



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIO  
DE ESMAGAMENTO DE TETOS VEICULARES COM  
BASE NA NORMA FMVSS 216a (ROOF CRUSH)**

**Autor:** João Marcos Hilário Barcelos Júnior

**Orientador:** Prof. Alessandro Borges de Sousa  
Oliveira, Dr.

**Co-Orientador:** Prof. Rita de Cássia Silva, Dra.

**Brasília, DF  
2023**



**JOÃO MARCOS HILÁRIO BARCELOS JÚNIOR**

**CALIBRAÇÃO E ENSAIO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE  
ESMAGAMENTO DE TETO VEICULAR COM BASE NA NORMA FMVSS 216a  
(ROOF CRUSH)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira

Co-Orientador: Dra. Rita de Cássia Silva

**Brasília, DF  
2023**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Hilário Barcelos Júnior, João Marcos.

Calibração de um dispositivo para teste de esmagamento de teto veicular com base na norma FMVSS 216a (Roof Crush): Calibração do dispositivo Roof Crush / João Marcos Hilário Barcelos Júnior. Brasília: UnB, 2023. N° p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2023. Orientação: Alessandro  
Borges de Sousa Oliveira.

1. Roof Crush. 2. FMVSS 216a. 3. Calibração.  
I. Oliveira, Alessandro Borges de Sousa. II. Dr. Eng. Mec.

CDU Classificação



## **CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE ESMAGAMENTO DE TETO VEICULAR COM BASE NA NORMA FMVSS 216a**

**João Marcos Hilário Barcelos Júnior**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 24/02/2023) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dra. Rita de Cássia Silva, UnB/ FGA**  
Co-orientador

---

**Prof. MsC: Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus queridos orientadores de TCC profa. Dra. Rita de Cássia Silva e prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira, com os quais trabalhei por mais de três anos em projetos de monitorias, iniciação científica e estágio e que me proporcionaram diversos conhecimentos técnicos para a engenharia e para a vida de modo geral.

Ao professor MsC. Saleh Barbosa Khalil por participar da banca deste trabalho e fornecer críticas construtivas valiosas para a evolução do projeto.

Agradeço ao Matheus Silva de Almeida pelo excelente trabalho na construção e soldagem da estrutura e componentes mecânicos do dispositivo Roof Crush.

Agradeço ao Eng. Pedro Henrique Barbosa Araújo de Almeida pelo excelente trabalho na construção do dispositivo Roof Crush.

Agradeço ao professor Evandro Leonardo Silva Teixeira pela ajuda com a confecção e dimensionamento de componentes elétricos para o circuito retificador de tensão utilizado no sensor LVDT.

Agradeço ao colega Alquier Arthur que veio da França para o Brasil à intercâmbio para trabalhar junto a mim no projeto Roof Crush. Sua ajuda permitiu a completa realização deste trabalho.

Agradeço ao Eng. João Carlos Wohlgemuth por toda a ajuda com o sistema hidráulicos deste projeto, furação do solo, dentre outros.

Agradeço ao técnico Danilo pela ajuda com a confecção dos corpos de prova, furação do solo, dentre outros.

Agradeço ao técnico Clóvis pela ajuda com a fabricação das peças utilizadas no sistema de retorno da placa.

Agradeço aos técnicos do laboratório de eletrônica NEI pela ajuda com a confecção do circuito retificador de tensão e soldagem dos terminais do sensor LDVT

Agradeço ao Valdemir pelo empréstimo de sua máquina de solda portátil, bem como de outros ferramentais.

Agradeço à FAP DF por proporcionar o aporte financeiro para a aquisição de material e contratação de recursos humanos para a construção do dispositivo Roof Crush.

Agradeço à minha amada mãe Kátia Silene Coelho Alencar por todo o suporte em toda a minha vida e durante a Graduação, sem nunca medir esforços, e por ser o maior base para qualquer conquista que eu possa futuramente alcançar.

Agradeço ao meu padrasto Leonnardo Victor Araújo Siqueira pelo apoio durante a Graduação por me proporcionar uma das principais ferramentas de trabalho e estudo

utilizada por mim em todos os dias, inclusive para a escrita deste trabalho, meu computador pessoal notebook.

Agradeço à minha namorada Maria Eva pelo apoio nos diversos momentos da Graduação.

Agradeço aos meus sogros Glauciane e Jilson pelo apoio em diversos momentos em que eu estudava para obter o diploma de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Agradeço aos meus irmãos Filipe Coelho Hilário Barcelos e Rebeca Araújo Coelho Alencar pelo apoio durante a Graduação.

Agradeço ao meu pai João Marcos Hilário Barcelos pelo apoio na Graduação, em especial pela ajuda durante a disciplina de Projeto Integrador 1 para Engenharia.

Aos diversos colegas e amigos que com os quais tive contato durante à Graduação e com os quais trabalhei em diversas disciplinas, em especial Gabriel Martins de Castro e Paulo Cezar da Silva.

Agradeço, por fim, à Universidade de Brasília por me proporcionar uma imensa mudança de perspectiva sobre o mundo ao meu redor por meio do conhecimento. Espero poder retribuir com excelência na forma de bons serviços para a sociedade e humanidade de modo geral.

## RESUMO

Uma das abordagens utilizadas por órgãos competentes e pela indústria automotiva para avaliar a segurança passiva em veículos submetidos ao capotamento é por meio da resistência ao esmagamento do teto. Essa avaliação é baseada nos procedimentos constantes na norma internacional FMVSS 216a, que estabelece critérios mínimos de produto para garantir a redução do número de mortes e lesões graves decorrentes do capotamento veicular em que há elevada intrusão. Em trabalhos anteriores de iniciação científica do autor, realizou-se o desenvolvimento e construção de um dispositivo de testes para operar segundo a norma FMVSS 216a. A maior parte da estrutura mecânica da bancada de testes foi construída no Laboratório GMSSA do prédio LDTEA no Campus UnB Gama com sucesso ainda nos trabalhos de iniciação científica. Entretanto, antes da realização do presente trabalho ainda havia a necessidade de tornar o dispositivo capaz de realizar os ensaios conforme os procedimentos estabelecidos em norma. Sendo assim, neste trabalho apresenta-se as etapas necessárias para tornar o dispositivo Roof Crush operável. Para tanto, é mostrada a montagem, os testes e a calibração dos sistemas de medição das grandezas relevantes para o ensaio de esmagamento. Realizou-se também testes iniciais com o dispositivo e este se encontra capaz de realizar os ensaios para os quais foi projetado. Apresenta-se, por fim, os resultados relevantes para avaliação de desempenho do dispositivo, bem como sugestões para trabalhos futuros e boas práticas a serem seguidas durante a operação do equipamento.

**Palavras-chave:** Roof Crush Test. FMVSS 216a. Capotamento. Ensaio. Calibração. Instrumentação.

## **ABSTRACT**

One of the approaches used by competent institutes and the automotive industry to assess passive safety in vehicles subject to rollover is through the crushing strength of the roof. This assessment is based on the procedures contained in the international standard FMVSS 216a, which establishes minimum product criteria to ensure the reduction in the number of deaths and serious injuries resulting from vehicle rollovers in which there is a high intrusion. In previous works of scientific initiation by the author, the development and construction of a test device to operate according to the FMVSS 216a standard was carried out. Most of the mechanical structure of the test bench was built in the GMSSA Laboratory of the LDTEA building on the UnB Gama Campus, with success still in the scientific initiation work. However, before carrying out this work, there was still a need to make the device capable of performing the tests according to the procedures established in the standard. Therefore, this work presents the necessary steps to make the Roof Crush device operable. It was also possible to perform the initial tests with the device and it is capable of performing the tests for which it was designed for. Finally, the relevant results for evaluating the performance of the device are presented, as well as suggestions for future work and good practices to be followed during the operation of the equipment.

**Keywords:** Roof Crush Test. FMVSS 216a. Rollover. Essay. Calibration. Instrumentation.



## LISTA DE ABREVIATURAS

ABS – Anti-lock Braking System  
ACC – Adaptative Cruise Control  
ADAS – Advanced Driver Assistance Systems  
AIS - Abbreviated Injury Scale  
ATD - Anthropomorphic Test Devices  
BIW – Body In White  
CFIR - Center for Injury Research  
CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito  
CP – Corpo de Prova  
CRIS - Controlled Rollover Impact System  
EBA – Emergency Braking Assist  
ECE - Economic Commission for Europe  
ECU – Electronic Control Unit  
ESC – Eletronic Stability Control  
ESP - Eletronic Stability Program  
ESV - Experimental Safety Vehicles  
EUA – Estados Unidos da América  
FAP DF – Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal  
FARS - Fatality Analysis Reporting System  
FGA – Faculdade do Gama  
FMVSS – Federal Motor Vehicle Safaty Standards  
GMSSA – Grupo de Modelagem e Simulação de Sistemas Automotivos  
GTP 1000 – Sensor de pressão da empresa Gulton  
HIC - Head Injury Criterion  
HLDI - Highway Loss Data Institute  
HPC - Head Protection Criteria  
IIHS - Insurance Institute for Highway Safety  
JRS - Jordan Rollover System  
LDTEA - Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas  
LKAS – Lane Keep Assist System  
LVDT – Linear Variable Differential Transformer  
NCAP - New Car Assessment Program

NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration

OEM – Original Equipment Manufacturer

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PIBIC - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

PNATRANS – Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito

SAE – Society of Automotive Engineers

SI - Severity Index

TCC 1 – Trabalho de Conclusão de Curso 1

SWR – Strength to Weight to Ratio

UnB – Universidade de Brasília

UVW – Unloaded Vehicle Weight

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1 ASPECTOS GERAIS DE SEGURANÇA VEICULAR	16
2.2 TECNOLOGIAS RELACIONADAS À SEGURANÇA VEICULAR	20
2.2.1 Estrutura Veicular (Vehicle Body)	20
2.2.2 Biomecânica	22
2.3 ROOF CRUSH TEST (FMVSS 216a)	24
2.3.1 Histórico da norma	24
2.3.2 Procedimentos dos ensaios experimentais	27
2.3.3 Justificativas para a utilização do Roof Crush Test	30
2.3.4 Concepção do dispositivo Roof Crush construído no Lab. GMSSA	30
2.4 TESTES DINÂMICOS RELACIONADOS AO CAPOTAMENTO	35
2.4.1 Testes dinâmicos para avaliação da performance estrutural do teto veicular em capotamentos	35
2.4.2 Dolly Rollover Test (FMVSS 208)	36
2.4.3 Jordan Rollover System (JRS)	37
2.4.4 Controlled Rollover Impact System (CRIS)	40
2.5 SISTEMAS DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA	41
2.5.1 Processo de calibração de sensores	43
2.6 SISTEMAS HIDRÁULICOS	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>49</b>
3.1 CALIBRAÇÃO DE SENSORES	49
3.1.1 Calibração do transdutor de pressão	49
3.1.2 Calibração do transdutor de deslocamento linear LVDT	54
3.2 ENSAIOS PRELIMINARES (CRASHBOX)	58
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO NOVO SISTEMA MECÂNICO DE RETORNO DA PLACA	59
3.4 INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS	65
3.5 SIMULAÇÕES DO SISTEMA HIDRÁULICO UTILIZADO	67
3.6 MECÂNICA DO MOVIMENTO DA PLACA DE ESMAGAMENTO	72
3.7 ENSAIOS PRELIMINARES (ROOF CRUSH)	82
3.7.1 Primeiro ensaio com aquisição de dados (05/01/2023)	82
3.7.2 Segundo ensaio com aquisição de dados (06/01/2023)	82
3.7.3 Terceiro ensaio com aquisição de dados (07/01/2023)	85
3.7.4 Quarto ensaio com aquisição de dados (31/01/2023)	91
<b>4 RESULTADOS PRELIMINARES</b>	<b>95</b>
4.1 CURVA MÉDIA DE CALIBRAÇÃO	95
4.1.1 GTP1000	95
4.1.2 LVDT	95
4.2 ENSAIO COM O DISPOSITIVO CRASH BOX	96
4.3 ENSAIOS COM O DISPOSITIVO ROOF CRUSH	98
4.3.1 Primeiro ensaio com amostra (06/01/2023)	98
4.3.2 Segundo ensaio com amostra (07/01/2023)	100
4.3.3 Terceiro ensaio com amostra (31/01/2023)	103
4.3.4 Quarto ensaio com amostra (31/01/2023)	105

<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>
<b>6 TRABALHO FUTUROS.....</b>	<b>110</b>
<b>7 CRONOGRAMA DO TCC 2 .....</b>	<b>111</b>
<b>8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>9 ANEXOS .....</b>	<b>114</b>
ANEXO I.....	114
ANEXO II.....	116
ANEXO III.....	118
ANEXO IV .....	124

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança veicular tornou-se, nas últimas décadas, uma das grandes preocupações durante o projeto de um veículo. Prova disso é que os consumidores, quando questionados sobre os aspectos de maior relevância durante a aquisição de um automóvel, apontam, além de conforto e confiabilidade, que o produto deve ser o mais seguro possível no caso de um acidente [5], [7].

É certo que boa parte da melhora na segurança dos veículos ao longo do tempo está relacionada à implementação de normas no sentido de tornar algum item de segurança veicular obrigatório. Um exemplo nacional disso foi a promulgação da lei municipal, em 04 de novembro de 1994 na cidade de São Paulo, que tornou obrigatória a utilização do cinto de segurança pelos ocupantes do banco dianteiro dos automóveis particulares ou de aluguel que circulassem na cidade. No ano seguinte (1995), estima-se que a implementação desse sistema impediu 1500 lesões graves e 4500 lesões leves [5].

Outros exemplos importantes da influência da legislação nacional como força motriz para evoluções dos veículos em termos de segurança veicular foi a introdução dos freios ABS e do sistema Airbag, por meio das Resoluções CONTRAN N° 395 e 394, respectivamente [9], [10]. Esses se tornaram itens de série em veículos nacionais produzidos a partir de 2014. Da mesma forma, o controle eletrônico de estabilidade (ESC/ESP) está previsto para ser implementado nos veículos nacionais ou importados das categorias M1 e N1 produzidos a partir de 1º de janeiro de 2024, conforme estabelecido pela Resolução do CONTRAN N° 799 de 22 de outubro de 2022 [11].

Para mitigar as lesões graves e mortes acarretadas por acidentes de trânsito existem iniciativas nacionais e internacionais. Nesse contexto, uma das iniciativas nacionais mais recentes é o programa PNATRANS (Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito). Criado em janeiro de 2018, esse tem por objetivo a redução do índice nacional de mortes de trânsito por grupo de habitantes (ou veículos) por, no mínimo, metade dos valores apurados no ano da entrada em vigor da Lei nº 13.614 [30]. Ressalta-se, no entanto, que apesar de ser Nacional, o PNATRANS foi instaurado em consonância com um plano global da ONU visando a segurança no trânsito. Através da Resolução 74/299, a Assembleia Geral da ONU declarou a Segunda Década de Ação pela Segurança no Trânsito (2021-2030) [29]. Esta baseia-

se em alguns pilares de atuação, assim como o PNATRANS. As ações incluem o Transporte Multimodal, Infraestrutura viária segura, Segurança do veículo e Uso Seguro da Via.

Segundo dados da Organização Mundial da Saúde, a cada ano aproximadamente 1,3 milhão de pessoas morrem todos os anos em decorrência de acidentes de trânsito. Além disso, ocorrem entre 20 e 50 milhões de lesões não fatais a cada ano no mundo, sendo que muitas dessas resultam em deficiência por parte das vítimas. As mortes decorrentes dos sinistros de trânsito ocorrem majoritariamente entre pessoas de 5 a 29 anos. Ademais, jovens do sexo masculino com menos de 25 anos têm 3 vezes mais chances de se envolverem em acidentes de trânsito fatais do que jovens do sexo feminino da mesma faixa etária. Outrossim, acidentes de trânsito acarretam prejuízos de cerca de 3% do PIB de diversos países [33], [34].

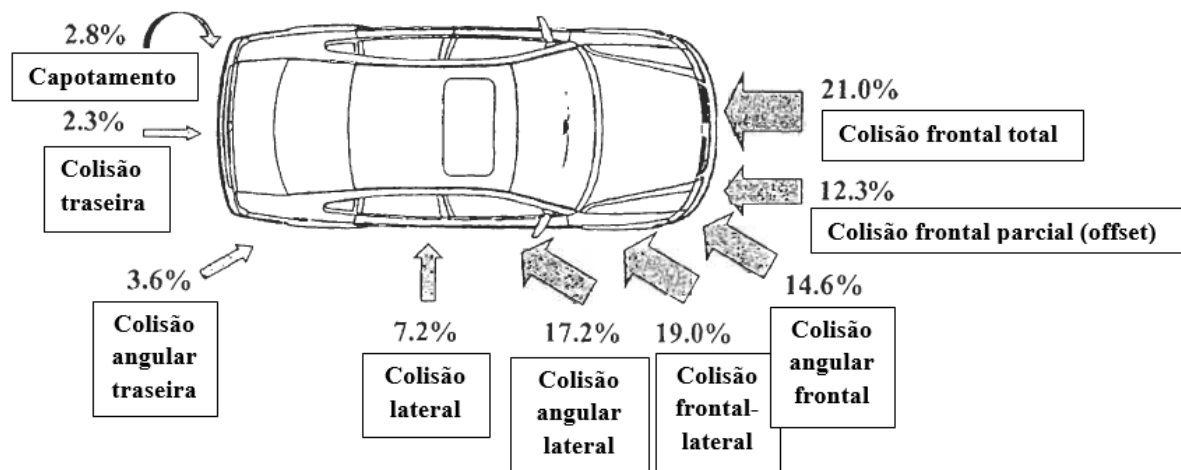


Figura 1. Frequência de acidentes veiculares considerando os diversos tipos de sinistros. (Fonte: adaptado de [32])

Dentre os tipos de acidentes mais frequentes de veículos automotores destacam-se: colisão frontal, colisão lateral e colisão angular [32]. Entretanto, o capotamento veicular, apesar de não ser um dos mais frequentes, é um dos tipos de acidentes automotivos que possui maior contribuição no número de lesões graves e mortes dentre os acidentes de trânsito. Nos Estados Unidos, por exemplo, entre 2014 e 2018 apenas 2% do número total de acidentes veiculares resultaram em capotamento. Entretanto, 24% do número total de mortes decorrentes de sinistros foram causados pelo capotamento veicular [17]. Além disso, os acidentes de trânsito

nos EUA resultaram em 23551 mortes no ano de 2017. Dessas, aproximadamente 30% tiveram relação com o capotamento [17].

Com o objetivo de mitigar lesões graves e mortes causadas pelo capotamento, a NHTSA dispõe de um plano geral, que envolve a criação de normas obrigatórias para seguimento dos fabricantes de veículos OEMs (Original Equipment Manufacturers). As normas atuam no sentido de forçar as OEMs a incluírem itens de segurança ativa e passiva, bem como alterar configurações estruturais preexistentes para que algum critério de desempenho seja atingido. Nesse sentido, em termos de segurança passiva relativa ao capotamento tem-se a norma FMVSS 216a, cujo principal objetivo é garantir a redução de lesões graves e mortes devido ao esmagamento do teto veicular como consequência do contato teto/solo em eventos de capotamento. Essa norma se aplica a algumas categorias de veículos comercializados nos EUA e seu critério de avaliação baseia-se no peso do veículo [22], [23].

Nesse trabalho é feita uma revisão bibliográfica sobre aspectos gerais de segurança veicular (passiva e ativa), bem como objetos de estudo específicos da engenharia de segurança veicular, tais como: tecnologias relacionadas a estrutura veicular BIW e biomecânica. Além disso, apresenta-se os procedimentos experimentais da norma FMVSS 216a, um dos principais objetos de estudo deste texto. Também, apresenta-se uma breve descrição de testes dinâmicos que foram sugeridos por algumas entidades relacionadas à segurança veicular para serem incorporados às normas federais FMVSSs com o intuito de avaliar a resistência ao esmagamento do teto veicular.

Este texto tem como base trabalhos anteriores desenvolvidos por meio de projetos de Iniciação Científica (PIBIC) do autor. Dessa forma, apresenta-se brevemente algumas etapas da concepção do dispositivo Roof Crush, previamente desenvolvido e construído no Lab. GMSSA da UnB Gama como etapa de trabalhos supracitados. Apesar de a estrutura mecânica do equipamento já estar desenvolvida, antes desse trabalho ainda havia a necessidade de tornar o dispositivo Roof Crush capaz de realizar os ensaios de esmagamento conforme os procedimentos experimentais da norma. Nesse contexto, destaca-se o **Objetivo Geral** deste trabalho:

*“Tornar o dispositivo Roof Crush construído no Lab. GMSSA capaz de realizar os ensaios de resistência ao esmagamento de tetos veiculares (Roof Crush*

*Test) em conformidade com o protocolo experimental constante na norma americana FMVSS 216a.”*

Além disso, apresenta-se também as etapas necessárias para alcançar o Objetivo Geral. Essas etapas são os **Objetivos Específicos**, listados abaixo:

- Finalização da montagem dos suportes do novo sistema de contrapesos tangencial
- Calibração do Transdutor de pressão GTP 1000
- Calibração do sensor de deslocamento linear LVDT
- Confecção as amostras em alumínio para ensaios preliminares na máquina de CrashBox
- Instrumentação do dispositivo de ensaios de absorvedores CrashBox a fim de testar o sistema hidráulico e o sistema de aquisição de dados
- Ensaios preliminares na máquina de CrashBox e obtenção da curva Força x Deslocamento
- Confecção das amostras em aço SAE 1010 para ensaios preliminares do dispositivo Roof Crush
- Desenvolvimento e implementação do sistema de retorno
- Instrumentação do dispositivo Roof Crush
- Ensaios preliminares no dispositivo Roof Crush e obtenção dos dados de Deslocamento e de Pressão
- Plotagem das curvas Força x Deslocamento dos ensaios de esmagamento

A conclusão dos Objetivos Específicos permitiu o alcance do Objetivo Geral do trabalho. Desse modo, apresenta-se nas seções seguintes as etapas necessárias para tornar o dispositivo Roof Crush operável e os resultados obtidos nos ensaios, bem como as respectivas análises.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS DE SEGURANÇA VEICULAR

O crescimento do número de veículos de passageiros e transportes de carga foi, até a década de 1970, parcialmente responsável pelo aumento de lesões graves e mortes por quilômetro por passageiro. Nas décadas seguintes, no entanto, houve queda no número de danos graves aos passageiros por fatores diversos, tais como: melhorias nas estradas (tanto no pavimento como em sinalizações de trânsito), educação no trânsito e performance do veículo (segurança veicular). Este último trata-se dos esforços dos fabricantes de veículos no sentido de prevenir acidentes, ou mesmo reduzir os efeitos dos acidentes que não puderem ser evitados. Essas são definições básicas dos termos “Prevenção de acidentes” e “Mitigação de acidentes”, também popularmente conhecidos como segurança ativa e passiva, respectivamente [7].

Além de conforto e confiabilidade, o aspecto de segurança veicular é, atualmente, um dos mais relevantes e desejáveis num produto veicular, de acordo com os próprios consumidores. Os veículos modernos devem cumprir uma série de requisitos relacionados à emissões e consumo de combustível, conforto, emissão de ruído, confiabilidade, durabilidade, performance, reciclabilidade e, por fim, segurança [7].

Nos Estados Unidos, um grande salto no desenvolvimento de sistemas de segurança automotivos ocorreu em meados da década de 1960 devido à criação da National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), que promoveu normas FMVSSs de regulamentação obrigatórias aos fabricantes veiculares considerando as diversas classes de veículos terrestres comercializados. Algumas das normas e seus respectivos conteúdos estão mostrados na Tab. (1). Entretanto, é necessário observar que as normas estão sujeitas a mudanças em função do desenvolvimento de novas tecnologias e de requisitos mínimos de segurança veicular constantemente reestabelecidos [7].

Como mencionado, normalmente os sistemas de segurança possuem a função de prevenir ou mitigar os incidentes veiculares. Nesse sentido, existem definições importantes de alguns conceitos necessários para o entendimento das classificações de segurança veicular.

Tabela 1 – Tabela com algumas normas americanas promovidas pela NHTSA.  
(Fonte: adaptado de [32])

FMVSS	Descrição
201	Proteção dos ocupantes contra impactos com objetos do interior do veículo.
202	Equipamentos de restrição para cabeça.
203	Proteção do motorista contra impacto com sistema de direção.
205	Materiais de vidro (requisitos de segurança).
206	Trancas das portas e retenção de componentes das portas.
207	Sistemas dos assentos.
208	Proteção dos ocupantes contra colisões veiculares.
214	Proteção contra impacto lateral.
216	Resistência ao esmagamento do teto veicular.
219	Zona de intrusão do parabrisa.

A seguir, lista-se alguns deles com suas respectivas definições:

- **Segurança exterior:** está relacionado ao projeto de componentes exteriores no sentido de minimizar os danos aos pedestres decorrentes de colisões. Como exemplo, tem-se os parachoques, que antigamente eram fabricados com aço e atualmente são fabricados com materiais compósitos [7].
- **Segurança interior:** projeto de componentes do interior do veículo para minimizar os danos contra os ocupantes em eventos de colisão [7].
- **Sistemas de retenção dos ocupantes:** sistemas que exercem influência no movimento relativo entre os passageiros e o veículo. A exemplo disso tem-se o cinto de segurança e os apoios de cabeça [5].
- **Colisão primária:** colisão de um veículo com um obstáculo, seja este um veículo ou um objeto qualquer, até mesmo um ser humano ou animal.
- **Colisão secundária:** colisão dos ocupantes com partes do veículo.

- **Sistemas de segurança ativa:** recursos de segurança que devem ser ativados manualmente para exercerem sua função de atuar durante uma colisão. O principal exemplo de tecnologia que se encaixa neste conceito é o cinto de segurança.
- **Sistemas de segurança passiva:** sistemas que dispensam qualquer acionamento prévio por parte dos ocupantes para que sejam ativados durante acidentes, que são detectados por meio de sensores. Um exemplo disso é o AirBag.

Os acidentes veiculares são influenciados por diversos fatores, tais como: condições ambientais (ex. chuva), informações apresentadas ao motorista, condições da via (ex. lama, barro, cascalho, buracos), condições técnicas do veículo (ex. falhas mecânicas, elétricas, etc). Entretanto, a principal causa de acidentes ainda é o próprio erro humano. Dessa forma, torna-se necessário promover condições adequadas para que o condutor possa operar com conforto, ergonomia, iluminação adequada, boa visibilidade, sistemas de assistência ao condutor (freios ABS, motor, controle da taxa de guinada, assistente de frenagem), estabilidade veicular, insensibilidade ao vento, uso de sistemas de informação e comunicação [7]. Mais recentemente, iniciou-se os desenvolvimentos de sistemas ADAS (Advanced Driver Assistance-Systems) que foram criados para reduzir a possibilidade de erros humanos durante a condução do veículo. Dentre os principais sistemas ADAS, tem-se: frenagem de emergência (EBA), assistência de permanência em faixa (LKAS) controle de cruzeiro adaptativo (ACC) [2].

Segundo [7] as classificações de sistemas de segurança veicular em Prevenção e Mitigação estão ultrapassadas, pois alguns sistemas que são classificados como “passivos” podem atuar de maneira “ativa”. A exemplo disso, tem-se os sistemas de airbag que, apesar de serem utilizados para impedir lesões dos ocupantes com o interior do veículo após o acidente, podem ser inflados imediatamente antes da colisão. Isso é possível por conta da utilização de radares, que são capazes de identificar objetos à frente, bem como suas distâncias relativas ao veículo. Com base na informação desse sensor, a ECU do ABS é capaz de realizar um pré-acionamento do sistema.

Algumas tecnologias associadas à prevenção de acidentes *accident avoidance* estão sendo utilizadas concomitantemente às tecnologias de mitigação de acidentes

*mitigation of injuries*. A exemplo disso, tem-se a tecnologia de fusão sensorial *sensor fusion*, na qual os sensores são utilizados tanto para prevenir acidentes como para pré-ativação de sistemas de segurança imediatamente antes da colisão (pré-colisão) caso o acidente não possa ser evitado [32].

A classificação de mitigação de acidentes pode ser subdividida em dois subgrupos, que são:

- **Proteção durante o acidente:** proteção dos ocupantes dos veículos (em caso de colisões multiveicular, os ocupantes de ambos os veículos devem ser protegidos).
- **Proteção após o acidente:** capacidade de abrir as portas após o acidente sem auxílio de ferramentas externas. Prevenção de incêndios.

Uma outra área da segurança veicular é a pré-colisão. Neste caso, se os sensores detectarem a ocorrência inevitável de uma colisão algumas medidas serão realizadas, tais como: frenagem automática, ativação dos pré-tensionadores dos cintos de segurança, fechamento do teto-solar (caso tenha) e alteração da posição do assento.

Segundo [7] a legislação possui grande influência no desenvolvimento de tecnologias relacionadas à segurança veicular. No ano de 1832, na Inglaterra, já existiam normas de segurança para garantir o desempenho de ônibus com propulsão a vapor em acidentes. Outra grande contribuição em termos de desenvolvimento de normas relacionadas à segurança veicular se iniciou, nos Estados Unidos, por conta do advogado dos consumidores Ralph Nader e por conta de relatórios de segurança veicular e “crashworthness” divulgados por institutos tais como o IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) e HLDI (Highway Loss Data Institute). Além disso, contribuições em segurança veicular decorreram das atividades de programas globais relacionados à segurança veicular, tal como o NCAP (New Car Assessment Program) que avaliam veículos sob diferentes aspectos da segurança (colisões, frontais, laterais, biomecânica, etc).

A Figura (2) apresenta uma visão geral sobre as áreas de segurança veicular, bem como fatores de influência em cada área.

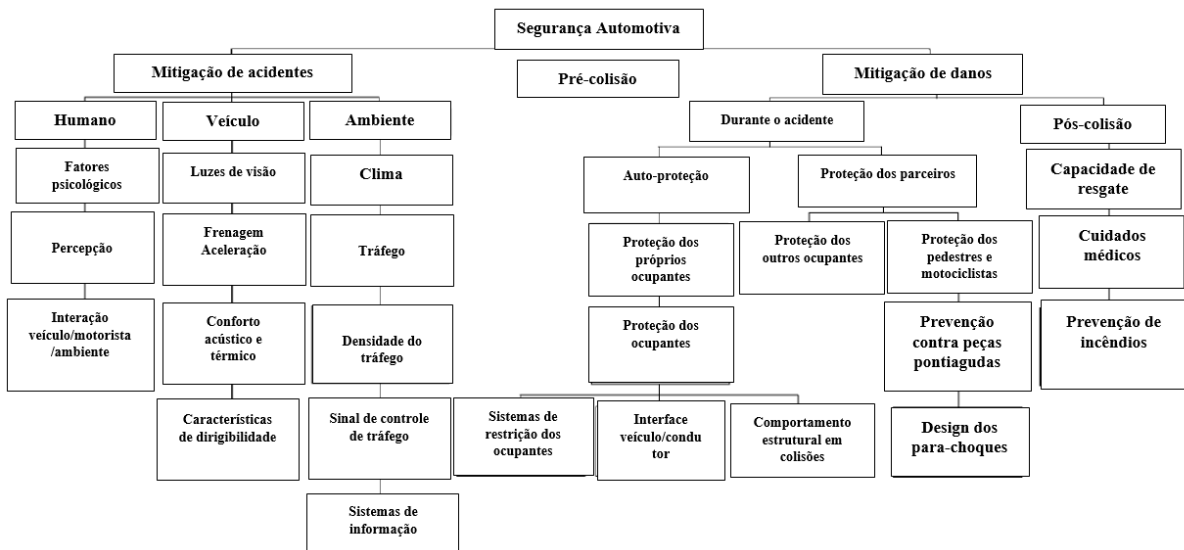


Figura 2. Diagrama com visão geral das áreas de segurança veicular.  
(Fonte: adaptado de [25])

## 2.2. TECNOLOGIAS RELEACIONADAS À SEGURANÇA VEICULAR

### 2.2.1. Estrutura veicular (Vehicle Body)

A estrutura veicular conhecida como Body in White (BIW), bem como o interior dos veículos modernos são projetados de maneira a promover segurança aos ocupantes no caso de acidentes. Entretanto, os primeiros projetos da carroceria e chassis veiculares eram construídos com a finalidade de suportar componentes e subsistemas relacionados ao funcionamento do veículo e dirigibilidade, tais como: sistema de Powertrain, suspensão, bem como os ocupantes do veículo. O primeiro trabalho patenteado no sentido de desenvolver uma estrutura voltada para a segurança veicular em colisões foi o de Bela Barény, em Outubro de 1952. Nesse trabalho, Barény afirmou que o compartimento dos passageiros deveria possuir uma maior resistência ao esmagamento do que as regiões frontal e traseira dos veículos que, por sua vez, deveriam também ser capazes de absorver a energia de impacto em eventos de colisão [32].

Nos veículos compactos modernos a estrutura BIW representa cerca de 25% do peso total bruto total do veículo. Essa parcela de peso representa uma grande evolução da engenharia de carroceria veicular, sobretudo quando se considera o

número crescente de requisitos de projeto de veículos modernos, que devem aliar baixo peso (menor consumo energético) à segurança veicular passiva. Outros aspectos relevantes que foram desenvolvidos ao longo dos anos foram: maior durabilidade de componentes e sistemas, maior espaço no interior para os ocupantes, redução dos níveis de vibrações mecânicas transmitidas aos ocupantes e aumento da rigidez torsional [7].

Um ponto importante de projeto de veículos modernos em termos de segurança veicular em colisões trata-se da integridade do tanque de combustível, que não deve falhar mesmo com impactos laterais e traseiros [32].

As colunas A e B devem ser reforçadas e fornecer boa proteção aos ocupantes que estiverem utilizando cinto de segurança no caso de capotamentos. Na Fig.(3) verifica-se normas relativas aos requisitos de segurança em diversas regiões do veículo e considerando diversos acidentes, tais como: capotamento, impacto traseiro, impacto frontal e impacto lateral [32].

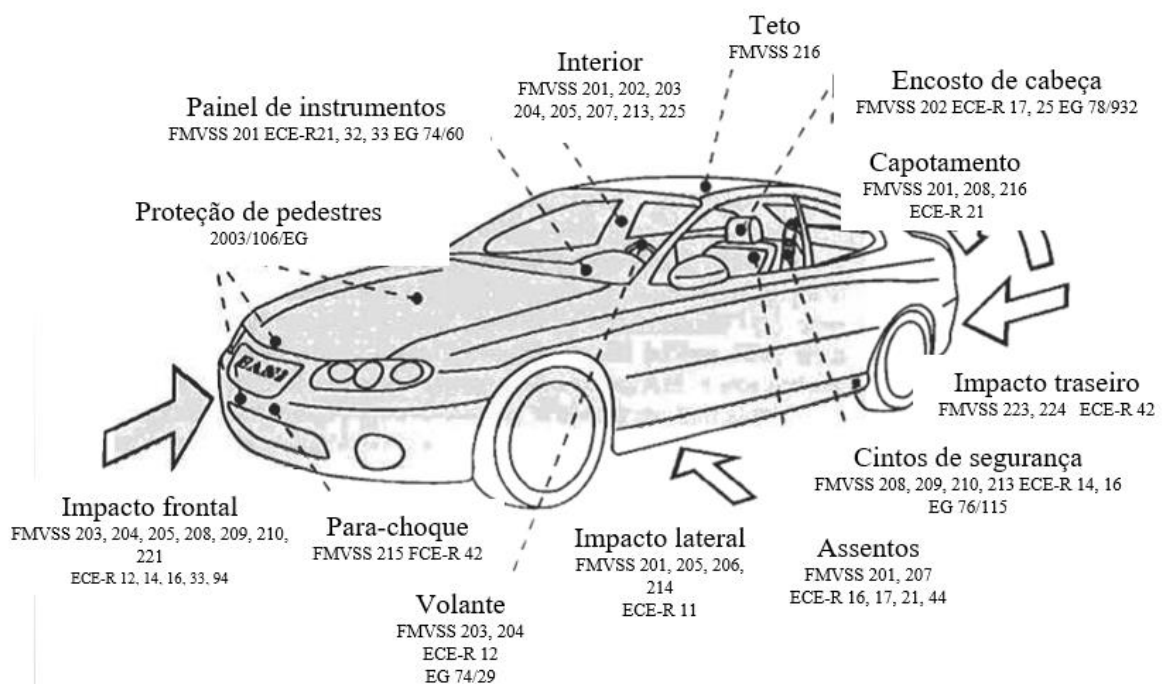


Figura 3. Relação entre tipos de colisão veicular e as respectivas normas com o objetivo de mitigar danos decorrentes de tais colisões.  
(Fonte: adaptado de [32])

### 2.2.2. Biomecânica

A biomecânica é o ramo da ciência que aplica os conceitos da mecânica clássica estudada nos cursos tradicionais de engenharia e exatas aos sistemas biológicos. Essa disciplina tem recebido maior relevância na engenharia automotiva no sentido de entender os mecanismos de lesões no corpo humano decorrentes de acidentes veiculares. Além disso, relações entre experts de medicina e engenharia para ampliar a troca de conhecimento e promover avanços no que tange à segurança dos ocupantes têm sido estabelecidas por meio de conferências sobre o tema. Como exemplo disso, tem-se as seguintes conferências: Experimental Safety Vehicles (ESV), Stapp Car Crash, SAE International, dentre outras [5], [7], [32].

Uma das primeiras contribuições de grande relevância relacionada ao entendimento do comportamento de seres humanos quando submetidos às grandes desacelerações se deu através dos experimentos de Colonel John Stapp. Esse foi o primeiro ser humano a sofrer uma desaceleração de 20g (20 vezes a aceleração da gravidade) e tem seu sobrenome atribuído a uma das grandes conferências relacionadas ao estudo do Impacto em Automóveis. Os experimentos de John possibilitaram o estabelecimento de níveis de tolerância aceitáveis para o corpo humano, que são utilizadas como referência para estudos de Impacto por parte dos fabricantes de automóveis, por exemplo [32].

Os limites de tolerância de danos aos seres humanos podem ser classificados por meio da escala AIS (Abbreviated Injury Scale), por exemplo. Os valores de danos individuais são, em geral, classificados por níveis de severidade, nos quais o valor '0' representa 'nenhum dano causado' e o valor '6' representa 'maior dano possível causado (morte)'. Ainda, é possível utilizar a escala AIS para classificar as lesões de acordo com as diferentes regiões do corpo humano, conforme representado no Fig. (4).

Existem diferentes critérios de performance para cada região do corpo desenvolvidos no intuito de se determinada os limites aceitáveis em termos de acelerações e solicitações mecânicas. A partir do estudo de 'Impacto de cadáveres em placa rígida' conduzido pelo Professor L. Patrick da Wayne State University foi observado uma relação entre o nível de desaceleração suportada por um cérebro humano em função do tempo. Como resultado do estudo obteve-se a "Curva de Patrick", representada na Fig.(5).

AIS	Cabeça	Tórax	Abdômen	Coluna	Pélvis óssea
1	Dores de cabeça ou tontura	Única costela fraturada	Laceração superficial	Distensão aguda (sem fratura ou luxação)	Fratura do dedo do pé
2	Sem consciência < 1h	2-3 costelas fraturadas; fratura do tronco	Baço, rim ou fígado; laceração ou contusão	Fratura menor sem envolvimento da medula	Fratura simples na tíbia, pélvis ou patela
3	Sem consciência 1 a 6h	Mais do que 4 costelas fraturadas;	Baço, rim; grande laceração	Disco rompido com danos na raiz nervosa	Luxação no joelho; Fratura do fêmur
4	Sem consciência 6 a 24h	Mais do que 4 costelas fraturadas; Falhas no peito	Fígado; grande laceração	Síndrome do cordão incompleto	Amputação ou esmagamento acima do joelho
5	Sem consciência > 24 h, hematoma elevado	Laceração da aorta	Ruptura do rim, fígado ou cólon	Quadriplegia	Esmagamento da pélvis

Figura 4. Escala AIS aplicada a diversas partes do corpo humano de forma individual. (Fonte: adaptado de [32])

Desaceleração

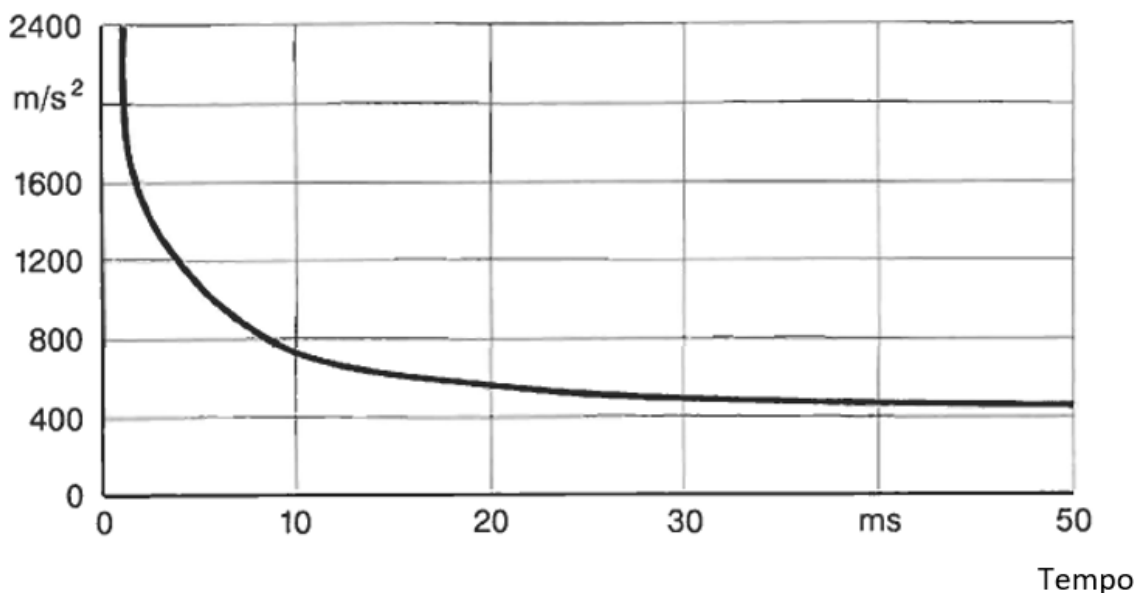


Figura 5. Curva de Patrick para avaliação de níveis de desaceleração permissíveis para o cérebro humano em função do tempo. (Fonte: adaptado de [32])



Os estudos de Patrick foram também utilizados como base para o desenvolvimento do critério SI (severity index) cujo objetivo é quantificar a severidade de um determinado impacto em termos da magnitude da desaceleração. O SI é representado pela Eq. (1).

$$SI = \int_0^T a^{2,5}(t) dt \quad (1)$$

De modo geral, o valor limite para o SI é de 1000 considerando a aceleração unidirecional. Mais tarde, novos critérios foram estabelecidos, sendo o HIC (Head Injury Criterion) nos Estados Unidos e o HPC (Head Protection Criteria) na Europa. O HIC é determinado a partir da Eq. (2). Em geral, os valores considerados aceitáveis para o HIC em testes de colisão veiculares estão abaixo de 1000:

$$HIC = \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right)^{2,5} (t_2 - t_1) < 1000 \quad (2)$$

Apesar de ser utilizado como parâmetro para avaliação da performance dos veículos em eventos de Impacto, é importante ressaltar que o HIC possui informação limitada. Isso porque a aceleração angular (anterior-posterior) não é considerada em sua avaliação. Entretanto, a influência do fenômeno rotacional foi estudada por Fiala, que estabeleceu um limite de 7500 rad/s<sup>2</sup> considerando uma massa cerebral de 1300 gramas [32].

