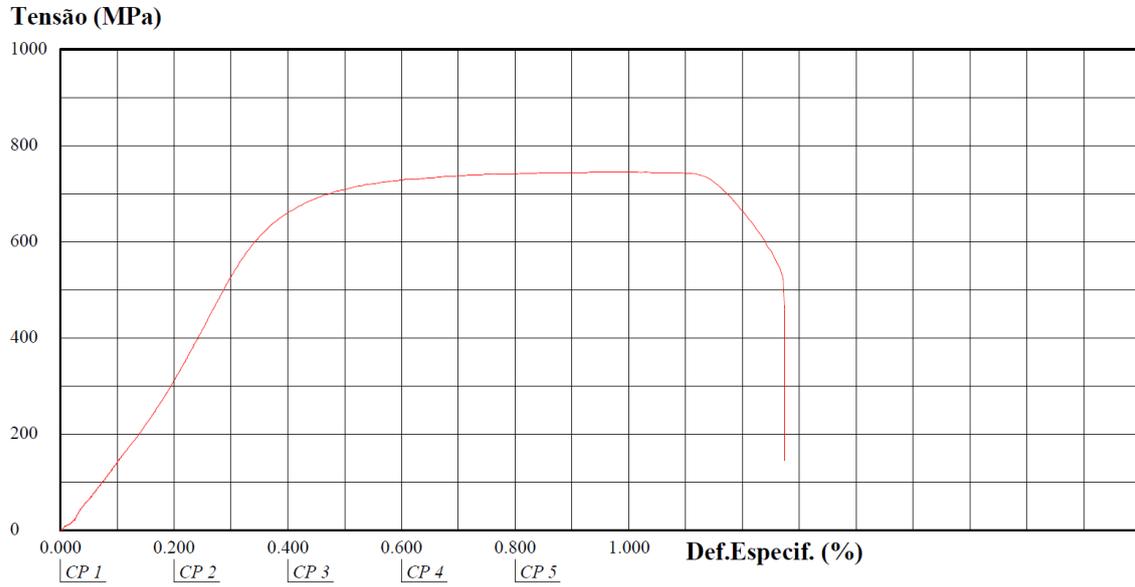
Figura 74 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP2)



Fonte: O autor.

B.3 – Barra de 5,0 mm (CP3)

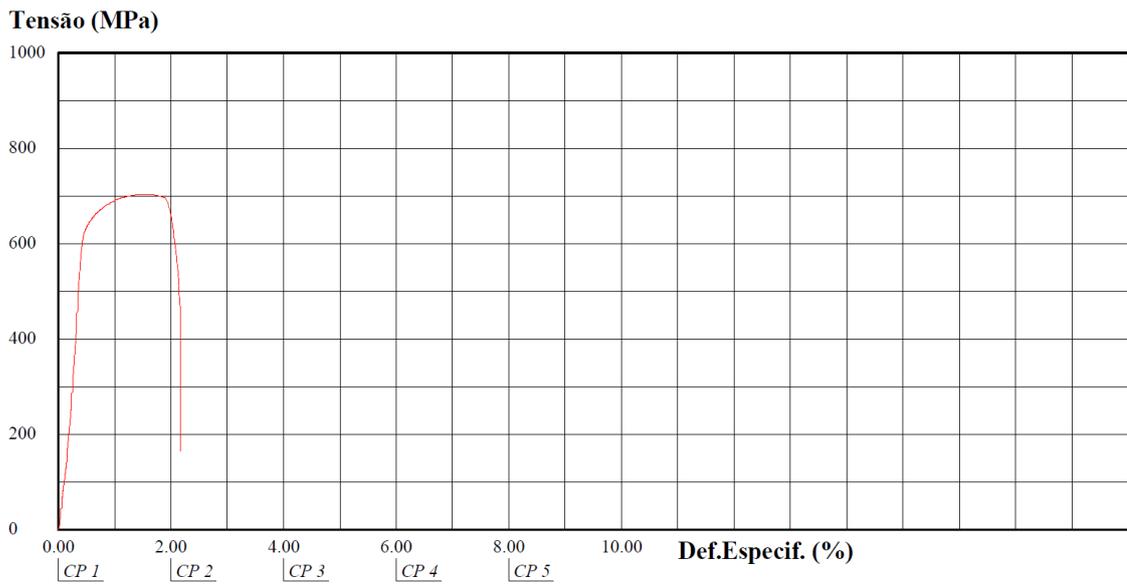
Figura 75 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 5,0 mm (CP3)



