

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE GARRAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM  
MATERIAIS COMPÓSITOS

João Vitor de Queiroz Marques

Campina Grande/PB  
Agosto de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE GARRAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM  
MATERIAIS COMPÓSITOS

João Vitor de Queiroz Marques

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
como requisito à obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior.

Campina Grande  
Agosto de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M357p Marques, João Vitor de Queiroz.  
Desenvolvimento de garras para ensaio de cisalhamento em materiais compósito / João Vitor de Queiroz Marques. – Campina Grande, 2015.  
161 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia, 2015.  
"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior".  
Referências.

1. Cisalhamento Interlaminar. 2. Iosipescu. 3. V-Notched Rail Shear. 4. Desenvolvimento de Garras. I. Amorim Junior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 621.965(043)

“DESENVOLVIMENTO DE GARRAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM  
MATERIAIS COMPÓSITOS”.

**JOÃO VITOR DE QUEIROZ MARQUES**

Dissertação Aprovada em 28/08/2015 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros:

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior**  
Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Marco Antonio dos Santos**

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Laura Hecker Carvalho**

Examinadora Externa

UAEMa/CCT/UFCG

## DEDICATÓRIA

A Vitória.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por conseguir concluir este trabalho

Agradeço a minha esposa Andreia por permitir que eu escreva este singelo trabalho.

A Deus novamente por dar-me paciência.

Ao professor Dr Wanderley Ferreira de Amorin Junior, por me orientar e tornar possível este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) por viabilizar o desenvolvimento dos dispositivos.

Ao Laboratório de Projeto de Instrumentos da UFCG, por fornecer a infraestrutura laboratorial para realização dos ensaios.

Ao laboratório de Propriedades mecânicas pela utilização de sua infraestrutura.

Ao laboratório de Vibrações da UFCG pela utilização de um aquisitor de dados.

Ao professor Joao Baptista da Costa Agra de Melo por tudo.

A Paulo Cesar Sales, pelo auxílio nas simulações computacionais realizadas.

Finalmente, a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

# DESENVOLVIMENTO DE GARRAS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

## RESUMO

Os compósitos poliméricos costumam ter uma elevada resistência mecânica em relação à sua densidade. Uma característica fundamental para que os materiais possam ser utilizados na engenharia é a previsibilidade de seu comportamento quanto ao carregamento. Devido à natureza heterogênea da estrutura dos compósitos e devido a interação entre suas fases constituintes as características deste material dependem das propriedades das fases constituintes, da fração volumétrica de cada fase constituinte, da interação entre suas fases e do método de fabricação. Este trabalho trata do desenvolvimento de garras para ensaio mecânico, para materiais compósitos, que possibilitem obter o valor do cisalhamento interlaminar de compósitos poliméricos. O cisalhamento interlaminar permite avaliar, entre outras coisas, a influência do método de fabricação na resistência do compósito. Foram desenvolvidos dois tipos de garras: o tipo Iosipescu e o tipo V-notched Rail Shear. Para o desenvolvimento das garras de ensaio foi utilizada a metodologia seguinte: Projeto Informacional, Projeto conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado, Fabricação e Testes. Além da montagem de um sistema de Instrumentação para avaliar a deformação localizada no centro dos corpos de prova. Os resultados obtidos com a garra Iosipescu apresentaram uma variação de 13,6% em relação a literatura, enquanto naquelas obtidas com a garra V-notched Rail Shear obtiveram uma variação de 3,9 % em relação a literatura.

Palavras-Chave: Cisalhamento Interlaminar, Iosipescu, V-Notched Rail Shear, Desenvolvimento de Garras.

## CLAWS DEVELOPMENT FOR SHEAR TEST ON COMPOSITES MATERIALS

### Abstract

Polymer composites in general have a high mechanical strength relative to their density. A feature displayed by the materials so that they can be used for engineering purposes is behavior predictability with respect to load. Due to the heterogeneous nature of the structure of composites and to the interaction between their constituent phases the property of these materials depend on the properties of their constituent phases, their volume fraction, phase interaction and manufacturing method. This work deals with the development of claws for mechanical testing for composite materials, to obtain the interlaminar shear value of polymer composites. The interlaminar shear allows for the evaluation of the influence of the manufacturing method on the composite's strength. Two types of jaws have been developed: the Iosipescu type and the V-notched Rail Shear type. The following methodology was used: Informational Design, Conceptual Design, Preliminary Design, Detailed Design, Manufacturing and Testing as well as the assembly of an instrumentation system for evaluating the deformation at the center of the specimens. Results obtained with the Iosipescu claw varied 13,6% with those reported in the literature while those obtained with the V-notched rail Shear claw showed a 3,9% variation with respect to the literature.

Keywords: Interlaminar Shear, Iosipescu, V-Notched Rail Shear, development of claws

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Zona rica em resina em um compósito reforçado com fibra de vidro. ....   | 20 |
| Figura 2 - Representação esquemática do processo Hand Lay-Up .....  | 24 |
| Figura 3 - Representação esquemática do processo Spray-up.....  | 25 |
| Figura 4 - Esquema básico de processamento por RTM: injeção de resina em uma preforma (arranjo de fibras organizadas no formato da peça) no interior de um molde rígido. .... | 26 |
| Figura 5 - influência da fração volumétrica de vazios na resistência ao Cisalhamento Interlaminar .....   | 28 |
| Figura 6: Ilustração representativa das tensões Interlaminares e perpendiculares. ....  | 28 |
| Figura 7 - Orientação do laminado no corpo de prova para obtenção das propriedades de cisalhamento .....  | 29 |
| Figura 8 - Micrografias de corpos de prova ensaiados com diferentes frações de vazios mostrando as trincas propagando dos defeitos .....                                      | 30 |
| Figura 9 - Representação esquemática da tensão de cisalhamento no material. ....  | 31 |
| Figura 10 - Representação esquemática do ensaio de Flexão curta em três pontos ...  | 32 |
| Figura 11 - Representação esquemática do ensaio Off-axis .....  | 33 |
| Figura 12 - Representação esquemática do ensaio Arcan.....  | 34 |
| Figura 13 - Geometria do corpo de prova Iosipescu. ....   | 35 |
| Figura 14 - Orientação das tensões de Cisalhamento no corpo de prova Iosipescu ....   | 35 |
| Figura 15 - resposta típica do corpo de prova durante a realização do ensaio Iosipescu. ....  | 36 |
| Figura 16 - Representação esquemática do ensaio Two Rail Shear .....  | 37 |
| Figura 17 - representação esquemática do ensaio Iosipescu e do corpo de prova. ....   | 38 |
| Figura 18 - Representação esquemática do ensaio Two Rail Shear .....  | 39 |
| Figura 19 - Configuração esquemática do ensaio Two Rail Shear modificado.....   | 40 |
| Figura 20 - representação esquemática do ensaio V-Notched Rail Shear.....   | 41 |
| Figura 21 - Geometria do corpo de Prova V-Notched Rail Shear. ....  | 42 |
| Figura 22 - resposta típica do corpo de prova durante a realização do ensaio V-NotchRailShear.....  | 44 |
| Figura 23 - Representação gráfica do elemento extensômetro axial Unico .....  | 48 |
| Figura 24 - Representação gráfica do elemento extensômetro Roseta de duas direções .....  | 48 |
| Figura 25 - Representação gráfica do elemento extensômetro Roseta de três Direções .....  | 49 |
| Figura 26 - Representação gráfica do elemento extensômetro tipo diafragma.....  | 49 |
| Figura 27 - Representação gráfica do elemento extensômetro para tensão residual....   | 50 |
| Figura 28 - Representação gráfica do elemento extensômetro para transdutores de carga. ....   | 50 |
| Figura 29 - representação esquemática da dimensão do extensômetro .....   | 51 |
| Figura 30 - gráfico da deformação específica do extensômetro em relação a sua dimensão .....  | 51 |
| Figura 31 - codificação utilizada pelo fabricante de extensômetros Excel sensores ....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32 - resumo da preparação das superfícies para alguns materiais .....   | 55 |
| Figura 33 - Corpo de Prova utilizado em Usak, na Turquia.....  | 56 |
| Figura 34 - Dispositivo alternativo de Wyoming sendo testado com vários<br>extensômetros .....   | 57 |
| Figura 35 - montagem para ensaio de cisalhamento VNRS realizado na Nasa.....   | 58 |
| Figura 36 - Fluxograma de desenvolvimento de um projeto .....  | 59 |
| Figura 37 - Tabela do fabricante Excel sensores indicando as colas recomendadas<br>para seus extensômetros.....  | 61 |
| Figura 38 - Circuito de uma Ponte de Wheatstone .....  | 63 |
| Figura 39 - diagrama de calibração de medição com o extensômetro com acréscimo<br>de uma resistencia em paralelo.....  | 64 |
| Figura 40 - Tabela do valor da resistência adicionada e da Deformação simulada.....  | 65 |
| Figura 41 - simulação computacional do corpo de prova losipescu .....  | 66 |
| Figura 42 - Análise computacional (FEA) da influência do angulo do entalhe do corpo<br>de prova losipescu.....   | 67 |
| Figura 43 - Representação esquemática do angulo de entalhe considerado por SUN.....  | 67 |
| Figura 44 - Definição do angulo de entalhe na simulação computacional realizada no<br>LaMMEA.....  | 68 |
| Figura 45 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu.....  | 68 |
| Figura 46 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos<br>$\alpha$ menores que $45^\circ$ .....  | 69 |
| Figura 47 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos<br>$\alpha$ maiores que $45^\circ$ .....  | 69 |
| Figura 48 - comparação entre o valor simulado do cisalhamento e a distância do centro<br>do corpo de prova.....  | 70 |
| Figura 49 - Simulação computacional do corpo de prova tipo losipescu.....  | 71 |
| Figura 50 - detalhe da Região central do corpo de prova losipescu Simulado.....  | 71 |
| Figura 51 - Simulação computacional do corpo de prova losipescu.....   | 72 |
| Figura 52 - Simulação Computacional do Corpo de Prova V-Notched Rail Shear.....  | 72 |
| Figura 53 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS.....  | 73 |
| Figura 54 - Resultado da simulação computacional do corpo de prova V-Notched Rail<br>Shear.....  | 74 |
| Figura 55 - simulação computacional do entalhe circular no corpo de prova VNRS ....  | 74 |
| Figura 56 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS.....  | 75 |
| Figura 57 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS.....  | 75 |
| Figura 58 - Dispositivo losipescu Utilizado na Universidade de Iasi, Romenia. (a)<br>fixador; (b) guia linear; (c) sistema de cunhas; (d) sistema de alinhamento.....  | 78 |
| Figura 59 - roteiro para as ampliações realizadas no dispositivo de Iasi.....  | 79 |
| Figura 60 - Detalhe do dispositivo Iasi mostrando os furos presentes nos fixadores. ..   | 79 |
| Figura 61 - detalhe da cunha utilizada no dispositivo Iasi .....   | 80 |
| Figura 62 -Dispositivo Utilizado no Royal Institute of Technology, Suécia. (a) guia linear<br>do dispositivo; (b) fixador; (c) sistema de cunhas duplas; (d) sistema de<br>alinhamento da amostra; (e) sistema de molas; ..... | 81 |
| Figura 63 - roteiro do dispositivo Royal Institute of Technology .....   | 82 |
| Figura 64 - Detalhe da cunha utilizada no dispositivo do Royal Institute of Technology<br>.....  | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 65 - Detalhe da utilização do (a) rabo de andorinha entre as cunhas (b) representação do rabo de andorinha..... | 83  |
| Figura 66 - Detalhe do travamento do fixador móvel.....  | 83  |
| Figura 67 - Primeiro dispositivo Iosipescu da universidade de Wyoming. ....  | 84  |
| Figura 68 - Roteiro do dispositivo Wyoming .....   | 85  |
| Figura 69 - Detalhe do fixador Dispositivo Iosipescu de Wyoming .....  | 85  |
| Figura 70 - Dispositivo Iosipescu Utilizado em Madison.....  | 86  |
| Figura 71 - Roteiro do dispositivo de Madison .....  | 87  |
| Figura 72 - Detalhe do Sistema de fixação do corpo de prova sem Cunhas. ....   | 87  |
| Figura 73 - Detalhe do sistema de guias lineares utilizado no dispositivo Madison.....                                 | 88  |
| Figura 74 - Detalhe do dispositivo Madison mostrando o mecanismo de ajuste das guias lineares.....                     | 88  |
| Figura 75 - Dispositivo para ensaio Iosipescu da Escola de Mines de Saint-Etienne...                                   | 89  |
| Figura 76 - Roteiro do dispositivo Saint-Etienne .....   | 90  |
| Figura 77 - Detalhe da cunha simples utilizado no dispositivo Saint-Etienne. ....                                      | 90  |
| Figura 78 - Detalhe do sistema de Carregamento do dispositivo Saint-Etienne.....                                       | 91  |
| Figura 79 - detalhe da guia linear utilizada no dispositivo Saint-Etienne .....  | 91  |
| Figura 80 - Conjuntos do Dispositivo de Ensaio Iosipescu.....  | 92  |
| Figura 81 - Modelagem computacional da cunha de ajuste número 1 (CA1). ....  | 94  |
| Figura 82 - modelagem computacional da cunha de ajuste número 2 (CA2). ....  | 95  |
| Figura 83 - modelagem computacional do prendedor fixo numero 1 (SF1).....  | 96  |
| Figura 84 - modelagem computacional dos prendedores número 2(SF2).....   | 96  |
| Figura 85 - modelagem computacional dos prendedores número 2 (SF3).....  | 97  |
| Figura 86 - guia linear SKF .....  | 97  |
| Figura 87 - Rolamentos Lineares.....   | 98  |
| Figura 88 - Bucha de bronze .....  | 98  |
| Figura 89 - modelagem computacional do suporte de ligação 1 .....  | 99  |
| Figura 90 - modelagem computacional do suporte de ligação 2 .....  | 100 |
| Figura 91 - modelagem computacional do suporte de ligação 3 .....  | 100 |
| Figura 92 - modelagem computacional do elemento eixo guia 1(EG1).....  | 101 |
| Figura 93 - modelagem computacional do elemento eixo guia 2 (EG2).....   | 101 |
| Figura 94 - trilho comercial para o conjunto guia linear .....   | 102 |
| Figura 95 - modelagem computacional do elemento base 1 (BS1). ....   | 102 |
| Figura 96 - modelagem computacional do elemento base 2 (BS2) .....   | 103 |
| Figura 97 - modelagem computacional do elemento base 3(BS3) .....  | 103 |
| Figura 98 - dispositivo manual de carregamento. ....   | 104 |
| Figura 99 - Elemento hidráulico para o sistema de transferência de carga.....  | 105 |
| Figura 100 - máquina de ensaio universal .....   | 105 |
| Figura 101 - Modelagem computacional do Subsistema de acoplamento1 (SAC1) ...  | 106 |
| Figura 102 - Modelagem computacional do subsistema de acoplamento número 2 (SAC2) .....                                | 107 |
| Figura 103 - Modelagem computacional do elemento Subsistema de acoplamento 3 (SAC3) .....                              | 107 |
| Figura 104 - modelagem computacional do sistema anti-rotação1 (SAR1).....  | 108 |
| Figura 105 - Modelagem computacional do conjunto Iosipescu.....  | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 106 - Simulação computacional do elemento Cunha.....  | 111 |
| Figura 107 - Simulação computacional do elemento suporte do Fixador. ....  | 112 |
| Figura 108 - Simulação Computacional do elemento Fixador. ....   | 113 |
| Figura 109 - Variação do Limite de resistência e do Limite de escoamento dos aços ao carbono .....                                       | 114 |
| Figura 110 - catalogo distribuidor metaiscoppermetal.....  | 115 |
| Figura 111 - Concepção final do dispositivo losipescu. ....  | 116 |
| Figura 112 - Protótipo confeccionado para o ensaio ASTM 5379.....  | 117 |
| Figura 113 - Corte das amostras realizado por Sousa.....   | 118 |
| Figura 114 - placa compósita cortada a laser de CO <sub>2</sub> .....  | 118 |
| Figura 115 - corpo de prova losipescu cortado a laser. ....  | 119 |
| Figura 116 - montagem do ensaio losipescu.....   | 120 |
| Figura 117 - Placa eletrônica confeccionada para sustentação dos cabos do sistema de aquisição.....                                      | 120 |
| Figura 118 - sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio losipescu para aquisição Extensométrica. ....                             | 121 |
| Figura 119 - circuito recomendado pelo fabricante do aquisitor de dados para aquisição com extensômetros na configuração 1/4 ponte ..... | 122 |
| Figura 120 - Gráfico Força x Deslocamento do Ensaio losipescu. ....  | 122 |
| Figura 121 - Corpo de prova losipescu depois de ensaiado .....   | 123 |
| Figura 122 - Classificação do tipo de fratura do corpo de prova losipescu .....  | 124 |
| Figura 123 - Corpo de prova losipescu depois de ensaiado.....  | 124 |
| Figura 124 - Detalhe da superfície de contato do corpo de prova com o fixador após a realização do ensaio.....                           | 124 |
| Figura 125 - extensômetro colado na superfície do corpo de prova após a realização do ensaio. ....                                       | 125 |
| Figura 126 - Dispositivo V-NotchedRailShear da Technische Universität Dresden, Alemanha. ....  | 126 |
| Figura 127 - roteiro do dispositivo Technische.....  | 127 |
| Figura 128 - Detalhe do dispositivo da Technische Universität Dresden.....   | 127 |
| Figura 129 - detalhe do tipo de guia linear utilizada no dispositivo Dresden.....  | 128 |
| Figura 130 - dispositivo V-NotchedRailShear da UFRGS .....   | 128 |
| Figura 131 - Roteiro do dispositivo UFRGS.....   | 129 |
| Figura 132 - Detalhe do sistema de fixação dispositivo VNRS da UFRGS .....   | 129 |
| Figura 133 - detalhe do sistema de acoplamento entre o fixador e a máquina de ensaio da UFRGS.....                                       | 130 |
| Figura 134 - dispositivo desenvolvido na UFF como uma modificação para o ensaio  | 130 |
| Figura 135 - corpo de prova utilizado no dispositivo alternativo VNRS da UFF .....   | 131 |
| Figura 136 - dispositivo desenvolvido na UFF.....  | 132 |
| Figura 137 - Roteiro do dispositivo da UFF. ....   | 133 |
| Figura 138 - Detalhe da Fixação do corpo de prova no dispositivo VNRS da UFF.....  | 134 |
| Figura 139 - Detalhe do acoplamento entre o dispositivo VNRS da UFF e a máquina de ensaio. ....  | 134 |
| Figura 140 - dispositivo utilizado na Universidade de Usak, Turquia .....  | 135 |
| Figura 141 - Roteiro do dispositivo Usak.....  | 136 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 142 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo de Usak.....   | 136 |
| Figura 143 -Detalhe do dispositivo de ensaio VNRS mostrando os parafusos de aperto<br>.....                          | 137 |
| Figura 144 - Dispositivo Utilizado na NASA.....  | 137 |
| Figura 145 - Roteiro do dispositivo NASA.....  | 138 |
| Figura 146 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo NASA. ....   | 138 |
| Figura 147 - detalhe do sistema de fixação do dispositivo da NASA.....   | 139 |
| Figura 148 - Dispositivo utilizado no Wyoming Test FixturesInc, Salt Lake City, EUA                                  | 139 |
| Figura 149 - Roteiro do dispositivo Wyoming. ....  | 140 |
| Figura 150 - detalhe do sistema de fixação das amostras do dispositivo Wyoming. ..                                   | 141 |
| Figura 151 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo Wyoming.....   | 141 |
| Figura 152 - Dispositivo desenvolvido no Wyoming Test Fixture, Inc, Salt Lake City.                                  | 142 |
| Figura 153 - Roteiro do dispositivo híbrido Wyoming.....   | 143 |
| Figura 154 - Detalhe mostrando os parafusos de ajuste do dispositivo Wyoming<br>alternativo.....                     | 143 |
| Figura 155 - detalhe mostrando o sistema de parafusos de aperto utilizado no<br>dispositivo alternativo Wyoming..... | 144 |
| Figura 156 - modelagem computacional do elemento fixador numero 1 (FXJ1) .....                                       | 146 |
| Figura 157 -Modelagem computacional do elemento fixador 2(FXJ2) .....  | 147 |
| Figura 158 - Modelagem computacional do elemento fixador 3 (FXJ3).....   | 147 |
| Figura 159 - modelagem computacional do elemento de contato número 1 (SCJ1) ..                                       | 148 |
| Figura 160 - Modelagem computacional do elemento contato número 2 (SCJ2).....  | 148 |
| Figura 161 - Modelagem computacional do elemento de alinhamento 1 (PAJ1) .....                                       | 149 |
| Figura 162 - Modelagem computacional do elemento Subsistema de acoplamento 1<br>(SAJ1).....                          | 150 |
| Figura 163 - máquina de ensaio universal presente na UFCG.....   | 151 |
| Figura 164 - idealização do sistema de carregamento manual por anilhas (SCJ2)...                                     | 151 |
| Figura 165 - Simulação computacional do elemento Fixador móvel. ....   | 153 |
| Figura 166 - simulação computacional do elemento fixador móvel quanto a tensão..                                     | 153 |
| Figura 167 -simulação computacional do elemento Fixador móvel. ....  | 154 |
| Figura 168 -simulação computacional do elemento fixador. ....  | 155 |
| Figura 169 - Concepção final do conjunto de ensaio V-Notched Rail Shear.....   | 156 |
| Figura 170 - Máquina de Eletro-erosão a fio da UFCG.....   | 157 |
| Figura 171 - Dispositivo V-Notched Rail Shear sendo usinado na Fresadora Universal<br>da UFCG. ....                  | 158 |
| Figura 172 - Dispositivo V-Notched Rail Shear sendo usinado na Fresadora Universal<br>da UFCG. ....                  | 158 |
| Figura 173 - dispositivo V-Notched Rail Shear fabricado na UFCG. ....  | 159 |
| Figura 174 - corpo de prova V-Notched Rail Shear.....  | 160 |
| Figura 175 - Dispositivo V-Notched Rail Shear antes da realização do ensaio. ....                                    | 161 |
| Figura 176 - Resultado do ensaio realizado com a norma ASTM 7078.....  | 161 |
| Figura 177 - Gráfico da extensômetria realizada na amostra ASTM D7078 .....  | 162 |
| Figura 178 - Curvas típicas dos ensaios de cisalhamento com entalhe em V. ....                                       | 162 |
| Figura 179 - corpo de prova V-Notched Rail Shear ensaiado. ....  | 163 |
| Figura 180 - Classificação do tipo de fratura segundo a norma ASTM D7078. ....                                       | 163 |



## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Subsistemas do Conjunto losipescu com o tag utilizado neste trabalho, a função principal e o pré-requisito de projeto.....       | 93  |
| Tabela 2 - Matriz de projeto do sistema losipescu.....  | 109 |
| Tabela 3 - Matriz de projeto do sistema losipescu com as opções escolhidas para construção.....   | 110 |
| Tabela 4 - Propriedades Mecânicas de aços esfriados lentamente em função do teor de Carbono.....  | 113 |
| Tabela 5 - material selecionado após a simulação para o dispositivo losipescu. ....   | 114 |
| Tabela 6 - Definição dos materiais de fabricação .....  | 115 |
| Tabela 7 - Apresentação dos Resultados dos Ensaios losipescu.....   | 123 |
| Tabela 8 - subsistemas do dispositivo “V-NotchedRailShear” .....  | 145 |
| Tabela 9 - matriz de projeto para o conjunto “V-Notched Rail Shear” .....   | 152 |
| Tabela 10 - matriz de projeto para o conjunto “V-Notched Rail Shear” com as opções selecionadas. ....                                       | 152 |
| Tabela 11 - Aços ao carbono selecionados para o dispositivo V-Notched Rail Shear após a simulação computacional.....                        | 155 |
| Tabela 12 - Apresentação dos Resultados dos Ensaios V-Notched Rail Shear com corpo de prova de poliéster reforçado com fibra de vidro. .... | 164 |

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

PRFV – Plásticos Reforçados por Fibra de Vidro

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

ILSS – Interlaminar Shear Strength

## LISTA DE SIMBOLOS

### *Letras Latinas*

- $E_c$  : Modulo de Elasticidade do compósito
- $E_m$  : Módulo de Elasticidade da matriz
- $E_r$  : Módulo de Elasticidade do reforço
- $v_m$  : Fração mássica da matriz
- $v_r$  : Fração mássica do reforço
- $A$  : Área
- $F$  : Força
- $P$  : Carregamento aplicado no Ensaio
- $r$  : Resistividade do material
- $F_{max}$  : Força máxima

### *Letras Gregas*

- $\sigma$  : Tensão
- $\tau$  : Cisalhamento

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPITULO I</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>1.Introdução</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>1.1 Objetivo Geral</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>1.2. Objetivos Específicos</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>CAPITULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                                     | <b>23</b> |
| <b>2. Introdução</b> .....   | <b>23</b> |
| 2.1 Materiais compósitos .....   | 24        |
| 2.2 Processamento de compósitos poliméricos .....                                    | 24        |
| 2.3 Influência da presença de vazios para a resistência mecânica dos compósitos..... | 29        |
| 2.4 Tensão de Cisalhamento .....   | 31        |
| 2.5 Dispositivos de ensaio de cisalhamento .....                                     | 32        |
| 2.5 Iosipescu x V-Notched Rail Shear.....  | 44        |
| 2.6 Extensometria .....  | 45        |
| 2.7 Utilização de Extensômetros colados nos ensaios de cisalhamento .....            | 56        |
| <b>CAPITULO III – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                      | <b>59</b> |
| <b>3.1 Metodologia</b> .....   | <b>59</b> |
| <b>3.2 Montagem do sistema de Instrumentação</b> .....                               | <b>60</b> |
| <b>3.3 Fabricação da placa Compósita</b> .....                                       | <b>65</b> |
| <b>3.4 Simulação Computacional dos corpos de prova</b> .....                         | <b>65</b> |
| <b>CAPITULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                   | <b>77</b> |
| <b>4. Resultados e Discussão</b> .....   | <b>77</b> |
| 4.1 Projeto do dispositivo Iosipescu.....  | 77        |
| 4.2 Projeto do dispositivo V-Notched Rail Shear .....                                | 125       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPITULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>                      | <b>165</b> |
| <b>5. Conclusões.....</b>  | <b>165</b> |
| <b>6.Recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros .....</b> | <b>166</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS .....</b>                                   | <b>167</b> |

# CAPITULO I

## 1.Introdução

Reforçar uma matriz com fibras é uma pratica antiga. Há histórico da utilização de crina de cavalos e palha no reforço de tijolos em cerca de 5.000 a.C. (ASHBY, et al., 2007).

Os compósitos estão sendo cada vez mais utilizados em diversos segmentos industriais. Esse aumento de utilização se dá pela sua versatilidade em formar novos materiais mais econômicos e mais eficientes. Um exemplo da utilização de estruturas compósitas está no concreto. A união do aço, em forma de vergalhão, e do concreto se dá de forma heterogênea e, mesmo assim, proporciona à estrutura a capacidade de resistir a tensões trativas. Apesar de não haver uma diluição do elemento de reforço com o elemento utilizado como base para o compósito, há uma iteração entre os materiais para adicionar uma característica nova a estrutura.

A indústria naval tem utilizado cada vez mais os Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV) por sua versatilidade e elevada resistência à corrosão. A fibra de carbono tem ganhado cada vez mais espaço nas indústrias automobilística, e aeronáutica, devido à sua elevada resistência em relação à sua densidade.

Conhecer a resistência mecânica dos materiais é fundamental para a sua empregabilidade. Quanto mais aprofundado for esse conhecimento, menor é o risco de ocorrerem falhas no emprego destas estruturas.

A formação de vazios em compósitos avançados deve-se, em geral, a bolhas de ar aprisionadas no sistema de resina quando da sua formulação, bolsas de resina, umidade absorvida pelo pré-impregnado durante a sua armazenagem e seu processamento e ciclos de cura inadequados, tais como valores de pressão e temperaturas não adequados. A formação e o crescimento de vazios causam a perda da resistência mecânica, rigidez e vida em fadiga do laminado, muitas vezes resultando em falha catastrófica. (COSTA, et al., 2001).

Esses vazios são formados devido à natureza da matriz polimérica utilizada ou por eventuais problemas durante o processamento do compósito, tais como: umidade excessiva, controle inadequado das taxas de aquecimento e

resfriamento durante o processamento, a existência de ar entre as camadas de reforço e de matriz ou impurezas existentes na matriz polimérica. Em geral, a porosidade diminui a resistência à compressão estática e a vida em fadiga de laminados. (BOTELHO, et al., 2002)

Áreas ricas em resina podem ser observadas nos compósitos mesmo quando são fabricados de acordo com as especificações dos fabricantes. Um exemplo típico de uma zona rica em resina no laminado de epóxi e carbono AS4 pode ser observado na Figura 1. Uma análise da micrografia revela trincas na parte superior da zona rica em resina na região adjacente as fibras. (CANTWELL, et al., 1991).

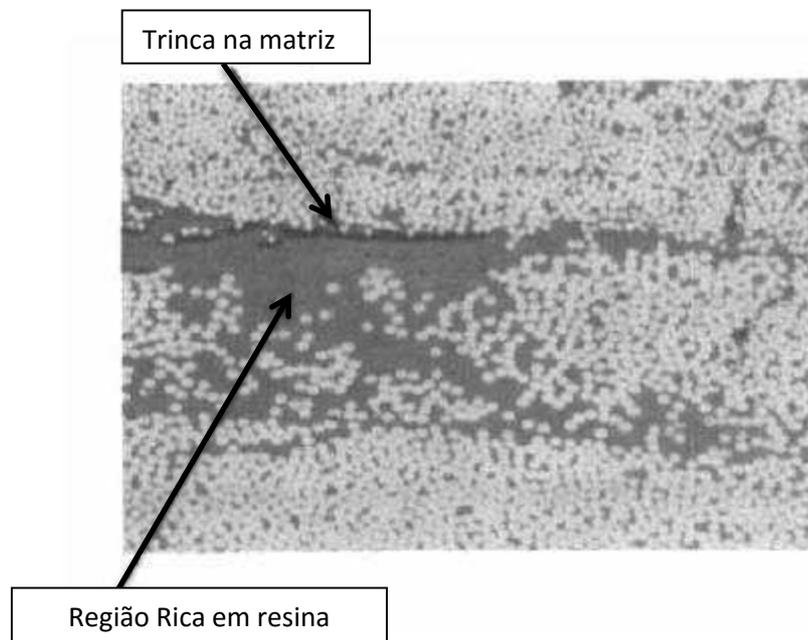


Figura 1 - Zona rica em resina em um compósito reforçado com fibra de vidro.  
[Fonte: (CANTWELL, et al., 1991)]

No caso de compósitos poliméricos, outro importante constituinte é a matriz polimérica. Esta tem as funções de agregar as fibras, dar proteção às suas superfícies contra danos por abrasão e atenuar os efeitos adversos das condições ambientais na utilização do compósito. A matriz deve apresentar uma adesão adequada à superfície do reforço, de tal forma que no carregamento mecânico aplicado a um componente, a matriz se deforme e transfira a carga entre as fibras contínuas e/ou descontínuas do compósito. Também, as propriedades de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento interlaminar, resistência ao cisalhamento no plano e a temperatura de serviço do

componente são dominadas pelo sistema de matriz polimérica. (CUNHA, et al., 2006).