Existem outros critérios de performance relacionados à biomecânica para as diferentes regiões do corpo humano, tais como: proteção do peitoral (Chest Injury) e Proteção do Pescoço (Neck Injury). Além disso, outros critérios de performance (como Peitoral, Pélvico, Perna/Joelho e Proteção de Pedestres) são utilizados como base para o estabelecimento de normas de segurança veicular, como a FMVSS 208 (no caso de Perna/Joelho), por exemplo [32].

## 2.3. ROOF CRUSH TEST (FMVSS 216a)

### 2.3.1. Histórico da norma

Segundo [19], no total foram lançadas 4 versões da norma FMVSS 216 ao longo da existência do Roof Crush Test, sendo que a primeira versão foi lançada em

1973 pela NHTSA. Pouco mais de 30 anos depois, em 2005, foi lançada a versão NPRM. A terceira versão da norma é denominada SNPRM e foi lançada em janeiro de 2008. A quarta e atual versão da norma é a FMVSS 216a, que é a de maior interesse para este trabalho. A FMVSS 216a foi lançada em abril de 2009 e implementou algumas alterações importantes com relação à SNPRM. Dentre elas, tem-se:

- Aumento da força de esmagamento mínima requerida a ser atingida durante o percurso de 127 mm da placa de esmagamento. O aumento foi de 1,5 vezes o peso do veículo sem carga UVW para 3 vezes UVW. Essa alteração contempla determinadas categorias de veículos, tais como: veículos de passageiros, veículos de multiuso, caminhões e ônibus já submetidos aos requisitos da norma. Ressalta-se, no entanto, que este aumento considera apenas os veículos com peso bruto total de 2722 kg (6000 lbs) ou menos.
- Inclusão de novos veículos, sendo este com massa entre 2722 kg (6000 lb) e 4536 kg (10000 lb). Para estes veículos, a carga mínima que o teto deve suportar é de 1,5 vezes o peso do veículo sem carga (SWR de 1,5).
- Todos os veículos submetidos a FMVSS 216a devem passar pelo teste de esmagamento em ambos os lados (passageiro e motorista).
- Novos requisitos em relação à manutenção do espaço para a cabeça após o esmagamento foram estabelecidos.
- Foram estabelecidos prazos para que os fabricantes, bem como fornecedores de componentes possam adequar seus produtos às disposições presentes na norma (introdução gradual phase-in). A solicitação para cumprimento dos requisitos da norma foi de 1 de setembro de 2016, considerando algumas exceções (a solicitação para os veículos produzidos em mais de um estágio foi a partir de 1 de setembro de 2017).

Segundo [23], após realizar estudos considerando os ensaios dinâmicos e de queda invertida, a agência concluiu que o teste Roof Crush, apesar de ser quase estático, é capaz de apresentar uma boa correlação entre resistência ao esmagamento e possibilidade de lesões graves e mortes.

Embora as melhorias nos requisitos da norma FMVSS 216a tenham mostrados possíveis benefícios em termos de redução de fatalidades e lesões de ocupantes, o

documento ressalta que existem mais de 10000 fatalidades decorrentes do capotamento a cada ano. Apenas uma pequena parcela dessas mortes (cerca de 7%, o que corresponde a 667 casos) está relacionada ao esmagamento do teto veicular. Ademais, estima-se que desses 667, a atual norma deve ser capaz de impedir 135 mortes devido ao esmagamento de tetos veiculares por capotamento. Considerando os números supracitados, o regulamento destaca que o aumento da resistência ao esmagamento do teto por meio da FMVSS 216a faz parte de um plano maior para reduzir as lesões graves e mortes por conta do capotamento veicular. Dentre as ações realizadas para diminuir o número de fatalidades decorrentes desse tipo de acidente, tem-se 3 abordagens, sendo a primeira a própria redução de capotamentos veiculares. Esse tipo de abordagem baseia-se nas tecnologias de segurança ativas já abordadas, tal como o controle de estabilidade ESP. Estima-se que a introdução do ESP é capaz de reduzir em, aproximadamente, 50% o número de fatalidades causadas pelo capotamento veicular, além de prevenir outros tipos de colisões. A segunda abordagem importante para aumento da segurança dos ocupantes no que diz respeito ao capotamento é o impedimento da ejeção dos ocupantes durante o acidente. A terceira abordagem trata-se do aumento da proteção dos ocupantes em capotamentos que não podem ser evitados e é nesse contexto que a norma FMVSS 216a se insere [22].

Em termos de resultados da última norma vigente (FMVSS 216a) em relação à anterior (SNPRM), destaca-se a prevenção de 135 acidentes fatais e de 1065 acidentes não fatais. Além disso, estima-se que o custo de aumento na produção de cada veículo afetado pela última versão da norma está entre \$69 e \$114. O preço do novo design dos veículos deve aumentar, em média, \$54 o preço do produto final. O aumento de preço devido ao maior consumo de combustível (decorrentes da adição de peso necessária para atingir as especificações da norma) está entre \$15 e \$62. Considerando os custos para cada veículo afetado pela norma, determina-se que o impacto financeiro total devido ao cumprimento da FMVSS 216a deve aumentar de \$875 milhões para \$1,4 bilhão anualmente [22].

Considerando a base de dados FARS (Fatality Analysis Reporting System), no ano de 2007 houveram 10196 mortes como resultado de capotamentos de veículos leves. Esse número representa 35% do total de mortos naquele ano considerando o mesmo tipo de veículo citado. Do número de mortos por capotamento, estima-se que

57% dos ocupantes foram completamente ou parcialmente ejetados do veículo durante a colisão (sendo que 47% foram completamente ejetados) [17].

### 2.3.2. Procedimentos dos ensaios experimentais

A FMVSS 216a estipula certas especificações que o dispositivo de esmagamento tem de cumprir. A seguir lista-se os procedimentos experimentais e requisitos do dispositivo Roof Crush:

1. O veículo deve ser rigidamente fixado à uma base essencialmente composta por perfis I, de modo a impedir qualquer movimento de corpo rígido que venha a interferir na distribuição de força na estrutura. O veículo é fixado ao longo de toda a distância entre eixos. As rodas do veículo devem ser previamente retiradas. Esse procedimento é também conhecido como Tie-down procedure.
2. A placa de esmagamento deve possuir dimensões preestabelecidas de 762 mm (largura) x 1829 mm (comprimento). Além disso, existem dois ângulos que devem ser atendidos para o correto posicionamento da placa. A placa deve ser girada de 25° com relação ao seu eixo longitudinal (roll angle) e 5° com relação ao seu eixo transversal (pitch angle). Esse posicionamento busca representar o contato teto/solo durante o capotamento veicular.
3. O veículo deve ser posicionado relativamente ao dispositivo de modo que a linha de centro longitudinal esteja a 10 mm de distância do ponto de contato inicial com o teto do veículo. Além disso, a coluna A do automóvel deve ser tomada como referência para que o mesmo seja posicionado a  $254 \pm 10$  mm de uma das arestas, conforme representado na Fig. (6).
4. A placa deve se deslocar 5 polegadas (127 mm) na direção normal à sua face inferior, após o contato inicial com o teto, para realizar o esmagamento. A taxa de deslocamento da placa deve ser constante e de até 13 mm/s.
5. Para que o veículo seja aprovado no teste, a força máxima (força de pico) de reação do teto deve ser, pelo menos, 3 vezes a força peso atuante sobre o veículo descarregado (Unloaded Vehicle Weight-UVW). Esse é o único critério utilizado para a avaliação da resistência ao esmagamento do teto devido ao capotamento. O critério citado é denominado Strength to Weight Ratio (SWR). Em português denomina-se “Razão força por peso”.

$$SWR = \frac{\text{força de pico (reação do teto)}}{\text{força peso do veículo}} \quad (3)$$

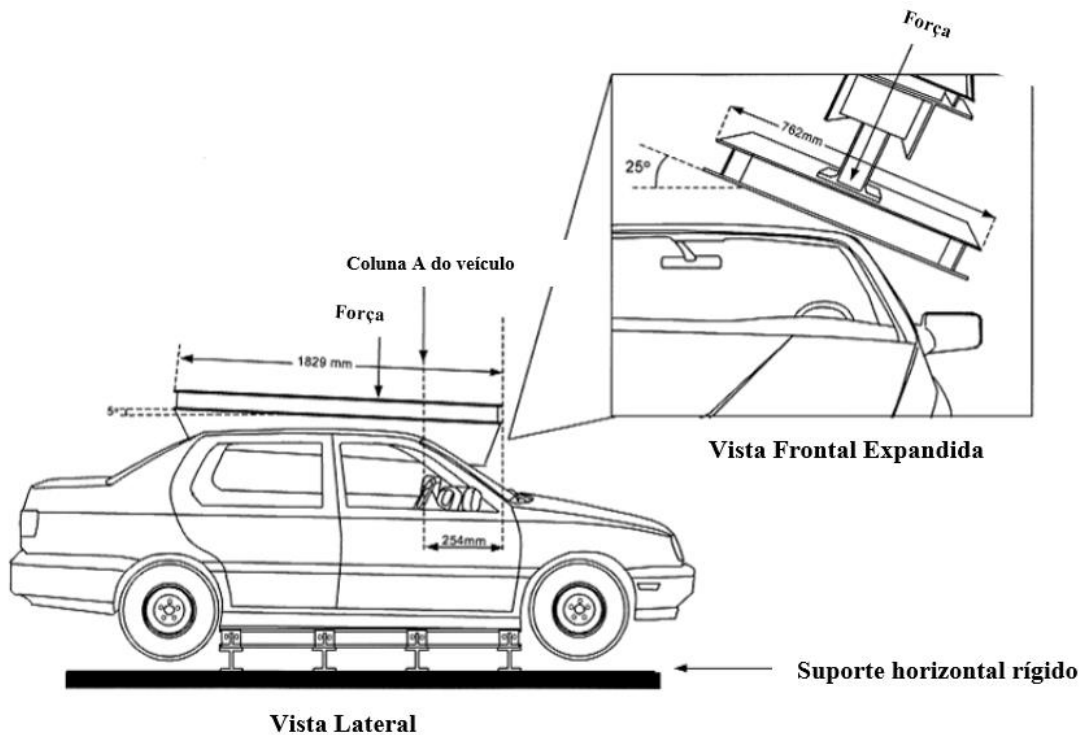


Figura 6. Protocolo experimental do Roof Crush Test segundo a norma FMVSS 216a. (Fonte: adaptado de [19])

Uma observação importante é que a atual versão da norma requer que o teste seja realizado em ambos os lados, do motorista e do passageiro.

A máquina utilizada para os ensaios oficiais da NHTSA é fornecida pela MGA Reasearch Corporation, ilustrada na Fig. (7).

Além do teste oficial requerido por lei federal nos EUA, existe um outro instituto, o IIHS (Insurance Institute for Highway Safety), que também realiza o Roof Crush Test utilizando, inclusive, o mesmo equipamento da MGA Research Corporation. Entretanto, contrariamente ao teste da NHTSA, o teste realizado pelo IIHS não é um requisito legal a ser atendido pelos fabricantes de veículos, mas sim uma avaliação de desempenho própria do instituto para classificar os veículos de acordo com seus critérios próprios de avaliação e fornecer informações úteis relacionadas à segurança veicular para os consumidores de automóveis e população em geral.



Figura 7. Dispositivo utilizado nos Roof Crush Test da NHTSA e IIHS fornecido pela MGA Research Corporation. (Fonte: [20])

Com relação ao Roof Crush Test, o protocolo utilizado pela IIHS é muito semelhante ao da FMVSS 216a. Entretanto, a velocidade de deslocamento da placa é menor, de 5 mm/s apenas. Além disso, apesar de o IIHS também utilizar o parâmetro SWR para classificar os veículos testados, as faixas de valores consideradas na classificação mudam com relação ao ensaio oficial. Os veículos são classificados de acordo com o gráfico da Fig.(8). Dessa forma, verifica-se que um veículo classificado como bom no quesito resistência ao esmagamento é aquele que atinge um SWR de, no mínimo, 4. Vale ressaltar também que os testes da IIHS são realizados apenas em um dos lados do veículo, motorista ou passageiro.

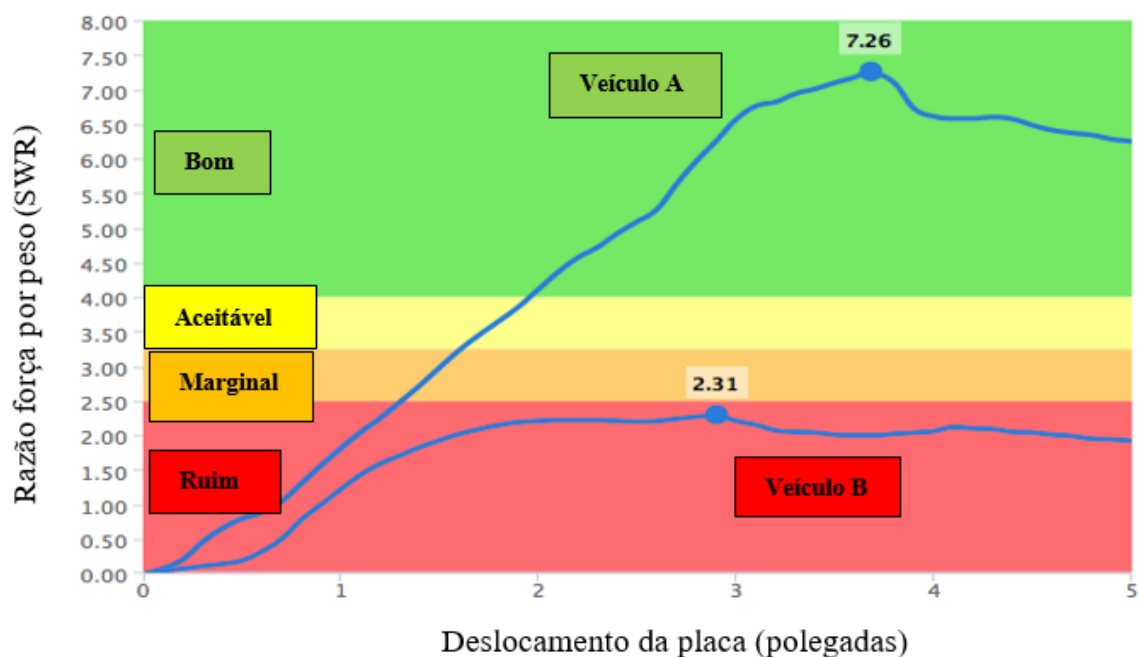


Figura 8. Classificação utilizada pelo IIHS para avaliação da resistência ao esmagamento dos tetos veiculares. (Fonte: adaptado de [31])

### **2.3.3. Justificativas para utilização do Roof Crush Test**

1. O investimento em segurança passiva deve ser realizado até que todos os acidentes possam ser evitados, o que dificilmente ocorrerá [19], [21].
2. Conforme a norma mostra, existem mortes e lesões graves que são consequência do esmagamento do teto durante o capotamento veicular. Com isso, o atingimento das FMVSS 216a por parte dos fabricantes irá promover a mitigação de mortes e lesões graves diretamente relacionadas às lesões na cabeça, pescoço e na coluna decorrentes do esmagamento do teto [21].
3. Não existem outros testes (sejam estáticos ou dinâmicos) que sejam capazes de representar o padrão de deformação devido ao capotamento com o mesmo grau de repetitividade do Roof Crush Test [23].

### **2.3.4. Concepção do dispositivo Roof Crush construído no Lab. GMSSA**

O dispositivo Roof Crush Test presente no Lab. LDTEA da UnB Gama foi construído como trabalho de PIBIC através do aporte financeiro fornecido pela FAP DF [3].[27]. O dispositivo foi dimensionado considerando a carga mínima necessária que um veículo de aproximadamente 2000 kg deve atingir considerando o SWR de 3, conforme a norma FMVSS 216a propõe. Dessa forma, considerou-se a teoria da resistência dos materiais no que diz respeito aos fenômenos de flexão, torção e cisalhamento de perfis de seção I. A partir disso, foram selecionados os perfis de seção I, segundo as dimensões constantes no trabalho prévio [3]. Além disso, o projeto sofreu adaptações à medida em que foi necessário, em função da disponibilidade de material no Distrito Federal, principalmente.

Para concepção do dispositivo, considerou-se principalmente o design do equipamento de Chen et al., [8]. Conforme a Fig.(9), esse dispositivo é composto por um pórtico principal e perfis laterais que, por sua vez, possuem articulações para o suporte da placa de esmagamento. A força é promovida por um atuador hidráulico, assim como no dispositivo da UnB Gama. O dispositivo de Chen et al., no entanto, não necessita de um sistema de contrapesos, o que facilita a operação do equipamento. Entretanto, é possível observar que o movimento da placa não é

exatamente o requerido pela norma FMVSS 216a, já que o aparato móvel realiza um deslocamento angular durante o esmagamento, ao invés de um movimento puramente linear. Verifica-se também que o ângulo inicial com relação ao eixo longitudinal (roll angle) é de  $8^\circ$ . Já na norma, e também no dispositivo construído no Lab. GMSSA, esse ângulo é de  $25^\circ$ .

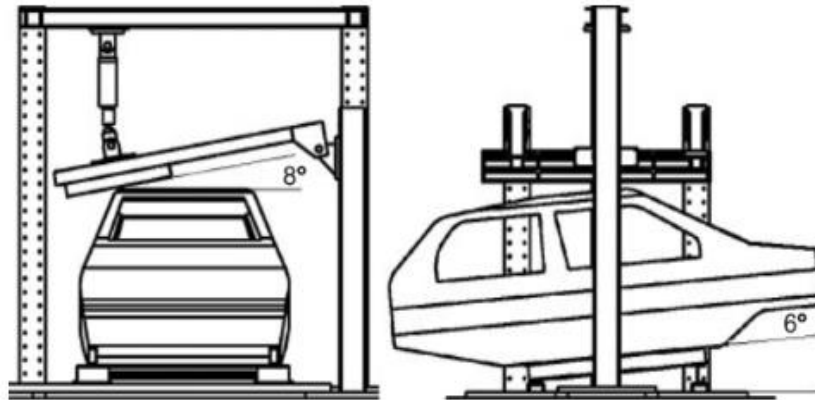


Figura 9. Configuração utilizada como inspiração para a concepção do dispositivo presente no Lab. GMSSA. (Fonte: [8])

A seguir apresenta-se uma breve linha do tempo do desenvolvimento e construção do dispositivo Roof Crush até o presente momento:

2019: Concepção inicial do dispositivo, simulações preliminares, confecção de pranchas e compra do material.

2020: Modelagem final da estrutura + amostra para esmagamento (Cage), verificações finais do desempenho estrutural do dispositivo, construção física do dispositivo no Lab. GMSSA do prédio LDTEA.

2021: Simulações numéricas de esmagamentos com a Cage, obtenção e análises dos resultados.

Na Fig. (10) tem-se uma representação holística das etapas do desenvolvimento do projeto Roof Crush previamente ao presente trabalho pré-operacional e de calibração do dispositivo.



### Linha do tempo de trabalhos prévios do Projeto RoofCrush

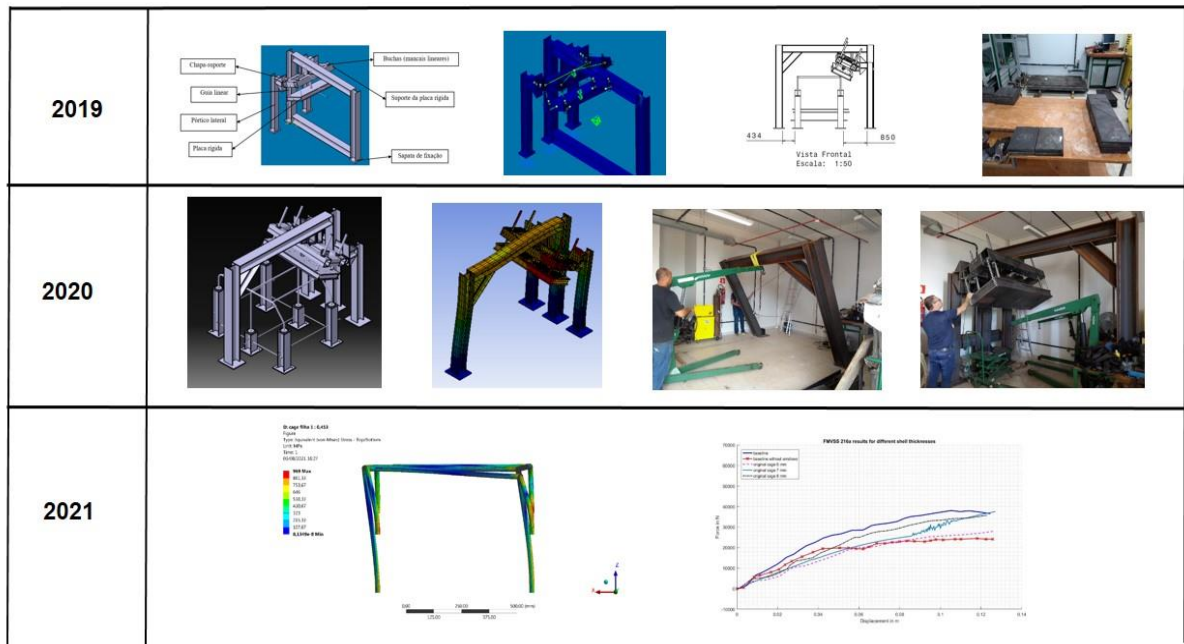
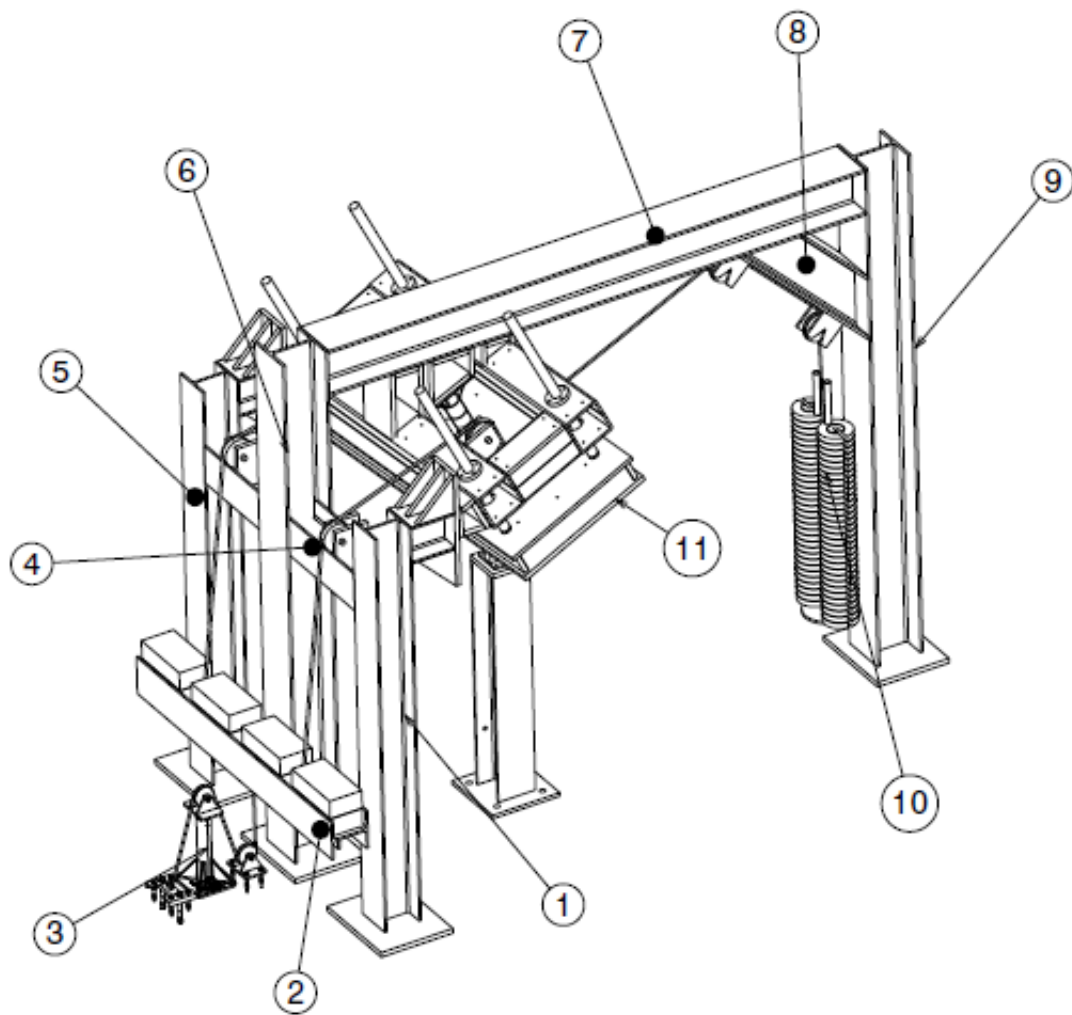


Figura 10. Linha do tempo dos trabalhos do projeto Roof Crush.  
(Fonte: autoria própria.)

O dispositivo final já considerando as implementações do presente trabalho está representado na Fig. (11). Neste trabalho foi realizada a implementação do sistema de contrapesos tangencial, do sistema de retorno, da instrumentação eletrônica e do sistema hidráulico. Desse modo, as funções e descrições mais detalhadas dos demais componentes e subsistemas desenvolvidos em trabalhos anteriores do autor podem ser encontradas no trabalho [3].

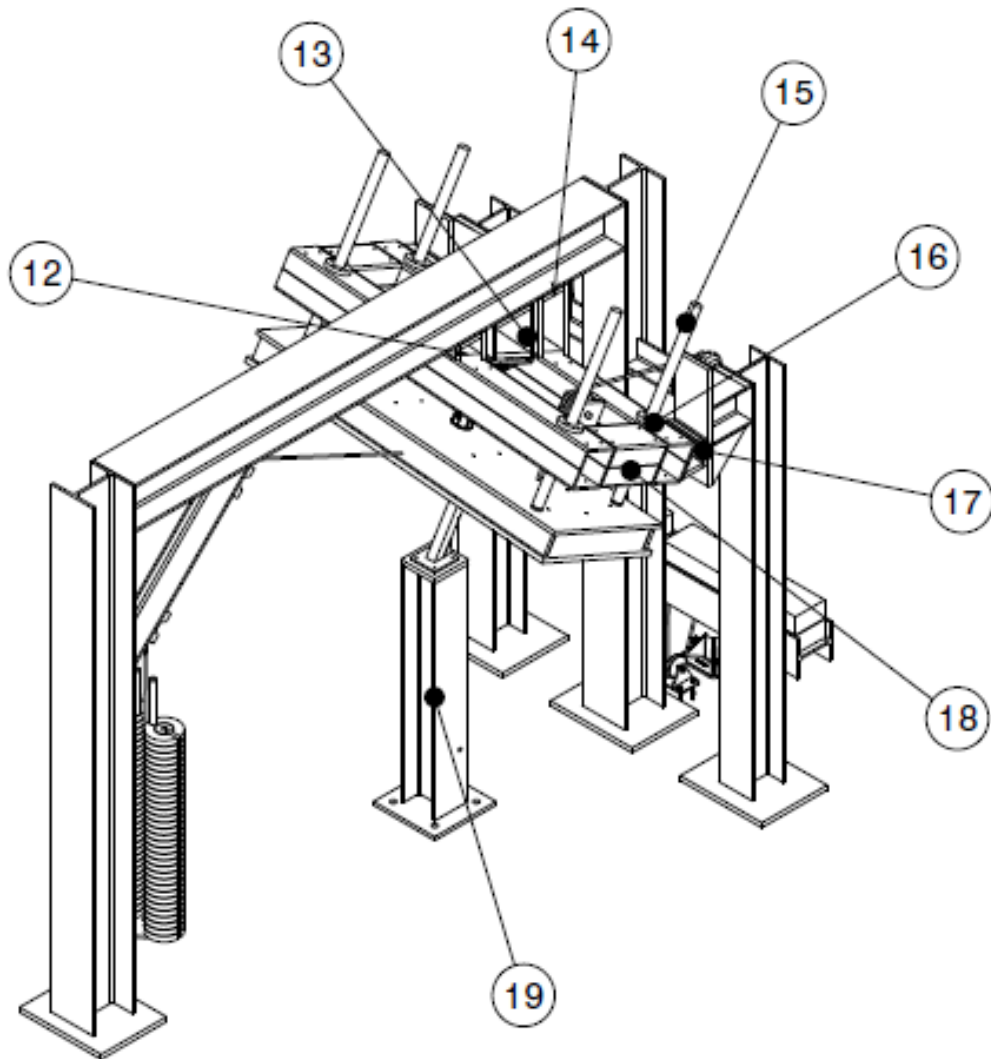
De modo geral, o dispositivo é composto por um pórtico principal (dois pilares grandes (6 e 9), uma viga (7) e uma mão francesa(8)) com os perfis Gerdau HP 250 x 85,0 (H). Além disso, tem-se um pórtico secundário composto por pilares (1 e 5) e vigas menores (4) utilizando perfis Gerdau HP 200 x 53,0 (H) [31]. Alguns dos principais componentes e subsistemas da estrutura mecânica do dispositivo estão representados nas Figs. (11) e (12).

Conforme requerido pela norma FMVSS 216a, a Placa de esmagamento possui dimensões 1829 x 762 mm<sup>2</sup> e é rotacionada em torno dos eixos longitudinal e transversal por 25° e 5°, respectivamente (vide Figs. (84) e (85) no Anexo III).



Número	Componente
1	Pilar lateral direito (Pórtico Secundário)
2	Sistema mecânico de contrapesos NORMAL
3	Sistema mecânico de retorno da Placa de esmagamento
4	Viga (Pórtico Secundário)
5	Pilar lateral esquerdo (Pórtico Secundário)
6	Pilar lateral esquerdo (Pórtico Principal)
7	Viga (Pórtico Principal)
8	Mão francesa
9	Pilar lateral direito (Pórtico Principal)
10	Sistema mecânico de contrapesos TANGENCIAL
11	Placa de esmagamento

Figura 11. Componentes do dispositivo Roof Crush por meio de ilustração desenvolvida no software CATIA V5 – Parte 1. (Fonte: autoria própria.)



Número	Componente
12	Caixa menor
13	Caixa intermediária
14	Caixa maior
15	Guia linear
16	Mancal linear
17	Cunha de transferência de carga
18	Suporte fixo da Placa de esmagamento
19	Conjunto (Pilar base + Corpo de Prova)

Figura 12. Componentes do dispositivo Roof Crush por meio de ilustração desenvolvida no software CATIA V5 – Parte 2. (Fonte: autoria própria.)

## 2.4. TESTES DINÂMICOS RELACIONADOS AO CAPOTAMENTO

### 2.4.1. Testes dinâmicos para avaliação da performance estrutural do teto veicular em capotamentos

A agência NHTSA discutiu sobre a implementação de testes dinâmicos como parte da avaliação da resistência ao esmagamento do teto veicular, tais como: o teste que queda invertida, o teste dolly rollover segundo a norma FMVSS 208, o teste CRIS (Controlled Impact Rollover System) e o teste Jordan Rollover System (JRS). Entretanto, foram observadas preocupações na implementação de testes dinâmicos em conjunto com o teste quase-estático de esmagamento proposto. O atual teste de esmagamento Roof Crush é capaz de representar os padrões de deformação da estrutura veicular causadas pelo capotamento. Além disso, esse teste possui um aspecto crucial para avaliação em grande escala de veículo, a repetitividade. Dessa forma, seguindo o protocolo experimental definido em norma é possível obter os mesmos resultados em diferentes laboratórios, desde que sejam mantidas as mesmas condições de ensaio que exercem algum efeito sobre a medição das grandezas relevantes. Além disso, a norma sugere que não existem testes dinâmicos de capotamento capazes de fornecer grau de repetitividade elevado o suficiente para que, utilizando-se os mesmos procedimentos experimentais, seja possível atingir os mesmos resultados diversas vezes [23].

A NHTSA recebeu diversos comentários negativos com relação à implementação do Roof Crush Test como metodologia de avaliação do desempenho de produtos em capotamento. Dentre os que foram contra a norma, tem-se centros de pesquisa relacionada à segurança veicular, pesquisadores e advogados dos consumidores. Houveram sugestões para utilização de testes dinâmicos justificando-se que, dessa forma, seriam obtidos resultados com maior correlação com o fenômeno real de capotamento. Além disso, houveram proposições para substituição do Roof Crush Test para testes dinâmicos existentes, tais como o Jordan Rollover System e o Dolly Rollover Test. Também, alguns advogados sugeriram que, com um teste dinâmico, seria possível prever os mecanismos de danos aos ocupantes (utilizando-se dummies). Outrossim, houveram sugestões para criação de um dispositivo antropométrico de teste (ATD) específico para medição de danos em capotamento para obtenção de maior biofidelidade [23].

Como resposta às sugestões acima, a agência NHTSA informou que deve ser estabelecido um protocolo específico para cada aspecto diferente de segurança veicular. Isso porque não é possível avaliar a performance dos diferentes componentes e subsistemas (cintos de segurança, integridade das portas e ejeção dos ocupantes) relacionados à segurança veicular num único teste. Dessa forma, é importante que o veículo seja submetido a diversos testes para avaliar os diferentes componentes considerando cada função de forma separada. Dito isso, o posicionamento da NHTSA foi o de manter a norma FMVSS 216a no sentido de avaliar apenas a resistência ao esmagamento do teto como representação de um capotamento veicular [23].

#### 2.4.2. Dolly Rollover Test (FMVSS 208)

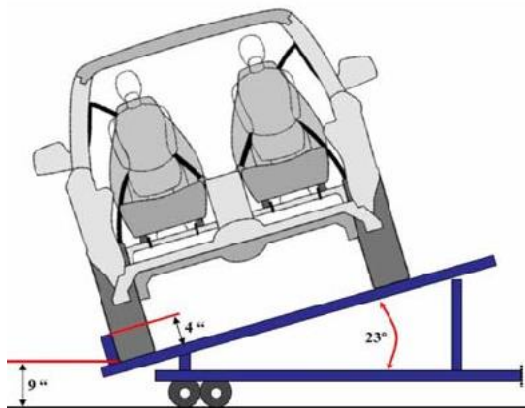


Figura 13. Configuração inicial do teste dinâmico Dolly Rollover Test.  
(Fonte: [6])

A seção S5.3 da norma FMVSS 208 diz que um Dummy masculino (Hybrid III) de percentil 50 deve ser mantido no veículo durante o capotamento mesmo sem utilizar o cinto de segurança. Essa norma, no entanto, não estabelece nenhum critério a ser atingido em termos de desempenho da estrutura do teto veicular, tampouco valores de referência (em termos de solicitações mecânicas) para avaliar possíveis lesões nos ocupantes decorrentes desse acidente. Nesse sentido, não é possível comparar diretamente a escolha entre os testes FMVSS 216a e o FMVSS 208, pois os objetivos são diferentes.

Outro aspecto importante a ser analisado é que, segundo o CFIR, a trajetória e a cinemática do Dummy podem ser significativamente alteradas em função das

condições do contato inicial do teto com o solo. Como consequência disso, o teste é precário em termos de repetitividade, o que faz com que uma possível avaliação de intrusão do teto veicular seja prejudicada. A exemplo disso, tem-se os estudos realizados por Bidez, que mostram que, apesar dos picos de força ocorrerem de forma similar (nos mesmos períodos), as magnitudes das forças e momentos medidos pelos manequins instrumentados diferem bastante a cada ensaio realizado. Além disso, foram realizados estudos para avaliar a intrusão do teto considerando os lados do motorista e passageiro. Assim, verificou-se uma grande alteração da intrusão a cada teste, considerando-se as mesmas condições iniciais do ensaio. Dessa forma, a agência NHTSA concluiu que, devido à falta de repetitividade, não seria possível realizar uma alteração no Dolly Rollover para implantá-lo na avaliação da resistência ao esmagamento de tetos veiculares submetidos ao capotamento. Ademais, não foi possível determinar quais veículos tinham a melhor performance em termos de estrutura do teto, pois como os valores se alteravam a cada teste, a classificação dos veículos também poderia mudar. Por isso, não seria possível determinar se um veículo 'A' teria melhor desempenho do que um veículo 'B' no que se refere à intrusão do teto [23].

#### 2.4.3. Jordan Rollover System (JRS)



Figura 14. Configuração inicial do teste dinâmico Jordan Rollover System.  
(Fonte: [31])

O teste JRS consiste na rolagem da estrutura veicular em torno de um eixo pré-determinado e montado sobre um aparato denominado 'split'. Enquanto o veículo gira no 'split', uma base (representando o solo) se desloca horizontalmente de modo a entrar em contato com o teto do veículo. À medida em que a base translada após o contato inicial com o teto, a estrutura se deforma, que é o efeito análogo ao da força de impacto atuante sobre o teto durante um capotamento real. O JRS é realizado pelos centros de pesquisa CFIR e Xprts, os quais forneceram dados de ensaios previamente realizados em seus respectivos domínios para avaliação do NHTSA. O intuito disso era convencer a NHTSA a implementar o JRS à FMVSS 216a como parte da avaliação da resistência ao esmagamento do teto. O CFIR obteve apoio da entidade DVExperts, que sugeriu que o teste JRS é prático, repetível e cientificamente válido como teste de capotamento, uma vez que o experimento seria capaz de simular os efeitos dinâmicos do fenômeno real. Foi dito, ainda, que o JRS seria capaz de utilizar dummies para verificação das solicitações mecânicas atuantes no corpo e que poderia também ser utilizado para verificar a eficiência do veículo quanto à manutenção dos ocupantes (com e sem cinto de segurança) na célula de sobrevivência.

As entidades CAS e CFIR realizaram testes JRS com manequins do tipo Hybrid III. Os grupos argumentaram que o JRS é altamente controlável, repetível e capaz de ser configurado (em termos de condições iniciais) para representar diferentes cenários de capotamento.

Apesar dos comentários a favor da implementação do JRS como norma federal da NHTSA, a entidade permaneceu relutante quanto a algumas questões técnicas. Nesse sentido, a agência questionou a parametrização do teste com o objetivo de determinar se o teste seria capaz de reproduzir os padrões dos danos causados por um capotamento real à estrutura do teto do veículo. Dentre os parâmetros que causaram incerteza quanto à determinação do JRS como teste para avaliação de integridade estrutural em capotamentos tem-se:

1. **Determinação da altura de queda inicial (para cada veículo):** segundo a NHTSA, não existe uma metodologia específica para determinação da altura de queda do veículo na base móvel do teste para cada tipo de veículo, tampouco uma metodologia que permita determinar esse parâmetro. Dessa forma, é possível que um determinado veículo seja submetido a uma

sobrecarga ou a uma carga inferior ao que seria ideal considerando um capotamento real. A agência sugere que deveria existir uma correlação entre dados de capotamento real, para cada tipo de veículo e condição de capotamento, para que fosse determinada uma altura inicial que favorecesse a obtenção de um bom grau de correlação com dados obtidos por meio de um capotamento real.