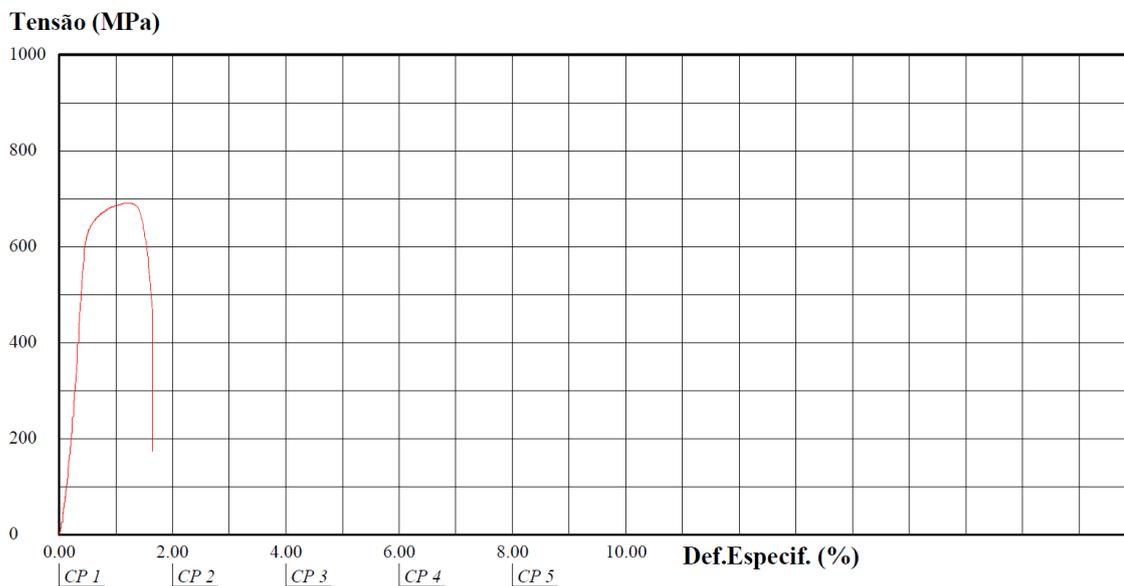
Fonte: O autor.

B.4 – Barra de 6,3 mm (CP1)

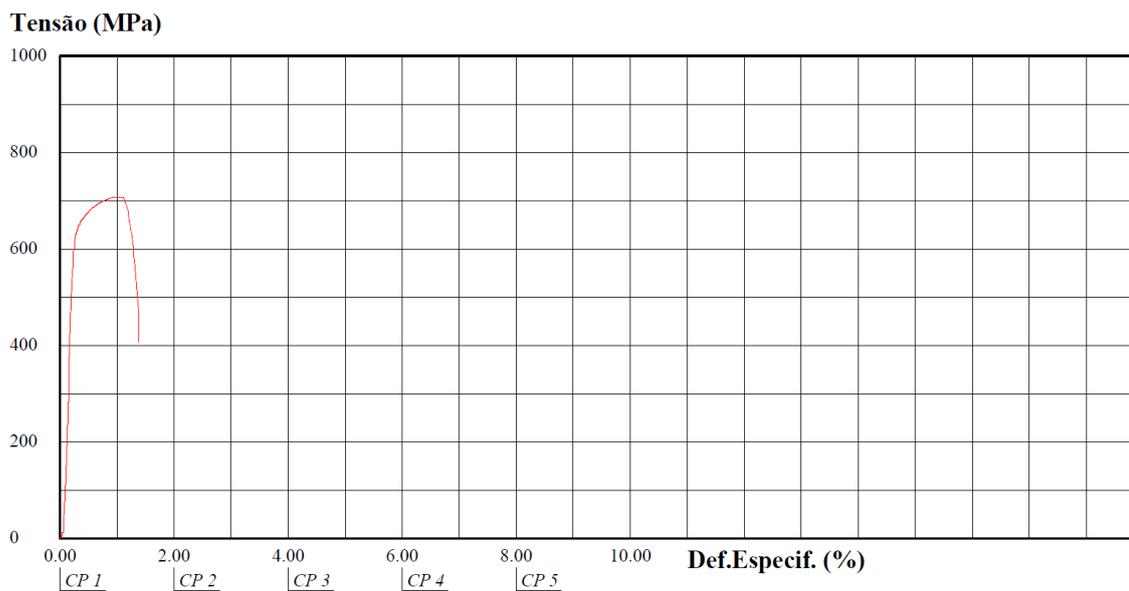
Figura 76 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP1)



Fonte: O autor.

