

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Douglas Sthéfanno de Sena Oliveira

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPONENTES
ESTRUTURAIS METÁLICOS DURANTE CARREGAMENTO DE CURTA
DURAÇÃO POR MEIO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES**

Belo Horizonte

Maio de 2018

Douglas Sthéfanno de Sena Oliveira

**Estudo do comportamento mecânico de componentes estruturais metálicos
durante carregamento de curta duração por meio da análise experimental de
tensões**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Prof. Dr. Nilton da Silva Maia

Prof. Dr. Luiz Leite da Silva

Belo Horizonte

Maio de 2018

Oliveira, Douglas Sthéfanno de Sena.
O48e Estudo do comportamento mecânico de componentes
estruturais metálicos durante carregamento de curta duração por
meio da análise experimental de tensões / Douglas Sthéfanno de
Sena Oliveira. – 2018.

132 f. : il., fotos, grafs., tabs.

Orientador: Nilton da Silva Maia

Coorientador: Luiz Leite da Silva

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.

Bibliografia.

1. Extensômetro. 2. Deformações e tensões - Análise. 3. Impacto
- Testes. 4. Dinâmica - Testes. 5. Materiais – Testes. I. Maia, Nilton
da Silva. II. Silva, Luiz Leite da. III. Título.

CDD: 620.11241



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
COMPONENTES ESTRUTURAIS METÁLICOS DURANTE
CARREGAMENTO DE CURTA DURAÇÃO POR MEIO DE
ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES”

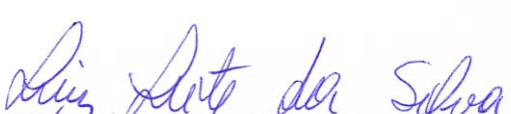
Autor: Douglas Sthéfanno de Sena Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



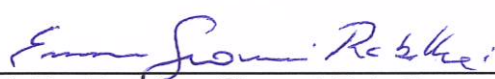
Prof. Dr. Nilton da Silva Maia (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Luiz Leite da Silva (COORDINADOR)
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN



Prof.ª Dr.ª Elaine Carballo Siqueira Corrêa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Emerson Giovani Rabello
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN

Belo Horizonte, 29 de Maio de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CEFET-MG, à CAPES, à FAPEMIG e à FINEP por proverem recursos diretamente ou indiretamente para o programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais, possibilitando o desenvolvimento do Projeto.

Agradeço ao CDTN pela parceria firmada, abrindo suas portas e me acolhendo como parte da equipe de pesquisadores, bem como provendo recursos experimentais e intelectuais para o desenvolvimento do Projeto.

Agradeço ao Prof. Orientador Dr. Nilton Maia pela dedicação e parceria intelectual ao longo de toda minha vida acadêmica e em especial neste Projeto, e ao Prof. coorientador Dr. Luiz Leite pela disponibilidade, confiança, transmissão de conhecimentos e por toda dedicação e acompanhamento para o desenvolvimento do Projeto.

Agradeço à Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela amizade, suporte e por me instigar motivação ao longo do Mestrado e ao Prof. Dr. Emerson Giovanni Rabello pela disponibilidade e presteza.

Agradeço à toda equipe do prédio 7 do CDTN que não mediram esforços para prestar qualquer auxílio solicitado, e especialmente ao técnico Vlamir Almeida, ao Msc. Antonio Juscelino, ao Dr. Rogério Mourão, ao Msc. Roger Ferreira, e ao técnico Nirlando Rocha.

O sábio nunca diz tudo que pensa, mas
pensa sempre tudo o que diz. (Aristóteles)

RESUMO

O estudo desenvolvido se insere no âmbito dos carregamentos dinâmicos dos materiais, que, em variadas situações, apresentam comportamento distinto em relação às solicitações estáticas, tornando-se necessária a adoção de procedimentos específicos e avaliações minuciosas caso a caso, pois existem inúmeras variáveis relacionadas, além do tempo de aplicação da carga ser curto. Valores superestimados de tensões mecânicas encontrados por meio da análise experimental por extensometria, em um teste de queda de um casco para armazenamento e transporte de combustíveis exauridos de um reator nuclear de pesquisa, instigaram a execução deste estudo de forma a compreender melhor os fenômenos e pormenores relacionados a resposta dos *strain gage* aos carregamentos de curta duração. Desse modo, verificou-se neste trabalho, por meio da análise experimental de tensões por extensometria, o nível de tensões mecânicas e o comportamento de um conjunto estrutural acoplado de barra e peso ao serem submetidos a diferentes magnitudes de esforços repentinos. O referido conjunto é constituído integralmente do mesmo material metálico, e verificou nos experimentos tanto a influência de condições experimentais de medição, quanto a influência de alguns parâmetros em situações de queda de peso. As avaliações principais demonstraram que o peso rebate no flange localizado na porção inferior da barra, ocasionando dois picos majoritários de tensão mecânica em ambos os componentes (barra e peso), dispostos em um curto intervalo de tempo, de ordem menor que 0,5 s. Além disso, percebeu-se experimentalmente em todas as fases, que, as tensões mecânicas na Barra, em sua grande maioria, foram maiores do que as tensões mecânicas no Peso, sendo as tensões nas seções reduzidas ainda maiores, expressando a possibilidade das seções reduzidas se comportarem como concentradores de tensão na estrutura da barra. O trabalho também revelou que, com os impactos sucessivos no decorrer das fases de testes, os terminais de ligação dos *strain gage* se descolam da superfície metálica em diversos pontos de medida, prejudicando ou eliminando a capacidade de medida destes sensores devido ao seu descolamento, e, conseqüentemente, conferindo aos cálculos os valores exacerbados de tensões, demonstrando a presença de certa relação com o ocorrido no protótipo do casco da fase preliminar de estudos.

Palavras-Chave: Extensometria, Comportamento Mecânico dos Materiais, Carregamento de Curta Duração.

ABSTRACT

The developed study falls within the scope of dynamic loading of materials, which, in various situations, present distinct behaviors in relation to static requests, being necessary to adopt specific procedures and detailed evaluations case-by-case, because there are many related variables, beyond the time of application of the load being very short. Overestimated values of mechanical stress, found using experimental stress analysis, in a drop test of a cask for storage and transportation of spent fuel from a nuclear research reactor, instigated the execution of this study, in order to better understand the phenomena and details related to the response of the strain gage to the short term loads. Thereby, it was verified in this work, by characterization of structural component and experimental stress analysis by strain gage, the level of mechanical stresses and the behavior of a coupled structural set of bar and weight, both made of the same metallic material, when subjected to different magnitudes of sudden efforts, so that both the influence of experimental measurement conditions and influence of some parameters in situations of drop weight were observed in the results. The initial evaluations showed that the weight rebound in the flange located in the lower portion of the bar, causing two major peaks of mechanical stress in both components (bar and weight) arranged in a short time interval, of order less than 0.5 s. Moreover, it can be seen in all phases that the mechanical stresses in the Bar are, for the most part, higher than the mechanical stresses in the Weight, with the stresses in the reduced sections being even greater, expressing the possibility of the reduced sections behaved stress concentrators in the bar structure. The work also revealed that, with successive impacts during the test phases, the strain gage partially released from the metal surface at various measurement points, damaging or eliminating the measurement capacity of these sensors due to its detachment, and, consequently, granting exacerbated values of mechanical stress, demonstrating the presence of certain relation with what happened in the cask prototype of the preliminary phase of studies.

Keywords: Experimental Stress Analysis, Mechanical Behavior of Materials, Short term loading.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Três níveis de impacto produzidos pela liberação de uma massa	23
Figura 2 - Representação do Ensaio de Impacto Charpy	26
Figura 3 - Representação do Experimento da Barra de Slipt-Hokinson.....	28
Figura 4 - Equilíbrio de deformações do Experimento da Barra de Hopkinson	30
Figura 5 - Experimento de Impacto de Queda de Peso em Barra	31
Figura 6 - <i>Strain gage</i> uniaxial	37
Figura 7 - Diversos tipos de <i>strain gage</i>	39
Figura 8 - Diagrama de Ishikawa para uma análise geral por extensometria	40
Figura 9 - Esquema do teste dinâmico em tigela de porcelana	42
Figura 10 - Influência do material e da espessura da amostra em Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado	44
Figura 11 - Influência da Posição do <i>strain gage</i> no sinal de carga para amostras de Alumínio 6061	45
Figura 12 - Carregamento estático para calibração do martelo	46
Figura 13 - Esquema da cadeia de medição na máquina de ensaios por meio de sensor personalizado	50
Figura 14 - Vista lateral do protótipo de casco.....	53
Figura 15 - Testes de validação postulados pela AIEA.....	54
Figura 16 - Protótipo após teste de queda de altura de 9m à 45°	55
Figura 17 - Protótipo com amortecedores preenchidos com Poliuretano	56
Figura 18 - Posições de instrumentação do casco	59
Figura 19 - <i>Strain gage</i> colados na superfície do Casco	59
Figura 20 - Protótipo do Casco em campo para o teste de queda.....	60
Figura 21 - Desenho técnico da barra objeto de estudo	61
Figura 22 - Amostra embutida a frio e atacada com Nital 3%.....	62
Figura 23 - Desenho do corpo de prova de Tração	63
Figura 24 - Ensaio de Tração.....	63
Figura 25 - Localização dos <i>strain gage</i> na barra em cada fase de estudo	65
Figura 26 - Localização dos <i>strain gage</i> no peso em cada fase de estudo.....	66
Figura 27 - <i>Strain gage</i> da 1ª fase no conjunto barra-peso	67
Figura 28 - <i>Strain gage</i> da 2ª e 3ª fase do conjunto barra-peso	68
Figura 29 - Montagem do Ensaio Dinâmico	70

Figura 30 - Módulos de aquisição de dados	71
Figura 31 - Condições experimentais da 1ª fase de testes	72
Figura 32 - Rosca na extremidade superior da barra	73
Figura 33 - Condicionador de sinais dos acelerômetros	73
Figura 34 - Condições experimentais da 2ª fase de teste	74
Figura 35 - Cordão de Solda da Barra na plataforma superior	75
Figura 36 - Acoplamento dos acelerômetros na barra e no peso	76
Figura 37 - Condições experimentais da 3ª fase de testes	77
Figura 38 - Afundamento do casco no amortecedor após o teste de queda	78
Figura 39 - Tensões máximas e mínimas: roseta inferior	80
Figura 40 - Tensões máximas e mínimas: roseta superior	81
Figura 41 - Fotomicrografias da amostra proveniente da barra de aço	83
Figura 42 - Curvas tensão-deformação para o aço AISI 1050	84
Figura 43 - Curvas de tensão teórica induzida x altura de queda	86
Figura 44 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas entre a seção reduzida superior e inferior	91
Figura 45 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGB1 inferior	93
Figura 46 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGP inferior	94
Figura 47 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGP superior	95
Figura 48 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas na RBC inferior	96
Figura 49 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas na RBC superior	97
Figura 50 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas no SGBC inferior	98
Figura 51 - Gráfico de comparação entre as tensões na seção completa e na seção reduzida para <i>strain gage</i> uniaxiais (2ª fase)	99
Figura 52 - Gráfico de comparação entre as tensões principais na seção reduzida (1ª fase) e na seção reduzida (3ª fase) para Rosetas Superiores	99
Figura 53 - Identificação visual dos <i>strain gage</i> nas Seções Reduzidas	101
Figura 54 - Identificação visual dos <i>strain gage</i> nas Seções Completas	102

Figura 55 - Identificação visual dos <i>strain gage</i> no Peso	103
Figura 56 - Falhas do terminal de ligação e do <i>strain gage</i> em um teste de barra de <i>Hopkinson</i>	104
Figura 57 - Condição ideal de ligação para evitar danos nos terminais de ligação	105
Figura 58 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 1ª fase.....	106
Figura 59 - Captura de tela do vídeo que revela o rebatimento do peso no flange	107
Figura 60 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 2ª fase.....	108
Figura 61 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 3ª fase.....	109
Figura 62 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 1ª fase.....	110
Figura 63 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 2ª fase.....	111
Figura 64 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 3ª fase.....	112
Figura 65 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – SGBC inferior	113
Figura 66 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo 250 mm	114
Figura 67 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo 500 mm	115
Figura 68 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo 250 mm	116
Figura 69 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo 1250 mm	117
Figura 70 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulos de fase x tempo 250 mm	118
Figura 71 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulos de fase x tempo 1250 mm	119
Figura 72 - Gráfico de tensões mecânicas x tempo – 1500 mm.....	120
Figura 73 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo 750 mm	121
Figura 74 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo – 1250 mm	122
Figura 75 - Gráfico de aceleração em relação ao tempo para queda de 250 mm	123
Figura 76 - Gráfico de aceleração em relação ao tempo para queda de 250 mm	123
Figura 77 - Sinal de aceleração em relação ao tempo para queda de 250 mm	124
Figura 78 - Sinal filtrado de aceleração em relação ao tempo para queda de 250mm.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas nominais do aço AISI 304.....	58
Tabela 2 - Resultados da análise química do material da barra.....	82
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas mensuradas a partir do ensaio de tração .	83
Tabela 4 - Tensões teóricas induzidas na seção Retangular	85
Tabela 5 - Tensões teóricas induzidas na Seção Cilíndrica	85
Tabela 6 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura (1ª fase de testes)	88
Tabela 7 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura (2ª fase de testes)	89
Tabela 8 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura (3ª fase de testes)	90
Tabela 9 - Razões de proporcionalidade entre as tensões mecânicas na Seção Reduzida e na Seção Completa	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de testes dinâmicos de acordo com a taxa de deformação	24
Quadro 2 - Siglas de identificação dos <i>strain gage</i>	64
Quadro 3 - Condições da 1ª fase de Testes de Queda	72
Quadro 4 - Condições da 2ª fase de Testes de Queda	74
Quadro 5 - Condições da 3ª fase de Testes de Queda	76
Quadro 6 - Cores de identificação das fases do experimento nos gráfico	87

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Velocidade de propagação do pulso na barra	29
Equação 2 - Equilíbrio de deformações no experimento de Hopkinson	30
Equação 3 - Cálculo da deformação no experimento de Hopkinson.....	30
Equação 4 - Cálculo da tensão no experimento de Hopkinson	30
Equação 5 - Equacionamento da energia potencial da massa em queda e energia de deformação da barra.....	33
Equação 6 - Alongamento máximo na barra devido a queda do peso	33
Equação 7 - Alongamento estático na barra devido ao peso.....	33
Equação 8 - Alongamento máximo na barra em função do alongamento estático	33
Equação 9 - Tensão máxima na barra devido a queda do peso.....	33
Equação 10 - Tensão máxima na barra em função da tensão estática	33
Equação 11 - Equacionamento da energia do peso P e uma carga axial fictícia N	33
Equação 12 - Equacionamento da energia do peso P e uma carga axial fictícia N em função de Tensão e Área.....	34
Equação 13 - Tensão Induzida na barra pela queda de um peso P	34
Equação 14 - Fator dinâmico.....	34
Equação 15 - Proporcionalidade entre carga dinâmica (F) e o peso (P)	35
Equação 16 - Fator dinâmico em função de propriedades e dimensão do componente.....	35
Equação 17 - Fator dinâmico em função de alongamento máximos e alongamento estático	36
Equação 18 - Fator de calibração de carga.....	44
Equação 19 - Tensão máxima na queda de peso em Barra.....	84

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AIEA = Agência Internacional de Energia Atômica

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

CDTN = Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CEFET-MG = Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

IPEN = Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

MTR = *Material testing reactors*

OBS = *Oriented Strand Board*

SAE = *Society Automotive Engineers*

SHPB = *Split-Hopkinson pressure bar*

TRIGA = *Training, Research, Isotopes, General Atomics*

SGB = *Strain gage* na seção reduzida da barra

SGBC = *Strain gage* na seção completa da barra

SGP = *Strain gage* no Peso

RB = Roseta na seção reduzida da Barra

RBC = Roseta na seção completa da Barra

RP = Roseta no Peso

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔR = Variação de resistência elétrica

ΔV = Variação de tensão elétrica

C_B = Velocidade de Propagação de onda em barra

E = Módulo de Elasticidade

E_B = Módulo de Elasticidade da Barra

ε_R = Pulso refletido

ε_T = Pulso transmitido

L_s = comprimento do corpo de prova

W ou P = Peso

$\Delta L_{MÁX}$ = Alongamento máximo

ΔL_{EST} = Alongamento estático

σ_{MAX} = Tensão máxima

σ_{EST} = Tensão estática

σ_{ind} = Tensão induzida na barra

$\emptyset$ = Fator dinâmico

ϵ_{cin} = Energia proveniente da aplicação dinâmica;

ϵ_{est} = Energia armazenada com a aplicação estática

C = Fator de Calibração

ΔF = Variação de Força

ΔV = Variação de Tensão Elétrica da Ponte de Wheatstone

R^2 = Coeficiente de Correlação / Determinação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Carregamentos estáticos e dinâmicos	22
3.1.1 Carregamentos de Impacto	25
3.1.1.1 Ensaio de Impacto: Charpy e Izod	26
3.1.1.2 Barra de Hopkinson	28
3.1.1.3 Impacto de queda de peso em barra	30
3.1.1.4 Fator dinâmico	34
3.2 Análise experimental de tensões	36
3.2.1 Procedimentos básicos para utilização da extensometria	38
3.3 Análise experimental de tensões em situações de impacto	41
3.3.1 Ensaio de Impacto Instrumentados	43
3.3.2 Componentes estruturais	47
3.3.3 Componentes para transporte e armazenamento de substâncias radioativas (Casco)	52
3.3.3.1 Panorama dos testes executados no protótipo desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear	54
4 MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1 Casco para transporte e armazenamento de substâncias radioativas (Experimento motivador)	58
4.1.1 Instrumentação do Casco	58
4.1.2 Teste de Queda do Casco	60
4.2 Conjunto barra-peso de aço (Experimento principal)	60
4.2.1 Caracterização da barra de aço	61
4.2.1.1 Análise Química	61
4.2.1.2 Análise Microestrutural	62
4.2.1.3 Ensaio de Tração	62
4.2.2 Instrumentação do conjunto Barra-Peso	64
4.2.2.1 Instrumentação da 1ª fase	66

4.2.2.2 Instrumentação da 2ª e 3ª fase	68
4.2.3 Experimento de queda de peso em barra de aço (Ensaio)	69
4.2.4 Montagem e condições em cada fase do experimento	71
4.2.4.1 Condições da 1ª fase de teste	71
4.2.4.2 Condições da 2ª fase de teste	74
4.2.4.3 Condições da 3ª fase de teste	76
5 RESULTADOS	78
5.1 Teste de queda do casco	78
5.2 Caracterização do Material da Barra	82
5.2.1 Análise Química	82
5.2.2 Análise Metalográfica	82
5.3.3 Ensaio de Tração	83
5.3 Teste de Impacto de queda de peso em barra	84
5.3.1 Cálculo Teórico	84
5.3.2 Análises de tendências das tensões mecânicas no conjunto barra-peso por extensometria (<i>strain gage</i>)	87
5.3.3 Identificação visual de danos na ligação dos <i>strain gage</i>	101
5.3.4 Análises das Tensões Mecânicas no intervalo de tempo de ensaio	106
5.3.4.1 SGB1 inferior	106
5.3.4.2 SGP inferior	110
5.3.4.3 SGBC inferior	112
5.3.4.4 RB superior	113
5.3.4.5 RBC superior	116
5.3.4.6 RBC inferior	117
5.3.5 Valores exacerbados de tensões mecânicas no decorrer do tempo	119
5.3.5.1 Valores exacerbados relacionado à falha visível do terminal e/ou dos <i>strain gage</i>	119
5.3.5.2 Valores exacerbados sem identificação de falha visível do terminal e do <i>strain gage</i> : RP (Roseta do Peso)	120
5.3.6 Análises do conjunto barra-peso por meio de acelerômetros	122
5.3.6.1 Teste preliminar de vibração da plataforma de sustentação	122
5.3.6.2 Análise da aceleração na barra na queda de 250mm	124
6 CONCLUSÕES	126
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
--	------------

1. INTRODUÇÃO

Os estudos e pesquisas no âmbito do comportamento dos materiais sob esforços de impacto tem ganhado cada vez mais ênfase, tanto em nível acadêmico, quanto em nível de pesquisa e desenvolvimento em grandes indústrias, como, por exemplo, na indústria automobilística, no estudo de componentes estruturais e no desenvolvimento de estruturas para armazenamento de transporte de substâncias com alto grau de periculosidade para o ser humano.

Para problemas que envolvem esforços estáticos existe uma expertise mais consolidada no âmbito da Engenharia, com uma gama maior de experimentos e de equipamentos que permitem fazer uma previsão do comportamento mecânico dos mais diversos materiais em diversas condições. No entanto, com relação aos estudos de impacto e de esforços dinâmicos em geral ainda há muito a se desenvolver, sendo que, a maioria dos estudos experimentais se baseiam em análises de tensões por extensometria, ainda com diversos pormenores a serem controlados e estudados, devido às variáveis complexas envolvidas neste tipo de solicitação.

Atualmente, a utilização de simulação numérica por meio de softwares específicos permite auxiliar na resolução de algumas dificuldades ainda presentes na análise experimental, porém, não substituem a análise real realizada diretamente no material de estudo, devido à dificuldade de reproduzir virtualmente algumas especificidades dos componentes, como propriedades e condições reais do material.

Haja vista o estado da arte, com a demanda da validação estrutural recomendada pela AIEA, de um casco de transporte de combustíveis irradiados produzido no CDTN, incitou-se o desenvolvimento de um Projeto que estudasse o comportamento da técnica da extensometria em um fenômeno de curto carregamento, principalmente pela dificuldade corriqueiramente relatada na literatura.

Desse modo, por meio da extensometria, avaliou-se o comportamento e os níveis de tensão mecânica em um conjunto desenvolvido de barra-peso de aço, quando submetido a diferentes níveis de impacto, pela queda do peso a partir de determinadas alturas. Além disso, pretendeu-se identificar a influência de parâmetros e

procedimentos inerentes ao estudo extensométrico nos resultados, com o intuito de compará-los aos comportamentos observados no teste de validação estrutural do casco (teste de queda).

Desse modo, essa pesquisa visou contribuir não somente para o estudo do comportamento do material e do componente específico, como também para a identificação de características e procedimentos que mais se adequam às análises nesse tipo de carregamento, vislumbrando o desenvolvimento de maior expertise para utilização da extensometria em ensaios dinâmicos com taxas de deformação consideráveis (impacto).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar o comportamento mecânico e o nível de tensões mecânicas de componentes estruturais metálicos submetidos a diferentes magnitudes de esforços repentinos de queda, avaliando a acurácia das técnicas de extensometria para análises experimentais com carregamentos de curta duração.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o comportamento mecânico e o nível de tensões mecânicas de um conjunto metálico barra-peso, em situação criada em laboratório, utilizando análise experimental via extensometria.
- Comparar o comportamento mecânico na seção reduzida da barra com relação à seção completa.
- Colaborar no entendimento dos pormenores e características relacionadas a técnica de medida (extensometria) no estudo dinâmico.
- Identificar visualmente comportamentos dos *strain gage* e das ligações de seus terminais, quando submetidos repetidamente a esforços de impacto, bem como analisar suas influências na percepção das deformações / tensões.
- Estabelecer analogias entre a análise experimental de tensões em um teste de queda único de um casco para armazenamento e transporte de combustíveis exauridos, e a análise no conjunto metálico barra-peso, de modo a comparar especificidades experimentais para a leitura de tensões e deformações atreladas a um carregamento de curta duração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Carregamentos estáticos e dinâmicos

Primeiramente, esclarece-se que, neste âmbito, um carregamento é definido como a ação de submeter uma estrutura, componente, ou material em geral à uma certa carga (força) mecânica. De acordo com Gere (2003), o principal objetivo da mecânica dos materiais é determinar as tensões, deformações e deslocamentos em estruturas e seus componentes devido à ação de cargas sobre eles. E, se fosse possível quantificar estas grandezas para todos os valores de cargas e situações, até mesmo as que causam falha, convergir-se-ia para uma noção completa do comportamento dos materiais.

Baseado no texto de Azevedo (2016), entende-se como carregamento estático todo carregamento em que a carga é aplicada gradativamente e permanece sem variações de intensidade ao longo do tempo. Além disso, para ser estacionária, tal força ou momento deve ser imutável em magnitude, em ponto(s) de aplicação e em direção. Uma carga estática pode produzir efeitos diversos, a depender das especificidades de aplicação, podendo ser uma tração axial ou compressão, uma carga de cisalhamento, uma carga de flexão, uma carga torcional, ou qualquer combinação dessas.

O comportamento dos materiais quando submetido a esforços dinâmicos tende a variar consideravelmente em relação ao comportamento estático dos mesmos. Silva Junior (1982) explana acerca desta variação de comportamento, considerando que, em linhas gerais, os esforços dinâmicos tendem a apresentar magnitudes bem maiores do que os mesmos correspondentes à solicitação estática.

A base da diferenciação entre as cargas estáticas e dinâmicas é a constância no decorrer do tempo, pois uma carga estática é aplicada lentamente, de forma que não cause nenhuma vibração ou efeito dinâmico na estrutura. (GERE, 2003; ALVES, 2009).

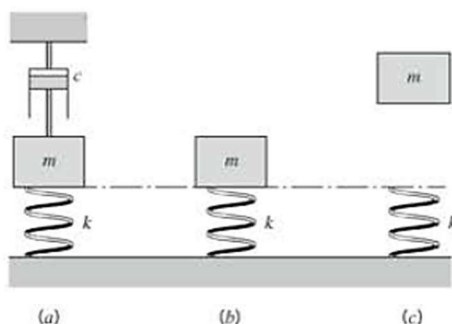
Clough e Penzien (1993) destacam ainda dois aspectos principais que diferenciam os carregamentos dinâmicos dos carregamentos estáticos: a possibilidade de mais de

uma solução para o problema dinâmico, pois, tanto o carregamento quanto a resposta da estrutura variam no tempo, e, a dependência das forças inerciais que se opõe as acelerações, em detrimento da dependência somente do carregamento imposto.

Di Blasi (1990) explica que os deslocamentos são efeitos diretos das cargas, e experimentam uma variação ao longo de um intervalo (dt) para atingirem um valor definitivo em t_0 . Quanto menor for o intervalo (dt) de aplicação da carga, maior a velocidade de propagação da carga, e mais brusco é o carregamento. Desse modo, uma carga que no instante de aplicação atinge seu valor final atua como verdadeira carga de impacto sobre o material, pois o intervalo (dt) tende a zero.

Juvinal e Marshek (2013) aprofundam-se mais e afirmam que o modo de se distinguir dois tipos de carregamentos é por meio da comparação entre o tempo utilizado na aplicação da carga e o período natural de vibração de um sistema-massa mola sem amortecimento. Esta abordagem pode parecer restrita, porém, é abrangente, porque todo material pode atuar como um sistema massa-mola, em seu regime elástico. A Figura 1 representa três níveis diferentes de carregamento de impacto pela liberação de uma massa.

Figura 1 – Três níveis de impacto produzidos pela liberação de uma massa



- (a) Impacto de peso com pressão adicional externa, (b) Impacto proveniente somente do efeito do próprio peso e (c) Impacto de queda de peso

Fonte: JUVINALL; MARSHEK, 2013, p. 149

O fenômeno principal que ocorre nestes casos é a vibração da massa, na direção longitudinal, a um intervalo de tempo constante entre ciclos consecutivos. Esse intervalo de tempo foi convencionado como sendo o período natural de vibração. E, conforme este excerto:

Se o tempo necessário para a aplicação da carga (isto é, para aumentá-la de zero até seu valor máximo) for maior do que três vezes o período natural, os efeitos dinâmicos podem ser desprezados e a hipótese de carregamento estático pode ser admitida. Se o tempo de carregamento for menor do que metade do período natural, definitivamente estará ocorrendo um impacto. Certamente, existe uma "região de indefinição" entre esses dois limites de tempo. (JUVINALL; MARSHEK, 2013, p. 149)

Outra abordagem utilizada para delimitar a classificação de testes estáticos e dinâmicos foi relatada por Meyers apud Alves (2009), definindo-se classes de testes comuns com relação a ordem de grandeza da taxa de deformação, conforme representado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação de testes dinâmicos de acordo com a taxa de deformação

Métodos comuns de testes	Taxa de deformação (s^{-1})
Alta velocidade de Impacto <i>Charpy e Izod</i> <i>Impacto de chapa normal</i> <i>Explosivos</i>	$10^7, 10^6, 10^5$
Dinâmica Alta <i>Anel de Expansão</i> <i>Barra de Hopkinson</i> <i>Teste de Taylor</i>	$10^4, 10^3$
Dinâmica Baixa <i>Máquinas hidráulica ou</i> <i>pneumática de alta velocidade</i>	$10^2, 10^1, 10^0$
Quase estático <i>Máquinas hidráulicas,</i> <i>servo-hidráulicas ou de parafuso</i>	$10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$
Fluência e Relaxamento de Tensões <i>Máquinas Convencionais de Ensaio</i>	$10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}, 10^{-9}$

Fonte: Meyers apud Alves, 2009, p. 32

Segundo ponderações expostas em Juvinal e Marshek (2013), as propriedades de resistência dos materiais geralmente variam com a velocidade de aplicação da carga, e correlatamente com a taxa de deformação. Em geral, essa variação se torna favorável, pois tanto o limite de escoamento quanto o limite de resistência tendem a

aumentar com a velocidade de aplicação do carregamento, porém, é importante ressaltar que um carregamento brusco tende a promover fratura frágil.

Alguns autores, como Gere (2003), estabelecem uma divisão de tipos de carga dinâmica, sendo que, algumas delas são aplicadas e removidas rapidamente (carga de impacto), e outras persistem por longos períodos de tempo e variam sua intensidade continuamente (cargas flutuantes). Cargas de impacto são produzidas, por exemplo, quando dois objetos se chocam ou quando um objeto em queda atinge uma estrutura. As cargas flutuantes são produzidas por maquinários em rotação, tráfego, corrente de vento, ondas de água, terremotos e processos de Manufatura.

3.1.1 Carregamentos de Impacto

Os carregamentos de Impacto podem causar diversas consequências em um material, do ponto de vista mecânico, pois a resposta do material com relação a um esforço brusco pode se pronunciar de diversas e variadas formas. Desse modo, os estudos nessa área têm se tornado cada vez mais frequentes, com o intuito de propor soluções específicas para situações que envolvam este tipo de solicitação. (GERE, 2003)

Ramesh (2008) acredita que as consequências de um esforço de impacto são tríplexes. Primeiramente, deve-se levar em consideração que, após um esforço de impacto, ondas de tensão ou ondas de choque se propagam dentro dos corpos impactados, e a propagação destas ondas deve ser estudada. Segundo, grandes deformações inelásticas podem ser desenvolvidas, principalmente em altas taxas de deformação. Terceiro, uma estrutura impactada é excitada pelo impacto, acarretando em disfunções estruturais e problemas de vibração, principalmente para longos tempos.

Como exemplo de situações possíveis nas quais podemos evidenciar um carregamento de impacto, pode-se citar: “A operação de equipamentos e componentes tais como bate-estacas e punções de corte, explosões, segurança em containers e, colisões entre meios de transporte, este último com crescente interesse devido ao aumento do número de acidentes” (ALVES, 2009, p. 26).

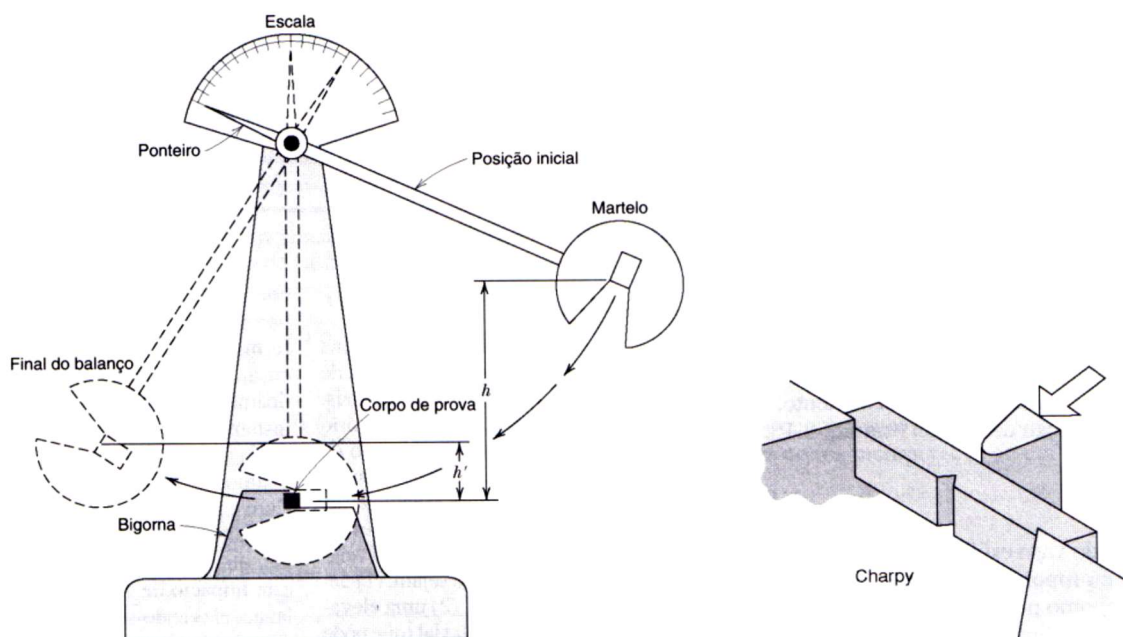
Além disso, pode-se destacar também a crescente análise de carregamentos de impacto em situações de queda, que tem abrangido desde quedas de pequenos componentes eletrônicos, até quedas de compartimentos robustos para o armazenamento de substâncias radioativas.

3.1.1.1 Ensaios de Impacto: Charpy e Izod

A partir do momento que se desenvolve um estudo sobre carregamentos de Impacto, instintivamente depara-se com os ensaios mais utilizados neste âmbito: Os ensaios Charpy e Izod.

O princípio utilizado nos dois ensaios é o mesmo, modificando-se somente a posição do entalhe no corpo de prova. No corpo de prova do Ensaio Charpy o entalhe é centralizado, pois o martelo colide no centro do mesmo, e, no corpo de prova do Ensaio Izod, o entalhe é descentralizado e o martelo colide na extremidade mais próxima do entalhe. As diferentes formas de entalhe são necessárias para possuírem versatilidade, de modo a assegurar a ruptura do corpo de prova, inclusive nos materiais mais dúcteis. A Figura 2 é uma representação do ensaio de impacto Charpy.

Figura 2 – Representação do Ensaio de Impacto Charpy



Fonte: CALLISTER, 2002

Estes ensaios destrutivos, que, a partir do uso da energia potencial de um martelo, deformam o corpo de prova até que ocorra sua falha, são considerados de alta taxa de deformação e configuram-se como um dos mais utilizados mundialmente. No entanto, existem restrições neste tipo de ensaio, que impedem a execução de um estudo mais aprofundado do comportamento do material submetido a altas taxas de deformação (KIST, 2014).

Ainda de acordo com Kist (2014), acredita-se que estas restrições estão relacionadas principalmente a dois problemas principais: pouca obtenção de informação útil para constituição da curva tensão-deformação de um evento de impacto, e baixo controle das condições as quais o corpo de prova é submetido (taxa de deformação, deformação, estado de tensões).

“Um ensaio de Charpy, por exemplo, pode produzir taxas de deformação de até 100/s, porém o dado obtido resulta apenas na energia absorvida até a falha do material, mas não uma curva tensão-deformação completa” (CHEN; SONG apud KIST, 2014, p. 1). Desse modo, estes ensaios são utilizados principalmente em uma avaliação semi-quantitativa da transição dúctil-frágil de determinado material com relação a uma variação de temperatura, ou, para mensurar a resistência à fratura dinâmica nos materiais através da energia local absorvida que culmine na fratura completa do corpo de prova. Entretanto, atualmente essa energia global não é muito utilizada quantitativamente, pelo fato de não se considerar vários fatores que interferem na resposta do ensaio (PASCHOALOTTO; MOREIRA; TOKIMATSU, 2007).

Por isso, a demanda por alternativas que permitam a possibilidade de obtenção das curvas tensão-deformação e de análises quantitativas nestes casos tem crescido cada vez mais. Uma alternativa que tem sido utilizada é o Ensaio Charpy Instrumentado, por meio da extensometria, que permite a medição real dos esforços no decorrer do tempo, contando-se ainda com uma gama maior de informações com respeito ao rompimento do corpo de prova.

Além disso, tem se destacado um ensaio mecânico que possibilita a obtenção das curvas tensão-deformação, sob condições controladas, a fim de obter-se as

propriedades dos materiais quando submetidos a altas velocidades de deformação. Este sistema é denominado de Barra de Hopkinson (Ramesh, 2008).

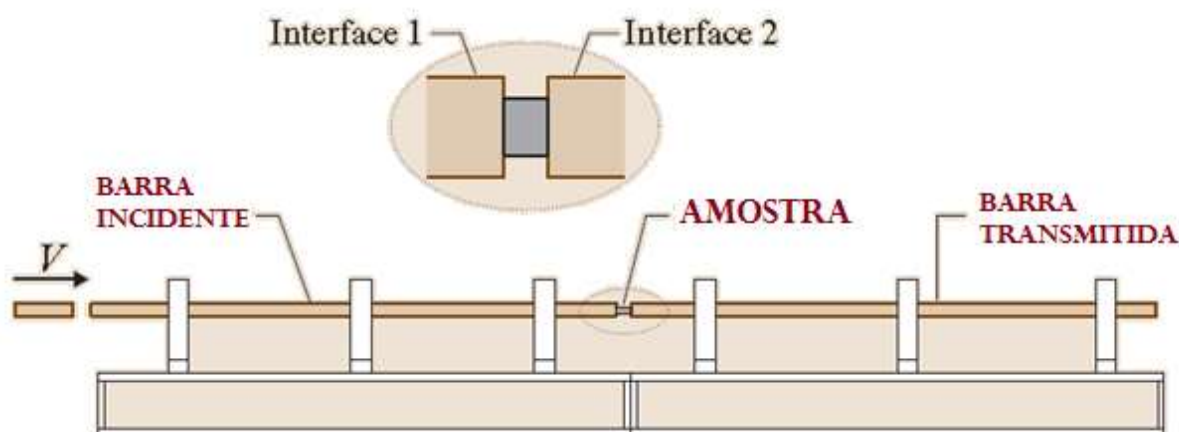
3.1.1.2 Barra de Hopkinson

O experimento pioneiro clássico no domínio das altas taxas de deformação, também denominado de *Kolsky Bar*, é mais comumente referenciado como Experimento de Barra de Pressão de *Slipt-Hopkinson* (*SHPB*, em inglês) e possibilita a determinação de propriedades mecânicas e comportamento de uma grande variedade de materiais, abrangendo as classes de metais, cerâmicas e polímeros (RAMESH, 2008).