2. **Determinação da taxa de rolagem (roll rate) e do ângulo de rolagem (roll angle) durante a liberação do veículo (para cada tipo de veículo):** segundo a NHTSA, além da altura de queda inicial, devem existir valores de taxa e ângulo de rolagem preestabelecidos para cada veículo. Isso porque o contato inicial teto/solo deve ocorrer sempre na mesma região do teto, independente do modelo de veículo a ser testado. A região de contato inicial com o solo é a junção entre a coluna A e o teto do veículo. A taxa de rolagem tem influência da duração de aplicação da carga de impacto sobre o teto do veículo, o que poderia exercer uma alteração significativa em termos de performance do teto durante o ensaio. Se a taxa de rolagem for baixa, a intrusão pode ser mínima e, caso contrário, a intrusão pode ser demasiadamente elevada. De acordo com a agência existe ainda uma necessidade de estabelecer uma correlação entre esses parâmetros e os dados reais de capotamento.
3. **Determinação da velocidade da base móvel, bem como do tipo de superfície empregada na confecção desse componente:** a base móvel representativa do solo é coberta com lixa no intuito de representar a interface de contato entre o teto e o solo. Tanto a velocidade da base como o coeficiente de atrito entre as superfícies envolvidas no fenômeno exercem influência sobre a transferência de momento angular (da base móvel para o veículo). De acordo com a NHTSA seriam necessários estudos para verificar a influência da velocidade da base móvel na interação teto/solo inicial e como essa interação afeta a cinemática do teste JRS, bem como seus resultados.
4. **Repetitividade dos parâmetros citados (altura de queda inicial, taxa de rolagem, ângulo de lançamento, região de contato inicial teto/solo e velocidade da base móvel):** segundo a NHTSA, qualquer teste de regulamentação deve ser repetível e executável. Dessa forma, a agência afirma que existe escassez de informações sobre tolerâncias e faixas de operação do JRS. Nesse sentido, há a necessidade de se determinar a acurácia do teste



considerando uma ampla gama de veículos de diferentes tamanhos e formas. É necessário, portanto, estabelecer quais veículos realmente podem ser avaliados estruturalmente pelo JRS antes que esse possa ser utilizado como teste de integridade estrutural do teto veicular.

5. **Critério de performance do veículo e instrumentação:** segundo a NHTSA, ainda não existem critérios para avaliar a performance dos veículos submetidos ao teste JRS. Além disso, há a necessidade de se estabelecer quais são os sistemas de medição relevantes para avaliar a performance no teste, uma vez estabelecido o critério de performance.

#### 2.4.4. Controlled Rollover Impact System (CRIS)

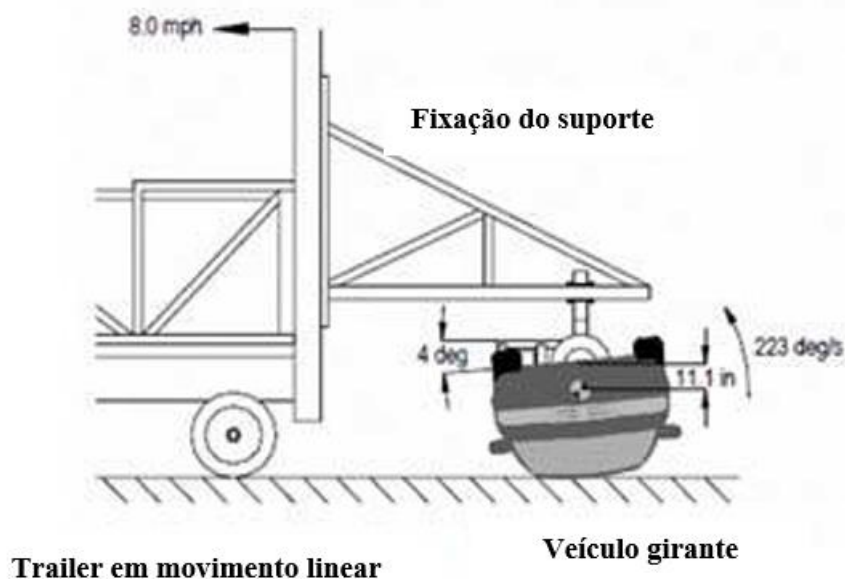


Figura 15. Configuração do teste dinâmico CRIS durante o ensaio.  
(Fonte: adaptado de [16])

Segundo a agência NHTSA, esse teste, apesar de ser útil para o entendimento da cinemática dos ocupantes durante o capotamento, não possui grau de repetitividade necessário para ser utilizado como norma de regulamentação para avaliar a performance do teto veicular em capotamento. O CRIS possui repetitividade limitada, sendo possível obter os mesmos resultados repetidas vezes apenas até o momento de contato inicial teto/solo. Além disso, não existem critérios para avaliar a performance do veículo com relação à segurança dos ocupantes. Dessa forma, não existem justificativas para realizar medições com os dummies. Para avaliar a

performance em termos de danos aos ocupantes seria necessário desenvolver um ATD (anthropomorphic test device) específico para realizar medições relevantes para o fenômeno de capotamento [23].

## 2.5. SISTEMAS DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

Um sistema de medição é um termo abrangente utilizado para designar qualquer meio utilizado para medir uma determinada grandeza física. O sistema pode ser um único instrumento de medição ou uma combinação de módulos integrados. As partes que compõem um sistema de medição são: sensor/transdutor, unidade de tratamento de sinal e dispositivo mostrador/registrador [1], [4], [12]. As áreas do conhecimento que necessitam de sistemas de medição normalmente são as ciências exatas e biológicas, considerando as mais diversas aplicações, como por exemplo: sistemas de monitoramento de processos, controle de processos/operações e análise experimental de engenharia [12]. Para melhor entendimento do funcionamento e importância dos sistemas de medição, torna-se necessário definir alguns conceitos básicos comumente encontrados nas literaturas sobre o tema.

- *Observador*: pessoa ou sistema físico que necessita de uma determinada informação variável a ser medida.
- *Processo*: qualquer sistema capaz de gerar uma informação. Alguns exemplos são: reatores químicos, veículos, coração humano, dentre diversos outros.
- *Informação variável*: qualquer grandeza física gerada por um *processo*. A exemplo disso tem-se o veículo, que gera um deslocamento e uma velocidade, ou um reator químico que gera temperatura, pressão, dentre outras diversas grandezas físicas.
- *Acurácia*: conceito utilizado para denotar o quão próximo é o valor medido pelo sistema de medição do valor real da grandeza física. Quanto menor o *erro de medição*, mais acurado é o sistema.
- *Erro de medição (E)*: é a diferença entre a *indicação do sistema de medição (I)* e o *valor verdadeiro convencional (VVC)*. De maneira análoga, pode-se dizer que o E corresponde à diferença entre a saída e a entrada do sistema de medição, conforme representado pela Eq. (4):

$$E = I - VVC = \text{Entrada} - \text{Saída} \quad (4)$$

O propósito do sistema de medição é conectar um observador ao processo, conforme representado na Fig.(16). De forma mais detalhada, um sistema de medição pode, também, ser representado na forma de diagrama de blocos por seus constituintes Fig.(17).

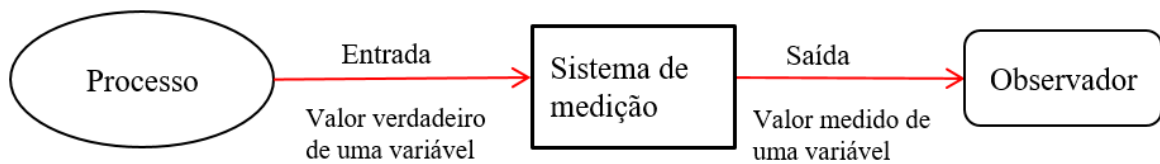


Figura 16. Representação de um sistema de medição padrão. (Adaptado de: [4])

A seguir, tem-se algumas definições dos componentes de um sistema de medição típico:

**Elemento sensor:** é um elemento capaz de responder à uma variação de alguma grandeza física (ex. temperatura, pressão) por meio de uma variação de alguma característica intrínseca ao material do qual o sensor é constituído. Normalmente o sinal produzido pelos sensores é elétrico, entretanto existem sensores mecânicos (mais antigos em sua maioria) [12]. Se existir mais de um sensor no sistema de medição, então denomina-se *Sensor Primário* aquele que estiver em contato direto com a variável a ser medida. É importante ressaltar que, por melhor que seja o elemento sensor, este irá sempre afetar o processo de medição ao ser inserido no meio no qual se deseja medir determinada grandeza. Dessa forma, normalmente os sensores são projetados para terem baixa eficiência, ou seja, serem capazes de interferir o mínimo possível no valor do mensurando [4].

**Elemento de Condicionamento de Sinal:** o objetivo desse elemento é tornar a leitura do VVC numa forma mais adequada para ser lida pelo Elemento de Processamento de Sinal. Existem dois tipos básicos de elementos de condicionamento de sinal, sendo eles: elemento de Conversão e elemento de Manipulação. O elemento de Conversão

é utilizado para modificar a natureza da grandeza a ser medida (ex. Ponte de Wheatstone utilizada em sistemas de medição de deformação com Strain Gauges). Já o elemento de Manipulação é utilizado para amplificar o sinal do valor emitido pelo Elemento Sensor, não alterando, portanto, a natureza física do sinal (ex. sistema de medição de temperatura com Termopar) [4].

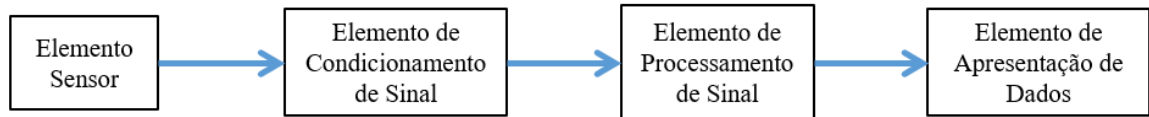


Figura 17. Componentes básicos de um sistema de medição convencional.  
(Adaptado de: [4])

**Elemento de Processamento de Sinal:** o objetivo desse elemento é converter o sinal já condicionado para uma forma mais adequada para apresentação ao usuário [4]. Como exemplo, é possível citar conversores analógicos digitais, que transformam sinais contínuos (analógicos) em sinais discretos (digitais) [4].

**Elemento de Apresentação de Dados:** o objetivo desse elemento é apresentar o valor medido de uma maneira que possa ser facilmente compreendida pelo usuário. A exemplo disso, tem-se os ponteiros e os displays alfanuméricos.

### 2.5.1. Processo de calibração de sensores

Para calibração dos sensores, foi realizada a medição das grandezas de interesse variando-se a Entrada (grandeza a ser medida) ao longo de toda a faixa de operação e medindo-se a Saída correspondente. Os dados foram coletados no sentido do incremento das Entradas e no sentido do decremento das Entradas. Dessa forma, foi possível verificar a Histerese presente em cada sensor, ou seja, foi possível observar a diferença entre as Saídas para uma mesma entrada quando se considera o sentido de incremento e o sentido de decremento [12].

Ambos os sensores utilizados são lineares. Dessa forma, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes que melhor representam a aproximação dos pontos coletados a uma reta. As equações utilizadas foram (5), (6) e (7) para estimativa dos parâmetros da reta [12].

$$q_o = mq_i + b \quad (5)$$

$$m = \frac{N\sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N\sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N\sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (7)$$

Para o cálculo da incerteza de medição foi necessário estimar as variâncias associadas às Entradas e Saídas, bem como aos parâmetros 'm' e 'b' estimados. As equações utilizadas foram (8) e (9) [12].

$$s_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (mq_i + b - q_o)^2 \quad (8)$$

$$s_{q_i}^2 = \frac{s_{q_o}^2}{m^2} \quad (9)$$

## 2.6. SISTEMAS HIDRÁULICOS

Os sistemas hidráulicos são utilizados para transmissão de energia de um ponto a outro de um determinado circuito e normalmente são compostos por:

- **Sistema de geração:** sistema responsável por gerar a pressão que promoverá a transmissão da energia hidráulica ao longo do sistema. Exemplos comuns incluem: bombas, motores e acumuladores.
- **Sistema de distribuição e controle:** esse sistema é responsável por direcionar o fluxo de fluido, bem como controlar a vazão do fluido hidráulico. Exemplos comuns incluem: válvulas controladoras de vazão, válvulas controladoras de pressão e válvulas direcionais. Neste trabalho utilizou-se, além dos três tipos de válvulas supracitados, uma válvula de alívio de pressão.
- **Sistema de aplicação de energia:** este sistema é composto por componentes ativos do sistema, responsáveis por realizar o trabalho útil do qual o sistema foi projetado para realizar. Exemplos de componentes são: motores hidráulicos e atuadores lineares. Neste trabalho utilizou-se atuadores hidráulicos lineares.

Segundo [35] existem diversas vantagens na utilização de sistemas hidráulicos, tais como:

1. Desenvolvimento de forças elevadas em espaços relativamente pequenos
2. Movimentos suaves, baixa inércia e ajustes precisos na velocidade de avanço

Entretanto, algumas desvantagens com relação aos sistemas elétricos devem ser destacadas:

1. Elevado custo inicial.
2. Perda de energia devido ao atrito interno entre o fluido e os componentes do sistema.
3. Possibilidade de perda de energia por vazamentos

Uma maneira esquemática de representar o sistema é por meio do diagrama de blocos da Fig. (18):

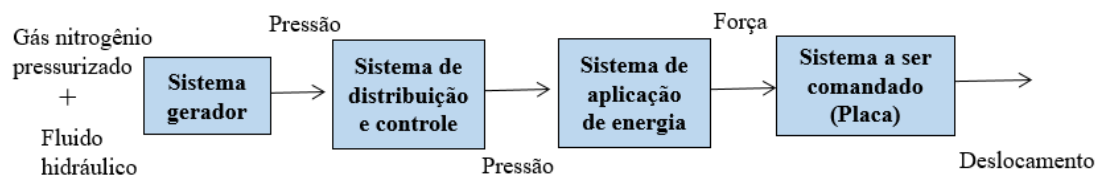


Figura 18. Diagrama de funcionamento do sistema hidráulico do dispositivo RoofCrush. (Adaptado de: [35])

A pressão de um sistema hidráulico é criada quando uma resistência é imposta ao fluxo de fluido. Essa resistência é, de modo geral, decorrente de dois fatores, são eles:

- Carga do atuador
- Restrição (ou orifício na tubulação)

A velocidade de avanço é dada em função da vazão de avanço. A relação entre essas grandezas é dada pela eq. (10):

$$Q_a = v_a * A_p \quad (10)$$

Em que:

- $Q_a$  = vazão de avanço [m<sup>3</sup>/s]
- $v_a$  = velocidade de avanço do atuador [m/s]

- $A_p$  = área do pistão do atuador [ $m^2$ ]

Dessa forma, como a velocidade requerida para o Roof Crush Test é constante, a vazão de fluido também deve ser. Essa vazão é controlada pela válvula de restrição de fluxo, que promove uma vazão e, portanto, velocidade constantes para a placa de esmagamento. A pressão medida é, no entanto, variável. Isso se deve aos dois fatores citados anteriormente (carga do atuador e restrição). A carga do atuador, por sua vez, ocorre devido ao peso do sistema móvel do disposto (placa + contrapesos) e à resistência ao esmagamento da amostra ensaiada. Além disso, tem-se a restrição de fluxo gerada pela válvula de controle de velocidade do sistema.

Considerando o procedimento experimental constante na norma FMVSS 216a para realização do experimento e os dados do catálogo do atuador Enerpac RC 2510 tem-se a seguinte vazão máxima permitida para o teste:

$$Q_a = v_a * A_p = 13 \frac{mm}{s} * 33,3 \text{ cm}^2 * \frac{(10 \text{ mm})^2}{(1 \text{ cm})^2} = 43290 \frac{mm^3}{s} * \frac{1 \text{ m}^3}{(1000 \text{ mm})^3}$$

$$Q_a = 4,329 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Q_a = 4,329 * 10^{-5} \frac{m^3}{s} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 0,04329 \frac{L}{s} = 43,29 \frac{mL}{s}$$

Outra grandeza relevante para a análise de movimento realizada neste trabalho é a força de avanço ( $F_a$ ). Segundo [35] essa é a força que o atuador deve exercer sobre a carga com o intuito de realizar o trabalho para o qual foi projetado. A obtenção da força de avanço pode ocorrer de várias maneiras, tais como: equações da mecânica (estática e dinâmica), resistência dos materiais e usinagem, a depender da aplicação do circuito. Neste trabalho a força de avanço do atuador é determinada por meio da pressão medida pelo transdutor GTP 1000 e da área efetiva do atuador, informada no catálogo em [37]. Dessa forma, calcula-se a força de avanço da seguinte forma:

$$F = 10 \frac{N}{\text{bar} * \text{cm}^2} * P * A \tag{11}$$

Em que:

- $F$ : força de esmagamento da amostra [N]
- $P$ : pressão medida pelo sensor GTP 1000 [bar]
- $A$ : área da seção transversal do pistão do atuador [cm<sup>2</sup>]

O termo '10' presente na equação (11) se deve ao fator de conversão para obter a força em Newtons.

Outro componente do sistema hidráulico de extrema relevância é o acumulador de pressão. Acumuladores são dispositivos que permitem o armazenamento de fluido pressurizado para posterior utilização durante a operação do equipamento [35]. O princípio de funcionamento baseia-se na combinação de propriedades do gás utilizado (normalmente nitrogênio) e do fluido hidráulico. O fluido pressurizado entra no cilindro fazendo com que o gás previamente armazenado seja comprimido. Dessa forma, ao entrar em equilíbrio, o sistema (gás + fluido) estará armazenado sobre uma mesma pressão. Ao abrir a válvula o gás irá pressurizar o fluido e forçá-lo a sair. O gás é capaz de se expandir sem que sua pressão seja abaixada de forma acentuada, permitindo que o fluido percorra grandes distâncias no circuito sem que a sua pressão seja reduzida [35]. Na Fig. (19) tem-se a representação de um acumulador do tipo bexiga comumente empregado em circuitos hidráulicos.

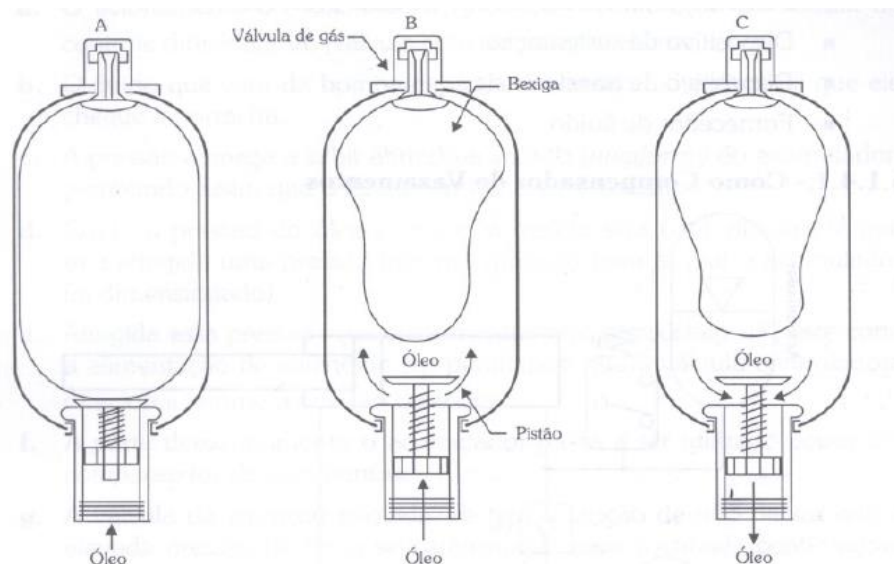


Figura 19. Representação do acumulador hidráulico do tipo bexiga. (Fonte: [35])

No caso da Fig. (19) o gás nitrogênio é armazenado numa bexiga, não entrando em contato direto com o fluido hidráulico. No caso do dispositivo Roof Crush empregou-se um sistema semelhante, porém sem a bexiga, ou seja, o gás nitrogênio é



armazenado em contato direto com o óleo no interior do acumulador. Além disso, no dispositivo Roof Crush o acumulador representa a fonte de potência principal utilizada durante os ensaios de esmagamento. Isso é possível devido à utilização de um cilindro auxiliar de nitrogênio, que é diretamente conectado ao acumulador (cilindro amarelo), conforme representado na Fig. (20).

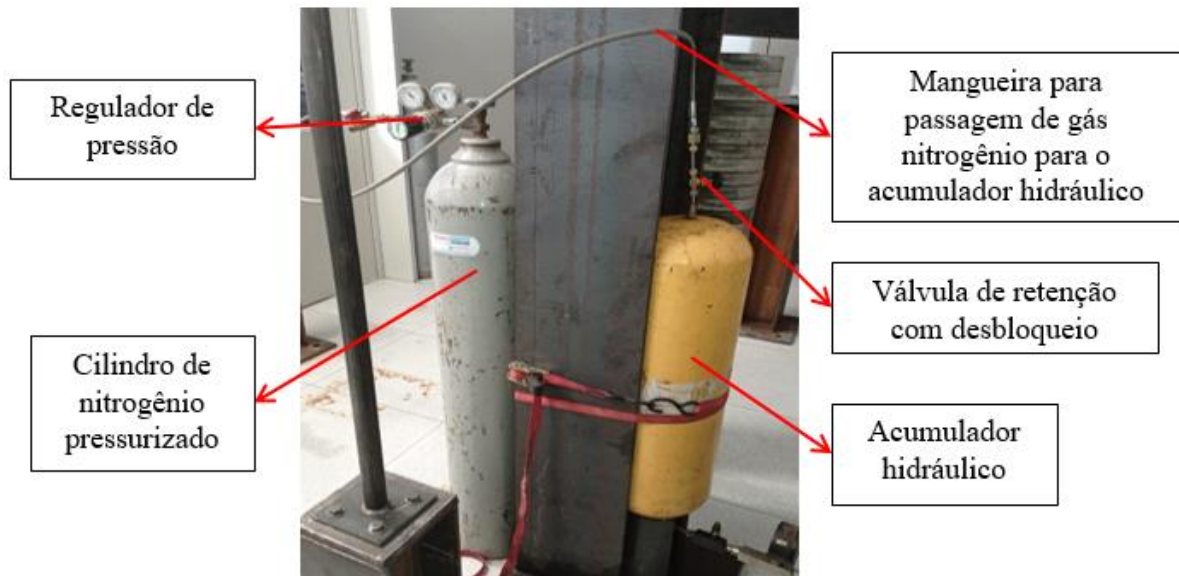


Figura 20. Sistema de Geração utilizado no dispositivo Roof Crush do Lab. GMSSA. (Fonte: autoria própria)

Observa-se também que a pressão a ser gerada no acumulador é controlada por meio de um regulador de pressão. Esse artefato é conectado à mangueira e permite a passagem de gás nitrogênio para o acumulador. A pressão do acumulador é limitada pela máxima pressão que o Cilindro de nitrogênio é capaz de fornecer.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. CALIBRAÇÃO DE SENSORES

Neste trabalho realizou-se a calibração dos elementos sensores dos sistemas de medição de Força (de reação ao esmagamento) e Deslocamento Linear (da placa de esmagamento).

##### 3.1.1. Calibração do transdutor de pressão

A Força de reação será medida de forma indireta, por meio da pressão da linha de avanço do sistema hidráulico. Para medição da pressão hidráulica foi utilizado o sensor Gulton modelo GTP 1000. A faixa de medição na entrada do sensor é de 0 a 700 bar. A saída, por sua vez, varia de 0 a 10 Volts. O sensor é passivo e deve ser alimentado por uma tensão contínua de 24 Volts. A calibração do transdutor de pressão foi realizada por meio da Balança de Peso Morto (BPM), cujo procedimento de calibração é descrito na Portaria INMETRO nº 029/1995 [18]. A montagem final do transdutor na BDP está representada na Fig. (21).



Figura 21. Montagem do transdutor de pressão GTP 1000 na Balança de Pressão.  
(Fonte: autoria própria)

Alguns cuidados devem ser tomados durante a operação da BPM no intuito de eliminar bolhas de ar na tubulação. O Volante (8 na Figura 22) deve ser desparafusado completamente antes de inserir qualquer massa de calibração nos cilindros de alta e de baixa pressão (2 e 3 na Figura 22). É importante ressaltar que a calibração do sensor foi realizada na faixa de 0 a 300 bar devido à capacidade de operação do equipamento de calibração. Outro detalhe importante é que os ‘Suportes de sustentação da BDP (Balança de Pressão)’ (1 na Figura 22) devem ser devidamente ajustados para garantir que a superfície da balança permaneça completamente plana durante todo o ensaio.

Para a fase de calibração, o transdutor de pressão deve ser parafusado no ‘Bocal para colocação do manômetro’ (7 na Figura 22). Para realizar tal etapa foi necessário adquirir adaptadores de rosca, além de uma pasta especial do tipo ‘Scotch-Weld Stainless Steel High Temperature Pipe Sealant PS67’ para evitar vazamentos (muito comuns nos primeiros testes do sistema hidráulico devido às pressões acima de 100 bar). A pasta especial requer, pelo menos, dois dias de cura antes que seja realizada qualquer pressurização do sistema.

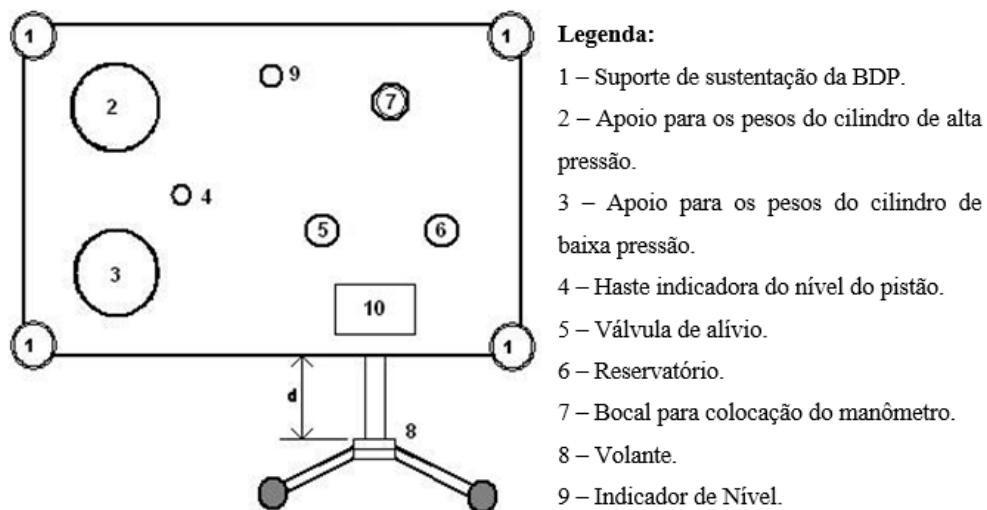


Figura 22. Balança de pressão utilizada para calibração do sensor GTP 1000.  
(Fonte: [18])

Tabela 2 – Dados coletados durante o primeiro incremento de Pressão do processo de calibração do sensor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Calibração do transdutor de pressão - Tensão em Volts (Incremento 1)</b>									
<b>P (bar)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	<b>Média</b>
0	0,0079	0,0131	0,0089	0,0148	0,0181	0,0144	0,0027	0,0069	0,0109
50	0,7156	0,7381	0,7245	0,7221	0,7138	0,7261	0,7064	0,7126	0,7199
100	1,4222	1,4200	1,4110	1,4226	1,4152	1,4111	1,4073	1,4182	1,4160
150	2,1325	2,1255	2,1062	2,1103	2,1019	2,0972	2,1376	2,1348	2,1183
200	2,8336	2,8360	2,8343	2,8288	2,8248	2,8223	2,8093	2,8018	2,8239
250	3,5358	3,5423	3,5417	3,5278	3,5322	3,5322	3,5223	3,5322	3,5333
300	4,2726	4,2562	4,2584	4,2457	4,2446	4,2467	4,2466	4,2258	4,2496

Tabela 3 – Dados coletados durante o segundo decremento de Pressão do processo de calibração do sensor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Calibração do transdutor de pressão - Tensão em Volts (Decremento 1)</b>									
<b>P (bar)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	<b>Média</b>
0	0,0064	0,0076	0,0033	0,0106	0,0010	0,0048	0,0001	0,0016	0,0044
50	0,0990	0,7473	0,7577	0,7463	0,7470	0,7474	0,7474	0,7353	0,6659
100	1,4534	1,4660	1,4643	1,4643	1,4659	1,4698	1,4565	1,4618	1,4627
150	2,1478	2,1542	2,1509	2,1440	2,1566	2,1600	2,1597	2,1652	2,1548
200	2,9020	2,8957	2,9008	2,8983	2,8993	2,8986	2,9000	2,8934	2,8985
250	3,5737	3,5756	3,5748	3,5751	3,5734	3,5720	3,5663	3,5732	3,5730
300	4,2174	4,2051	4,2019	4,2025	4,1971	4,1923	4,1910	4,1982	4,2007

Tabela 4 – Dados coletados durante o segundo incremento de Pressão do processo de calibração do sensor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Calibração do transdutor de pressão - Tensão em Volts (Incremento 2)</b>									
<b>P (bar)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	<b>Média</b>
0	0,0062	0,0065	0,0068	0,0034	0,0023	0,0099	0,0004	0,0054	0,0051
50	0,7313	0,7534	0,7281	0,7224	0,7112	0,7241	0,7261	0,7370	0,7292
100	1,4364	1,4387	1,4206	1,4237	1,4250	1,4116	1,4151	1,4144	1,4232
150	2,1521	2,1396	2,1383	2,1402	2,1311	2,1368	2,1269	2,1304	2,1369
200	2,8941	2,8846	2,8862	2,8774	2,8754	2,8670	2,8667	2,8531	2,8756
250	3,5812	3,5549	3,5592	3,5506	3,5577	3,5450	3,5362	3,5397	3,5531
300	4,3021	4,2826	4,2771	4,2681	4,2682	4,2597	4,2596	4,2555	4,2716

Tabela 5 – Dados coletados durante o segundo decréscimo de Pressão do processo de calibração do sensor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Calibração do transdutor de pressão - Tensão em Volts (Decremento 2)</b>									
<b>P (bar)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	<b>Média</b>
0	0,0160	0,0076	0,0023	0,0057	0,0106	0,0071	0,0007	0,0192	0,0086
50	0,7416	0,7288	0,7177	0,7569	0,7322	0,7445	0,7542	0,7445	0,7400
100	1,4564	1,4582	1,4612	1,4726	1,4700	1,4722	1,4640	1,4704	1,4656
150	2,1358	2,1389	2,1399	2,1489	2,1488	2,1399	2,1521	2,1376	2,1427
200	2,8497	2,8566	2,8233	2,8534	2,8599	2,8490	2,8521	2,8627	2,8508
250	3,5744	3,5749	3,5697	3,5717	3,5689	3,5771	3,5660	3,5698	3,5716
300	4,2526	4,2327	4,2326	4,2348	4,2341	4,2386	4,2215	4,2207	4,2335

Tabela 6 – Dados de entrada para o algoritmo de calibração do transdutor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Dados para calibração do GTP 1000</b>					
<b>Incremento</b>			<b>Decremento</b>		
Nº.medição	Pressão (bar)	Tensão (V)	Nº.medição	Pressão (bar)	Tensão (V)
1	0	0,0080	8	300	4,2171
2	50	0,7245	9	250	3,5723
3	100	1,4196	10	200	2,8747
4	150	2,1276	11	150	2,1488
5	200	2,8497	12	100	1,4642
6	250	3,5432	13	50	0,7030
7	300	4,2606	14	0	0,0065

Tabela 7 – Dados de entrada para o algoritmo de calibração do transdutor GTP 1000. (Fonte: autoria própria)

<b>Características Estáticas do sensor GTP 1000</b>						
<b>Entrada real</b>	<b>Saída indicada</b>	<b>Saída ideal</b>	<b>Não linearidade</b>		<b>Histerese</b>	
Pressão (bar)	Tensão (V)	Tensão (V)	Tensão (V)	% f.s.d	Tensão (V)	% f.s.d
0	0,015	0,000	0,015	0,359	-0,001	-0,034
50	0,720	0,714	0,006	0,143	-0,022	-0,503
100	1,425	1,429	-0,003	-0,074	0,045	1,041
150	2,130	2,143	-0,012	-0,291	0,021	0,494
200	2,835	2,857	-0,022	-0,507	0,025	0,583
250	3,540	3,571	-0,031	-0,724	0,029	0,679
300	4,245	4,286	-0,040	-0,941	-0,044	-1,015

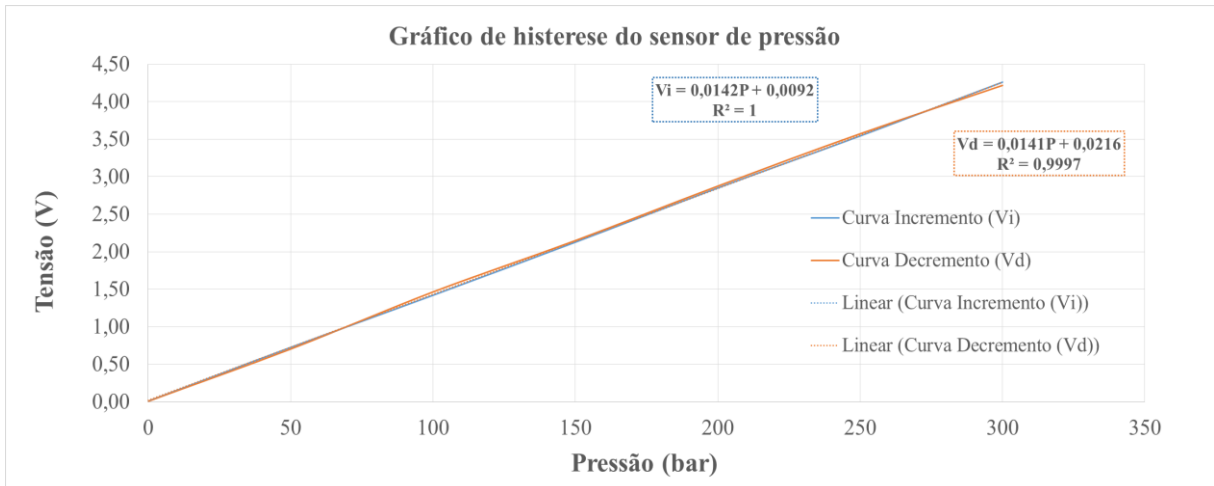


Figura 23. Curva de histerese do transdutor de pressão.  
(Fonte: autoria própria)

Tabela 8 – Dados de entrada para o algoritmo de calibração do transdutor GTP 1000.

<b>Pressão real (bar)</b>	<b>Tensão indicada (V)</b>	<b>Pressão indicada (bar)</b>
0	0,0154	0,0023
50	0,7204	49,8430
100	1,4254	99,6837
150	2,1304	149,5244
200	2,8354	199,3650
250	3,5404	249,2057
300	4,2454	299,0464

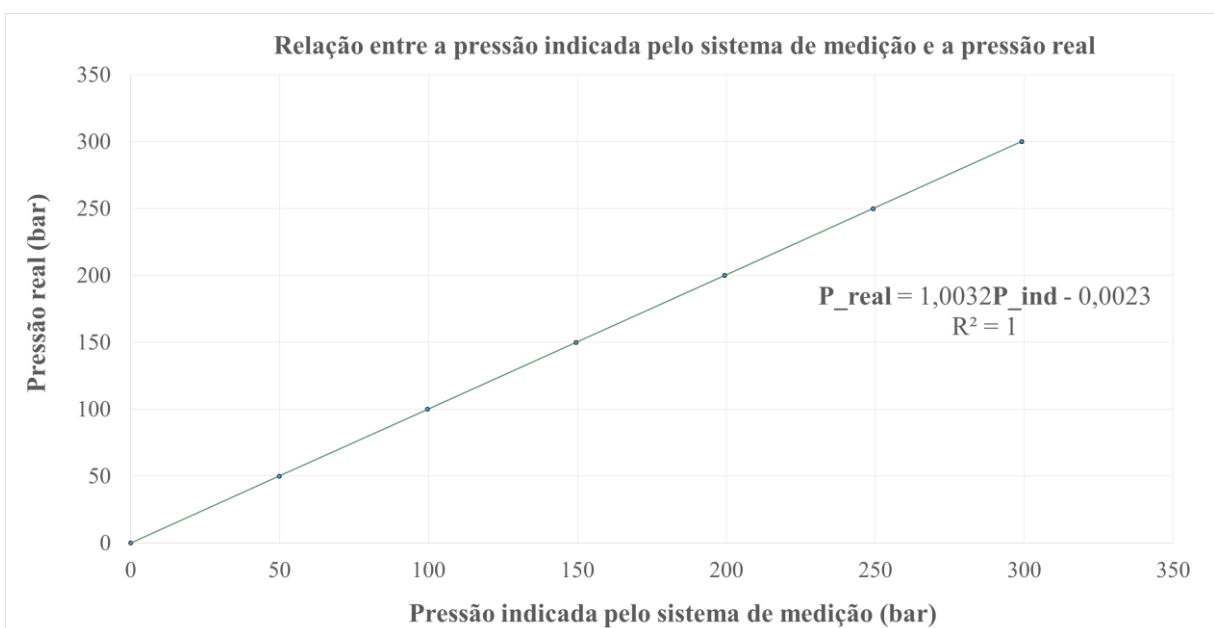


Figura 24. Relação entre e a pressão indicada pelo sistema de medição pressão a medida (real). (Fonte: autoria própria)

### 3.1.2. Calibração do transdutor de deslocamento linear LVDT

Para realizar a calibração do sensor LVDT utilizou-se a fonte Minipa MPL - 1303M. A tensão (Saída) correspondente ao deslocamento (Entrada) é diretamente proporcional à tensão de alimentação do sensor. Entretanto, verificou-se que a fonte utilizada não é capaz de fornecer uma tensão constante. Dessa forma, a tensão correspondente ao deslocamento do sensor pode variar (quando a tensão da fonte também varia), o que torna a calibração impraticável. Segundo o datasheet do sensor, a flutuação de tensão máxima deve ser inferior a 1% da tensão de operação aplicada ao mesmo, que deve ser de aproximadamente 10 V. Para manter a tensão de alimentação do sensor constante, foi necessário construir um circuito retificador de tensão, conforme representado na Fig. (25).

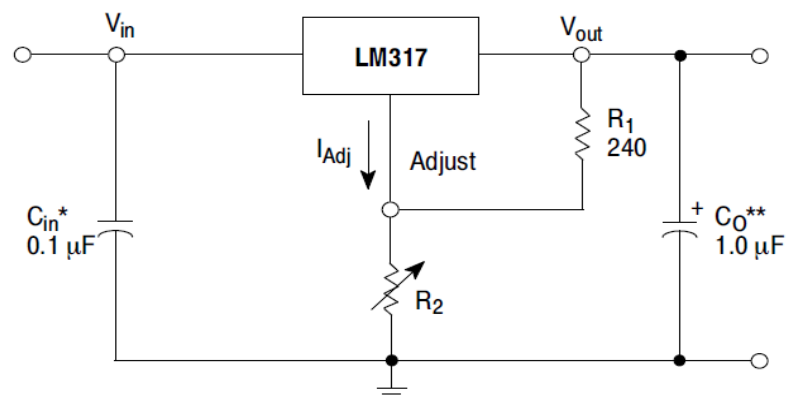


Figura 25. Circuito retificador de tensão utilizado no processo de calibração do sensor LVDT. (Fonte: [28])

A tensão de saída (retificada) é dada pela equação (10):

$$V_{out} = 1,25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{Adj} R_2 \quad (12)$$

Em que:

- $V_{out}$ : tensão de saída (retificada) [V]

- $R_2$ : resistor a ser especificado para garantir a tensão de saída desejada [Ohms]
- $R_1$ : resistor de 240 Ohms
- $C_{in}$ : capacitor cerâmico (0.1  $\mu$ F)
- $C_o$ : capacitor eletrolítico (1 $\mu$ F)
- $I_{Adj}$ : corrente de ajuste dada pelo fabricante (<100  $\mu$ A)

Considerando a tensão de saída requerida pela aplicação e os valores dados pelo fabricante, bem como a Eq.(12) obteve-se, como valor mais próximo comercial, que  $R_2$  deveria ser de 1680 Ohms. Além disso, para garantir a precisão necessária à operação, foi necessário encomendar resistores com tolerância de 1%. A partir disso, foi possível estabelecer a configuração necessária para realizar a calibração do sensor LVDT. Como instrumento de calibração utilizou-se uma régua de precisão, conforme representado na Fig.(26).

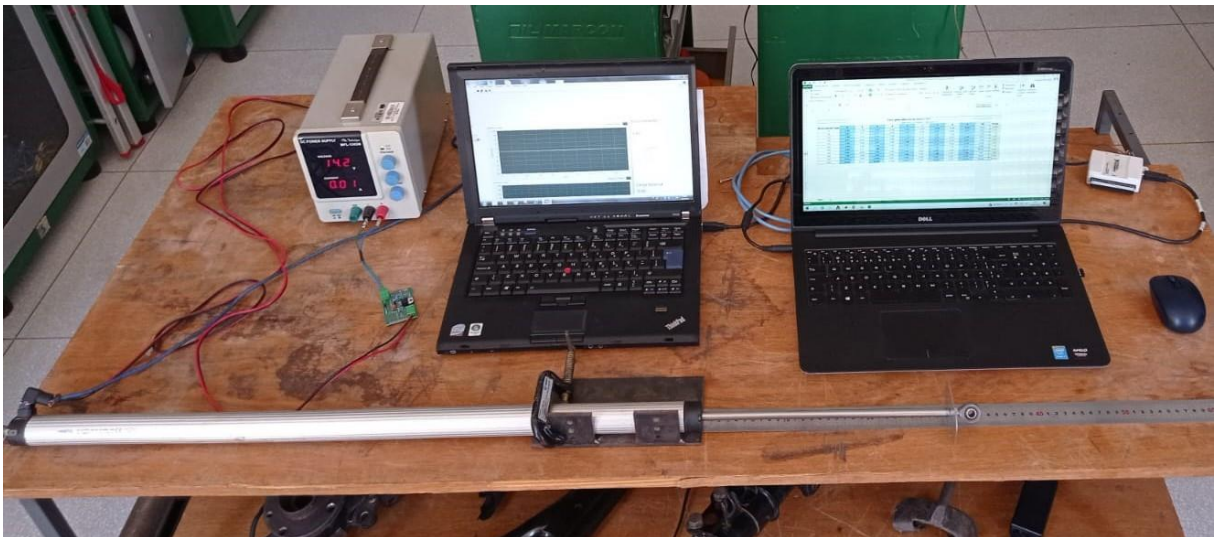


Figura 26. Processo de calibração do sensor LVDT. (Fonte: autoria própria)

Para calibração, foram realizados 5 processos de incremento e 5 processos de decremento. A faixa de operação do sensor foi dividida em 11 valores (10% da faixa de valores de entrada). Os valores obtidos estão representados na Tabela (9).