B.5 – Barra de 6,3 mm (CP2)**Figura 77 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP2)**

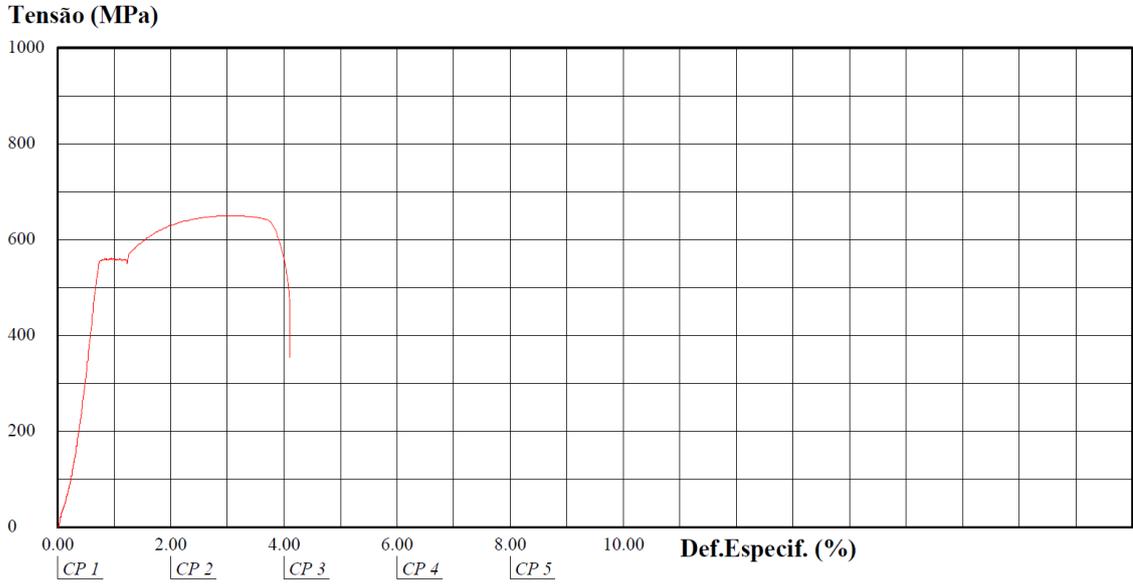
Fonte: O autor.

B.6 – Barra de 6,3 mm (CP3)**Figura 78 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 6,3 mm (CP3)**

Fonte: O autor.

B.7 – Barra de 10,0 mm (CP1)

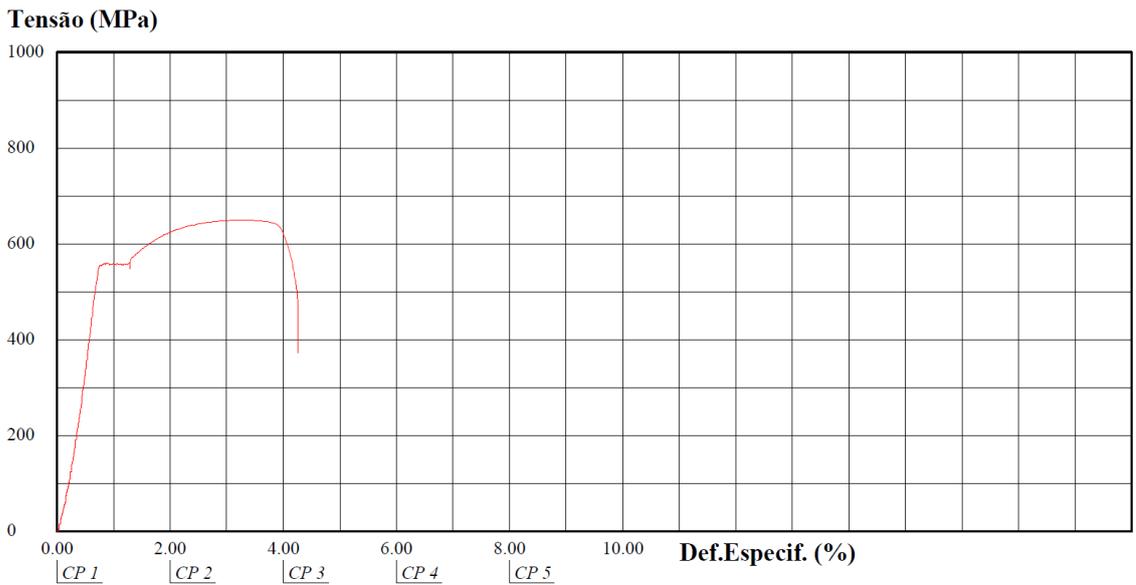
Figura 79 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP1)