Segundo Kist (2014), o que distingue o experimento de *Hopkinson* dos demais experimentos com altas velocidades de deformação é a possibilidade inerente de obtenção das curvas tensão-deformação, inclusive para várias taxas de deformação. Em contrapartida, em ensaios de impacto direto e de falha dinâmica, as informações coletadas são pontuais e se relacionam somente ao momento de ruptura do material.

O dispositivo ilustrado pela Figura 3 representa a configuração do experimento de Hopkinson que abrange a atuação de duas barras, de mesmo material, denominadas de barra incidente e barra transmitida. Entre as barras localiza-se a amostra de material a ser analisado, geralmente, de formato cilíndrico.

Figura 3 – Representação do Experimento da Barra de *Slipt-Hopkinson*



Fonte: RAMESH, 2008, p. 2

Conforme explanado em Ramesh (2008), as barras são desenvolvidas para permanecer somente no regime elástico durante o teste e, por isso, são compostas usualmente de materiais de alta resistência, com módulo de elasticidade muito alto e substancial tenacidade. Enquanto que, as amostras devem possuir comprimento bem menor do que as barras, e espera-se que desenvolvam deformações inelásticas (plásticas).

O teste propriamente dito ocorre por meio de uma colisão concêntrica de um projétil de velocidade V na barra incidente. Este projétil é confeccionado com material idêntico ao das barras, e, ao se chocar, promove a propagação do pulso compressivo resultante em direção à amostra, que reflete uma parte da onda, e transmite parte da onda para a barra transmitida (RAMESH, 2008; KIST, 2014).

“*Strain gage* são colocados sobre as barras, para medir os pulsos de onda incidente, refletido e transmitido, com os quais, por meio de relações matemáticas, obtém-se um diagrama tensão-deformação para cada taxa de deformação em análise.” (KIST, 2014, p. 3)

Conforme abordado por Kist (2014), o equacionamento matemático para construir as curvas tensão-deformação se baseia em relações de propagação de onda em sólidos, pois a velocidade de propagação do pulso na barra é diretamente proporcional à raiz do módulo de elasticidade da barra (E_B) e inversamente proporcional à raiz da massa específica da barra (ρ_B). Ou seja:

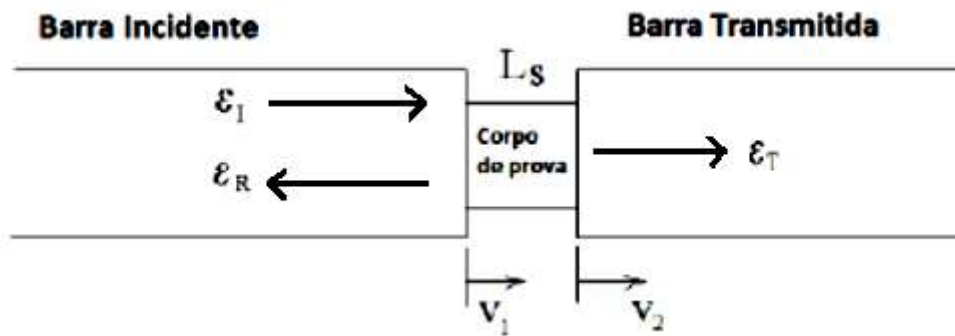
$$C_B = \sqrt{E_B} / \sqrt{\rho_B} \quad (1)$$

Considerando-se que há um equilíbrio de tensões no experimento, e que as ondas se propagam sem dispersão, é possível obter equações para a taxa de deformação, deformação e tensão na Barra de *Hopkinson*, a partir de um equacionamento das velocidades das partículas nas interfaces 1 e 2 da Figura 3 (v_1 e v_2) (RAMESH, 2008; KIST, 2014).

A partir de cálculos matemáticos, conforme figura 4, considerando-se o equilíbrio entre as deformações, as áreas de contato da interface e o comprimento do corpo de prova,

encontra-se as equações finais para o cálculo de taxa de deformação nominal, deformação nominal e tensão nominal. Sendo: C_B - Velocidade de propagação do pulso na barra, L_s - comprimento do corpo de prova, ε_R - pulso (deformação) refletido, ε_T - pulso (deformação) transmitido, t - tempo, A_B - Área da seção transversal da barra e A_S - Área da seção transversal do corpo de prova.

Figura 4 – Equilíbrio de deformações do Experimento da Barra de *Hopkinson*



Fonte: CHEN; SONG apud KIST, 2014, p. 4

As equações consequintes são referentes a deformações (ε) e tensões (σ) de engenharia (convencionais) e os esforços compressivos foram tomados como sendo de sinal positivo no equacionamento.

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_B}{L_s} \varepsilon_R \quad (2)$$

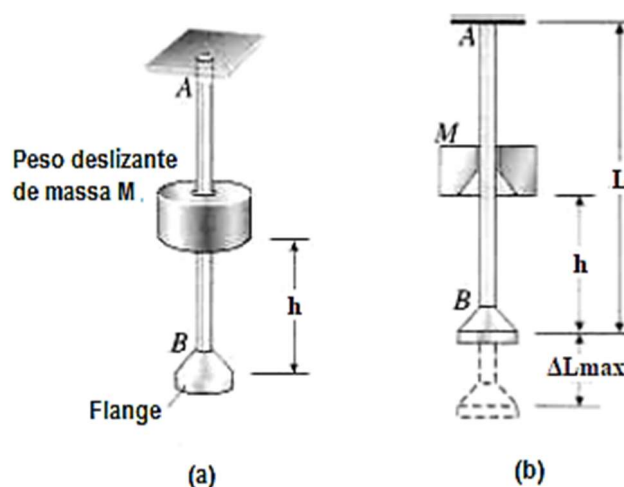
$$\varepsilon = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_S} E_B \varepsilon_T \quad (4)$$

3.1.1.3 Impacto de queda de peso em barra

O Impacto de queda de peso em uma barra cilíndrica é um exemplo significativo de como estruturas respondem as solicitações dinâmicas. Analisar-se-á o problema de um peso de massa M , inicialmente em repouso, que cai de uma altura h em um flange na extremidade inferior da barra AB , conforme Figura 5. (GERE, 2003)

Figura 5 – Representação do Experimento de Impacto de Queda de Peso em Barra



(a) Vista em perspectiva do peso deslizante na barra e (b) Vista em corte da montagem demonstrando a deformação máxima da barra

Fonte: GERE, 2003, p. 96, adaptada.

É necessário entender a resposta da barra a esse impacto e, para isso, este estudo é realizado considerando-se o estado de proporcionalidade entre tensões e deformações. (DI BLASI, 1990)

Nesta situação, quando a massa (M) é liberada de certa altura, esta atinge o flange em um intervalo de tempo bem pequeno, geralmente poucos milissegundos. Ao atingir o flange haverá um deslocamento da estrutura para baixo, atingindo-se a posição máxima. Após isso, a barra irá apresentar uma sequência infinitesimal de alongamentos e encurtamentos, caracterizando uma vibração longitudinal. Estas vibrações são similares a situações reais, como na atuação de uma mola qualquer, por exemplo, quando um indivíduo pula de *bungee jump*. Finalmente, as vibrações da barra cessam devido a efeitos de amortecimento e a barra fica em repouso com a massa M suportada pelo flange. (GERE, 2003)

Gere (2003) discorre sobre o fato de que a resposta da barra é bastante complicada, e, uma análise completa exige a utilização de técnicas matemáticas avançadas. A análise teórica aproximada deste problema é realizada utilizando-se os conceitos de transformação de energia no decorrer do evento, por meio de um conceito de energia de deformação, definida como a energia absorvida pela barra durante o processo de carregamento, proveniente do trabalho realizado pela carga, desde que não haja troca

de energia na forma de calor, além de várias considerações simplificadoras, nomeadamente:

- 1) o peso de massa M e o flange encaixam-se idealmente, ou seja, o peso não rebate;
- 2) desconsidera-se toda e qualquer perda de energia, assumindo que toda energia cinética da massa em queda é transformada em energia de deformação da barra.
- 3) desconsidera-se qualquer mudança de energia potencial da barra, devido aos movimentos verticais dos elementos da mesma.
- 4) desconsidera-se a existência de energia de deformação da barra devido ao seu próprio peso.
- 5) assume-se que as tensões na barra permanecem dentro do intervalo estático linear, ou seja, não ultrapassam o limite de escoamento.
- 6) as tensões são uniformes ao longo do volume da barra.

O balanceamento de energia que ocorre na situação real inclui a transformação de energia cinética do flange ao atingir a barra em energia de deformação, porém, com dissipação de energia na forma de calor e em deformações plásticas localizadas no sistema barra-peso.

No caso da consideração supracitada 1, sua aproximação da realidade será maior quanto maior for a massa do peso, em relação à massa da barra. As considerações 2, 3 e 4 surgem devido a predição intuitiva de grandes tensões na barra, tornando as perdas de energia e os efeitos recorrentes do peso da barra extremamente pequenos. A consideração 6 é idealística porque, na realidade, ocorre a propagação de ondas de tensão longitudinal que causam variações na distribuição de tensão.

Para estabelecer o cálculo teórico das tensões e deformações, Gere (2003) equaciona a perda de energia potencial da massa em queda para a máxima energia de deformação adquirida pela barra, sendo a variável " W ", o Peso da argola, e " A " a área da seção transversal da Barra. A Energia de deformação para um comportamento elástico linear é obtida da área do gráfico força-deslocamento, e neste caso, é igual a perda de energia potencial relativa ao tanto que o peso se move ($h + \Delta L_{MAX}$).

$$W \cdot (h + \Delta L_{MAX}) = \frac{E \cdot A \cdot \Delta L_{MAX}^2}{2L} \quad (5)$$

Esta equação é quadrática em ΔL_{MAX} , e, pode ser resolvida para a raiz positiva:

$$\Delta L_{MAX} = \frac{W \cdot L}{E \cdot A} + \left[\left(\frac{W \cdot L}{E \cdot A} \right)^2 + 2h \left(\frac{W \cdot L}{E \cdot A} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

Utiliza-se a notação ΔL_{EST} que seria o alongamento estático da barra devido ao peso da argola no regime elástico, para redimensionar a equação, culminando em:

$$\Delta L_{EST} = \frac{M \cdot g \cdot L}{E \cdot A} \quad (7)$$

$$\Delta L_{MAX} = \Delta L_{EST} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{\Delta L_{EST}} + 1 \right)^{1/2} \right] \quad (8)$$

A partir dessas equações é possível calcular a tensão máxima porque assume-se que a distribuição de tensão é uniforme ao longo do comprimento da barra, utilizando-se os valores de tensão estática (σ_{EST}), módulo de elasticidade (E) e comprimento da barra (L) e altura de queda (h):

$$\sigma_{MAX} = \frac{E \cdot \Delta L_{MAX}}{L} \quad (9)$$

$$\sigma_{MAX} = \sigma_{EST} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h \cdot E}{\sigma_{EST} \cdot L} + 1 \right)^{1/2} \right] \quad (10)$$

Di Blasi (1990) executa outra abordagem de cálculo, muito similar a apresentada por Gere (2003), pois também baseia-se no princípio da conservação de energia, de modo que a energia potencial de um peso P é utilizada por uma carga normal fictícia N, ou seja, estabelece-se que o impacto do peso pode ser interpretado como se tivesse sido ocasionado por uma carga axial fictícia.

Assim, pode-se determinar as seguintes equações:

$$P \cdot (h + \Delta L) = \frac{1}{2} F \cdot \Delta L \quad (11)$$

$$P \cdot (h + \Delta L) = \frac{1}{2} A \cdot \sigma \cdot \Delta L \quad (12)$$

$$\sigma_{ind} = \sqrt{\frac{2P(h + \Delta L)}{L \cdot A}}, \text{ sendo que: } \Delta L = \frac{\sigma_{ind} \cdot L}{E} \quad (13)$$

Ao verificar que as equações principais têm duas grandezas que devem ser determinadas, respectivamente, o alongamento (ΔL) e a tensão induzida na barra (σ_{ind}), Di Blasi (1990) promove a solução da indeterminação por meio da pré-fixação do valor da tensão, que não deve ultrapassar o limite de escoamento do material. Isso permite, além do cálculo do alongamento, o dimensionamento da seção transversal da barra. Porém, obviamente, outras análises podem ser feitas desde que se consiga realocar a indeterminação para somente uma grandeza.

O comprimento da barra, usualmente não importante para o dimensionamento de cargas estáticas, é bastante significativo no caso de cargas dinâmicas, e a resistência da peça cresce com o aumento do seu comprimento. Acredita-se que isto ocorre pois há maior distância para que as ondas de tensão se propaguem, além de maior possibilidade de dissipação das mesmas. (DI BLASI, 1990)

3.1.1.4 Fator dinâmico

Alguns autores estabelecem um conceito denominado fator dinâmico ou fator de impacto, que corresponde ao aumento nas tensões e deformação inerentes ao carregamento dinâmico, em comparação com um carregamento estático correlato.

A teoria exposta em Silva Junior (1982) executa um balanceamento de energias absorvidas quando a aplicação é estática em relação à aplicação dinâmica, culminando-se na seguinte fórmula geral do fator dinâmico:

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \frac{\epsilon_{cin}}{\epsilon_{est}}} \quad (14)$$

Sendo, ϵ_{cin} é a energia proveniente da aplicação dinâmica, e, ϵ_{est} é a energia que o corpo armazena com a aplicação estática e exclusiva da deformação.

Pode-se associar que a estrutura do material submetido ao impacto é representada por uma mola, visto que todas as estruturas possuem alguma flexibilidade, desse modo, os balanceamentos de energia exarados na seção anterior decorrem simplesmente de uma equalização da energia potencial de uma massa em queda à energia elástica absorvida por uma mola que obedece a Lei de Hooke. (JUVINAL; MARSHEK, 2013). Desse modo, após a resolução de equações quadráticas em ΔL_{MAX} percebe-se que há um elemento multiplicador (fator dinâmico) que estabelece a proporcionalidade entre a carga dinâmica (F) e o peso utilizado no impacto (P).

$$F = P. \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta L_{EST}}} \right) \quad (15)$$

Esta passagem esclarece o significado do fator de impacto em carregamentos dinâmicos axiais:

Como foi admitido que a estrutura (a mola) responde elasticamente ao impacto, a tensão gerada é proporcional à carga. O termo entre parênteses na [equação 15] é chamado *de fator de impacto*. Este é o fator pelo qual a carga, a tensão e o deslocamento causados pelo peso P , aplicado dinamicamente, excedem aqueles decorrentes da aplicação estática ou lenta do mesmo peso. (JUVINAL; MARSHEK, 2013, p. 151)

Para exemplificar e tornar mais palpável a grandeza fator dinâmico, aplicar-se-á a fórmula no caso relatado na seção 3.1.1.3, referente ao Impacto de queda de peso em barra. A energia proveniente da aplicação dinâmica é igual à energia potencial gravitacional que o peso perde ao cair (mgh), e a energia proveniente de aplicação estática correlata é igual a metade da carga multiplicada pelo alongamento da barra. (SILVA JUNIOR, 1982)

Após manipulações matemáticas e substituição de fórmulas base encontra-se:

$$\phi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2.E.A.h}{P.l}} \quad (16)$$

Na abordagem de Gere (2003) a fórmula do fator dinâmico é estabelecida já baseada nos alongamentos pré-dimensionados. Ou seja, os cálculos de equilíbrios de energia

são feitos anteriormente e o fator dinâmico se torna simplesmente a razão entre o alongamento máximo e o alongamento estático:

$$\text{Fator Dinâmico} = \Delta L_{MAX} / \Delta L_{EST}. \quad (17)$$

3.2 Análise Experimental de Tensões

Diversas técnicas de análise experimental de tensões e deformações apresentam utilização difundida tanto nos níveis de pesquisa quanto no monitoramento estrutural em situações reais, como por exemplo o monitoramento da deformação de pontes e viadutos. (DALLY; RILEY, 1991)

A extensometria se configura como uma técnica experimental utilizada para determinação das propriedades mecânicas tanto para materiais consolidados no mercado quanto para novos materiais. Além disso, sua aplicação principal é o acompanhamento do comportamento de componentes durante serviço. (MAIA, 1998 apud STIEF, 2009, p. 1)

Esse acompanhamento em serviço permite medir as deformações reais para as estruturas de interesse. Ou seja, por meio dessa técnica é possível aprimorar os modelos físicos e matemáticos que permitem descrever o comportamento das estruturas reais em operação. (STIEF, 2009)

Ou seja, segundo Maia (1998) apud Stief (2009, p. 8), uma vantagem diferencial da técnica de extensometria para análise experimental de tensões é o fato dos *strain gage* poderem ser instalados em estruturas que trabalham sob condições operacionais reais, de modo que as deformações medidas são as verdadeiras deformações atuantes durante o funcionamento da estrutura.

Dentre essas técnicas, a extensometria tem sido bastante utilizada, devido a qualidade dos resultados obtidos, versatilidade e uma razoável relação custo/benefício, e principalmente devido aos avanços nas demais áreas científicas, que agregaram valor no que se refere aos materiais e a constituição dos *strain gage*,

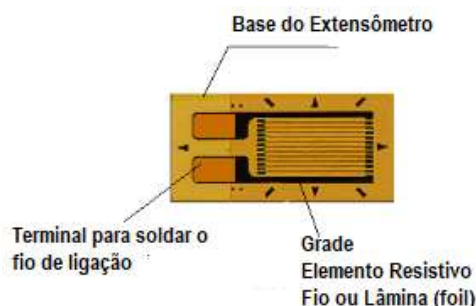
aos dispositivos eletrônicos associados e aos sistemas computacionais de coleta e análise de dados. (STIEF, 2009)

Todos esses artifícios convergem para que a técnica apresente alta precisão e eficácia nas medidas, maior facilidade de manipulação, além de possibilitar especificidade e variabilidade de análises por ser um método quantitativo, superficial, pontual e que pode ser utilizado em aplicações estáticas e dinâmicas. (CIONE, 2012; STIEF, 2009)

Os extensômetros elétricos de resistência, ou simplesmente *strain gage*, são dispositivos que ao serem acoplados em uma determinada peça ou componente estrutural permitem mensurar deformações nos mesmos, por meio de uma variação em sua dimensão (deformação) que acarreta uma variação de sua resistência elétrica.

Na Figura 6 representa-se um dos tipos mais utilizados de *strain gage*: O uniaxial.

Figura 6 - *Strain gage* uniaxial.



Fonte: ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004

A aplicabilidade dos *strain gage* é muito ampla, pois esses dispositivos apresentam alta correlação de medidas, versatilidade de tipos e especificidades, e, além disso, permitem o monitoramento até às cargas finais em ensaios destrutivos. Estes dispositivos permitem avaliar tensões e deformações em várias partes de uma estrutura em condições reais de operação sem que haja prejuízos para a mesma e, portanto, permitem uma análise quantitativa de tensões e deformações para os mais diversos tipos de carregamentos estáticos ou dinâmicos sob as mais diversas circunstâncias. (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

3.2.1 Procedimentos básicos para utilização da extensometria

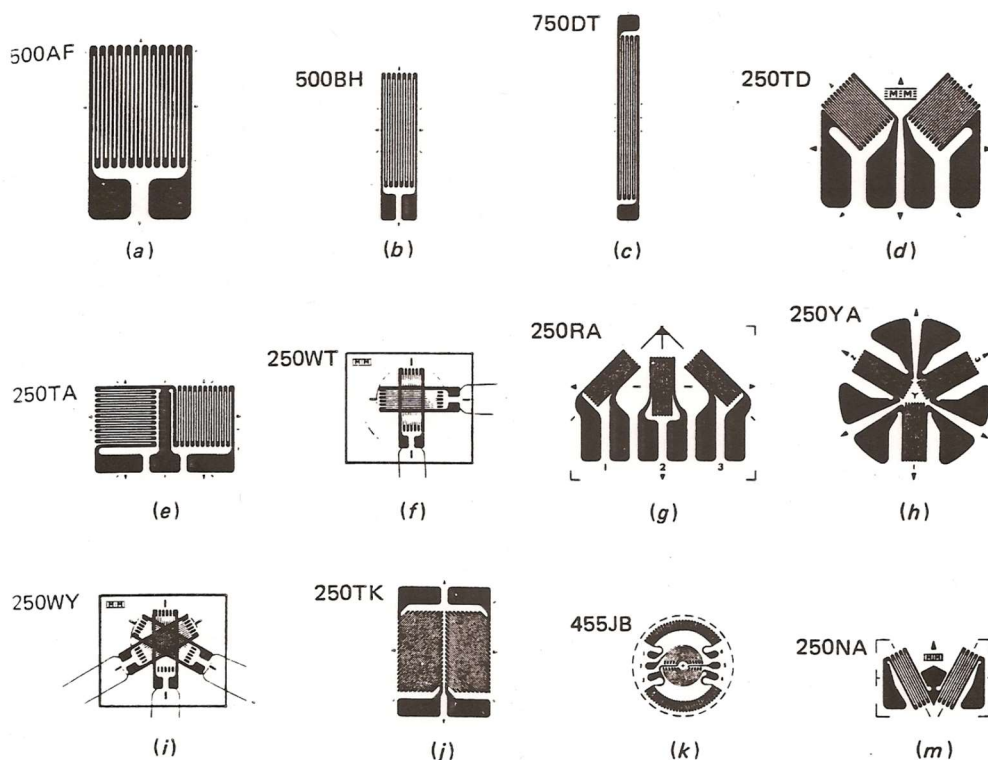
A utilização da extensometria demanda a adoção de procedimentos corretos de seleção, colagem, proteção e instrumentação de *strain gage*, para conferir maior confiabilidade e eficácia às variadas análises. E, apesar de os fornecedores de *strain gage*, especificarem geralmente os procedimentos usuais para utilização de seu produto, cabe ao operador a avaliação de todas as condições de operação para a execução dos mesmos.

A seleção dos *strain gage* a serem utilizados em determinada análise deve considerar basicamente a aplicação e as condições que o afetam durante a operação. Portanto, em nível de propriedades, deve-se avaliar, o material utilizado como elemento resistivo, a configuração do elemento resistivo (comprimento efetivo e geometria da grade), a base de apoio do elemento resistivo, a temperatura de operação e as condições ambientais. (GRANTE, 2004)

Atualmente, existem diversos tipos de *strain gage* no mercado, como pode-se verificar por exemplo no catálogo do fornecedor HBM, que oferece mais de 2.000 modelos. Estes modelos estão divididos em tipos que se baseiam principalmente no tipo de esforço a ser medido (flexão, tração, tensão residual, dentre outros), na classe de materiais dos elementos de medição (concreto, polímeros, metálicos, dentre outros), na atuação de condições externas (água, hidrogênio, áreas com significativos campos magnéticos e elétricos, dentre outros) e, além disso, todos possuem especificações referente a uma faixa de temperatura de operação.

Na Figura 7 apresentam-se vários tipos de *strain gage* que podem ser utilizados de acordo com a aplicação, processo e intuito final de medição.

Figura 7 – Diversos tipos de *strain gage*.



(a), (b) e (c) *strain gage* uniaxiais; (d) e (e) rosetas biaxiais; (f) roseta de dois elementos superpostos; (g) e (h) roseta triaxial; (i) roseta de três elementos superpostos; (j) *strain gage* pra medição de torque; (k) *strain gage* diafragma; (m) *stress gage*;

Fonte: DALLY; RILEY, 1991 apud GALLINA, 2003, p. 14.

Na análise propriamente dita, deve-se avaliar, principalmente, a configuração de *strain gage* de acordo com o estado de tensões e deformações definido pela teoria da resistência dos materiais. Quando a direção de deformação não é facilmente perceptível pela teoria, a melhor opção é utilizar uma roseta, que permita identificar o ângulo que as tensões principais atuam na estrutura, por meio da medição da deformação por três *strain gage* orientados de forma característica.

Além da seleção minuciosa dos *strain gage* existem as principais etapas subsequentes: preparo da superfície, colagem, proteção, soldagem da fiação, instrumentação elétrica e captura dos dados.

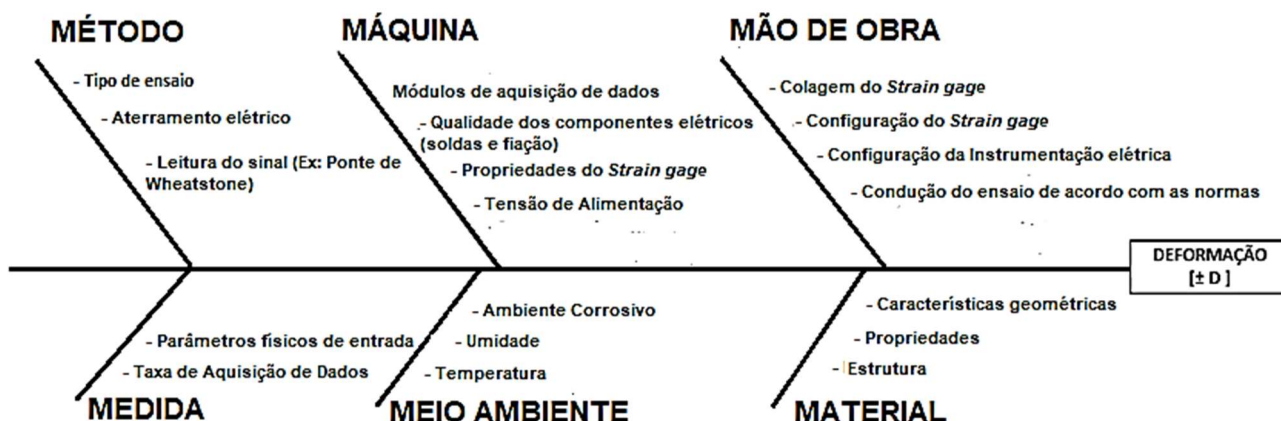
A colagem é executada para promover uma transmissão efetiva dos esforços mecânicos da estrutura para o *strain gage*, a proteção é executada principalmente contra ação da umidade, que pode promover curtos circuitos e impossibilitar a

medição. Além disso, usualmente, são empregadas, também, proteções mecânicas robustas para a utilização em ambientes mais hostis, como por exemplo na indústria da construção civil. (GALLINA, 2003)

Segundo Gallina (2003) e Grante (2004), a soldagem da fiação é usualmente feita por solda de estanho e a configuração da mesma é escolhida de acordo com o sistema de medição. Este sistema pode se basear em dois princípios: medição direta por variação de resistência elétrica ou medição por pontes de Wheatstone. Na medição por pontes de Wheatstone, o sinal de variação de resistência (ΔR) é amplificado e traduzido em variação de tensão elétrica (ΔV). Isso permite maior perceptibilidade do sinal em pequenas deformações e maior variedade de associação de *strain gage*.

Todas essas etapas são cruciais para a diminuição de fontes de erros e incertezas no resultado final direto (deformação) proveniente de aspectos de maquinário e meio ambiente. Deve-se estar atento aos procedimentos para utilização dos *strain gage* para evitar erros provenientes do operador (mão de obra), e é importante identificar possíveis descontinuidades na estrutura, e conseqüentemente nas propriedades do material, visto que a medição por extensometria é uma técnica pontual. Na figura 8 representa-se um digrama de Ishikawa que revela as principais fontes de incertezas para o cálculo da deformação por extensometria em uma aplicação geral.

Figura 8 - Diagrama de Ishikawa para uma análise geral por extensometria



. Fonte: Próprio Autor

3.3 Análises Experimentais de Tensões em Situações de Impacto

A princípio, os *strain gage* podem ser utilizados para a medição de esforços provenientes de carregamentos dinâmicos. Entretanto, devido a alta variabilidade de tipos de solicitações dinâmicas e de altas magnitudes de taxa de deformação, ainda não está totalmente consolidada a efetividade dos mesmos e os pormenores a serem considerados neste tipo de análise experimental.

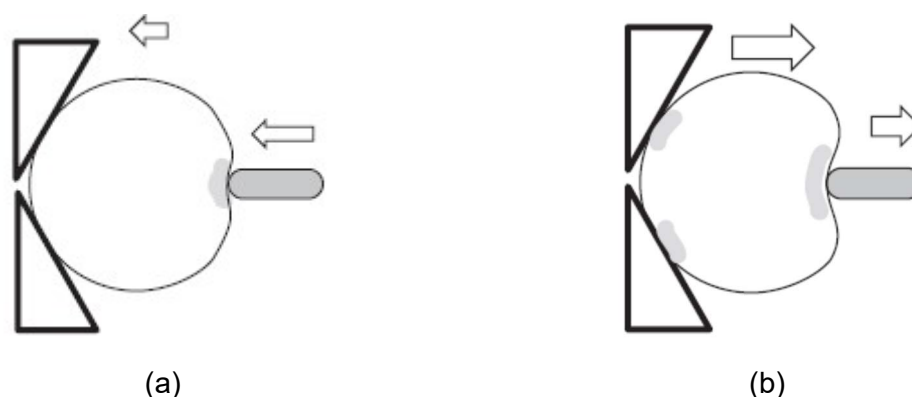
Conforme Ramesh (2008), uma das características definidoras de impactos que ocorrem em velocidades grandes, o suficiente para caracterizar uma colisão inelástica (e algumas particularmente plásticas), é que a maioria destas deformações ocorrem com altas taxas de deformação. E, todavia, não se está consolidado um padrão do comportamento dos materiais em altas taxas de deformação, pois ainda é difícil definir ao mesmo tempo o comportamento da tensão de fluxo em função da deformação, taxa de deformação, e ainda outras variáveis influenciadoras, como a temperatura.

A aplicação de *strain gage* e de outras técnicas para medições de carregamentos dinâmicos tem sido utilizada para avaliar o comportamento de diversos tipos de componentes e de materiais sob condições de impacto.

Uma das aplicações atuais abrange o comportamento de componentes de produtos portáteis, pois, conforme Liu et. al. (2009), um aspecto crítico de confiabilidade de produtos eletrônicos portáteis é suportar os esforços de impactos, como: quedas, forte vibração e choque mecânico. Isso instigou a pesquisa e desenvolvimento de análises em testes de queda para componentes eletrônicos utilizando-se extensometria, principalmente em placas de circuito impresso.

Um exemplo de análise de Impacto em materiais cerâmicos foi abordado por Hayash; Tsuge; Kurachi (2012), no qual tigelas de porcelana reforçada foram instrumentadas internamente por *strain gage* e submetidas ao impacto de um projétil em uma de suas extremidades, sendo que a outra extremidade ficava disposta em um anteparo de quina. Retrata-se na figura 9 o experimento realizado nas tigelas, no qual o projétil exercia um esforço localizado que provocava a deformação da tigela, porém, este mesmo projétil retornava em sentido inverso devido ao retorno elástico.

Figura 9 – Esquema do teste dinâmico em tigela de porcelana



Fonte: HAYASH; TSUGE; KURACHI, 2012, p.108

As conclusões do estudo foram gerais e discorreram que a resistência ao impacto variava bastante com o tamanho da amostra, e com a presença do batente e o ângulo do mesmo. (HAYASH; TSUGE; KURACHI, 2012)

No âmbito dos materiais poliméricos pode-se citar o estudo relatado em Kist (2014) que dimensiona uma Barra de *Hopkinson* para ensaios de alta velocidade de deformação em plásticos dúcteis. As conclusões do estudo dão bastante ênfase à escolha do sistema de aquisição de dados de modo que de acordo com a literatura em geral, usualmente são utilizadas ordens de grandeza de frequência de aquisição de MHz, e em alguns casos mais extremos chega-se a utilizar ordens de GHz. Porém, neste estudo apresentado em Kist (2014), a frequência de 500 KHz (0,5 MHz) foi suficiente para estabelecer o dimensionamento entre taxas de deformação de 500 s^{-1} a 5000 s^{-1} .

Um estudo desenvolvido por Biase; Donadon; Almeida (2010), apresenta uma metodologia técnica para realização de testes de impacto em placas de laminados compósitos, que são especialmente utilizados na indústria aeroespacial e aeronáutica. Os experimentos foram realizados em uma Torre de teste de queda (*Drop Test Tower*) e os laminados foram instrumentados na face diretamente impactada e na face oposta. Foi relatado que durante os ensaios de impacto, o sistema de aquisição e a célula de carga funcionaram adequadamente, entretanto houveram problemas com relação à sensibilidade do sensor fotoelétrico e de alguns *strain gage* dos corpos de prova.

As principais pesquisas robustas na área de impacto estão inseridas no âmbito dos materiais metálicos, de modo que existe uma grande gama de situações específicas nas quais os mesmos são estudados, e, ainda há muitos contratempos experimentais relatados, bem como perduram algumas questões no estado da arte, ainda bastante obscuras. Desse modo, dar-se-á ênfase na abordagem de ramos que estabelecem maior correlação com o estudo em questão e que são recorrentes na literatura.

3.3.1 Ensaio de Impacto Instrumentados

A principal utilização inicial dos ensaios de Impacto era a execução de testes para avaliar a tenacidade à fratura dos materiais, como um controle de qualidade, de modo a assegurar que o material estava com as propriedades adequadas de acordo com o projeto e aplicação pretendida. Os parâmetros avaliados eram baseados na energia de impacto total absorvida ou em algum outro parâmetro relacionado à ductilidade bruta do material. (SERVER, 2002)

Existem exemplos onde o sinal de carga com relação ao tempo foi aplicado para avaliar melhor a qualidade de materiais estruturais variados para as suas aplicações de projeto, e outras aplicações pioneiras relatadas se pautavam na avaliação de propriedades do material com sensibilidade à degradação durante o serviço, como por exemplo vasos de pressão de aço ferrítico utilizados em reatores. (SERVER, 2002)

Os estudos de instrumentação do Ensaio de Impacto tem sido cada vez mais corriqueiros, desenvolvendo-se principalmente no ensaio de impacto Charpy, advindos da demanda crescente de pesquisas mais completas do comportamento de materiais quando submetidos a esse tipo de esforço, e do crescente desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Materiais.

A Instrumentação de um Ensaio de Impacto Charpy consiste basicamente na leitura das deformações do martelo e/ou do corpo de prova por meio de *strain gage* colados nas superfícies dos mesmos, porém, é importante ressaltar que uma calibração de leitura da carga deve ser realizada, devido às diferenças que podem existir entre os equipamentos, principalmente no que se refere aos martelos.

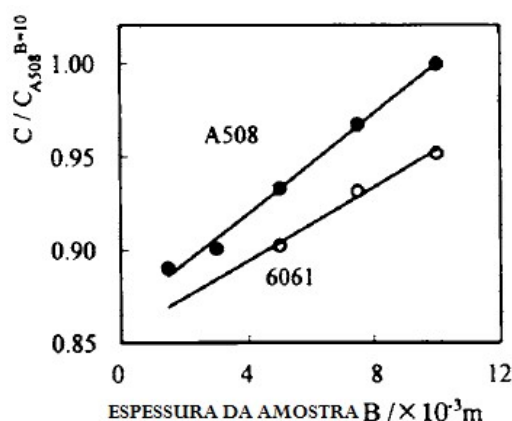
Morita; Otani; Kobayashi (2002) relatam sobre alguns problemas na medição do sinal de carga (Força) neste tipo de ensaio e explicam acerca de uma calibração de carga que deve ser realizada de acordo com o seguinte fator de calibração:

$$C = \frac{\Delta F}{\Delta V} \quad (18)$$

Este fator de calibração, que é a razão entre uma variação de força (ΔF) e uma variação de Tensão Elétrica (ΔV), é calculado a partir da aplicação de uma carga sob condições estáticas em um martelo instrumentado, correlacionando-a com o desequilíbrio na Ponte de Wheatstone do sistema para leitura com os *strain gage*. (MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002)

Por meio de testes com amostras de materiais diferentes, nomeadamente Aço baixa liga ASTM A508 e Liga de Alumínio 6061, e, de espessuras variadas, foi possível estabelecer uma tendência de comportamento do fator de calibração. Na Figura 10 apresenta-se um gráfico que demonstra o efeito da espessura da amostra normalizado com relação ao fator de calibração de uma amostra padrão de 10 mm de espessura e feita de Aço ASTM A508. (MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002)

Figura 10 – Influência do material e da espessura da amostra em Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado



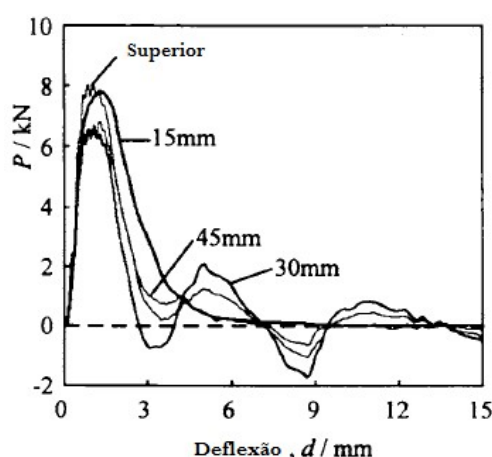
Fonte: MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002, p. 216

Concluiu-se, de acordo com Morita; Otani; Kobayashi (2002) que a espessura da amostra e o material da amostra influenciam significativamente na calibração do

experimento. Além disso, estudos de simulação numérica demonstraram que a sensibilidade do martelo instrumentado também é influenciada pelo seu próprio projeto.

Outra avaliação realizada foi pautada na localização do *strain gage* com relação ao ponto de Impacto nos testes com a Liga de Alumínio 6061. A Figura 11 representa graficamente a influência da posição do *strain gage* com relação ao comportamento mecânico, sendo que, haviam três *strain gage* localizados na face impactada às distâncias de 15mm, 30mm e 45mm do ponto de impacto; e um *strain gage* na face oposta (superior). (MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002)

Figura 11 – Influência da Posição do *strain gage* no sinal de carga para amostras de Alumínio 6061.



Fonte: MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002, p. 218

Os resultados indicam que somente a curva referente ao *strain gage* localizado à 15 mm do ponto de Impacto teve um único pico de carga, enquanto que, as outras posições apresentaram um comportamento de onda, configurando-se como um indicativo da presença de vibrações. Desse modo, acredita-se que o *strain gage* deve ser colado o mais próximo possível do ponto de impacto. (MORITA; OTANI; KOBAYASHI, 2002)

Entretanto, foi verificado também que, devido ao forte efeito das vibrações do martelo, a carga de impacto não pode ser medida em torno da extremidade da fenda que tinha

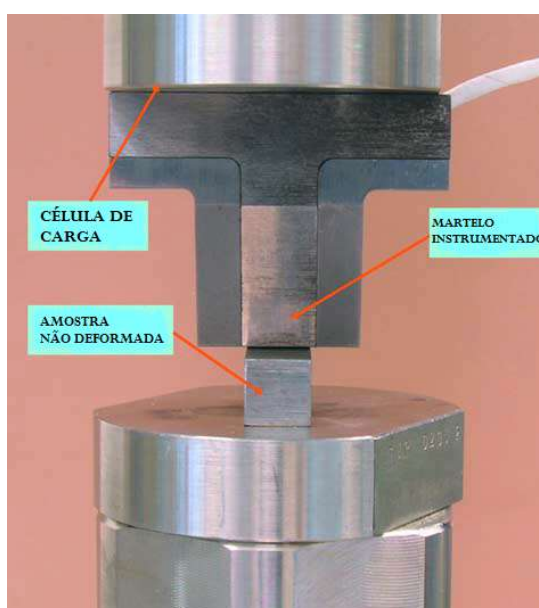
sido introduzida para libertar o efeito de restrição da deformação da posição de calibração do martelo circundante.