Tabela 9 – Dados de incremento e decremento obtidos para calibração do sensor LVDT. (Fonte: autoria própria)

<b>Dados para calibração do sensor LVDT</b>										
<b>Deslocamento (mm)</b>	<b>Amostras de tensões coletadas (V)</b>									
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
<b>60</b>	0,97	0,97	0,97	0,99	0,97	0,96	0,97	0,96	0,97	0,97
<b>120</b>	1,96	1,98	1,98	1,99	1,97	1,97	1,97	1,96	1,97	1,97
<b>180</b>	2,97	2,97	2,97	2,99	2,97	2,97	2,97	2,97	2,98	2,97
<b>240</b>	3,96	3,96	3,97	3,98	3,96	3,96	3,97	3,96	3,97	3,96
<b>300</b>	4,95	4,96	4,96	4,98	4,95	4,95	4,95	4,94	4,96	4,94
<b>360</b>	5,94	5,95	5,96	5,96	5,96	5,94	5,95	5,95	5,95	5,95
<b>420</b>	6,95	6,94	6,96	6,96	6,96	6,94	6,95	6,94	6,95	6,95
<b>480</b>	7,96	7,98	7,98	7,98	7,98	7,97	7,98	7,97	7,98	7,97
<b>540</b>	8,99	8,99	8,99	9,00	9,00	8,99	9,00	8,99	9,00	8,99
<b>600</b>	10,01	10,02	10,00	10,00	9,99	9,99	10,00	9,99	10,00	10,00

Tabela 10 – Dados de entrada para o algoritmo de calibração do sensor LVDT. (Fonte: autoria própria)

<b>Dados para calibração do LVDT (média do incremento e decremento)</b>					
<b>Incremento</b>			<b>Decremento</b>		
<b>Nº</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Nº</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>	<b>Tensão (V)</b>
1	0,00	0,00	12	600,00	0,00
2	60,00	0,97	13	540,00	0,97
3	120,00	1,97	14	480,00	1,97
4	180,00	2,97	15	420,00	2,97
5	240,00	3,97	16	360,00	3,96
6	300,00	4,95	17	300,00	4,95
7	360,00	5,95	18	240,00	5,95
8	420,00	6,95	19	180,00	6,95
9	480,00	7,98	20	120,00	7,97
10	540,00	9,00	21	60,00	8,99
11	600,00	10,00	22	0,00	10,00

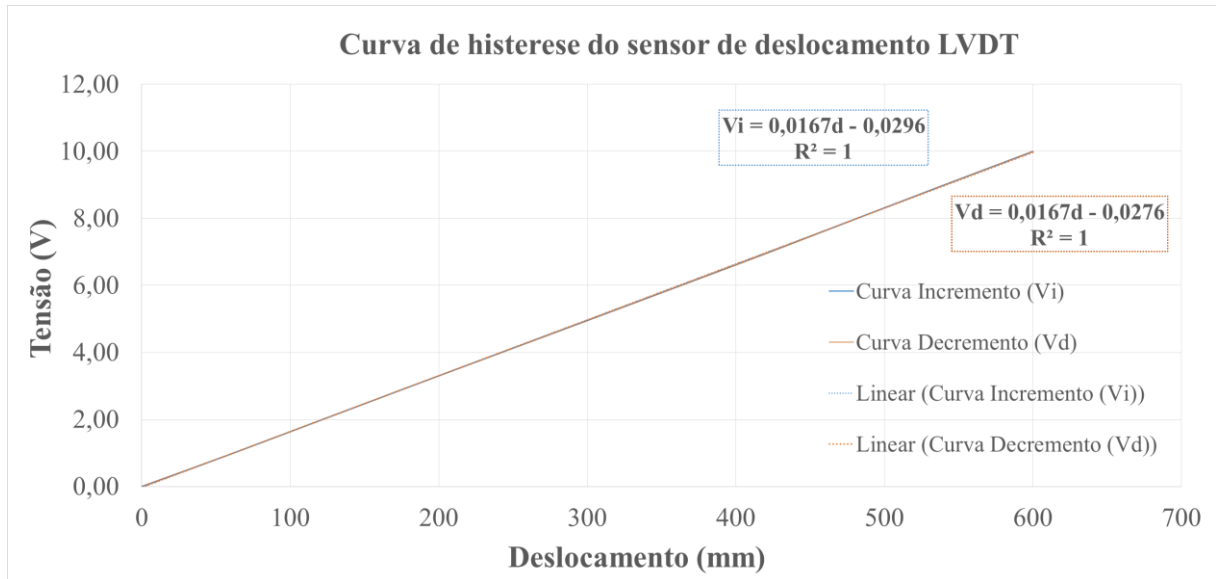


Figura 27. Curva de histerese do sensor LVDT. (Fonte: autoria própria)

Tabela 11 – Características estáticas do sensor LVDT. (Fonte: autoria própria)

Características estáticas do sensor LVDT						
Entrada real	Saída real	Saída ideal	Não linearidade		Histerese	
Deslocamento (mm)	Tensão (V)	Tensão (V)	Tensão (V)	% f.s.d	Tensão (V)	% f.s.d
0	-0,031	0,000	-0,031	-0,305	0,002	0,020
60	0,972	1,000	-0,029	-0,285	0,000	0,000
120	1,974	2,000	-0,027	-0,265	0,004	0,040
180	2,976	3,000	-0,025	-0,245	0,002	0,020
240	3,978	4,000	-0,023	-0,225	-0,002	-0,020
300	4,980	5,000	-0,021	-0,205	0,000	0,000
360	5,982	6,000	-0,019	-0,185	-0,002	-0,020
420	6,984	7,000	-0,016	-0,165	-0,008	-0,080
480	7,986	8,000	-0,015	-0,145	-0,002	-0,020
540	8,988	9,000	-0,013	-0,125	-0,004	-0,040
600	9,990	10,000	-0,011	-0,105	0,000	0,000

\*f.s.d = full scale deflection (relação em porcentagem entre o valor de tensão e a escala completa de tensão, que nesse caso é de 10 V).

Tabela 12 – Relação entre Entrada e Saída do sensor. (Fonte: autoria própria)

Deslocamento medido (mm)	Tensão indicada (V)	Deslocamento indicado (mm)
0	-0,0305	-0,0027
60	0,9715	60,0845
120	1,9735	120,1718
180	2,9755	180,2590
240	3,9775	240,3462
300	4,9795	300,4335
360	5,9815	360,5207
420	6,9835	420,6079
480	7,9855	480,6952
540	8,9875	540,7824
600	9,9895	600,8696

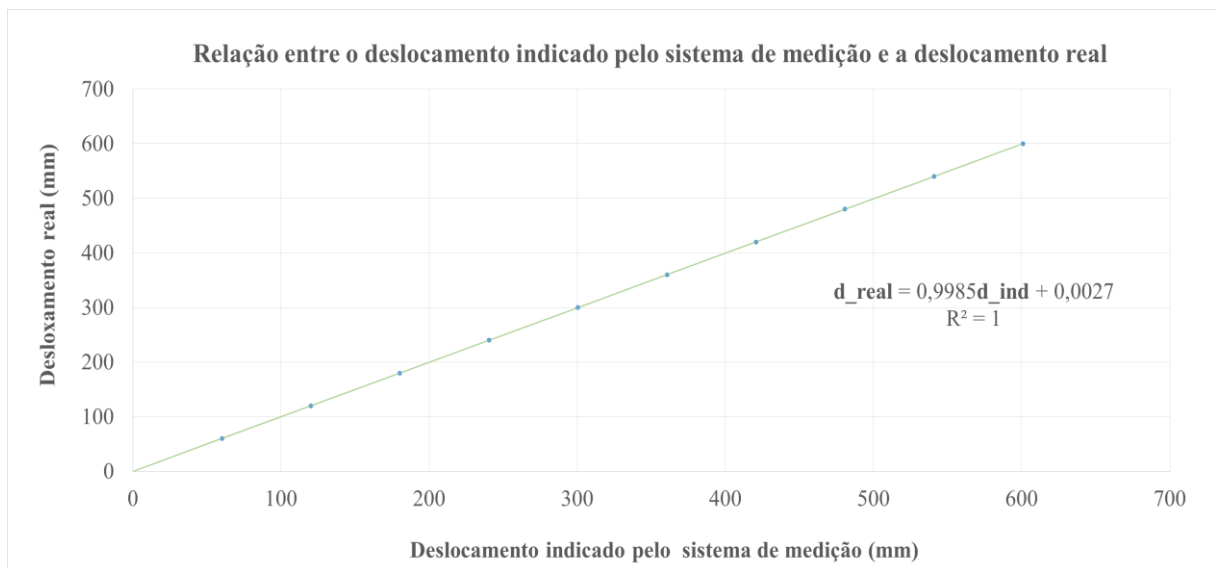


Figura 28. Relação entre deslocamento real e deslocamento indicado. (Fonte: autoria própria)

### 3.2. ENSAIOS PRELIMINARES (CRASHBOX)

Realizou-se um teste preliminar na máquina de CrashBox com o corpo de prova de alumínio com o objetivo de verificar o funcionamento dos sensores calibrados, bem como do sistema hidráulico. A configuração do ensaio está representada na Fig. (29). A partir disso, obteve-se a curva Força x Deslocamento, bem como a velocidade do ensaio.



Figura 29. Configuração do ensaio preliminar com a máquina de CrashBox. (Fonte: autoria própria)

### 3.3. IMPLEMENTAÇÃO DO NOVO SISTEMA MECÂNICO DE RETORNO DA PLACA

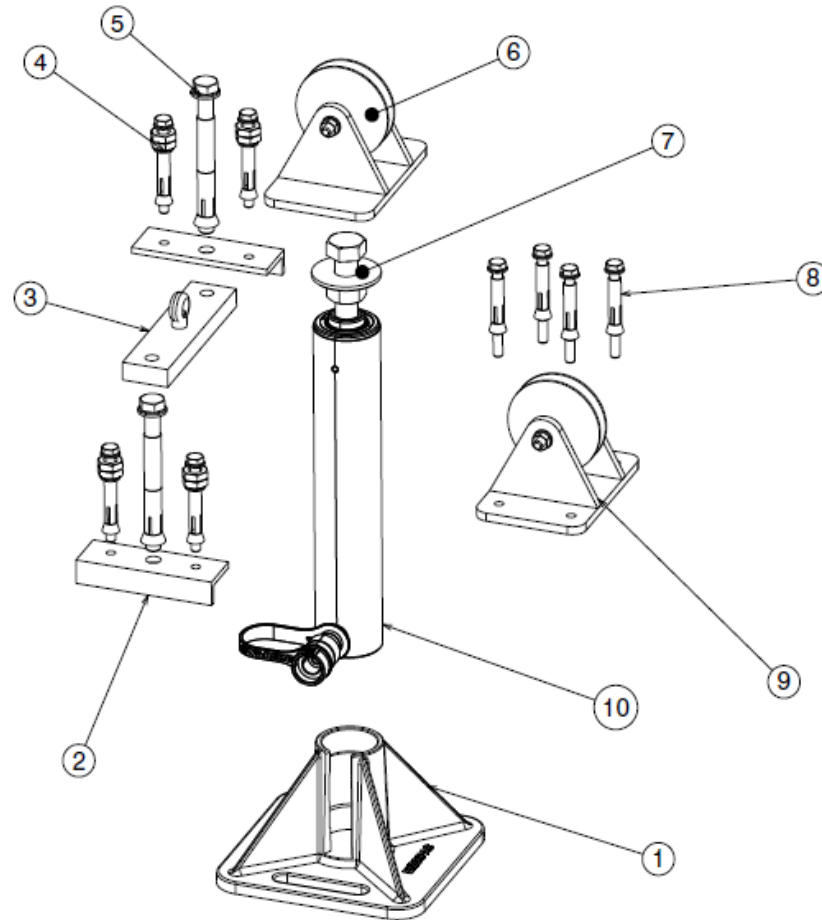
Uma vez que o ensaio de esmagamento é realizado, a placa tende a se manter em repouso por conta do equilíbrio de forças com o sistema de contrapesos normal. Dessa forma, para realizar novos ensaios há a necessidade de realizar o retorno da placa à sua posição inicial, o que significa que o atuador deve estar completamente comprimido e em contato físico com a base JBI 25.

Apesar do equilíbrio de forças entre o sistema de contrapesos normal e a placa de esmagamento, o sistema possui elevada inércia e o atrito entre as guias e os mancais/buchas são significativos, conforme será mostrado adiante no texto. Dessa forma, para realizar o avanço ou o retorno da placa de esmagamento um esforço significativo é requerido. Por conta disso, foi necessário projetar um sistema específico para realizar o retorno da placa à sua posição inicial.

O sistema é conectado à viga do sistema de contrapesos normal por meio de um cabo de aço. Esse cabo passa pelas duas polias do sistema e sua outra extremidade é fixada na peça 3 da Fig. (30). Desse modo, para realizar o retorno basta realizar o avanço do atuador RC 1010 para que o cabo de aço seja tracionado e exerça uma força sobre o sistema.

É importante ressaltar que a determinação das solicitações mecânicas atuantes sobre o sistema era, nessa etapa do projeto, desconhecida. Dessa forma, utilizou-se da experiência dos professores orientadores para determinar as dimensões da chapas

utilizadas no sistema, bem como as polias e parafusos. A montagem final desse sistema no dispositivo, bem como as quantidades de cada conjunto estão representados na Fig. (30).



Número	Quantidade	Componente
1	1	Base atuador
2	2	Chapa cantoneira
3	1	Chapa olhal
4	4	Chumbador mecânico (Parabolt 3/8'') com porcas auxiliares
5	2	Chumbador mecânico (Parabolt 5/8'')
6	1	Suporte para polia de 4'' para fixação do atuador RC1010
7	1	Parafuso, arruela e porca de 1''
8	4	Chumbador mecânico (Parabolt 3/8'')
9	1	Suporte para polia de 4'' para fixação no solo
10	1	Atuador enerpac RC1010

Figura 30. Componentes do sistema mecânico de retorno da placa de esmagamento. (Fonte: autoria própria)

Durante a implementação física deste sistema vários imprevistos surgiram. Na Tab. (13) tem-se uma descrição dos diversos desafios surgidos ao longo da implementação do Sistema de retorno da placa bem como as decisões que foram tomadas para resolver os problemas e seus respectivos resultados. Além disso, a seguir tem-se uma descrição mais detalhada sobre cada item constante na Tab. (13).

1 – Neste ocorrido foi observado que os furos realizados pela empresa responsável por fabricar as chapas metálicas não condiziam com o solicitado, tanto em termos de dimensões como em qualidade. Dessa forma, foi solicitado à empresa novas peças. Após o tempo mostrado na Tab. (13) obteve-se as peças. Ainda assim, algum trabalho extra em termos de furação foi necessário por parte dos técnicos do Lab. LDTEA a fim de preparar as peças para a fabricação dos componentes do Sistema de retorno da placa.

2 – Para realizar a fixação dos cabos de aço do sistema de retorno foram necessários dois parafusos do tipo olhal M14. Um desses parafusos vai juntamente à chapa de 20 mm (número 3 na Fig. (30)). Para fixar esses parafusos às respectivas peças de suporte foi necessário confeccionar uma rosca adequada para o parafuso, o que torna acarreta a utilização da ferramenta Macho. Entretanto, para o diâmetro M14, não havia disponibilidade ferramenta no Lab. de fabricação. Desse modo, foi necessário adquirir em outra loja dar prosseguimento aos trabalhos.

3 – No início do projeto foi verificada a necessidade de se estabelecer mais conexões no sistema hidráulico já existente no Lab. (utilizado para os ensaio na máquina Crash Box). Dessa forma, foi realizado um novo arranjo que permite a passagem de fluido hidráulico tanto para a máquina CrashBox como para o dispositivo RoofCrush.

4 – Ao longo do andamento do projeto e dos testes realizados verificou-se a existência de vazamentos pontuais no sistema hidráulico. Dessa forma, foi necessário realizar a desmontagem do sistema, introduzir a pasta 'Scotch-Weld Stainless Steel High Temperature Pipe Sealant PS67' e realizar a montagem do sistema novamente. Ressalta-se que a pasta requer um tempo de cura de aproximadamente 48 horas para que o sistema possa ser testado novamente.

5 – Ao fixar os suporte do LVDT no dispositivo foram realizados testes para verificar o funcionamento da instrumentação, previamente calibrada na Parte 1 deste trabalho.

Tabela 13 – Dificuldades encontradas durante a implementação do sistema de retorno da placa de esmagamento. (Fonte: autoria própria)

	<b>Descrição do Imprevisto</b>	<b>Atraso estimado</b>	<b>Solução</b>	<b>Resultado</b>
1	Erros na fabricação das peças por parte do fornecedor	1 semana	Retrabalho de peças por parte do fornecedor	Peças disponíveis para avanços na implementação do sistema
2	Indisponibilidade de ferramental no Laboratório de fabricação (ex: macho M14)	2 dias	Compra do material	Foi possível construir o furo com rosca necessário para fixação do parafuso olhal
3	Indisponibilidade de conexões (T e válvula) para implementação do novo sistema hidráulico	2 dias	Compra do material	Rearranjo do sistema hidráulico, permitindo a passagem de fluido para o atuador RC 2510 do dispositivo Roof Crush
4	Vazamentos do sistema hidráulico	2 semanas (total de todos os vazamentos)	Desmontagem do sistema e reparo dos vazamentos utilizando a cola Scotch-Weld	O novo sistema hidráulico está livre de vazamentos.
5	Rompimento do cabo do sensor LVDT	1 dia	Reparo dos cabos e nova soldagem dos terminais do sensor	O sistema de medição de deslocamento funciona corretamente
6	Fratura do solo do Lab. na primeira tentativa de implementação do sistema	1 semana	Alterações de projeto	O novo sistema é capaz de cumprir a função para a qual foi projetado
7	Fratura do parafuso 3/8" de suporte das polias	2 dias	Compra do parafuso de classe 8.8	O novo parafuso é capaz de suportar as tensões de flexão decorrentes do carregamento transversal executado pela polia
8	Fratura do cabo de aço utilizado	2 dias	Compra de um cabo de aço novo	O novo cabo de aço é capaz de suportar o esforço de tração aplicado
9	Indisponibilidade da máquina de solda portátil no Laboratório de fabricação	1 semana	Empréstimo da máquina	Foi possível soldar o suporte do sensor LVDT na posição adequada para realizar a medição do deslocamento da placa
10	Falta de pressão do circuito do sistema hidráulico para realizar os ensaio com as amostras	3 semanas	Compra de um novo cilindro de gás nitrogênio pressurizado	Foi possível atingir uma pressão máxima de 165 bar

Entretanto, verificou-se falhas no recebimento dos sinais dos sensores de deslocamento (LVDT) e de pressão (GTP 1000). Utilizando um multímetro foi possível observar a raiz da falha e, dessa forma, verificou-se mal contato nas conexões elétricas. Foi realizado o reparo das conexões e foi possível obter os sinais esperados.

6 - Uma das dificuldades encontradas nesta etapa foi a resistência da junção entre o parafuso e o solo. O solo mostrou incapaz de suportar elevadas tensões, principalmente decorrentes de carregamentos trativos na união. Dessa forma, foi necessário alterar o projeto da peça, aumentando-se o número de Parabolts e adicionando-se chapas cantoneira. Dessa forma, obteve-se uma melhor distribuição de tensões atuantes no solo e um melhor ancoramento mecânico entre os chumbadores e o solo. Assim, o sistema funciona adequadamente.

7 – Durante testes manuais do sistema de retorno ocorreu um possível erro na operação. O bombeamento do atuador RC 1010 (de retorno) foi continuado mesmo após o atuador RC 2510 (de avanço) atingir o fim de curso, tocando a base JBI 25. Desse modo, os parafusos de suportes de ambas as polias do Sistema de retorno foram submetidos a sobrecarga e sofreram danos permanentes.

8 – Ainda nos testes manuais do sistema de retorno ocorreu a ruptura do cabo de aço utilizado. Acredita-se que a falha se deu devido ao estado do cabo, que já possuía uma das fibras rompidas. Dessa forma adquiriu-se um novo cabo de mesmo diâmetro e, atualmente, o sistema funciona corretamente.

9 – Para realizar a solda do suporte do sensor LVDT no dispositivo Roof Crush foi necessário obter uma máquina de solda portátil, não disponível no Lab. A máquina foi arranjada e o suporte foi soldado adequadamente.

10 – Nos ensaios iniciais observou-se que o sistema utilizado era incapaz de fornecer a pressão necessária para esmagar a amostra confeccionada. A pressão máxima atingida pelo sistema era de aproximadamente 135 bar, o que corresponde a uma força de avanço de aproximadamente 45 kN para o atuador RC 2510. Ao substituir o cilindro de gás nitrogênio obteve-se uma pressão máxima de 165 bar, o que corresponde a uma força de avanço 55 kN para o atuador RC 2510. No entanto, ainda assim não foi possível realizar o esmagamento completo da amostra.



A implementação física final do sistema de retorno está representada na Fig. (31).



Figura 31. Montagem final do sistema de contrapesos para retorno da placa.  
(Fonte: autoria própria)

Esse sistema é capaz de cumprir a sua função e realizar o retorno da placa de esmagamento para a sua posição inicial. Ressalta-se que o controle desse sistema é completamente manual e realizado por meio de uma bomba mecânica.

O operador deve ficar atento ao fim de curso do atuador RC 2510 da placa para que o sistema não seja sobrecarregado, conforme mencionando no Item 7 da Tab. (13). Melhores instruções estão representadas no Manual de Operação do dispositivo Roof Crush presente no Anexo IV.

### 3.4. INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para obter os dados de pressão e deslocamento utilizou-se o software LabVIEW, que possui diversas funções, tais como:

- Aquisição de dados de instrumentos de medição
- Processamento de dados (filtragem e manipulação de dados)
- Análise de dados
- Controle de instrumentos e equipamentos

Neste trabalho utilizou-se o LabVIEW para as finalidades de aquisição e processamento dos dados de interesse. O software LabVIEW utiliza uma linguagem gráfica. Dessa forma é necessário criar um diagrama de blocos com a lógica a ser implementada pelo programa.

Utilizou-se o bloco DAQ Assistant para configurar as entradas da placa National Instruments. É necessário utilizar dois pinos para cada sensor, sendo um relativo ao terra (potencial elétrico de referência) e outro relativo ao sinal de tensão enviado pelo sensor em função da intensidade da grandeza medida (pressão ou deslocamento). A configuração de pinos está representada na Fig. (32). Para o sensor LVDT utilizou-se os canais analógicos GND e AI0 e para o sensor GTP 100 utilizou-se GND e AI1. Conforme observado anteriormente, esses sinais são linearmente proporcionais à magnitude da grandeza medida.



Figura 32. Placa de aquisição de dados da National Instruments (Fonte: autoria própria)

No bloco DAQ Assistant é necessário especificar as configuração relativas à taxa de aquisição de dados. Nesse programa foram realizadas aquisições a cada 5 milissegundos. Em outras palavras, a cada segundo de gravação dos dados são aqisitados 200 dados de pressão e de deslocamento. Esses dados são, posteriormente, exportados para uma planilha em Excel. A partir disso, é realizado um tratamento dos dados relevantes para as análises relativas ao desempenho do dispositivo Roof Crush.

Os dados aqisitados são multiplicados pelos Ganhos de pressão e de deslocamento, conforme observado na Fig. (32). O valor resultante dessa operação é, então, subtraído do Zero para se obter o valor indicado do mensurando. Em seguida, o valor indicado é filtrado no intuito de remover ruídos no sinal elétrico aqisitado. Ressalta-se que os coeficientes Ganho e Zero são obtidos por meio do processo de calibração dos sensores, utilizando os algoritmos em MATLAB constantes nos Anexos I e II.

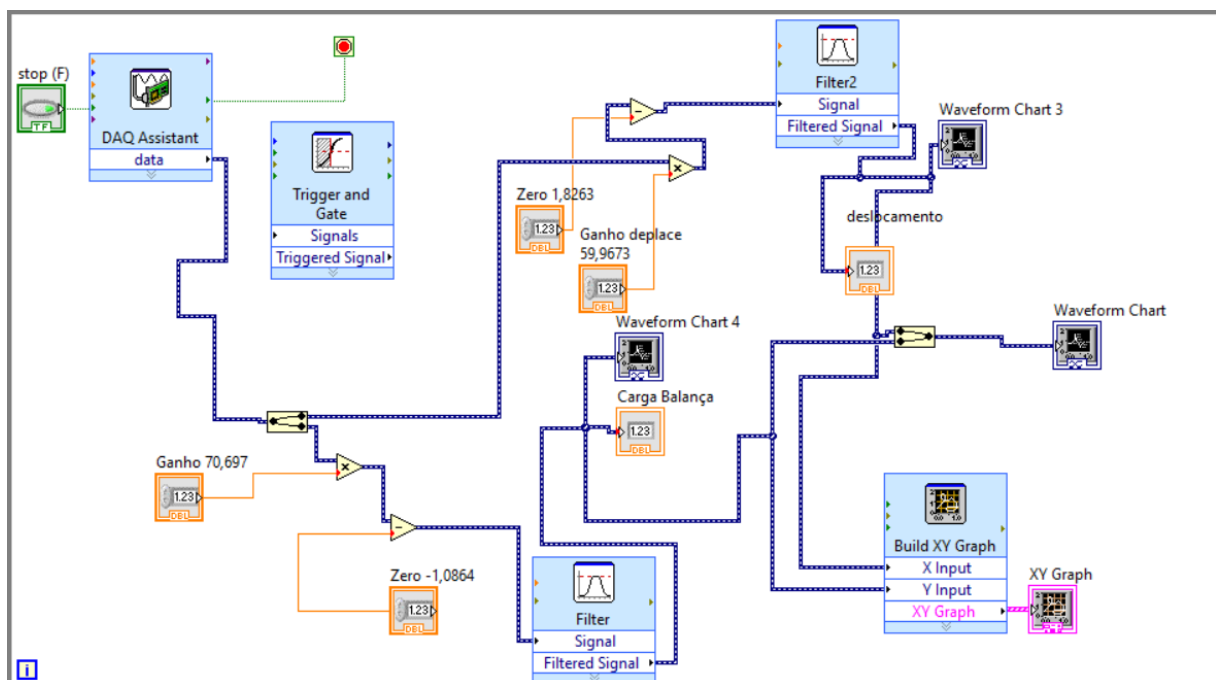


Figura 33. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados no programa LabVIEW. (Fonte: autoria própria)

Por meio dos blocos “Waveform Chart” é possível observar os sinais medidos em função do tempo.

O bloco “Build XY Graph” foi utilizado para aqisitar os dados de Pressão e Deslocamento num único gráfico em tempos correspondentes facilitando, desse modo, a análise e plotagem dos resultados experimentais.

### 3.5. SIMULAÇÕES DO SISTEMA HIDRÁULICO UTILIZADO

Para realizar o avanço da placa de esmagamento utilizou-se um sistema puramente hidráulico, sendo a velocidade da carga (placa de esmagamento) controlada apenas por meio de uma válvula de restrição de fluxo. Aproveitou-se da estrutura preexistente do dispositivo CrashBox presente no Lab. GMSSA. O circuito é composto essencialmente pelos seguintes componentes:

- 5 Válvulas de esfera
- 3 conexões hidráulicas em T
- Mangueiras de circuito hidráulico
- 1 Bomba mecânica (para operação manual de avanço e despressurização do sistema)
- 1 Cilindro de gás nitrogênio pressurizado (pressão máxima de 165 bar)
- 1 Acumulador de pressão (pressão máxima de 165 bar)
- 1 Válvula de restrição de fluxo/válvula controladora de vazão
- 1 Transdutor de pressão (GTP 1000)
- 2 Atuadores Enerparc RC 2510

Na Fig. (34) tem-se um esquemático do fluxo de energia do sistema utilizado e da forma de geração de pressão no sistema.

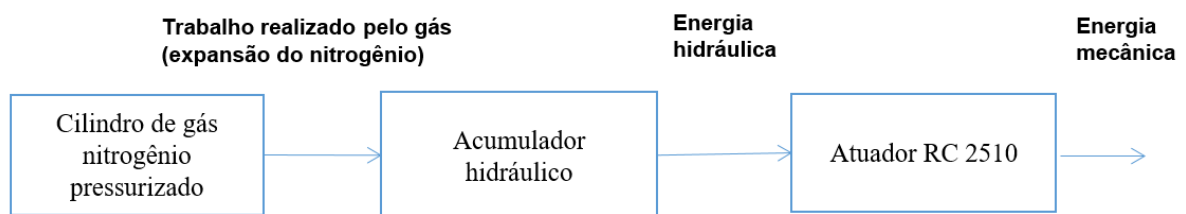


Figura 34. Fluxo de energia do sistema hidráulico do dispositivo Roof Crush.  
(Fonte: autoria própria)

Observa-se que, na etapa de avanço do sistema, utiliza-se o fluido hidráulico contido no reservatório. Esse fluido é pressurizado pelo gás nitrogênio. A importância do gás nitrogênio se dá pelo devido à sua compressibilidade. O gás é capaz de se expandir sem ter a sua pressão reduzida, diferentemente do fluido hidráulico, que é incompressível. Desse modo, para que o fluido se mantenha pressurizado é

necessário que o gás nitrogênio esteja sempre pressurizando o sistema, o que também garante o movimento do fluido ao longo da linha de pressão. Sem a presença do gás nitrogênio, o fluido não seria capaz de deslocar ao longo do sistema e cumprir a sua função de expandir a câmara do atuador e realizar o movimento do cilindro. Para ilustrar o funcionamento do sistema hidráulico nas diversas condições de operação, considerando os ensaios realizados, foram desenvolvidas simulações no software FluidSim. A partir da Fig. (34) observa-se a configuração do sistema hidráulico utilizado atualmente no Lab. GMSSA. O mesmo sistema é utilizado para pressurizar dois atuadores montados em paralelo de duas máquinas diferentes, o dispositivo CrashBox e o dispositivo RoofCrush. Entretanto, apenas um dispositivo deve ser utilizado por vez.

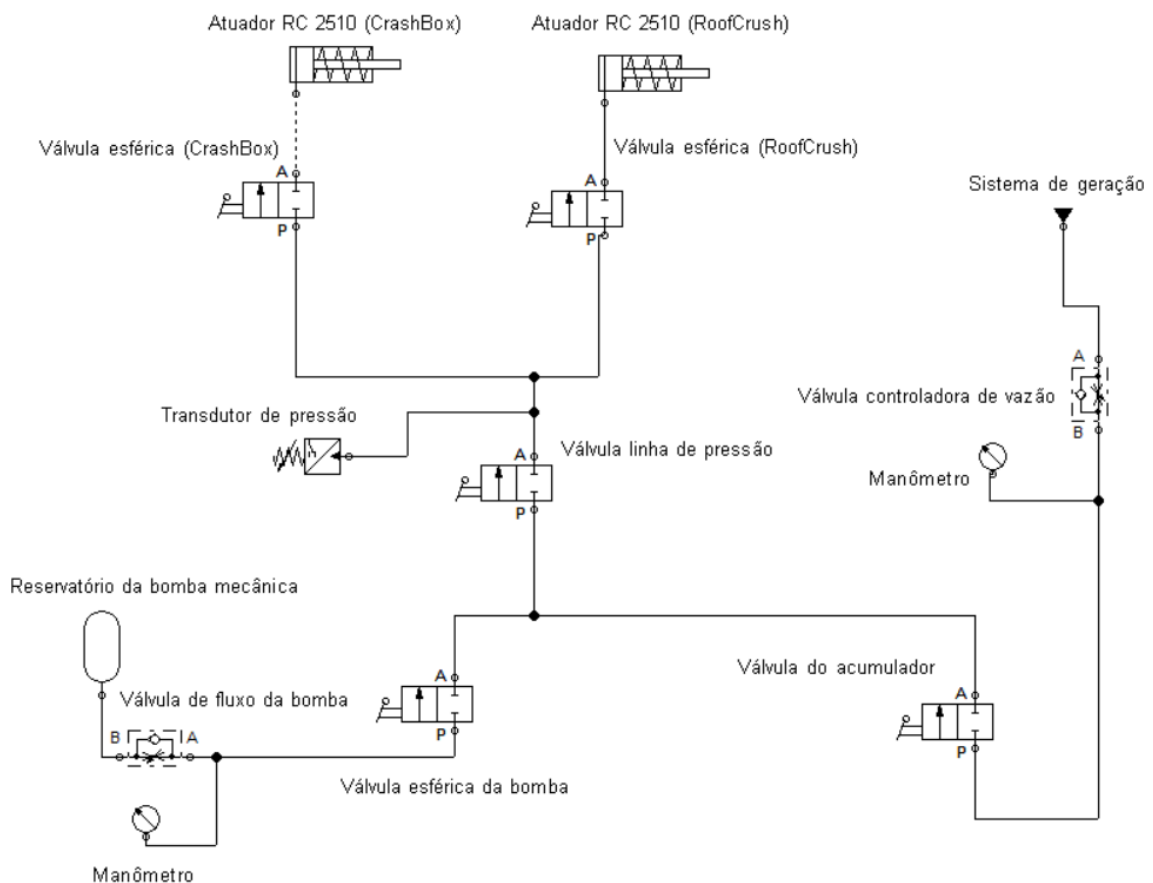


Figura 35. Diagrama do circuito hidráulico utilizado para o Roof Crush no software FluidSim. (Fonte: autoria própria)

O conjunto (acumulador + cilindro de pressão com gás nitrogênio) foi representado por uma bomba, apenas para fins de simulação do funcionamento do circuito. Essa substituição mostrou-se condizente com a operação real do sistema, pois o conjunto

supracitado exerce a mesma função de uma bomba num circuito hidráulico, ou seja, promover o fluxo de óleo no circuito por meio da geração de uma diferença de pressão entre dois pontos.

Na simulação é possível ver o estágio inicial do sistema por meio da Fig. (36). Inicialmente, observa-se que apenas uma parte do circuito está sob pressão (linhas grossas na cor marrom escuro). A pressão provém do sistema de geração que, no estado atual do dispositivo, é capaz de fornecer uma pressão máxima de 165 bar. A 'Válvula do acumulador' está inicialmente fechada e impede a passagem do fluido pressurizado para as outras partes do sistema.

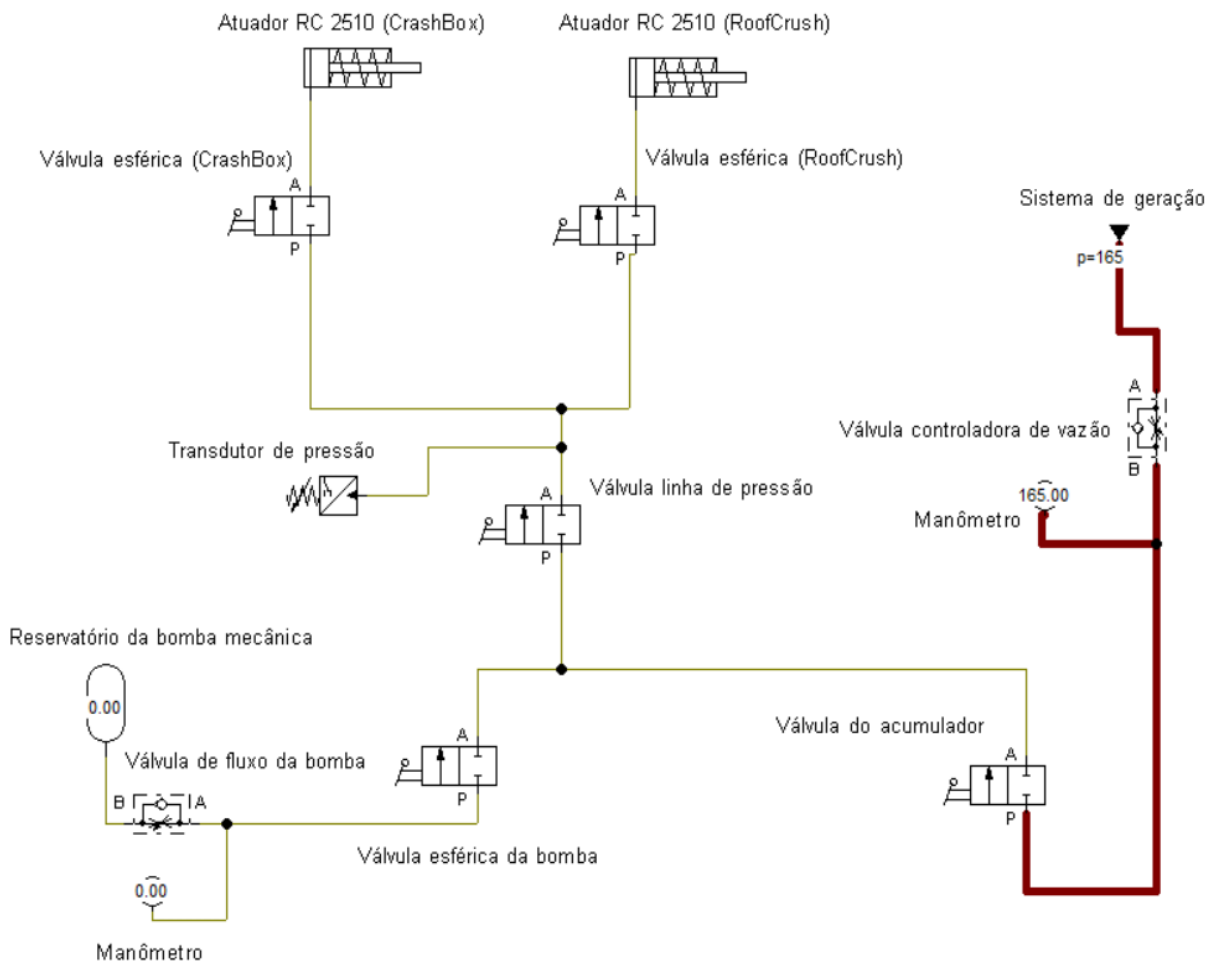


Figura 36. Simulação do circuito no software FluidSim representando a condição de pressurização inicial do circuito hidráulico. (Fonte: autoria própria)

Na próxima etapa, abre-se as válvulas da linha de pressão e do Roof Crush. Dessa forma, a pressurização do atuador hidráulico ficará condicionada à abertura da válvula

do acumulador. Ao abrir a 'Válvula do acumulador' o fluido pressurizado avança direto para o atuador do dispositivo RoofCrush, realizando o avanço do atuador hidráulico, conforme a Fig. (37).

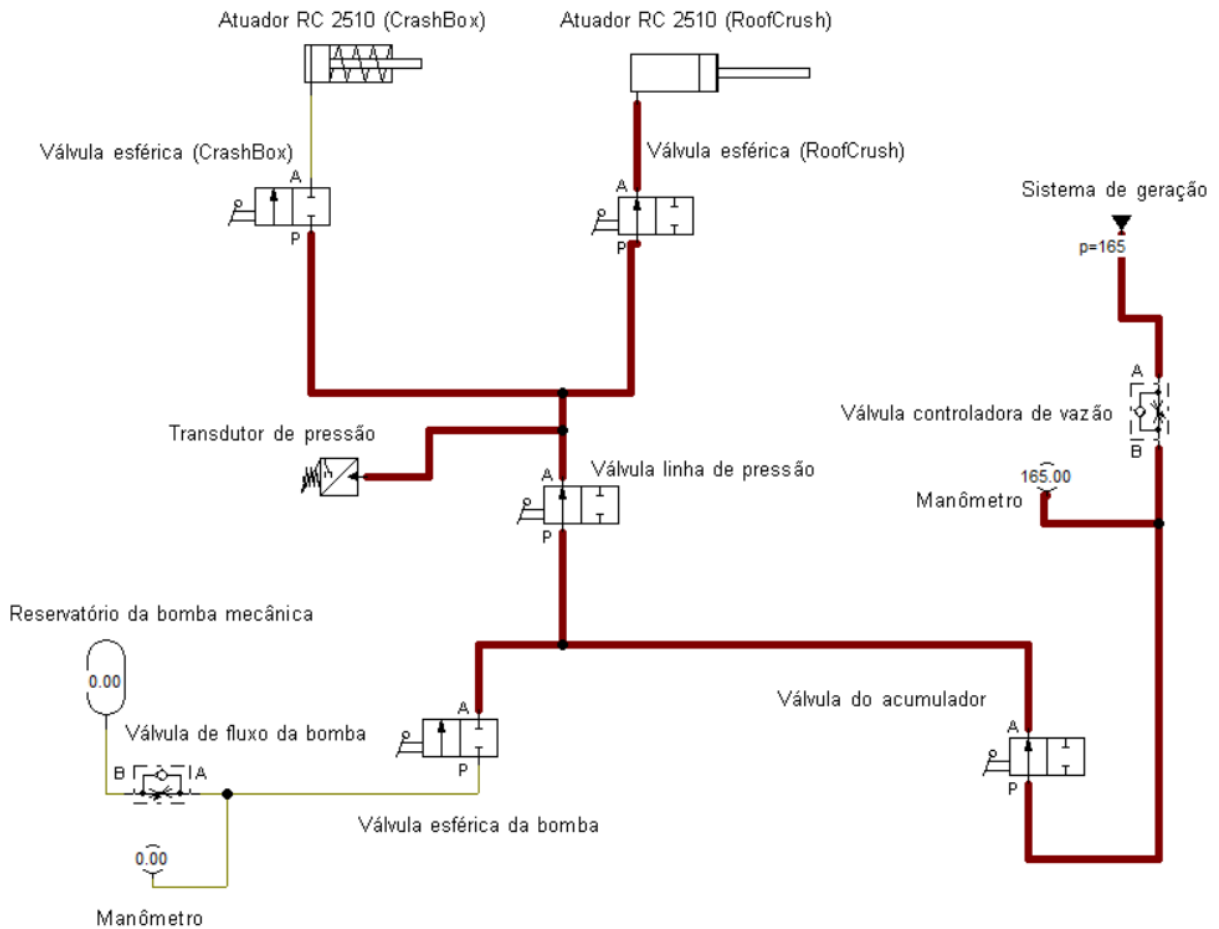


Figura 37. Simulação do circuito no software FluidSim representando a condição de avanço do atuador hidráulico (sistema pressurizado). (Fonte: autoria própria)

A próxima etapa da operação consiste na despressurização do atuador do RoofCrush. Isso é realizado por meio do fechamento da válvula do acumulador e abertura da válvula esférica da bomba. Além disso é necessário abrir (lentamente) a válvula de fluxo da bomba para que o fluido seja armazenado no reservatório da bomba mecânica. Essa etapa está representada na Fig. (38), na qual verifica-se a mudança na cor e espessura das linhas (de marrom com linhas grossas para verde com linhas finas), indicando a despressurização das respectivas linhas.