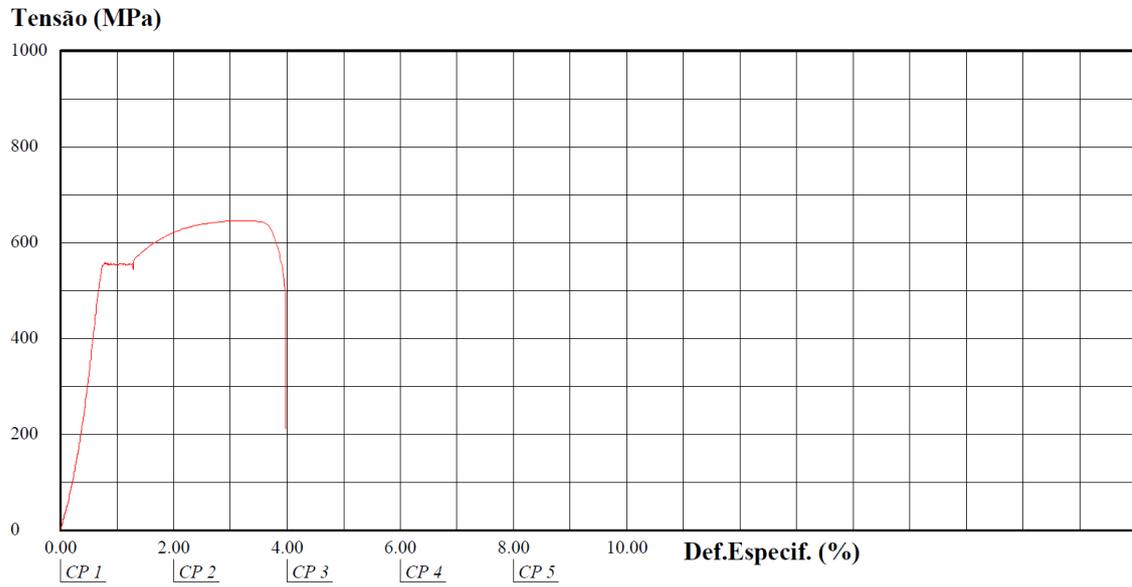
Fonte: O autor.

B.8 – Barra de 10,0 mm (CP2)

Figura 80 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP2)



Fonte: O autor.

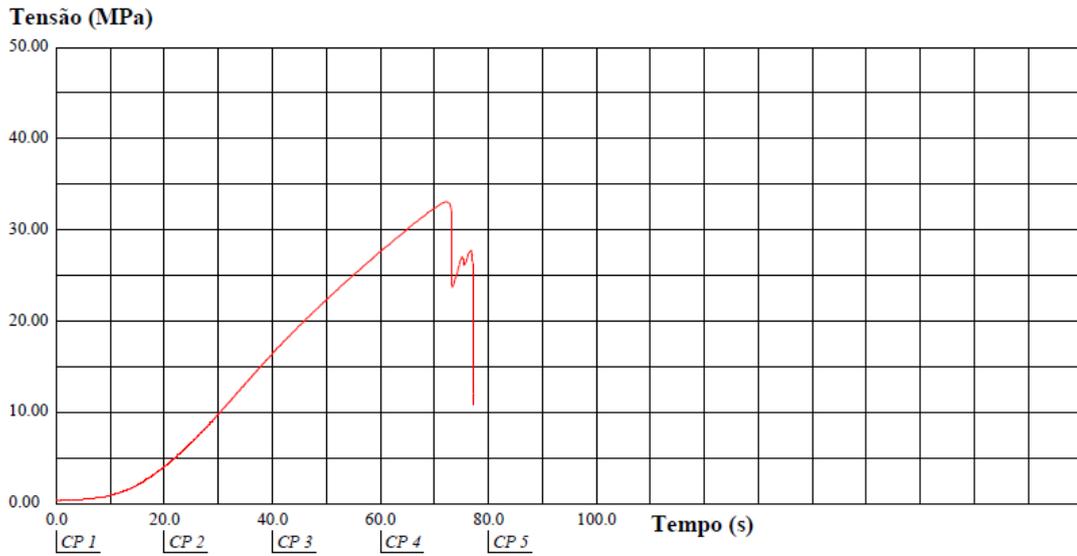
B.9 – Barra de 10,0 mm (CP3)**Figura 81 - Diagrama de tensão x deformação da barra de 10,0 mm (CP3)**