Uma forma muito utilizada para avaliar a qualidade do processamento dos compósitos é através de ensaios de cisalhamento. Dentre os vários ensaios de cisalhamento, foi verificado que aquele que mais se adequa a avaliar o cisalhamento em materiais compósitos é o ensaio de cisalhamento com entalhe em V. Dos ensaios classificados nesta categoria no presente trabalho foram desenvolvidos dois dispositivos de ensaio: tipo Iosipescu e tipo VNRS (V-Notched Rail Shear).

Diante do que foi exposto, o presente trabalho foi subdividido em:

O CAPITULO I mostra, de forma abrangente, a importância do estudo do Cisalhamento Interlaminar em compósitos reforçados com fibras para avaliar a qualidade da fabricação.

No CAPITULO II é apresentada a discussão sobre a utilização dos ensaios de cisalhamento para avaliar a qualidade na fabricação de estruturas compósitas e apresenta, de forma breve, os diferentes dispositivos capazes de fornecer tensões cisalhantes ao material.

O CAPITULO III apresenta a metodologia de projeto aplicada. Esta metodologia é composta das fases de projeto informacional, projeto Conceitual, Projeto Preliminar, Projeto Detalhado, Fabricação e testes.

O CAPITULO IV discute, primeiramente, o produto final desenvolvido para o ensaio de cisalhamento tipo Iosipescu. Em seguida é apresentada a discussão em torno do dispositivo de cisalhamento interlaminar intitulado V-Notched Rail Shear.

No CAPITULO V são apresentadas as conclusões e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Por fim apresentam-se em anexo os desenhos técnicos dos dois dispositivos desenvolvidos para o ensaio de cisalhamento em compósitos.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de garras para ensaio mecânico de cisalhamento para materiais compósitos.

## **1.2. Objetivos Específicos**

- Domínio do projeto mecânico dos dispositivos de ensaio de cisalhamento tipo Iosipescu e V-Notched Rail Shear.
- Fabricação dos dispositivos utilizados.

## **CAPITULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O objetivo deste capítulo é discutir a influência do processamento e da fabricação dos compósitos poliméricos na formação de vazios, a influência dos vazios e defeitos na resistência mecânica dos materiais, como a variação do valor da tensão de cisalhamento indica a presença de defeitos e apresenta os diversos tipos de ensaio utilizados para obter o valor do cisalhamento interlaminar.

### **2. Introdução**

Existem, na natureza, basicamente quatro tipos de materiais: metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Para grande parte das aplicações em engenharia, os metais, cerâmicas e polímeros são suficientes. Principalmente quando as propriedades destes materiais não são mais suficientes para atender aos pré-requisitos da aplicação é que se utilizam os materiais compósitos. Um material compósito é uma estrutura formada pela união de dois ou mais materiais distintos, que mantêm suas características individuais, separado por uma interface, sem que haja reação química entre eles.

A palavra compósito significa: “formado por duas ou mais partes distintas” (VASILEV, et al., 2001). Essa união é heterogênea, ou seja, é possível identificar os componentes que compõem a estrutura, mas os componentes fornecem uma parcela de suas propriedades individuais para formar esse novo material.

Um material multifase exibindo uma combinação de propriedades que o torna superior a cada fase de sua composição pode ser considerado um compósito (CALLISTER JR, 1985)

Pode se dividir os compósitos em três grandes grupos: compósitos de matriz cerâmica, compósitos de matriz metálica e compósitos de matriz polimérica. O grupo ao qual o compósito pertence é definido pela fase matriz. Este trabalho foi desenvolvido utilizando apenas compósitos de matriz polimérica.

## 2.1 Materiais compósitos

Os compósitos de Matriz Polimérica: dividem-se em termorrígidos (epóxi, poliéster) e termoplásticos (poli-éter-éter-cetona (PEEK), poli-sulfona (PSU), poli-éter-imida (PEI)) reforçados com fibras de vidro, carbono, aramida (Kevlar) ou boro. (CALLISTER JR, 1985) . Os compósitos também podem ser reforçados por cargas particuladas.

Outro aspecto interessante é a inerente anisotropia, ou seja, a presença de propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas diferenciadas direccionalmente ao longo do material. (VINSON & SIERAKOWSKI, 1986)

## 2.2 Processamento de compósitos poliméricos

Atualmente são conhecidos diversos processos de impregnação do tecido pela resina, dentre os mais comuns, destacam-se:

Impregnação Hand-Lay-Up: processo de laminação manual de impregnação do tecido com resina (geralmente termofixa). Uma representação esquemática é apresentada na *Figura 2*, a seguir. Neste processo de fabricação a resina (a) e a fibra (b) são colocados manualmente no molde (d) e, em seguida, são compactados manualmente com um rolo (c) para formar o compósito.

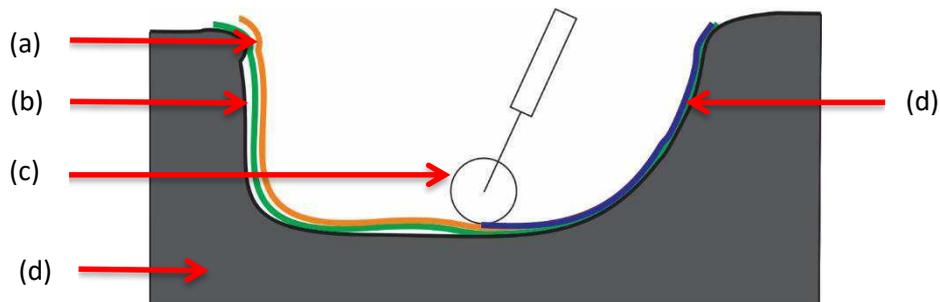


Figura 2 - Representação esquemática do processo Hand Lay-Up

Impregnação Spray-Up: é um processo de fabricação semi-automatizado em que a resina (geralmente termofixa) e a fibra são depositados no molde através de uma pistola pneumática. A *Figura 3* apresenta uma representação esquemática deste processo de fabricação.

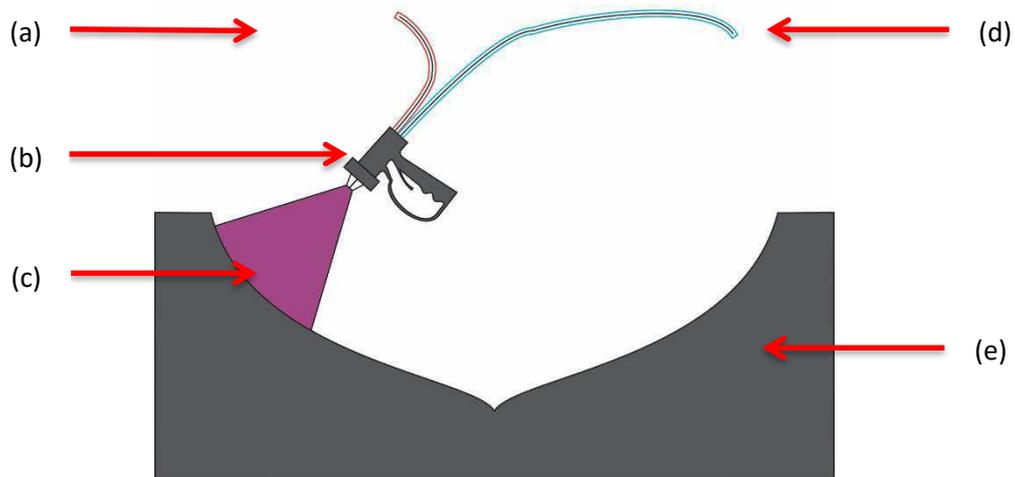


Figura 3 - Representação esquemática do processo Spray-up.

A deposição da Resina no molde (e) é realizada através de uma pistola pneumática que faz a mistura dos componentes. A resina (a) entra na pistola de mistura (b) pressurizada, com ar comprimido, e forma um spray de resina com fibra (c). A fibra entra por um segundo tubo, indicado na figura como (d). O molde (e) é utilizado da mesma forma que o processo Hand Lay-up, sendo necessário a utilização de um rolo manual para finalizar o processo (esta técnica pode ser utilizada com materiais termofixos, ou termoplásticos se a “impregnação” ocorrer em misturador interno, ou calandragem, ou extrusora e a moldagem for por compressão ou por injeção).

Impregnação por injeção de resina (Resin Transfer Moulding - RTM): No processamento típico de RTM, a pré-forma (reforços no formato da peça) é inicialmente preparada e posicionada no molde. Esse é então fechado e a pré-forma é comprimida para obter-se a fração volumétrica desejada de fibras. Em seguida, a resina é injetada no molde e as fibras são impregnadas, ver *Figura 4*. Finalmente, depois da cura da resina, o molde é aberto e a peça retirada. Se necessário, a peça pode sofrer um tratamento de pós-cura para atingir o máximo de suas propriedades. O molde de RTM deve possuir pelo menos uma entrada, para injeção da resina, e uma saída, para permitir, durante a injeção da resina, a saída do ar existente no interior do molde. Em peças maiores, é comum, porém, a presença de várias entradas e saídas. (AMORIM JÚNIOR, 2007)

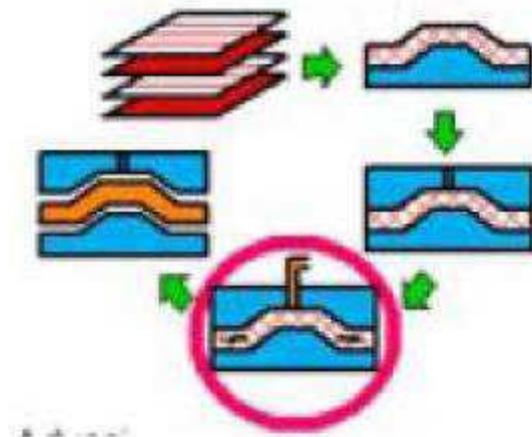


Figura 4 - Esquema básico de processamento por RTM: injeção de resina em uma pré-forma (arranjo de fibras organizadas no formato da peça) no interior de um molde rígido.  
[Fonte: (AMORIM JUNIOR, 2007)]

Impregnação Pré-peg: processo onde o tecido utilizado como reforço é moldado e impregnado por uma resina, que não sofre o processo de cura à pressão e temperatura ambiente, antes de ser acomodado no molde final. Neste processo é necessário o uso de autoclaves para finalizar a confecção das peças.

Estruturas fabricadas em materiais compósitos são susceptíveis a diversos tipos de defeitos, como a delaminação, vazios ou porosidade, inclusões, regiões com acúmulo de resina, orientação ou alinhamento de camadas incorreto, queima de resina na superfície, vincos na camada superficial, e descolamento no caso de estruturas laminadas com núcleo. Estes defeitos podem ocorrer devido ao processo de fabricação ou mesmo resultado de um dano em serviço. Os defeitos mais comuns advindos do processo de fabricação são a delaminação e a presença de vazios ou porosidade (ANCELOTTI JR, 2006).

A delaminação pode ser caracterizada como uma separação de camadas em um compósito como resultado de bolsas de ar ou uma contaminação por objetos estranhos durante o processo de laminação. Os vazios ou porosidade podem ser caracterizados pela formação de microbolhas de ar que ao serem aprisionadas no laminado tendem a se localizar entre as suas camadas (ANCELOTTI JR, 2006).

Uma das formas de avaliar a quantidade de vazios presentes no material é através de um ensaio de ultrassom. Uma das formas de avaliar o resultado do ultrassom é pelo critério de Mar-Lin. O critério de Mar-Lin é utilizado para avaliação do efeito dos vazios em compósitos de acordo com a equação:

$$\sigma_f = H(\alpha)^{-m} \quad ((2))$$

Onde  $\alpha$  representa o coeficiente de absorção ultra-sônico do compósito em dB/mm, cujo valor é relacionado ao conteúdo de vazios no compósito,  $H$  representa a tenacidade do compósito e  $m$  a ordem de singularidade (ANCELOTTI JR, 2006).

A influência da porosidade na propriedade de cisalhamento pode ser analisada sob o critério de fratura de Mar-Lin. Este critério associado à inspeção por ultra-som e às medidas da porcentagem de vazios, permitem uma avaliação dos níveis de porosidade onde os valores de resistência ao cisalhamento começam a ser influenciados de maneira crítica. Sob esse critério de análise, o nível de porosidade crítica para compósitos de tecido de fibras de carbono/resina epóxi tem início a partir de 0,9%, e para compósitos unidirecionais a partir de 0,75%. (COSTA, et al., 2001).

O critério proposto considera que abaixo de um valor de coeficiente de atenuação crítico conhecido por  $\alpha$  crítico (relativo ao conteúdo de vazios crítico) as propriedades do material não são afetadas pela presença de vazios (ANCELOTTI JR, 2006).

A variação da resistência ao cisalhamento interlaminar é mais sensível a defeitos como vazios, trincas, inclusões e áreas de colagem defeituosas, porque o esforço é concentrado na interface fibra/matriz ou entre as lâminas de compósitos, onde preferencialmente se localizam os poros. Além disso, a presença destes defeitos pode causar dispersões consideráveis na medida das propriedades em cisalhamento fazendo com que o ensaio em cisalhamento seja efetivo na investigação dos efeitos da porosidade em compósitos (WISNOM, et al., 1996).

A *Figura 5* apresenta a influência da quantidade de vazios em relação a fração volumétrica do compósito com redução do valor do cisalhamento interlaminar.

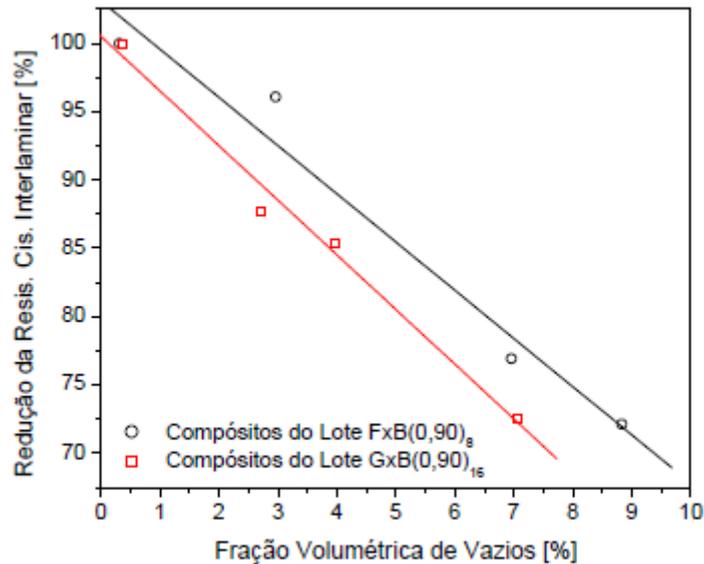


Figura 5 - influência da fração volumétrica de vazios na resistência ao Cisalhamento Interlaminar  
[Fonte: (ANCELOTTI JR, 2006)]

É possível observar que a porcentagem de vazios e defeitos afetam significativamente o valor do cisalhamento interlaminar.