Lucon (2009), estuda a influência da taxa de carregamento na calibração dos martelos de Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado, também calibrado estaticamente por meio da determinação do fator de calibração, porém, a resposta do martelo submetido a cargas estáticas difere significativamente do seu comportamento durante um Ensaio de Impacto Charpy.

“Isto é tipicamente refletido numa grande diferença entre a energia absorvida devolvida pelo codificador de pêndulo, e a mesma energia calculada sob o registo de teste de força / deslocamento instrumentado” (LUCON, 2009, p. 521).

Os martelos instrumentados são calibrados removendo-os do pêndulo e instalando-os em uma máquina de ensaio universal, conforme Figura 12. Aplicam-se forças de 5 a 40 kN em passos de 5 kN contra uma amostra Charpy não testada. Antes de gravar os dados de calibração, é feita uma impressão na amostra Charpy aplicando 40 kN e depois descarregando completamente.

Figura 12 – Carregamento estático para calibração do martelo



Fonte: LUCON, 2009, p. 521, tradução nossa.

As investigações de Lucon (2009) indicam que, quando os martelos são submetidos a carregamentos cíclicos, a sensibilidade dos *strain gage* em termos do sinal de saída (Tensão elétrica) diminui com o aumento da taxa de carregamento, acima de certa frequência. Este fato aparenta depender do projeto dimensional do martelo, e, mais especificamente, do tipo e da localização dos *strain gage*, sendo que os dois martelos instrumentados neste estudo diferiram seus resultados em limites em torno de uma ordem de grandeza principal.

Acredita-se que essa queda de sensibilidade dos *strain gage* é causada pela vibração do martelo, pois durante o carregamento de calibração de ciclo, são geradas ondas elásticas constantes, de modo que elas incidam umas sobre as outras, possivelmente decaindo o sinal de tensão de saída. Em um carregamento de uma única vez isto não aconteceria porque os sinais de calibração de tensão são lidos sem qualquer reflexão de onda elástica. (LUCON, 2009)

As instrumentações de Ensaio Charpy geralmente são executadas somente no martelo, por diversos motivos, porém conforme Paschoalotto; Moreira; Tokimatsu (2007) há uma busca constante da captura do sinal proveniente do corpo-de-prova em si, pois os resultados obtidos trariam informações muito mais significativas do que as informações análogas obtidas do martelo pendular, que são respostas reativas do mesmo ao rompimento do corpo.

A qualidade do sinal proveniente do corpo-de-prova ainda é muito inferior àquela obtida nos ensaios com martelo instrumentado. Tais problemas se devem ao nível de ruído ainda existente nos sinais capturados e ao fato de que ainda não foram realizados ensaios suficientes para total aprimoramento da captura destes sinais. (PASCHOALOTTO; MOREIRA; TOKIMATSU, 2007)

3.3.2 Componentes estruturais

A necessidade de medir os esforços provenientes de situações dinâmicas é uma questão relevante em muitas indústrias. Estruturas que estão corriqueiramente submetidas a cargas dinâmicas costumam apresentar mudanças nas propriedades do

material constituinte, que podem ser associadas ao tipo e à duração do carregamento. (SERVER, 2002)

Em estruturas grandes e complexas alguns dos efeitos dinâmicos localizados podem ser dissipados, devido ao tamanho, pois há maior caminho para propagação de ondas de tensão, e devido à resposta de rigidez da estrutura. (SERVER, 2002)

“Em particular, para exemplificar, sabe-se que os aços ferríticos na região de temperatura de transição são muito sensíveis à carga dinâmica, porém, o grau de carga dinâmica precisa ser avaliado para toda a estrutura” (SERVER, 2002)

Em estudo desenvolvido por MICHELI (2008), analisou-se o comportamento de chapas de alumínio utilizadas em componentes aeronáuticos por meio da associação de um estudo numérico e experimental. No que tange ao estudo experimental, houve a utilização do sistema de Barra de *Hopkinson* para execução de uma caracterização dinâmica do material das chapas.

Os testes estáticos ou semi-estáticos são realizados por diversas máquinas de ensaios comerciais, fornecidas por diversas empresas. Em contrapartida equipamentos de ensaios dinâmicos comerciais são menos comuns. Esse fato corrobora e justifica a continuidade das pesquisas e bibliografias acerca de projetos de novos equipamentos ou mudanças em máquinas existentes, com o intuito de abranger os mais variados tipos de teste a altas taxas de deformação. (MICHELI, 2008)

Alguns problemas da caracterização dinâmica por meio da Barra de *Hopkinson* foi previamente relatado em Meng; Li apud Micheli (2008), pois os pulsos são medidos a certa distância das interfaces, o que pode acarretar em uma representação com menor fidelidade ao que realmente ocorre na região de contato com o corpo de prova, visto que as ondas mecânicas provavelmente sofrem dispersão e atenuação em concomitância com sua propagação. A dispersão é advinda da alteração na forma do pulso devido às defasagens geradas na propagação em componentes com frequência natural diferente, e a atenuação está associada ao dispêndio de energia de onda

devido à propagação não-uniaxial, a efeitos de inércia e ao amortecimento intrínseco de cada material.

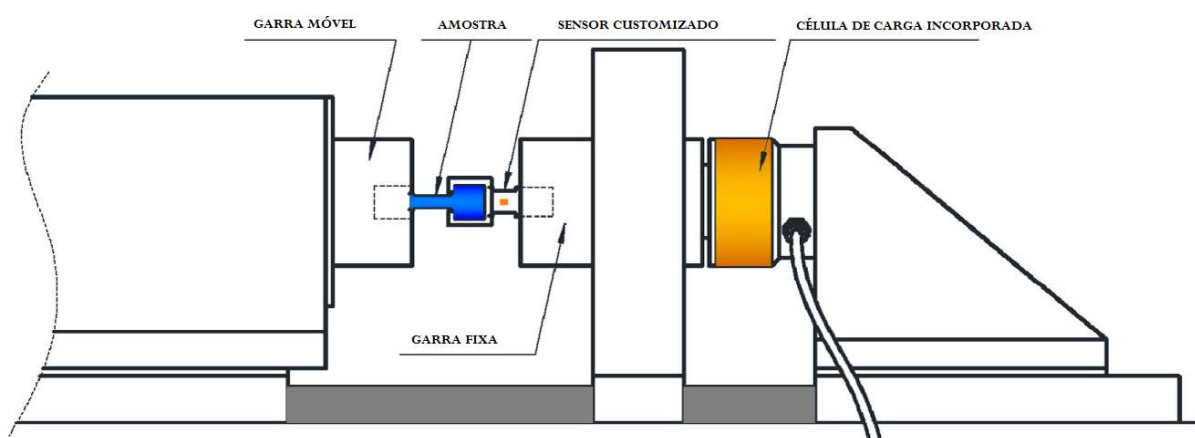
No que se refere a atuação dos *strain gage* na Barra de Hopkinson afirma-se que a frequência deve estar numa faixa de até 300 KHz, e por meio de experimentos físicos, alguns autores concluem que o comprimento de um *strain gage* é o fator que determina sua resposta em frequência e indicaram utilizar *strain gage* de 3mm para mensurar cargas dinâmicas. (UEDA; UMEDA apud MICHELI, 2008)

A aquisição de dados foi realizada na máxima taxa, o que implicaria na possibilidade de um sinal de maior frequência, chegando até 2,5 MHz, porém a literatura relata que os *strain gage* perdem linearidade de resposta quando a frequência utilizada é maior do que 300 KHz. Desse modo, a solução escolhida foi agregar um formatador de pulso, que eliminava componentes de alta frequência do sinal, além de trazer outros benefícios já citados, como a diminuição da dispersão das ondas na barra e a colaboração para consolidar um estado uniforme de tensão e deformação no corpo de prova. (MICHELI, 2008)

Micheli (2008) foi inovador e propôs uma nova metodologia e modificação no Ensaio da Barra de Hopkinson, eliminando a necessidade de utilização de lubrificante e diminuindo os efeitos danosos do atrito, além de promover o equilíbrio da relação das inércias axial e radial em corpos de prova de pequeno comprimento. Estas vantagens foram conseguidas por meio da confecção de amostras adaptadas em formato de anel, em detrimento do cilindro maciço corriqueiramente utilizado. E a consolidação da eficácia foi averiguada pela ocorrência de taxas constantes de deformação no corpo de prova ao longo do teste, que demonstrou numérica e analiticamente as vantagens de sua utilização.

Outra tentativa de padronização de testes dinâmicos foi abordada recentemente em Xia et. al. (2016) por meio da criação de um sensor de carga baseado em *strain gage* para testes dinâmicos de média velocidade com o auxílio de uma máquina de ensaios hidráulica. A cadeia de medição está representada esquematicamente pela Figura 13.

Figura 13 – Esquema da cadeia de medição na máquina de ensaios por meio de sensor personalizado



Fonte: XIA ET. AL., 2016, p. 144, tradução nossa.

O sensor de carga, após calibração, foi utilizado em testes de tensão dinâmicos em dois típicos materiais metálicos: Um aço avançado de alta resistência (DP780) e uma liga de alumínio (2024-T4), e para avaliar melhor os efeitos de vibração procedeu-se com os experimentos em três taxas de deformação: 10, 100 e 200 s⁻¹. (XIA et. al., 2016)

As considerações do estudo frizam que a curva velocidade-tempo de carregamento (taxa de carregamento) e a relação tensão-deformação são duas referências principais que influenciam o sistema de vibrações. Um rápido aumento do estágio inicial na curva velocidade-tempo ou uma descontinuidade na curva tensão-deformação na tensão podem estar associados e resultar em efeitos graves de vibração. (XIA et. al., 2016)

Além disso, Xia et. al. (2016) recomenda que materiais de alto módulo de elasticidade e baixo peso são preferenciais para construção do sensor de carga, pois são menos susceptíveis a desenvolver efeitos de vibração exacerbados. E, sobre a posição dos *strain gage*, as considerações finais recomendam que os mesmos se fixem em zona de deformação uniforme para garantir a validade do coeficiente de calibração.

Outro estudo no ramo estrutural foi desenvolvido em Manoel et. al. (2011), que analisou a influência da rigidez de barras de Aço AISI 4340, engastadas unilateralmente, submetidas a impacto. O aço AISI 4340 é utilizado em componentes

para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, como: eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas de eixo e cilindros.

Este estudo empregou uma cadeia de medição de *strain gage* que foram capazes de captar os sinais de resposta ao impacto nas barras prismáticas metálicas de rigidez diferentes. Manoel et. al. (2011) explicita que compreender o efeito da rigidez na resposta ao Impacto é um fator importante, pois é possível correlacionar com o Ensaio Charpy, avaliando, por exemplo, o melhor material para confecção do martelo.

O Ensaio Charpy apresenta corriqueiramente em seus resultados uma curva tensão-deformação semelhante a uma senóide amortecida e, acredita-se que este efeito seja causado por vibrações mecânicas, e é de extrema necessidade que ele seja minimizado, ou por meio de modificações de projeto e dimensionais ou dos materiais no Projeto da Máquina de Ensaio. (MANOEL et. al., 2011)

Os resultados expuseram que a barra de maior rigidez apresentou menor sensibilidade ao Impacto, pois há uma diminuição da frequência do componente de resposta e uma diminuição considerável desta intensidade, o que corrobora, assim como Xia et. al. (2016), a utilização de materiais de maior módulo de elasticidade para este tipo de aplicação.

De acordo com Batelo (2014), com aprimoramentos crescentes dos sistemas computacionais, existem ferramentas de simulação e programas que permitem análises concomitantes com a análise experimental. E, é fortemente recomendado, principalmente em casos complexos, que se execute uma contraposição dos resultados das duas vertentes, com o intuito de unir resultados e compensar as deficiências de cada técnica.

“Uma análise estrutural rigorosa é de fundamental importância para o projeto e o desempenho adequado ao longo da vida útil de uma estrutura. Os pórticos de aço, são uma excelente solução estrutural para os mais variados tipos de construções.” (BATELO, 2014, p. 7)

Situações práticas envolvendo cargas de impactos e sismos avaliadas no decorrer do estudo de pórticos são abordadas por Batelo (2014), evidenciando o amortecimento histerético introduzido na estrutura devido à consideração do escoamento parcial das seções transversais e uma boa representação das respostas transientes não lineares obtidas com o método da rótula plástica refinada quando comparado a outras análises numéricas e estudos experimentais.

3.3.3 Componentes para transporte e armazenamento de substâncias radioativas (Cascos)

O desenvolvimento de cascos para transporte e armazenamento de substâncias radioativas (combustíveis exauridos) foi instigado na América Latina e no Brasil, principalmente pela quantidade significativa de reatores de pesquisa em operação, o volume atual de combustíveis gerados e o impedimento de repatriação dos mesmos.

A escolha dessa alternativa para solucionar o problema de gestão dos combustíveis irradiados parece ter se baseado em históricos de países como Alemanha e EUA que possuem maior grau de desenvolvimento neste aspecto, estando a Alemanha desenvolvendo cascos de duplo propósito desde 1978 (DROSTE et. al., 2010), e os EUA com vários tipos de cascos já licenciados e em testes iniciais de uso (BIPARTISAN POLICY CENTER, 2015).

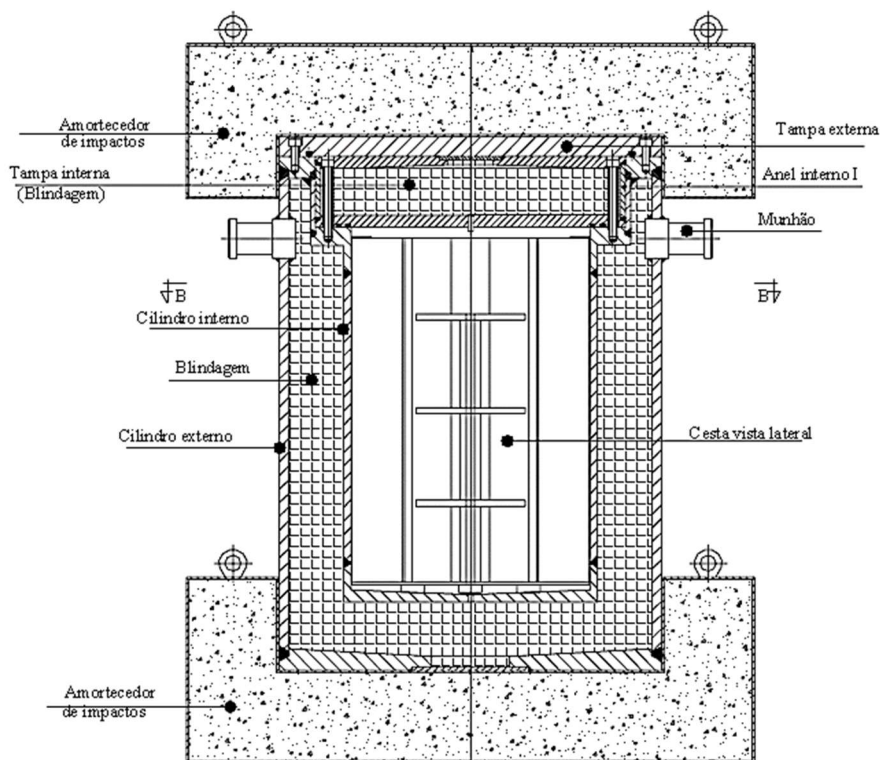
O projeto conceitual pioneiro do casco na América Latina foi desenvolvido nos institutos participantes brasileiros: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) em conjunto com outras instituições de países latino americanos, principalmente Argentina e Chile.

O conceito preliminar foi associado a um barril cilíndrico com uma cavidade interna, um cesto para conter os elementos de combustível, e amortecedores externos. O protótipo foi projetado em uma escala 1:2, obedecendo, portanto, a uma escala 1:8 em volume, e possuindo um peso máximo de 1250 kgf.

As especificidades bem detalhadas do protótipo são abordadas na descrição que segue e pela Figura 14, que representa uma vista em corte transversal do protótipo:

O corpo principal é composto de uma parede interna e outra externa, em aço inoxidável AISI 304, sendo o espaço intermediário preenchido com chumbo, cuja finalidade é prover blindagem biológica. A tampa interna tem parede composta na direção axial, sendo provida de anéis de vedação e portas para pressurização, amostragem e verificação da contenção. A tampa externa serve de proteção à tampa interna. A estrutura dos cestos é composta de tubos de seção quadrada ou circular, respectivamente para elementos MTR e TRIGA, sendo o arranjo tubular reforçado por chapa inferior, pés e espaçadores. Finalmente, os amortecedores de impacto são estruturas compostas de recobrimento externo de aço inoxidável de parede delgada e enchimento com compósito de madeira OBS (*Oriented Strand Board*). Os amortecedores, superior e inferior, são fixados entre si por meio de quatro tirantes, não tendo conexão rígida ao corpo do casco. (SILVA; MOURÃO; LOPES, 2005, p. 1)

Figura 14 - Vista lateral do protótipo de casco

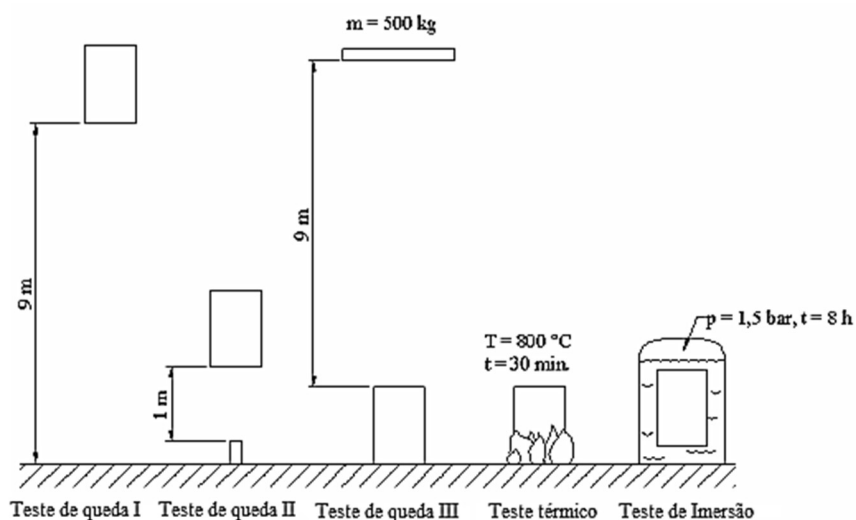


Fonte: SILVA; MOURÃO; LOPES, 2005, p. 6.

Conforme Mattar Neto e Mourão (2002), os requisitos específicos para os cascos do tipo B(U) estabelecem os testes e ensaios que os mesmos devem resistir e os critérios de aprovação. Em outras palavras, os regulamentos estabelecem os testes que garantem que o material físsil pode ser embalado e enviado de tal maneira que eles permaneçam subcríticos nas condições durante o transporte de rotina e em acidentes. A Figura 15 representa os cinco ensaios destrutivos recomendados pela AIEA para os cascos do tipo B(U).

Conforme Mattar Neto e Mourão (2002), o teste de queda I (Figura 15) destina-se a cascos que pesam mais de 500 Kg ou que possuem uma densidade global superior a 1000 Kg/m^3 , e, se configura em uma queda do casco a partir de uma altura de 9 m sobre uma plataforma alvo resistente, normalmente uma plataforma de concreto coberta com uma chapa de aço espessa. O casco deve ser lançado na orientação que espera-se que seja a mais prejudicial ou mais de uma orientação para estabelecer comparações, por exemplo orientações a 0, 45 e 90 graus.

Figura 15 - Testes de validação postulados pela AIEA



Fonte: ORNL/M-5003, 1998 apud MATTAR NETO; MOURÃO, 2002

3.3.3.1 Panorama dos testes executados no protótipo desenvolvido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Como parte do programa de desenvolvimento do casco, um modelo de meia-escala manufaturado na Argentina, baseado no projeto executado no Brasil (Projeto RLA4-

018), foi submetido em duas instâncias para sequências de ensaios prescritos no padrão da AIEA para a condução segura de material radioativo. Conjuntos de ensaios iniciais foram realizados em junho de 2008, e devido à não aprovação nos testes de estanqueidade na primeira campanha experimental, foram realizados novamente em junho de 2010, após modificações no protótipo. Estes testes foram realizados para simular condições normais de transporte (NCT) e as condições de acidentes hipotéticos (HAC) (SILVA et. al., 2011).

A análise dos resultados dos testes iniciais (primeira campanha), sugerem que, a causa da falha do protótipo no teste final de vazamento de hélio foi a deformação plástica dos parafusos da tampa interna, provavelmente, devido à falta de força de aperto e comprimento de encaixe. A fim de melhorar o desempenho do protótipo, algumas alterações de estrutura foram executadas para a segunda campanha de teste. As modificações incluíram alterações na forma, dimensões e material de alguns dos componentes do protótipo e, em certas especificações de fabricação. (SILVA et. al., 2011)

Os diferentes danos sofridos pelos amortecedores, representados parcialmente pela figura 16, foram: recuo ao longo das bordas impactadas; protuberâncias nas superfícies perto das regiões de impacto; abertura dos cordões de solda de maior tensão; cisalhamento (rasgo) da casca limitadora de impacto devido ao impacto dos munhões de elevação, e dobra das barras dos amortecedores que fixam o topo e amortecedores de fundo. (SILVA et. al., 2011)

Figura 16 - Protótipo após teste de queda de altura de 9m à 45°.



Fonte: SILVA et. al., 2011.

As modificações introduzidas no protótipo entre as duas campanhas de testes apresentados se revelaram boas para o comportamento geral do mesmo, mas, por outro lado, eram uma desvantagem durante os testes de queda na posição vertical. A absorção de energia de impacto dos amortecedores durante este teste parece ser menor do que o esperado e, além disso, o casco sofreu acelerações elevadas durante o impacto de curta duração, ou seja, houve muita transmissão do impacto para o casco e pouca atuação efetiva dos amortecedores. Essas acelerações eram a causa do deslocamento da tampa e a consequente perda das propriedades de vedação pelos selos da tampa de vedação (SILVA et. al., 2011).

Desse modo, algumas proposições, como a substituição de OSB por Poliuretano como material base para absorção de impacto, análises minuciosas dos esforços nos testes por análise experimental de tensões (extensometria) e simulações por elementos finitos, foram executados. Na Figura 17 revela-se o protótipo com os amortecedores preenchidos com Poliuretano, concretizado no início de 2016.

Figura 17 - Protótipo com amortecedores preenchidos com Poliuretano.



Fonte: Próprio autor.

Em ensaios dinâmicos, como nestes testes de queda do casco, para leitura correta da deformação pelo *strain gage*, o sistema de aquisição de dados deve ser robusto o suficiente para gravar corretamente a forma da onda dinâmica de resposta,

principalmente em testes de queda. Entretanto, conforme concluído por Qiao et. al. (2011), em geral, é difícil verificar a acurácia do método num modelo de casco complexo usando somente os resultados de um ensaio de queda, por causa do processo de impacto complexo e a estrutura complexa de tais compartimentos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Casco para transporte e armazenamento de substâncias radioativas (Experimento motivador)

O casco para transporte e armazenamento de substâncias radioativas, objeto central de estudo da fase inicial do trabalho, foi concebido em sua última versão de Projeto datada do início do ano de 2016, sendo que as análises experimentais de tensões mecânicas se basearam no estudo do comportamento do aço inoxidável AISI 304, componente estrutural principal do casco, em um teste de queda único.

Além disso, os novos amortecedores foram concebidos com um preenchimento de Poliuretano em estrutura de aço AISI 304, em substituição ao uso de OSB do protótipo inicial. Porém, não serão discutidos aqui os critérios e estudos do material polimérico especificamente, pois a integridade estrutural do casco em si, sem amortecedores, está atrelada ao componente de aço.

A Tabela 1 indica as propriedades mecânicas principais do aço AISI 304 utilizado, indicadas pelo fornecedor do material via ficha técnica, na fase inicial do Projeto de concepção do casco.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas nominais do aço AISI 304

Propriedades	Valor Nominal
Limite de Ecoamento (MPa)	172,0
Limite de Ruptura (MPa)	512,0
Módulo de Elasticidade (GPa)	195,0
Coefficiente de Poisson	0,29

Fonte: Fornecedor do material

4.1.1 Instrumentação do Casco

O casco foi instrumentado em 9 pontos, totalizando 24 canais de medição externos e 3 canais internos, pois todos os pontos foram instrumentados com rosetas

extensométricas de três *strain gage* associados. Ressalta-se que quatro canais externos se situavam mais próximos do ponto de superfície impactada, enquanto que os outros quatro canais se situavam verticalmente pra cima de forma simétrica, conforme pode-se verificar na figura 18, que representa o casco em posição inversa verticalmente, sem os amortecedores.

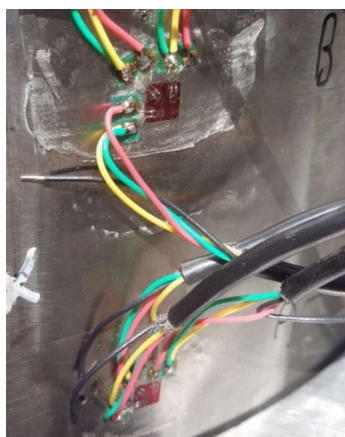
Figura 18 – Posições de instrumentação do casco



Fonte: Próprio Autor

Indica-se na Figura 19, em detalhe, duas rosetas coladas na estrutura externa do casco, com camada impermeabilizante, e ligadas por meio de fios a um sistema de aquisição de dados, com ligações em $\frac{1}{4}$ de Ponte de Wheatstone para leitura de tensão elétrica (V). A tensão de alimentação foi de aproximadamente 2,5 V e o fator do *strain gage*, 2,11.

Figura 19 – *Strain gage* colados na superfície do casco



Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Teste de Queda do Casco

O teste de queda do casco foi realizado em campo aberto no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) na data 22/03/2016. O protótipo foi elevado por meio de um guindaste e solto a partir de 9 m de altura, com as rosetas ligadas a um sistema de aquisição de dados associado a um computador portátil. Apresenta-se, na Figura 20, o Protótipo do Casco em campo com os rosetas ligadas por meio de cabos suficientemente longos de modo a permitir a elevação do casco.

Figura 20 – Protótipo do Casco em campo para o teste de queda



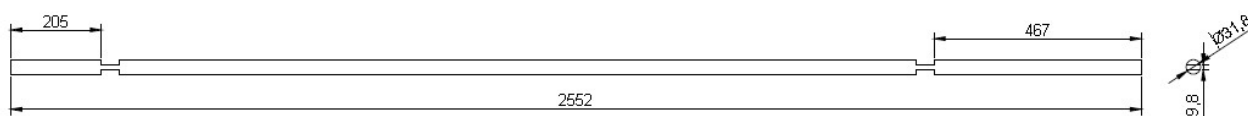
Fonte: Próprio autor.

4.2 Conjunto barra-peso de aço (Experimento principal)

O material utilizado para a fase principal de desenvolvimento do trabalho foi também fornecido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e se constituiu como um conjunto barra-peso de aço, sendo a barra primordialmente cilíndrica, porém, com uma redução de seção em duas partes simétricas, sendo estas as seções críticas do componente. E o peso em forma de paralelepípedo vazado, similarmente a um tubo, com massa de 16,2 kg.

Na figura 21 representa-se um desenho técnico na posição horizontal, para evidenciar o formato do componente, e a redução da seção cilíndrica para uma seção retangular.

Figura 21 – Desenho técnico da barra objeto de estudo



Fonte: Próprio Autor

4.2.1 Caracterização da barra de aço

O material da barra era inicialmente desconhecido e, portanto, tornou-se necessária a caracterização do mesmo para melhor aferição de suas propriedades, tanto para avaliar suas propriedades Mecânicas básicas, quanto para definição dos Parâmetros gerais do Ensaio Dinâmico criado. A caracterização abrangeu uma análise da composição química, uma caracterização metalográfica e um ensaio de tração para definição de propriedades essenciais, como: Módulo de Elasticidade (E) e Limite de Escoamento (LE).

A porção de material retirado da barra foi inicialmente cortada com uma cortadeira metalográfica da marca AROTEC modelo COR 80/2 com um disco de corte A4. Com essas operações foram confeccionadas pequenas amostras de formatos diversos, cortando-se, em etapas, partes de um cilindro. Nessa fase, quatro amostras foram obtidas, das quais duas foram utilizadas para a análise metalográfica, uma para a análise química, e uma foi armazenada. O ensaio de tração foi realizado em dois corpos de prova provenientes da barra que foram confeccionados por processo usual de usinagem entre pontos no torno.

4.2.1.1 Análise Química

A análise química do material foi realizada em um Espectrômetro Foundry Master OXFORD, que é um espectrômetro de emissão ótica de alto desempenho, por meio de bombardeios em uma superfície da porção de material, retirado da barra, e lixada com lixa de granulometria #120. Em cada bombardeio, o sistema do equipamento

identificou o teor de dezoito elementos químicos presentes no material, e, foram realizados três bombardeios por uma questão estatística e da restrição dimensional da superfície disponível para a análise.

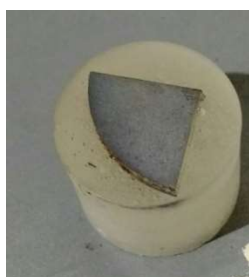
4.2.1.2 Análise microestrutural

A análise microestrutural metalográfica foi executada em duas amostras, retiradas da barra por meio de corte, na seguinte sequência de etapas:

- 1) embutimento a frio com acrílico autopolimerizável;
- 2) lixamento (lixa #120, #240, #320, #400 e #600, sequencialmente);
- 3) polimento com pasta de diamante (9 μ m e 3 μ m);
- 4) ataque químico com o reagente Nital 3% para revelação dos microconstituintes e descontinuidades
- 5) observação e coleta de imagens no microscópio óptico.

Revela-se, na Figura 22, uma das amostras após passar pelos quatro primeiros processos supracitados, pronta para observação e coleta de imagens no microscópio óptico (etapa 5).

Figura 22 – Amostra embutida a frio e atacada com Nital 3%



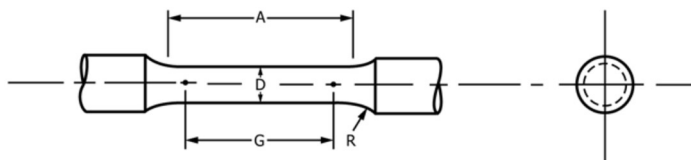
Fonte: Próprio Autor

4.2.1.3 Ensaio de tração

Os corpos de prova, de seção cilíndrica, foram dimensionados de acordo com a norma ASTM E8/E8M, que estipula que o comprimento útil do corpo de prova tenha quatro vezes o valor do diâmetro. Reportando-se à Figura 23, afirma-se que o comprimento útil utilizado foi de 24mm (G) e o diâmetro foi de 6 mm (D), caracterizando a utilização

de corpos de prova menores, usualmente denominados de “Sub-size”, porém proporcionais ao tamanho padrão.

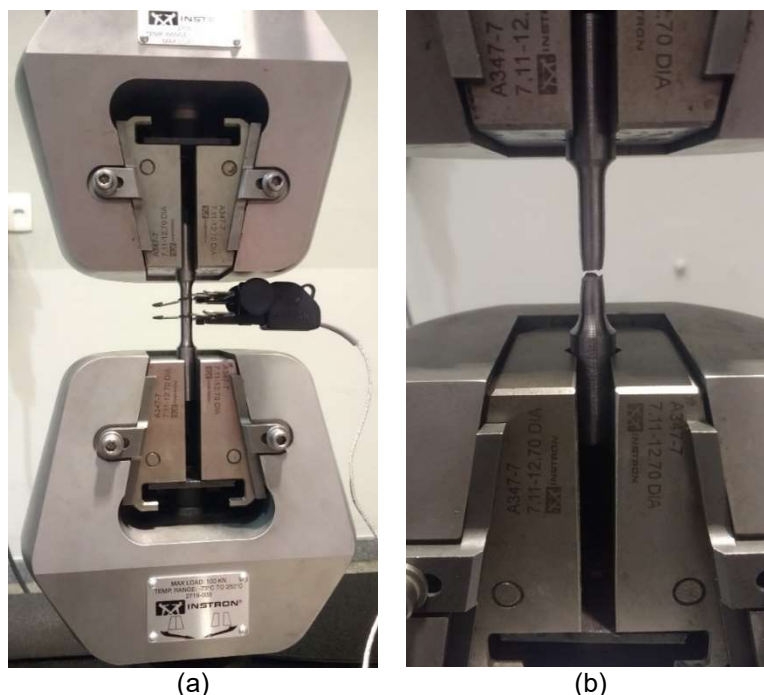
Figura 23 – Desenho do corpo de prova de tração



Fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal, da marca Instron, módulo 5982, de carga máxima 100 KN, com movimentação constante do travessão móvel de 1,44 mm/min, e, conseqüentemente, taxa de deformação inicial de 10^{-3} s^{-1} , conforme Figura 24.

Figura 24 - Ensaio de Tração



(a) Corpo de prova com clip gage ; (b) Corpo de prova após ruptura

Fonte: Próprio Autor

A medição das deformações no regime elástico foi realizada por meio de um *clip gage*, de abertura 10 mm, acoplado ao corpo de prova, como pode ser visto na Figura 24(a). Para promover a ruptura do corpo de prova retirou-se o *clip gage* assim que a carga

(Força) começou a diminuir. Ilustra-se, na Figura 24, o corpo de prova com o *clip gage* (a) e o corpo de prova após ruptura (b).

4.2.2 Instrumentação do Conjunto Barra-Peso

As análises de deformações e tensões por extensometria ocorreram em 3 fases, sendo que, em cada uma delas, houve modificações de projeto de instrumentação e montagem, para avaliar influências de algumas condições que porventura se tornaram fatores influenciadores da medição com *strain gage*.

No Quadro 2 resume-se esquematicamente as siglas de identificação dos *strain gage* utilizados, dividindo-se em *strain gage* uniaxiais e rosetas, e apontando a localização do mesmo no componente (barra ou peso), com o intuito de facilitar o entendimento sobre as diferenças de instrumentação entre as fases do trabalho.

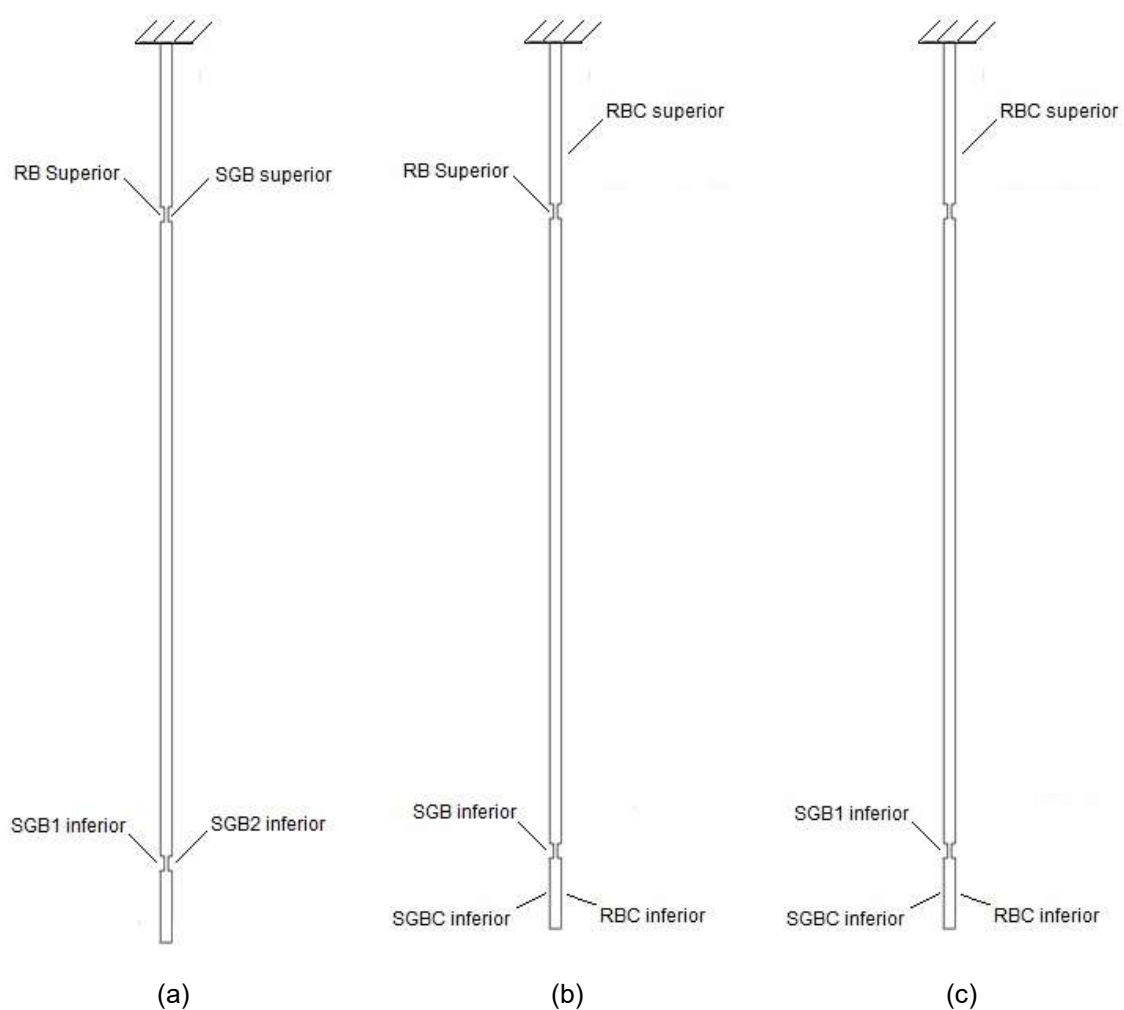
Quadro 2 – Siglas de identificação dos *strain gage*

Sigla	Referência
SGB	<i>Strain gage</i> na seção reduzida da barra
SGBC	<i>Strain gage</i> na seção completa da barra
SGP	<i>Strain gage</i> no Peso
RB	Roseta na seção reduzida da barra
RBC	Roseta na seção completa da barra
RP	Roseta no Peso

Fonte: Próprio autor

Na Figura 25 detalha-se ainda a localização de cada *strain gage*, relacionado à uma posição superior, sempre mais afastada do ponto de impacto, e uma posição inferior, sempre mais próxima do ponto de impacto e, além disso, na 2ª e 3ª fase existe outra diferenciação, relativa à localização do *strain gage* na seção completa da barra (cilíndrica) ou na seção crítica reduzida (retangular)

Figura 25 - Localização dos *strain gage* na Barra no decorrer das fases de estudo

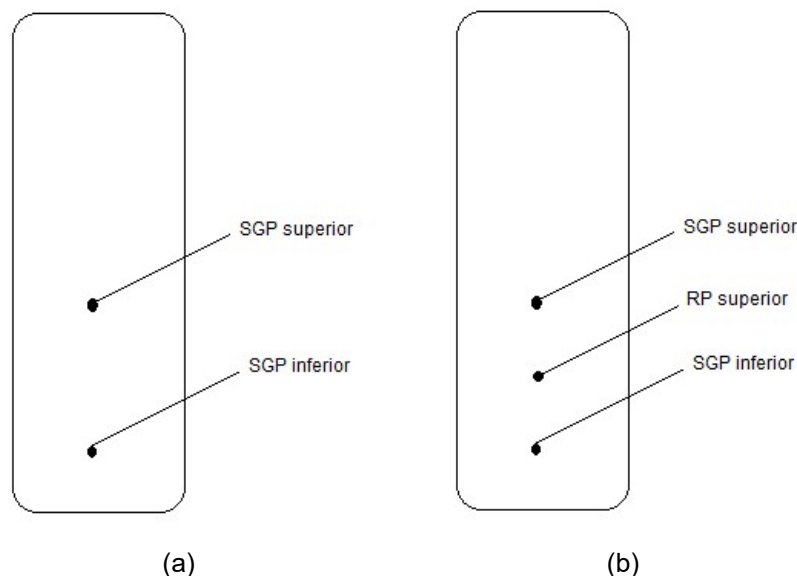


(a) Instrumentação da 1ª fase; (b) Instrumentação da 2ª fase e (c) Instrumentação da 3ª fase

Fonte: Próprio autor

Na Figura 26, representa-se as posições dos *strain gage* utilizados no Peso, referentes às três fases de análise, sendo que não houve mudança de instrumentação, no que tange a quantidade de *strain gage* utilizados na 2ª e 3ª fase.