Fonte: O autor.

ANEXO C – Diagramas de tensão x tempo de realização dos ensaios de compressão dos corpos de prova

C.1 – Corpo de prova V1C1

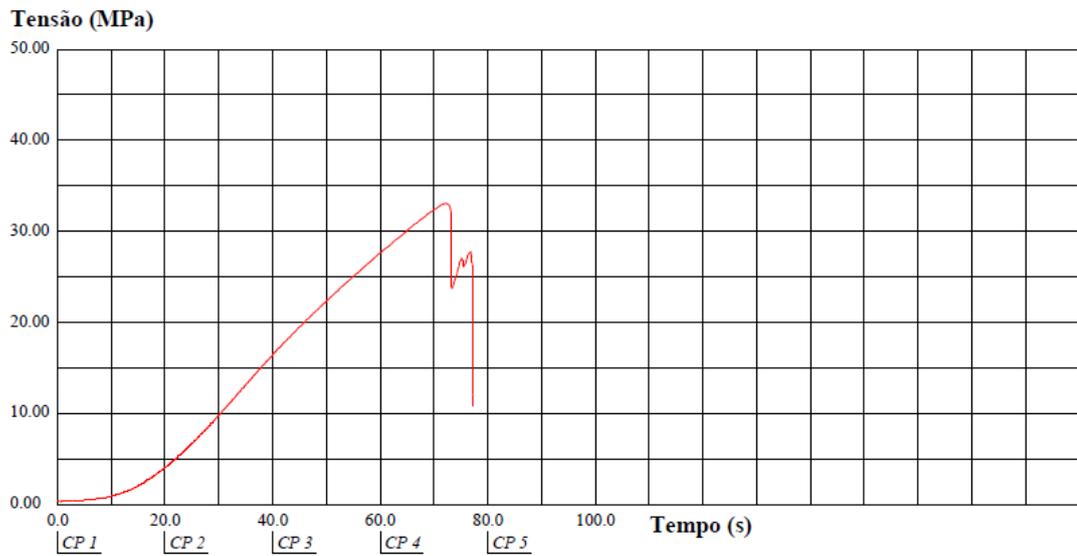
Figura 82 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V1C1



Fonte: O autor.

C.2 – Corpo de prova V1C2

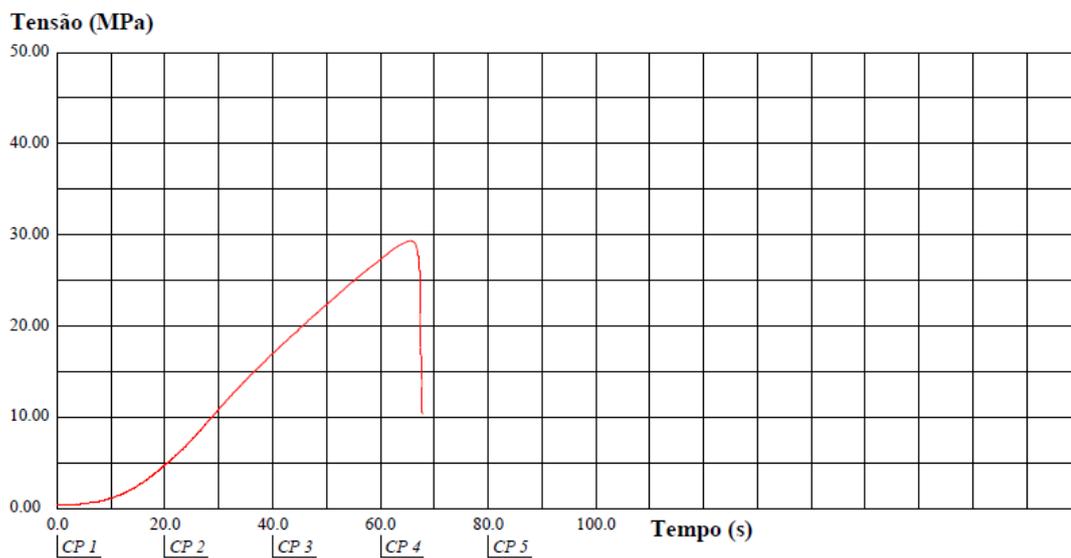
Figura 83 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V1C2



Fonte: O autor.