A Figura 6 apresenta uma ilustração representativa para explicar a diferença das tensões obtidas através do ensaio de cisalhamento.

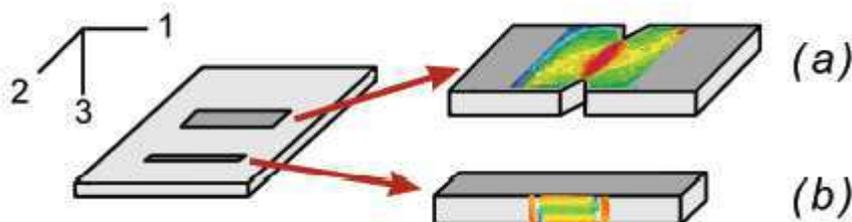


Figura 6 - Ilustração representativa das tensões Interlaminares e perpendiculares.  
[Fonte: (MELIN, 2008)]

O corpo de prova (a) é utilizado para obter o valor do cisalhamento no plano de fabricação da placa compósita (in-plane). O corpo de prova (b) é utilizado para obter o valor do cisalhamento na direção perpendicular a placa compósita (out-of-plane).

A Figura 7 apresenta uma representação esquemática explicando a diferença da obtenção da propriedade de cisalhamento Intralaminar e cisalhamento Interlaminar a partir dos ensaios de cisalhamento com entalhe em “V”.

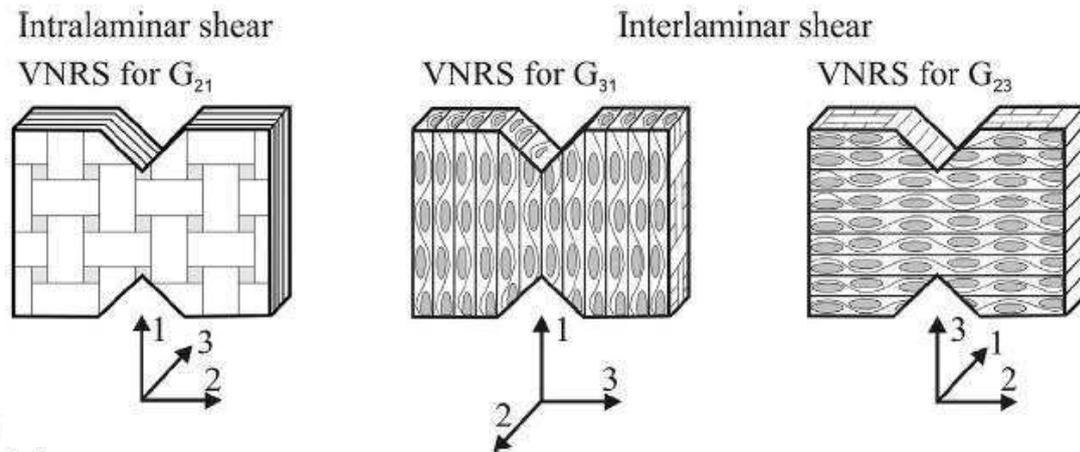


Figura 7 - Orientação do laminado no corpo de prova para obtenção das propriedades de cisalhamento [Fonte: (GUDE, et al., 2015)]

### 2.3 Influência da presença de vazios para a resistência mecânica dos compósitos

Vazios são os defeitos de fabricação mais comuns de serem encontrados nos compósitos. Eles são formados, principalmente, pelo aprisionamento de ar durante a aplicação da resina, em regiões do material com grande quantidade de reforço, e também são formados devido a absorção de umidade durante o processamento ou armazenamento do material. (COSTA, et al., 2001)

A porosidade é, em qualquer circunstância, danosa às propriedades mecânicas do compósito. Os efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas podem ser avaliados de várias maneiras, e principalmente por ensaios mecânicos (ANCELOTTI JR, 2006)

De fato, é aceito que um compósito laminado possui elevada qualidade de fabricação quando tem um teor máximo de vazio abaixo de 0,5%. O nível aceitável de vazios nos compósitos foi estabelecido por experimentos para caracterizar a influência dos vazios na resistência mecânica nos laminados. (ALMEIDA, et al., 1994)

A formação e o crescimento de vazios causam a perda da resistência, rigidez e vida em fadiga do laminado, muitas vezes resultando em falha catastrófica. Sabe-se que, a resistência dos compósitos a alguns tipos de esforços (cisalhamento interlaminar e compressão, entre outros) diminui com o aumento do volume de vazios. (COSTA, et al., 2001).

Propriedades relacionadas ao cisalhamento, por sua vez, são relativamente mais sensíveis a defeitos como vazios, trincas, inclusões e áreas de colagem defeituosas, porque o esforço é concentrado na interface fibra/matriz ou entre as lâminas de compósitos, onde preferencialmente se localizam os poros (ANCELOTTI JR, 2006).

ZHU (ZHU, 2009) avaliou a influência dos vazios para a resistência ao cisalhamento interlaminar de laminados de fibra de carbono/epoxy. A Figura 8 apresenta as micrografias obtidas por ZHU.

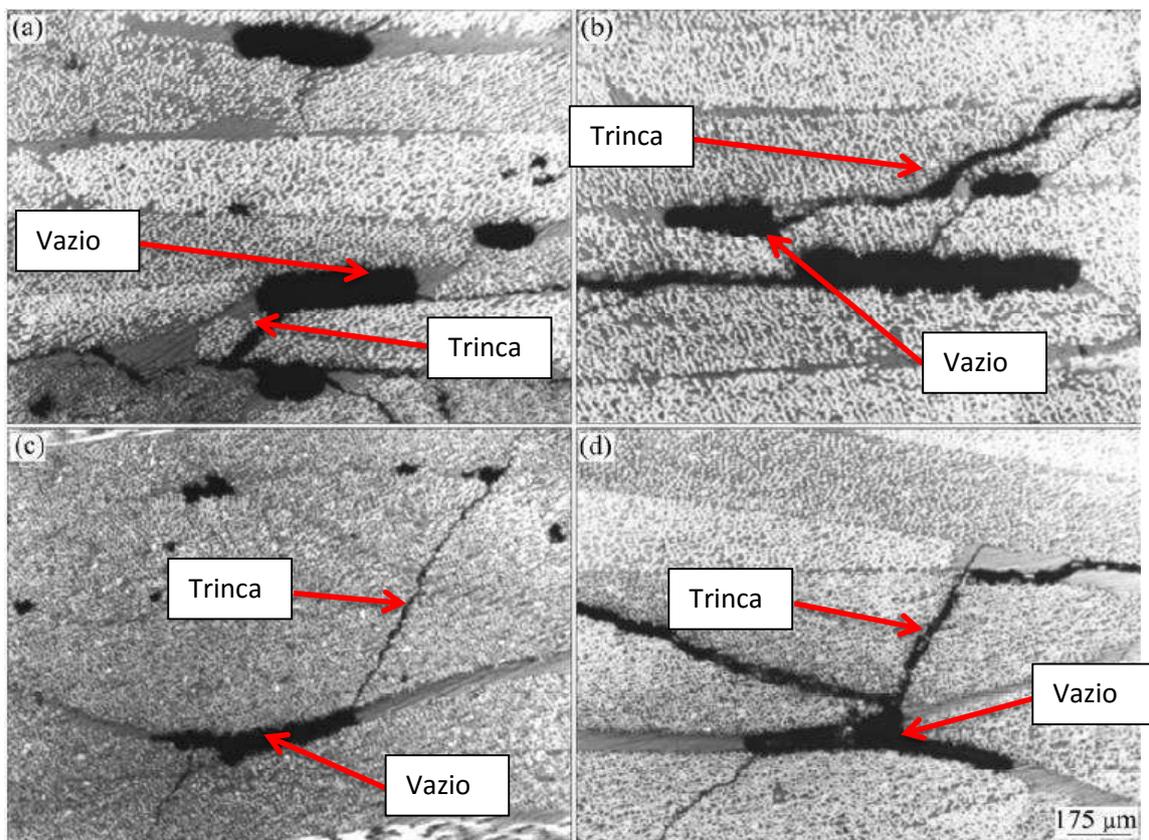


Figura 8 - Micrografias de corpos de prova ensaiados com diferentes frações de vazios mostrando as trincas propagando dos defeitos  
[Fonte: (ZHU, et al., 2009)]

É possível observar que as trincas iniciaram preferencialmente a partir dos vazios. ZHU concluiu que o início e a propagação das trincas é associada com os vazios encontrados nos laminados. A propagação envolve coalescência dos vazios e os vazios podem alterar a direção da propagação das trincas no laminado (ZHU, et al., 2009).

## 2.4 Tensão de Cisalhamento

A tensão de cisalhamento, tensão de ruptura ou tensão de corte, é o valor característico do material quanto à resistência a ruptura. Esse valor é função da força aplicada e da área do material. A *Figura 9*, a seguir, apresenta a representação esquemática da tensão de cisalhamento.

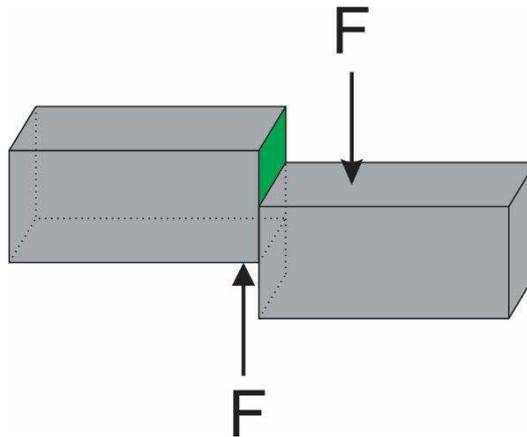


Figura 9 - Representação esquemática da tensão de cisalhamento no material.

Para os materiais mais comuns esse valor é obtido por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde,

- $\tau$  : Tensão de cisalhamento (MPa)
- $F$  : Força (N)
- $A$  : Área da seção transversal (mm<sup>2</sup>)

Nos compósitos o mecanismo de cisalhamento difere dos outros materiais devido à natureza heterogênea. Como o compósito é formado por mais de um material, em escala macroscópica, o cisalhamento é resultado da interação do material compósito com o esforço solicitante e do material matriz com o material disperso.

O ensaio de cisalhamento Interlaminar é um dos ensaios mais utilizados como ferramenta de avaliação qualitativa de materiais compósitos por proporcionar economia de matéria-prima e facilidade de obtenção do corpo-de-prova. (ANCELOTTI JR, 2006)

## 2.5 Dispositivos de ensaio de cisalhamento

### Flexão curta em três pontos

A Figura 10 a seguir apresenta uma representação esquemática do ensaio de flexão curta em três pontos

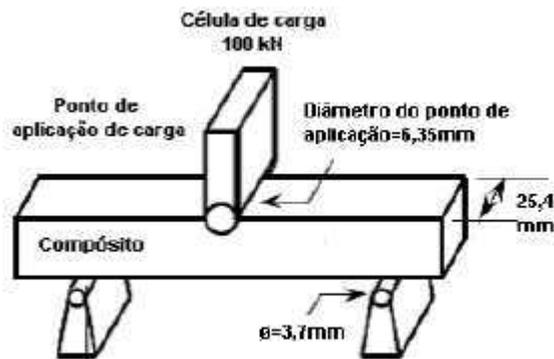


Figura 10 - Representação esquemática do ensaio de Flexão curta em três pontos  
[Fonte: (AMORIM JÚNIOR, 2007)]

O ensaio de flexão em três pontos consiste em impor um carregamento ao material no centro enquanto o corpo de prova fica apoiado pelas laterais. Ele é utilizado para materiais rígidos como as cerâmicas. O cisalhamento utilizando este ensaio é obtido por:

$$\tau = \frac{3P}{4bd} \quad (3)$$

Aonde,

- $\tau$  : Tensão cisalhante (MPa)
- $P$  : Carga máxima observada durante o teste (N)
- $b$  : Largura do corpo de prova (mm)
- $d$  : Espessura do corpo de prova (mm)

### Ensaio de tração Off axis test

O ensaio de tração Off-axis é utilizado para determinar o módulo de rigidez transversal em compósitos. Para isso se utiliza uma inclinação de 10 graus para a orientação preferencial das fibras.

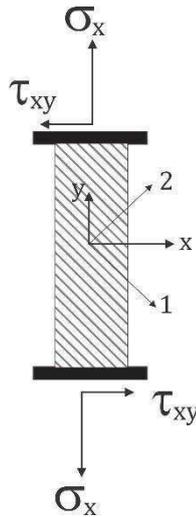


Figura 11 - Representação esquemática do ensaio Off-axis

Para determinar o módulo de rigidez transversal se utiliza a equação a seguir.

$$G_{12} = \frac{\text{sen}^2 \phi \text{cos}^2 \phi}{\frac{1}{E_x} - \frac{\text{cos}^4 \phi}{E_1} - \frac{\text{sen}^4 \phi}{E_2} + \left( \frac{\nu_{21}}{E_1} + \frac{\nu_{12}}{E_2} \right) \text{sen}^2 \phi \text{cos}^2 \phi} \quad (4)$$

Aonde,

- $G_{12}$  : Módulo de rigidez transversal (MPa)
- $\phi$  : Ângulo de inclinação do laminado
- $E_i$  : Modulo de elasticidade (MPa)

Para a determinar o módulo de rigidez transversal de compósitos laminados por este método é necessário que o ângulo de orientação do laminado ( $\phi$ ) seja de  $10^\circ$ .

### Ensaio Arcan

Neste método a questão não é procurar encontrar a solução para ter, num plano bem determinado, uma tensão cisalhamento pura, mas sim encontrar uma possibilidade em que as tensões de compressão e tração criadas indiretamente no plano do cisalhamento, sejam as menores possíveis e sempre que realizável quantificar a sua influência. (SANTOS, 2007).

A *Figura 12* apresenta uma representação esquemática do ensaio Arcan.