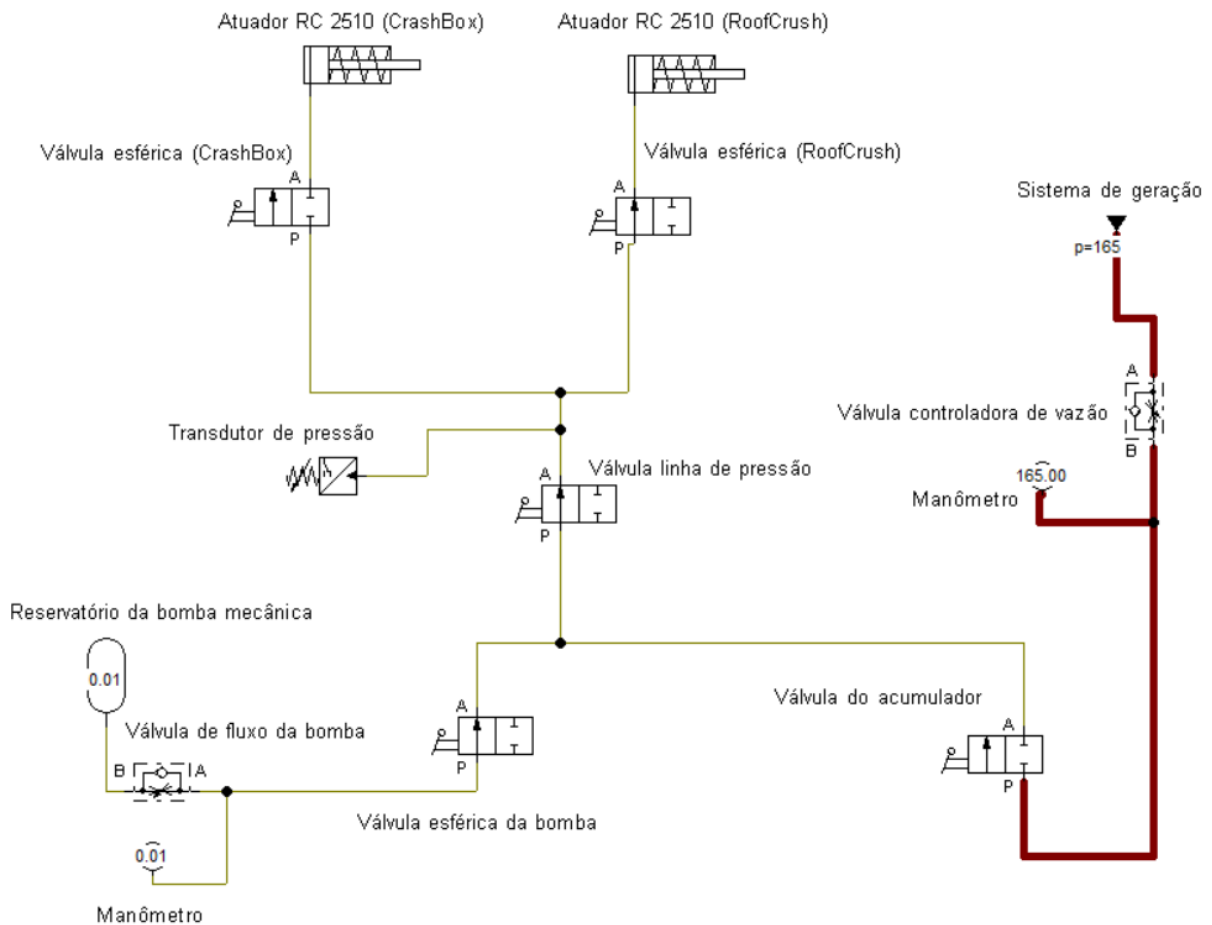


Figura 38. Simulação do circuito no software FluidSim representando a condição de despressurização do atuador. (Fonte: autoria própria)

É possível que o reservatório de fluido hidráulico da bomba mecânica não seja capaz de armazenar todo o fluido durante a etapa de despressurização do sistema. Desse modo, pode ser necessário bombear mecanicamente o fluido para o acumulador hidráulico. Isso é feito fechando-se as válvulas do RoofCrush e da linha de pressão. Deve-se também fechar completamente a 'válvula de fluxo da bomba' e manter a 'válvula esférica da bomba' aberta. Além disso, é necessário abrir a 'válvula do acumulador'. Assim, basta bombear mecanicamente o fluido hidráulico para o acumulador novamente. O esquema hidráulico desse processo está representado na Fig. (39). Após essa etapa é necessário realizar o retorno da placa para sua posição inicial. Feito isso torna-se possível realizar um novo teste de esmagamento. Ressalta-se também que maiores detalhes da operação real de todos os processos simulados por meio do software FluidSim serão mostrados na prática por meio do Manual de Operações do dispositivo RoofCrush.



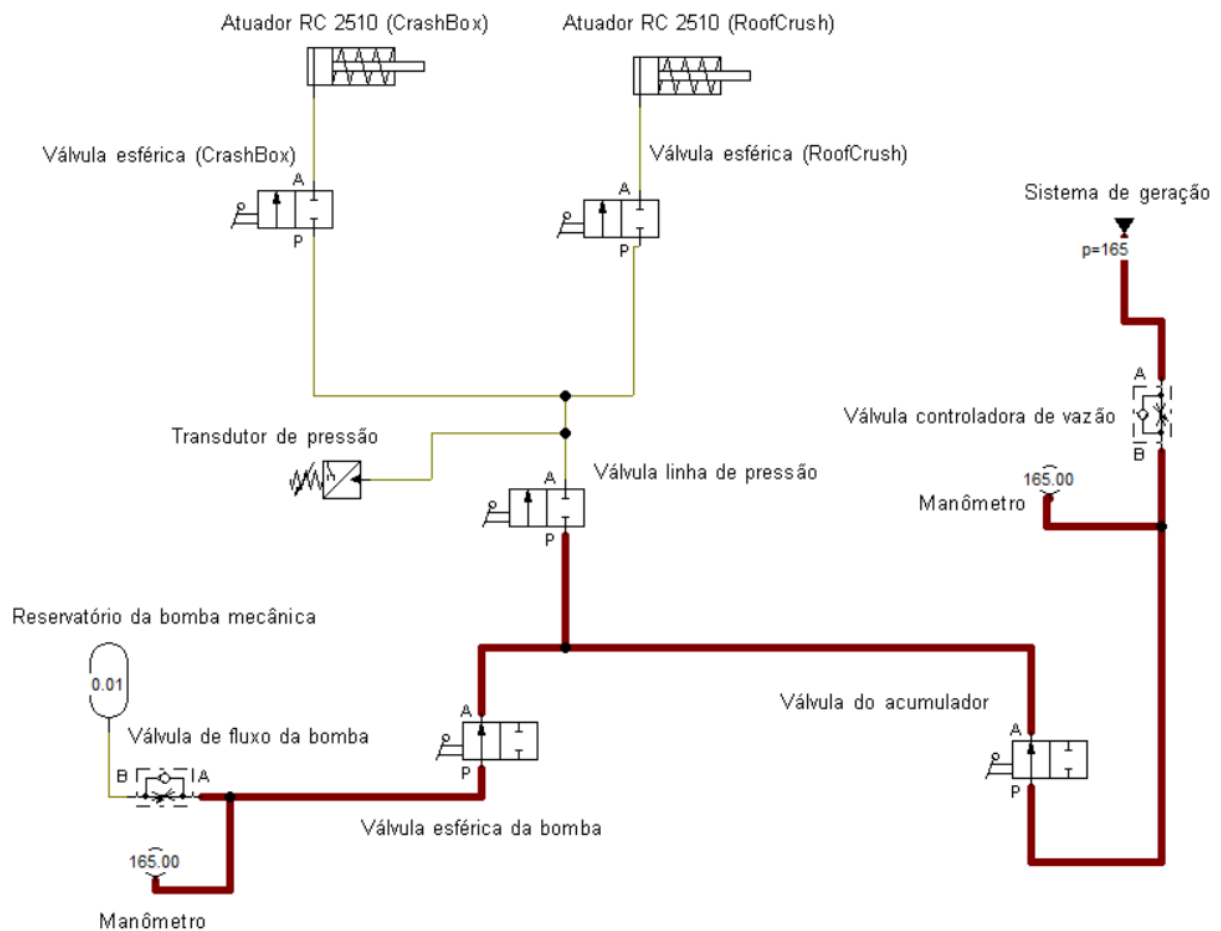


Figura 39. Simulação do circuito no software FluidSim representando a condição de retorno do fluido hidráulico para o acumulador. (Fonte: autoria própria)

Os processos mostrados pela simulação são mostrados em operação real por meio Anexo IV deste trabalho.

### 3.6. MECÂNICA DO MOVIMENTO DA PLACA DE ESMAGAMENTO

Nesta seção apresenta-se a análise de movimento da placa de esmagamento. Essa análise foi realizada para determinar as forças envolvidas no movimento (forças ativas e dissipativas). Dessa forma, tornou-se possível determinar a parcela de contribuição de cada um dos efeitos de forças no sistema e obter uma melhor compreensão acerca do comportamento do sistema de avanço e de retorno do dispositivo. Para essa análise é importante observar que o peso da Placa de esmagamento é de aproximadamente 810 kg, o que corresponde a 7946 N.

# Avanço da placa

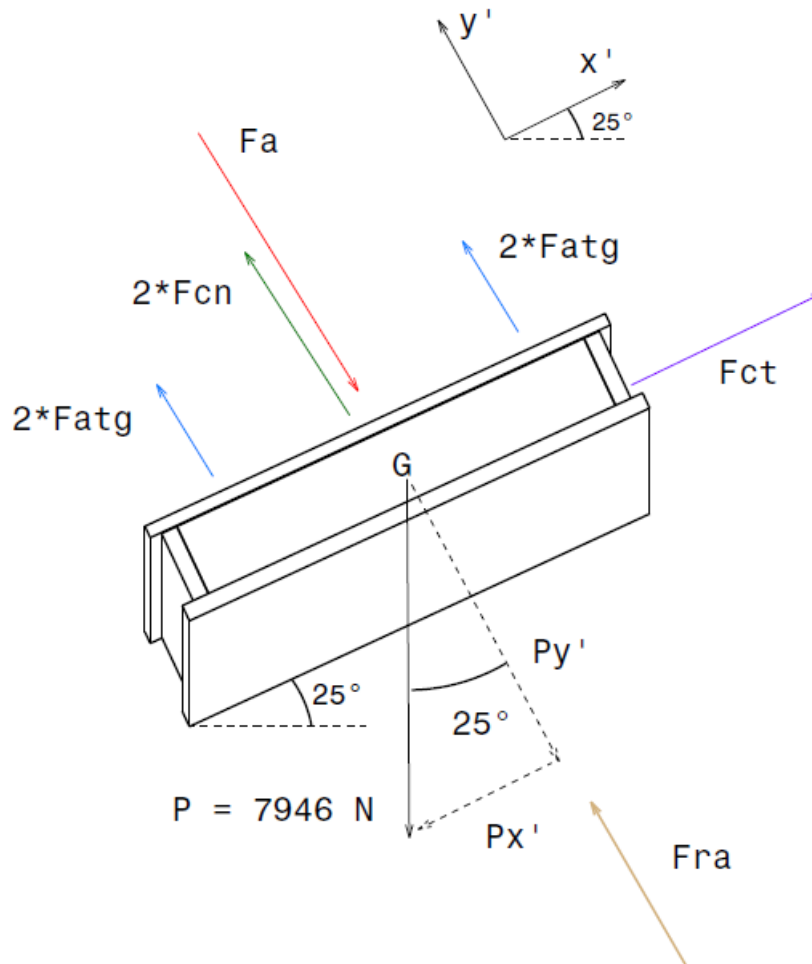


Figura 40. Diagrama de corpo livre da placa de esmagamento representando a condição de Avanço.

Em que:

- $F_a$  = força exercida pelo atuador hidráulico sobre a placa
- $F_{atg}$  = força de atrito das guias com o conjunto (bucha + mancal de deslizamento) que é transmitida à placa por meio das guias
- $F_{cn}$  = força exercida pelo cabo de aço do sistema de contrapeso normal sobre a placa
- $F_{ct}$  = força exercida pelo cabo de aço do sistema de contrapeso tangencial sobre a placa
- $F_{ra}$  = força exercida pela amostra (CP) sobre a placa

- P = força peso atuante sobre a placa
- $P_x'$  = componente tangencial da força peso da placa
- $P_y'$  = componente normal da força peso da placa

Equilíbrio de forças na direção  $x'$  considerando o sistema de coordenadas preestabelecido na Fig. (40):

$$\sum F_x' = F_{ct} - P_x' = 0 \quad (13)$$

$$F_{ct} = P_x' = P * \sin(25^\circ) = 810 \text{ kg} * \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} * \sin(25^\circ) = 3358,17 \text{ N}$$

A força de 3358,17 N corresponde à uma força de aproximadamente 342 kgf. Considerando-se que cada massa do sistema de contrapesos tangencial possui 5 kg, utilizou-se 68 massas no sistema.

Considerando-se o sistema de coordenadas preestabelecido na Fig.(40) tem-se a seguinte equação de equilíbrio na direção  $y'$ :

$$\sum F_y' = -F_a + 2 * F_{cn} + 4 * F_{atg} - P_y' + F_{ra} = 0 \quad (14)$$

Como o peso do conjunto de contrapesos é, por requisito operacional, igual à componente normal do peso da placa de esmagamento tem-se ( $2 * F_{cn} = P_y'$ ) tem-se:

$$F_{atg} = \frac{F_a - F_{ra}}{4}$$

Além disso, considerando-se o ensaio à vazio, ou seja, sem amostra, tem-se que a força de reação da amostra é nula ( $F_{ra} = 0$ ). Dessa forma, torna-se possível determinar a força de atrito total do sistema. Portanto, tem-se:

$$F_{atg} = \frac{F_a}{4} \quad \text{ou} \quad F_a = 4 * F_{atg} = F_{atg\_total}$$

Em que:

- $F_{atg\_total}$  = Força de atrito total no sistema (considerando todas as guias)

Entretanto, a equação (14) representa uma situação de equilíbrio estático. Para determinar a força que é, de fato, necessária para retirar o sistema de repouso é necessário considerar a força inercial dada pelo produto entre a massa da placa e a aceleração desta até atingir a velocidade constante estipulada no ensaio. Essa determinação é, no entanto, puramente experimental. Dessa forma, utilizou-se os dados presentes adquiridos a partir da instrumentação do dispositivo Roof Crush, que num primeiro momento ocorreu à vazio.

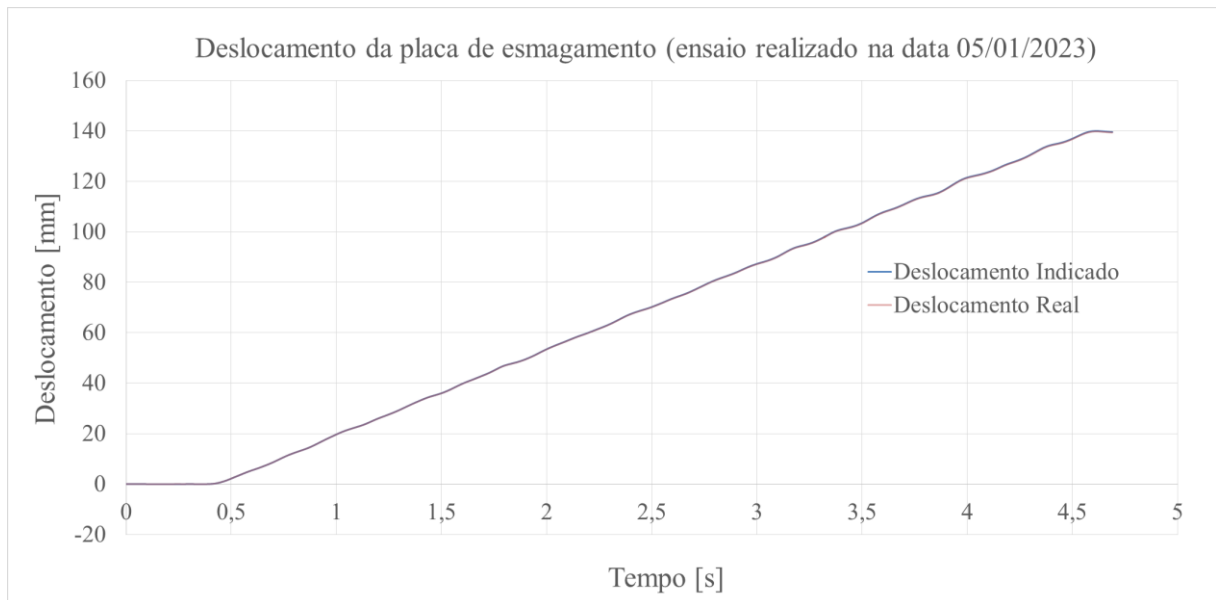


Figura 41. Gráfico representando o deslocamento da placa de esmagamento durante o Avanço à vazio.

A partir dos gráficos é possível observar que o movimento da placa é iniciado apenas após 0,5 segundo do início do ensaio. Observa-se, além disso, que o deslocamento varia linearmente com o tempo sendo a velocidade, dessa forma, aproximadamente constante. Utilizando os pontos de deslocamento em 0,5 e 4,5 segundos do gráfico da Fig. (41) calcula-se a velocidade média da placa da seguinte forma:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(136,73 - 2,20) \text{ mm}}{(4,5 - 0,5) \text{ s}} = 33,63 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (15)$$

Em que:

- $v$ : velocidade da placa [mm/s]
- $\Delta s$ : variação da posição (deslocamento) [mm]
- $\Delta t$ : variação do tempo correspondente a um determinado deslocamento [s]

Além disso, por meio da Eq. (10) é possível determinar a vazão necessária de fluido da seguinte forma:

$$Q = v * A = 33,63 \frac{mm}{s} * 33,3 \text{ cm}^2 * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} = 112 \frac{\text{cm}^3}{s} = 112 \frac{mL}{s}$$

A partir da Fig. (42) é possível observar que a placa leva aproximadamente 0,1 segundo (período entre 0,4 e 0,5 segundo) para sair do repouso atingindo a velocidade média calculada. Posteriormente, a velocidade instantânea oscila em torno da velocidade média calculada devido às instabilidades decorrentes do atrito presente no sistema.

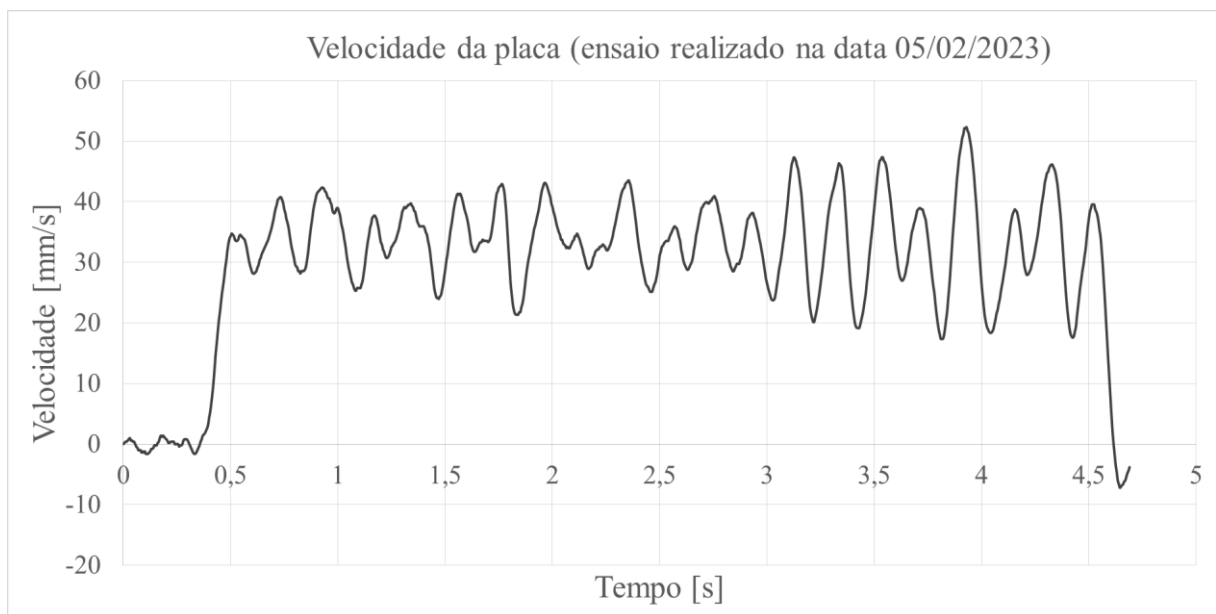


Figura 42. Gráfico representando a velocidade da placa de esmagamento durante o Avanço à vazio.

Apesar dessa variação de velocidade, observa-se por meio da Fig. (41) que o sistema móvel do dispositivo Roof Crush não percebe tais variações, pois o deslocamento é

uma reta entre 0,5 e 4,5 segundos. Dessa forma, tem-se um movimento relativamente suave e com velocidade constante.

Na Fig. (43) tem-se o gráfico de aceleração da placa de esmagamento. É possível observar que o valor de pico é de 600 mm/s<sup>2</sup>. A aceleração, apesar de variar, oscila em torno de um valor de aproximadamente -0,85 mm/s<sup>2</sup>. Com isso, observa-se que a aceleração é praticamente nula e, por conta disso, tem-se a velocidade constante ao longo do ensaio.

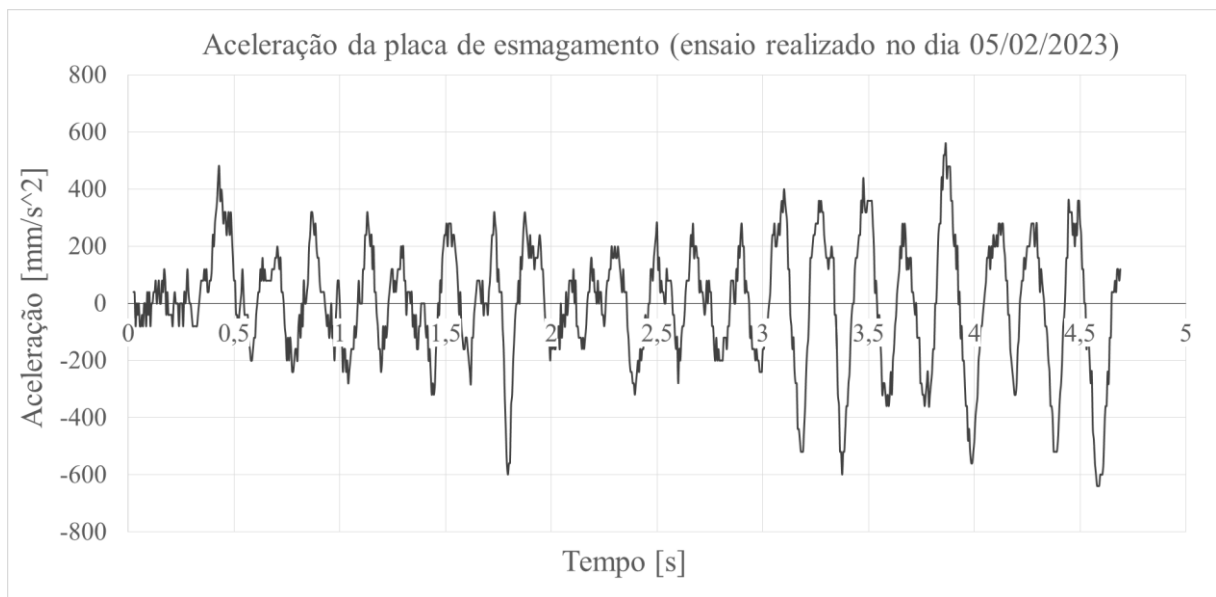


Figura 43. Gráfico representando a aceleração da placa de esmagamento durante o Avanço à vazio.

Utilizando-se a aceleração de pico utilizada para retirar o sistema da inércia é possível calcular justamente a força inercial não considerada na equação (14). Neste caso, considerando as equação de movimento da placa, tem-se:

$$\sum F_y' = -F_a + 2 * F_{cn} + 4 * F_{atg} - P_y' + F_{ra} = m_p * a_p \quad (16)$$

Em que:

- $m_p$ : massa da placa de esmagamento [kg]
- $a_p$ : aceleração da placa de esmagamento [m/s<sup>2</sup>]

Considerando os mesmos passos adotados anteriormente na análise de equilíbrio estático da placa tem-se:

$$-F_a + 4 * F_{atg} = -m_p * a_p$$

$$F_{atg\_total} = F_a - m_p * a_p$$

Considerando-se o instante  $t=0,5$  segundos é possível extrair os dados por meio das planilhas em Excel e calcular a força de atrito total instantânea no sistema, bem como as forças inerciais.

$$F_{atg\_total} = 4893,9 \text{ N} - 810 \text{ kg} * 0,08 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4893,9 \text{ N} - 64,7 \text{ N} = 4829,23 \text{ N}$$

É importante ressaltar que a força inercial poderá ser alterada em função da aceleração à qual a placa está submetida.

A partir da Fig. (44) é possível observar a contribuição de cada parcela nas forças que possuem influência no movimento da placa. Além disso, é possível observar a como a comparação da ordem de grandeza dessas forças em relação à força máxima do atuador, bem como a ordem de grandeza das oscilações da “Força de atrito” com relação à “Força média de atrito”. A máxima diferença entre a “Força de atrito” e a “Força média de atrito” entre 0,5 e 4,5 segundos de teste é de 2464,9 N. Portanto, observa-se que as variações da força de atrito em torno de seu valor médio são muito menores do que a “Força máxima do atuador”. Dessa forma, tais variações na “Força de atrito” não influenciam de forma significativa nos resultados obtidos pelos ensaios de esmagamento.

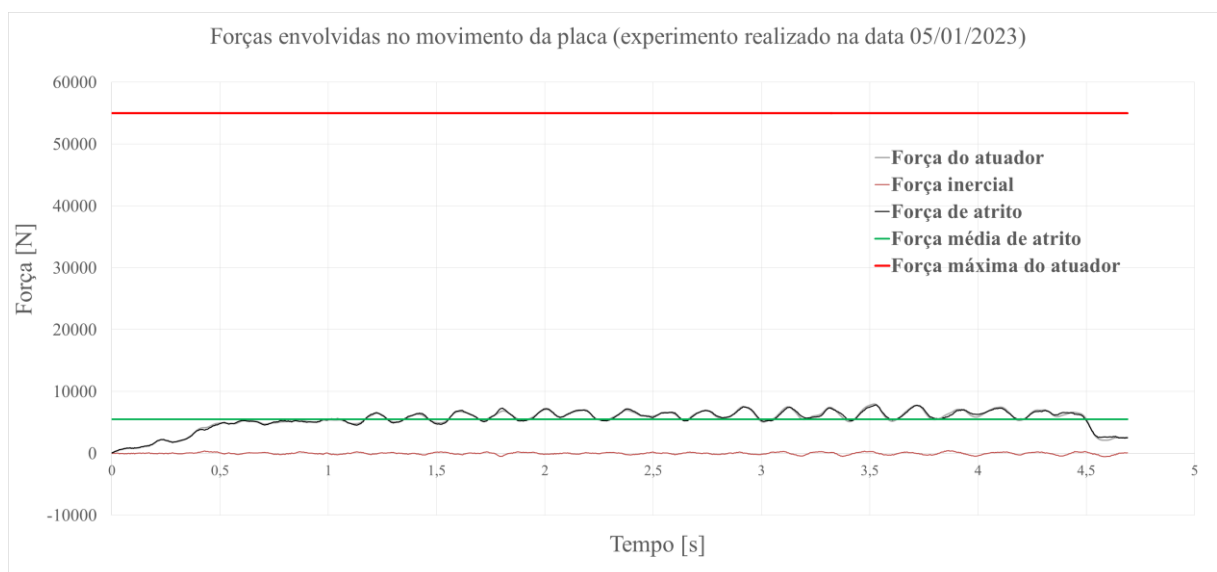


Figura 44. Gráfico representando as forças envolvidas no movimento de Avanço da placa à vazio.

Observa-se que a maior força resistiva ao movimento da placa decorre do atrito do sistema. Considerando que o movimento da placa inicia em aproximadamente 0,4 segundo, observa-se que, nesse instante a força de atrito é de aproximadamente 4 kN e a força inercial é de aproximadamente 194 N.

Além disso, ao contrário do que seria esperado por um modelo de atrito seco de Coulomb, por exemplo, no qual a força de atrito dinâmico é menor do que a força de atrito estático, não é o que ocorre no caso do dispositivo RoofCrush. Verificou-se, portanto, um aumento da força de atrito no sistema mesmo após o início do movimento da placa, de modo que essa força tornou-se aproximadamente constante e próxima da força aplicada pelo atuador hidráulico, que é o que se espera, já que a velocidade da placa é constante. Tomando-se as médias das forças do atuador, inercial e de atrito obtém-se: 5522,84 N, -0,69 N e 5522,15 N; respectivamente. Considerando-se a equação (11) e a área do pistão RC 2510 conforme o catálogo [37], tem-se:

$$P = \frac{F}{10 * A} = \frac{5522,15}{10 * 33,3} = 16,58 \text{ bar}$$

Desse modo, a pressão média para realizar o avanço da placa é de aproximadamente 16,58 bar. Os valores próximos das forças do atuador e de atrito, bem como a força inercial média aproximadamente nula corroboram a hipótese de que a velocidade da placa é, de modo geral, constante.



## Retorno da placa

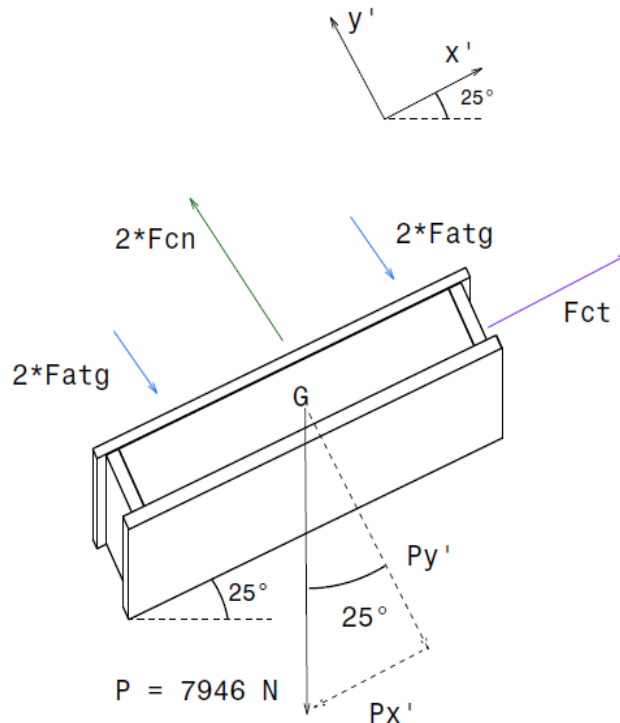


Figura 45. Diagrama de corpo livre da placa de esmagamento representando a condição de Retorno.

Na situação de retorno da placa de esmagamento observa-se uma situação semelhante à de avanço. Entretanto, nesse caso, a força do atuador e a força da amostra são nulas. A força que, de fato, impulsiona o sistema é a força de tração do cabo, que é aumentada em função da carga aplicada pelo atuador RC 1010 do sistema de retorno, conforme as Figs. (45) e (46).

$$\sum F_y' = 2 * F_{cn} - 4 * F_{atg} - P_y' = 0 \quad (17)$$

$$F_{cn} = \frac{4 * F_{atg} + P_y'}{2} = \frac{F_{atg\_total} + P * \cos 25^\circ}{2}$$

Considerando a força de atrito total média determinada por meio do ensaio à vazio da placa de esmagamento, tem-se:

$$F_{cn} = \frac{5522,15 + 7946 * \cos 25^\circ}{2}$$

$$F_{cn} = 6361,84 \text{ N}$$

Considerando uma força inercial com a mesma magnitude da força obtida pelo ensaio de avanço à vazio:

$$F_{cn} = 6361,84 + 194 = 6555,84 \text{ N}$$

$$2 * F_{cn} = 13111,67 \text{ N}$$

Dessa forma- verifica-se que a força requerida para realizar o retorno da placa é maior do que a força necessária para realizar o avanço da placa à vazio.

A seguir tem-se uma análise das forças envolvidas no funcionamento do sistema de retorno do dispositivo.

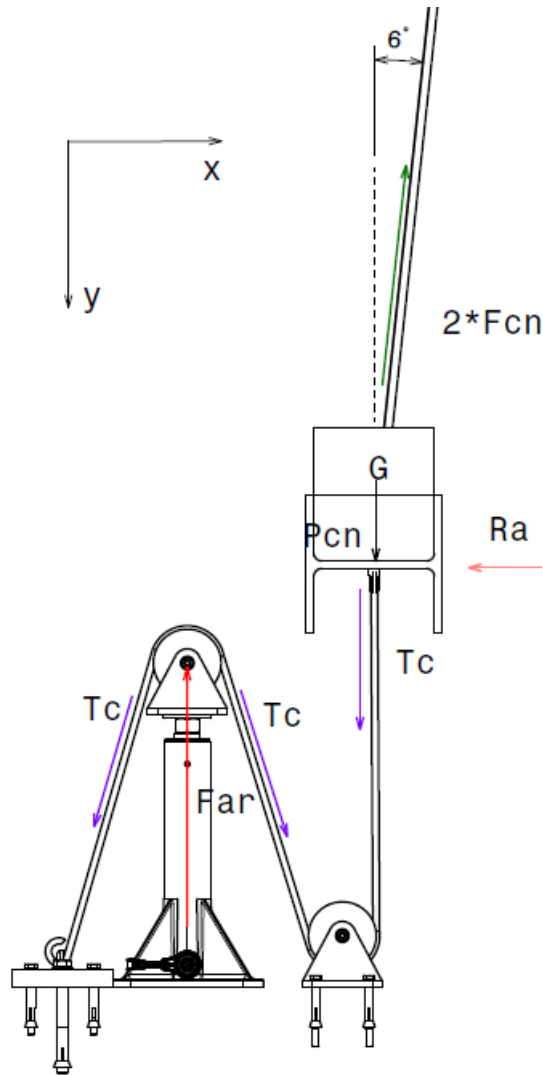


Figura 46. Diagrama de corpo livre do sistema mecânico de retorno.

Em que:

- $T_c$ : Força de tração atuante sobre cabo de aço utilizado no sistema de retorno
- $F_{ar}$ : Força de avanço do atuador RC 1010 utilizado no sistema de retorno.
- $P_{cn}$ : Força peso atuante sobre o conjunto (viga + sacos de pó de ferro compacto)
- $R_a$ : Reação à força de contato entre a viga e os pilares do Pórtico
- $F_{cn}$ : Força atuante no cabo de aço conectado à placa de esmagamento

$$\sum F_y = T_c + P_{cn} - 2 * F_{cn} * \cos 6^\circ = 0 \quad (18)$$

Considerando-se que a força peso atuante sobre o sistema (viga + sacos de pó de ferro) é igual à componente normal do peso da placa de esmagamento ( $P_{cn} = P * \cos 25^\circ$ ), tem-se:

$$T_c = 2 * F_{cn} * \cos 6^\circ - P * \cos 25^\circ = 13111,67 * \cos 6^\circ - 7946 * \cos 25^\circ$$

$$T_c = 5838,32 \text{ N}$$

### 3.7. ENSAIOS PRELIMINARES (ROOF CRUSH)

#### 3.7.1. Primeiro ensaio com aquisição de dados (05/01/2023)

Neste ensaio foi realizada a primeira movimentação da placa de esmagamento utilizando o cilindro de pressão com nitrogênio, ou seja, com avanço da placa automático e velocidade controlada. O ensaio foi realizado para verificar o funcionamento do dispositivo sem carga, o que significa que nenhum corpo de prova foi utilizado no teste. A aquisição de dados foi realizada por meio do programa em LabVIEW com o programa representado na Fig. (33). A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 5 milissegundos. Dessa forma, a cada segundo de ensaio obteve-se 200 amostras de dados, o que se mostrou suficiente para captar as grandezas relevantes para esse ensaio, ou seja, pressão do fluido hidráulico e deslocamento linear da placa de esmagamento. Os resultados obtidos nesse ensaio foram discutidos anteriormente e utilizados para estimar as forças atuantes sobre a placa durante os testes, tanto em Avanço como em Retorno.

#### 3.7.2. Segundo ensaio com aquisição de dados (06/01/2023)

Este foi o primeiro ensaio que conteve uma amostra real. A amostra foi posicionada no centro do comprimento da placa de esmagamento, porém descentralizada em relação à largura da placa, conforme a Fig. (84) no Anexo III. A fixação da amostra se deu por meio de catracas, conforme a Fig. (47). Entretanto, durante o ensaio ocorreram problemas para manter a amostra em sua devida posição. Isso porque o arranjo de catracas utilizado é capaz de promover reações apenas numa única direção e o carregamento externo, por sua vez, ocorre numa direção perpendicular à placa de esmagamento. Dessa forma, o arranjo utilizado foi

insuficiente para suportar a força externa atuante sobre o conjunto (Pilar base + Corpo de prova).



(a)



(b)

Figura 47. Montagem final do sistema de contrapesos para retorno da placa. (Fonte: autoria própria)

Observou-se na primeira tentativa de ensaio um deslocamento de corpo rígido do conjunto supracitado. Ocorreu um movimento rotativo em torno do Eixo longitudinal e um deslocamento, conforme a Fig. (48). Não houve, portanto, deformação plástica da amostra utilizada no teste nesse primeiro ensaio.



Figura 48. Posição do conjunto relativamente à placa após a primeira tentativa de ensaio

Como não houve falha da amostra na primeira tentativa de ensaio, optou-se por adicionar uma nova cinta na parte inferior do pilar e realizar um novo teste. O novo arranjo utilizado está representado na Fig. (49).

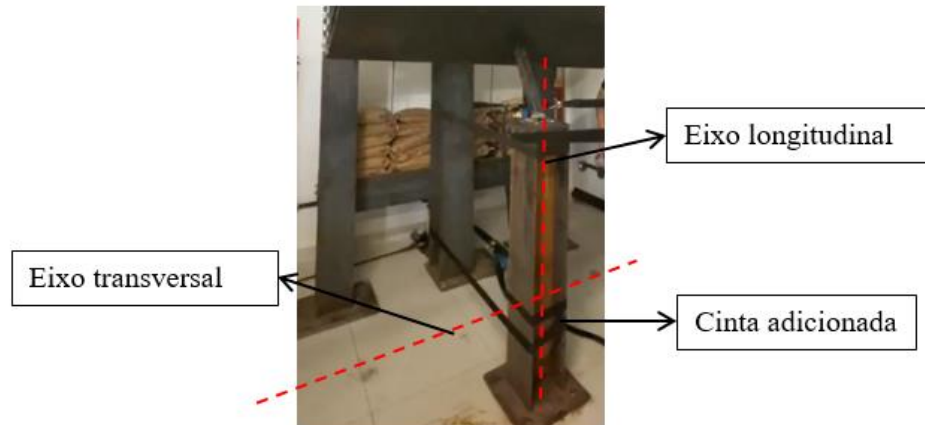


Figura 49. Posição do conjunto relativamente à placa após a segunda tentativa de ensaio

A nova cinta impediu a rotação do conjunto em torno do Eixo longitudinal do Pilar base, porém permitiu uma ligeira rotação em torno do Eixo transversal. Desse forma houve deslizamento relativo entre o corpo de prova e a face inferior da placa de esmagamento, o que, por consequência, fez com que um momento fletor suficientemente elevado para romper a união soldada surgisse e causasse o arrancamento da amostra de sua base, conforme a Fig. (50).

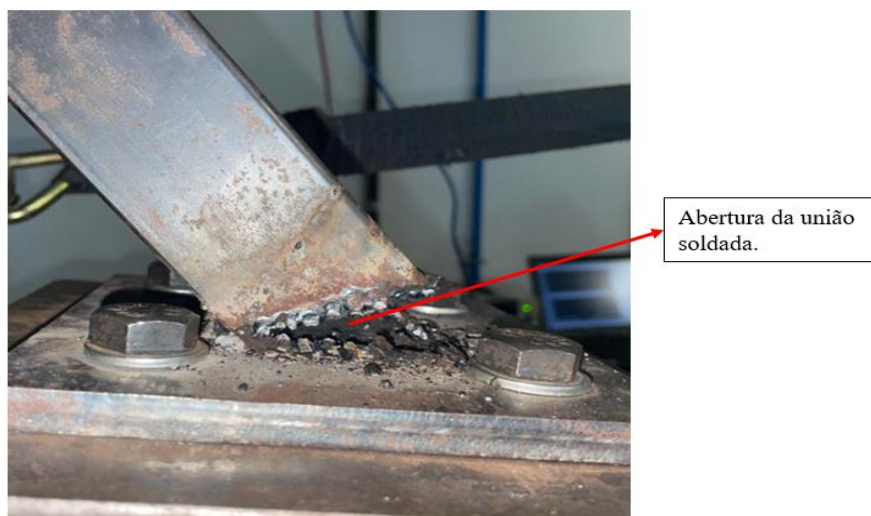


Figura 50. Arrancamento do corpo de prova em relação à sua respectiva base na junta soldada.