Figura 26 - Localização dos *strain gage* no Peso em cada fase de estudo



(a) *Strain gage* da 1ª fase e (b) *Strain gage* da 2ª fase

Fonte: Próprio autor

4.2.2.1 Instrumentação da 1ª fase

Na primeira fase de estudo do conjunto Barra / Peso, a instrumentação da barra foi realizada em quatro pontos, nas faces correspondentes das seções críticas retangulares, sendo que, em uma das faces, optou-se pela utilização de uma roseta extensométrica para verificar se haveria a presença de carregamento além do uniaxial

Foram realizados os testes de valor de resistência e o teste de colagem nos *strain gage*, e os valores de todos os canais de medição se apresentaram compatíveis com a resistência nominal dos mesmos de 120 Ω . O valor nominal do fator do *strain gage* (K) estabelecido pelo fornecedor TML (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.) é de 2,11.

O peso utilizado também foi instrumentado, inicialmente com *strain gage* uniaxiais, em dois pontos, seguindo a mesma linha longitudinal, um mais próximo da superfície de impacto com o flange, e outro, mais afastado, conforme pode ser verificado na Figura 27, juntamente com o detalhamento dos *strain gage* (uniaxial e roseta) colados na barra e protegidos contra oxidação por meio de substância impermeabilizante.

Figura 27 - Strain gage da 1ª fase no conjunto barra-peso



(a) *Strain gage* no peso; (b) *Strain gage* uniaxial e (c) Roseta na seção reduzida da barra

Fonte: Próprio autor

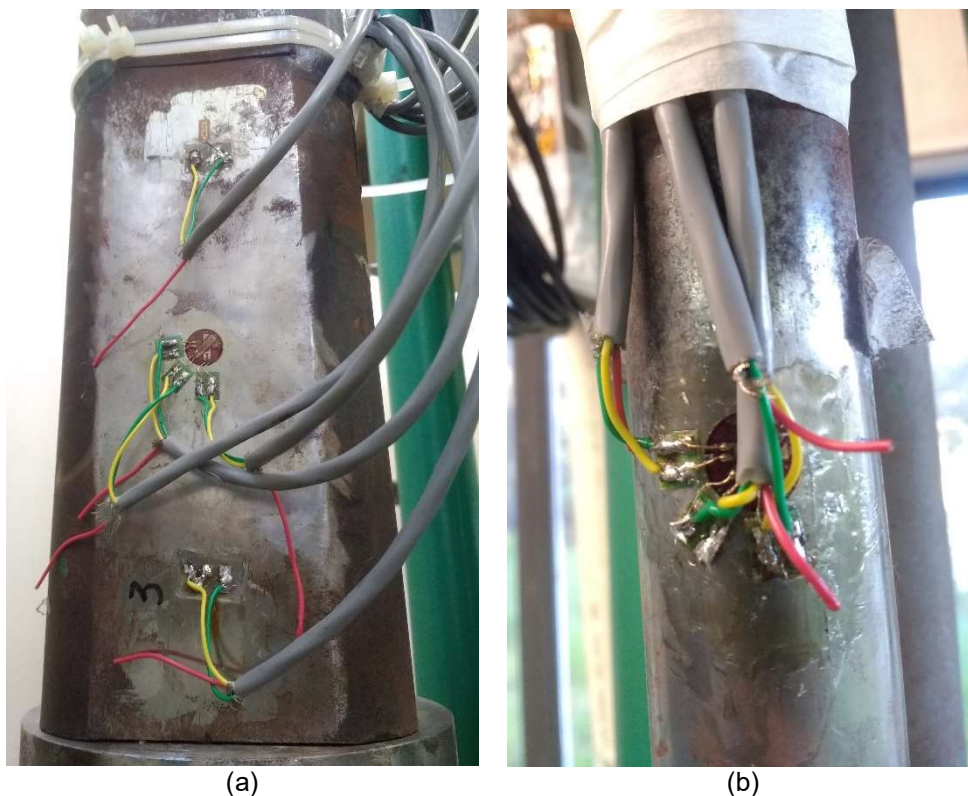
As Pontes de Wheatstone para leitura de tensão elétrica foram acopladas em placas metálicas próximas aos respectivos *strain gage*, e foram alimentadas com uma tensão elétrica (V), que também foi coletada ao longo do experimento, para executar-se os cálculos de deformação. Todas as ligações foram realizadas em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, de modo a possibilitar a medição, por meio de equação específica, do valor correspondente da deformação no conjunto, de acordo com o desequilíbrio da ponte. O aterramento para evitar a presença de ruídos foi realizado por meio de ligação de um fio metálico de cobre na base do suporte no qual está presa a barra.

4.2.2.2 Instrumentação da 2ª e 3ª fase

Houve duas mudanças principais na instrumentação da 2ª e 3ª fase experimental, sendo que, primeiramente, instrumentou-se novamente o Peso, em uma posição central com relação aos demais *strain gage* uniaxiais, com uma Roseta, na tentativa de identificar melhor o comportamento do mesmo no momento de impacto, conforme pode ser observado na Figura 28(a).

Subsequentemente procedeu-se com a instrumentação da barra em três pontos localizados na seção completa (cilíndrica), conforme detalhado na Figura 28, tanto superiormente (b), quanto inferiormente (c), de modo que, na posição inferior, criou-se um dispositivo metálico em forma de tubo que envolvesse a região instrumentada, deslocando-se o flange um pouco pra cima, e, conseqüentemente, também a posição de impacto. Essa ação foi necessária para que os cabos pudessem ficar livres sem serem atingidos pelo Peso.

Figura 28 - *Strain gage* da 2ª e 3ª fase do conjunto barra-peso





(c)

(a) Roseta central no peso; (b) Roseta na seção cilíndrica superior da barra e (c) Roseta na seção cilíndrica inferior da barra envolta por dispositivo protetor

Fonte: Próprio autor

4.2.3 Experimento de queda de peso em barra de aço (Ensaio)

Primeiramente, é importante ressaltar que, a concepção central deste experimento já havia sido pensada e desenvolvida por um grupo de pesquisadores do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), no entanto, este grupo reportou uma série de obstáculos, principalmente relacionados à fixação da barra. A alternativa encontrada naquela época foi executar a fixação da barra no teto de um dos laboratórios de ensaios mecânicos do referido centro. No entanto, as sucessivas quedas de peso, causavam vibrações na estrutura e ruídos excessivos no ambiente, os quais provocaram um receio da equipe em seguir com o Projeto daquela maneira.

Desse modo, procederam-se com modificações no projeto do Ensaio dinâmico de queda de peso em barra de aço, e, neste trabalho, optou-se pela fixação da barra na plataforma superior de uma estrutura metálica, usualmente utilizada para um ensaio padronizado de *Drop Weight*, conforme montagem exposta na Figura 29.

Em suma, o ensaio consistiu em prender verticalmente uma das extremidades da barra em um suporte, deixando um peso determinado, em formato de paralelepípedo, que se desloca ao longo da barra, cair de alturas diferentes, neste caso: 250 mm, 500 mm, 750 mm, 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm. Cada queda proporciona um esforço de impacto por meio do choque em um flange que serve de anteparo para o peso, e está acoplado na extremidade inferior da barra.

A variação de altura de queda do peso ocasiona diferentes magnitudes de deformação na barra que foram percebidas pelos *strain gage* em diferentes pontos, com o intuito de verificar o comportamento mecânico do conjunto em um carregamento de curta duração. Na figura 29 apresenta-se a montagem do ensaio dinâmico, com o peso em repouso em cima do flange, alocado no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

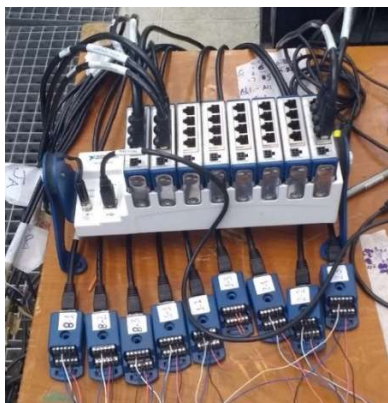
Figura 29 – Montagem do Ensaio Dinâmico



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 30 representa-se os módulos de aquisição de dados utilizados, com frequência máxima de aquisição de 250 KSamples/s, no qual foram ligados diversos canais de medição de variação de tensão elétrica (V) da Ponte de Wheatstone, de acordo com a quantidade de *strain gage* uniaxiais e rosetas utilizados em cada fase do experimento. A taxa de aquisição utilizada nos experimentos foi de 25KSamples/s.

Figura 30 - Módulos de aquisição de dados



Fonte: Próprio Autor

Nos experimentos descritos em Kist (2014), desenvolvidos em uma barra de Hopkinson, verifica-se a utilização de uma taxa de aquisição de dados de 500 KSamples/s (0,5 MHz), ou seja, vinte vezes maior do que a taxa definida neste trabalho (25KSamples/s). Sabe-se que, quanto maior a taxa de aquisição de dados, mais fidedigna ao fenômeno é a coleta dos mesmos, no entanto, precisou-se equilibrar o valor da taxa para não gerar um volume de dados exacerbado, que inviabilizaria o tratamento matemáticos nos softwares disponíveis.

Testes preliminares de queda de peso indicaram que com uma taxa de 25KSamples/s coletavam-se dados suficientes para distinguir os picos de deformação e tensão no momento do impacto. Visualizou-se instantaneamente os picos de variação de tensão elétrica (ΔV) no sistema *LabView*, em todos os canais, validando, portanto, o uso dessa taxa para o estudo dos fenômenos de interesse.

4.2.4 Montagem e condições em cada fase do experimento

4.2.4.1 Condições da 1ª fase de teste

Nos testes de queda de peso em barra, além das condições de instrumentação relatadas anteriormente, é necessário atentar-se à algumas condições de montagem. Ressalta-se primeiramente que, para promover a ligação dos *strain gage* em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, foram utilizadas placas metálicas, nas quais haviam *strain gage* de mesma resistência elétrica (120 Ω), de modo que executava-se o circuito elétrico adequado para aquisição dos dados no sistema. A escolha de completar a ponte por

meio dessas placas foi proveniente da ideia de evitar vibrações e ondas de tensão nos fios de ligação, visto que haviam hipóteses acerca da influência dos mesmos na resposta dos sensores.

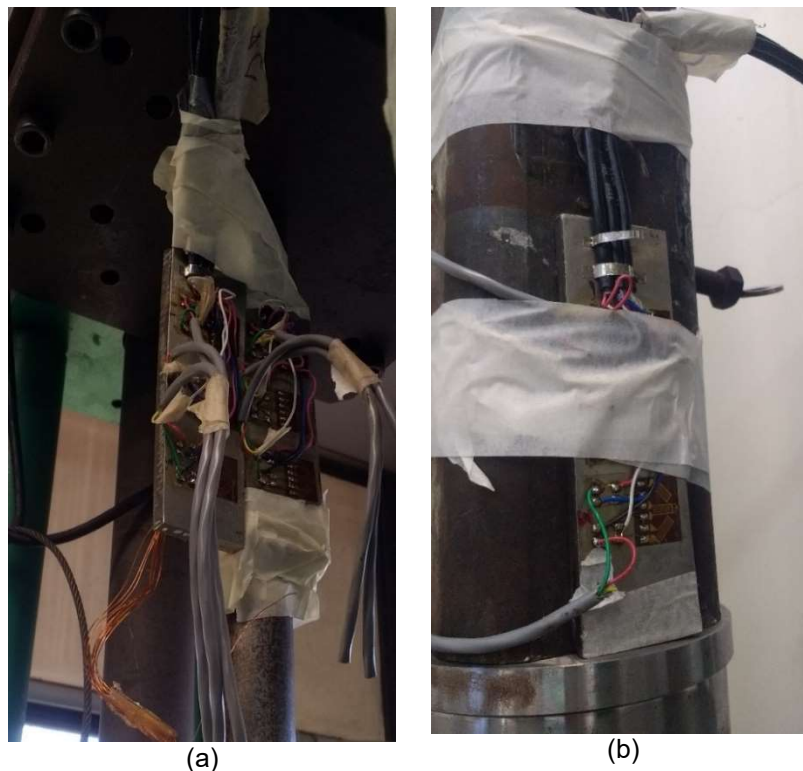
Conforme disposto no quadro 3, na 1ª fase de testes, as referidas placas da ponte de Wheatstone se encontravam anexas à estrutura tanto da barra quanto do peso, conforme pode ser observado na Figura 31(a) e 31(b), respectivamente.

Quadro 3 - Condições da 1ª fase de Testes de Queda (Verificar citação)

Localização das placas para ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone	Barra + Peso
Método de fixação da barra na plataforma superior	Rosca
Acelerômetros	Colados diretamente nos componentes

Fonte: Próprio autor

Figura 31 - Condições experimentais da 1ª fase de testes



(a) Placas da Ponte de Wheatstone na barra, (b) Placas da Ponte de Wheatstone no peso

Fonte: Próprio autor

Além disso, destaca-se, na Figura 32, a presença da rosca na porção superior da barra na fase de instrumentação, indicando que o método de fixação utilizado na 1ª fase foi de rosqueamento na plataforma superior de sustentação.

Figura 32 – Rosca na extremidade superior da barra



Fonte: Próprio autor

Procedeu-se também com a aquisição de dados por meio de dois acelerômetros, fixados diretamente na barra e no Peso, por meio de sistema específico, com um auxílio de um condicionador de sinais, à uma taxa de conversão de 31,6 mV/g.

Na Figura 33 mostra-se o visor do condicionador de sinais utilizado, da marca Brüel & Kjaer, que permite que o dispositivo de aquisição de dados efetue a medição de forma eficaz das acelerações, que necessitam de amplificação de sinal e, além disso, apresentam alta sensibilidade.

Figura 33: Condicionador de sinais dos acelerômetros



Fonte: Próprio Autor

4.2.4.2 Condições da 2ª fase de teste

Na 2ª fase de testes de queda de peso em barra, conforme disposto no quadro 4, ressalta-se que as placas que completam a ponte de Wheatstone foram alocadas na estrutura suporte, que contém a plataforma superior de sustentação da barra, além de quatro pilares metálicos inclinados em direção à base no solo.

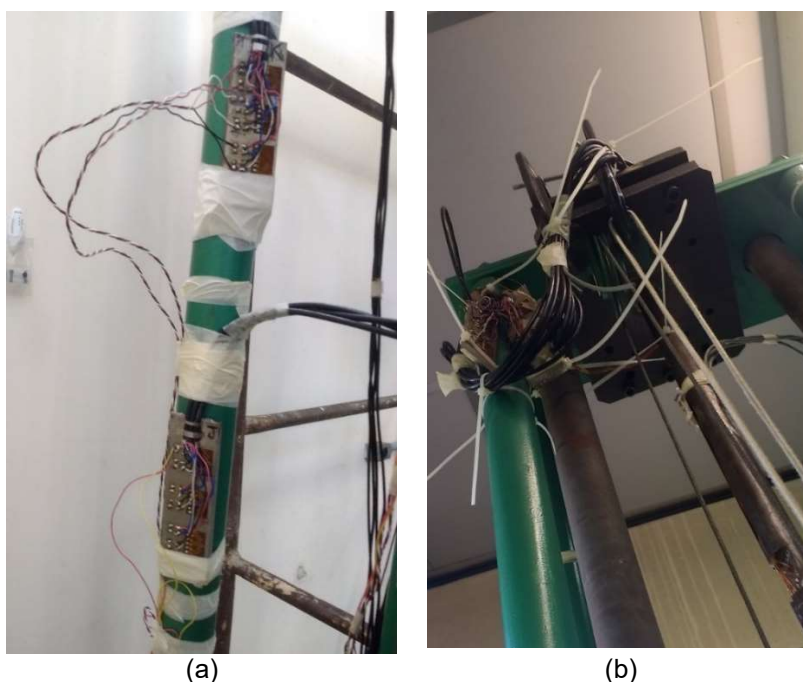
Quadro 4 - Condições da 2ª fase de Testes de Queda

Localização das placas para ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone	Estrutura Suporte
Método de fixação da barra na plataforma superior	Soldagem
Acelerômetros	Melhoria da fixação

Fonte: Próprio autor

As placas se localizaram especificamente nos pilares metálicos supracitados, conforme pode ser observado na porção inferior da estrutura (Figura 34(a)), bem como na porção superior da estrutura (Figura 34(b)).

Figura 34: Condições experimentais da 2ª fase de testes



(a) Placas na porção inferior da estrutura suporte, (b) Placas na porção inferior da estrutura suporte

Fonte: Próprio Autor

Nesta fase, executou-se uma análise adicional, que consistiu em verificar se as placas para formar a ponte de Wheatstone estavam sofrendo influência do impacto na estrutura suporte, de modo que pudessem prejudicar a exatidão dos resultados coletados no sistema de aquisição de dados. Para isso, ligou-se um resistor fixo de 120Ω em um braço da ponte, ao invés de um *strain gage* da estrutura. E, em contrapartida, observou-se no sistema de aquisição, o comportamento de um dos *strain gage* localizados na superfície da placa que faz a ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte, quando executava-se a queda.

Na Figura 35, demonstra-se a soldagem da porção superior da barra na plataforma superior para evitar os movimentos giratórios que provavelmente existiram no rosqueamento, durante o impacto.

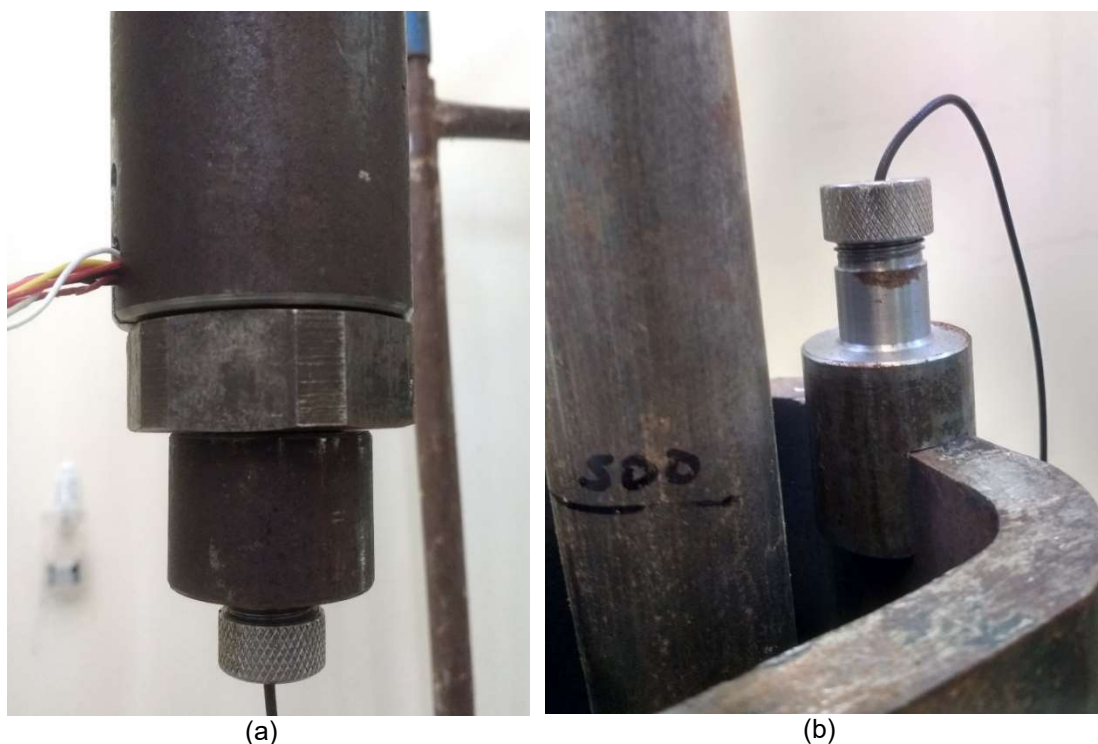
Figura 35: Cordão de Solda da Barra na plataforma superior



Fonte: Próprio Autor

Nessa fase, procedeu-se com uma melhoria na fixação dos acelerômetros, devido à identificação visual de fixação ineficiente na fase anterior, estando um deles localizado na extremidade inferior da barra e fixado mecanicamente por meio de suporte com rosca, conforme Figura 36(a). E, o outro, como pode ser observado na Figura 36(b), localizado na extremidade superior do peso e associado a um dispositivo usinado especificamente para ser fixado em uma das laterais do corpo do peso. O condicionador de sinais foi utilizado da mesma forma que na fase anterior.

Figura 36: Acoplamento dos acelerômetros na barra e no peso



(a) Acelerômetro na porção inferior da barra, (b) Acelerômetro na porção superior lateral do Peso

Fonte: Próprio Autor

4.2.4.3 Condições da 3ª fase de teste

Na 3ª fase de testes de queda de peso em barra, conforme disposto no quadro 5, ressalta-se que as placas que completam a ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone foram realocadas para uma estrutura sem nenhuma solidariedade com a estrutura principal, de modo a eliminar uma possibilidade de pequena deformação, devido à influência do impacto transmitido da estrutura para as placas. Manteve-se o método de fixação da barra por soldagem, bem como a análise adicional de deformação da placa que completa uma Ponte de Wheatstone.

Quadro 5 - Condições da 3ª fase de Testes de Queda

Método de fixação da barra na plataforma superior	Soldagem
Localização das placas para ligação em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone	Fora da estrutura suporte
Acelerômetros	Mudança da taxa de conversão

Fonte: Próprio Autor

A Figura 37 demonstra a utilização de uma estrutura auxiliar localizada ao lado da estrutura suporte, sem solidarização ou junção entre elas, de modo que as placas foram associadas à mesma por meio de fitas adesivas. A Figura 37(a) apresenta uma visão superior dessa estrutura auxiliar com uma das placas anexada, enquanto que a figura 37(b) apresenta uma visão superior da estrutura auxiliar com placas anexadas.

Figura 37: Condições experimentais da 3ª fase de testes



(a) Placas na porção inferior da estrutura auxiliar, (b) Placas na porção superior da estrutura auxiliar

Fonte: Próprio Autor

Nessa última fase, diminuiu-se a taxa de conversão das leituras provenientes dos acelerômetros para o valor mínimo disponível no condicionador de sinais, que é de 1mV/g, visto que grande parte das leituras anteriores estavam extrapolando o limite de leitura de 10 V à -10 V, invalidando a captura de dados.

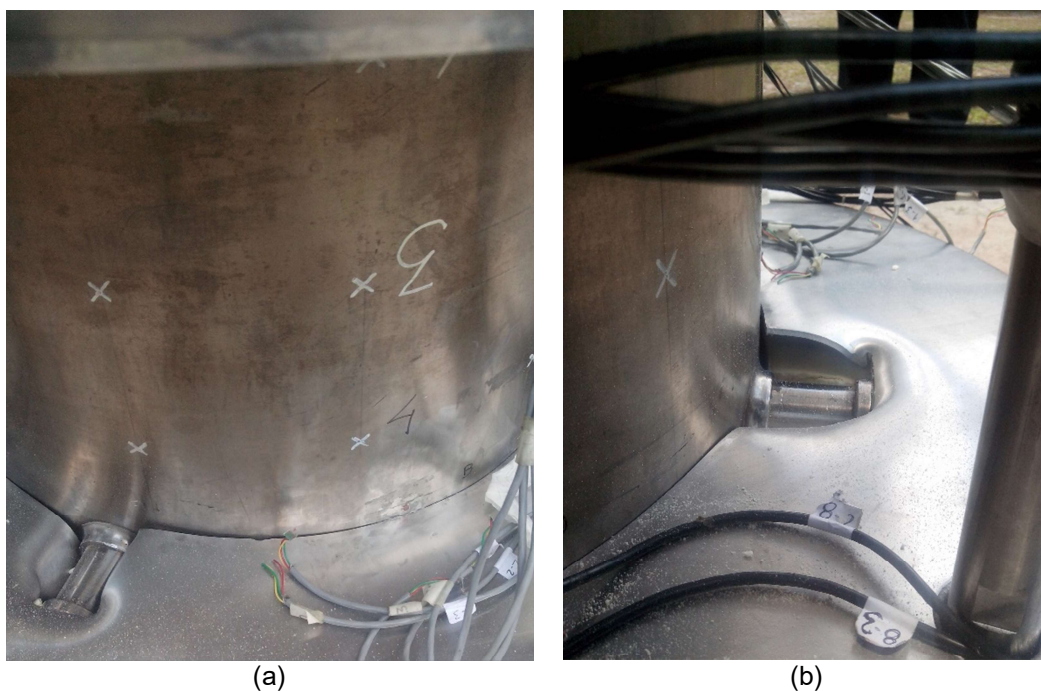
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Teste de Queda do Casco

O teste de queda de 9 m de altura revelou, dentre outros aspectos, que o amortecedor inferior apresentou indícios de falha e de deformação plástica da estrutura externa de Aço AISI 304, porém, o projeto de amortecedor do casco é justamente pautado na possibilidade de o amortecedor falhar de modo a manter a integridade estrutural do corpo principal. Estes aspectos foram avaliados somente por meio de análise visual, conforme Figura 38, no qual houve um afundamento do corpo principal na estrutura de poliuretano, bem como a deformação plástica da carcaça de aço do amortecedor.

Esta situação promoveu o corte de alguns cabos das rosetas inferiores localizadas no corpo principal, que culminaram em alguns sinais com alta variabilidade e pouca convergência de comportamento, devido ao fato do efeito de queda e de afundamento na estrutura polimérica serem praticamente simultâneos, pois acredita-se que os cabos para aquisição de sinal foram cortados logo após a leitura do pico principal.

Figura 38 – Afundamento do casco no amortecedor após o teste de queda



(a) Cabos seccionados com o afundamento do amortecedor e (b) Deformação visível do material metálico do amortecedor

Fonte: Próprio Autor

É possível perceber também na Figura 38(a) a presença dos cabos que foram arrancados com o afundamento do corpo principal na estrutura de Poliuretano, que, muito provavelmente, incitou um dano nos terminais e na leitura dos *strain gage*. O afundamento da estrutura está detalhado na Figura 38(b).

Além disso, conforme percebido por Bolduc e Arsenault (2012), acredita-se que a inércia dos fios condutores conectados ao corpo induzido pela onda de tensão possa ter prejudicado os terminais de ligação bem como as medidas de deformação do casco.

Em adição a esse fato, acredita-se que a taxa de aquisição de dados de 10K*Samples/s* pode ter sido insuficiente para verificar os fenômenos de impacto que ocorrem em um curto intervalo de tempo, provavelmente menor do que 1s, visto que, em outro experimento de queda de casco a partir de 9 m de altura, abordado em DROSTE et. al. (2007), utilizou-se uma taxa 10 vezes maior (100 kHz).

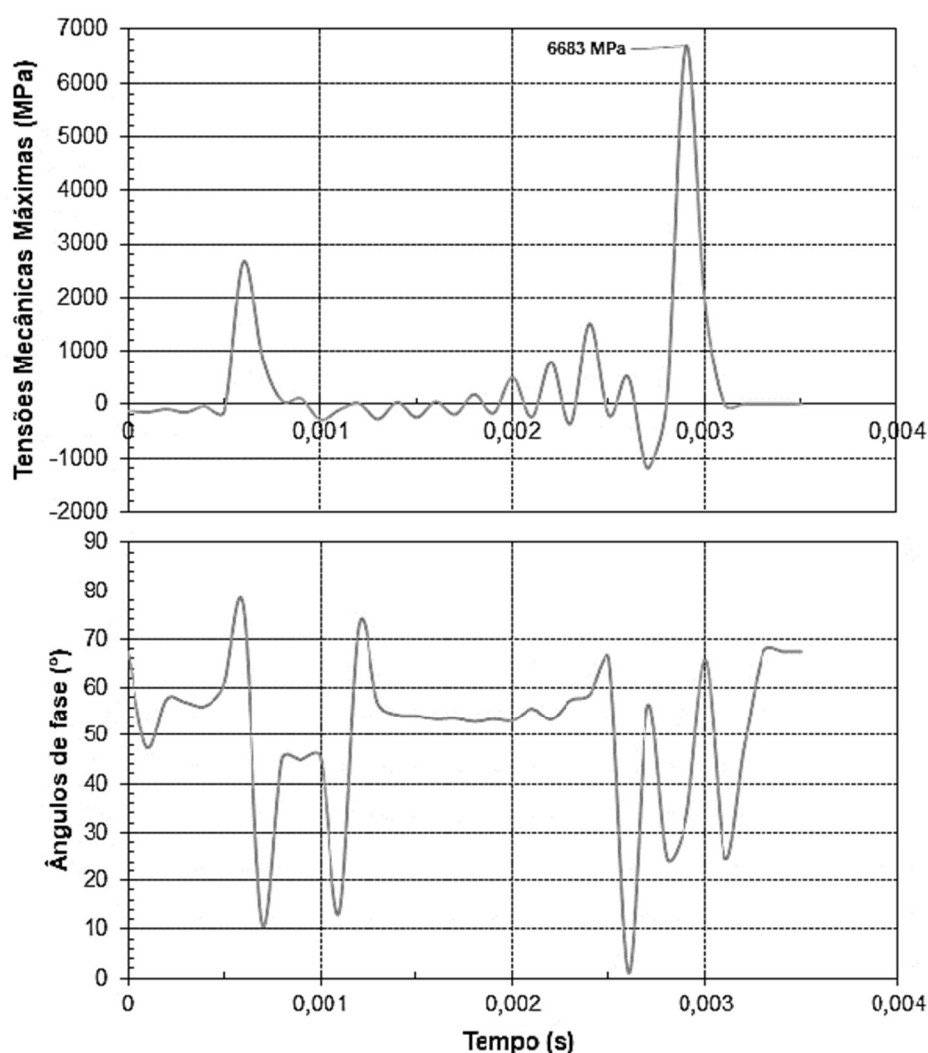
Apresentam-se nas Figuras 39 e 40 gráficos de tensão principal máxima e ângulos de fase com relação ao tempo de aplicação do carregamento coletados na queda do casco. Verifica-se na curva da Roseta Inferior (Figura 37) a perda rápida da aquisição de sinais, devido ao rompimento dos cabos, logo após o pico mais significativo de 6683 MPa. Enquanto que, na Roseta Superior (Figura 38), verificou-se maior constância da aquisição de sinais, com dois picos bem definidos no momento do Impacto, provavelmente devido a um rebatimento que naturalmente ocorre neste tipo de situação.

Porém, o principal aspecto incongruente nos dados são os valores de tensões máximas extremamente altos com relação ao limite de escoamento do material, que é de aproximadamente 200 MPa, e também com relação ao limite de ruptura que é de aproximadamente 500 MPa, e, além disso, é perceptível a grande variabilidade dos ângulos de fase no decorrer do ensaio, provavelmente devido ao afundamento não homogêneo do material polimérico de preenchimento do amortecedor, além das falhas na ligação das Rosetas.

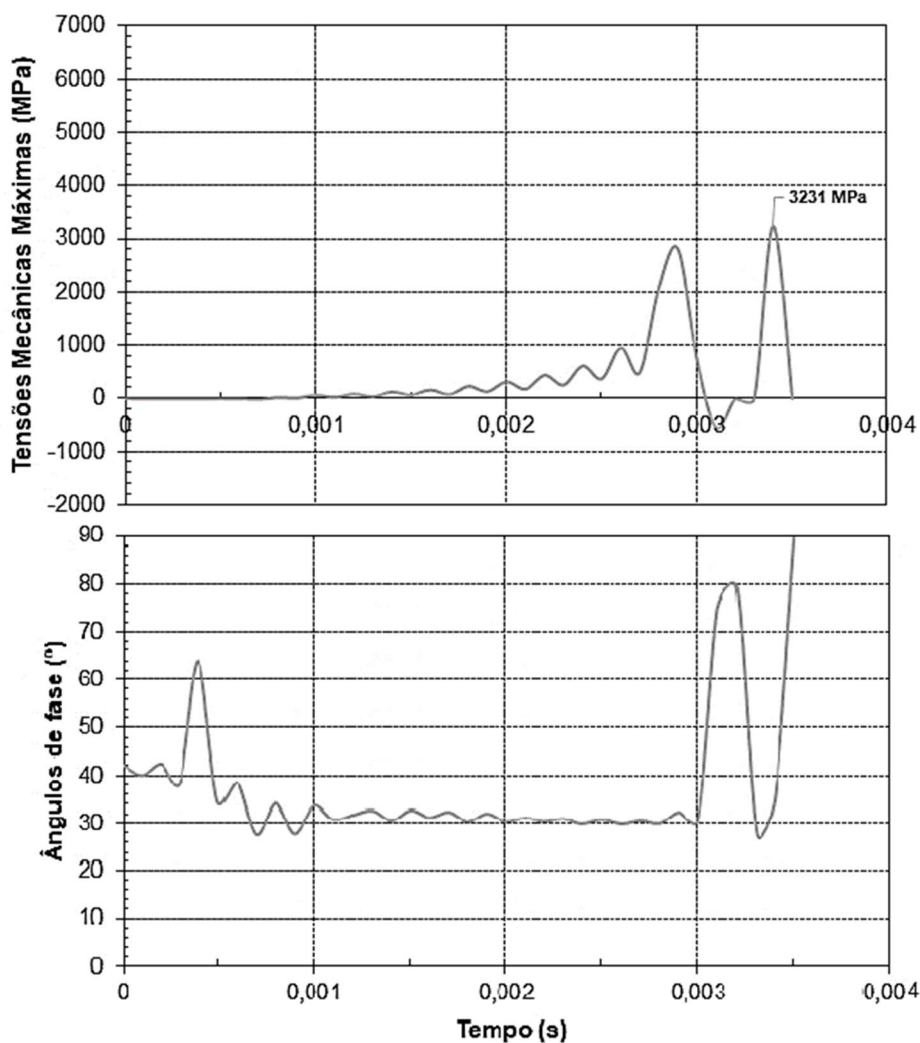
Se estes valores calculados traduzissem fielmente o comportamento do material estrutural do casco, haveria certamente um colapso geral no corpo principal, com a presença de falhas extremamente visíveis. No entanto, isso não ocorreu, e não houve prejuízo dos anéis de vedação das tampas, verificadas em teste de estanqueidade.

Acredita-se, portanto, principalmente, na presença das falhas nos terminais de ligação dos *strain gage*, similarmente aos apontamentos e testes expostos em Bolduc e Arsenault (2012).

Figura 39 – Tensões máximas e mínimas: roseta inferior



Fonte: Próprio autor

Figura 40 – Tensões máximas e mínimas: roseta superior

Fonte: Próprio autor

A discussão em torno desta peculiaridade na leitura dos *strain gage* instigou o desenvolvimento do estudo em estruturas mais simples (barra e peso), proporcionando maior controle de variáveis e uma avaliação minuciosa da influência de diversos parâmetros na leitura dos *strain gage*, e da atuação dos próprios *strain gage* como sensores.

Na estrutura referida, ocorrem quedas sucessivas que provocam esforços mecânicos correlacionados a uma determinada altura de queda, e que são percebidos pelos *strain gage* localizados em pontos estratégicos tanto da barra quanto do peso. Desse modo é possível ter repetibilidade de medidas, e um maior controle da leitura de

dados, além de se trabalhar com um material que foi previamente caracterizado e, portanto, está com suas propriedades principais calculadas.

5.2 Caracterização do material do Conjunto Barra-Peso

5.2.1 Análise Química

Os resultados da análise química do material da barra abrangeram teores de 18 elementos. Porém, expor-se-á somente o teor dos elementos principais e que definem a identificação do material. Na tabela 2 estão dispostos os valores coletados nas três análises em pontos diferentes da superfície analisada e os valores médios e desvios padrão para os mesmos.

Tabela 2 – Resultados da Análise Química do Material da Barra

Elemento	Queima 1	Queima 2	Queima 3	Média	Desvio Padrão
Fe	98,1	98,3	98,3	98,2	0,1
C	0,538	0,510	0,481	0,510	0,030
P	0,0154	0,0144	0,0138	0,010	0,000
S	0,0202	0,0177	0,0202	0,020	0,000

Fonte: Próprio Autor

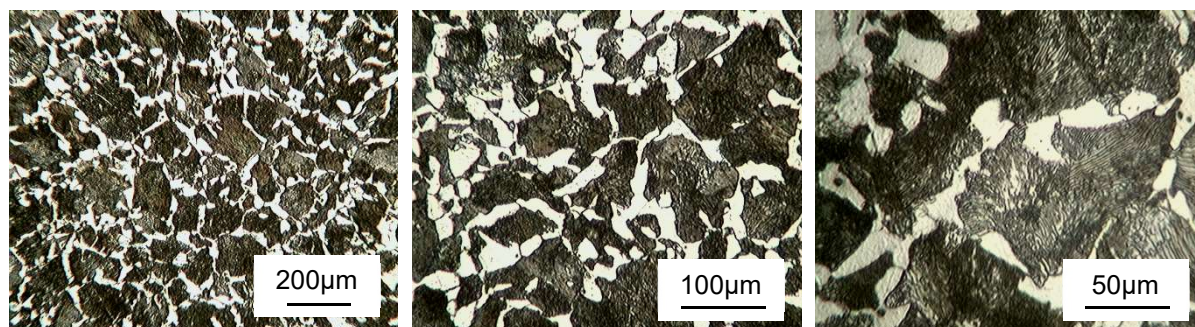
A partir destes resultados verificou-se que o teor médio de carbono é de 0,51%, e que os valores de possíveis elementos de liga de aços especiais são irrisórios, estabelecendo um indício de que o aço seja um aço carbono AISI 1050. Além disso, verificou-se que os teores de Fósforo (P) e Enxofre (S) estão de acordo com a norma brasileira que regulamenta a composição de aços (ABNT NBRNM87, 2000).