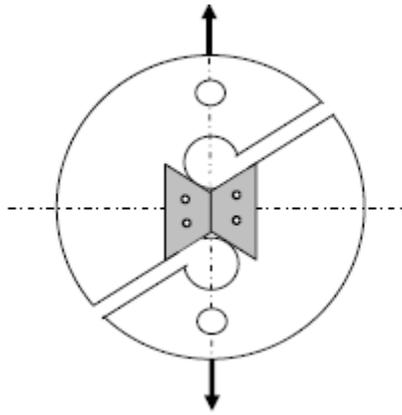


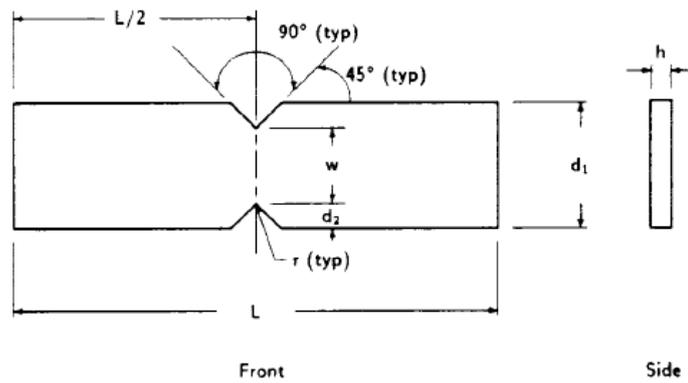
Figura 12 - Representação esquemática do ensaio Arcan  
[Fonte: (SANTOS, 2007)]

O método de Arcan só é aplicável para a avaliação do cisalhamento no plano paralelo às fibras. (LIU, 1996)

### **Ensaio de cisalhamento interlaminar losipescu**

O método losipescu consiste em utilizar um corpo de prova com uma geometria particular, como seja, a partir de um paralelepípedo retangular de pequena dimensão são cortadas centralmente duas incisões em V com o vértice apontado para o centro de geometria central, utilizando depois um dispositivo metálico que induz tensões de cisalhamento (quase puro) num plano bem determinado. (SANTOS, 2007)

O método permite ainda a medição rigorosa das deformações, quer com aplicação de extensômetros colados (operação difícil, dispendiosa e demorada), ou através de medições de deslocamentos nos acessórios com transdutores de precisão, embora neste caso com alguma perda de precisão (influência dos esmagamentos nos pontos de carga). (SANTOS, 2007).



Nominal Specimen Dimensions

|       |                      |
|-------|----------------------|
| $d_1$ | = 19 mm [0.75 in.]   |
| $d_2$ | = 3.8 mm [0.15 in.]  |
| $h$   | = as required        |
| $L$   | = 76 mm [3.0 in.]    |
| $r$   | = 1.3 mm [0.05 in.]  |
| $w$   | = 11.4 mm [0.45 in.] |

Figura 13 - Geometria do corpo de prova losipescu.  
[Fonte: ASTM D5379]

No teste de losipescu a avaliação da tensão de cisalhamento é obtida por meio da leitura de sinais de deformação em sensores montados no centro da amostra para  $\beta = \pm 45^\circ$ . As tensões de cisalhamento acontecem ao logo da linha A-B como apresentado na Figura 14 (PIERROW, et al., 1994).

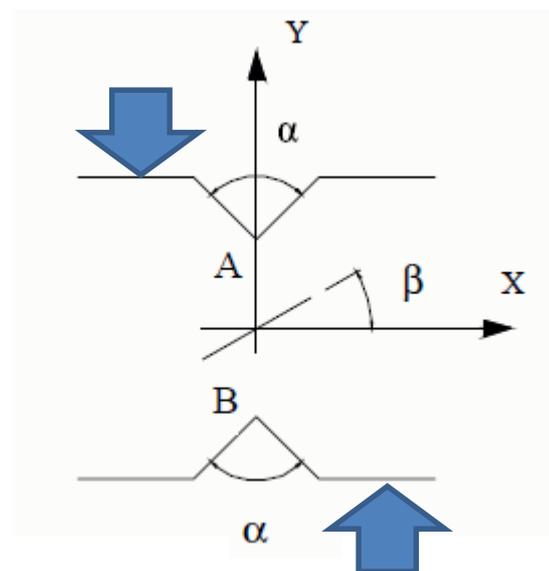


Figura 14 - Orientação das tensões de Cisalhamento no corpo de prova losipescu  
[Fonte: (HAWONG, et al., 2004)]

A tensão de cisalhamento é obtida a partir do valor de carregamento máximo obtida no ensaio. A equação (4), a seguir, mostra como obter o valor da tensão de cisalhamento máximo do material.

$$\tau = \frac{F_{falha}}{A} \quad (5)$$

Aonde,

- $\tau$  : Tensão de cisalhamento (MPa)
- $F_{falha}$  : Força de ruptura (N)
- $A$  : Área (mm<sup>2</sup>)

A figura a seguir apresenta o resultado esperado durante a realização do ensaio.

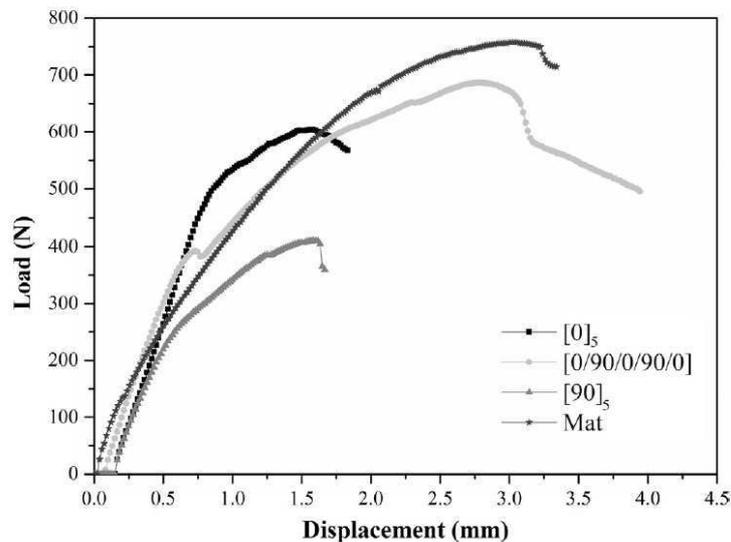


Figura 15 - resposta típica do corpo de prova durante a realização do ensaio Iosipescu.  
[Fonte: (ALMEIDA JR, et al., 2014)]

Na Figura 15 é apresentado o gráfico típico do ensaio Iosipescu. É possível observar que a orientação do reforço dentro da matriz tem grande influência no valor obtido.

### Ensaio Two Rail Shear

A figura a seguir apresenta a montagem do ensaio Two Rail Shear.

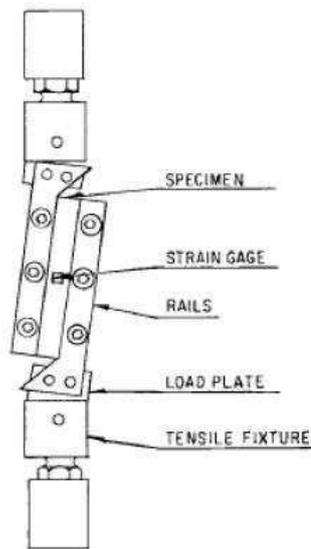


Figura 16 - Representação esquemática do ensaio Two Rail Shear  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2003)]

A Figura 16 apresenta a representação esquemática do ensaio Two Rail Shear.

O método Two Rail Shear tem sido criticado pela comunidade de materiais por várias deficiências. Seis orifícios precisam ser usinados na amostra para acomodar os parafusos de aperto, tornando a preparação da amostra um processo dispendioso e demorado. Além disso a determinação da resistência ao cisalhamento utilizando este dispositivo é questionável devido aos níveis de estresse provocados pelas calhas. É muito difícil obter uma compressão adequada no carregamento realizado através das faces do corpo de prova, principalmente para compósitos de alta resistência ao cisalhamento (ADAMS, et al., 2005).

### **V-Notched Rail Shear**

Para caracterizar completamente as propriedades de cisalhamento de um material compósito, tanto as propriedades de cisalhamento plano quanto as propriedades interlaminares (perpendiculares ao plano de carregamento) precisam ser determinadas. Para cada orientação do laminado, o Módulo de Cisalhamento ( $G$ ) e a tensão de Cisalhamento ( $\tau$ ) são necessários. (ADAMS, et al., 2002)

Determinar as propriedades de cisalhamento para um compósito unidirecional é necessário para que sejam obtidos o módulo de cisalhamento e

a força de cisalhamento de um compósito com laminados multidirecionais. Para compósitos laminados com arranjos de orientação do tecido (diferente de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ), a resistência ao cisalhamento aumenta drasticamente, tornando a aplicação de carregamento no corpo de prova problemática. Tanto o losipescu V-notched shear test quanto o two rail shear test são métodos de ensaio utilizados para o cisalhamento uniaxial de compósitos laminares com elevada resistência ao cisalhamento, mas são comuns os problemas de carregamento e fixação. (ADAMS, et al., 2005)

O ensaio V-Notched rail shear foi desenvolvido para medir as propriedades de cisalhamento plano de uma variedade de compósitos laminares. Este método de ensaio incorpora elementos importantes dos ensaios losipescu e Two rail shear. Este ensaio proporciona uma elevada região para medição se comparado com o losipescu e uma capacidade de carregamento aprimorada se comparada com outros métodos de ensaio existentes. . (ADAMS, et al., 2002)

O método de ensaio tipo losipescu, mostrado na *Figura 17*, é capaz de determinar tanto as propriedades biaxiais quanto as interlaminares de um compósito unidirecional. Uma região de medição relativamente pequena proporciona limitações para alguns compósitos reforçados com tecidos e o carregamento lateral do corpo de prova limita o carregamento que pode ser aplicado ao corpo de prova sem produzir fraturas localizadas. Para compósitos unidirecionais essas limitações não são um problema, porque o cisalhamento biaxial e o cisalhamento interlaminar são relativamente pequenos. Para compósitos com laminados multidirecionais, entretanto, elevadas tensões de ruptura são possíveis, e, para estes laminados, um carregamento elevado é necessário. (ADAMS, et al., 2002)

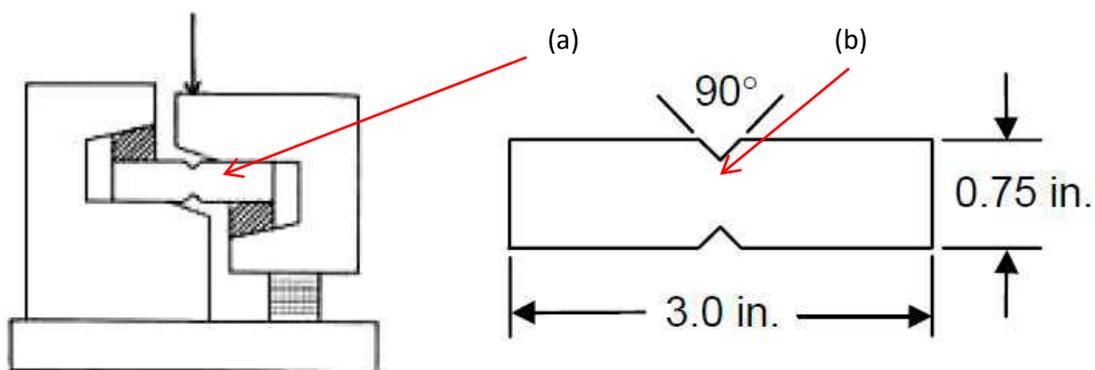


Figura 17 - representação esquemática do ensaio losipescu e do corpo de prova.  
[Fonte: (COSTA, et al., 2001)]

O corpo de prova (a) possui região de medição (b) localizada entre os entalhes.

Outra diferença do ensaio V-Notched Rail Shear em relação ao teste losipescu é o aumento do comprimento livre entre os entalhes, que permite o teste de polímeros reforçados com tecido com um aumento da capacidade de transferência de carregamento e reprodutibilidade. (GUDE, et al., 2015)

O dispositivo do ensaio Two-Rail shear, apresentado na Figura 18, utiliza um corpo de prova retangular relativamente largo (3" x 6") retangular. Seis furos precisam ser usinados no corpo de prova para a passagem dos parafusos utilizados na fixação no trilho. A determinação da resistência ao cisalhamento utilizando este ensaio é questionável por conter concentradores de tensão produzidos no corpo de prova. Além disso, o escorregamento entre a amostra e os trilhos é uma limitação do ensaio. (ADAMS, et al., 2002)

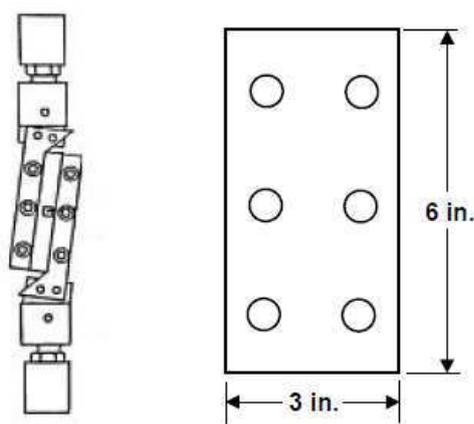


Figura 18 - Representação esquemática do ensaio Two Rail Shear  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2002)]

Hussain (Hussain, et al., 1998) modificou o sistema de fixação do ensaio Two Rail Shear para a utilização de garras rugosas. Utilizando a configuração garra-C, apresentada na *Figura 19*, a necessidade de furações no corpo de prova foi eliminada.

Com esta modificação no sistema de fixação, o ensaio Two Rail Shear se tornou promissor para a determinação da resistência ao cisalhamento. (ADAMS, et al., 2002)

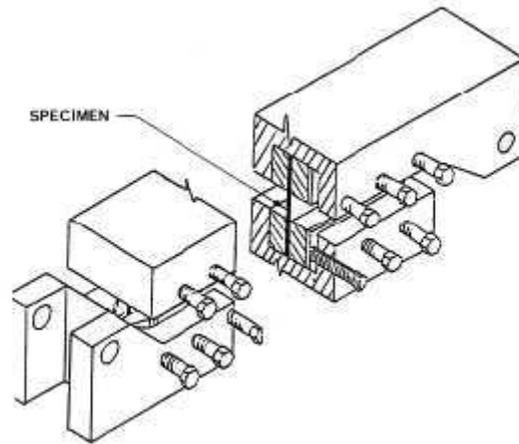


Figura 19 - Configuração esquemática do ensaio Two Rail Shear modificado  
[Fonte: (Hussain, et al., 1998)]

O ensaio V-notched Rail Shear, ASTM D7078, incorpora características atraentes para permitir o ensaio de cisalhamento de compósitos laminados e compósitos de tecidos. O primeiro elemento incorporado do ensaio Iosipescu é o entalhe duplo, que produz um carregamento relativamente uniforme na região central dos entalhes na posição do extensômetro. No entanto, para conseguir imprimir um maior cisalhamento no corpo de prova, o método de carregamento do ensaio Two-Rail Shear foi incorporado. Finalmente para permitir que um elevado nível de cisalhamento possa ser gerado ao corpo de prova, o comprimento da secção de teste é três vezes maior que o ensaio Iosipescu (ADAMS, et al., 2005)

Isso significa que o corpo de prova do ensaio V-Notched Rail Shear possui secção de teste de 3”.

O dispositivo de ensaio consiste de duas metades, cada bloco em forma de “L” possui uma cavidade usinada que aloja duas placas de aperto. A tolerância entre o comprimento das placas de aperto e a cavidade retangular garante que as placas de aperto encaixem precisamente nos blocos externos. A cavidade retangular forma duas flanges. Três furos de parafusos com rosca são usinados em cada flange para acomodar parafusos de aço de cabeça hexagonal. Estes parafusos fornecem a força necessária para as placas de aperto fixarem o corpo de prova. O uso de parafusos opostos sobre os dois lados da cavidade retangular permite a centragem do corpo de prova, independente da espessura da amostra. (ADAMS, et al., 2005)

A figura a seguir traz uma representação esquemática do ensaio.