C.3 – Corpo de prova V2C1

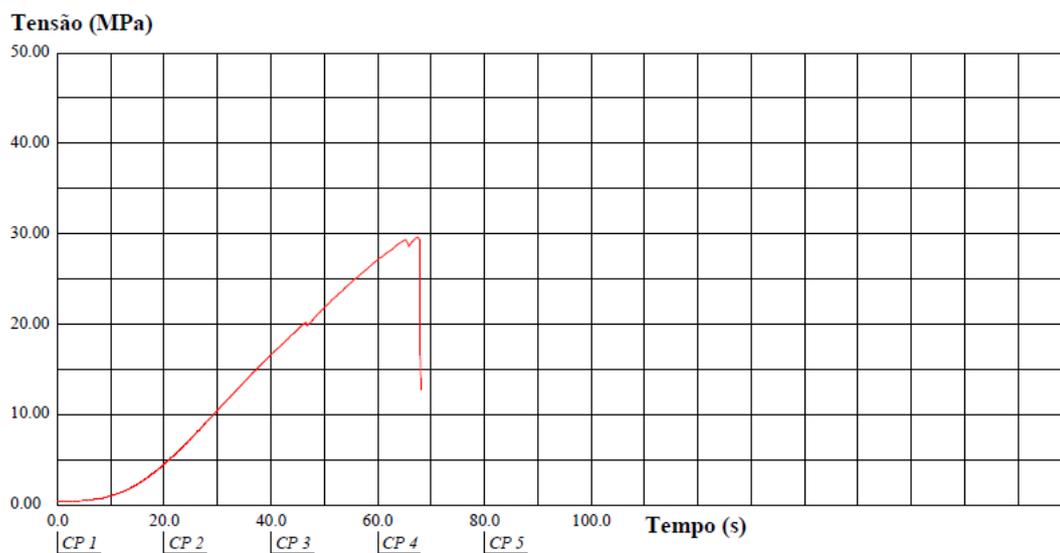
Figura 84 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C1



Fonte: O autor.

C.4 – Corpo de prova V2C2

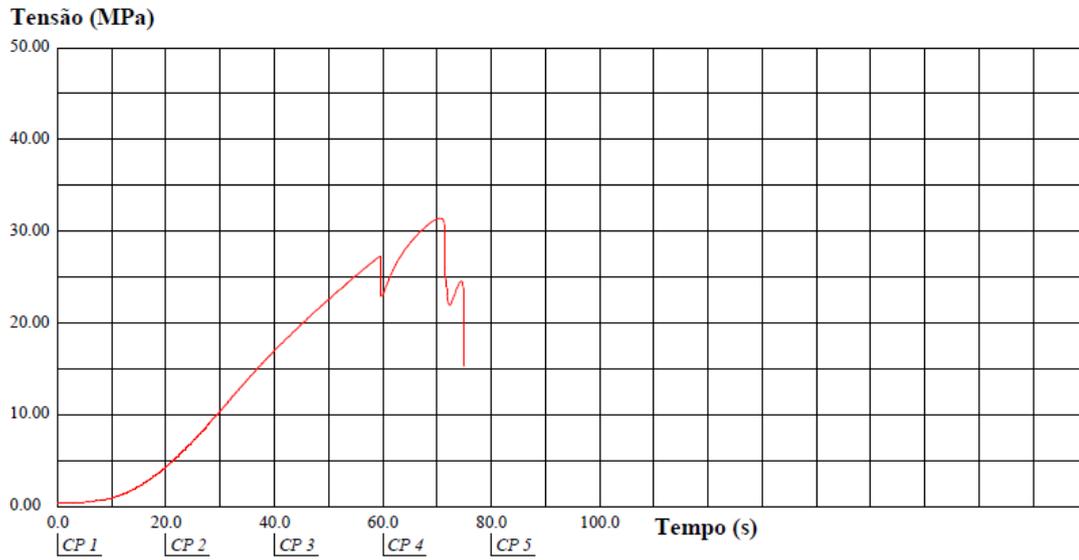
Figura 85 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C2



Fonte: O autor.