5.2.2 Análise Metalográfica

A análise metalográfica corroborou os indícios encontrados na análise química, e, portanto, concluiu-se que o aço em questão se trata de um aço carbono AISI 1050, pois é possível perceber claramente a majoritariedade de um constituinte perlítico (colônias) e grãos de ferrita, conforme pode ser verificado na Figura 41, sendo os

grãos de ferrita as regiões mais claras e as colônias de perlita a região mais escura. E, além disso, não há indícios de carbonetos e nem outros constituintes que pudessem indicar a presença de elementos de liga.

Figura 41 – Fotomicrografias da amostra proveniente da Barra de aço



(a)

(b)

(c)

(a), (b) e (c) Ampliações distintas.

Fonte: Próprio Autor

5.2.3 Ensaio de Tração

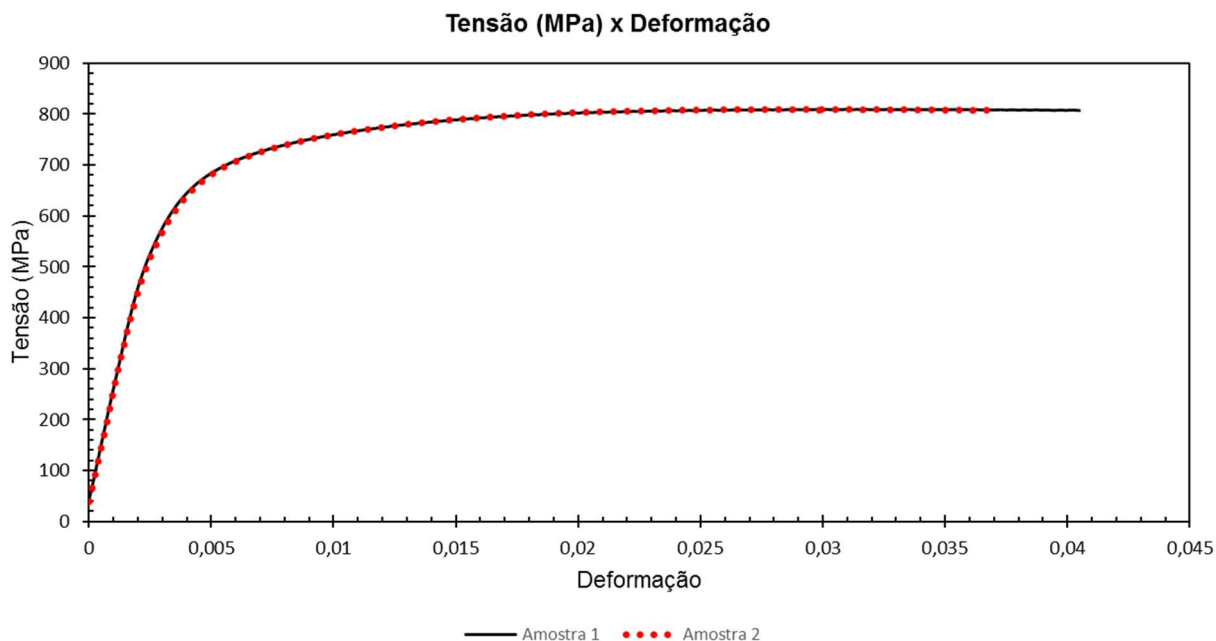
O ensaio de tração foi realizado em dois corpos de prova (Amostra 1 e Amostra 2) e as curvas tensão-deformação das duas amostras estão expostas na Figura 42. Verificou-se que as curvas foram bastante coincidentes e, portanto, estatisticamente os resultados foram pouco dispersos. A ausência de Patamar de Escoamento nas curvas corrobora o fato de que o aço seja AISI 1050, pois nesta classe usualmente esta característica não é evidenciada.

Calculou-se a partir do gráfico Tensão x Deformação as principais propriedades do Material, nomeadamente: Limite de Escoamento, Módulo de Elasticidade e Limite de Resistência, conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas mensuradas a partir do Ensaio de Tração

Propriedades	CP 1	CP 2	Média	Desvio Padrão
Limite de Escoamento (MPa)	692,54	692,80	692,67	0,18
Módulo de Elasticidade (GPa)	187,31	184,22	185,77	2,18
Limite de Resistência (MPa)	809,58	810,35	809,97	0,54

Fonte: Próprio Autor

Figura 42 – Curvas tensão-deformação do aço AISI 1050

Fonte: Próprio Autor

5.3 Ensaio de Queda de Peso em Barra

5.3.1 Cálculo teórico estimado das tensões mecânicas induzidas na barra

Esta abordagem de cálculo considera o estado de proporcionalidade entre tensões e deformações. Além disso, para o cálculo aplicado ao ensaio com a barra, considera-se ainda que não há atrito entre o peso e a barra.

Por isso, o princípio de conservação de energia pode ser aplicado e, pode-se escrever, conforme Gere (2003), em concordância com Di Blasi (1990) que:

$$\sigma_{MAX} = \sigma_{EST} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h \cdot E}{\sigma_{EST} \cdot L} + 1 \right)^{1/2} \right] \quad (19)$$

Neste caso, escolheu-se definir uma massa fixa para o “Peso” de 16,2 Kg, devido à concepção de Projeto do experimento, e, variou-se as alturas de queda para verificar o comportamento da barra em diferentes níveis de Impacto, correlacionando-se também com porcentagens teóricas do limite de escoamento determinado experimentalmente. Ou seja, os esforços submetidos são correspondentes a

porcentagens do valor de tensão do limite de escoamento calculado, teoricamente. Na Tabela 4 apresenta-se os valores de tensões induzida correspondentes às alturas determinadas.

Tabela 4 - Tensões teóricas induzidas na seção Retangular

Massa (Kg)	Altura (mm)	Tensão	
		Induzida (MPa)	% LE
16,2	250	136,7	19,7%
	500	193,2	27,9%
	750	236,5	34,1%
	1000	273,0	39,4%
	1250	305,1	44,1%
	1500	334,2	48,3%

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados das tensões teóricas induzidas na seção cilíndrica, calculados também pela equação 19, mudando somente a área da seção.

Tabela 5 – Tensões teóricas induzidas na Seção Cilíndrica

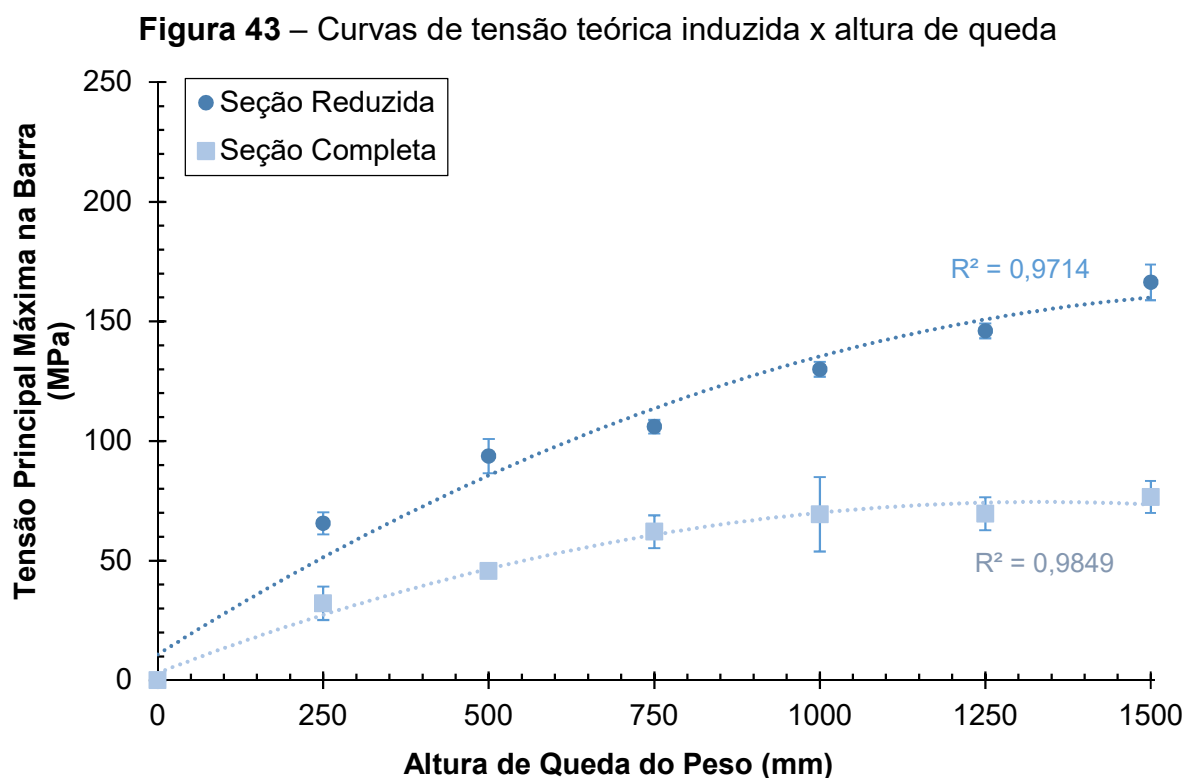
Massa (Kg)	Altura (mm)	Tensão	
		Induzida (MPa)	% LE
16,2	250	85,5	12,3%
	500	120,9	17,5%
	750	148,0	21,4%
	1000	170,9	24,7%
	1250	191,0	27,6%
	1500	209,2	30,2%

Fonte: Próprio Autor

Este cálculo teórico não considera uma redução de seção na estrutura, devido à consideração de que as tensões são uniformes ao longo do volume da barra, para o balanceamento de energias. Desse modo, optou-se por fazer cálculos abordando uma barra com a seção completamente cilíndrica, bem como abordando uma barra com

seção completamente retangular, com dimensões correspondentes à barra real, no intuito de estabelecer um intervalo comparativo.

A Figura 43 representa uma comparação entre as curvas de tensão teórica induzida para a seção completa e para a seção reduzida, ambas com uma linha de tendência quadrática, com valor R^2 em torno de 0,98, indicando uma correlação significativa.



É importante ressaltar que, na equação teórica, a relação entre a tensão teórica induzida e a altura é em função de uma raiz quadrada, no entanto, optou-se por utilizar uma função quadrática, devido à facilidade de identificação e criação deste tipo de linha de tendência no programa utilizado (Excel), em contrapartida à indisponibilidade de criar linhas de tendência com funções de raiz quadrada nos softwares mais usuais (Excel e Origin).

Além disso, analisando matematicamente, verifica-se que, em determinada porção, uma função quadrática pode se assemelhar significativamente à uma função de raiz quadrada, desde que não ultrapasse o ponto crítico da parábola de concavidade pra baixo.

A razão de proporcionalidade teórica entre a seção retangular e a seção cilíndrica é de aproximadamente 60%, para quaisquer das alturas, de acordo com os cálculos realizados. Ou seja, teoricamente, as tensões mecânicas da seção retangular devem ser aproximadamente 60% maiores do que as tensões na seção cilíndrica.

No entanto, conforme discutido anteriormente, devido às limitações do cálculo teórico, não é possível executar uma análise que permita reproduzir a situação real de transição e de distribuição de tensões entre as seções de diferentes dimensões e, por isso, procedeu-se com essa analogia comparativa simplificada para correlacionar a teoria com a prática.

5.3.2 Análises de tendências das tensões mecânicas no conjunto barra-peso por extensometria (*strain gage*)

As análises do impacto de queda de peso foram realizadas em 3 fases de acordo com modificações de projeto e configurações experimentais comentadas anteriormente. Primeiramente, atenta-se para as siglas de identificações dos *strain gage* já definidas, e para as cores das curvas correspondentes a cada fase do trabalho experimental, relacionadas no quadro 6.

Quadro 6 – Cores de identificação das fases do experimento nos gráficos

PRETO	1ª fase
VERMELHO	2ª fase
VERDE	3ª fase

Fonte: Próprio Autor

A taxa de amostragem utilizada nas três fases foi de cinco medidas para cada uma das seis alturas de queda, de modo que, além de identificar o comportamento mecânico ao longo do tempo de ensaio, foi possível executar os cálculos dos valores médios e respectivos desvios-padrão destas tensões mecânicas, com o intuito de identificar a tendência das tensões máximas (de pico) com relação a altura de queda, dentre outros aspectos correlacionados.

Na Tabela 6 apresenta-se os valores médios das tensões mecânicas máximas, ou seja, tensões de pico, para cada altura de queda na primeira fase de testes.

Tabela 6 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura (1ª fase de testes)

ALTURA DE QUEDA	BARRA	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	PESO	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
250mm	SGB1 inferior	57,8	5,4	SGP superior	36,7	3,5
	SGB2 inferior	75,3	10,3	SGP inferior	11,2	1,6
	SGB superior	83,7	2,3	-	-	-
	RB Superior	65,6	4,6	-	-	-
500mm	SGB1 inferior	90,5	8,7	SGP superior	20,3	6,8
	SGB2 inferior	110,8	7,1	SGP inferior	19,6	5,5
	SGB superior	97,9	6,5	-	-	-
	RB Superior	93,6	7,1	-	-	-
750mm	SGB1 inferior	111,8	14,6	SGP superior	25,6	5,7
	SGB2 inferior	139,3	13,6	SGP inferior	24,6	5,6
	SGB superior	120,1	4,1	-	-	-
	RB Superior	105,9	2,8	-	-	-
1000mm	SGB1 inferior	149,3	18,0	SGP superior	-	-
	SGB2 inferior	147,2	12,6	SGP inferior	21,8	6,8
	SGB superior	139,9	5,0	-	-	-
	RB Superior	130,0	3,1	-	-	-
1250mm	SGB1 inferior	176,4	11,0	SGP superior	-	-
	SGB2 inferior	160,2	14,8	SGP inferior	30,1	5,0
	SGB superior	167,3	7,2	-	-	-
	RB Superior	146,0	3,0	-	-	-
1500mm	SGB1 inferior	187,0	10,1	SGP superior	-	-
	SGB2 inferior	178,5	13,4	SGP inferior	37,6	9,4
	SGB superior	205,8	10,8	-	-	-
	RB Superior	166,3	7,4	-	-	-

Fonte: Próprio Autor

Na 1ª fase, o SGP superior se rompeu visivelmente a partir da altura de 1000mm e, por isso, a aquisição de dados excepcionalmente neste canal foi interrompida a partir dessa altura. Na Tabela 7 apresenta-se os respectivos valores para a 2ª fase de testes:

Tabela 7 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura
(2ª fase de testes)

ALTURA DE QUEDA	BARRA	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	PESO	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
250mm	SGB inferior	42,3	1,6	SGP superior	45,8	11,8
	SGBC inferior	30,7	11,8	SGP inferior	27,3	6,5
	RB superior	73,7	4,6	RP	38,4	6,8
	RBC inferior	23,5	5,2			
	RBC superior	27,1	2,6			
500mm	SGB inferior	99,3	12,0	SGP superior	76,9	11,9
	SGBC inferior	25,3	5,2	SGP inferior	32,9	6,2
	RB superior	95,7	4,6	RP	89,9	14,4
	RBC inferior	68,5	1,6			
	RBC superior	49,1	1,1			
750mm	SGB inferior	136,0	2,3	SGP superior	127,1	20,5
	SGBC inferior	28,1	6,2	SGP inferior	40,2	10,8
	RB superior	124,2	3,8	RP	212,5	164,6
	RBC inferior	87,2	1,7			
	RBC superior	56,7	1,4			
1000mm	SGB inferior	152,9	7,5	SGP superior	108,7	11,8
	SGBC inferior	29,4	3,2	SGP inferior	48,1	25,3
	RB superior	131,5	10,5	RP	434,2	182,2
	RBC inferior	93,8	8,0			
	RBC superior	62,8	4,3			
1250mm	SGB inferior	160,9	2,3	SGP superior	114,3	16,7
	SGBC inferior	29,0	4,2	SGP inferior	48,3	13,6
	RB superior	149,5	12,4	RP	460,3	54,8
	RBC inferior	96,6	7,0			
	RBC superior	70,2	1,8			
1500mm	SGB inferior	222,2	14,4	SGP superior	96,6	11,3
	SGBC inferior	100,2	2,6	SGP inferior	35,2	3,3
	RB superior	169,1	17,4	RP	354,3	169,1
	RBC inferior	106,4	10,4			
	RBC superior	73,6	7,4			

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 8 apresenta-se os respectivos valores para a 3ª fase de testes:

Tabela 8 - Valores médios das Tensões Mecânicas máximas (MPa) para cada altura (3ª fase de testes)

ALTURA DE QUEDA	BARRA	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	PESO	$\sigma_{\text{Média}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
250mm	SGB inferior	52,2	8,5	SGP superior	95,8	12,6
	SGBC inferior	21,2	8,1	SGP inferior	11,5	1,8
	RBC inferior	20,2	7,6	RP	225,5	128,8
	RBC superior	32,2	7,0			
500mm	SGB inferior	83,6	16,7	SGP superior	85,7	22,9
	SGBC inferior	23,4	5,0	SGP inferior	16,0	5,9
	RBC inferior	38,8	17,4	RP	219,2	14,4
	RBC superior	45,7	2,6			
750mm	SGB inferior	146,2	16,3	SGP superior	96,6	7,0
	SGBC inferior	27,5	1,8	SGP inferior	24,4	12,5
	RBC inferior	87,2	8,3	RP	327,0	50,5
	RBC superior	62,1	6,9			
1000mm	SGB inferior	170,2	9,4	SGP superior	128,6	21,9
	SGBC inferior	28,7	4,2	SGP inferior	28,4	11,8
	RBC inferior	92,4	8,0	RP	330,8	44,5
	RBC superior	69,4	15,5			
1250mm	SGB inferior	186,5	16,8	SGP superior	103,3	17,9
	SGBC inferior	30,9	5,4	SGP inferior	26,8	7,1
	RBC inferior	100,6	17,8	RP	292,8	281,4
	RBC superior	69,6	10,0			
1500mm	SGB inferior	156,9	16,8	SGP superior	-	-
	SGBC inferior	66,9	10,6	SGP inferior	-	-
	RBC inferior	48,2	3,7	RP	-	-
	RBC superior	76,6	6,7			

Fonte: Próprio Autor

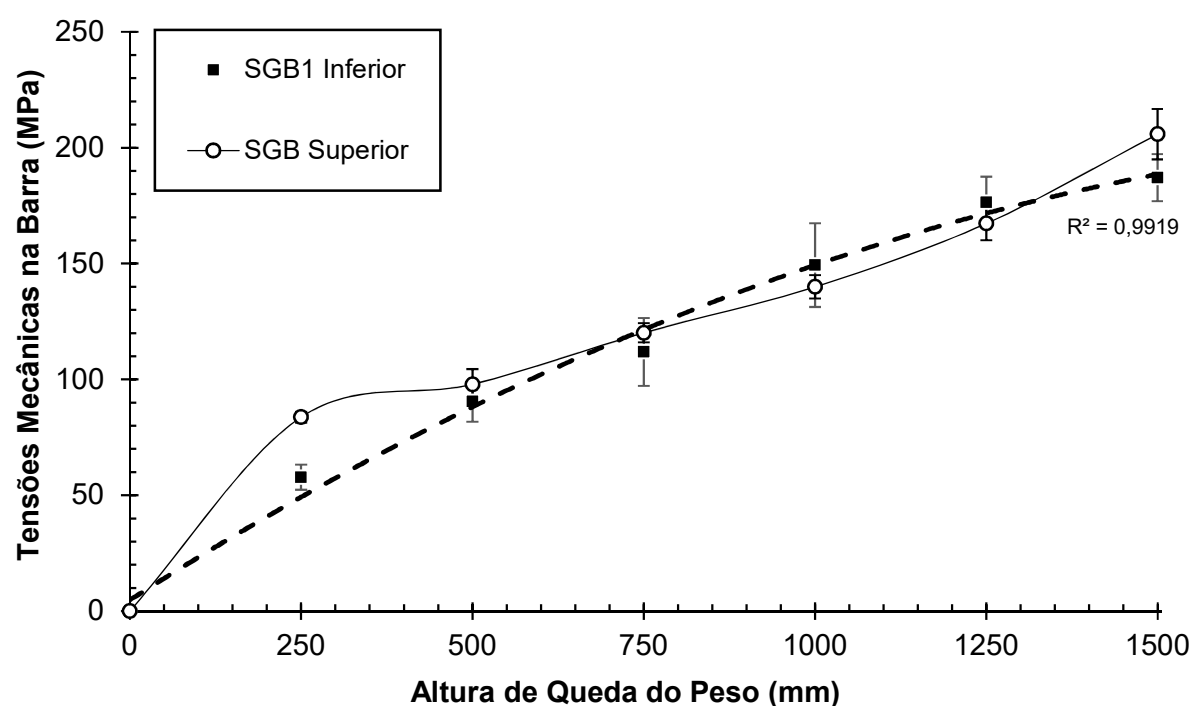
Ressalta-se que estes valores médios de tensão expostos nas Tabelas supracitadas representam uma seleção de cinco resultados mais coincidentes, retirados de uma gama de repetições. Essa amostragem foi necessária, porque, inúmeras vezes, precisou-se refazer as soldas dos *strain gage*, visto que alguns destes foram

danificados e até destruídos ao longo das fases pelos efeitos de impacto. Essa danificação dos mesmos será discutida minuciosamente em tópico posterior, pois estas condições experimentais poderiam levar a uma interpretação equivocada de resultados, caso tivessem sido identificados incorretamente.

As análises a seguir abrangem a identificação de tendências de comportamento mecânico relacionadas a todas as peculiaridades dos componentes estruturais metálicos (barra e peso), bem como às especificidades das condições de experimentação de cada fase, e de projeto.

Na Figura 44 exprime-se a tendência dos valores médios das tensões mecânicas entre a seção reduzida superior e inferior medidas pelos *strain gage* uniaxiais (SGB1 inferior e SGB superior).

Figura 44 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas entre a seção reduzida superior e inferior



Fonte: Próprio Autor

As tensões da seção reduzida inferior seguem um comportamento parabólico, com correlação significativa entre as variáveis tensão mecânica e altura de queda, corroborando a concepção de tendência do cálculo teórico. Ao extrapolar essa curva

no eixo x, provavelmente ficaria perceptível a tendência a um pico máximo, pois a porção da curva no gráfico é crescente, no entanto a taxa de crescimento diminui à medida que se aumenta a altura de queda.

Ressalta-se que o intervalo para definir uma correlação significativa foi baseado no valor de R^2 da aproximação parabólica da tendência das curvas teóricas, que girou em torno de 0,98, com um intervalo de 0,01 de variação, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior é a correlação entre as variáveis tensão e altura.

Presume-se que, este suposto pico máximo de tensão, provavelmente poderia ter certa associação a um limite de escoamento do material sob cargas dinâmicas, caso fosse possível uma padronização mais eficiente do protótipo, culminando-se com a criação de um ensaio de tração dinâmico normatizado, de modo que as condições de projeto não tivessem tanto efeito nos resultados.

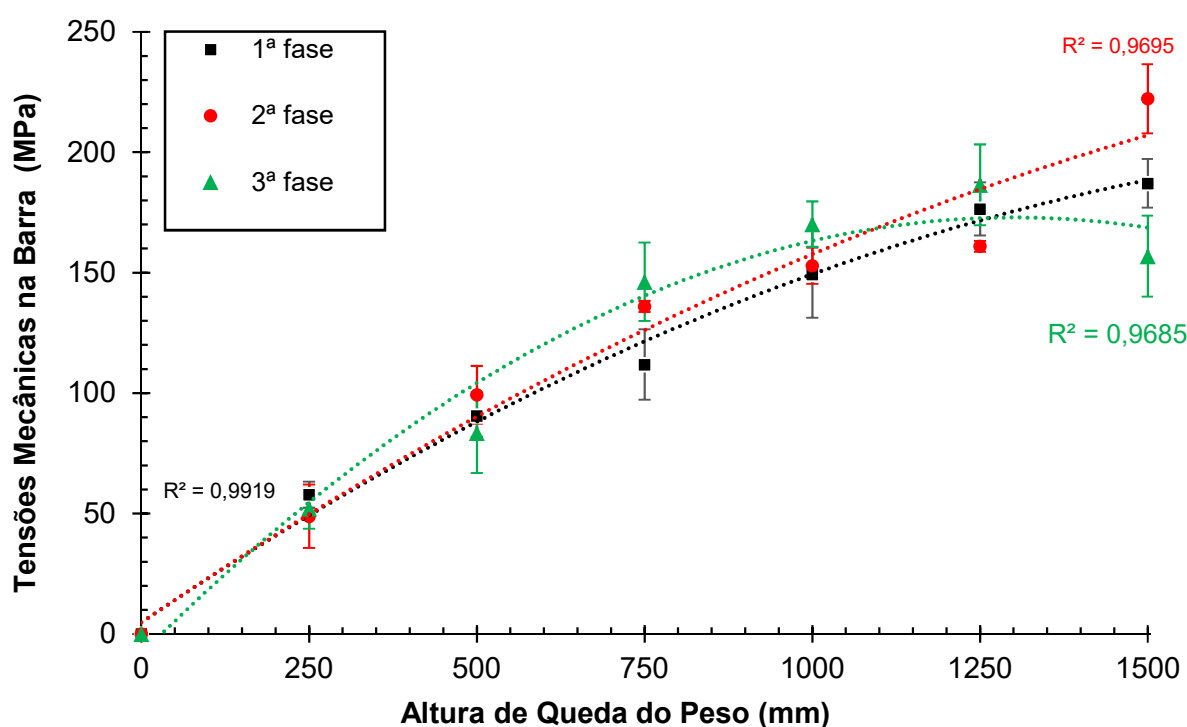
As condições mais controladas e definidas nos experimentos de barra de *Hopkinson*, por exemplo, permitem a obtenção de curvas tensão-deformação, para várias taxas de deformação, podendo definir melhor algumas propriedades do material relacionadas ao seu comportamento dinâmico. No entanto, como este experimento também utiliza *strain gage*, ainda perdura a impossibilidade de uma avaliação minuciosa do comportamento em regime plástico. (RAMESH, 2008)

Houve uma certa não uniformidade de tendência dos valores médios das tensões na porção superior (SGB superior), sendo mais discrepante o valor na altura de 250 mm. Algumas condições podem ser responsáveis por essa variabilidade, sendo as mais plausíveis: a diferença de propagação das ondas de tensão ao longo da barra e a variabilidade no rebatimento do peso no flange que pode promover um carregamento diferenciado entre as faces opostas do local de medição (seção reduzida).

Na Figura 45 apresenta-se um gráfico de tendência dos valores médios das tensões mecânicas no SGB1 inferior para as três fases, sendo que, este foi um dos únicos *strain gage* que não apresentou danos visíveis em nenhum dos seus componentes (terminais, fios, corpo principal) no decorrer das fases.

Desse modo, foi possível identificar uma correlação significativa em todas as fases por meio de linhas de tendência parabólicas, sendo o maior valor médio de tensão identificado na 2ª fase de 222,2 MPa (cerca de três vezes menor do que o limite de escoamento do material). Uma peculiaridade de comportamento foi identificada na terceira fase, que se refere ao ponto crítico da curva, localizando-se antes do valor mensurado na queda de 1500 mm. Acredita-se que houve um indício do início de falha no *strain gage*, visto que este valor corresponde às últimas quedas realizadas, dentre todos os experimentos desde a primeira fase.

Figura 45 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGB1 inferior



Fonte: Próprio Autor

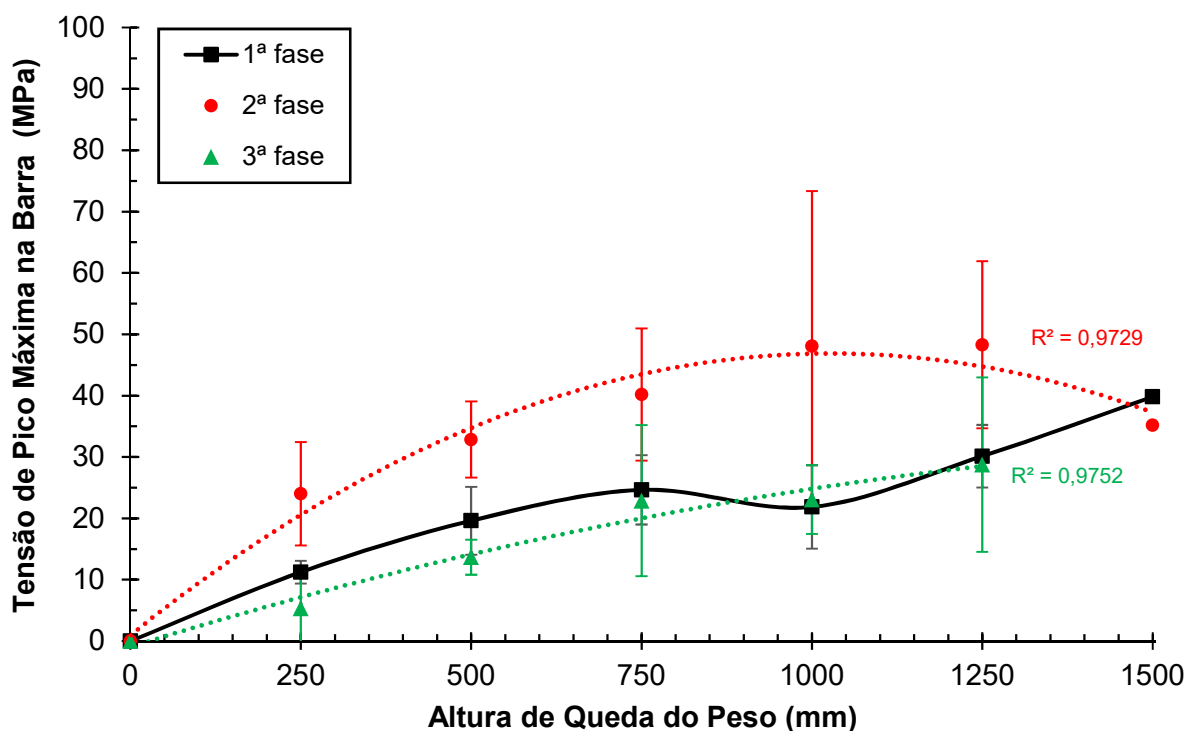
Na Figura 46 aborda-se os gráficos de tendência para o SGP inferior demonstrando que na 2ª e 3ª fase os valores médios de tensões seguem um perfil com correlação razoável, enquanto que na 1ª fase os valores não seguem um perfil definido principalmente devido ao valor de 21,8 MPa referente à queda da altura de 1000m.

Verificam-se duas condições principais para este comportamento na 1ª fase, que, provavelmente influenciaram o valor subestimado na altura de queda de 1000 mm:

Rotação da barra na rosca da plataforma superior e Influência das placas da ponte de Wheatstone que estavam fixadas ao Peso e caíam junto com o mesmo nesta fase.

Além disso, vale ressaltar que os desvios-padrão da 2ª fase possuem valores significativos com relação aos desvios da 3ª fase, promovendo um indício de que a colocação das placas que completam o 1/4 da Ponte de Wheatstone em uma estrutura completamente fora da estrutura principal foi favorável, principalmente para o Peso.

Figura 46 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGP inferior



Fonte: Próprio autor

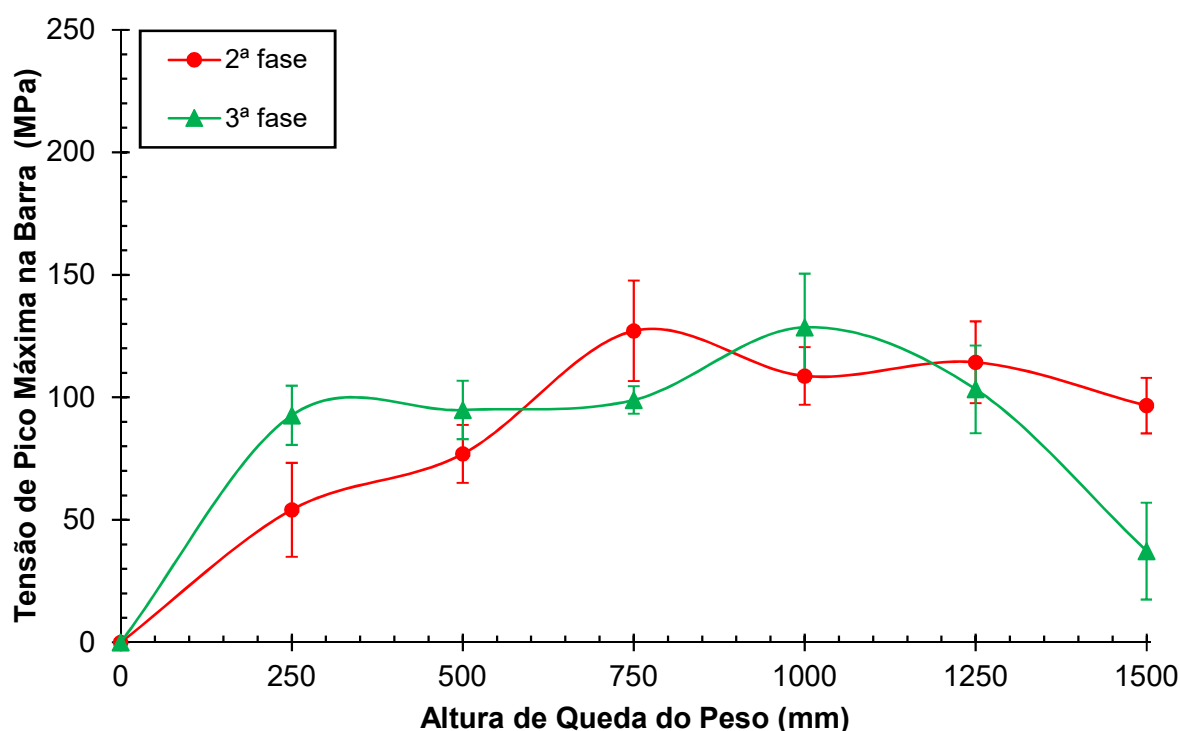
Verifica-se ainda que não foi abordado o valor médio de tensão para a altura de 1500mm na 3ª fase. A impossibilidade de mensurar esse valor médio ocorreu porque houve uma falha no terminal do *strain gage*, que provocou o seu rompimento, neste último conjunto de ensaios, apresentando um pico exacerbado (>3000 MPa) de tensões mecânicas, que não condizem com os demais valores.

Na Figura 47 revela-se os gráficos dos valores médios de tensões mecânicas para o SGP superior, na 2ª e 3ª fase, sendo que em nenhum dos casos conseguiu-se

identificar uma tendência parabólica, e, na 1ª fase, houve danificação da ligação do *strain gage* (terminal).

Além disso, é perceptível pela análise dos desvios-padrão na Figura 46 e 47, que a variabilidade de comportamento de medidas no peso é muito maior do que na Barra. Isso pode ocorrer devido ao peso não se chocar sempre da mesma forma com o flange, ou seja, os mesmos não tem um encaixe ideal, conforme cita a concepção teórica.

Figura 47 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas no SGP superior



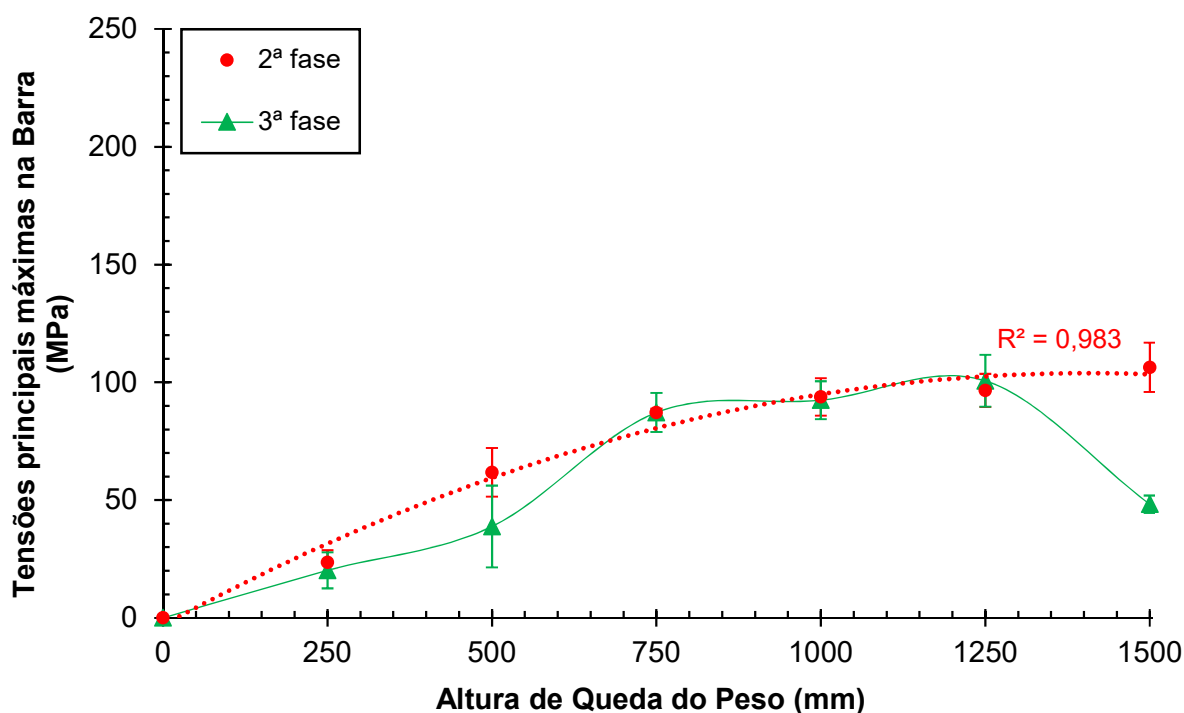
Outra grande possibilidade de influência nas leituras de tensão no peso é a movimentação dos cabos ligados aos *strain gage*, visto que eles estão mais sujeitos à influência das ondas de tensão devido à inércia inerente, ao caírem junto com o Peso. Ou seja, a possibilidade de influência de uma sobretensão no terminal de ligação que se transmite ao *strain gage* é grande e, portanto, as leituras podem não estar fielmente associadas à deformação do conjunto em si.