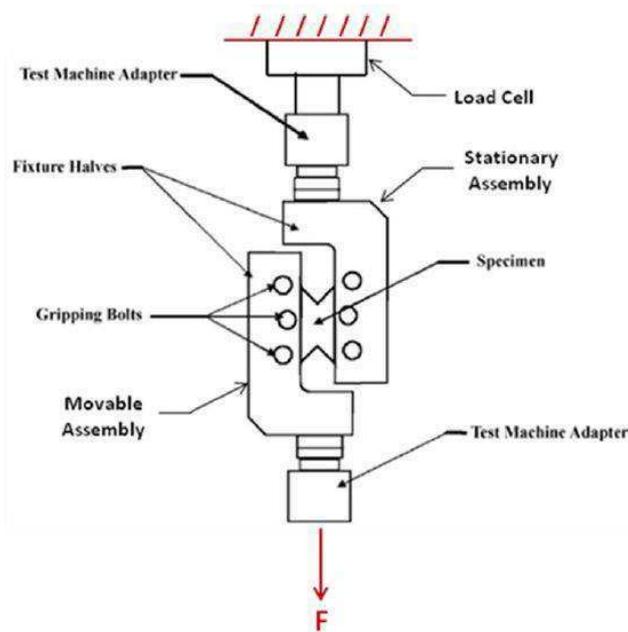


Figura 20 - representação esquemática do ensaio V-Notched Rail Shear.  
 [Fonte: (TATIPALLI, 2008)]

A Figura 20 apresenta os principais elementos do ensaio V-Notched Rail Shear.

A seção de testes do corpo de prova V-notched Rail Shear (VNRS) é baseado no corpo de prova tipo losipescu, com importantes alterações. Primeiramente o comprimento do corpo de prova é uma razão de três em relação ao losipescu (o ensaio losipescu possui seção de teste de 0,75" enquanto o V-Notched Rail Shear possui seção de testes de 2,25") o que promove uma região mais ampla para testar compósitos reforçados por tecidos. Outra característica é uma maior distância livre entre as partes do dispositivo (distância entre as sapatas de aperto), o losipescu é de 11mm enquanto no VNRS esta distância é aumentada para 31.0mm. A relação da profundidade do entalhe e a região de medição foi mantida em relação ao ensaio losipescu. Além disso, as duas zonas de extremidade de cada lado da seção de ensaio entalhado de V, utilizado para o carregamento da amostra pela borda no losipescu, foram encurtados para a utilização da carga pela face no ensaio VNRS. (ADAMS, et al., 2005)

A figura a seguir apresenta o corpo de prova V-Notched Rail Shear.

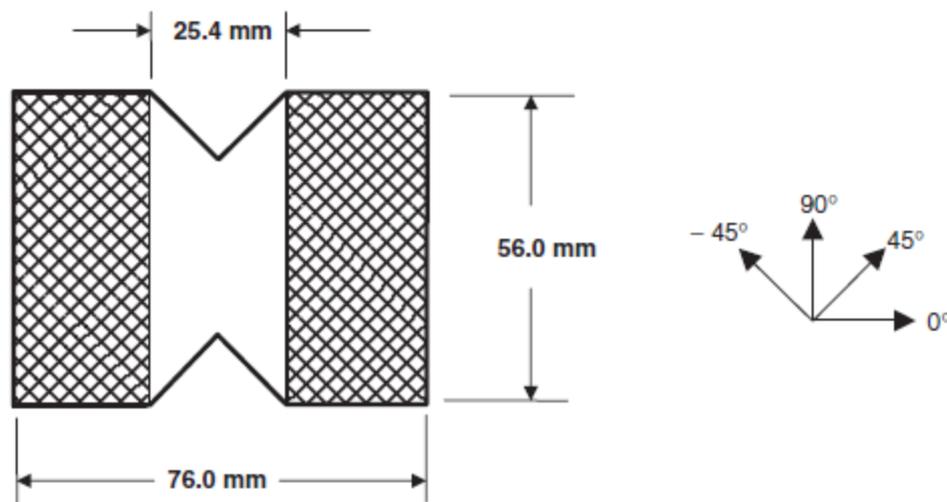


Figura 21 - Geometria do corpo de Prova V-Notched Rail Shear.  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2005)]

Na Figura 21 é possível observar a geometria do corpo de prova para o ensaio V-Notched Rail Shear. A área hachurada representa a área de contato, ou de carregamento pela face, do dispositivo de ensaio.

Em comparação com o corpo de prova retangular do ensaio Two Rail Shear (ASTM D4255, apresentado na Figura 18), o corpo de prova VNRS, apresentado na Figura 20, apresenta duas vantagens importantes. A primeira é a uniformidade da distribuição da tensão de cisalhamento na região central do corpo de prova. Esta uniformidade é importante para determinar o módulo de cisalhamento e a tensão de cisalhamento. A segunda vantagem está no fato da área reduzida, proporcionada pelo entalhe em V, proporcionar um aumento da tensão de cisalhamento na região de medição em relação a tensão de cisalhamento provocada pelas sapatas de aperto. Como resultado a ruptura do corpo de prova ocorre na região do extensômetro e não sofre influências significativas da fixação feita através das garras. A relação entre a seção transversal do ensaio corpo de prova com entalhe em V, definida como a razão entre a largura da seção do "Gauge" ( distância entre entalhes ) para o comprimento da seção do "Gauge" ( distância entre as placas de aperto ) foi reduzida significativamente em comparação com a amostra de Two Rail Shear. (ADAMS, et al., 2005)

O escorregamento do corpo de prova em relação as sapatas de aperto é comum e é recomendado que aumente o torque utilizado nos parafusos de aperto para eliminar este problema. No entanto, vários ensaios mostraram que o torque alto nos parafusos provoca problemas, tanto a rotação de ambas as

metades de fixação, resultando em uma flexão da amostra, e falhas prematuras, como resultado de picos de tensão na área de aperto. (ADAMS, et al., 2005)

Se a obtenção do módulo de cisalhamento for desejada, extensômetros colados são utilizados. Normalmente, dois extensômetros são utilizados, orientados a 45° em relação a direção do carregamento e na região central dos entalhes. Esses dois elementos medem a deformação normal a 45° e -45° respectivamente. Se o corpo de prova rotacionar na direção perpendicular, pode-se utilizar dois conjuntos de extensômetros separados, montados nas duas faces do corpo de prova. O resultado de deformação obtida pode ser utilizado para obter o módulo de cisalhamento. Resultados obtidos de outros autores mostram que a rotação do corpo de prova é mínima. (ADAMS, et al., 2005)

A deformação é calculada pela expressão:

$$\gamma = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}| \quad ((5))$$

- $\gamma$  : Deformação no centro da amostra
- $\varepsilon_{+45}$  : Deformação do sensor posicionado a 45°
- $\varepsilon_{-45}$  : Deformação do sensor posicionado a -45°

Para o cálculo do módulo do cisalhamento, assume-se que há uma distribuição uniforme na região central, entre os entalhes (ADAMS, et al., 2005).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad ((6))$$

- $\tau$  : Tensão de cisalhamento em MPa
- $F$  : Força em N
- $A$  : Área da seção central da amostra em mm<sup>2</sup>

Uma outra propriedade que pode ser obtida por este ensaio é o módulo de rigidez. Para isso, considera-se que a área da seção entre os entalhes não varia e, por isso, recebe a designação de rigidez transversal equivalente. Esta maneira de calcular é apresentada na equação a seguir.

$$G^0 = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad ((7))$$

- $G^0$  : Módulo de rigidez transversal equivalente.
- $\Delta\tau$  : Variação da tensão de cisalhamento.
- $\Delta\gamma$  : Variação da deformação localizada no centro da amostra.

A Figura 22, a seguir, apresenta o gráfico ( carregamento x Deslocamento) típico de um ensaio V-Notched Rail Shear para diferentes orientações de laminados.

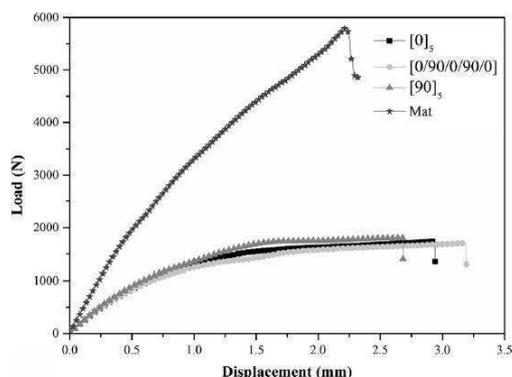


Figura 22 - resposta típica do corpo de prova durante a realização do ensaio V-NotchRailShear.  
[Fonte: (ALMEIDA JR, et al., 2014) ]

É possível observar que a orientação preferencial do reforço dentro do material compósito tem grande influência no valor da resistência.

## 2.5 Iosipescu x V-Notched Rail Shear

O ensaio de cisalhamento Iosipescu e o ensaio V-Notched Rail Shear são padrões ASTM, ASTM D 53791 e D 70782, respectivamente. Os dois ensaios são utilizados para a determinação do cisalhamento com estado uniaxial de tensão e podem ser utilizados para o cisalhamento interlaminar (ADAMS, 2009).

Para obter dados precisos de propriedades ligadas ao cisalhamento, os dois métodos de ensaio, Iosipescu e V-Notched Rail Shear podem ser utilizados (ADAMS, 2009).

Pesquisadores podem aumentar o comprimento do corpo de prova V-Notched Rail Shear em relação ao Iosipescu para promover uma larga zona de cisalhamento uniforme entre os entalhes. Um acréscimo dimensional similar não é possível no corpo de prova tipo Iosipescu, a menos que a espessura do corpo de prova aumente na mesma proporção para suportar o carregamento mais alto sem fraturar, inadequadamente, por flambagem. Para o corpo de prova VNRS a largura pode aumentar sem ser necessário aumentar a espessura do corpo de prova. Isto é possível porque o carregamento pela face frontal do corpo de prova é mais eficiente que o carregamento feito pela face superior (ADAMS, 2009).

Os níveis de cisalhamento que podem ser atingidos no corpo de prova VNRS são três a quatro vezes maiores que o losipescu. Esta característica não é importante quando se está ensaiando materiais com baixa resistência ao cisalhamento ( $< 140$  MPa). O ensaio de cisalhamento losipescu também pode acomodar estes materiais, mas é necessário a utilização de reforços. Por outro lado, laminados que possuem elevados números de camadas tendem a exibir uma elevada resistência ao cisalhamento e não podem ser testados satisfatoriamente utilizando o carregamento lateral do VNRS. Por exemplo, com laminados orientados a  $\pm 45^\circ$ , e resistência ao cisalhamento superior a 500 MPa quando ensaiados tendem a escorregar antes de ser atingido o limite de resistência ao cisalhamento.

Este trabalho apresenta a fabricação de dois dispositivos de ensaio de cisalhamento Interlaminar (ILSS). O primeiro dispositivo de ensaio apresentado é o dispositivo para ensaio tipo losipescu, bem como suas fases de concepção do projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e testes.

Em seguida apresenta o dispositivo para ensaio tipo V-Notched Rail Shear, e também apresenta suas fases de concepção do projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e testes.

## **2.6 Extensometria**

O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Sua utilização constitui um meio de se medir e registrar o fenômeno da deformação como sendo uma grandeza elétrica (BARRETO JR).

O extensômetro elétrico é utilizado para medir deformações em diferentes estruturas tais como: pontes, máquinas, locomotivas, navios e associado a instrumentos especiais (transdutores), possibilita a medição de pressão, tensão, força, aceleração e outros instrumentos de medidas que são usados em campos que vão desde a análise experimental de tensão até a investigação e práticas médicas e cirúrgicas (BARRETO JR).

As características do extensômetro elétrico de resistência podem ser resumidas no seguinte:

- Alta precisão de medida;
- Baixo custo;
- Excelente resposta dinâmica;
- Excelente linearidade;
- Fácil de instalar;
- Pode ser utilizado imerso em água ou em atmosfera de gás corrosivo, desde que se faça o tratamento adequado;
- Possibilidade de se efetuar medidas à distância.

A utilização de extensômetros colados à superfície do material ensaiado é uma forma de se obter a deformação. O extensômetro é um resistor depositado sobre um filme polimérico. Quando o filme se alonga o elemento resistivo que constitui o extensômetro também se alonga.

A resistência elétrica de um condutor de seção uniforme é dada pela equação:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad ((8))$$

Aonde,

- $\rho$  : Resistividade do material
- $l$  : Comprimento
- $A$  : Área

### ***Tipos de extensômetros.***

Existem disponíveis no mercado, diversos tipos de extensômetros elétricos, que podem ser classificados de acordo com:

- **Os materiais utilizados como elemento resistivo**

**Extensômetro de fio:** O extensômetro de fio é constituído de fio resistivo, colado em um suporte que serve para transmitir as deformações da peça em estudo, para o fio, que constitui o elemento sensível, e também deve isolar eletricamente esse fio. Atualmente o extensômetro de fio é muito pouco utilizado em comparação com o extensômetro de lâmina (BARRETO JR).

**Extensômetro de lâmina (metal-foil strain gages):** Estes extensômetros, em princípio, são idênticos aos de fio. A diferença básica está no processo de fabricação, em que se usa uma finíssima lâmina de uma liga resistiva, da ordem de 3 a 10  $\mu\text{m}$ , recortada por processo de máscara fotosensitiva corroída com ácido (idêntico ao processo de fabricação de circuito impresso).

As vantagens deste tipo de extensômetro sobre o de fios, além da versatilidade de fabricação, é que possuem uma área maior de colagem, e em consequência disto, diminui a tensão no adesivo, obtendo-se assim deformação lenta e histerese bem menores. Outra vantagem é o da dissipação térmica, bem melhor que nos de fio, possibilitando circuitos mais sensíveis, uma vez que o nível de excitação do extensômetro depende da dissipação térmica do mesmo. (BARRETO JR)

**Extensômetro de semicondutor:** O extensômetro de semicondutor consiste basicamente de um pequeno e finíssimo filamento de cristal de silício que é geralmente montado em suporte epóxico ou fenólico.

As características principais dos extensômetros elétricos de semicondutores são: sua grande capacidade de variação de resistência em função da deformação e seu alto valor do fator de extensômetro, que é de aproximadamente 150, podendo ser positivo ou negativo (BARRETO JR).

Nos extensômetros de semicondutores, entretanto, o fator do extensômetro varia com a deformação, numa relação não linear. Isto dificulta a interpretação das leituras desses dispositivos. Entretanto é possível se obter circuitos eletrônicos que linearizem esses efeitos (BARRETO JR).

- **Os materiais utilizados como base:**

Cada tipo de material utilizado como base, em combinação com o material utilizado na fabricação da lâmina, faz com que o extensômetro tenha uma aplicação específica para: medição dinâmica, medição estática, ou para utilização em alta temperatura. Os fabricantes têm à disposição grande variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, permitindo a escolha correta para cada caso específico. Quanto ao material os extensômetros mais comuns são de: Extensômetro com base de papel, Extensômetro com base de baquelita, Extensômetro com base de poliéster, Extensômetro com base de poliamida, Extensômetro com base epóxica. (BARRETO JR).