C.5 – Corpo de prova V2C3

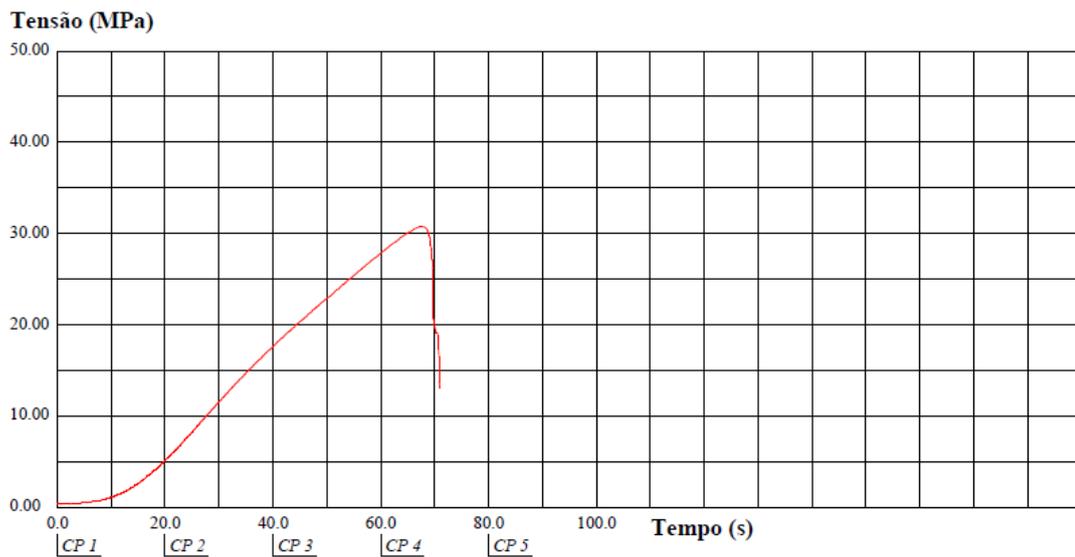
Figura 86 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C3



Fonte: O autor.

C.6 – Corpo de prova V2C4

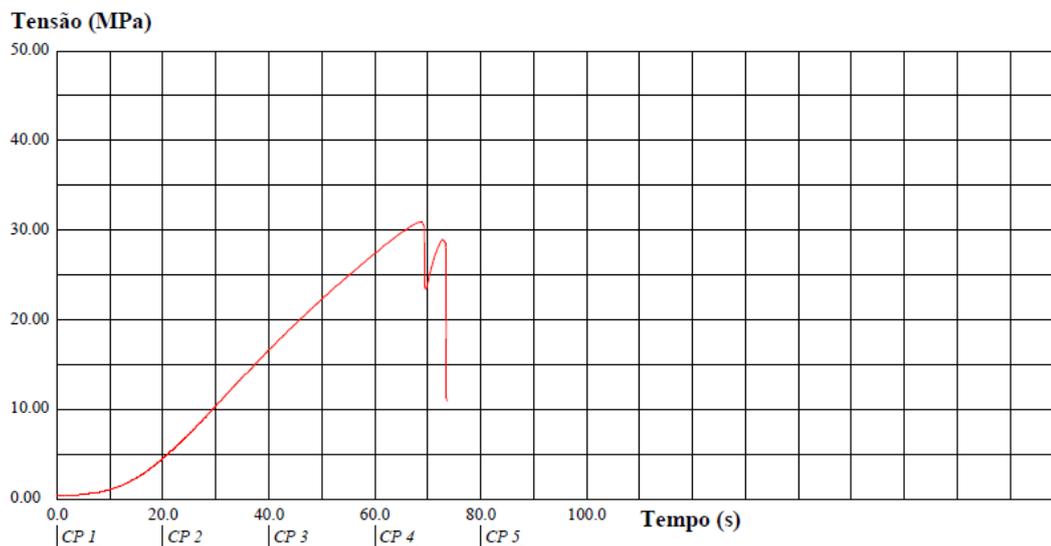
Figura 87 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V2C4



Fonte: O autor.