A Figura 48 revela os gráficos para a RBC inferior demonstrando que na 2ª fase foi possível estabelecer uma linha de tendência com boa correlação, que demonstra o

comportamento crescente das tensões principais máximas na seção completa da barra.

No entanto, na 3ª fase, essa tendência não foi satisfeita, provavelmente por falhas dos terminais no decorrer do tempo com as quedas sucessivas, claramente visíveis em diversos canais. Ou seja, no caso da barra percebe-se que a mudança da posição das placas da Ponte de Wheatstone não foi condição suficiente para eliminar a variabilidade de resultados, ou seja, a influência das mesmas parece não ter sido significativa neste caso.

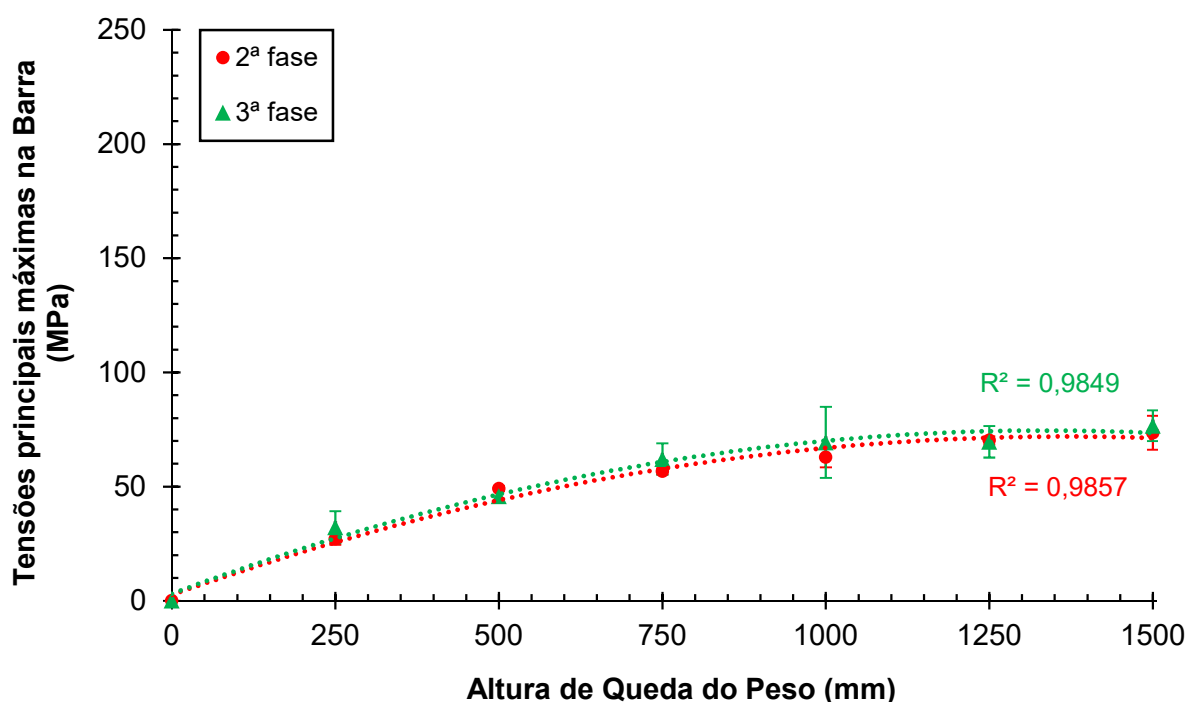
Figura 48 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas na RBC inferior



Fonte: Próprio autor

A Figura 49 revela as curvas para a RBC superior demonstrando que, tanto na 2ª fase quanto na 3ª fase, foi possível estabelecer uma linha de tendência com boa correlação, e, além disso, as curvas são muito próximas, demonstrando novamente que a influência da localização das placas para ligação em ¼ de ponte de Wheatstone parece não ser significativa para a magnitude das Tensões máximas nas Rosetas da Seção Completa.

Figura 49 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas na RBC superior

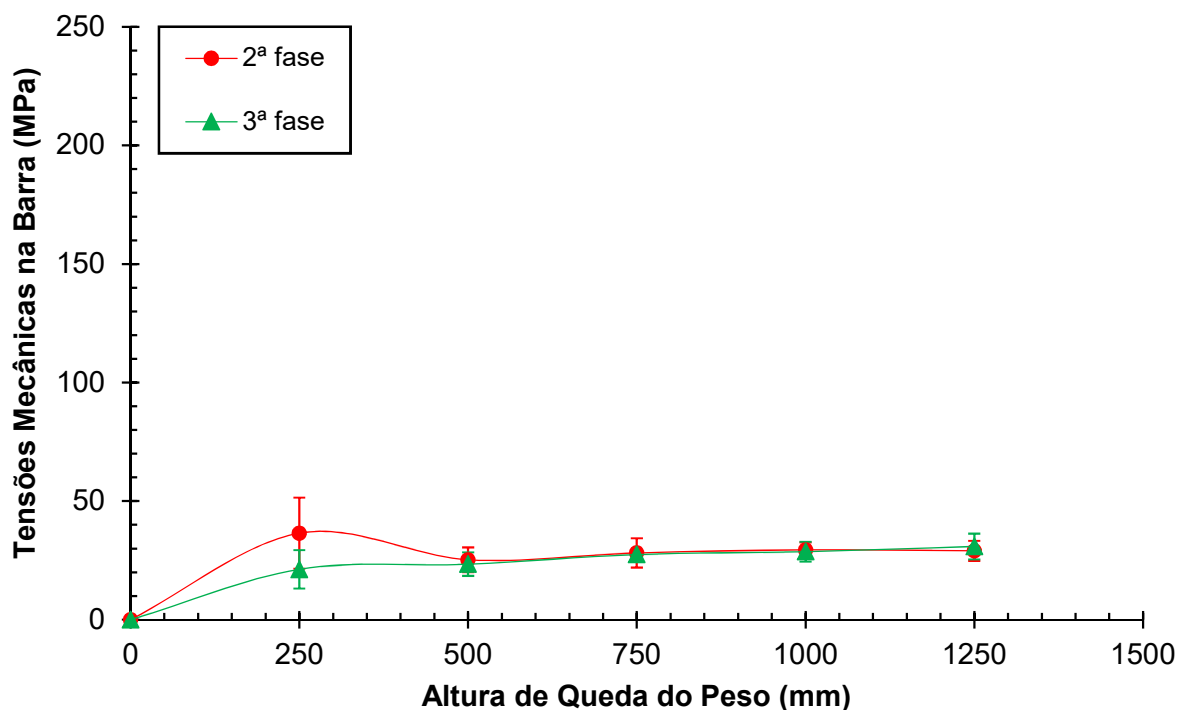


Fonte: Próprio autor

Avaliando-se o *strain gage* uniaxial da Seção Completa (SGBC), localizado na porção inferior, verifica-se que a grande maioria dos valores médios de tensão ficaram entre 20 e 30 MPa, conforme ampliação presente na Figura 50. Uma das hipóteses para essa constância de valores refere-se ao fato da possibilidade das ondas de tensão serem amortecidas antes mesmo de se transmitir ao *strain gage*, visto que, na 2ª e 3ª fase, o impacto com o flange ocorre acima do ponto de medição devido à nova concepção de projeto.

Além disso, isso também pode ser considerado como um indício de ineficiência na colagem do *strain gage*, pois as tensões reais parecem não estar sendo transmitidas, mantendo-se sempre no mesmo intervalo, apesar da grande variação de altura de queda. No entanto, visivelmente não foram verificados problemas de colagem.

Figura 50 - Gráfico de tendência dos valores médios das Tensões Mecânicas máximas no SGBC inferior

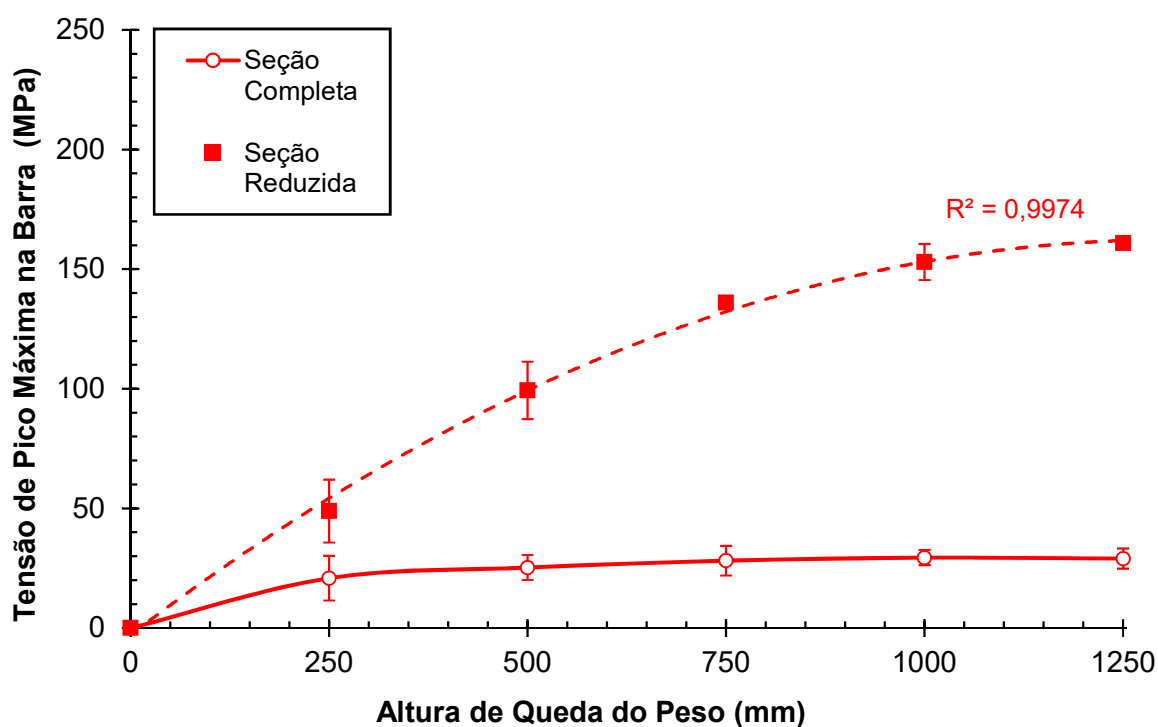


Além disso, verificou-se valores exacerbados de tensões mecânicas nas quedas de 1500mm (>3000 MPa), que obviamente não seguem a tendência exposta na Figura 48, provavelmente devido à falhas nos terminais de conexão dos *strain gage*, que poderão ser verificadas em fotografias de todos os referidos *strain gage* na próxima seção do trabalho.

A Figura 51 visa comparar as tensões na seção completa e na seção reduzida para a leitura por meio de *strain gage* uniaxiais localizados na porção inferior. Escolheu-se os dados da 2ª fase por possuir a linha de tendência com maior correlação, bem como menores desvios-padrão no geral.

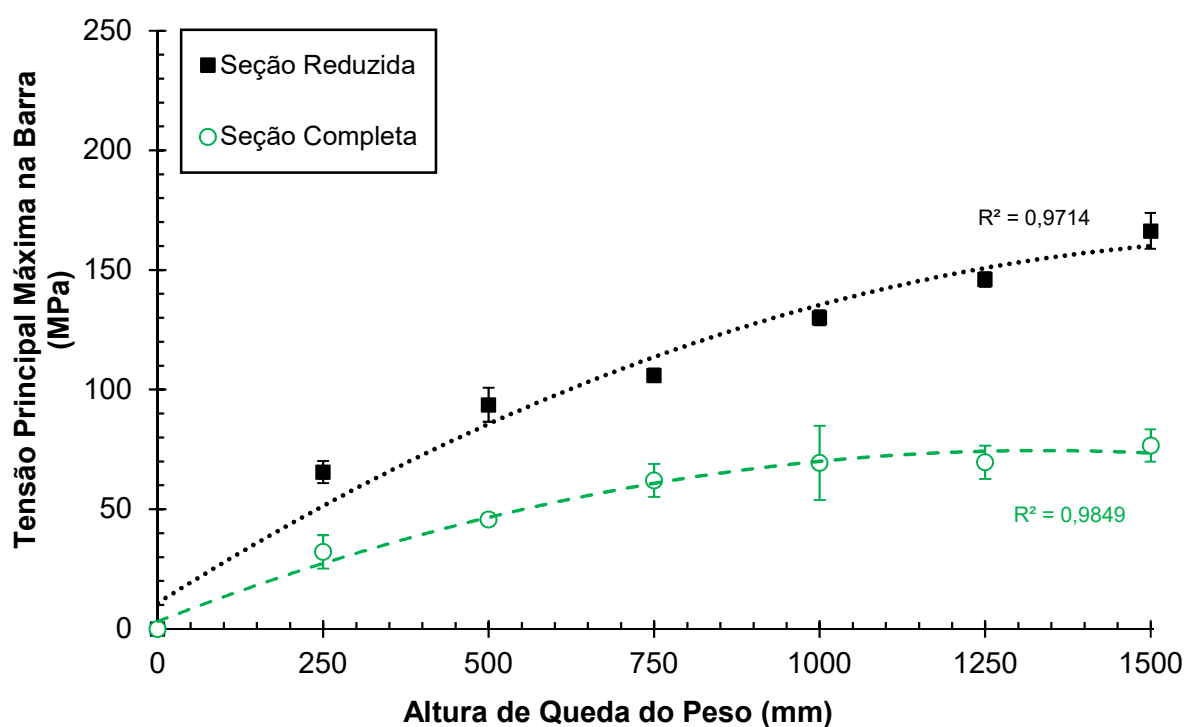
A Figura 52 visa comparar as tensões principais na seção reduzida (1ª fase) e na seção completa (3ª fase) para Rosetas localizadas na porção superior da estrutura, considerando somente as tensões máximas.

Figura 51 - Gráfico de comparação entre as tensões na seção completa e na seção reduzida para *strain gage* uniaxiais (2ª fase)



Fonte: Próprio autor

Figura 52 - Gráfico de comparação entre as tensões principais na seção reduzida (1ª fase) e na seção completa (3ª fase) para Rosetas Superiores



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 9 apresenta as razões de proporcionalidade entre as tensões mecânicas na seção reduzida e na seção completa, conforme comparações expostas nas Figuras 51 e 52. Estas razões apresentaram magnitude significativa, principalmente nas avaliações com *strain gage* uniaxiais.

Tabela 9 - Razões de proporcionalidade entre as tensões mecânicas na Seção Reduzida e na Seção Completa

Altura de Queda (mm)	Razão de Proporcionalidade SG Uniaxiais (Inferiores)	Razão de Proporcionalidade Roseta (Superiores)
250	135%	104%
500	293%	105%
750	383%	71%
1000	420%	87%
1250	455%	110%
1500	-	117%

Acredita-se que estes valores altos de razão de proporcionalidade, todos maiores que a razão de proporcionalidade teórica (60%), indicam que a seção reduzida se tornou um concentrador de tensões da estrutura e, por isso, as razões de proporcionalidade entre as tensões induzidas são maiores para alturas maiores, tanto na porção superior da estrutura quanto na porção inferior, de modo que quanto maior o esforço submetido à estrutura, maior foi a concentração da tensão na seção reduzida.

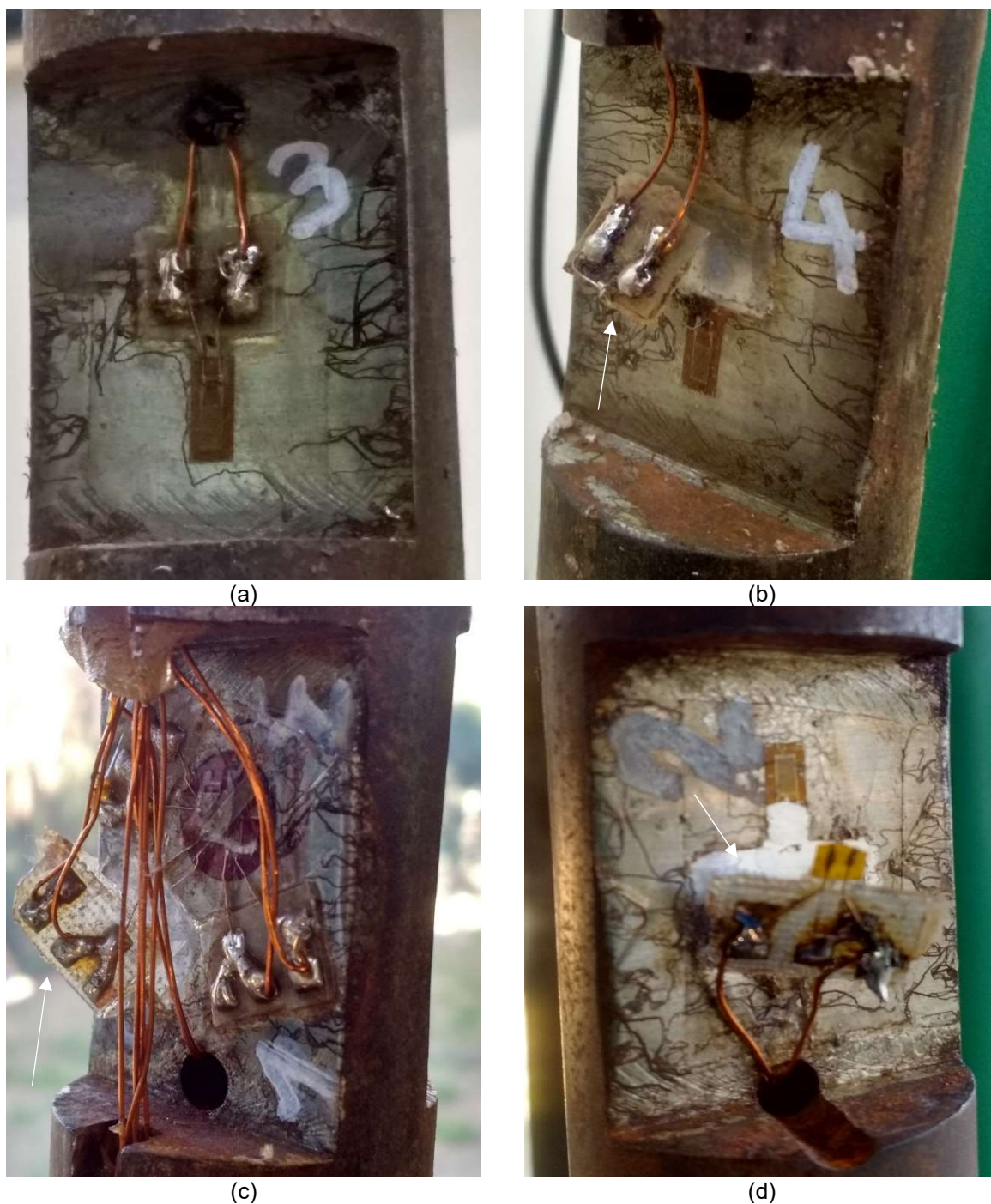
Além disso, há de se levar em consideração que o cálculo teórico abrange diversas condições simplificadoras que destoam da condição real de experimento, como, por exemplo:

- encaixe ideal do peso no flange x Rebatimento do peso no flange
- ausência de atrito entre barra e peso x Presença de atrito entre barra e peso
- uniformidade de tensões ao longo da barra de mesma seção x Não uniformidade de tensões ao longo da barra com uma redução abrupta de tensão.

5.3.3 Identificação visual de danos na ligação dos *strain gage*

Procedeu-se com a identificação visual por meio de fotografias dos danos na ligação dos *strain gage*. Na Figura 53 verifica-se os danos nos *strain gage* da seção reduzida, que serão detalhados na sequência:

Figura 53 – Identificação visual dos *strain gage* nas seções reduzidas

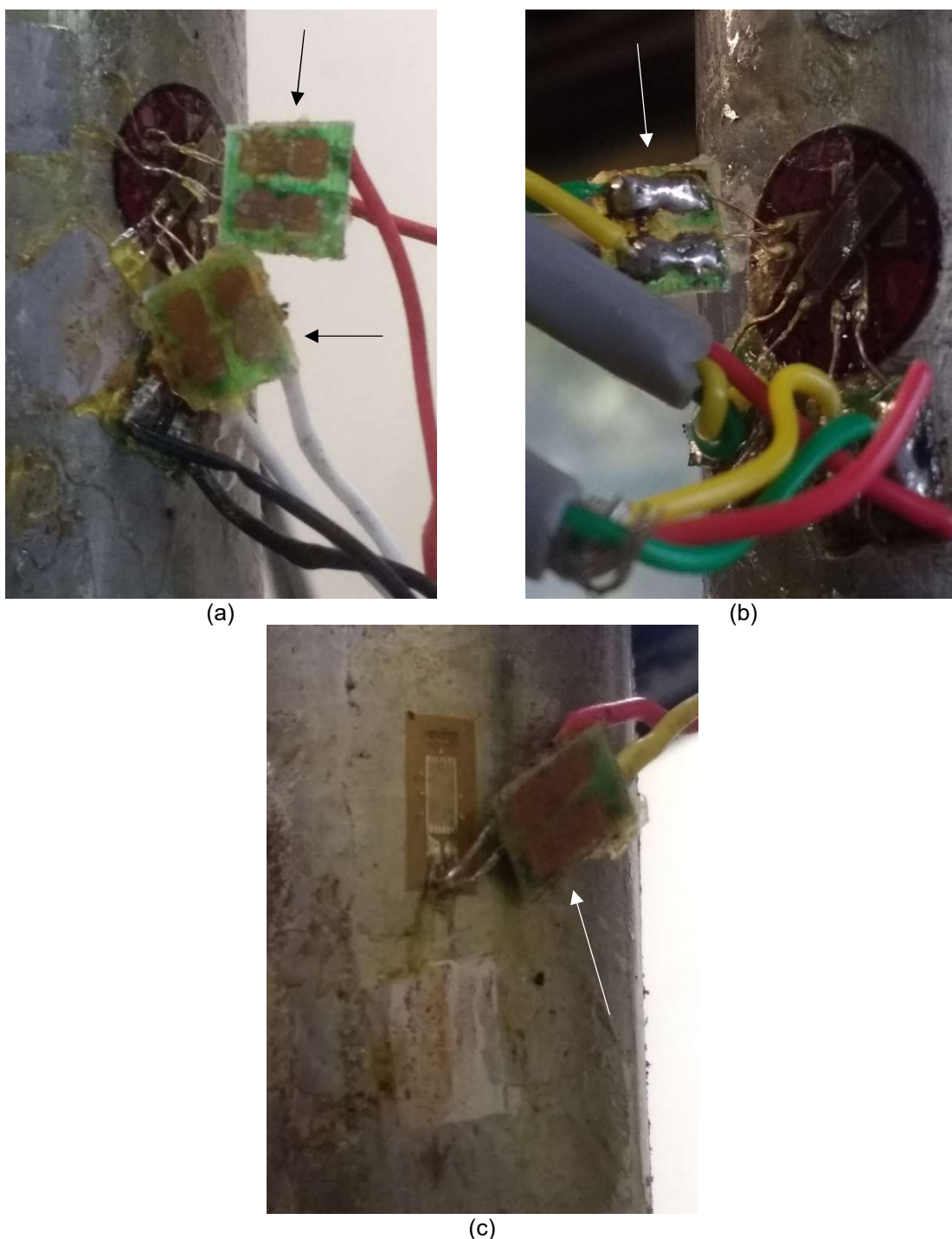


(a) SGB1 inferior; (b) SGB2 inferior e (c) RB superior (d) SGB superior

Fonte: Próprio Autor

- (a) Não foi detectado dano aparente
- (b) Terminal se descolou da estrutura e rompeu a ligação com o *strain gage*
- (c) Terminal do *strain gage* diagonal da Roseta se descolou da estrutura
- (d) Terminal se deslocou da estrutura e rompeu o *strain gage*

Figura 54 – Identificação visual dos *strain gage* nas seções completas



(a) RBC inferior; (b) RBC superior e (c) SGBC inferior

Fonte: Próprio Autor

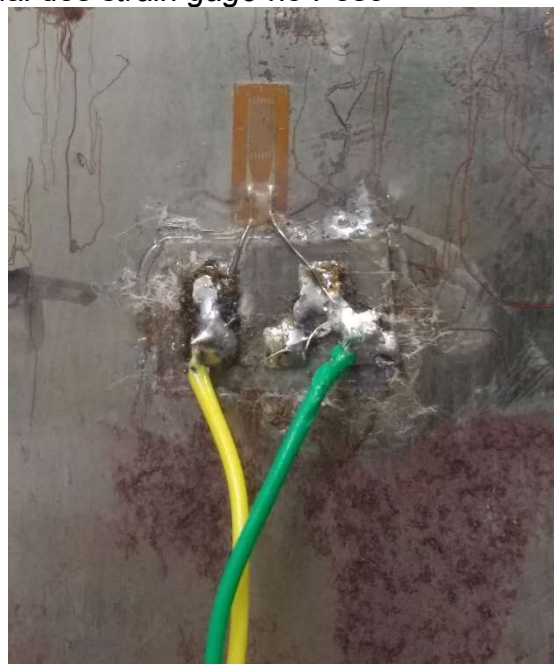
Pela Figura 54 é possível perceber claramente os seguintes danos:

- (a) Terminais dos *strain gage* diagonal e horizontal se descolaram da estrutura
- (b) Terminal do *strain gage* horizontal se descolou da estrutura
- (c) Terminal se descolou da estrutura, mas não rompeu o *strain gage*.

Figura 55 – Identificação visual dos *strain gage* no Peso



(a)



(b)



(c)

(a) SGP inferior; (b) SGP superior e (c) RP

Fonte: Próprio Autor

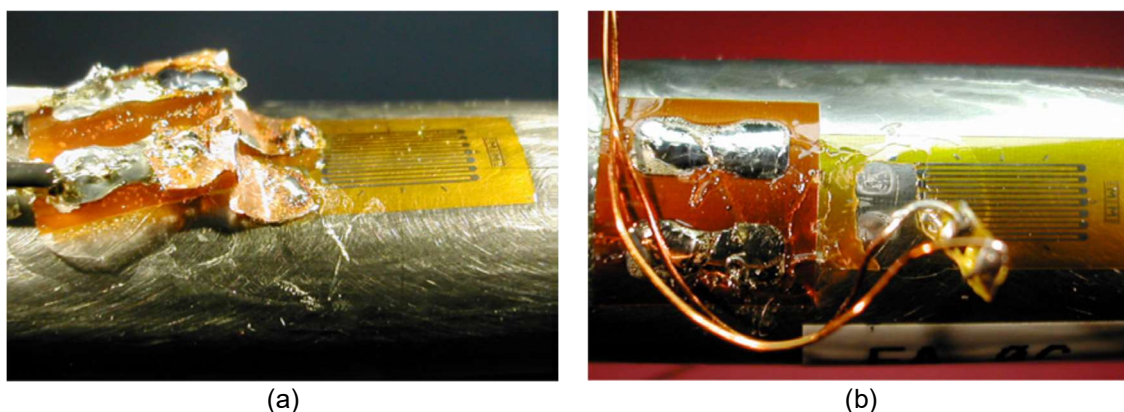
Pela Figura 55 é possível perceber claramente as seguintes condições dos *strain gage* e seus terminais de ligação, no peso:

- (a) Terminal se descolou da estrutura e rompeu o *strain gage*.
- (b) Não foi detectado dano aparente
- (c) Não foi detectado dano aparente

De acordo com as observações relatadas em Bolduc e Arsenault (2012), percebeu-se a similaridade das falhas encontradas nos *strain gage* do referido artigo em relação aos *strain gage* utilizados no desenvolvimento deste trabalho, causados provavelmente por qualidade e tipo de material dos fios de ligação, colagem do *strain gage*, soldagem dos fios na aquisição de dados e dos fios do *strain gage* no terminal.

Nos testes relatados em Bolduc e Arsenault (2012) explica-se que o terminal de conexão é a ligação entre o *strain gage* e a instrumentação, e, em carregamentos de impacto, o mesmo deve ser capaz de suportar a aceleração a deformação elástica de si mesmo, sem perder a adesão com a superfície impactada e, principalmente, deve suportar a inércia dos fios condutores que induzidos pela onda de tensão elástica para não incitar em sobretensão no *strain gage*. Neste mesmo trabalho são executados testes para melhorar o comportamento dos terminais, obtendo resultados visuais intermediários similares aos encontrados nos testes de queda de peso em barra, conforme pode ser observado na Figura 56 (a) e (b).

Figura 56 – Falhas do terminal de ligação e do *strain gage* em um teste de barra de Hopkinson

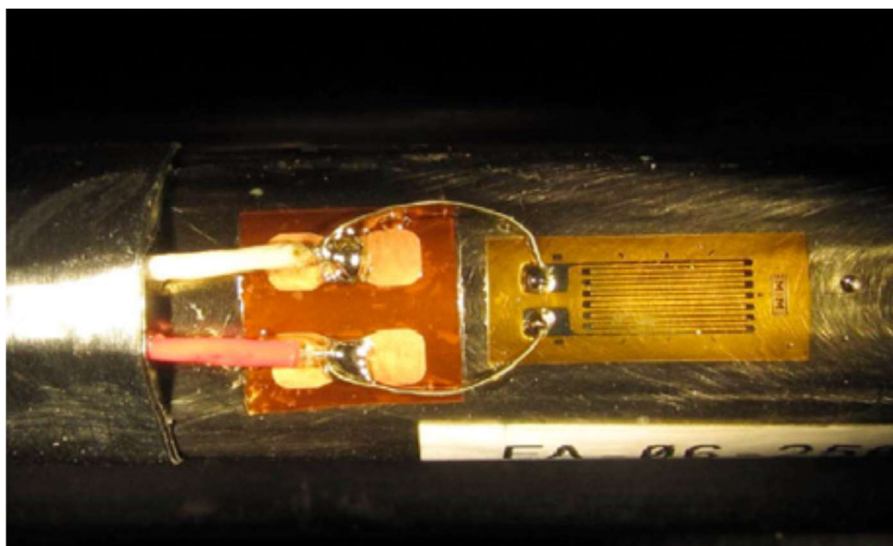


(a) Falha no terminal, (b) Falha no *strain gage*

Fonte: BOLDUC; ARSENAULT, 2012, p.3

No último teste, um resultado satisfatório foi obtido quando se utilizou uma quantidade mínima de solda para fazer a ligação dupla do terminal com os fios do *strain gage* e com os fios para aquisição de dados e, além disso, os fios de ligação com o *strain gage* foram mais compridos e deslocados para as extremidades, com intuito de aumentar a força necessária para deslocá-los. Essa melhoria nas propriedades foi pautada no fato de que uma menor quantidade de solda implica em uma menor tensão no terminal, devido à diferença de elasticidade dos mesmos, como pode ser visto na Figura 57. (BOLDUC; ARSENAULT, 2012)

Figura 57 – Condição ideal de ligação para evitar danos nos terminais de ligação



Fonte: BOLDUC; ARSENAULT, 2012, p.3

Nos resultados dos testes de queda de peso em barra verificou-se principalmente o descolamento destes terminais no decorrer dos ensaios, principalmente para as alturas de queda de 1500mm, que levam à um carregamento maior da estrutura.

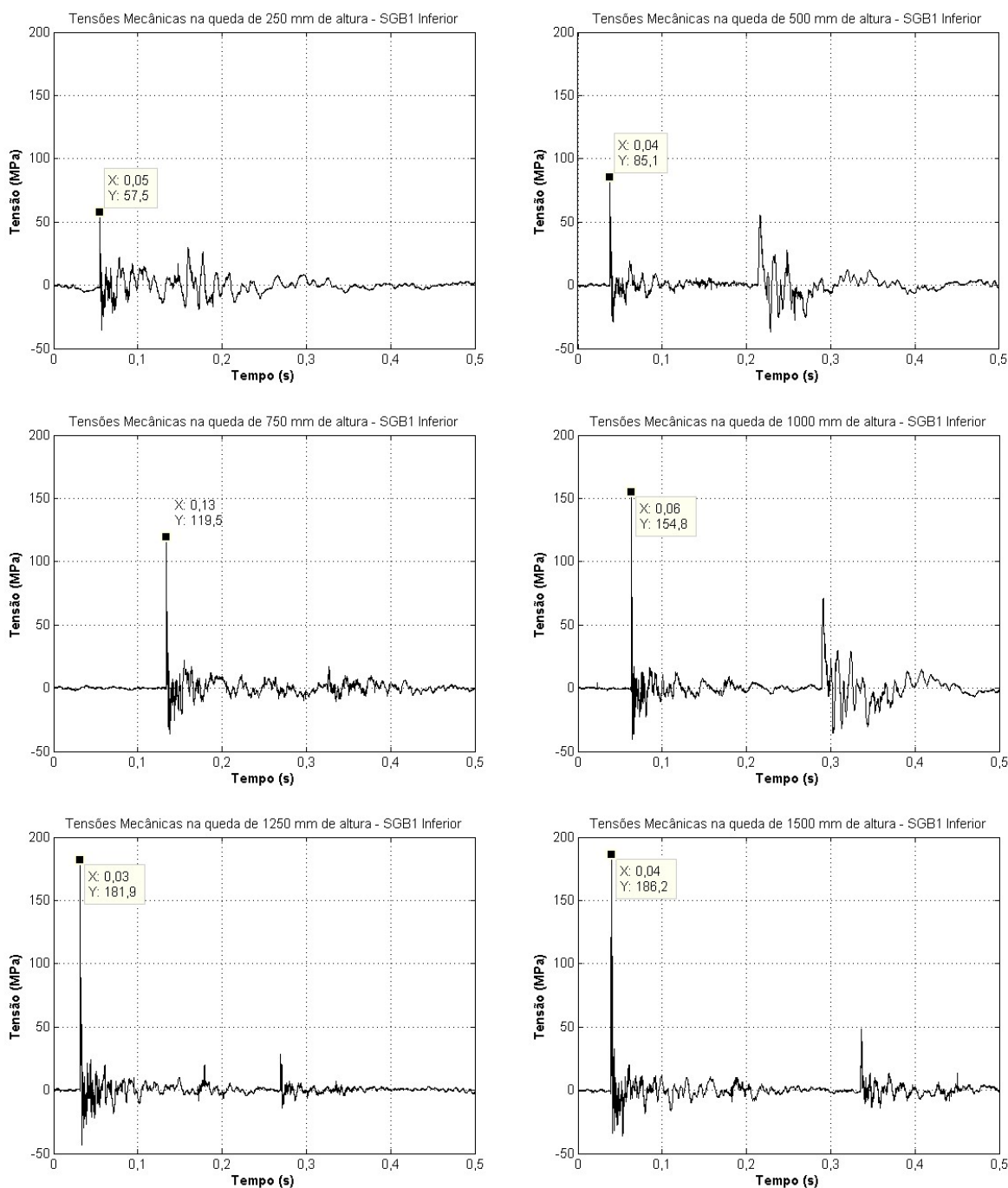
E, além disso, foi usual a presença de curtos referentes a falhas na solda dos fios no decorrer dos ensaios, com a necessidade de refazer a solda, provavelmente porque a quantidade da mesma estava exacerbada e os fios de ligação com os *strain gage* muito curtos, aumentando em níveis significativos a tensão entre terminal, substrato da solda e fios de ligação do *strain gage* e, portanto incitando e/ou ocasionando os problemas vistos nas imagens das Figuras 51, 52 e 53.

5.3.4 Análises das Tensões Mecânicas no intervalo de tempo de ensaio

5.3.4.1 SGB1 inferior

Na Figura 58 abrange-se os gráficos de tensão mecânica em relação ao Tempo, lidas pelo SGB1 inferior nas seis alturas de queda, nas condições da 1ª fase de testes.

Figura 58 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 1ª fase



Fonte: Próprio autor

Percebeu-se a presença de dois picos majoritários de tensão no decorrer do curto intervalo de tempo de 0,5s para todas as alturas, provavelmente devido ao rebatimento do peso no flange inferior, conforme pode ser observado na Figura 59, que representa capturas de tela sucessivas de um vídeo em câmera lenta da queda do peso. Na Figura 59(d) mostra-se um pequeno espaço entre o flange deslocado e a base.

Figura 59 – Captura de tela do vídeo que revela o rebatimento do peso no flange



(a)



(b)



(c)



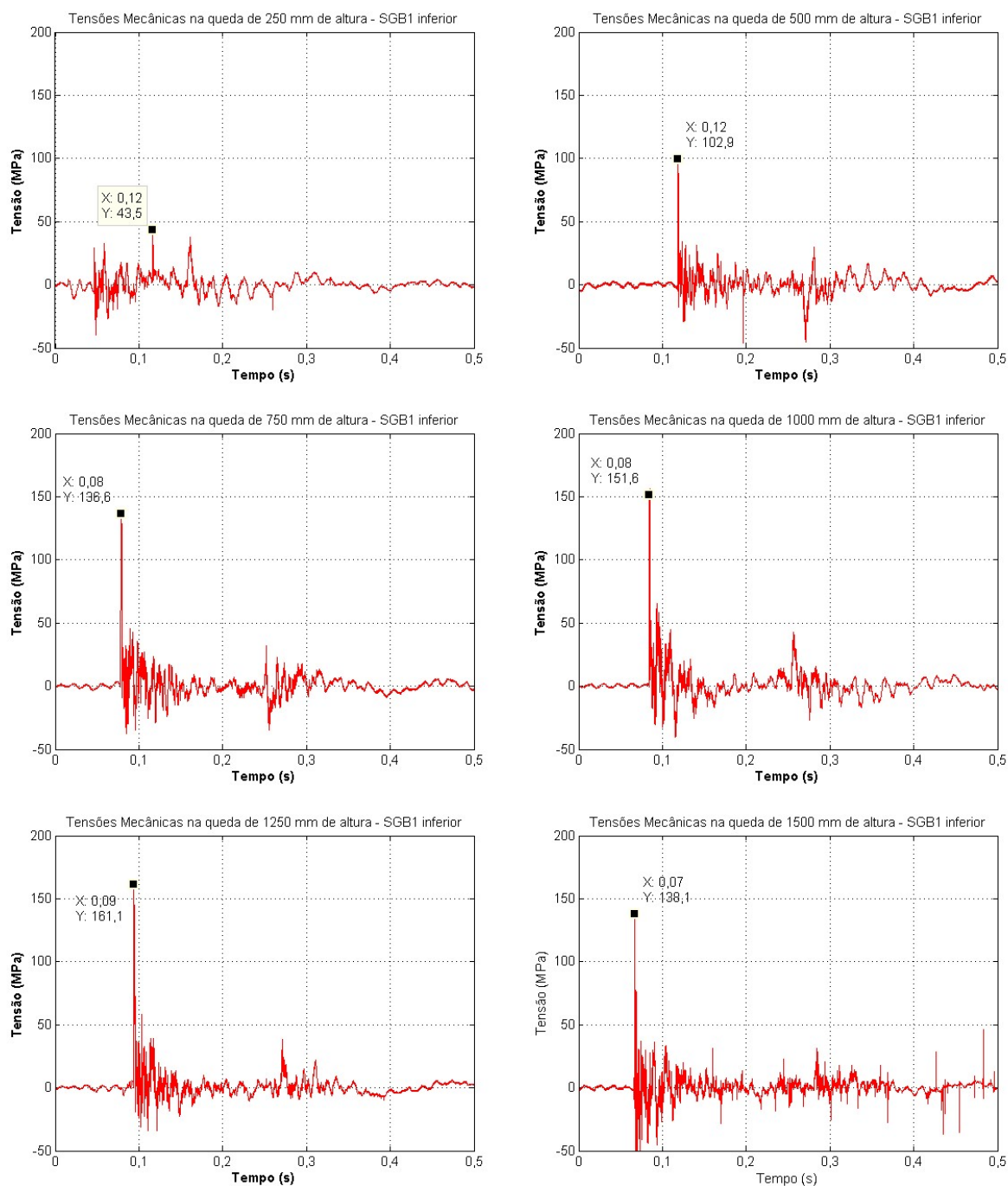
(d)

(a), (b), (c) e (d) Instantes sucessivos.