- **A configuração da grade**

**Extensômetro axial único:** Utilizado quando se conhece a direção da deformação, que é em um único sentido.

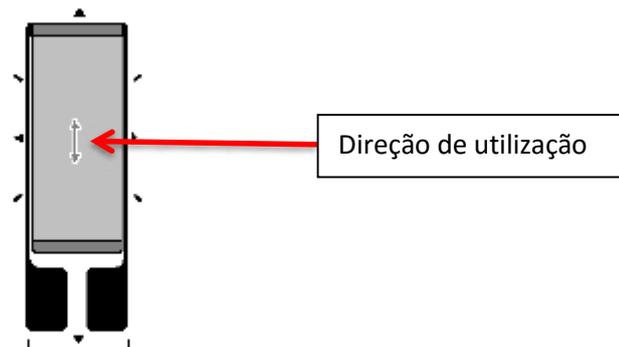


Figura 23 - Representação gráfica do elemento extensômetro axial Único  
[Fonte: (BARRETO JR)]

A *Figura 23* apresenta a representação gráfica do extensômetro uniaxial e sua direção preferencial de utilização.

**Extensômetro axial múltiplo (roseta de extensômetro):**

**Roseta de duas direções:** São dois extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a duas direções. É utilizada para se medir as deformações principais quando se conhecem as direções.

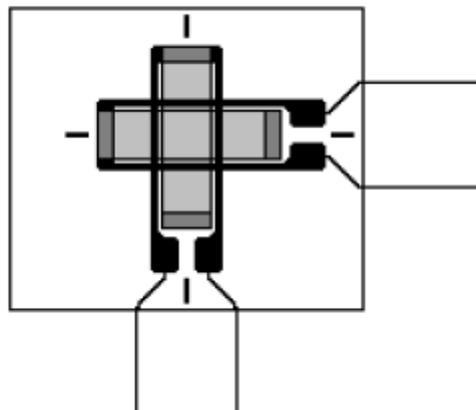


Figura 24 - Representação gráfica do elemento extensômetro Roseta de duas direções  
[Fonte: (BARRETO JR)]

A *Figura 24* apresenta a representação gráfica do extensômetro tipo roseta de duas direções.

**Roseta de três direções:** São três extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a três direções. É utilizada quando as direções principais de deformações não são conhecidas.

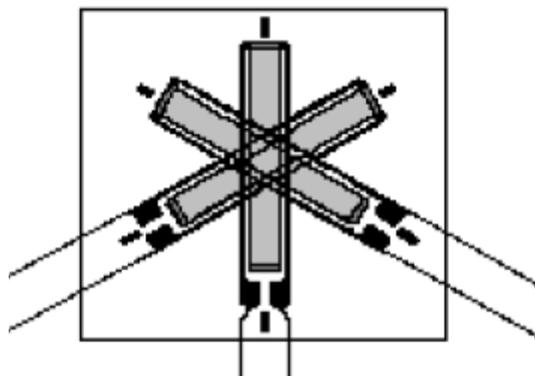


Figura 25 - Representação gráfica do elemento extensômetro Roseta de três Direções  
[Fonte: (BARRETO JR)]

A *Figura 25* apresenta a representação gráfica de um elemento extensômetro Roseta de três direções nas direções  $120^{\circ}/0^{\circ}/-120^{\circ}$ . Existe também rosetas triplas nas direções  $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ .

**Extensômetro com modelos especiais:**

**Extensômetro tipo diafragma:** São quatro extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em duas posições diferentes. É utilizado para transdutores de pressão.

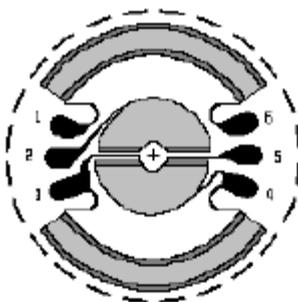


Figura 26 -Representação gráfica do elemento extensômetro tipo diafragma  
[Fonte: (BARRETO JR)]

A *Figura 26* apresenta o elemento extensômetro tipo diafragma.

**Extensômetro para medida de tensão residual:** São três extensômetros sobre uma mesma base devidamente posicionados para utilização em método de medida de tensão residual.

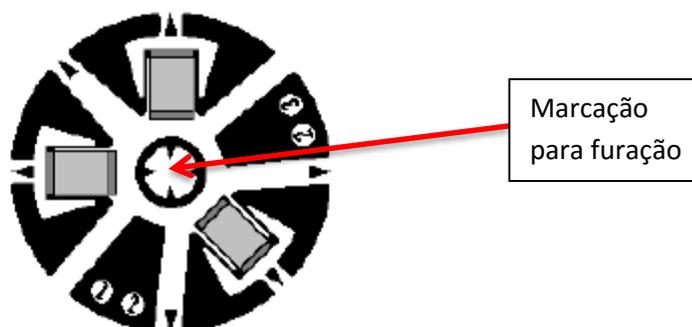


Figura 27 -Representação gráfica do elemento extensômetro para tensão residual  
[Fonte: (BARRETO JR) ]

A *Figura 27* apresenta o elemento extensômetro específico para medição da tensão residual. A posição central deste extensômetro serve de referência para a furação do ensaio de medição da tensão residual.

**Extensômetro para transdutores de carga:** São dois extensômetros dispostos lado a lado, sobre uma mesma base, para utilização em células de cargas.

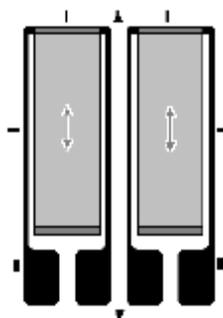


Figura 28 - Representação gráfica do elemento extensômetro para transdutores de carga.  
[Fonte: (BARRETO JR) ]

A *Figura 28* apresenta uma representação gráfica de um elemento extensômetro para transdutores de carga e sua direção preferencial de carregamento.

Os fabricantes de materiais para extensômetro, fornecem gratuitamente folhetos e catálogos técnicos com todos modelos e tamanhos de extensômetros, dos produtos utilizados para colagem, impermeabilização e dos equipamentos de leituras (BARRETO JR).

A escolha correta do extensômetro deve obedecer basicamente a três fatores: Dimensão do extensômetro, Geometria da grade, Tipo do extensômetro.

A dimensão do extensômetro refere-se ao comprimento da grade, que é a parte sensível, conforme é mostrado na figura abaixo.

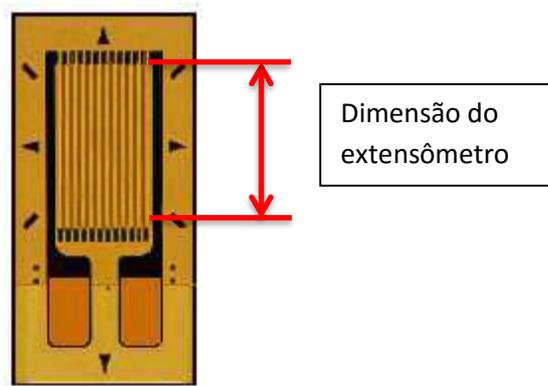


Figura 29 - representação esquemática da dimensão do extensômetro  
[Fonte: (BARRETO JR)]

É a consideração mais importante a ser feita, pois o extensômetro deve ser colado na região de maior deformação. A *Figura 30* apresenta um gráfico da distribuição ao redor de um ponto de elevada concentração de tensão e mostra também o erro cometido na medição da deformação por ter sido utilizado um extensômetro de dimensão maior do que o da região de concentração de tensão (BARRETO JR).

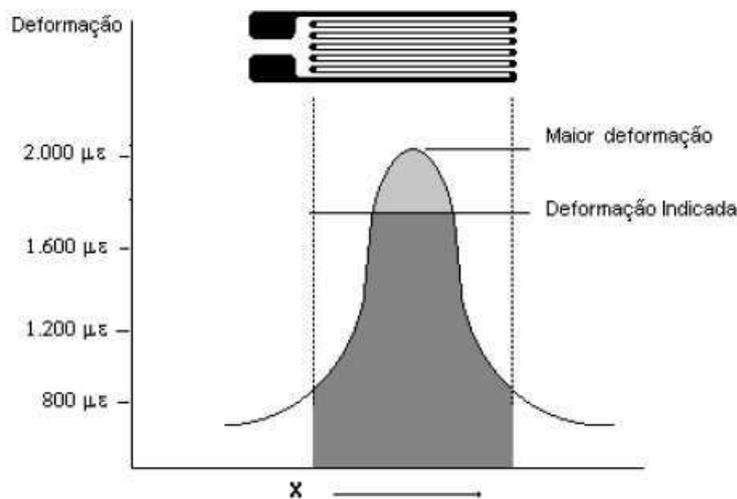


Figura 30 - gráfico da deformação específica do extensômetro em relação a sua dimensão  
[Fonte: (BARRETO JR)]

#### Geometria da grade:

A grade do extensômetro (elemento resistivo) deve ser posicionada de tal modo que a direção da deformação principal coincida com a direção da grade. Para o caso de medição de deformações em uma só direção, utilizamos o extensômetro simples. Quando são conhecidas duas direções principais, utilizamos um par de extensômetro denominados de roseta de dois elementos. Quando as direções principais de deformações não são conhecidas utilizamos a

roseta com três extensômetros que aplicados a um ponto, permite que se determine as amplitudes das deformações principais e a direção em que elas ocorrem. Para transdutores existem extensômetros especiais com modelos de grade que ficam posicionadas na direção da deformação principal. (BARRETO JR).

**Tipo do extensômetro:**

Para a escolha do tipo do extensômetro deve-se tomar em consideração: Medidas de natureza das deformações, temperatura de operação , limite de operação, capacidade de corrente de excitação, auto compensação da temperatura.

Medidas de natureza estática (ensaios quase-estáticos) requerem que os extensômetros tenham um grande desempenho. Sua escolha associada aos acessórios tais como: cola, materiais de impermeabilização e fios de conexões, deve ser feita para cada caso de aplicação, levando em consideração as limitações de toda instalação (BARRETO JR).

Um extensômetro para ser utilizado em medidas estáticas deve satisfazer as condições tais como: grande sensibilidade longitudinal (fator do extensômetro), mínima sensibilidade transversal, baixa sensibilidade à temperatura, onde grandes variações de temperatura ocorrem e máxima estabilidade elétrica e dimensional (BARRETO JR).

Para ensaios dinâmicos os extensômetros devem, além de ter uma grande sensibilidade longitudinal, devem ser confeccionados de materiais resistentes à fadiga

**Temperatura de operação:** Deve ser observada a temperatura de trabalho. Existem extensômetros para as mais variadas faixas de trabalho e o limite de temperatura de operação de um extensômetro depende dos componentes que entram na sua composição (BARRETO JR).

**Limite de deformação:** Existem na prática extensômetros para alongamento de até 10%, mas os mais comuns são para 2% de deformação. Esta propriedade depende da liga do filamento e dos materiais da base e sua colagem e, ainda, da própria fixação do extensômetro (BARRETO JR).

**Capacidade da corrente de excitação:** A corrente suportada pelo extensômetro é de grande importância na sensibilidade do sistema de medida, uma vez que a tensão de saída do aparelho em que está o extensômetro ligado,

é diretamente proporcional à corrente de excitação. Deve-se levar em conta a dissipação do calor gerado pelo efeito Joule nessa resistência que implica na estabilidade ou erro de leitura (BARRETO JR).

A corrente que deve ser imposta ao circuito é dependente do extensômetro em si, ou seja, do tamanho da grade, do tipo de base e do material em que está colado. Os valores práticos, para uma orientação, de maneira geral podem ser:

- Para os extensômetros de base de papel, a corrente suportada é de até 25 mA;
- Para os extensômetros de base de baquelita colado em metal pode suportar até 50 mA;
- Para os extensômetros aplicados em materiais de baixo coeficiente de condução térmica, tais como: plásticos, gesso, concreto e outros, é aconselhável não ultrapassar 6 mA de excitação.

Os instrumentos normais para uso em extensometria, funcionam com correntes inferiores a 5 mA (BARRETO JR).

Auto-compensação de temperatura: Quando forem utilizados extensômetros com coeficiente térmico linear diferente do coeficiente térmico do material onde o extensômetro está aplicado, ao variar a temperatura, o extensômetro estará sujeito a uma deformação aparente que é proveniente unicamente da variação da temperatura (BARRETO JR).

Os extensômetros auto-compensado com a temperatura, são obtidos combinados perfeitamente, o coeficiente de dilatação térmica da liga da grade, com o material em que está aplicado o extensômetro e mantendo o coeficiente de resistividade com a temperatura nula, evidentemente, para um dado intervalo de temperatura (BARRETO JR).

Para selecionar o extensômetro os fabricantes utilizam uma codificação própria para designar as características do elemento. A figura a seguir é um exemplo deste tipo de codificação.



Figura 31 - codificação utilizada pelo fabricante de extensômetros Excel sensores  
[Fonte: <http://www.excelsensor.com.br>]

A *Figura 31* apresenta a codificação feita pelo fabricante Excel sensores para codificar seus extensômetros. É possível observar as características mínimas necessárias para adquirir estes elementos.

Para definir o estado de tensão de um corpo de prova, quando as direções principais das deformações e tensões são desconhecidas, utiliza-se a roseta de 3 elementos em 0°, 45° e 90° .

Para este trabalho utilizou-se o extensômetro Excel sensores **PA-06-062RB-120-L** que é um uma roseta de 2mm de comprimento orientada a 0°45°90°.

Após a escolha do tipo adequado do extensômetro a ser utilizado para se obter resultado fiel da medida de deformação, é indispensável que se proceda a uma boa colagem. A deformação aplicada ao extensômetro deve a mesma que a da peça a ser examinada e sem que sofra influência de temperatura, umidade e qualquer outro fator, portanto, devem ser adotadas algumas técnicas que minimizem ou eliminem os efeitos indesejáveis (BARRETO JR).

A boa colagem depende do adesivo e dos cuidados no seu manuseio: é de regra geral uma boa limpeza de maneira a evitar a contaminação do local de colagem e do próprio extensômetro com óleos, graxas, poeiras e outros agentes prejudiciais à boa colagem (BARRETO JR).

Inicialmente deve-se proceder à limpeza do ponto em que se deseja a medida da deformação para eliminar óxidos, saliências, óleos, e etc., de maneira a deixar a superfície livre de matéria estranha.

| Material                    | Cloretene NU | Freon TF | Lixa # 220 | Lixa # 320 | Lixa # 400 | Condicionador | Neutralizador | Álcool Isopropílico |
|-----------------------------|--------------|----------|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------------|
| Aço                         | 1, 4         | (1, 4)   | 2          | 3          |            | 5             | 6             |                     |
| Aço Invar                   | 1, 4         | (1, 4)   | 2          | 3          |            | 5             | 6             |                     |
| Alumínio                    | 1, 4         | (1, 4)   |            | 2          | (2) ,<br>3 | 5             | 6             |                     |
| Borracha sintética          |              | 1, 3     | 2          |            |            |               | 4             |                     |
| Cobre                       | 1, 4         | (1, 4)   |            |            | 2 , 3<br>* | 5             |               | 6                   |
| Laminados de fibra de vidro | 1, 3         | (1, 3)   |            |            | 2          | 4             | 5             |                     |
| Bronze e latão              | 1, 4         | (1, 4)   |            |            | 2 , 3*     | 5             |               |                     |
| Nylon                       |              |          |            |            | 1          | 2             |               | 3                   |
| Teflon                      | 1            | (1)      |            |            |            |               | 2             |                     |
| Zinco                       |              | 1, 3     |            |            | 2 , 4<br>* | 5             | 6             |                     |

Figura 32 - resumo da preparação das superfícies para alguns materiais  
[Fonte: (BARRETO JR)]

Na literatura é possível encontrar procedimentos para a colagem de extensômetros nos mais diversos materiais. A *Figura 32* apresenta uma tabela que indica a sequência de operações para a colagem de extensômetros.