### 3.7.3. Terceiro ensaio com aquisição de dados (07/01/2023)

Foi realizada a preparação (setup) do ensaio da segunda amostra construída previamente na Parte 1 deste trabalho (TCC 1). A fixação foi realizada por meio de catracas no topo do pilar base e nos 4 pilares do dispositivo Roof Crush (pórtico principal e pórtico secundário). Além disso, uma catraca adicional foi posicionada na parte inferior do pilar da amostra e um dos pilares do pórtico principal. Também, próximo à catraca inferior, posicionou-se uma barra de aço de 108 cm de comprimento no intuito de impedir o deslocamento da base do pilar, que havia ocorrido no ensaio preliminar do dia 06/01/2023.

Apesar dos novos esforços para garantir a realização adequada do ensaio, novos imprevistos surgiram. Dentre eles, tem-se:

1. Inicialmente observou-se o rompimento de uma pequena região da solda entre o tubo e sua respectiva base, assim como já havia ocorrido no ensaio anterior conforme a Fig. (50). Entretanto, ainda assim deu-se prosseguimento ao ensaio de esmagamento.
2. A pressão máxima fornecida pelo cilindro de nitrogênio foi insuficiente para esmagar a amostra após um determinado deslocamento da placa, conforme poderá ser observado nos resultados. Essa pressão foi de aproximadamente 135 bar e gerou uma força de avanço máxima de 45 kN.

Barra de 108 cm  
adicionada

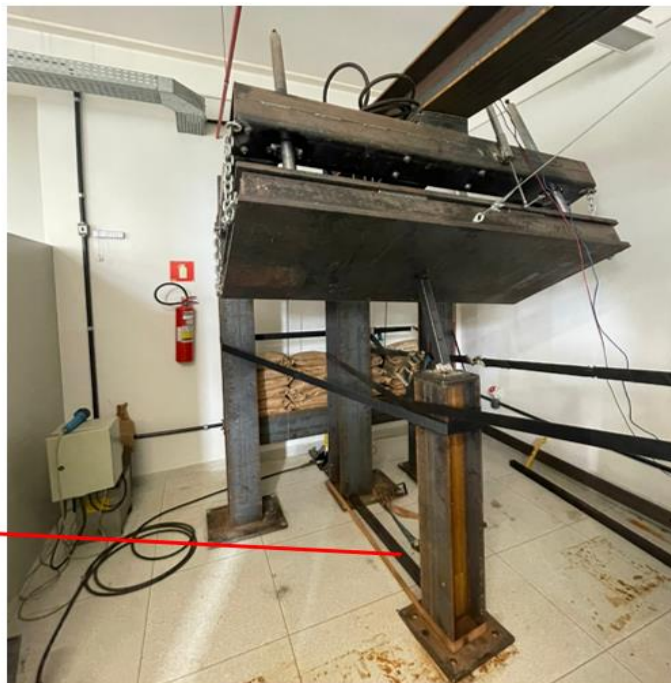


Figura 51. Configuração/arranjo de cintas utilizado para fixar o corpo de prova no Ensaio do dia 07/01/2023.

3. Tendo em vista o item anterior, continuou-se o avanço da placa de forma manual (por meio da bomba mecânica). No entanto, após algum deslocamento da placa ocorreu a falha catastrófica de uma das cintas utilizadas para a fixação da amostra.
4. Adicionou-se uma nova cinta ao conjunto, o que foi suficiente para segurar o conjunto (pilar base + corpo de prova) por mais algum tempo. Dessa forma, foi possível realizar o esmagamento e gerar um lóbulo de flambagem local no topo da amostra. Entretanto, após algum nível adicional de deslocamento da placa, observou-se o rompimento completo da soldagem amostra, o que inviabilizou o prosseguimento do ensaio.

Com o intuito de determinar as forças atuantes em cada catraca utilizada e propor novas soluções para o arranjo de fixação da amostra, desenvolveu-se um diagrama de corpo livre simplificado do arranjo mostrado na Fig. (51).

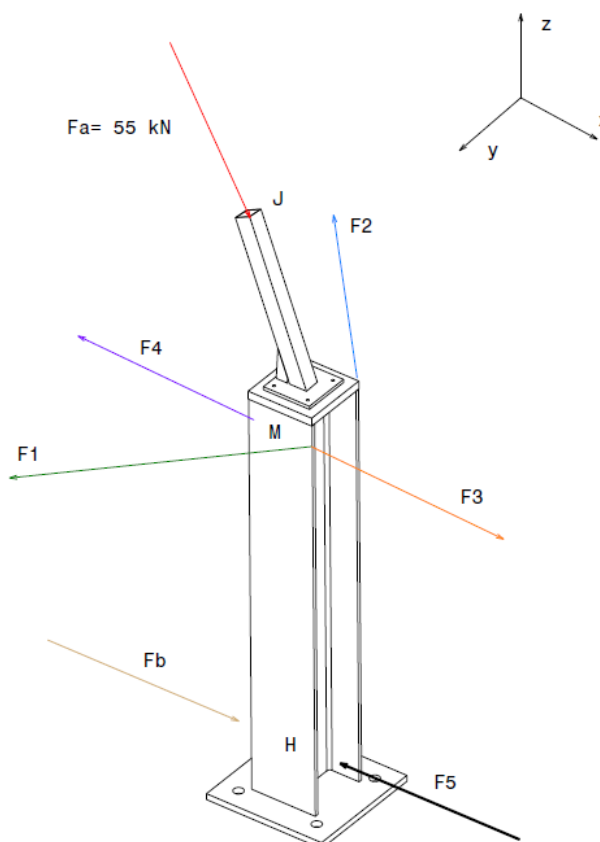


Figura 52. Diagrama de corpo livre simplificado do conjunto (Pilar de suporte + Corpo de prova - vista isométrica).



É possível observar que no terceiro ensaio utilizou-se os pilares laterais para promover reações em diferentes direções e evitar quaisquer tipos de movimento do pilar de apoio do corpo de prova. Para realização dos cálculos analíticos utilizou-se a maior força externa atingida nos ensaios realizados até o momento da escrita deste trabalho, que foi de 55 kN. Além disso, o diagrama leva em conta a hipótese de as forças  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$  agem no mesmo plano (M) para efeitos de simplificação dos cálculos analíticos. Essa hipótese foi tomada porque, na prática, as cintas que promovem as forças de reação  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  e  $F_4$  estão muito próximas umas das outras. Do mesmo modo, considera-se que as forças  $F_b$  e  $F_5$  também agem no mesmo plano (H). A seguir tem-se a descrição das forças atuantes sobre o conjunto (pilar + corpo de prova):

- $F_a$ : Força de avanço instantânea do atuador
- $F_1$ : Força que a cinta conectada ao pilar lateral direito (pórtico secundário) exerce sobre o conjunto
- $F_2$ : Força que a cinta conectada ao pilar lateral esquerdo (pórtico secundário) exerce sobre o conjunto
- $F_3$ : Força que a cinta conectada ao pilar lateral direito (pórtico principal) exerce sobre o conjunto
- $F_4$ : Força que a cinta conectada ao pilar lateral esquerdo (pórtico principal) e à parte superior do pilar base exerce sobre o conjunto
- $F_5$ : Força que a cinta conectada ao pilar lateral esquerdo (pórtico principal) e à parte inferior do pilar base exerce sobre o conjunto
- $F_b$ : Força que a barra de aço exerce sobre o conjunto

Para fins de redução de variáveis do problema de cálculo reações de apoio promovidas pelas cintas, considera-se uma força resultante no plano M (força  $F_M$ ), bem como uma força resultante no plano H (força  $F_H$ ).

Forças horizontais atuantes no plano M:

$$-F_{1x} - F_{2x} - F_4 + F_3 = F_M \quad (19)$$

Forças horizontais atuantes no plano H:

$$F_b - F_5 = F_H \quad (20)$$

Utilizando a Fig. (53) como base, calcula-se o somatório de momentos em torno do ponto M para determinar a força  $F_H$ .

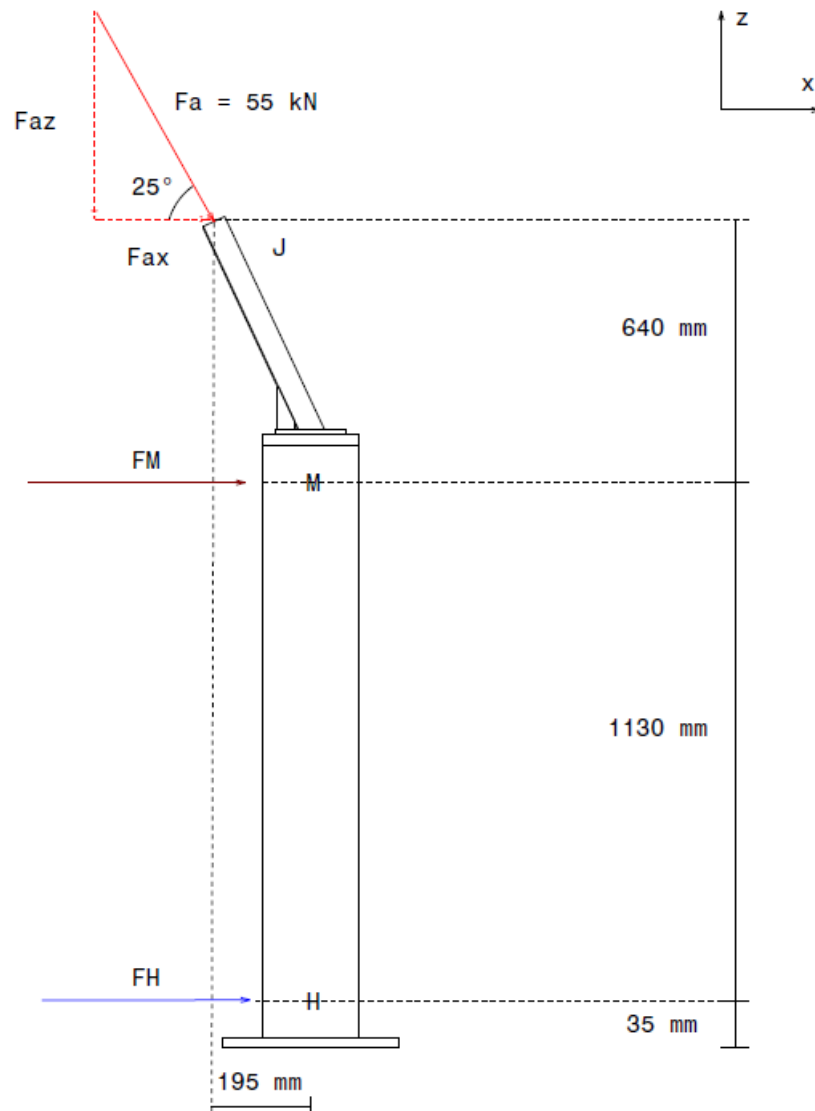


Figura 53. Diagrama de corpo livre simplificado do conjunto (Pilar base + Corpo de prova - vista lateral).

$$\sum M^H = -F_{ax} * 0,64 + F_{az} * 0,195 + F_H * 1,130 = 0 \quad (21)$$

Sabendo que:

$$F_{ax} = F_a * \text{sen } 25^\circ = 55000 * \text{sen } 25^\circ$$

$$F_{az} = F_a * \text{cos } 25^\circ = 55000 * \text{cos } 25^\circ$$

Tem-se

$$F_H = \frac{55000 * \text{sen } 25^\circ * 0,64 - 55000 * \text{cos}25^\circ * 0,195}{1,130}$$

$$F_H = 4562,84 \text{ N ou } 465,12 \text{ kgf}$$

Somatório de forças na direção 'x':

$$\sum F_x = F_{ax} + F_M + F_H = 0 \quad (22)$$

$$F_M = -(F_{ax} + F_H) = -(55000 * \text{sen } 25^\circ + 4562,84)$$

$$F_M = -27806,84 \text{ N ou } -2834,54 \text{ kgf}$$

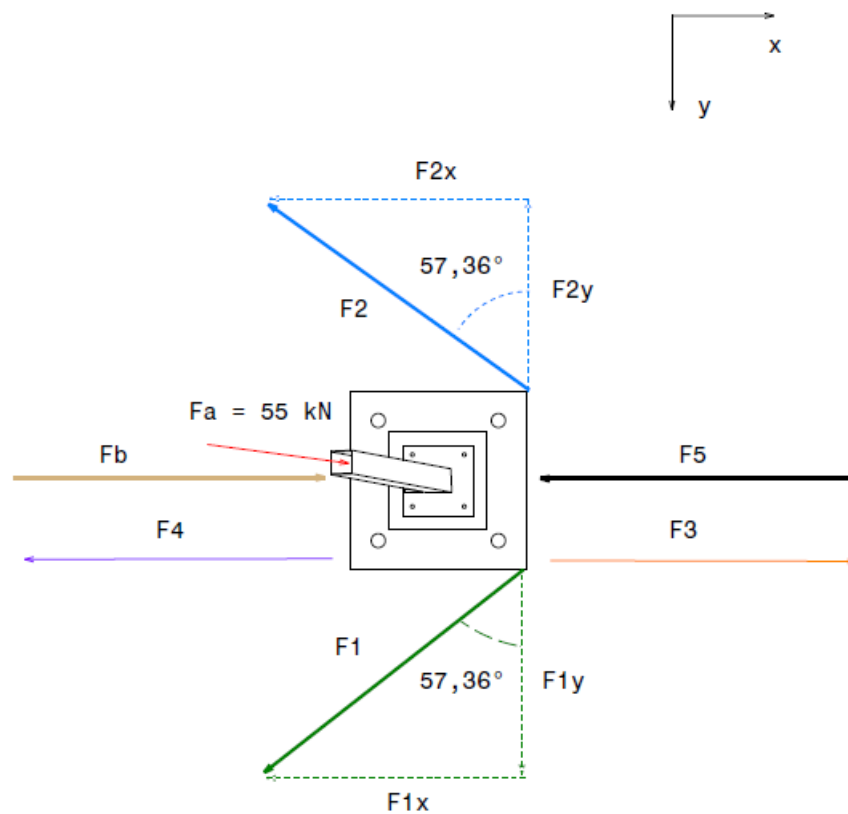


Figura 54. Diagrama de corpo livre simplificado do conjunto (Pilar base + Corpo de prova - vista superior).

Utilizando-se a Fig. (54) calcula-se o somatório de forças na direção 'y' e o somatório de momentos em torno do eixo vertical 'z'.

Somatório de forças na direção 'y':

$$\sum F_y = F_{1y} - F_{2y} = 0 \quad (23)$$

$$F_1 * \cos 57,36^\circ - F_2 * \cos 57,36^\circ = 0$$

$$F_1 = F_2$$

Somatório de momentos em torno do eixo 'z':

$$\sum M^z = -F_4 * 0,1875 + F_3 * 0,1875 - F_{1x} * 0,1875 + F_{2x} * 0,1875 = 0 \quad (24)$$

Como determinado anteriormente,  $F_{1x} = F_{2x}$ . Dessa forma, tem-se:

$$F_4 = F_3$$

Voltando à equação (19) tem-se:

$$-F_{1x} - F_{2x} - F_4 + F_3 = F_M$$

$$F_M = -2 * F_{1x}$$

$$F_{1x} = \frac{-F_M}{2} = \frac{-(-27806,84 \text{ N})}{2} = 13903,42 \text{ N}$$

A partir disso tem-se

$$F_1 = \frac{F_{1x}}{\sin 57,36^\circ} = \frac{13903,42 \text{ N}}{\sin 57,36^\circ} = 16510,88 \text{ N ou } 1683,07 \text{ kgf}$$

As forças  $F_2, F_3, F_4, F_5$  e  $F_b$  permaneceram indeterminadas, pois não é possível determiná-las apenas com as equações da estática (estrutura hiperestática).

**OBS:** desconsiderou-se nas análises acima as forças Normal e Peso atuantes sobre o conjunto (pilar base + corpo de prova):

#### 3.7.4. Quarto ensaio com aquisição de dados (31/01/2023)

Para realizar o quarto ensaio relevante para a calibração do dispositivo foi necessário realizar algumas modificações com relação à configuração prévia do ensaio realizado em 07/01/2023. Dentre as principais alterações tem-se:

- Desmontagem do sistema hidráulico para reparo de vazamentos, Fig. (55). Utilizou-se novamente a pasta 'Scotch-Weld Stainless Steel High Temperature Pipe Sealant PS67' entre as conexões mecânicas para impedir vazamentos.

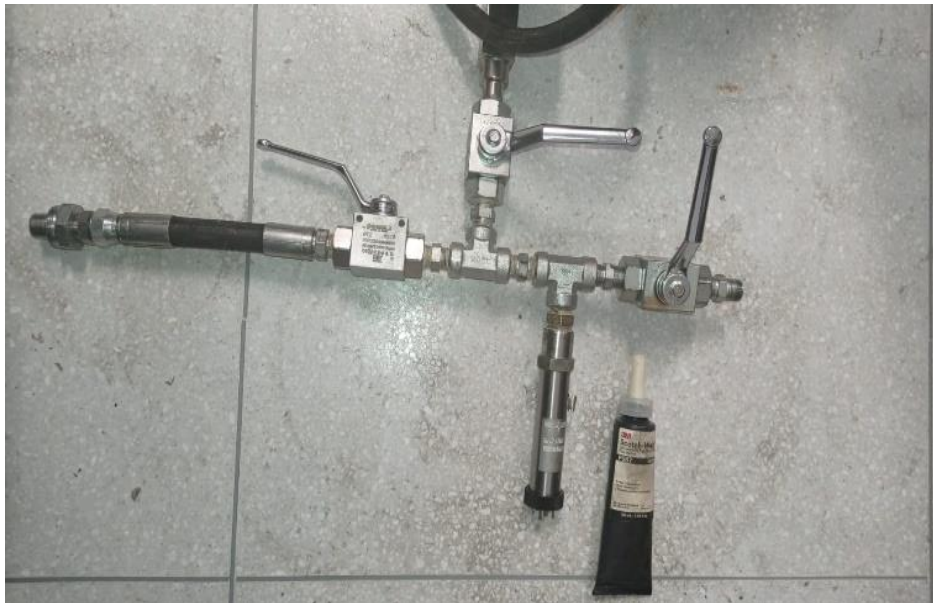


Figura 55. Parte do circuito hidráulico desmontada para realizar reparos de vazamentos do óleo do sistema hidráulico.

- Testes e verificações de pressão no sistema. Aplicou-se uma pressão de 200 bar (após a cura da pasta utilizada) para testar a linha de pressão. Verificou-se que não havia mais vazamentos. Dessa forma, prosseguiu-se para a próxima etapa.
- Verificou-se a necessidade de se realizar a substituição da válvula de restrição de fluxo existente no sistema para que o operador do equipamento pudesse ter

um maior controle sobre a vazão de fluido hidráulico para o atuador durante os ensaios de esmagamento. À esquerda da Fig. (56) tem-se a nova válvula e à direita, a válvula antiga.



Figura 56. Válvulas de restrição de fluxo para realizar o controle de velocidade da placa.

- Devido aos problemas mencionados de arrancamento dos corpos de prova de suas respectivas bases nas regiões de soldagem, realizou-se a confecção de novas amostras utilizando a solda (MAG – 75%Ar-25%CO<sub>2</sub>, metal de adição ER-70S-6), conforme Fig. (57).



Figura 57. Novas amostras confeccionadas utilizando a solda MAG para conexão entre o corpo de prova e a base.

- Substituição do cilindro de hidrogênio devido à necessidade de se promover uma maior força de avanço para completar o ensaio. O novo cilindro foi capaz

de fornecer uma pressão máxima de 165 bar, o que, para o atuador RC 2510, corresponde à uma força de avanço de aproximadamente 55 kN.

Para fixar as novas amostras utilizou-se o mesmo arranjo do ensaio anterior (vide Fig. (51)), porém com uma cinta nova, conforme representado na Fig. (58).



Figura 58. Configuração/arranjo de cintas utilizado para fixar o corpo de prova no Ensaio do dia 31/01/2023.

Após a finalização do arranjo representado na Fig. (58) realizou-se dois ensaios. No primeiro ensaio obteve-se a configuração deformada do corpo de prova mostrada na Fig. (59). Verifica-se a formação de um lóbulo na para inferior do CP e, na parte superior, onde há o contato com a placa, há a deformação de apenas uma parte da seção transversal. Observa-se também um aparente deslizamento relativo na região de contato entre o CP e a placa. Verifica-se também que nesse ensaio não houve ruptura da junta soldada.



Figura 59. Configuração deformada do CP após o primeiro ensaio realizado no dia 31/01/2023.

No segundo ensaio ocorrido no mesmo dia obteve-se uma configuração deformada diferente. Acredita-se que a diferença esteja relacionada à dificuldade de fixar o conjunto (Pilar base + corpo de prova) dificultando, dessa forma, a repetitividade do ensaio. Nesse ensaio, observa-se que a flexão ocorreu com relação à dois eixos diferentes.

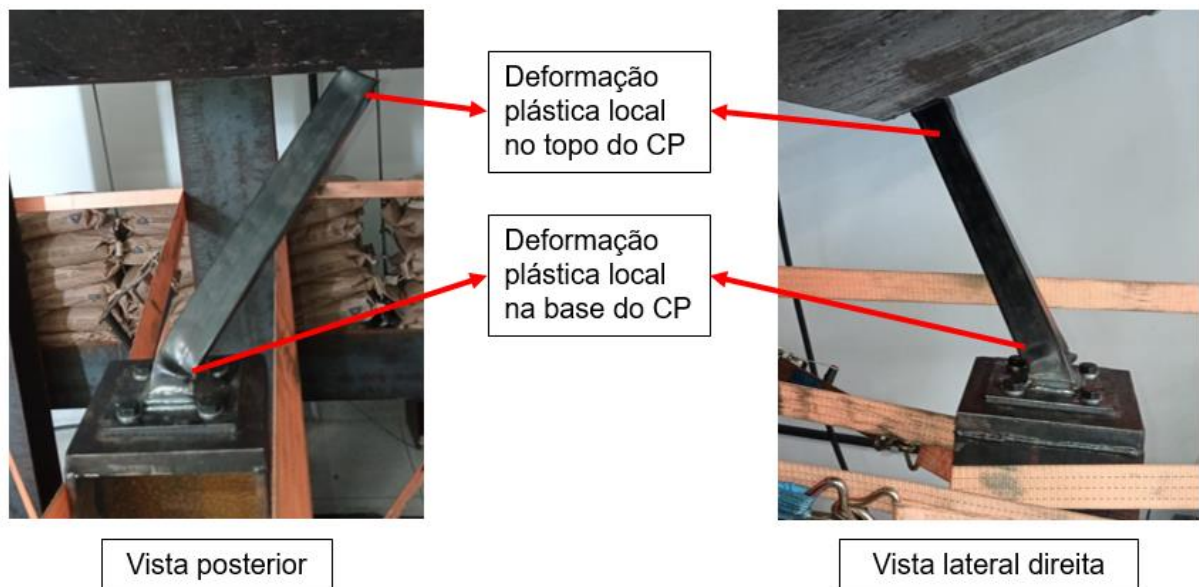


Figura 60. Configuração deformada do CP após o segundo ensaio realizado no dia 31/01/2023.



## 4 RESULTADOS PRELIMINARES

### 4.1. CURVA MÉDIA DE CALIBRAÇÃO

#### 4.1.1. GTP 1000

Considerando as Eqs.(6) e (7) apresentadas na Metodologia, bem como os dados obtidos por meio da Tabela (6), estimou-se os seguintes parâmetros para a curva de calibração do sensor:

$$m_{GTP1000} = 0,0141 \pm 5,1642 * 10^{-5} \frac{V}{bar}$$

$$b_{GTP1000} = 0,0154 \pm 0,0093 V$$

Dessa forma, a equação estimada do sensor é:

$$V_{GTP1000} = m_{GTP1000} * P + b_{GTP1000}$$

$$V_{GTP1000} = 0,0141 * P + 0,0154 \quad (25)$$

Para obter o resultado da medição, basta inverter a equação (11) e adicionar a incerteza de medição, calculada através da equação (9) utilizando o algoritmo em MATLAB presente no Anexo I.

$$ganho_{GTP1000} = \frac{1}{m_{GTP1000}} = \frac{1}{0,0141} = 70,6960 \frac{bar}{V}$$

$$zero_{GTP1000} = \frac{-b_{GTP1000}}{m_{GTP1000}} = \frac{-0,0154}{0,0141} = -1,0864 bar$$

$$P = ganho_{GTP1000} * V_{GTP1000} + zero_{GTP1000} \pm 2 * \sigma_d \quad (26)$$

$$P = 70,6960 * V_{GTP1000} - 1,0864 \pm 2,73 bar$$

#### 4.1.2. LVDT

Considerando as Eqs.(6) e (7) apresentadas na Metodologia, bem como os dados obtidos por meio da Tabela (10), estimou-se os seguintes parâmetros para a curva de calibração do sensor:

$$m_{LVDT} = 0,0167 \pm 2,0498 * 10^{-5} \frac{V}{mm}$$

$$b_{LVDT} = -0,0305 \pm 0,0073 V$$

Dessa forma, a equação estimada do sensor é:

$$V_{LVDT} = m_{LVDT} * d + b_{LVDT}$$

$$V_{LVDT} = 0,0167 * d - 0,0305 \quad (27)$$

Para obter o resultado da medição, basta inverter a equação (27) e adicionar a incerteza de medição, calculada através do utilizando o algoritmo em MATLAB presente no Anexo II.

$$ganho_{LVDT} = \frac{1}{m_{LVDT}} = \frac{1}{0,0167} = 59,9673 \frac{mm}{V}$$

$$zero_{LVDT} = \frac{-b_{LVDT}}{m_{LVDT}} = \frac{-(-0,0305)}{0,0167} = 1,8263 mm$$

$$d = ganho_{LVDT} * V_{LVDT} + zero_{LVDT} \pm 2 * \sigma_d \quad (28)$$

$$d = 59,9673 * V_{LVDT} + 1,8263 \pm 2,19 mm$$

#### 4.2. ENSAIO COM O DISPOSITIVO CRASHBOX

O ensaio preliminar realizado na máquina de absorvedores CrashBox com corpo de prova gerou os resultados das Figs. (61) e (62), respectivamente. O deslocamento foi obtido diretamente pelo sistema de aquisição de dados utilizando o software LabView e a força foi obtida indiretamente pela pressão do fluido hidráulico. Considerando o atuador utilizado (Enerpac RC 2510) utilizou-se a especificação do fabricante para obter a área do pistão, que é de 33,3 cm<sup>2</sup>. A partir disso utilizou-se a Eq.(11) para obter a força necessária para esmagar o corpo de prova.

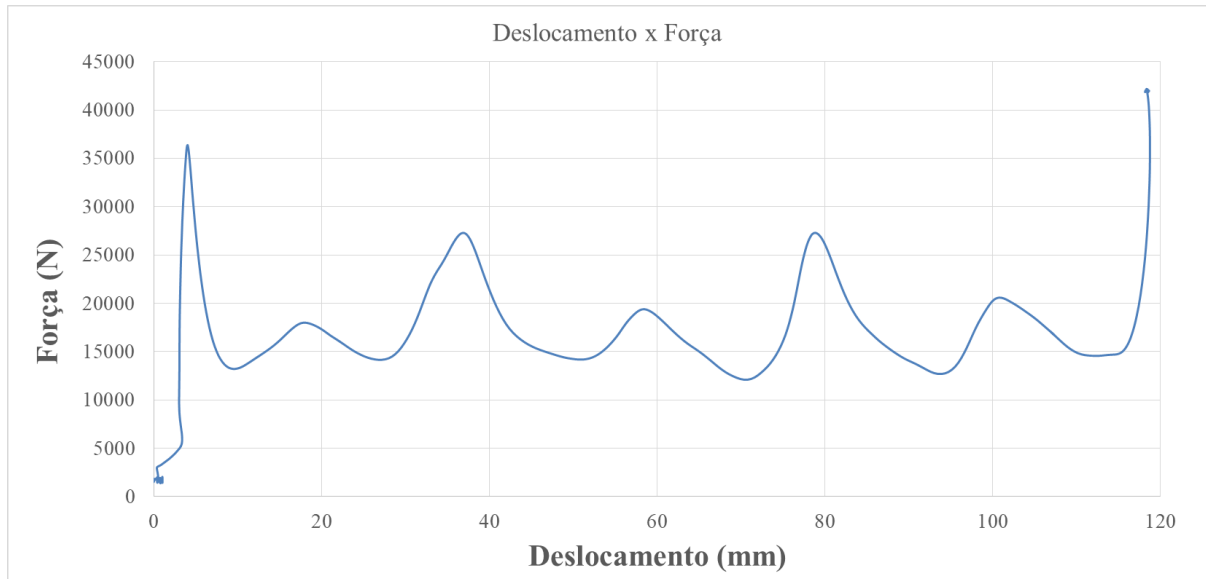


Figura 61. Curva Força x Deslocamento do ensaio preliminar na máquina de CrashBox com corpo de prova de alumínio. (Fonte: autoria própria)

Na Figura (62) tem-se a relação entre o Tempo de duração do ensaio e o Deslocamento da placa de esmagamento da máquina de CrashBox. A partir dessa curva, é possível obter a velocidade da placa de esmagamento. A partir do gráfico, verifica-se que o ensaio ocorreu, de fato, entre 1,74 s e 3,515 s. Os deslocamentos correspondentes foram 3,765 mm e 118,716 mm, respectivamente. Desse modo, como a região supracitada se aproxima de uma reta, a velocidade é aproximadamente constante e pode ser obtida por meio da tangente do ângulo entre a reta e o eixo horizontal como se segue:

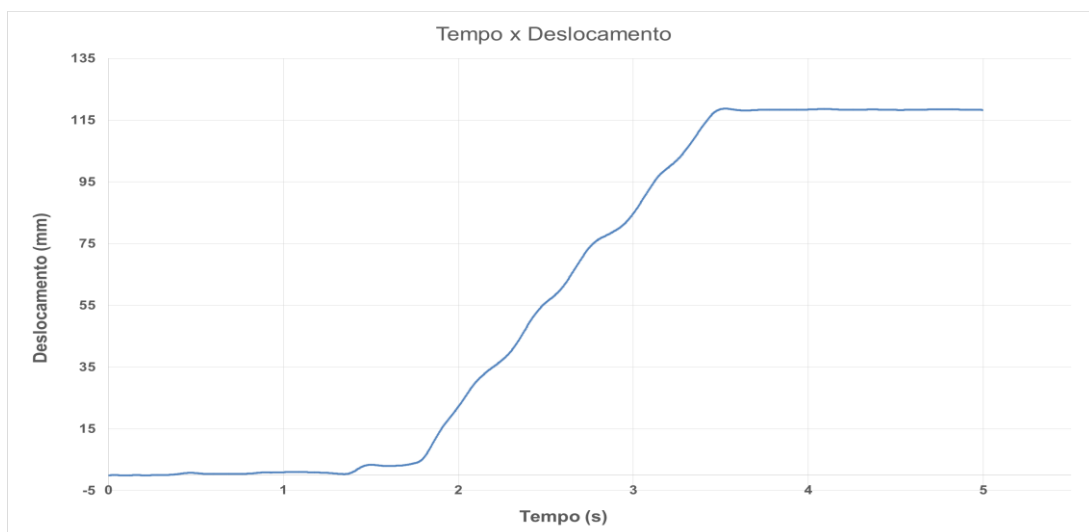


Figura 62. Curva Deslocamento x Tempo do ensaio preliminar na máquina de CrashBox com corpo de prova de alumínio. (Fonte: autoria própria)

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(118,716 - 3,765) \text{ mm}}{(3,515 - 1,74) \text{ s}} = 64,76 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

#### 4.3. ENSAIOS COM O DISPOSITIVO ROOF CRUSH

##### 4.3.1. Primeiro ensaio com amostra (06/01/2023)

O primeiro ensaio resultou na fratura da região de solda entre o corpo de prova e a base de fixação (sapata). Neste ensaio verificou-se a necessidade de promover uma fixação com maior rigidez para amostra. Isso porque ao iniciar o ensaio de esmagamento logo percebeu-se um deslocamento do conjunto (pilar base + corpo de prova). Além disso, devido ao deslocamento do conjunto, gerou-se um braço de alavanca com ralação ao eixo que passa pelo centroide da seção transversal, o que gerou uma tensão normal e, por consequência, a ruptura de um dos lados da junção soldada, conforme a Fig. (50).

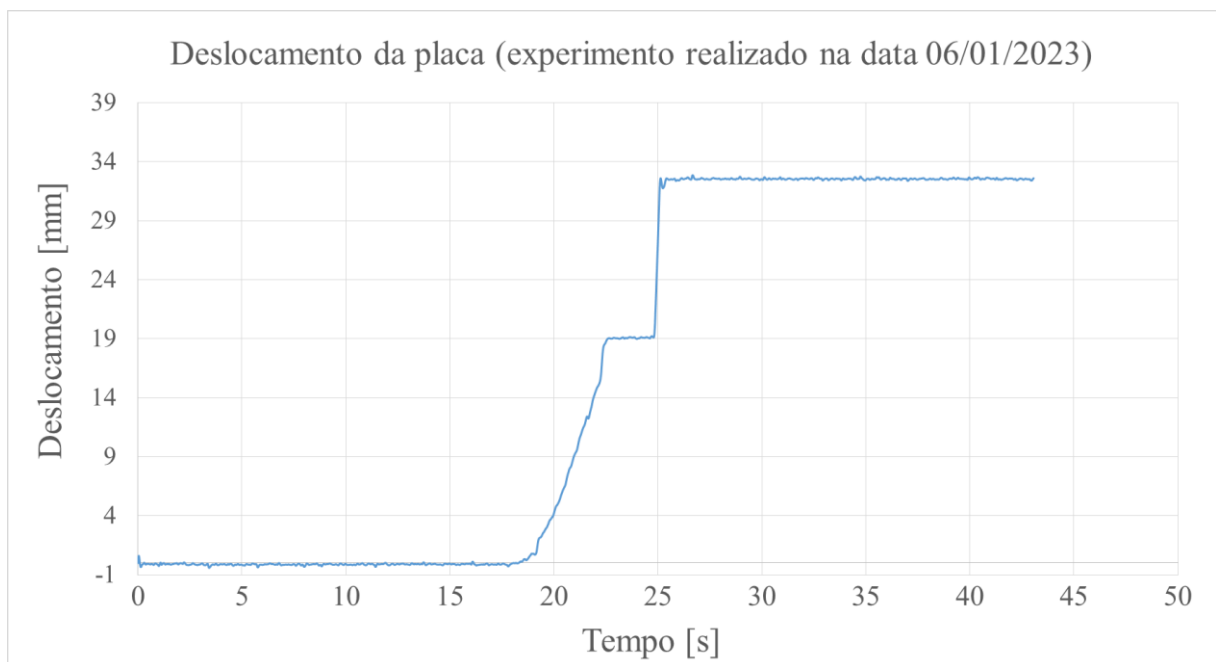


Figura 63. Curva Deslocamento x Tempo do primeiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Na Figura (63) verifica-se um deslocamento de 18 mm entre 19 e 22 segundos com taxa de variação aproximadamente constante. Desse modo obtém-se uma velocidade de aproximadamente 4,86 mm/s, conforme mostrado a seguir.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(18,814 - 0,454) \text{ mm}}{(22,46 - 18,68) \text{ s}} = 4,86 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Em 22 segundos de ensaio o deslocamento permanece constante por aproximadamente 3 segundos e volta a aumentar abruptamente. Tem-se uma velocidade de aproximadamente 26,80 mm/s, porém essa taxa de deslocamento durou apenas meio segundo. Após isso o deslocamento permanece constante e o ensaio é finalizado.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(32,084 - 19,353) \text{ mm}}{(25,28 - 24,805) \text{ s}} = 26,80 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Com relação à Força de reação da Fig. (64), tem-se uma força constante de aproximadamente 3 kN. A força começa a aumentar linearmente próximo dos 17 segundos e, logo após, o deslocamento da placa (também linear) é iniciado. A força de pico atingida no ensaio foi de aproximadamente 25 kN, em aproximadamente 20 segundos de ensaio. Após esse momento ocorreu a ruptura da região soldada e a consequente queda abrupta da força, acompanhada por um aumento abrupto do deslocamento. Após a manutenção da força (e também do deslocamento) em aproximadamente 13 kN entre 22 e 25 segundos, verifica-se outra queda abrupta da força. Essa vai para aproximadamente 6,5 kN e permanece nesse valor até o fim do ensaio. Concomitantemente à queda da força, verificou-se o aumento abrupto do deslocamento, conforme as Figs. (63) e (64).

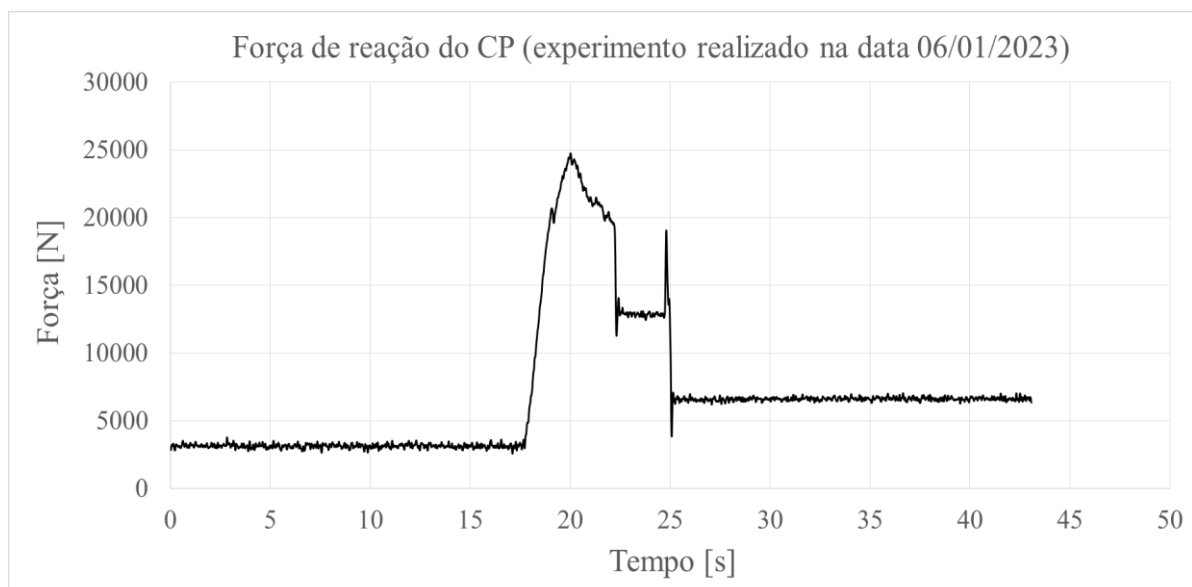


Figura 64. Curva Força x Tempo do primeiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Para finalizar a análise dos resultados do primeiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush, plotou-se na Fig. (65) um gráfico relacionando as grandezas Força e Deslocamento, analisadas previamente de forma separada. Por meio do gráfico da Fig. (65) é possível observar que a força aumenta progressivamente com o deslocamento da placa até certo ponto. Próximo de 5 mm de deslocamento ocorre uma estabilização da força próximo de 20 kN. Entre 15 e 20 mm de deslocamento observa-se uma queda suave da força seguida por um aumento abrupto em 19 mm, porém sem deslocamento adicional. Acredita-se que a queda tenha ocorrido devido a uma falha da amostra em dois estágios, sendo o primeiro aos 22 segundos (com estabilização do deslocamento em 19 mm) e o segundo aos 26 segundos (com estabilização do deslocamento aos 32,5 mm).

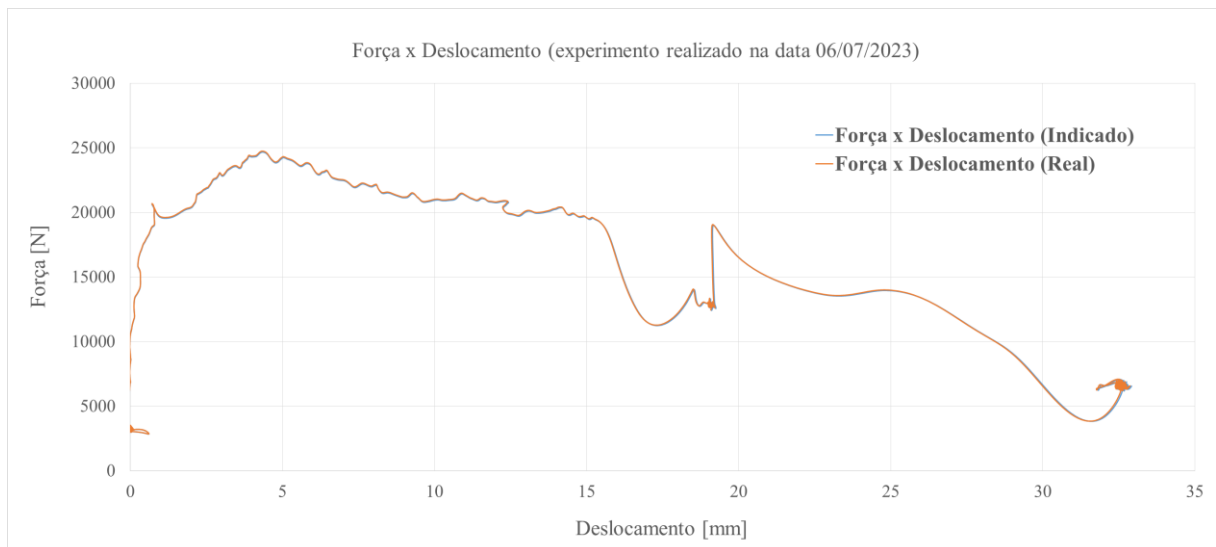


Figura 65. Curva Força x Deslocamento do primeiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

#### 4.3.2. Segundo ensaio com amostra (07/01/23)

Os dados mostrados neste ensaio mostram uma condição inicial na qual o sistema hidráulico já fornecia a máxima pressão disponível, gerando uma força máxima de aproximadamente 45 kN. É possível observar que a pressão é insuficiente para garantir um esmagamento com velocidade constante durante todo o ensaio.