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 60 revelam-se os gráficos de tensão mecânica em relação ao tempo, lidas pelo SGB1 Uniaxial nas seis alturas de queda, nas condições da 2ª fase de testes, sendo que não houve diferença de comportamento significativa identificada entre a 1ª e a 2ª fase, por meio do comportamento expostos nessa curva.

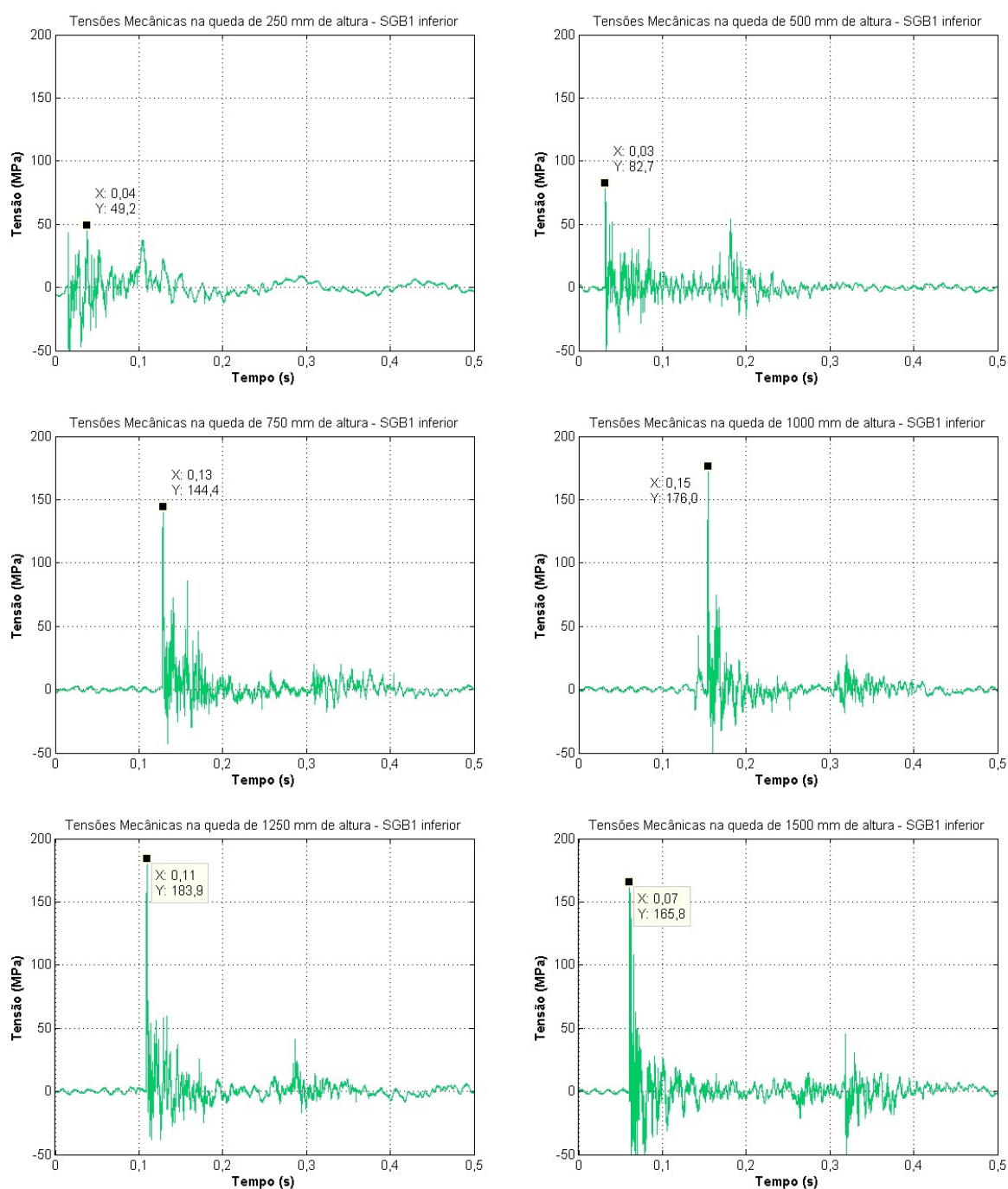
Figura 60 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 2ª fase



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 61 revelam-se os gráficos de tensão mecânica em relação ao tempo, percebidas pelo SGB1 Uniaxial nas seis alturas de queda, nas condições da 3ª fase de testes, sendo que a princípio parece haver uma diminuição do ruído no eixo x, seguindo o zero, no entanto, não é possível estabelecer uma relação conclusiva com a mudança de localização das placas que fazem a ligação de $\frac{1}{4}$ de Ponte de Wheatstone, porque outras condições podem ter influenciado a leitura de dados.

Figura 61 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 3ª fase

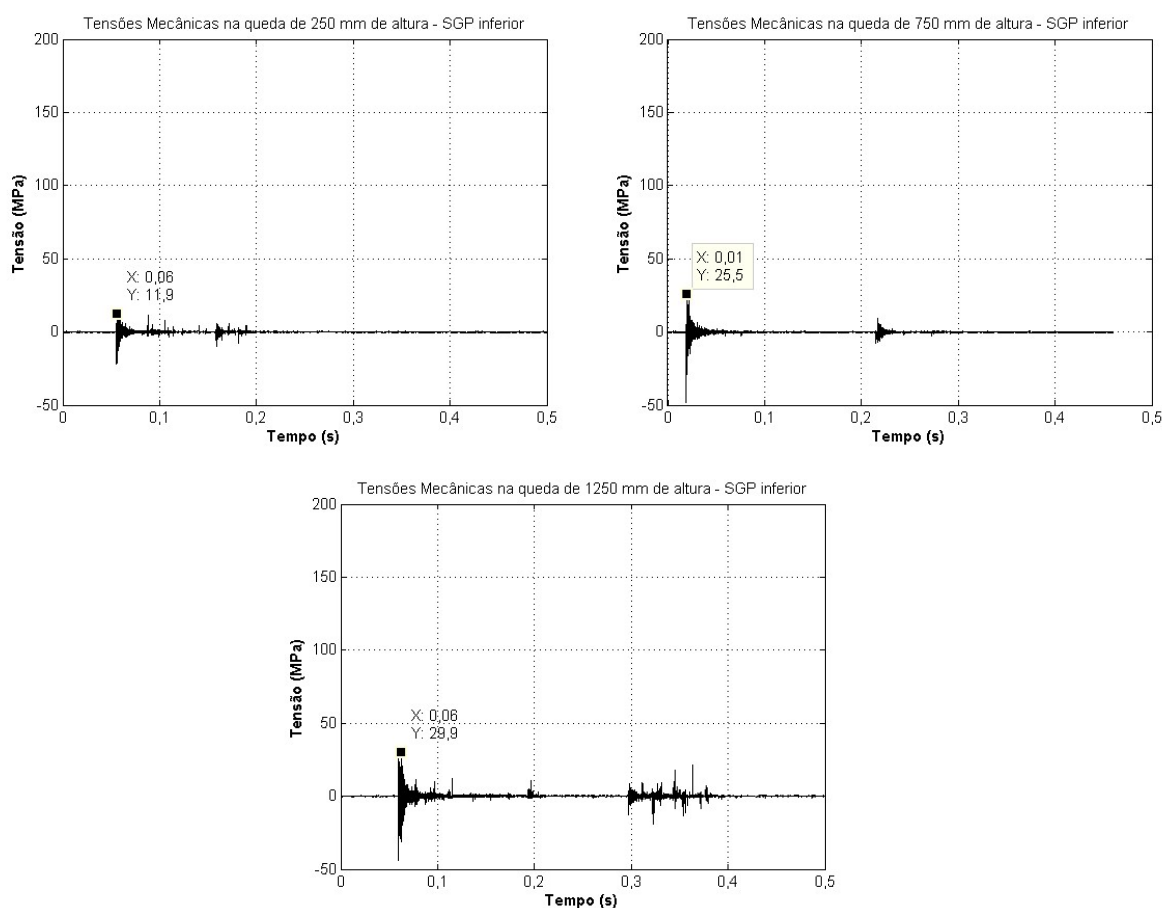


Fonte: Próprio Autor

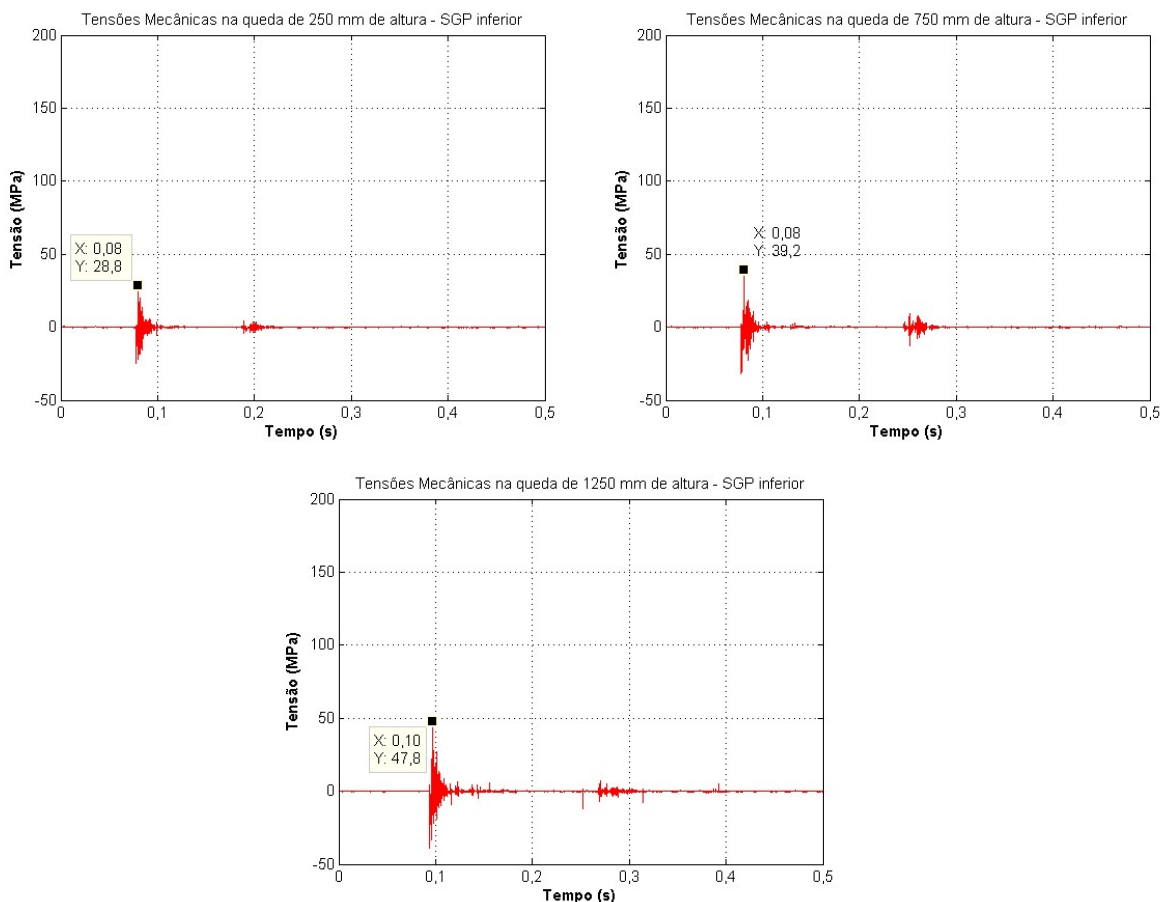
5.3.4.2 SGP inferior

Na Figura 62 abrange-se os gráficos de tensão mecânica em relação ao tempo, percebidas pelo SGP inferior em três alturas de queda (250 mm, 750mm, 1250mm) nas condições da 1ª fase de testes. Tornaram-se identificáveis as menores magnitudes da tensão no Peso, sendo em alguns casos 5 vezes menores do que as tensões na Barra, no entanto, apesar da baixa magnitude, ainda é possível identificar dois picos, corroborando a presença do rebatimento do peso no flange.

Figura 62 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 1ª fase



Na Figura 63 abrange-se os gráficos de tensão mecânica em relação ao tempo, percebidas pelo SGP inferior em três alturas de queda (250 mm, 750mm, 1250mm) nas condições da 2ª fase de testes. Não foram observadas alterações de formato significativas e nem valores muito discrepantes em relação a 1ª fase.

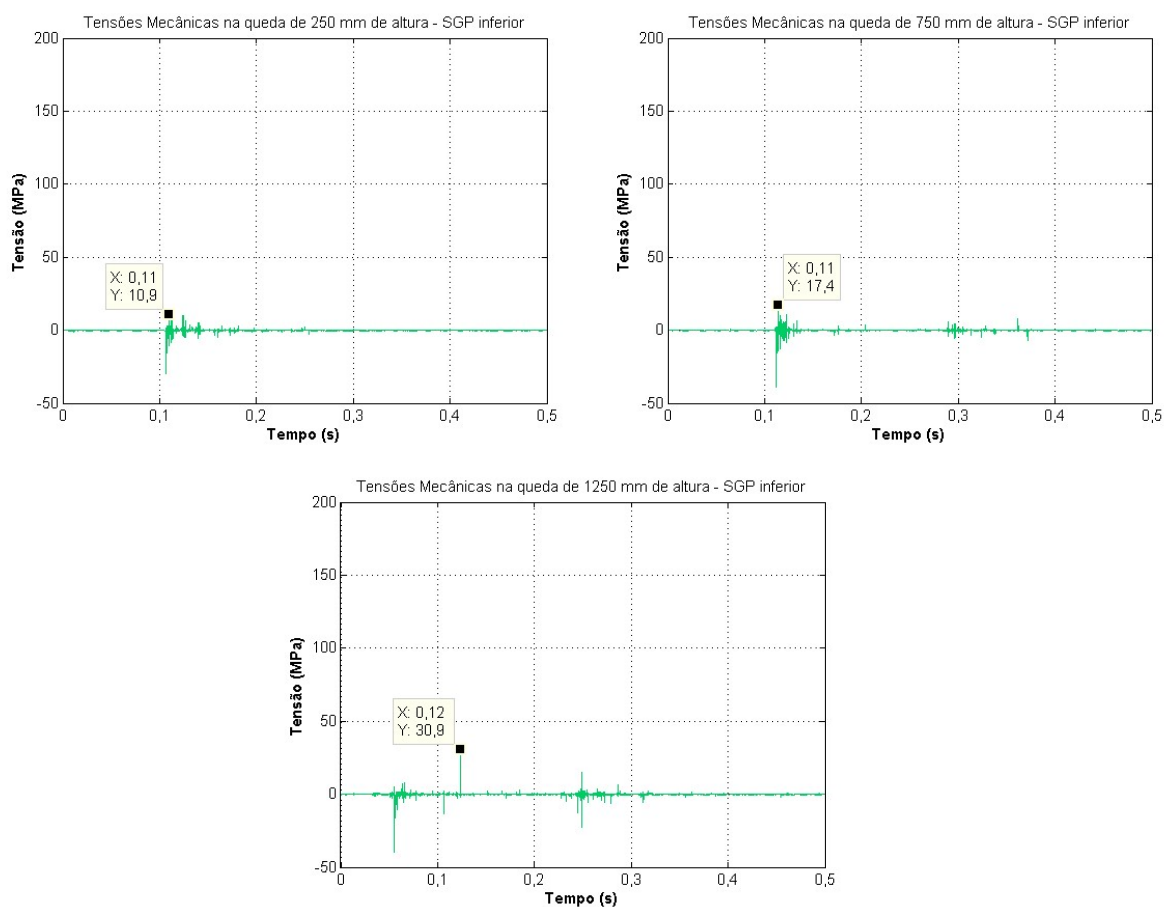
Figura 63 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 2ª fase

Na Figura 64 abrange-se os gráficos de Tensão Mecânica em relação ao tempo, lidas pelo SGP inferior em três alturas de queda (250 mm, 750mm, 1250mm) nas condições da 3ª fase de testes.

Não foram observadas alterações de formato significativas e nem valores muito discrepantes com relação a 1ª fase e 2ª fase, corroborando o fato de que as possíveis interferências provenientes da placa da Ponte de Wheatstone foram insignificantes para as medições.

Além disso, vale ressaltar que a utilização destas placas foi pautada justamente para diminuir o efeito da inércia dos cabos na leitura das tensões e deformações, por meio da diminuição do comprimento do cabo, e, portanto, com menor caminho para a onda de tensão percorrer. No entanto, conforme discutido anteriormente, esse parece ter sido o principal fenômeno causador de interferências e de danos nos *strain gage*.

Figura 64 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – 3ª fase

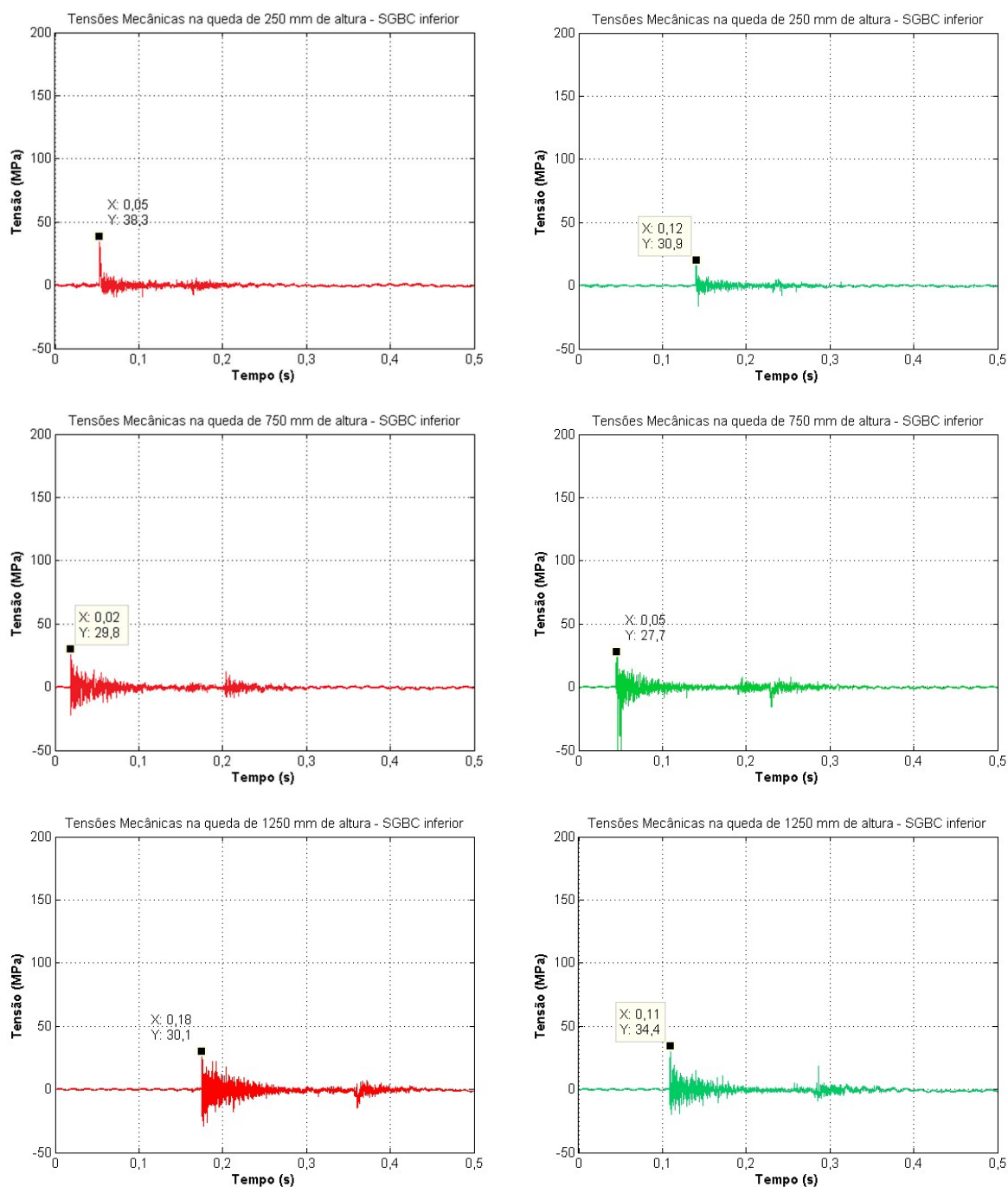


5.3.4.3 SGBC inferior

Os gráficos de tensão Mecânica em relação ao tempo, de acordo com as leituras do SGBC inferior em três alturas de queda (250 mm, 750mm, 1250mm), estão dispostos de maneira comparativa na Figura 65.

Percebeu-se grande similaridade de formatos das curvas e de valores encontrados, corroborando mais uma vez que a influência das placas das Pontes de Wheatstone tais como dispostas nestas fases não possuem efeito significativo nos resultados.

Figura 65 - Gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo – SGBC inferior

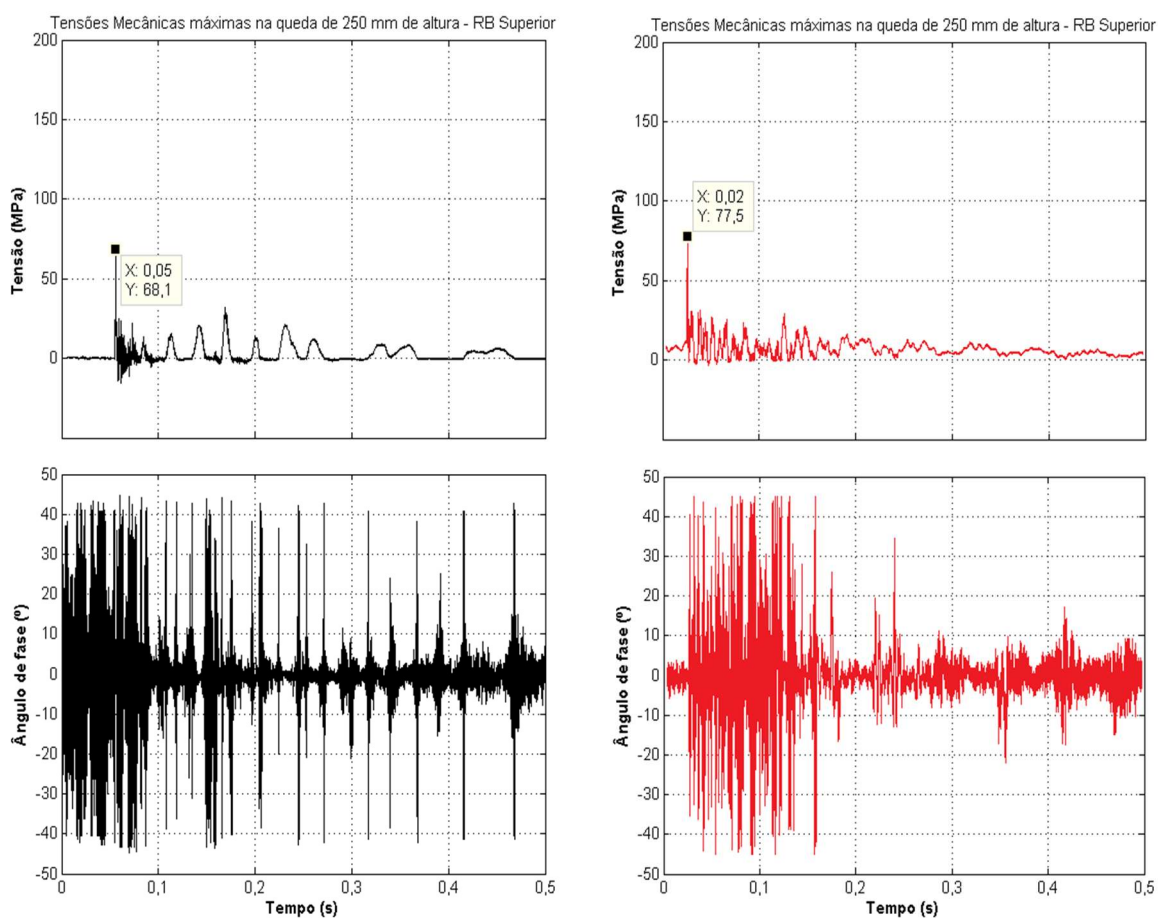


5.3.4.4 RB superior

No caso da RB Superior o maior intuito das análises de tensões foi verificar o efeito de uma modificação de projeto da 1ª para a 2ª fase, que se refere à fixação da barra na plataforma superior. Identificou-se, na 1ª fase, a presença de ângulos de fase de 45°, geralmente característicos de um esforço torcional e, além disso, percebia-se

visualmente que a barra rotacionava a cada queda devido à fixação ineficiente na plataforma superior por meio de rosca. Desse modo, procedeu-se à soldagem da barra na plataforma superior para evitar esse movimento de giro e, a verificação da influência dessa modificação de Projeto foi avaliada por meio dos gráficos de tensão relacionados aos ângulos de fase, dispostos nas Figuras 66 e 67.

Figura 66 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo - 250 mm



Fonte: próprio autor.

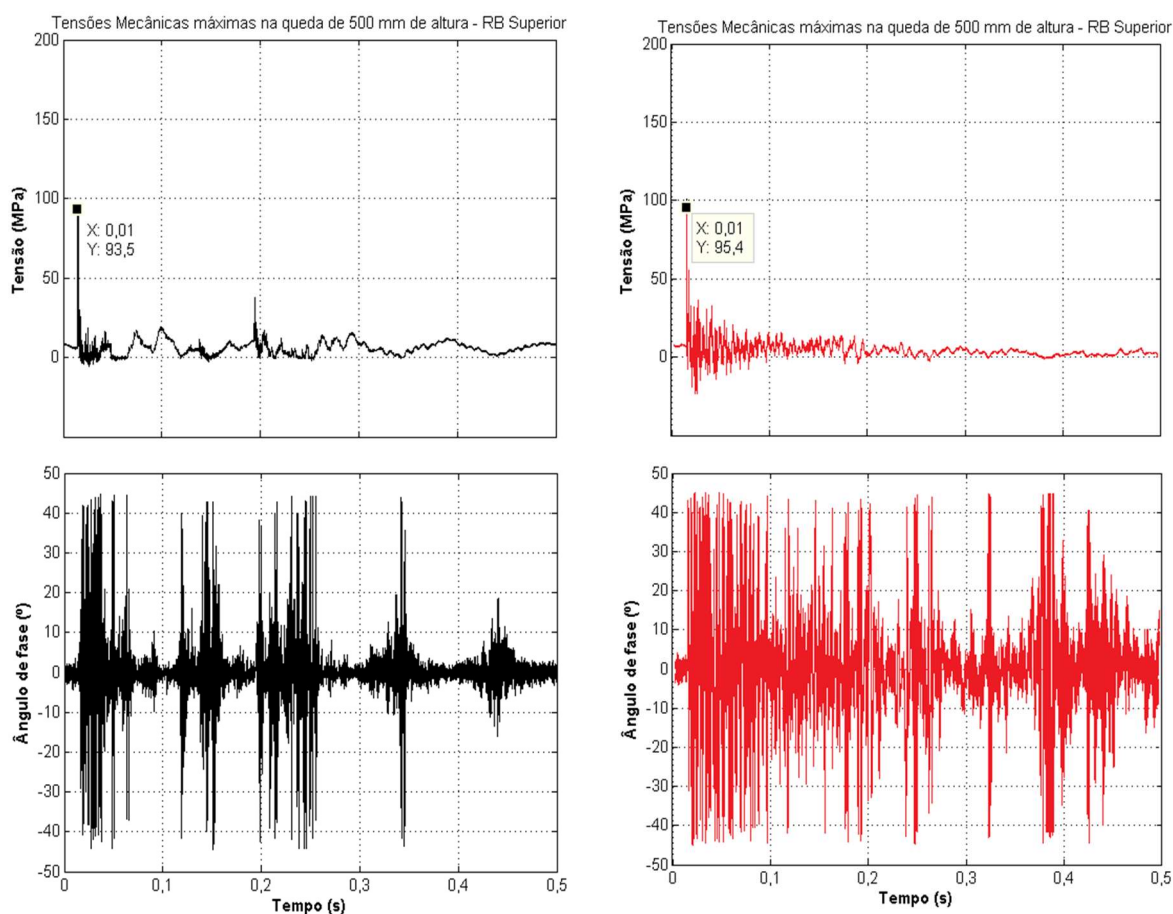
A princípio, percebe-se que, continuaram presentes os ângulos de fase próximos à 45° , após a modificação de projeto da 1ª fase (gráficos em preto) para a 2ª fase (gráficos em vermelho), referente à mudança de fixação da barra na plataforma de sustentação superior.

Desse modo, a hipótese relacionada a um possível giro da barra, fixada por rosca, como único fenômeno responsável pela percepção de ângulos de 45° nos cálculos das tensões principais da Roseta não procedeu. Novas hipóteses que surgiram seriam

a possível influência do efeito da força gravitacional no Peso (efeito do peso próprio), que envolve circunferencialmente a barra, porque se ele tiver um pequeno desvio de orientação ou de distribuição de forças na barra, pode ser que reflita em diferentes ângulos de fase nos cálculos, pois a barra não estará sujeita a um esforço na mesma direção vertical em todo instante infinitesimal.

Além disso, é importante ressaltar que, o ato imediatamente anterior as leituras, consiste em subir o peso por meio de corda e isso causa visivelmente uma pequena vibração transversal na barra (devido ao seu grande comprimento), pois, na parte inferior, os graus de liberdade são maiores do que na parte de cima, visto que ela não está fixa. Percebe-se inclusive que os ângulos de 45° permanecem ainda depois da queda (Figura 65), provavelmente por essa liberdade de movimentação na parte inferior.

Figura 67 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo - 500 mm

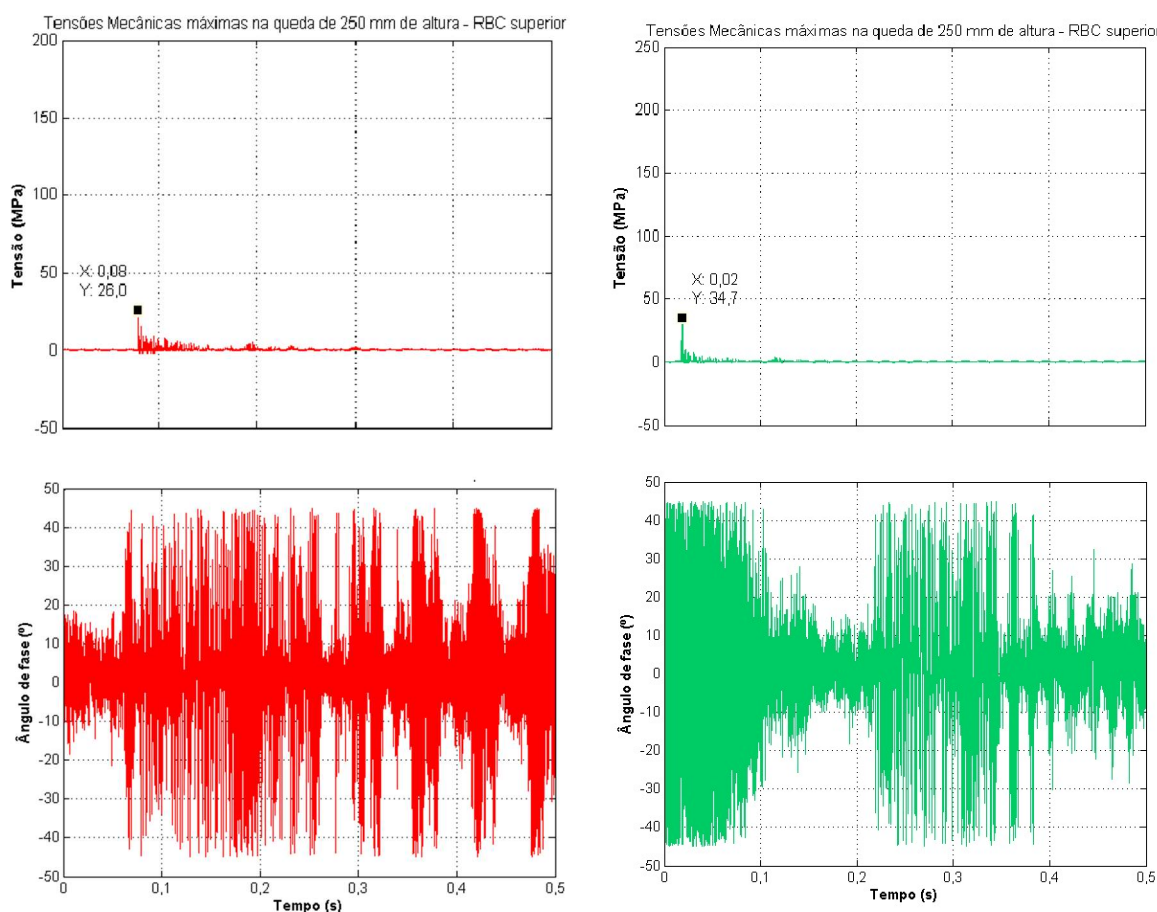


Fonte: Próprio autor

5.3.4.5 RBC superior

Na RBC superior, avaliou-se também os ângulos de fase, para, dentre outras análises, verificar o comportamento dos ângulos das tensões principais máximas da Roseta, com o intuito de identificar diferenças de comportamento entre a seção reduzida e a seção completa. Percebeu-se logo na análise das primeiras quedas (250 mm) que os ângulos de fase de aproximadamente 45° continuavam presente, tanto na 2ª fase, quanto na 3ª fase, conforme pode ser verificado na figura 68.

Figura 68 – Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo – 250 mm

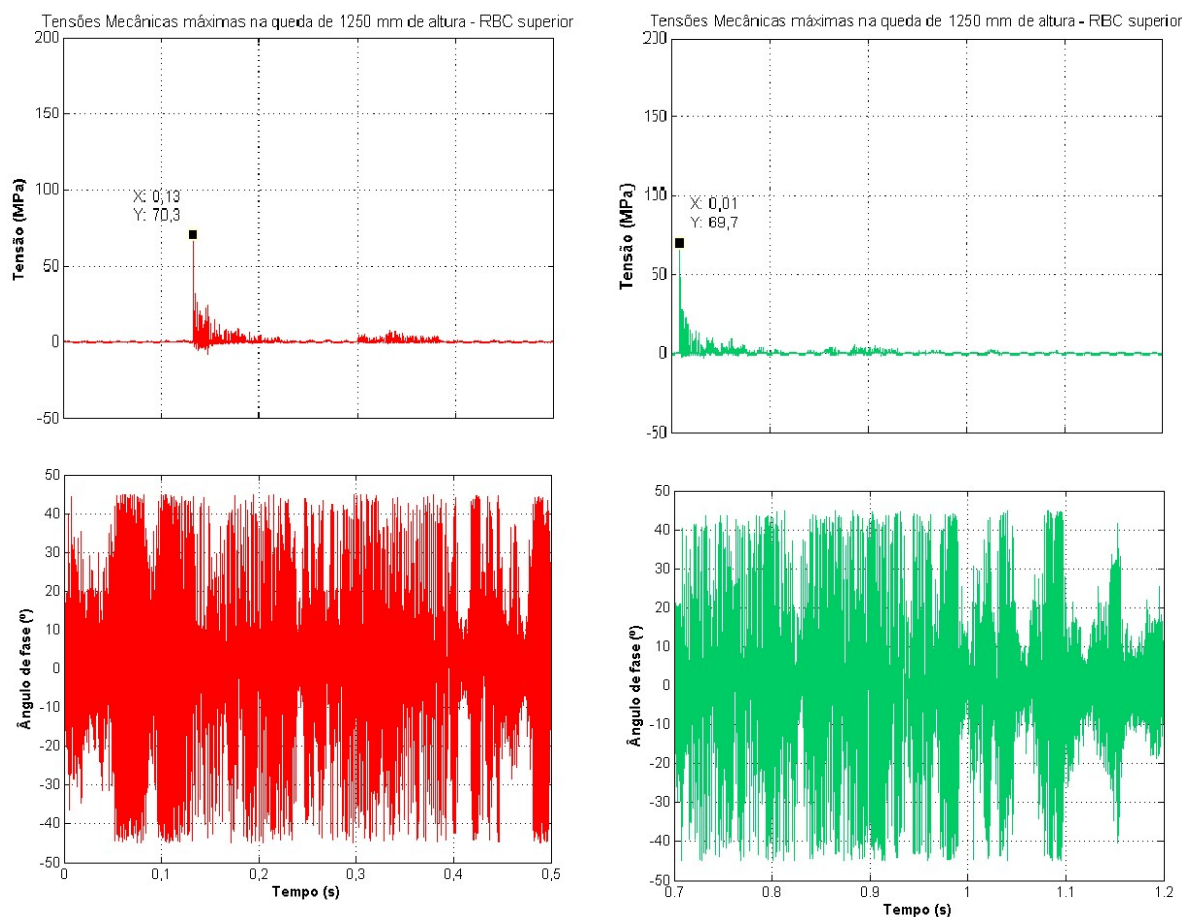


Fonte: Próprio autor

Este comportamento foi verificado em praticamente todas as quedas até 1250 mm (Figura 69), com a presença desta grande variação no ângulo de fase, que margeia o zero e varia até 45° em todo intervalo de tempo após a queda. Somente em algumas medidas da queda de 1500 mm houve um comportamento diferenciado ocasionado pela falha dos terminais que incitaram o cálculo de um valor exacerbado de tensão,

de acordo com análises anteriores. Além disso, como peso não encaixa idealmente no flange, o atrito do mesmo com o flange, na hora da queda, pode ser o principal fator responsável para induzir o efeito de torção.