C.7 – Corpo de prova V3C1

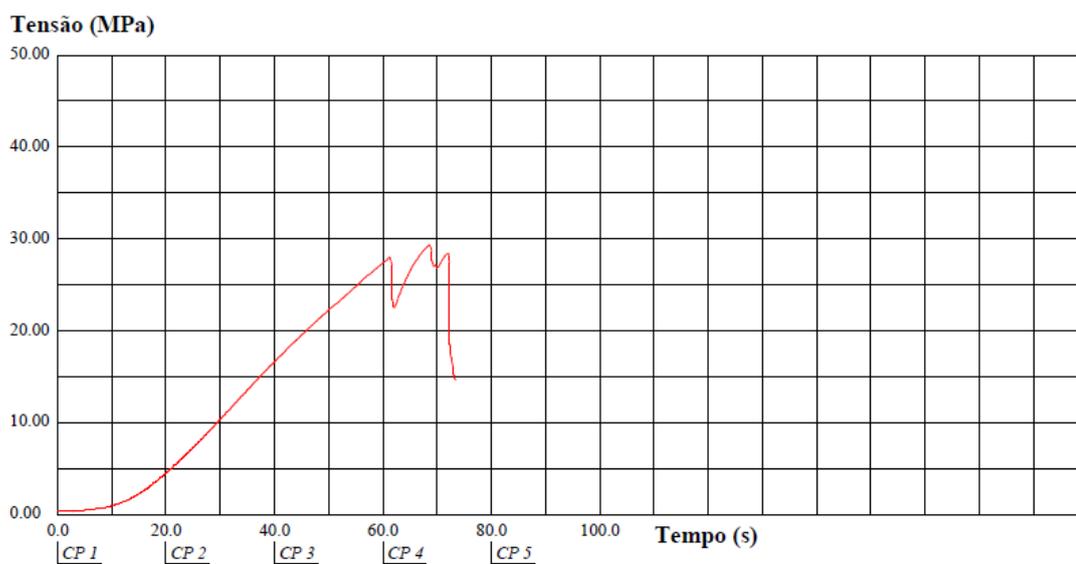
Figura 88 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C1



Fonte: O autor.

C.8 – Corpo de prova V3C2

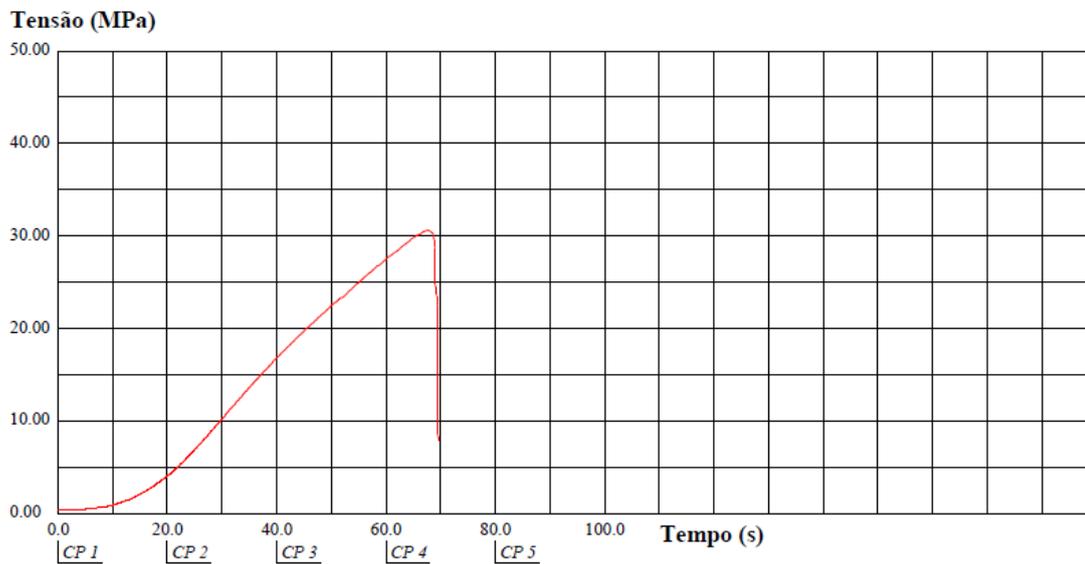
Figura 89 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C2



Fonte: O autor.

C.9 – Corpo de prova V3C3

Figura 90 - Diagrama de tensão x tempo de ensaio de V3C3



Fonte: O autor.