Entretanto, observa-se que numa região do gráfico tem-se um deslocamento variando com uma taxa constante entre 60 e 86 segundos de ensaio. Mais precisamente, obtém-se uma velocidade média constante como se segue:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(15,19 - 4,08) \text{ mm}}{(86,01 - 59,795) \text{ s}} = 0,423 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Em aproximadamente 87 segundos de ensaio verifica-se um aumento abrupto no deslocamento acompanhado de uma queda abrupta na força de reação do CP, conforme as Figs. (66) e (67). Supõe-se que nesse momento tenha ocorrido a falha da região soldada do CP, conforme havia ocorrido também no ensaio anterior a este. Após esse momento finalizou-se o ensaio.

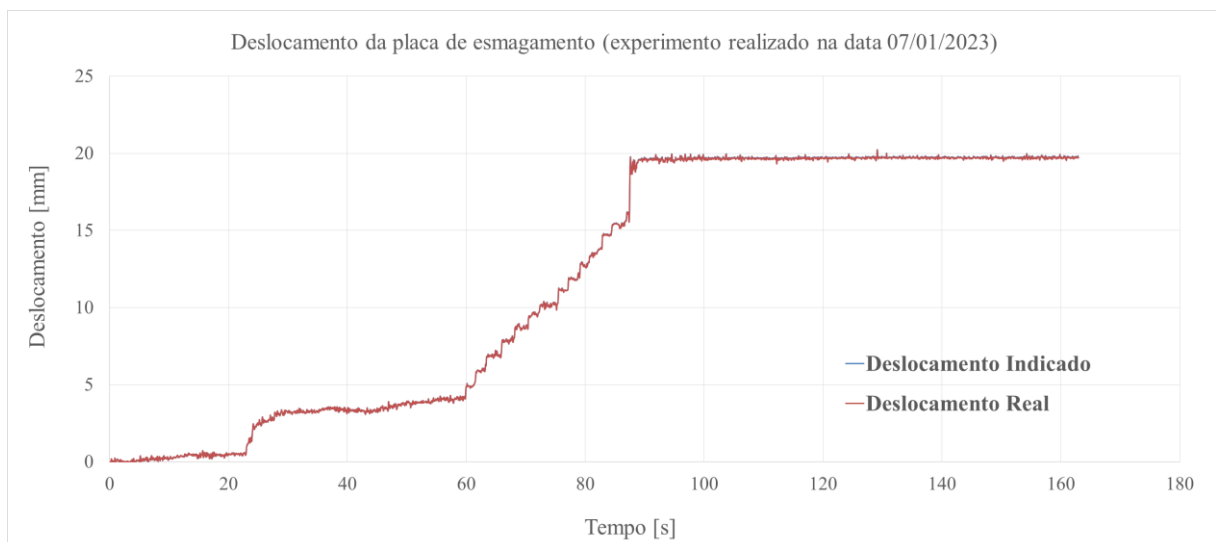


Figura 66. Curva Deslocamento x Tempo do segundo ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

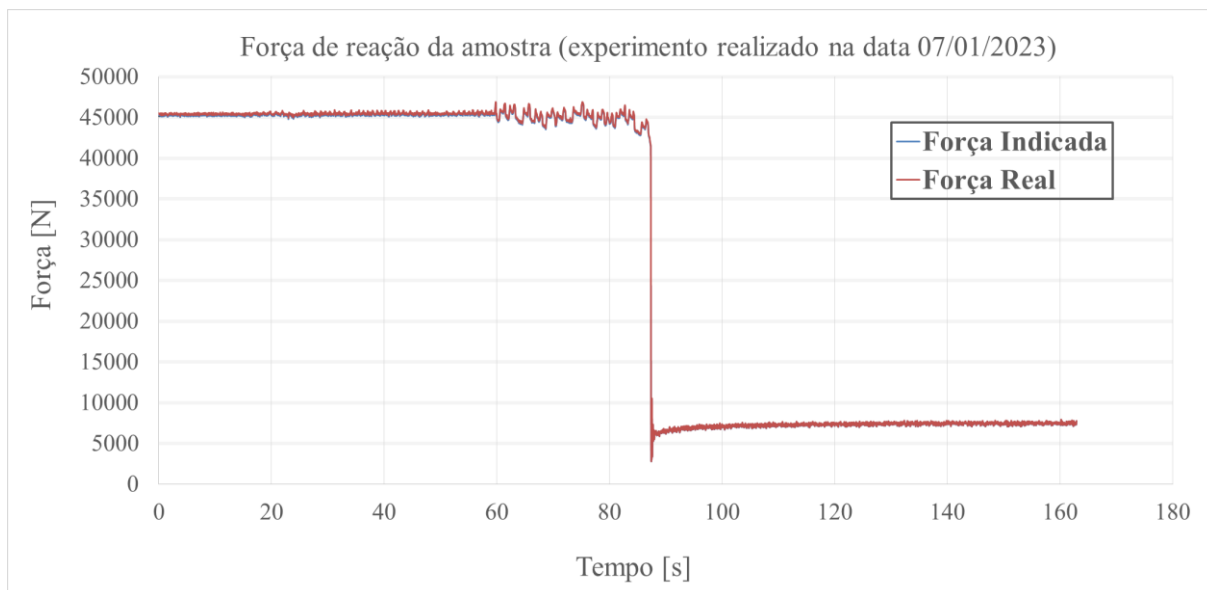


Figura 67. Curva Força x Tempo do segundo ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Por fim verifica-se na Fig. (67) que a força é mantida constante em aproximadamente 45 kN até os 87 segundos de ensaio, momento no qual ocorre a falha do CP. Logo após, a força é mantida constante em aproximadamente 7,5 kN. Desse modo observa-se que mesmo havendo deslocamento (antes da falha do CP) a força de reação manteve-se aproximadamente constante, flutuando sempre em torno da força máxima promovida pelo atuador hidráulico nessa ocasião, que foi de 45 kN.

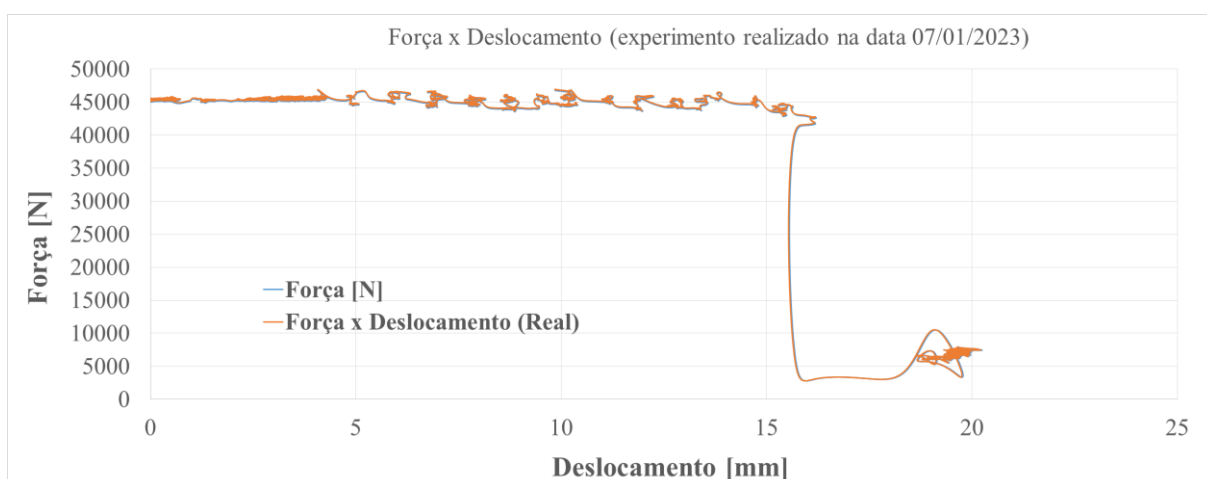


Figura 68. Curva Força x Deslocamento do segundo ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)



### 4.3.3. Terceiro ensaio com amostra (31/01/2023)

Na Figura (69) observa-se que o deslocamento, de modo geral, se aproxima de uma reta. Mais especificamente, observa-se duas regiões com inclinações diferentes, sendo a primeira entre 0 e 24 segundos e a segunda entre 24 e 92,5 segundos.

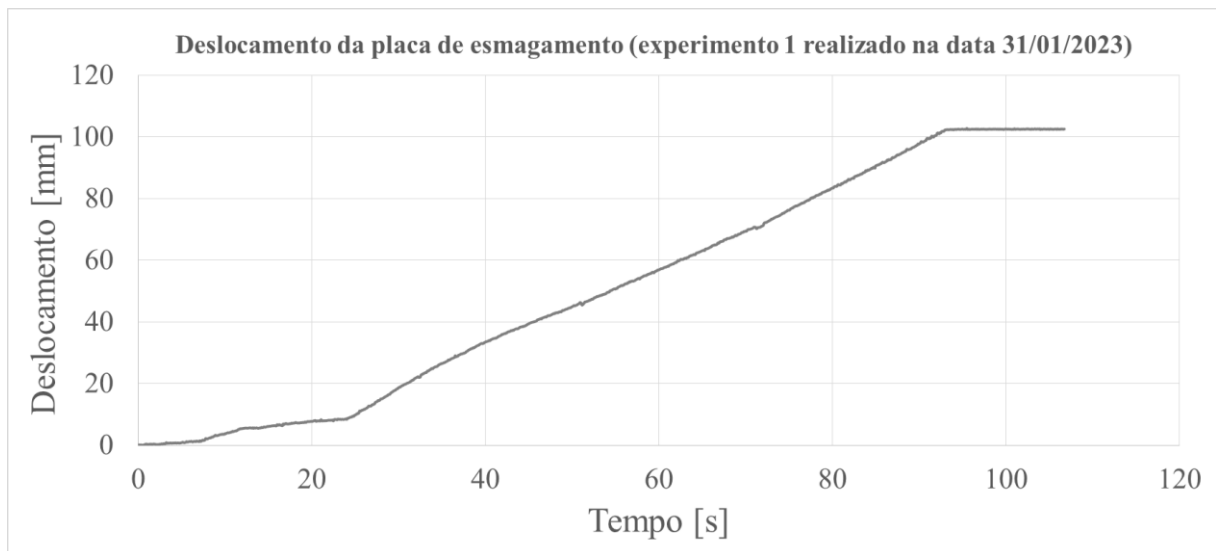


Figura 69. Curva Deslocamento x Tempo do terceiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Desse modo, obtém-se as seguintes velocidades médias para cada uma das regiões do gráfico:

Velocidade entre 0 e 24,05 segundos de teste:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(8,434 - 0) \text{ mm}}{(24,05 - 0) \text{ s}} = 0,35 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Velocidade entre 24,05 e 92,50 segundos de teste:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(101,295 - 8,434) \text{ mm}}{(92,50 - 24,05) \text{ s}} = 1,36 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Com relação à força de reação da amostra, verifica-se na Fig. (70) um aumento não linear até aproximadamente 50 segundos de ensaio, momento no qual se atinge uma

força de pico de 38 kN. Após os primeiros 50 segundos, a força decai lentamente com o prosseguimento do ensaio, embora a velocidade da placa se mantenha constante.



Figura 70. Curva Força x Tempo do terceiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Na Fig. (71) tem-se a relação entre a força de reação do CP e o deslocamento da placa. Verifica-se nos primeiros 15 segundos uma relação aproximadamente linear. A partir daí a força é aumentada com o aumento do deslocamento, porém numa relação não linear. Após 40 mm de deslocamento tem-se a força de pico de 38 kN seguida por um decaimento gradativo da força até o fim do ensaio. Verifica-se um padrão semelhante ao que se ontém num ensaio com teto veicular, conforme a Fig. 8 na Pág. 29.

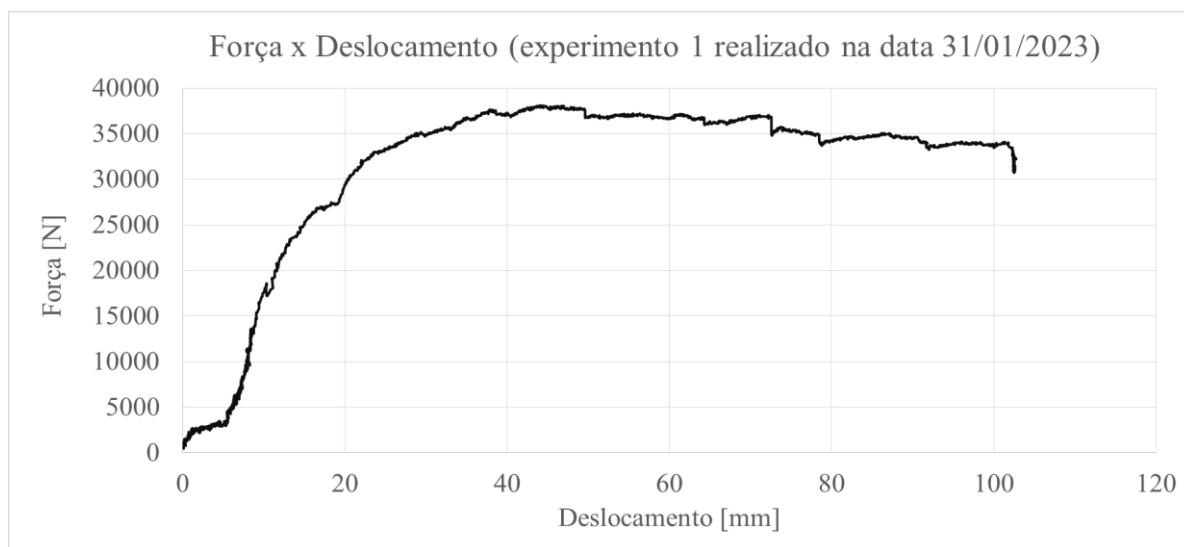


Figura 71. Curva Força x Deslocamento do terceiro ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

#### 4.3.4. Quarto ensaio com amostra (31/01/2023)

Na Figura (72) tem-se o deslocamento da placa durante o Quarto ensaio com o dispositivo RoofCrush, no qual verifica-se regiões aproximadamente lineares, porém com diferentes inclinações. Nos primeiros 15 segundos de ensaio, tem-se uma velocidade de aproximadamente 1,53 mm/s conforme o cálculo a seguir.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(23,267 - 0) \text{ mm}}{(15,16 - 0) \text{ s}} = 1,53 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Entre 102 e 249 segundos de ensaio tem-se uma velocidade constante de aproximadamente 0,085 mm/s, conforme o cálculo a seguir.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(59,221 - 46,802) \text{ mm}}{(248,99 - 102,155) \text{ s}} = 0,085 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

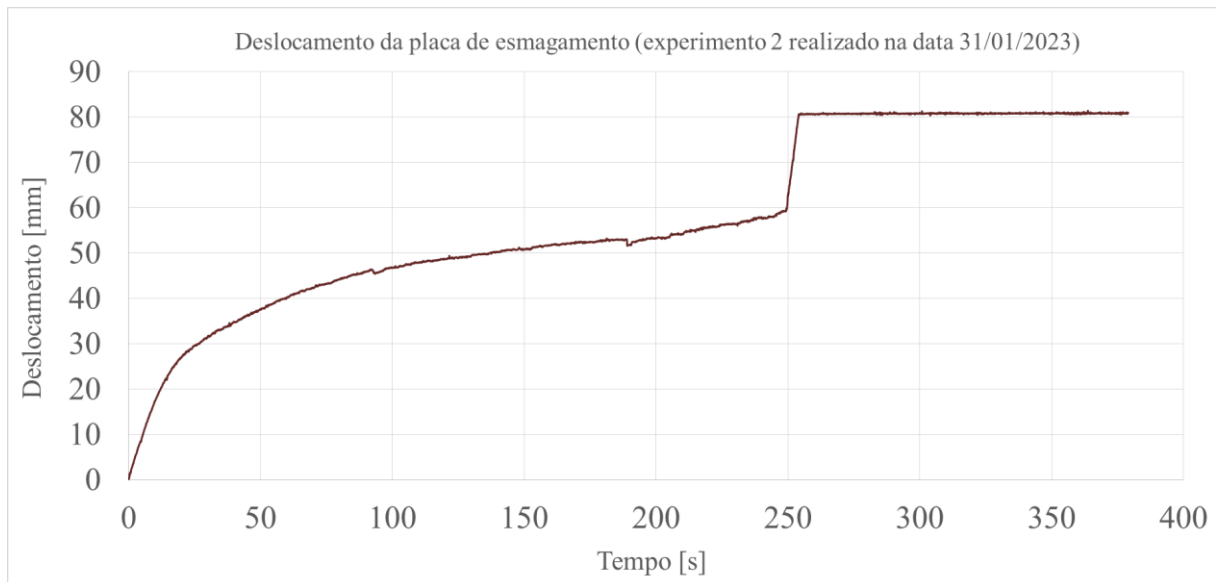


Figura 72. Curva Deslocamento x Tempo do quarto ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Entre 249 e 256 segundos de ensaio tem-se uma velocidade constante de aproximadamente 3,005 mm/s, conforme o cálculo a seguir.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(80,585 - 59,221) \text{ mm}}{(256,01 - 248,9) \text{ s}} = 3,005 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Assim, a velocidade da placa de esmagamento está dentro do limite estabelecido pela norma FVMSS 216a durante todo o ensaio. Ressalta-se a norma que permite uma velocidade máxima de 13 mm/s.

Na Figura (73) verifica-se um aumento acentuado da força até aproximadamente 31 segundos. Após esse momento a força continua aumentando lentamente até 187 segundos, momento no qual a força máxima de 55 kN é atingida. Após esse ponto, ocorre uma queda brusca na força de reação para 37 kN, representando a formação de um lóbulo de flambagem local na base do CP, conforme já mostrado na Fig. (60). A força de 55 kN é logo atingida novamente e permanece até os 250 segundos. Nesse ponto ocorre outra instabilidade no CP, sendo dessa vez por conta de uma flexão em outro sentido (devido aos 5° de inclinação da placa). Assim forma-se, além do lóbulo de flexão semelhante à Fig. (59), um lóbulo de flexão lateral, que pode ser visto na Fig. (60).



Figura 73. Curva Força x Tempo do quarto ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

Por fim, verifica-se nas Figs. (72), (73) e (74) um aumento brusco da força em 340 segundos, porém sem o aumento do deslocamento. Dessa forma, conclui-se que mesmo com o novo cilindro de pressão o sistema ainda não é capaz de gerar a força necessária para esmagar por completo os últimos CPs confeccionados utilizando a solda MAG.

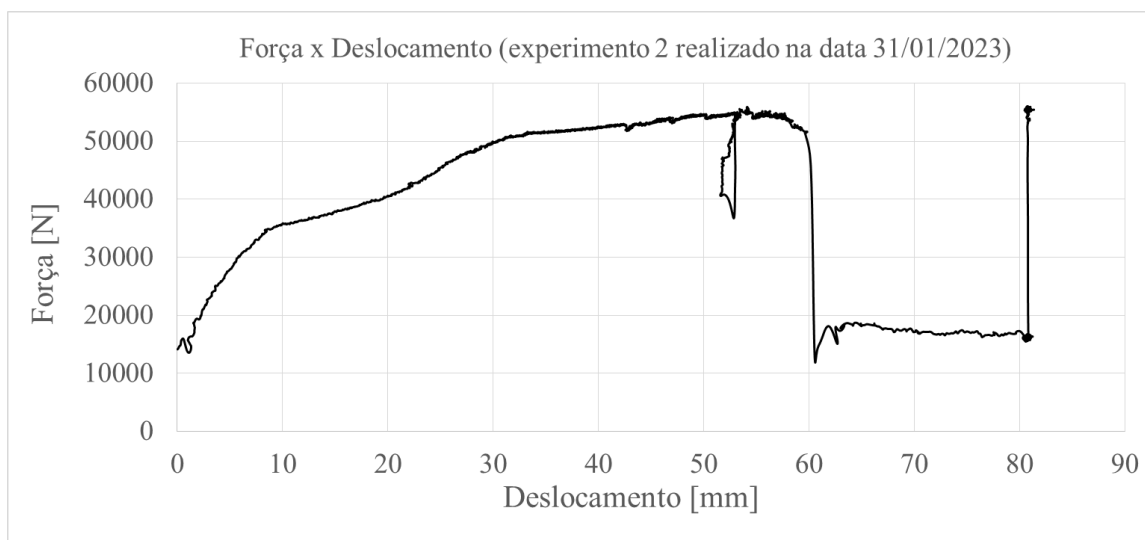


Figura 74. Curva Força x Deslocamento do quarto ensaio com CP utilizando o dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A partir da Revisão Bibliográfica infere-se que o capotamento, apesar de não ser o tipo de acidente veicular mais frequente, é um dos mais fatais.
- Existe uma relação direta entre o aumento do critério de avaliação da resistência ao esmagamento do teto (SWR) e a redução da probabilidade de lesões graves e mortes devido ao capotamento, sobretudo em ocupantes que não sofreram ejeção durante os acidentes utilizados para analisar os dados.
- O Roof Crush Test deve ser entendido como um requisito mínimo de produto para certificação e homologação veicular.
- Não é possível verificar todos aspectos de segurança veicular por meio de um único teste. É necessário um conjunto de testes que se complementem entre si para avaliar a segurança de forma geral do veículo. Nesse sentido, o Roof Crush Test, apesar de ser quase-estático, é o mais apropriado para a avaliação da resistência ao esmagamento do teto veicular, uma vez que este teste garante a repetitividade.
- Os sistemas de medição utilizados são capazes de indicar valores de Deslocamento e Pressão muito próximos aos valores reais do mensurando.
- Este representa uma etapa do projeto Roof Crush que se fez necessária para que o dispositivo pudesse sair de um estado completamente inoperável para um estado operável e capaz de realizar testes físicos de esmagamento. Desse modo, tem-se agora a base para novos trabalhos focados no desempenho das amostras, calibração dos modelos em elementos finitos previamente construídos em trabalhos anteriores do grupo GMSSA.
- O dispositivo atual é capaz de gerar uma força máxima de 55 kN (pressão máxima de aproximadamente 165 bar). De acordo com as simulações realizadas em um outro trabalho de Iniciação Científica do autor [39], a força de pico do ensaio da Cage utilizando o aço SAE 1010 é de aproximadamente 18 kN. Considerando que a força necessária para mover a placa é de aproximadamente 5,2 kN, seria necessário uma força mínima de aproximadamente 23,2 kN para realizar o ensaio de esmagamento com a Cage. Dessa forma, o dispositivo atual é capaz de realizar o ensaio conforme a norma FMVSS 216a.
- Foi possível atingir todos os Objetivos Específicos e, por consequência, o Objetivo Geral deste trabalho. Assim, foi possível superar os diversos imprevistos surgidos e entender o que é, essencialmente, um trabalho experimental.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

- Estimar as forças atuantes sobre cada uma das cintas individualmente por meio do método do elementos finitos, por meio do modelo virtual no software Ansys.
- Ensaio da amostra (Cage em tamanho real) existente no Laboratório.
- De posse da curva experimental Força x Deslocamento, realizar a calibração do modelo em elementos finitos da Cage já existente.
- Implementação de uma bomba elétrica para realizar o avanço do atuador e o retorno de fluido hidráulico para o reservatório. Dessa forma, será eliminada a necessidade de realizar o retorno manual de fluido hidráulico para o acumulador hidráulico.
- Implementação de painel de comando elétrico e automação dos processos de avanço e retorno.
- Implementação de sensores de fim de curso para impedir a sobrecarga do dispositivo (tanto no avanço quanto no retorno).
- Controle da velocidade por meio de sistema de controle em malha fechada, sendo a velocidade da placa a variável a ser controlada e a vazão de fluido a variável de comando.

## 7 CRONOGRAMA DO TCC2

### Cronograma inicial (apresentado no TCC 1)

<b>Cronograma para TCC 2 (inicial)</b>	
<b>Mês 1</b> Novembro/2022	Correções que se mostrarem necessárias com relação à escrita do TCC1. Adição de conteúdos referentes às etapas de concepção da amostra a ser ensaiada (CAGE), bem como análises em elementos finitos previamente realizadas em trabalho de PIBIC. Finalização da montagem do sistema hidráulico e alterações que se mostrarem necessárias para realizar o movimento da placa de esmagamento de forma satisfatória. Finalização da instrumentação do dispositivo Roof Crush. Ensaios Preliminares com as amostras em aço 1010 previamente construídas. Aquisição dos dados e ajuste da velocidade da placa de esmagamento. Escrita das etapas realizadas.
<b>Mês 2</b> Dezembro/2022	Instrumentação da CAGE previamente construída. Aquisição das coordenadas espaciais da estrutura indeformada por meio do equipamento NAJA 3D existente no Lab. GMSSA. Ensaio de esmagamento da CAGE. Aquisição das coordenadas espaciais da estrutura deformada. Análises de elementos finitos com a CAGE, com o objetivo de obter a correlação entre os resultados experimentais obtidos e os resultados numéricos das análises computacionais. Escrita das etapas realizadas.
<b>Mês 3</b> Janeiro/2023	Continuação das análises em elementos finitos para concluir a calibração do modelo em elementos finitos. Correção de possíveis erros que venham a ocorrer nas etapas experimentais. Escrita do relatório.
<b>Mês 4</b> Fevereiro/2023	Continuação das análises em elementos finitos para concluir a calibração do modelo em elementos finitos. Finalização da escrita do relatório. Envio da versão final do Trabalho de Conclusão de Curso para a banca avaliadora. Defesa final do TCC.

### Cronograma final (realizado no TCC2)

<b>Cronograma para TCC 2 (final)</b>	
<b>Mês 1</b> Novembro/2022	Correções que se mostrarem necessárias com relação à escrita do TCC1. Rearranjo do sistema hidráulico para permitir a inserção de uma linha de pressão para o atuador de avanço do Roof Crush. Concepção do sistema de retorno do Roof Crush. Orçamento e aquisição do material necessário para implementação do sistema de retorno da placa de esmagamento. Escrita das etapas realizadas.
<b>Mês 2</b> Dezembro/2022	Fabricação dos componentes do sistema de retorno da placa de esmagamento. Furação do solo. Correções de imprevistos surgidos durante a implementação do sistema de retorno (adição de chapas laterais, substituição de chumbadores mecânicos e substituição de parafuso). Testes iniciais de movimento da placa com sistema de avanço e sistema de retorno (ambos mecânicos).
<b>Mês 3</b> Janeiro/2023	Implementação do sistema de aquisição de dados no Roof Crush. Ensaios iniciais com o dispositivo Roof Crush. Ensaios iniciais utilizando o avanço automático por meio da válvula de restrição de fluxo. Substituição da válvula de restrição de fluxo. Fabricação de novas amostras com solda MAG. Realização de novos ensaios. Aquisição, tratamento de dados, análise dos resultados e escrita do relatório.
<b>Mês 4</b> Fevereiro/2023	Análise de resultados, cálculos analíticos envolvendo o movimento da placa e fixação do conjunto (Pilar base + Corpo de prova) durante o ensaio. Finalização da escrita do relatório. Envio da versão final do Trabalho de Conclusão de Curso para a banca avaliadora. Defesa final do TCC.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ALBERTAZZI, Armano G. Jr.; SOUZA, André R.** Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial.
2. **AVL.** AVL ADAS and Autonomous Driving. Disponível em: <<https://www.avl.com/adas>>.
3. **BARCELOS Jr, J.M.H.** Construção do dispositivo de teste Roof Crush segundo a norma FMVSS 216a. 26º Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Brasília. 04 de novembro de 2020.
4. **BENTLEY, John P.** Principles of Measurement Systems. Quarta Edição. Universidade de Teesside: PEARSON Prentice Hall.
5. **BERTOCCHI, Marcelo.** Segurança Veicular. Skill Elaboração de Materiais Didáticos Ltda, 2005.
6. **BIDEZ, Martha W; COCHRAN, John E; KING Dottie.** Occupant Dynamics in Rollover Crashes: Influence of Roof Deformation and Seat Belt Performance on Probable Spinal Column Injury.
7. **BRAESS, Hans-Hermann; SEIFFERT, Ulrich; WECH.** Handbook of Automotive Engineering. Warrendale, Pa: SAE International, 2005.
8. **Chen, T., Chirwa, E. C., Mao, M. and Latchford, J., 2007.** Rollover far side roof strength test and simulation. International Journal of Crashworthiness, 12:1, 29-39.
9. **CONTRAN.** RESOLUÇÃO N° 394, 13 de dezembro de 2011.
10. **CONTRAN.** RESOLUÇÃO N° 395, 13 de dezembro de 2011.
11. **CONTRAN.** RESOLUÇÃO N° 799, 22 de outubro de 2022.
12. **DOEBELIN, Ernest O.** Measurement Systems Application and Design. Quarta Edição. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Ohio: McGraw-Hill Publishing Company.
13. **IIHS, 2008. Insurance Institute for Highway Safety.** "Research on vehicle roof crush" Arlington, USA.
14. **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. 2003.** *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia.* 3. Rio de Janeiro : INMETRO, 2003. p. 75. ISBN 85-87090-90-9.
15. **INSURANCE INSTITUTE FOR HIGHWAY SAFETY (IIHS).** Crashworthiness Evaluation Roof Strength Test Protocol. Version IV. Maio de 2021.
16. **KULAK, Ronal F.** On Rollover Simulation of a Full-sized Sedan. 13<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference 2014. Dearborn, Michigan USA. June 2014.
17. **Kweon, Y.-J. (2020, November).** Evaluation of FMVSS No. 216a, roof crush resistance, upgraded standard (Report No. DOT HS 813 027). National Highway Traffic Safety Administration.
18. **LABORATÓRIO DE METROLOGIA DINÂMICA (LMD).** Calibração Estática de Medidor Analógico de Pressão. Documento N° PT-01.
19. **MGA RESEARCH CORPORATION.** FMVSS 216A and IIHS Roof Crush Webnar. 7 de janeiro de 2010.

20. **MGA RESEARCH CORPORATION.** Static Roof and Side Crush Strength System. Acesso em <<https://mgaresearch.com/structural/>>.
21. **NHTSA, 2005.** Rollover Crash Mechanisms and Injury Outcomes for Restrained Occupants. Springfield VA, USA.
22. **NHTSA, 2006.** Federal Motor Vehicle Safety Standards. "Roof Crush Resistance". Washington D.C, USA.
23. **NHTSA, 2009.** Federal Motor Vehicle Safety Standards. "LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS No.216a, ROOF CRUSH RESISTANCE". Washington D.C, USA.
24. **NHTSA, 2009.** Federal Motor Vehicle Safety Standards. "Roof Crush Resistance". Washington D.C, USA.
25. **NHTSA.** Fatality Analysis Reporting. Disponível em: <<https://www-fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx>>
26. **NHTSA.** Traffic Safety Facts Roof Strength Testing and Real-World Roof Intrusion in Rollovers. Agosto de 2010.
27. **OLIVEIRA, A.B S; SILVA, R. C, BARCELOS Jr, J.M.H.** Desenvolvimento de dispositivo de teste para esmagamento de teto em escala real e reduzida. AEA – Brazilian Society of Automotive Engineering – SIMEA 2020.
28. **ONSEMI.** Datasheet Voltage Regulator – Adjustable Output, Positive 1.5 A LM317, NCV317.
29. **Organização Mundial da Saúde (OMS/WHO).** PLANO GLOBAL DÉCADA DE AÇÃO PELA SEGURANÇA NO TRÂNSITO (2021-2030).
30. **PNATRANS.** Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito.
31. **Rittner, M. 2012.** An investigation of force characteristics of various vehicle roof shapes in Jordan Rollover Tests using simulation. Thesis. Faculty of the School of Engineering and Applied Sciences of the George Washington University.
32. **SEIFFERT, Ulrich; WECH, Lothar 2007.** Automotive Safety Handbook. Segunda Edição. Warrendale, Pa: SAE International, 2003.
33. **World Health Organization (WHO).** GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2018.
34. **World Health Organization (WHO).** Road traffic injuries. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>>
35. **FIALHO, Arivelto Bustamente.** AUTOMAÇÃO HIDRÁULICA Projeto, Dimensionamento e Análise de Circuitos. Segunda Edição. Editora Érica. São Paulo, 2004.
36. **GERDAU Açominas.** TABELA DE BITOLAS.
37. **Catálogo Enerpac RC 2510.** Acesso em: <<https://www.enerpac.com/pt-br/cilindros/cilindros-de-uso-geral/RC2510>>
38. **Catálogo Enerpac RC 1010.** Acesso em: <https://www.enerpac.com/pt-br/cilindros/cilindros-de-uso-geral/RC1010>
39. **BARCELOS Jr, J.M.H et al.** Similarity-Based Models for Testing Vehicle Roofs against Crushing during Impact Events. ABCM. COBEM 2021, Florianópolis, SC.

## 9 ANEXOS

# Anexo I

Nesse Anexo é mostrada a Rotina de cálculo utilizada para a calibração do transdutor de pressão GTP 1000.

```

%% Código de calibração de transdutor de pressão Gulston
GTP 1000

% Aluno: João Marcos Hilário Barcelos Júnior
% Matrícula: 16/0127289
% Disciplina: Trabalho de Conclusão de Curso 1 (TCC1)
% Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva
% Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oli-
veira

%% Limpar a Workspace e Command Window
clc, clear all, close all;

%% Dados de entrada do código
qi=[0 50 100 150 200 250 300 300 250 200 150 100 50
0];
qo=[0.0080 0.7245 1.4196 2.1276 2.8497 3.5432 4.2606
4.2171 3.5723 2.8747 2.1488 1.4642 0.7030 0.0065];

%% Estimativa dos parâmetros 'm' e 'b'
qoqi=0;
somaqi=0;
somaqo=0;
somaqi2=0;

for i=1:length(qi)
    qoqi= qoqi + qi(i)*qo(i);
    somaqi=somaqi+qi(i);
    somaqo=somaqo+qo(i);
    somaqi2=somaqi2+(qi(i)^2);
end

n=length(qi);

% Inclinação da curva 'm'
m = ((n * qoqi) - somaqi*somaqo) / ((n*somaqi2) -
somaqi^2);

% Interseção no eixo vertical 'b'

```

```

        b = ((somaqo*somaqi2) - (qoqi)*(somaqi)) / ((n*somaqi2) - somaqi^2);

%% Estimativa das variâncias associadas aos parâmetros estimados 'm' e 'b'

    % Estimativa da variância e dev. padrão associado à saída q0:
        soma_sqo = 0;

        for i=1:length(qi)
            soma_sqo = soma_sqo + (m*qi(i) + b - qo(i))^2;
        end

        sqo2 = (1/n)*soma_sqo;
        sqo = sqrt(sqo2);

    % Estimativa da variância e dev. padrão associado à entrada qi:
        sqi2 = sqo2/m^2;
        sqi = sqrt(sqi2);

    % Estimativa da variância e desvio padrão da inclinação 'm'
        sm2 = n*sqo2/(n*somaqi2 - somaqi^2);
        sm = sqrt(sm2);

    % Estimativa da variância e desvio padrão de 'b'
        sb2 = sqo2*somaqi2/(n*somaqi2 - somaqi^2);
        sb = sqrt(sb2);

%% Curva de calibração do sensor

Pin = [0 50 100 150 200 250 300];
Vout = m*Pin + b;

%plot(Pin,Vout)

%% Melhor estimativa do valor real da entrada 'qi'

clc
prompt = "Leitura do sensor GTP 1000 (V): ";
qo_indicado = input(prompt);
ganho = 1/m;
zero = -b/m;
%qi_real = (qo_indicado - b)/m;

```

```

V = qo_indicado;

P = ganho*V + zero;

% Indicação final
fprintf('Melhor estimativa da pressão real: %.2f
\x00B1 %.2f bar\n',P,2*sqi);

```

## Anexo II

Nesse Anexo é mostrada a Rotina de cálculo utilizada para a calibração do transdutor de deslocamento linear LVDT

```

%% Código de calibração de sensor LVDT

% Aluno: João Marcos Hilário Barcelos Júnior
% Matrícula: 16/0127289
% Disciplina: Trabalho de Conclusão de Curso 1 (TCC1)
% Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Silva
% Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro Borges de Sousa Oliveira

%% Limpar a Workspace e Command Window
clc, clear all, close all;

%% Dados de entrada do código
qi=[0 60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 600 540
480 420 360 300 240 180 120 60 0];
qo=[0 0.97 1.97 2.97 3.97 4.95 5.95 6.95 7.98 9 10 10
8.99 7.97 6.95 5.95 ...
4.95 3.96 2.97 1.97 0.97 0];

%% Estimativa dos parâmetros 'm' e 'b'
qoqi=0;
somaqi=0;
somaqo=0;
somaqi2=0;

for i=1:length(qi)
    qoqi= qoqi + qi(i)*qo(i);
    somaqi=somaqi+qi(i);
    somaqo=somaqo+qo(i);

```

```

        somaqi2=somaqi2+(qi(i)^2);
end

n=length(qi);

% Inclinação da curva 'm'
    m = ((n * qoqi) - somaqi*somaqo) / ((n*somaqi2) -
somaqi^2);

% Interseção no eixo vertical 'b'
    b = ((somaqo*somaqi2) - (qoqi)*(somaqi)) / ((n*so-
maqi2) - somaqi^2);

%% Estimativa das variâncias associadas aos parâmetros es-
timados 'm' e 'b'

    % Estimativa da variância e dev. padrão associado à
saída q0:
        soma_sqo = 0;

        for i=1:length(qi)
            soma_sqo = soma_sqo + (m*qi(i) + b -
qo(i))^2;
        end

        sqo2 = (1/n)*soma_sqo;
        sqo = sqrt(sqo2);

    % Estimativa da variância e dev. padrão associado à
entrada qi:
        sqi2 = sqo2/m^2;
        sqi = sqrt(sqi2);

    % Estimativa da variância e desvio padrão da inclina-
ção 'm'
        sm2 = n*sqo2/(n*somaqi2 - somaqi^2);
        sm = sqrt(sm2);

    % Estimativa da variância e desvio padrão de 'b'
        sb2 = sqo2*somaqi2/(n*somaqi2 - somaqi^2);
        sb = sqrt(sb2);

%% Melhor estimativa do valor real da entrada 'qi'

clc
prompt = "Tensão do sensor LVDT (V): ";
qo_indicado = input(prompt);
ganho = 1/m;

```

```

zero = -b/m;
%qi_real = (qo_indicado - b)/m;
V = qo_indicado;
d = ganho*V + zero;

% Indicação final
fprintf('Melhor estimativa do deslocamento real:
%.2f \x00B1 %.2f mm\n',d,2*sqi);

```

## Anexo III

Nesse Anexo são mostradas algumas pranchas utilizadas para confecção das peças de finalização do projeto mecânico do dispositivo, bem como para confecção das amostras em tubos de paredes finas com seção quadrada 50 x 50 mm<sup>2</sup>.