Figura 69 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo - 1250 mm



5.3.4.6 RBC inferior

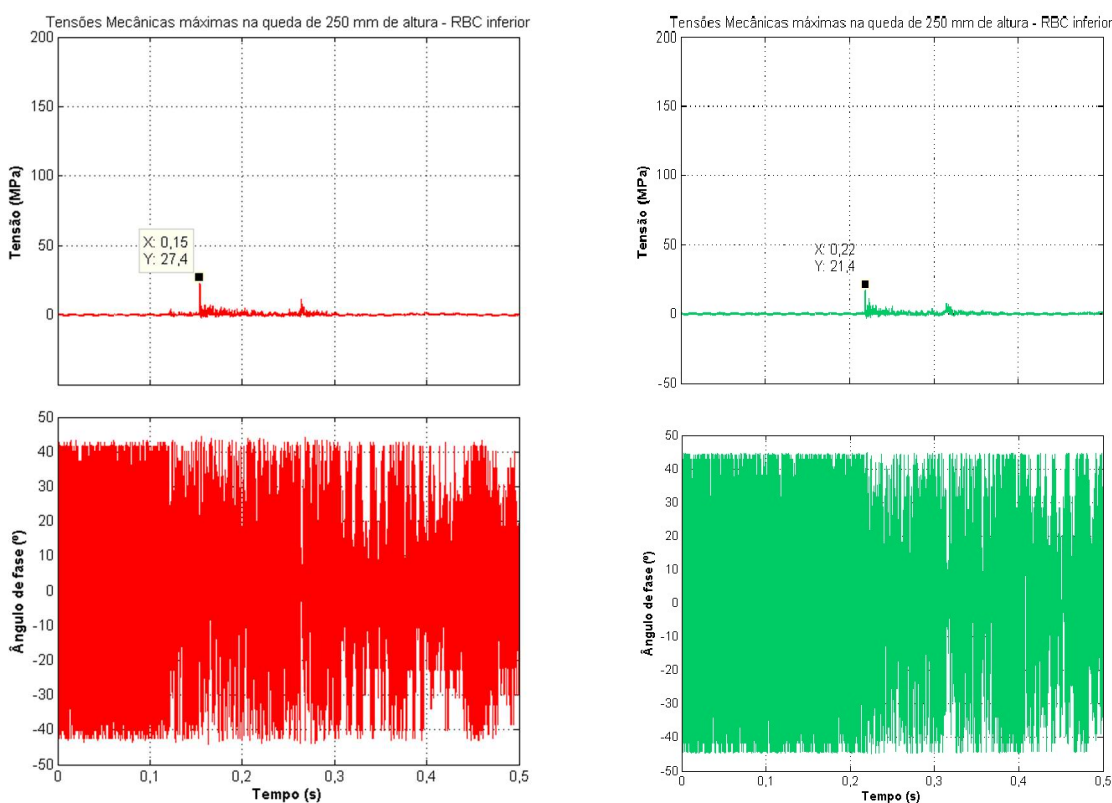
Da mesma forma que na parte superior, avaliou-se também os ângulos de fase, para, dentre outras análises, verificar o comportamento dos ângulos das tensões principais máximas da roseta, com o intuito de identificar diferenças de comportamento entre a seção reduzida e a seção completa. Na Figura 70, exibe-se um gráfico de tensões mecânicas instantâneas x tempo para queda da altura de 250 mm, que apresenta um perfil repleto de ângulos de 45° positivos e negativos no decorrer do tempo. No entanto, é possível notar que, logo após o pico de tensão, estes ângulos variam para valores menores do que 45°, inclusive alcançando valores próximos à 20°.

Uma possível influência do efeito do “peso próprio” do Peso sempre anexado na barra, pode ser considerada, visto que os gráficos já se iniciam apresentando ângulos de 45° antes do carregamento principal ocorrer. Se houver um desvio de orientação longitudinal na barra é possível que condições torcionais sejam pronunciadas devido a um desequilíbrio de distribuições de forças.

Além disso, pode-se ressaltar que, o rebatimento do peso no flange é uma condição que foge ao controle experimental, de modo que qualquer pequeno giro do flange ou do peso pode incitar também o desenvolvimento de tais ângulos.

O ângulo de fase por ser calculado por meio de uma função arco tangente, tem domínio que varia de $-1,5708 \text{ rad } (-\pi/2)$ à $1,5708 \text{ rad } (\pi/2)$, desse modo, acredita-se também que os ruídos provenientes da aquisição de dados sejam amplificados neste cálculo, por causa da alta taxa de aquisição de dados, sendo que, no intervalo de tempo de 0,5 s temos 12.500 pontos para definir o seu comportamento, gerando uma densidade de ângulos muito grande que podem suprimir os valores mais significativos.

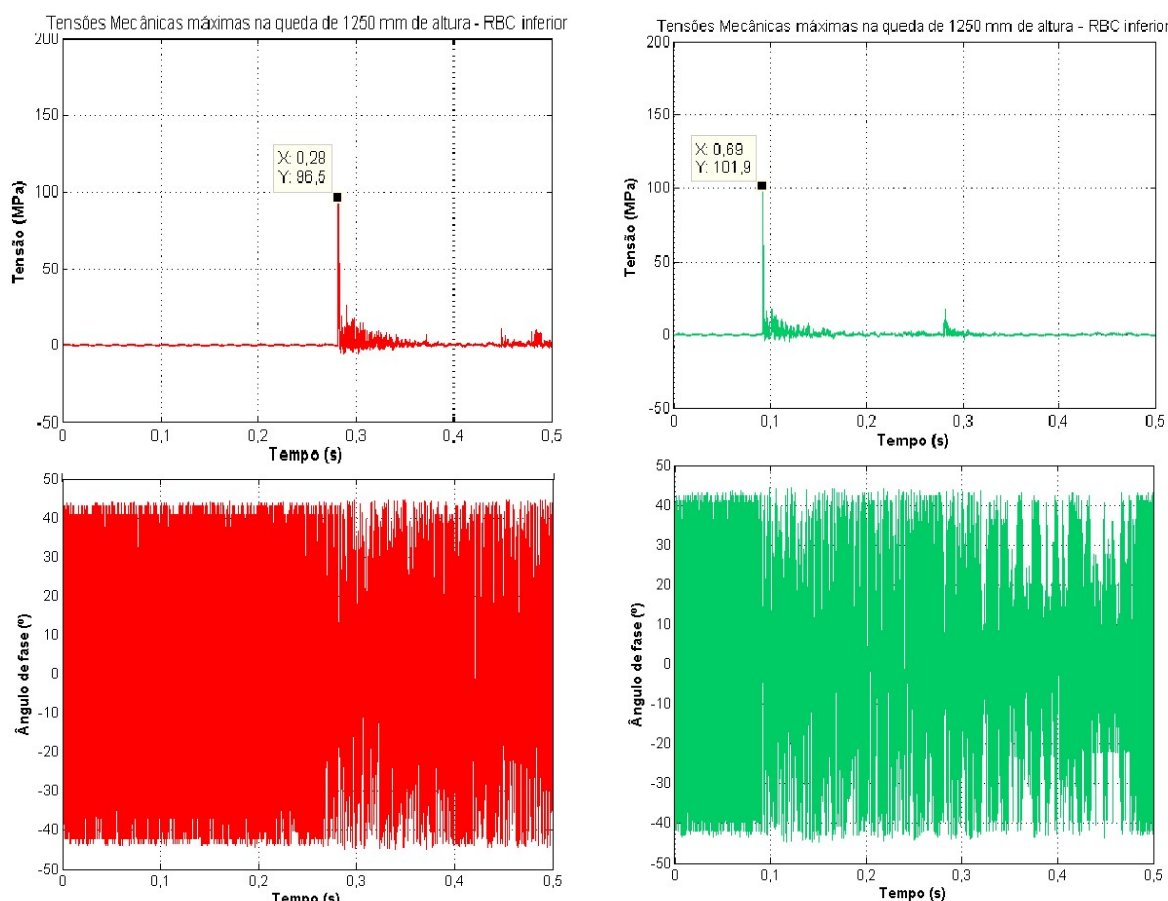
Figura 70 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulos de fase x tempo – 250 mm



Fonte: Próprio autor

Na Figura 71 exibem-se gráficos para a altura de queda de 1250 mm, no qual é possível identificar o mesmo comportamento dos ângulos de fase. Ou seja, uma grande variação de altura entre as quedas não configurou uma mudança significativa dos resultados de ângulo de fase, apesar da magnitude das tensões ter se modificado

Figura 71 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulos de fase x tempo – 1250 mm



Fonte: Próprio autor

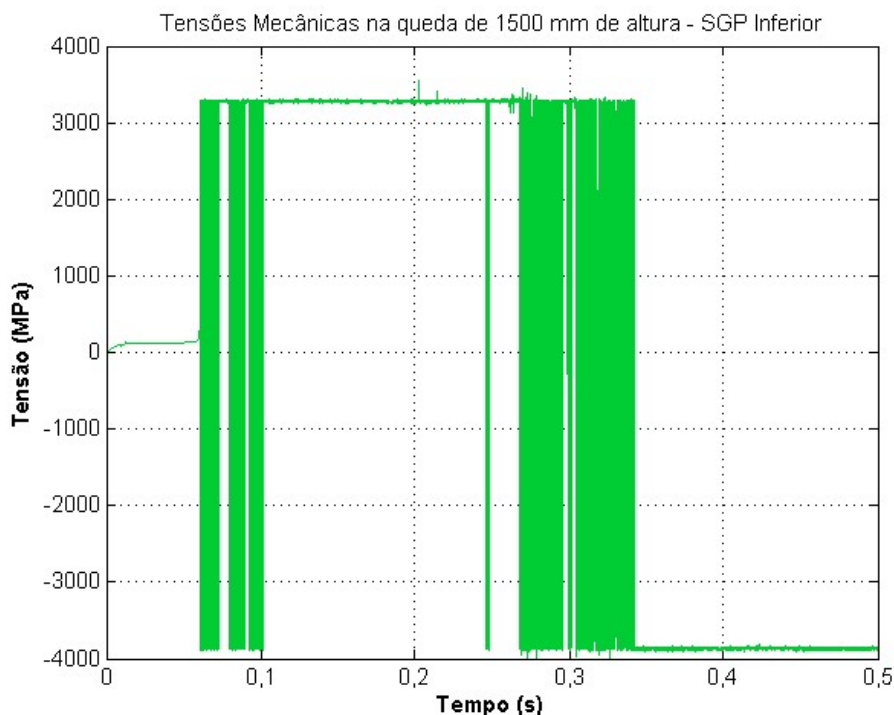
5.3.5 Valores exacerbados de tensões mecânicas no decorrer do tempo

5.3.5.1 Valores exacerbados relacionado à falha visível do terminal e/ou dos strain gage

Conforme comentado anteriormente verificou-se a presença de valores exacerbados de tensões mecânicas em praticamente todos os canais quando alguns componentes da instrumentação falhavam, principalmente os terminais de ligação do *strain gage* com a fiação ou os próprios sensores. Essas falhas ocorriam geralmente na maior altura de 1500mm, conforme pode ser exemplificado pelo gráfico referentes ao *strain*

gage inferior do peso (Figura 72), com valor bem acima dos valores médios encontrados, inclusive maiores que o limite de escoamento do material.

Figura 72 - Gráfico de tensões mecânicas x tempo – 1500 mm



Fonte: Próprio autor

Ou seja, verificou-se que estes não são valores reais que refletem realmente o comportamento da estrutura devido às falhas na instrumentação, principalmente devido ao descolamento de terminais.

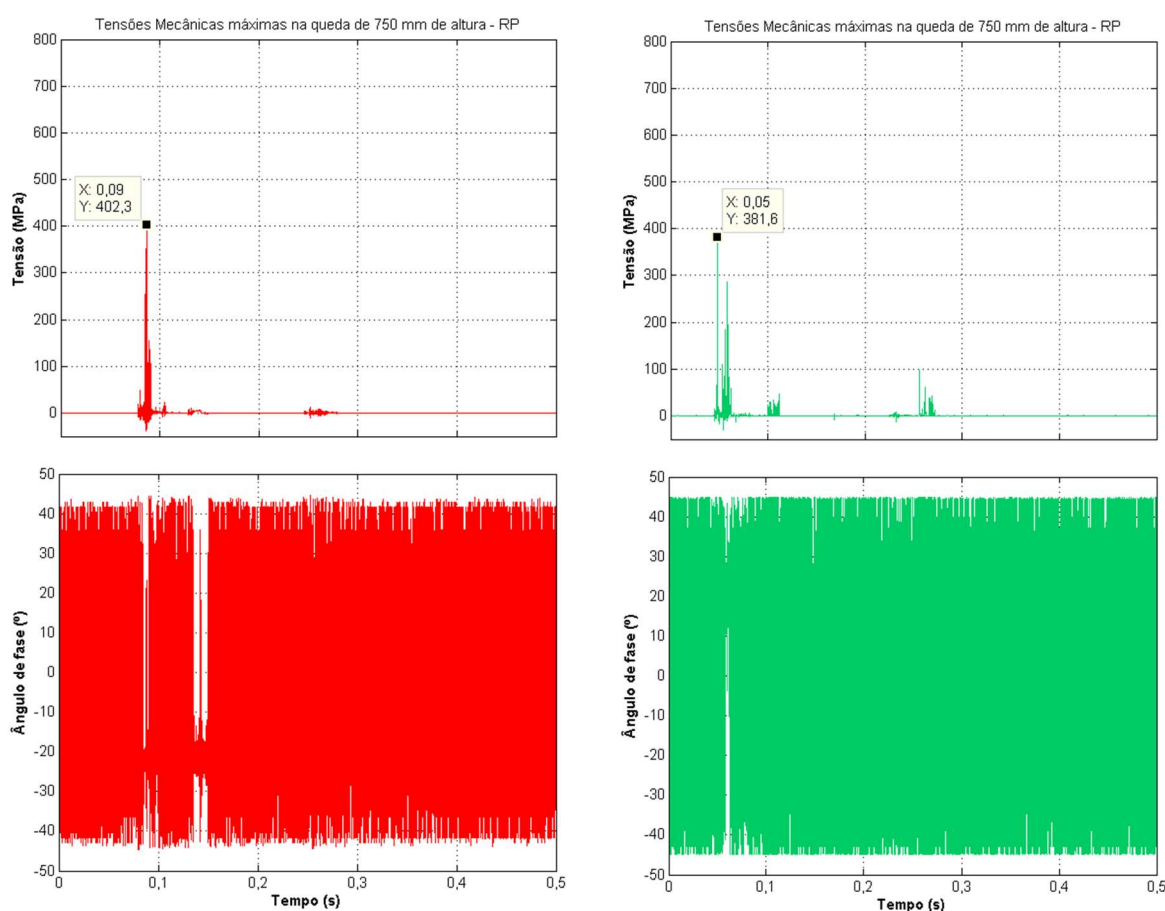
5.3.5.2 Valores exacerbados sem identificação de falha visível do terminal e do strain gage: RP (Roseta do Peso)

Curiosamente, verificou-se também que, a Roseta do Peso (RP) apresentava valores exacerbados de tensões mecânicas em algumas medições, mesmo sem o descolamento visível do terminal.

Acredita-se que este comportamento acontece principalmente porque, no caso do Peso, a inércia dos fios condutores que estão conectados aos componentes induzidos pela onda de tensão elástica é maior e, portanto, a influência nos terminais da Roseta é maior.

Uma hipótese acerca deste comportamento é que algum terminal da roseta pode estar na iminência de falhar, porém, isso não esteja perceptível a olho nu. Outra hipótese seria referente à variabilidade de movimento do cabo que pode conduzir maior ou menor quantidade de onda de tensão dependendo da situação. A Figura 73 revela os valores exacerbados de tensões mecânicas na roseta do peso, para uma queda de 750mm, que se mantém na 2ª e 3ª fase com um patamar de tensões de aproximadamente 400MPa.

Figura 73 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo - 750 mm

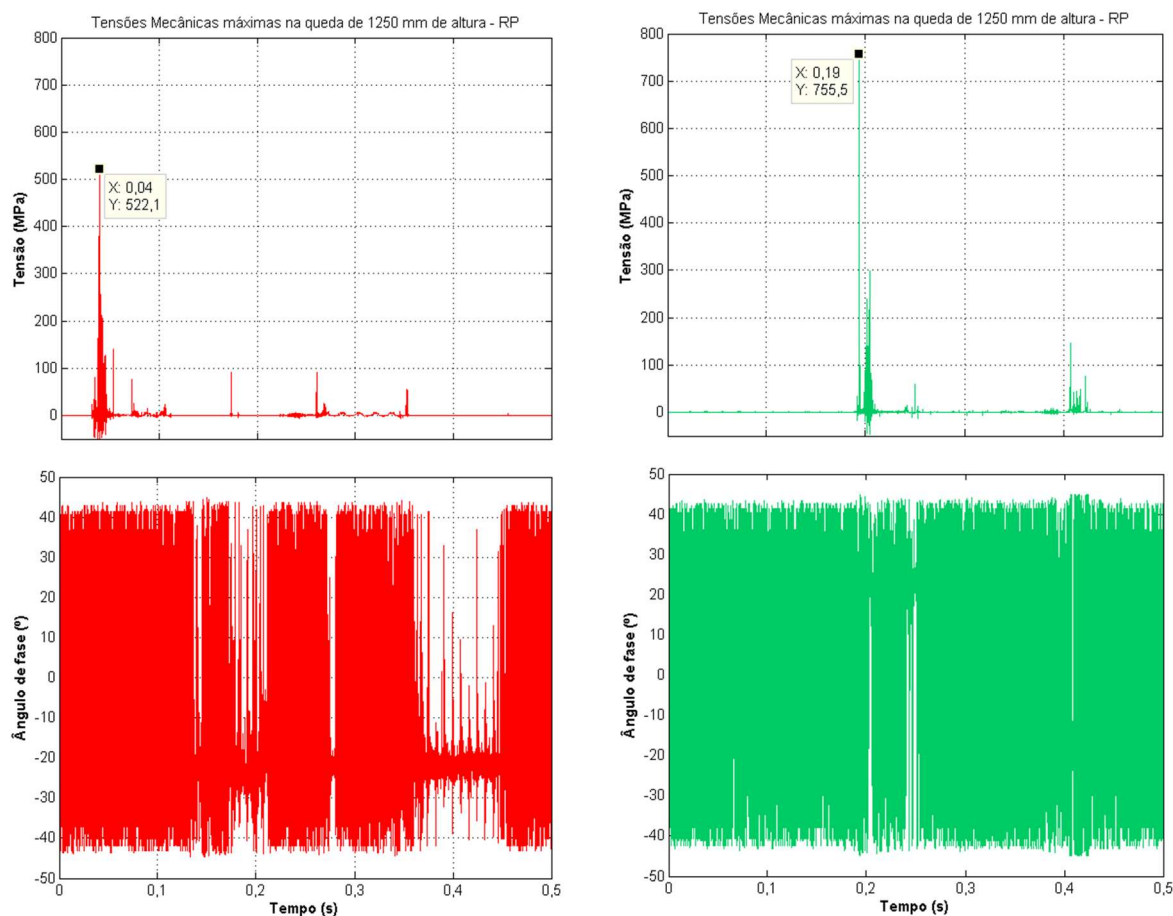


Fonte: próprio autor

Nestes casos também foi visível uma variação do ângulo de fase na hora do carregamento, concentrando-se por volta de 20° ou -20°, podendo representar uma queda inclinada do Peso, de modo que toda a superfície inferior não bate uniformemente no flange e, além disso, existe o rebatimento entre peso e flange conforme comentado anteriormente.

A Figura 74 revela os valores exacerbados de tensões mecânicas na roseta do peso, para uma queda de 1250 mm, que apresentam na 2ª fase um pico de tensões da ordem de 500 MPa, e na 3ª fase um pico de tensões da ordem de 700 MPa. Essa alta variabilidade de valores entre a 2ª e a 3ª fase não pode estar associada às já comentadas mudanças das condições experimentais, pois a variação é muito grande.

Figura 74 - Gráfico de tensões mecânicas e ângulo de fase x tempo – 1250 mm



Fonte: próprio autor

5.3.6 Análises do conjunto barra-peso por meio de acelerômetros

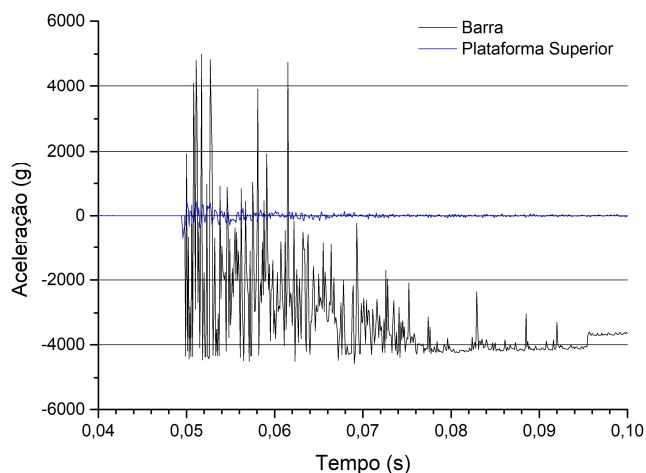
5.3.6.1 Teste preliminar de vibração da plataforma de sustentação

Primeiramente, ressalta-se que na 1ª e 2ª fase não foi possível estabelecer uma tendência de dados dos acelerômetros, visto que a maioria das medições ultrapassaram os limites máximos de leitura do equipamento (-10 V à 10 V), e, quando isso ocorre, não existe uma coleta de dados plausível subsequentemente.

Na 3ª fase, como teste preliminar, fixou-se por meio de cera específica um acelerômetro na plataforma de sustentação superior, na qual a barra está fixada por meio de soldagem, devido à uma hipótese de que a plataforma de sustentação estivesse se deformando, percebida pelos deslocamentos dos grampos de fixação superior na estrutura.

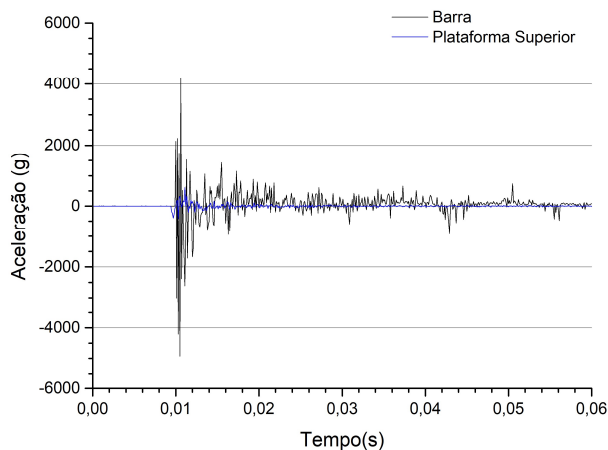
Os sinais provenientes dos acelerômetros para quedas de 250 mm e 500 mm demonstraram que a porcentagem de sinal coletado na plataforma superior é pequena ($< 5\%$) com relação as acelerações (g) medidas na barra, conforme pode ser verificado nas Figuras 75 e 76, no entanto, pode ser que a estrutura não esteja se comportando como um corpo totalmente rígido, visto que verificou-se na aquisição de sinais essa vibração.

Figura 75 - Gráfico de aceleração em relação ao tempo para queda de 250 mm



Fonte: próprio autor

Figura 76 - Gráfico de aceleração em relação ao tempo para queda de 500 mm

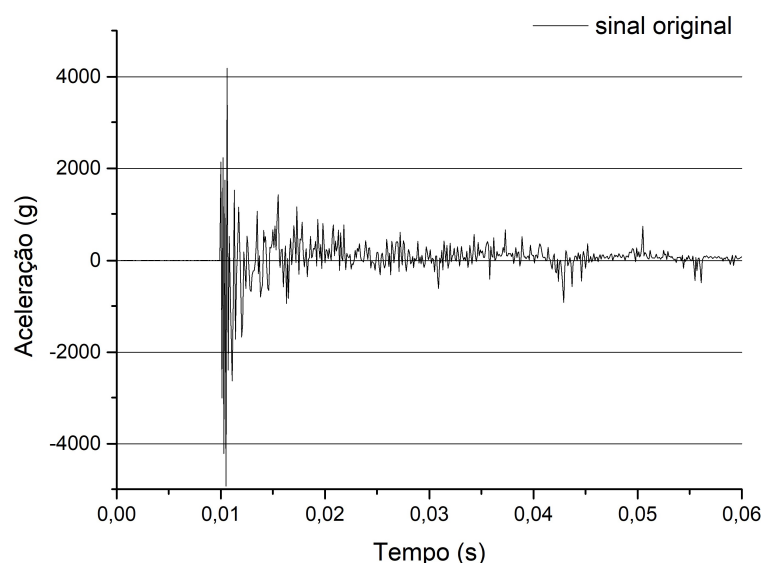


Fonte: próprio autor

5.3.6.2 Análise da aceleração na barra na queda de 250mm

A Figura 77 representa o sinal coletado de aceleração com relação ao tempo para a queda de 250 mm de altura, com picos máximos de aceleração no momento da queda em torno de 4000 g.

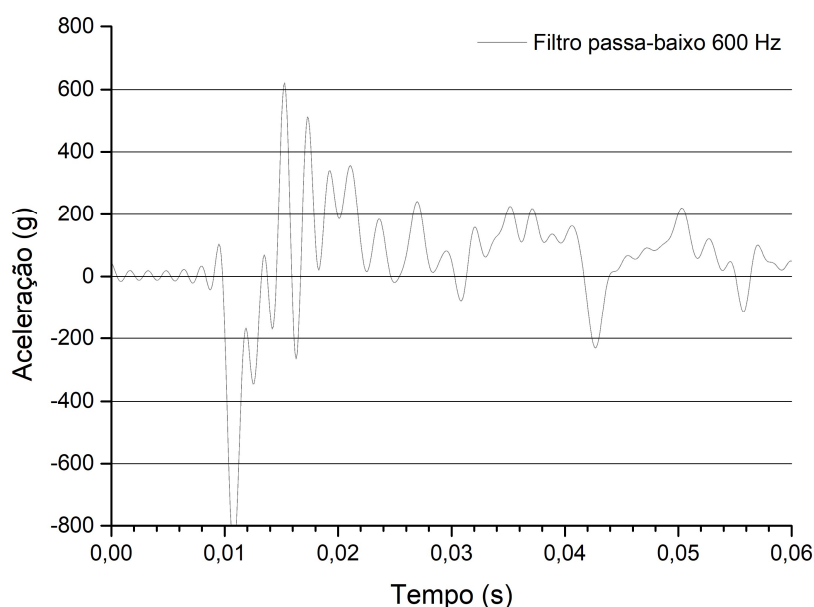
Figura 77 - Sinal de aceleração em relação ao tempo para queda de 250 mm



Fonte: Próprio autor

Primeiramente, é importante ressaltar que nestas análises de aceleração utilizou-se um filtro passa-baixa, considerado mais adequado, pois permite a passagem de baixas frequências sem dificuldades e atenua (ou reduz) a amplitude das frequências maiores que a frequência de corte, conforme Figura 78.

A frequência de corte foi verificada por meio da transformada de Fourier, e a frequência de 600 Hz foi escolhida transformando-se o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência por transformada rápida de Fourier (FFT), de modo a filtrar os sinais de aceleração de acordo com uma gama de frequência observada que deve estar relacionada a uma frequência natural do material da barra.

Figura 78 – Sinal filtrado de aceleração em relação ao tempo para queda de 250mm

Fonte: Próprio autor

Entretanto, após análise de alguns resultados, acredita-se que a complexa montagem do ensaio pode estar influenciando de forma não avaliada os perfis de aceleração obtidos, uma vez que existem vários componentes móveis e independentes na estrutura. A barra está afixada em uma estrutura delgada, o peso de teste impacta um flange, que por sua vez impacta uma rosca afixada na extremidade inferior da barra a ser ensaiada, ou seja, são muitos pormenores que não permitem identificar um padrão de aceleração com relação às alturas de queda, devido à alta sensibilidade dos mesmos.

6 CONCLUSÕES

As análises dos resultados nos permitem chegar às seguintes conclusões:

- A) Com taxa de aquisição de dados de 25 KSamples/s foi possível distinguir os picos de tensões mecânicas, sendo que, os dois picos de tensão presentes na grande maioria dos casos foram observados em um intervalo de tempo menor que 0,5 s. Estes dois picos de tensão são provenientes do impacto e de um rebatimento do peso no flange, comprovado por gravação de vídeo em câmera lenta,
- B) As tensões no Peso foram significativamente menores do que na Barra na totalidade de experimentos, provavelmente porque a forma de montagem do experimento implica em um esforço trativo na barra de forma dinâmica no momento do choque, enquanto que o peso fica sujeito a um maior amortecimento devido ao impacto direto no flange, bem como por ter maior grau de liberdade de movimentação.
- C) É provável que a seção crítica (retangular) da barra tenha se comportado como um concentrador de tensões, visto que a relação entre as tensões na seção reduzida e na seção completa apresentaram razões de proporcionalidade significativamente maiores do que o estabelecido na concepção teórica.
- D) Os picos de tensão exacerbados, que não seguem uma tendência de comportamento usual, devem-se principalmente as falhas relatadas nos terminais de ligação, que levam conseqüentemente à falhas nos *strain gage*, ocasionadas pela ineficiência em suportar as acelerações, a deformação elástica da estrutura, e principalmente a inércia dos fios condutores conectados ao corpo induzido pela onda de tensão.
- E) Comparando-se com o experimento preliminar do casco de transporte de combustíveis exauridos, acredita-se também que falhas nos terminais de ligação com as Rosetas podem ter sido o principal motivo dos picos de tensão exacerbados, visto que vários dos cabos foram arrancados com o afundamento do amortecedor inferior do casco, no instante de impacto com o solo, e, portanto, é provável que esse arrancamento brusco tenha promovido um esforço indesejado nos terminais e conseqüentemente nas Rosetas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A) Avaliar as propriedades de terminais de ligação, colagem dos mesmos, e mecanismos de solda para utilização em situações de carregamentos de Impacto
- B) Avaliar as propriedades dos fios utilizados para ligação dos terminais no sistema de aquisição de dados, de modo que suportem a inércia inerente à propagação da onda de tensão sem influenciar na fixação dos terminais, bem como na leitura das deformações e tensões.
- C) Pesquisar acerca de colas específicas para carregamento dinâmico a serem utilizadas no *strain gage*
- D) Instrumentar os pilares e a plataforma da estrutura suporte para verificar se a mesma está se comportando efetivamente como um corpo rígido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2000. **NBRNM87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica; designação e composição química. Rio de Janeiro, 19 p.

ALVES, T. G. **Avaliação de absorção de energia de impacto uma abordagem baseada em testes com estruturas similares**. 2009. 153f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www2.dbd.pucrio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0621120_09_Indice.html> Acesso em: 03 maio 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**: Standard test methods for tension test of metallic materials. West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/E8.htm>>. Acesso em: 15 Mar. 2017.

ANDOLFATO R. P.; CAMACHO G. S; BRITO, G. A. Extensometria básica. **UNESP**, Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometria%20basica.pdf> Acesso em: 28 mar. 2017

AZEVEDO, D. F. O. **Tipos de carregamento**. 1 ed. Mogi das Cruzes: Domingos Flávio de Oliveira Azevedo, 2016. 29 p.

BATELO, E. A. P. **Análise dinâmica avançada de estruturas de aço sob cargas extremas**. 2014. 70f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.propec.ufop.br/uploads/propec2016/teses/arquivos/tese214.pdf>> Acesso em; 10 maio 2017

BIASE, E. H: C.; DONADON, M. V.; ALMEIDA, S: F. M. Uma metodologia experimental para ensaios de impacto em placas de laminados compósitos. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 2010. Disponível em <www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0452.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017

BIPARTISAN POLICY CENTER. Transporting spent nuclear fuel in the United States: an assessment of current capabilities and future challenges. **BPC**, Washington, 2015. Disponível em: <<http://bipartisanpolicy.org/wp-content/uploads/2015/09/BPC-Energy-Transporting-Nuclear-Fuel.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2016.

BOLDUC M.; ARSENAULT R., Development of a strain-gage installation method for high-speed impact of strikers on a Split Hopkinson bar apparatus. In: EPJ Web of conferences, v. 26, 2012, Freiburg. **Anais...** Freiburg, 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20122601033>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

CALLISTER JR.; WILLIAM, D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 1a ed., Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CIONE, F. C. **Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor da mobilidade**. 2012. 118f. Dissertação (Mestrado) – Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-06032013-150024/pt-br.php>> Acesso em: 10 dez. 2017

CLOUGH, R W. PENZIEN, J. **Dynamics os structures**. Mc Graw-Hill, New York, 2 ed. 5 ed., 1993.

DALLY, J. W. RILEY, W. F. **Experimental Stress Analysis**. 3.ed. New Jersey: McGrall-Hill, 1991

DI BLASI, C.G. **Resistência dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1990. 539 p.

DROSTE et. al. Impact target characterisation of BAM drop test facility. 15TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIALS, 2007, Miami. **Anais...** Miami: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/233620567>>. Acesso em: 16 abr. 2016

DROSTE et al. Drop and fire testing of spent fuel and hlw transport casks at “bam test site technical safety”. In: WASTE MANAGEMENT CONFERENCE, 2010, Berlim. **Anais...** Berlim: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2010. Disponível em: <<http://www.wmsym.org/archives/2010/pdfs/10079.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2016

GALLINA, R. **Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências**. São Paulo, 2003. 84f. Disponível em: <www2.dem.inpe.br/mcr/Orient/pdf/RenatoGallina.pdf> Acesso em: 7 fev. 2011.

GERE, J. M. **Mecânica dos Materiais**. Traduzido por: Luiz Fernando de Castro Paiva. 1 ed. São Paulo: Thomson, 2003. 689 p.

GRANTE. Extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina, Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Florianópolis, 2004, 47 p. Apostila. Disponível em: <www.grante.ufsc.br/download/SG-Apostila.pdf> Acesso em: 17 ago. 2011

HAYASHI, A; TSUGE, H.; KURACHI, K.; MIZUNO, M.; OTA, T. Variation of the strain waveform developed in strenghtned porcelain upon impact. **Journal of the ceramic Society of Japan**, v. 120, n. 3, 2012, p. 104-110. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcersj2/120/1399/120_1399_104/_article/-char/ja/>. Acesso em: 05 abr. 2017

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Spent fuel management options for research reactors in Latin America. TECDOC-1508, IAEA, Vienna, 2006, 77 p. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1508_web.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2016.

JUVINALL, R. C.; MARKESH, K. M. **Fundamentos do Projeto de componentes de máquina**. Traduzido por: Fernando Ribeiro da Silva 4 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2013. 500 p.

KIST, R. F. **Dimensionamento de uma barra de Hopkinson para ensaios de alta velocidade de deformação em plásticos dúcteis**. 2014. 15f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/101199>>. Acesso em: 15 abr. 2017

LIU, Y. Comparing drop impact test method using strain gauge measurements. **Microelectronics Reliability**, v. 49, 2009, p. 1299–1303. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271409002388>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

LUCON, E.; SCIBETTA, M.; MCCOLSKEY, J. D.; MCCOWAN, C. N. Influence of loading rate on the calibration of instrumented Charpy strikers. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 37, n. 6, 2009, p. 520-530. Disponível em: <www.astm.org>. Acesso em: 13 abr. 2017

MANOEL, P. A. F.; NETO, V. G.; SOKEI, C. R.; VENTRELLA, V. A.; TOKIMATSU, R. C. Influência da rigidez na resposta ao impulso aplicado em barras de Aço ABNT/AISI 4340 engastadas unilateralmente. In: 10º CIBEM, 2011, Porto. **Anais...** Porto: Universidade do Porto, 2011. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecnica/maprotec/cibem2011a.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2017

MATTAR NETO, M.; MOURÃO, M. P. Regional dual-purpose cask for the storage and transport of research reactor spent fuel. In: INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS, 2002, Bariloche, Argentina. **Anais...** Bariloche: IAEA, 2002. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/35/015/35015819.pdf?r=1>. Acesso em: 24 maio 2016.

MICHELI, G. B. **Análise numérico-experimental do impacto em chapas de alumínio aeronáutico**. 2008. 180f. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-09022009-161857/pt-br.php>>. Acesso em: 25 mar. 2017

MORITA, S.; OTANI, M.; KOBAYASHI, T. Problems related to the measurement of load signal in the instrumented Charpy impact test. **European Structural Integrity Society**, v. 30, 2002, p. 213–220. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566136902800231>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

PASCHOALOTTO, L. A. C.; MOREIRA, R. F.; TOKIMATSU, R. C. Captura simultânea dos sinais obtidos do martelo e do corpo-de-prova durante carregamento por impacto em um ensaio charpy instrumentado. In: XIV CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2007, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Disponível em <www.abcm.org.br/anais/creem/2007/PDF/0138.PDF>. Acesso em: 20 mar. 2017

QIAO, et. al. Dynamic finite element analyses of a spent fuel transport and storage cask with impact limiters by 9 meter drop tests. In: SIMULIA CUSTOMER CONFERENCE, 2011, Berlim. **Anais...** Berlim: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, 2011. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/266075212>>. Acesso em: 3 jun. 2016.

RAMESH, K. T. High strain rate and impact experiments: part D 33. **Springer handbook of experimental solid mechanics**, 2008, 1098p. Disponível em: <<http://www.springer.com/gp/book/9780387268835>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

SILVA JUNIOR, J. F. **Resistência dos Materiais**. 5 ed. Belo Horizonte: Edições Engenharia e Arquitetura, 1982.

SILVA, L. L.; MOURÃO, R. P.; LOPES, C. C.. Dimensionamento estrutural de protótipo de casco de duplo propósito. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2005, Santos. **Anais...** Santos: ABEN, 2005. Disponível em <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/383.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

SILVA, L. L. et. al. Testing of a transport cask for research reactor spent fuel. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABEN, 2011, p. 24-28. Disponível em <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/handle/123456789/14042>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

SERVER, W. L. Instrumented Charpy Test Review and application to structural integrity. **European Structural Integrity Society**, v. 30, 2002, p. 205–212. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156613690280022X>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

STIEF, J. N. P.; MAIA, N. S.; PEIXOTO R. A. F. Determinação experimental do módulo de elasticidade do concreto convencional e com agregados de escória de aciaria. **Educação & Tecnologia**, v. 14, n. 2, 2009, p. 22–27. Disponível em: <<https://periodicos.cefetmg.br/index.php/revista-et/article/download/218/221>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

STIEF, J. N. P. **Análise das deformações, por extensometria, em concreto armado convencional e com agregados de escória de aciaria**. 2009. 135f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao_jnia_stief.pdf> Acesso em: 10 dez. 2017.

XIA, Y., ZHU, J.; WANG, K.; ZHOU, Q. Design and verification of a strain gauge based load sensor for medium-speed dynamic tests with a hydraulic test machine. **International Journal of Impact Engineering**, v. 88, 2016, p. 139–152. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X15002109>. Acesso em: 15 abr. 2017.