### Sistema mecânico de contrapesos tangencial:

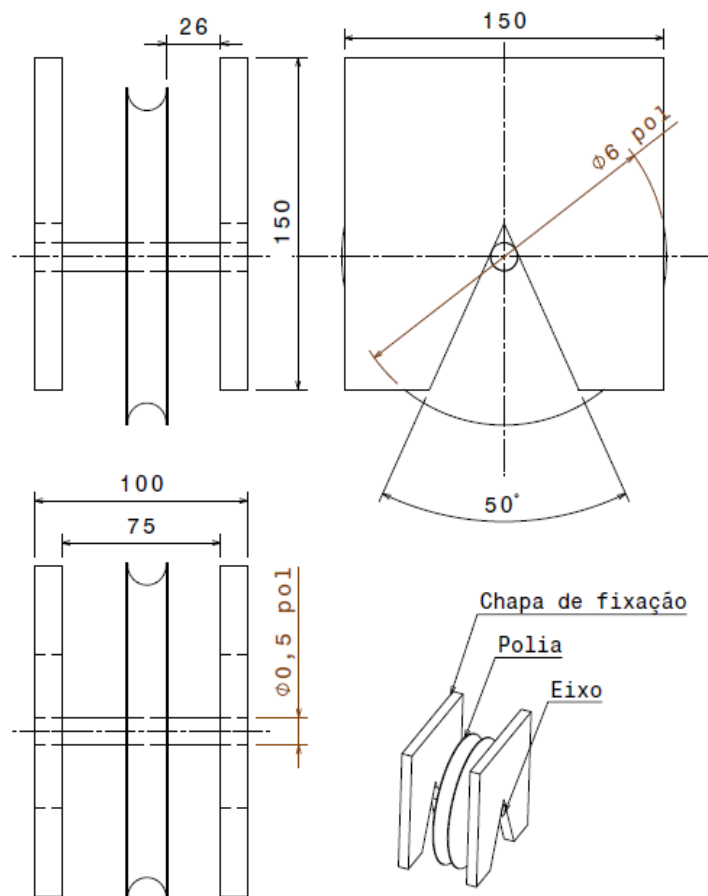


Figura 75. Suporte do sistema de contrapesos tangencial. (Fonte: autoria própria)

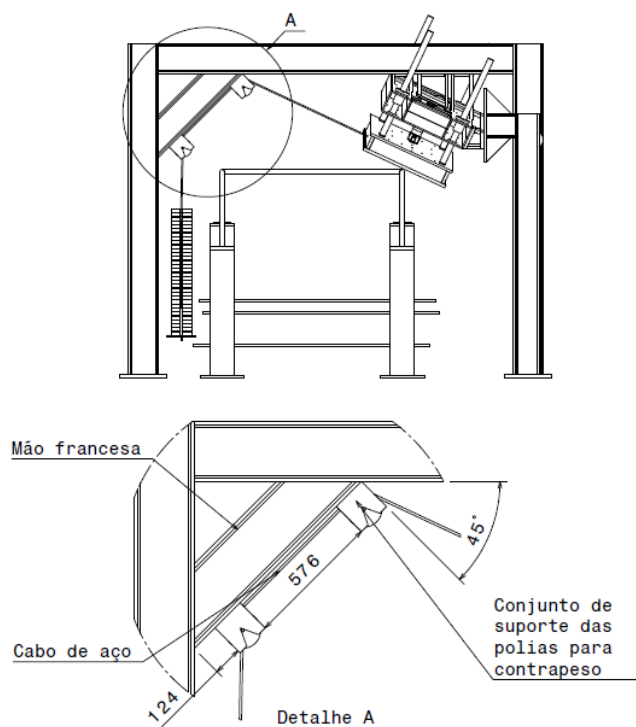


Figura 76. Vista posterior do dispositivo RoofCrush (+ Cage) com foco no sistema de contrapesos tangencial. (Fonte: autoria própria)

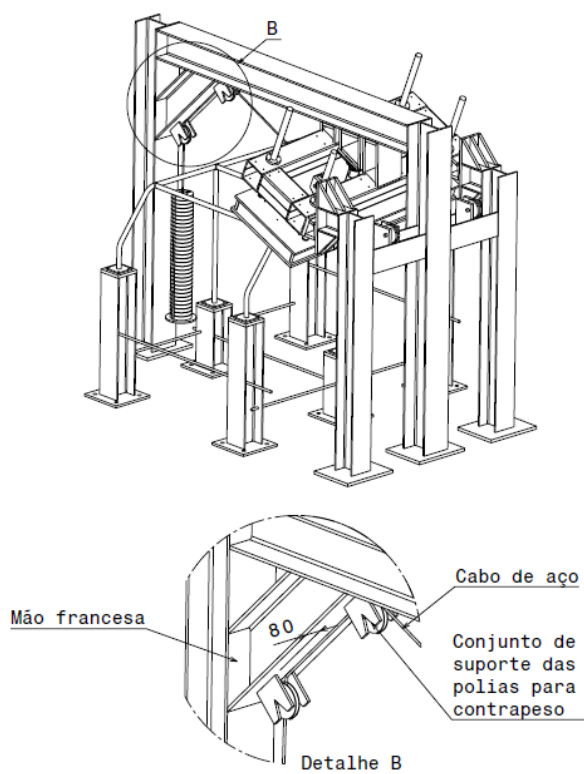


Figura 77. Vista isométrica do dispositivo RoofCrush (+ Cage) com foco no sistema de contrapesos tangencial. (Fonte: autoria própria)



### Confeção dos corpos de prova:

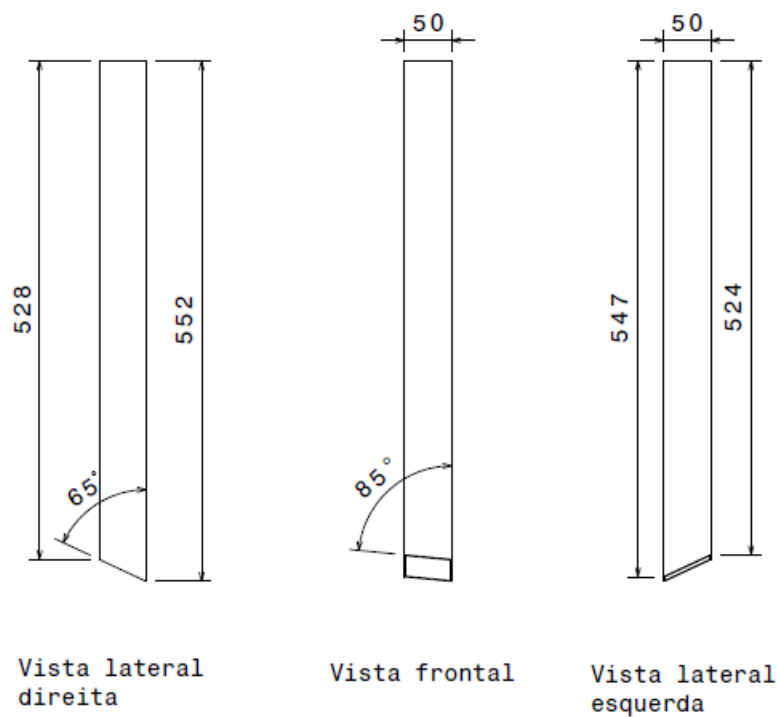


Figura 78. Desenho técnico para fabricação do CP. (Fonte: autoria própria)

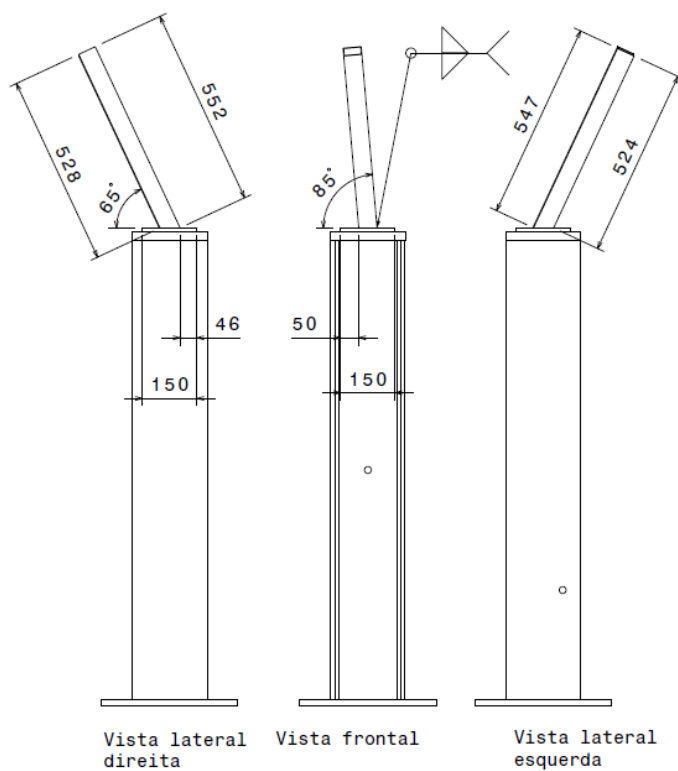
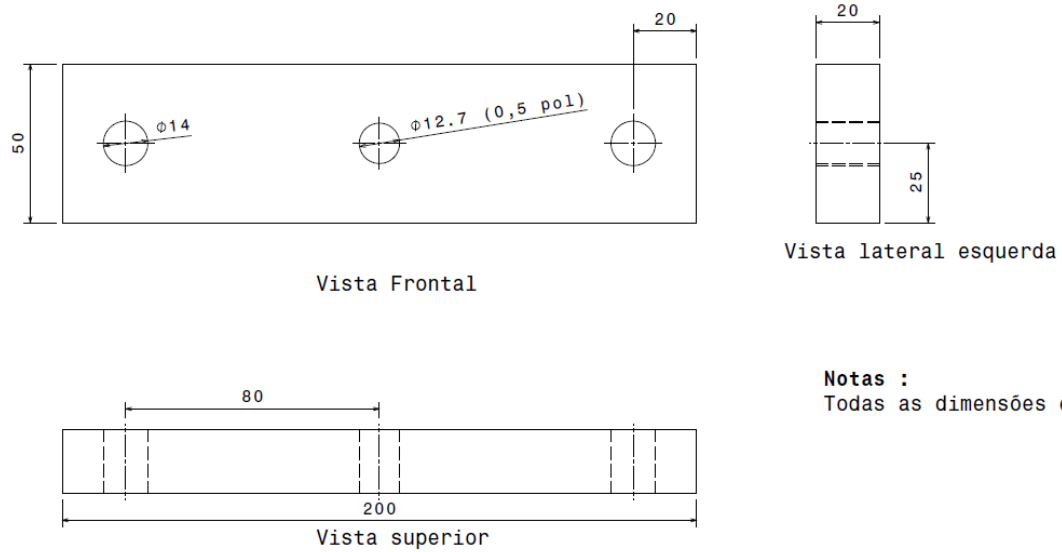


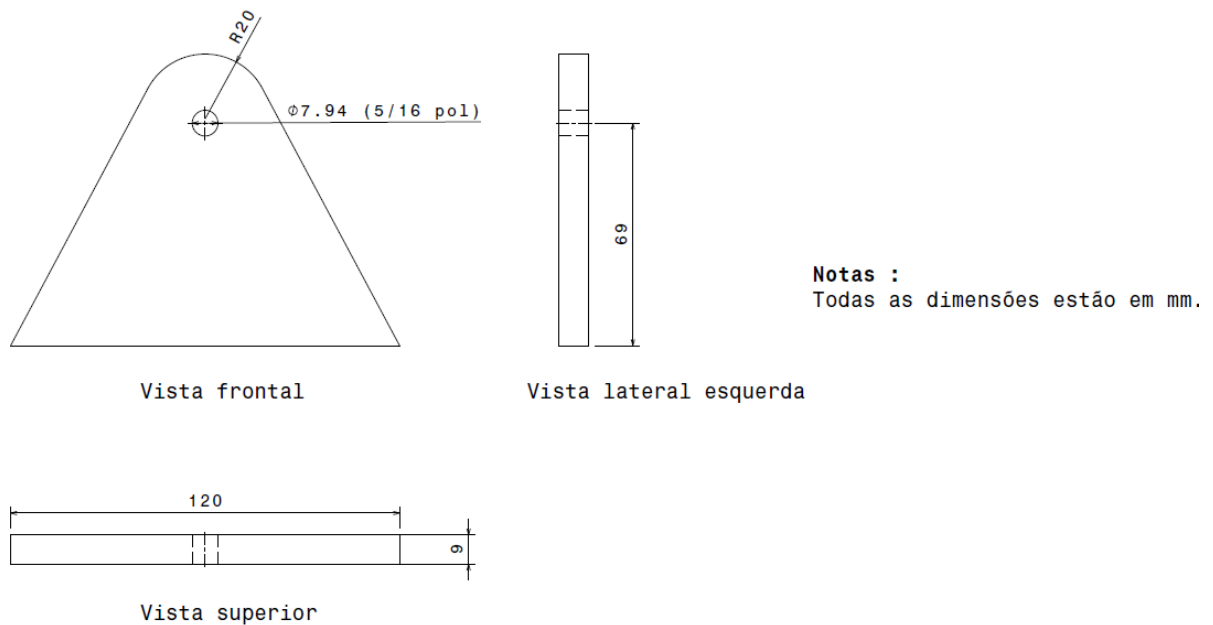
Figura 79. Desenho técnico para fabricação do CP e montagem no Pilar base. (Fonte: autoria própria)

### Confecção dos sistema mecânico de retorno:



**Notas :**  
Todas as dimensões estão em mm.

Figura 80. Desenho técnico para fabricação do Chapa olhal do sistema mecânico de retorno. (Fonte: autoria própria)



**Notas :**  
Todas as dimensões estão em mm.

Figura 81. Desenho técnico para fabricação do Chapa lateral de suporte da polia. (Fonte: autoria própria)

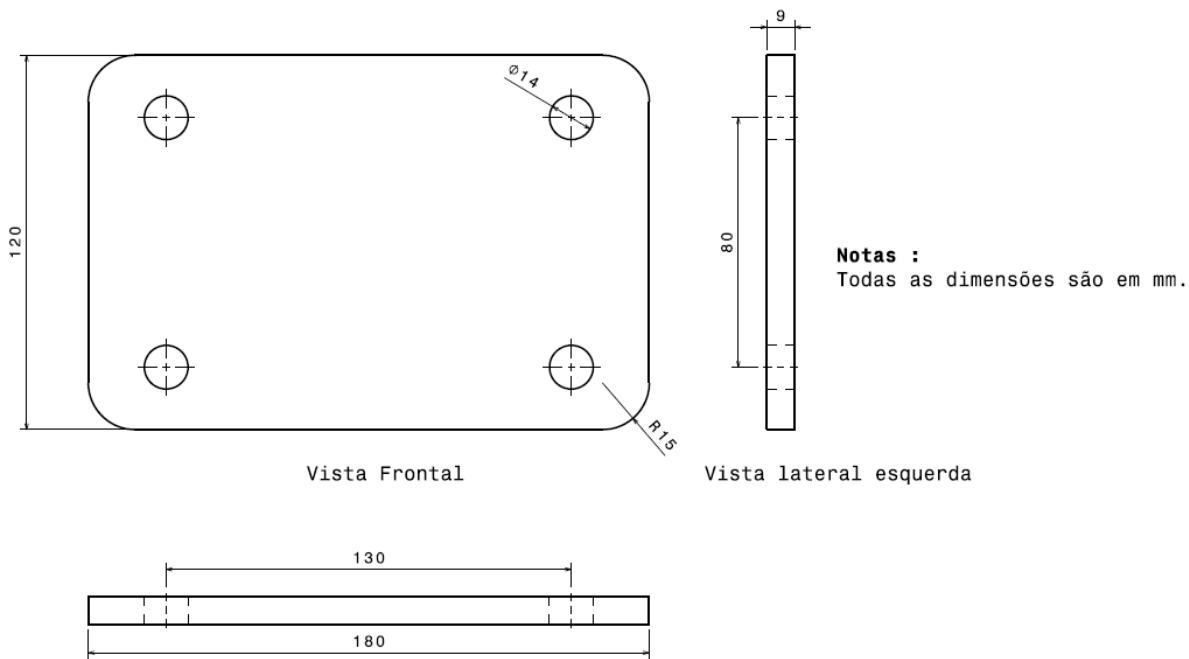


Figura 82. Desenho técnico para fabricação do Chapa do suporte da polia (peça fixada ao solo). (Fonte: autoria própria)

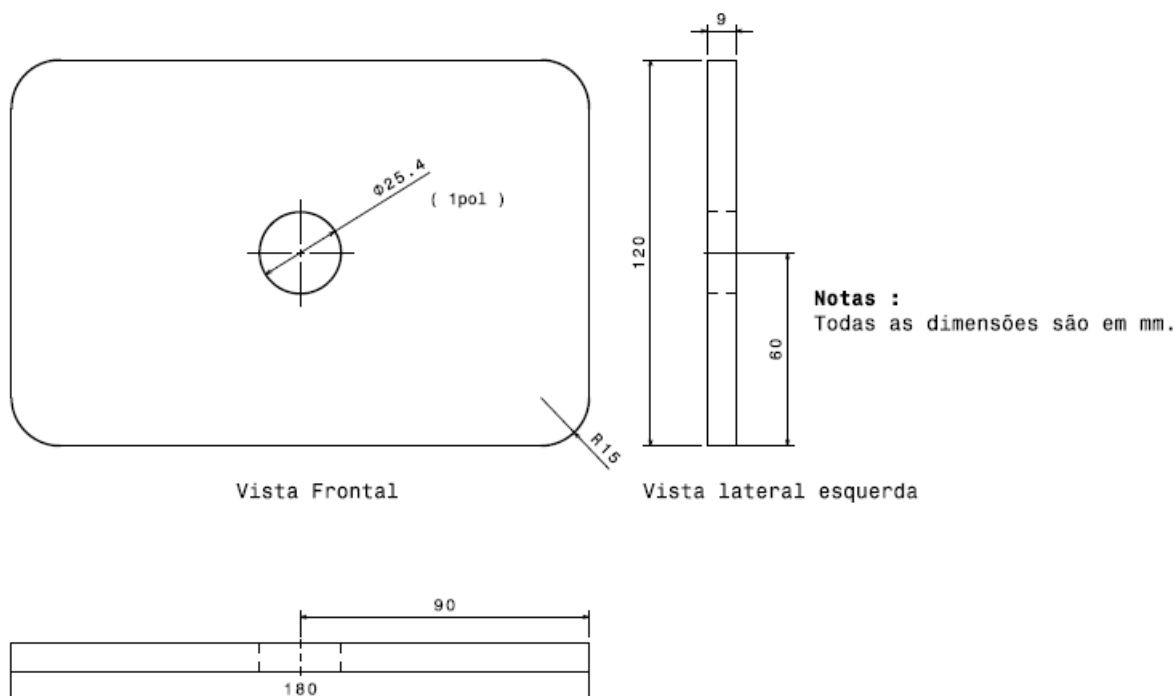


Figura 83. Desenho técnico para fabricação do Chapa do suporte da polia (peça fixada no atuador RC 1010). (Fonte: autoria própria)

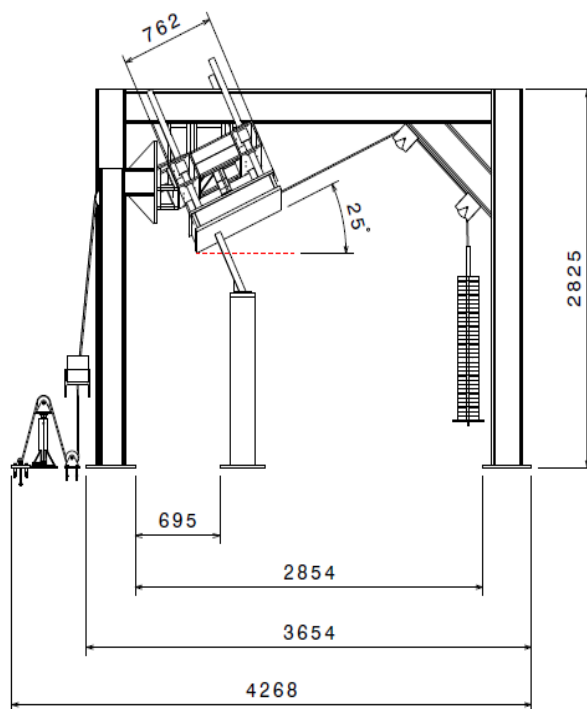
**Versão final do dispositivo Roof Crush:**

Figura 84. Vista frontal da versão final do dispositivo Roof Crush.  
(Fonte: autoria própria)

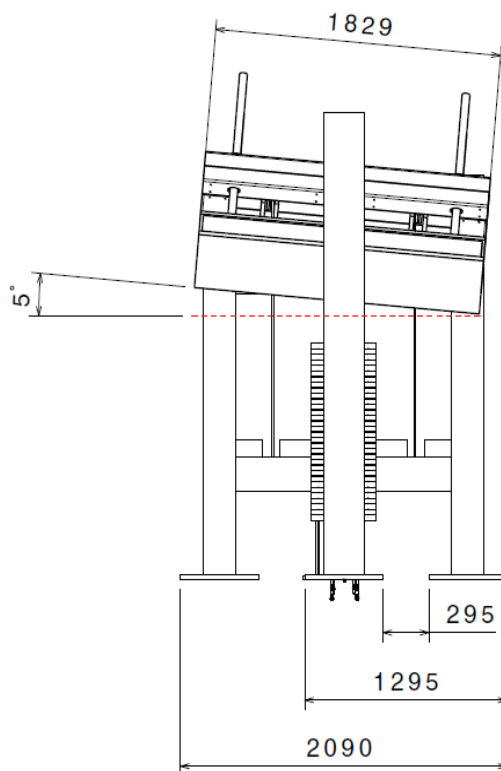


Figura 85. Vista lateral esquerda da versão final do dispositivo Roof Crush.  
(Fonte: autoria própria)

## Anexo IV (Manual de Operação do Roof Crush)

Neste anexo apresenta-se um Manual de Operação do dispositivo Roof Crush. A operação do dispositivo pode ocorrer de forma semiautomática (avanço automático e retorno manual) ou de forma completamente manual (avanço e retorno manuais). Além disso, apresenta-se alguns cuidados e boas práticas necessárias para o correto funcionamento e realização de testes com o dispositivo.

### Etapas da operação completamente manual (sem cilindro pressurizado por gás nitrogênio):

Avanço da placa:

- 1) Com o atuador (RC 2510) de movimento da placa completamente comprimido e com a placa na posição inicial (parte superior do atuador encostando à sua respectiva base de fixação JBI), deve-se configurar a abertura de válvulas do sistema hidráulico conforme a Fig. (86).

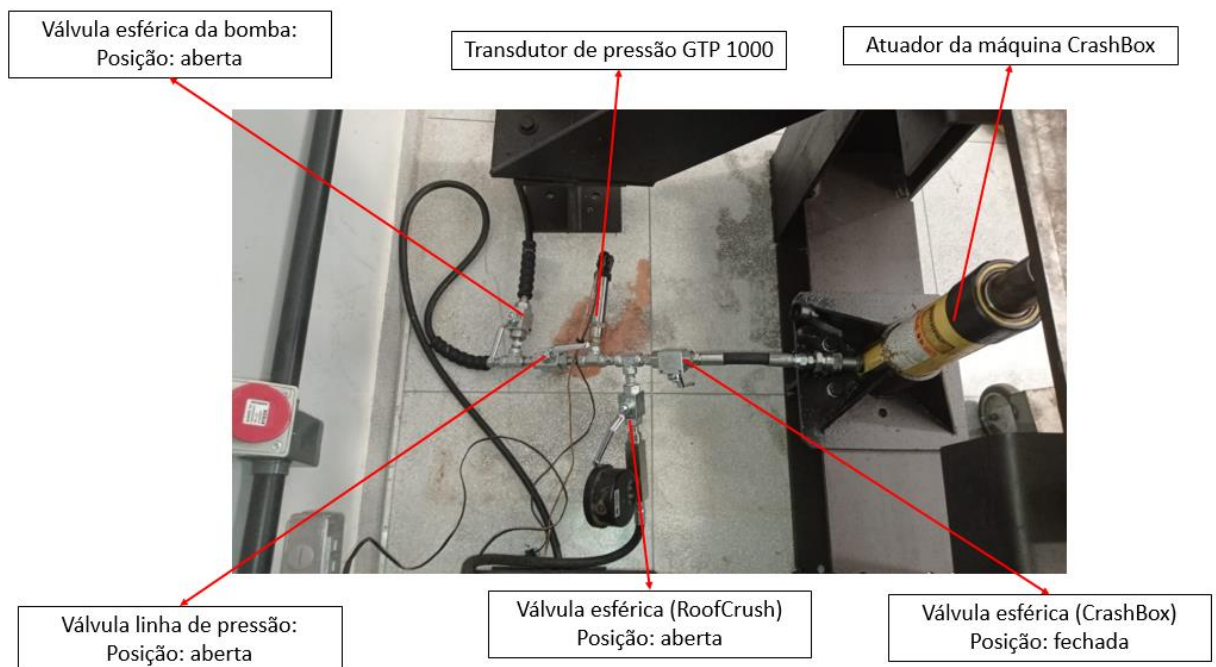


Figura 86. Configuração de válvulas para operação manual do dispositivo RoofCrush. (Fonte: autoria própria)

OBS: Antes de iniciar o processo de avanço da placa de esmagamento, deve-se garantir que o cabo de aço do sistema de retorno não esteja tensionado, conforme a Fig. (87). Caso esteja, deve-se despressurizar o atuador RC 1010 do sistema de retorno da placa antes de seguir para a etapa '2'.

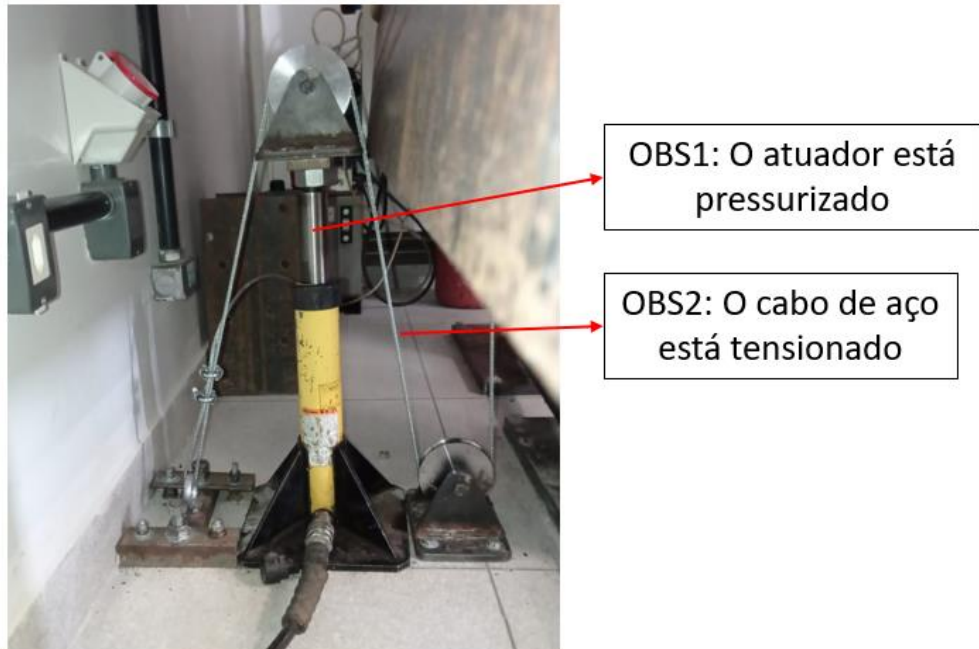


Figura 87. Sistema de retorno acionado. (Fonte: autoria própria)

- 2) Operar manualmente a bomba por meio da alavanca, conforme representado na Fig. (88). Nesta etapa deve-se observar a faixa de operação da placa de esmagamento (limitada mecanicamente em aproximadamente 150 mm a partir da posição inicial).

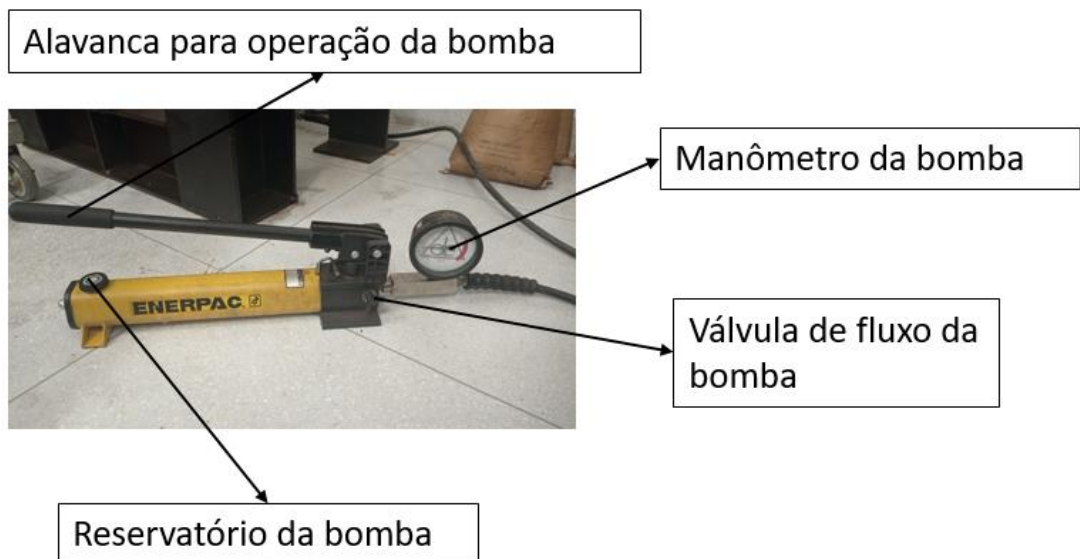


Figura 88. Bomba para operação manual do dispositivo RoofCrush.  
(Fonte: autoria própria)

OBS: Caso o fluido contido no reservatório de fluido da bomba hidráulica não seja suficiente para garantir o curso permitido do atuador (150 mm), deve-se permitir a passagem de fluido pressurizado contido no acumulador hidráulico para o reservatório da bomba. Para tanto, é necessário fechar a válvula do dispositivo RoofCrush e abrir a válvula do esférica do acumulador (vide Fig. (90)). Feito isso, deve-se abrir lentamente a válvula de fluxo da bomba para permitir a entrada do fluido hidráulico em sua respectiva câmara. Nesta etapa o operador devera sempre observar o nível de fluido contido na câmara da bomba para evitar possíveis vazamentos. Com o fluido necessário já na câmara da bomba, deve-se fechar a válvula de fluxo da bomba e fechar a válvula esférica do acumulador. Depois, basta reabrir a válvula esférica (RoofCrush) novamente e operar a bomba por meio de sua alavanca para retomar a operação de o avanço da placa.

Retorno da placa:

- 3) Para realizar o retorno, deve-se abrir a válvula de fluxo da bomba para permitir que o fluido do atuador RC 2510 previamente pressurizado retorne à câmara de sua respectiva bomba.

OBS: Nesta etapa deve-se tomar o cuidado de não deixar o atuador RC 2510 se desprender completamente de sua base JBI2510 podendo, dessa forma, sair completamente de sua posição original e possivelmente causar um acidente ao operador do dispositivo.

- 4) Deve-se colocar o cabo de aço na posição correta e operar por meio da bomba acoplada ao atuador do sistema de retorno (RC 1010). Nessa etapa é importante verificar o limite no qual o sistema pode retornar (até o topo do atuador encostar em sua respectiva base, conforme mostrado na Fig. (89)).

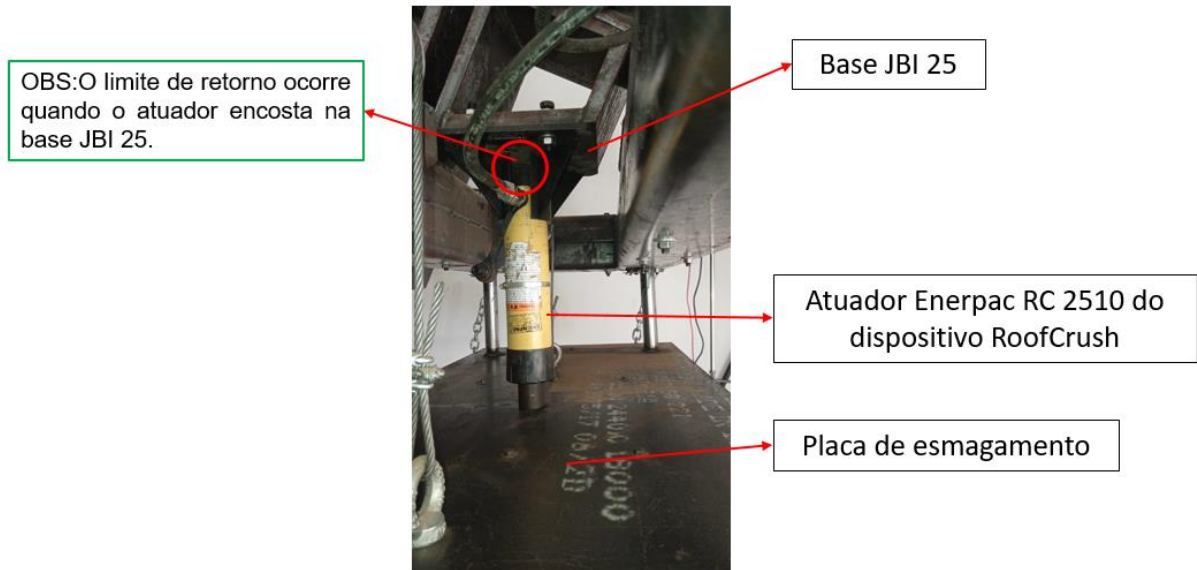


Figura 89. Atuador RC 2510 do dispositivo RoofCrush.  
(Fonte: autoria própria)

**IMPORTANTE:** Caso o limite indicado na Fig. (89) não seja respeitado poderá ocorrer a sobrecarga do sistema de retorno da placa e, possivelmente, dano permanente.

- 5) Após alcançar o limite deve-se novamente liberar a pressão do atuador RC 2510 por completo até que este seja completamente despressurizado. Caso o reservatório da bomba esteja cheio de fluido deve-se realizar o bombeamento desse fluido para dentro do acumulador hidráulico. Para tanto, é necessário realizar o arranjo de válvulas representado na Fig. (90). Assim, fecha-se a válvula do atuador RoofCrush e da linha de pressão (opcional) e abre-se a válvula do acumulador. Posteriormente, opera-se a bomba mecânica novamente até que seu respectivo reservatório se esvazie suficientemente para, em seguida, receber o fluido pressurizado do atuador.
- 6) Opera-se novamente a bomba mecânica do atuador RC 1010 do sistema de retorno, sempre observando os cuidados tomados na etapa '4'.



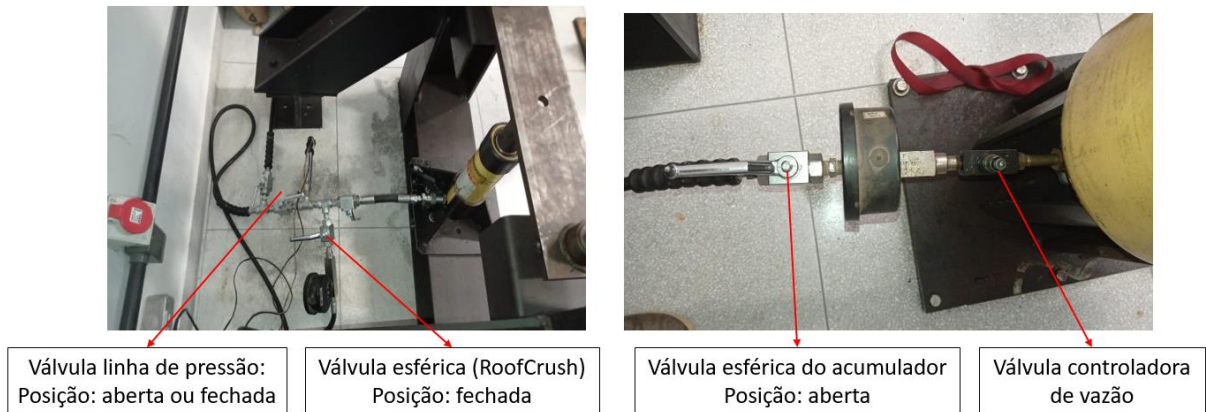


Figura 90. Configuração de abertura de válvulas para retorno do fluido para dentro do acumulador hidráulico. (Fonte: autoria própria)

### Etapas da operação completamente manual (com cilindro pressurizado por gás nitrogênio):

Avanço da placa:

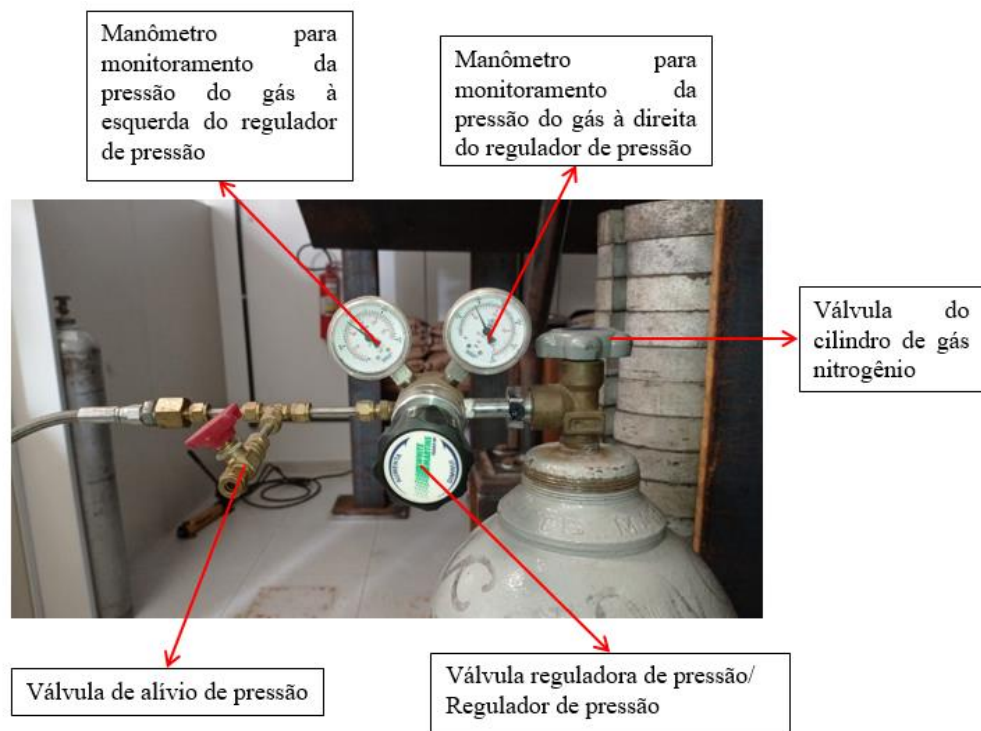


Figura 91. Válvula reguladora de pressão do gás nitrogênio (Fonte: autoria própria)

- 1) Abrir a válvula do cilindro de gás nitrogênio Fig. (91).
- 2) Abrir a válvula reguladora de pressão até que a pressão desejada seja indicada no manômetro à esquerda Fig. (91).

- 3) Abrir a válvula de retenção com desbloqueio para permitir a passagem do gás nitrogênio pressurizado para o acumulador hidráulico, Fig. (92).
- 4) Abrir a válvula do acumulador (parte inferior) Fig. (92).



Figura 92. Válvulas do acumulador hidráulico. (Fonte: autoria própria)

- 5) Com o atuador (RC 2510) de movimento da placa completamente comprimido e com a placa na posição inicial (parte superior do atuador encostando à sua respectiva base de fixação JBI), deve-se fechar a válvula esférica da bomba mecânica, abrir a válvula da linha de pressão e abrir a válvula do RoofCrush, nessa ordem. Por fim, deve-se regular a abertura da válvula controladora de vazão e abrir a válvula esférica do acumulador. Desse modo, a placa irá iniciar o movimento. É possível regular a velocidade da placa por meio da válvula controladora de vazão.

OBS1: Antes de iniciar o processo de avanço da placa de esmagamento, deve-se garantir que o cabo de aço do sistema de retorno não esteja tensionado, como ocorre na Fig. (87). Caso necessário, deve-se despressurizar o atuador RC 1010 do sistema de retorno da placa.

OBS2: Nesta etapa deve-se observar o limite de curso da placa (150 mm).

Retorno da placa:

- 1) O retorno é completamente manual, idêntico ao que já foi descrito.

Aquisição de dados com o LabVIEW:

- 1) Ligar a fonte de tensão do sensor LVDT e ajustar uma tensão acima de 10,15 Volts, que é a tensão retificada pelo circuito retificador. Recomenda-se uma tensão de aproximadamente 13 Volts.
- 2) Conectar a placa National Instrumentos, já com os canais dos sensores de deslocamento e de pressão fixados em seus respectivos canais, mostrados na Metodologia do trabalho.
- 3) Abrir o arquivo 'Roofcrush.vi' no software Labview.



Figura 93. Sistema para de aquisição de dados para o ensaio.  
(Fonte: autoria própria)

- 4) Configurar os Ganhos e Zeros dos sensores de deslocamento e de pressão, conforme a Fig. (94).
- 5) Clicar no botão 'Run Continuously' para iniciar a gravação dos dados.
- 6) Após o ensaio é necessário clicar no botão 'Run Continuously' novamente para interromper a gravação dos dados.
- 7) Para extrair os dados clica-se com o botão direito no gráfico do qual se deseja extrair os dados. Com isso, clica-se na opção para exportar os dados para planilha em Excel, por exemplo.

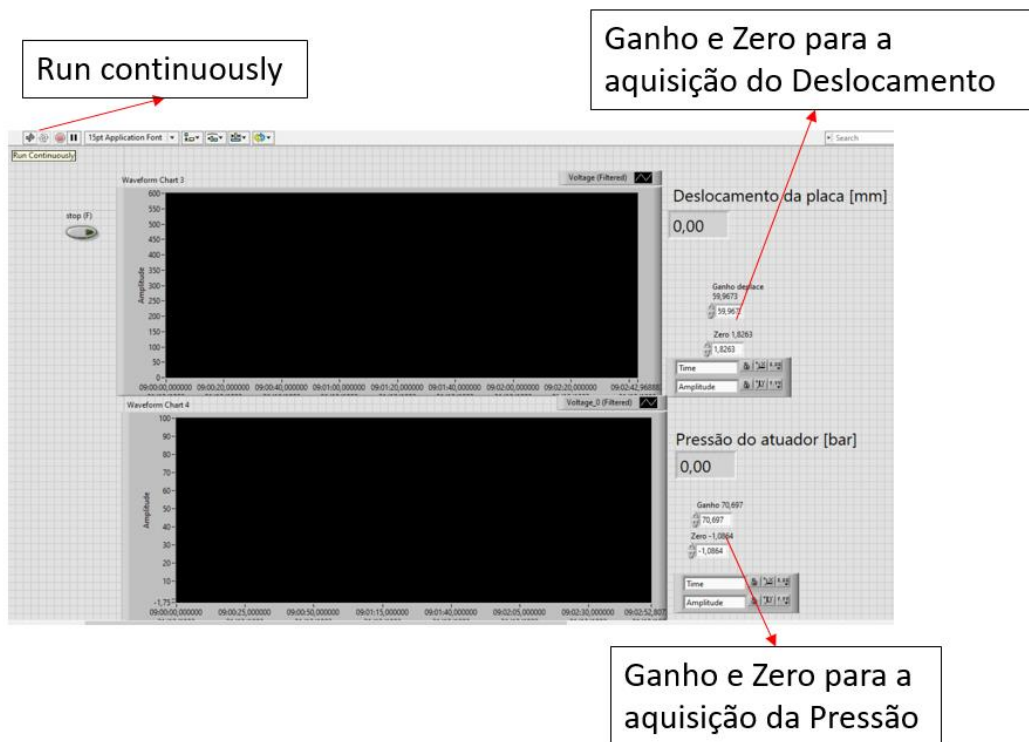


Figura 94. Interface do software LabVIEW com os gráficos das grandezas relevantes. (Fonte: autoria própria)