De acordo com a *Figura 32* em laminados de fibra de vidro deve-se, primeiramente, utilizar “Cloretene NU” ou “freon TF”, depois utilizar uma lixa de granulometria 400. Depois de lixar deve-se novamente fazer a limpeza com “Cloretene NU” ou “freon TF”. Após a limpeza deve-se utilizar um produto condicionador e um produto neutralizador respectivamente.

Cloretene NU: Hidrocarboneto clorado de utilização mais recomendada, pois é um poderoso solvente utilizado para a maioria dos metais e plásticos, exceto o poliestireno. Ataca rapidamente todos os tipos de graxas e óleos hidráulicos. Não é inflamável. Freon TF: Triclorotrifluoretano - é um solvente menos ativo, usado muitas vezes onde o Cloretene NU não é recomendado. (BARRETO JR).

O Condicionador é um Líquido volátil ligeiramente ácido, recomendado para a remoção de pequenas oxidações superficiais. Tem a função de melhorar as condições de adesão do extensômetro (Excel Sensores).

O neutralizador é um líquido volátil ligeiramente básico, a ser usado em conjunto com o condicionador. Tem a função de neutralizar a acidez introduzida pelo condicionador (Excel Sensores).

Para a colagem do extensômetro se utiliza uma cola recomendada pelo fabricante. Colas de um único componente estão prontas para usar fora do tubo e não necessitam de componentes de mistura. Colas multi-componentes têm, geralmente, dois componentes que devem ser misturados antes da utilização. Estas colas também têm um pot lifetime, ou seja, um intervalo de tempo em que você pode usar a cola depois de misturá-la (pode ser por minutos ou horas).

## 2.7 Utilização de Extensômetros colados nos ensaios de cisalhamento

Na Figura 33 é apresentado o corpo de prova utilizado na Universidade de Usak, na Turquia.

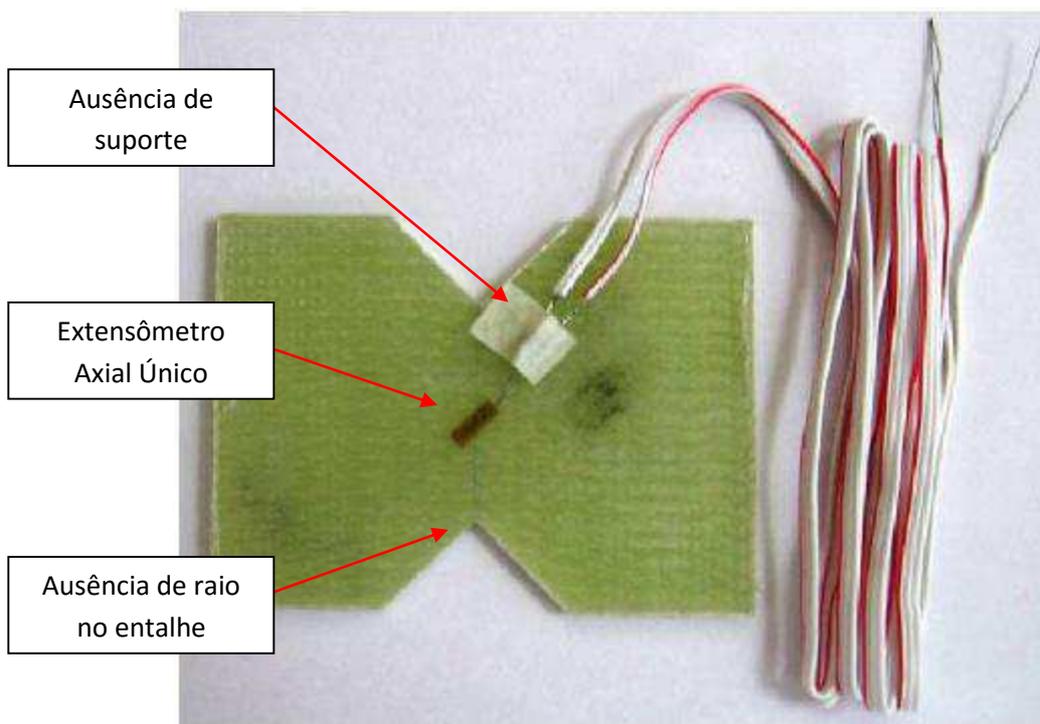


Figura 33 - Corpo de Prova utilizado em Usak, na Turquia.  
[Fonte (AKTAS, et al., 2010):]

É possível observar a ausência do raio de 1,3mm no canto do entalhe. Também é possível observar a utilização de um extensômetro axial único, o que faz a aquisição, como foi visto na seção 3.2, da deformação em apenas uma direção. O entalhe utilizado neste ensaio é de 90°.

A seguir é apresentado o dispositivo testado no Wyoming Test Fixture Inc. A Figura 34 mostra a utilização de vários extensômetros na amostra.

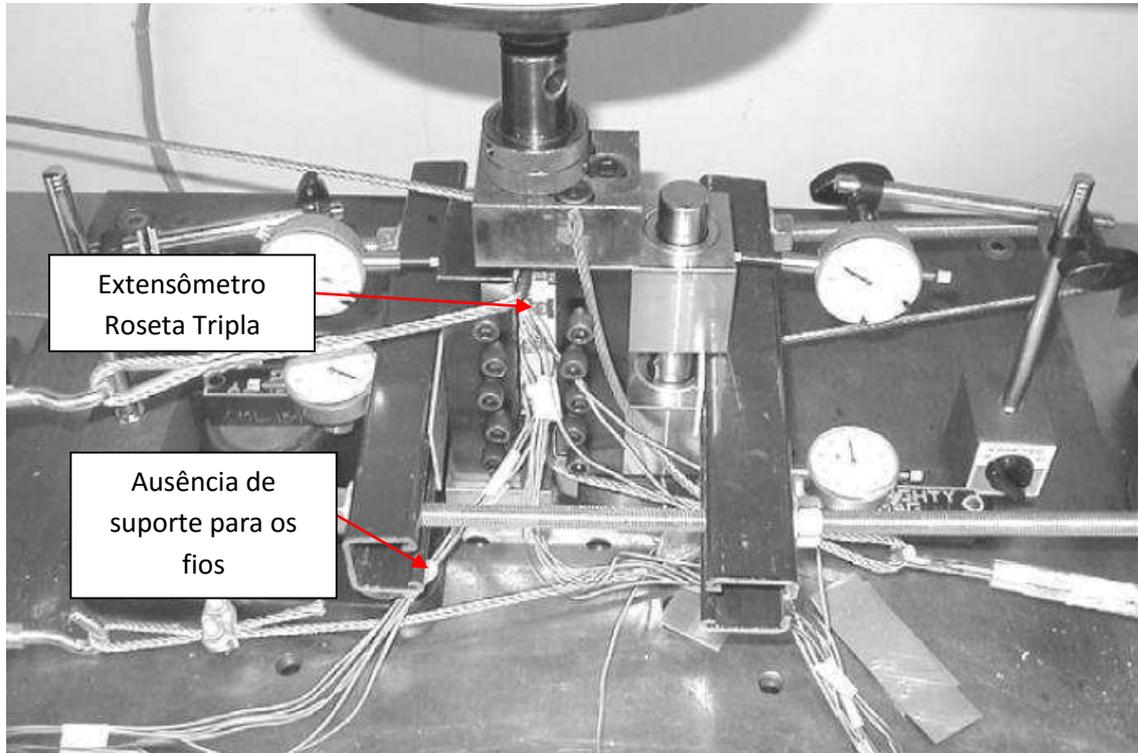


Figura 34 - Dispositivo alternativo de Wyoming sendo testado com vários extensômetros  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2003)]

É notável a quantidade de fios para aquisição presentes nesse ensaio. É possível concluir que essa quantidade de cabos torna a montagem para a realização do ensaio trabalhosa e demorada. Não foi avaliado se a quantidade de adesivo utilizado para fixar os extensômetros provocaram alteração significativa na espessura da amostra, como também não foi avaliado se o peso adicional provocado pelos cabos afetou o ensaio.

A seguir é apresentado outra montagem de cisalhamento VNRS que utiliza extensômetro para medir deformação. A Figura 35 apresenta a montagem para o ensaio de cisalhamento realizado na NASA, EUA.

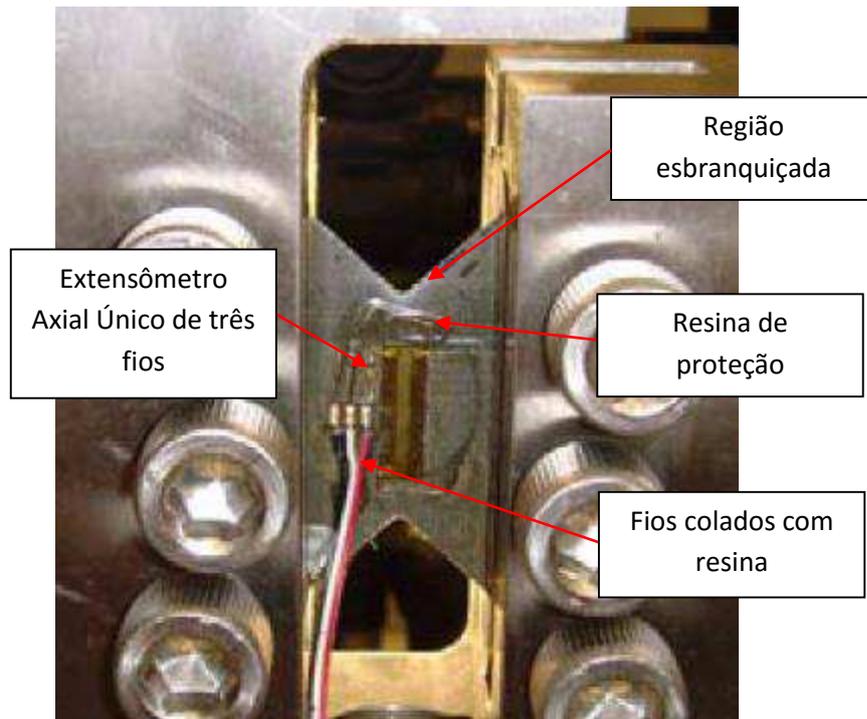


Figura 35 - montagem para ensaio de cisalhamento VNRS realizado na Nasa.  
[Fonte (HILL, et al., 2011)]

É possível observar a presença de um extensômetro axial único na região central dos entalhes. Também é possível observar a utilização de uma resina de proteção para proteger os terminais do sensor. Existe uma região esbranquiçada no entalhe superior que pode indicar a iteração da resina utilizada para proteção do extensômetro com o material do corpo de prova.

## CAPITULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Metodologia

A Figura 36, a seguir, ilustra a metodologia utilizada para desenvolver os dispositivos de cisalhamento interlaminar.

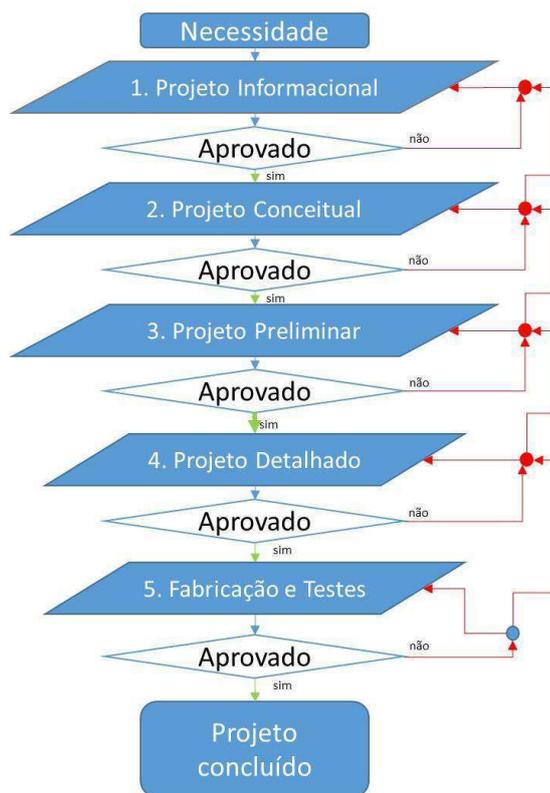


Figura 36 - Fluxograma de desenvolvimento de um projeto

O desenvolvimento de um produto passa por cinco etapas até a conclusão. Sempre que uma etapa não puder ser concluída pode-se retornar para uma etapa anterior ou até mesmo para a etapa inicial.

**Projeto Informacional:** O projeto Informacional é a definição do problema. É preciso interpretar o que é necessário para solucionar o problema. O levantamento das necessidades foi realizado através uma pesquisa. Quando esta etapa estiver concluída pode-se começar a fazer o levantamento dos pré-requisitos do projeto

**Projeto Conceitual:** Os pré-requisitos do projeto é sua segunda etapa. É nesta etapa que são definidos os níveis de carregamento, as normas a serem seguidas e geometrias. Foi realizado um levantamento bibliográfico para determinar qual o melhor método de obtenção do cisalhamento em compósitos poliméricos reforçados por fibras.

**Projeto Preliminar:** A partir dos pré-requisitos é que se inicia o projeto preliminar. O projeto preliminar é a etapa do projeto em que os croquis são elaborados de modo a atender o que foi definido na etapa anterior. Para a realização do projeto preliminar foi utilizado uma ferramenta computacional para definir as melhores geometrias para construção.

**Projeto Detalhado:** Ao final dessa etapa, todos os desenhos técnicos e as especificações dos materiais e métodos de fabricação devem estar definidos. A partir desse levantamento é possível estimar a viabilidade de construção do projeto, bem como o levantamento dos custos.

**Fabricação do Protótipo e Testes:** A construção do protótipo é uma das etapas fundamentais do projeto. Para isso, se utiliza dos recursos disponíveis de modo que o projeto físico possa ser realizado.

Por último o projeto precisa ser testado para verificar se o problema proposto na etapa inicial foi solucionado. Sempre que uma etapa não for satisfeita deve-se retroceder no diagrama.

Neste projeto de pesquisa todas as etapas foram cumpridas e resultou no desenvolvimento de dois dispositivos de cisalhamento: o dispositivo de cisalhamento tipo losipescu e o dispositivo de cisalhamento tipo VNRS.

## **3.2 Montagem do sistema de Instrumentação**

### ***Colagem dos Extensômetros***

O primeiro procedimento para aquisição dos dados é a fixação do elemento sensor na região central do corpo de prova. Os extensômetros são elementos sensores que precisam ser colados. O fabricante dos extensômetros disponibiliza uma tabela com as principais colas que podem ser utilizadas.

| Material            | Pre-treatment  | Cleaning   | Suitable adhesive             | Note   |
|---------------------|--|--|-------------------------------|--|
| Polyimide           | Roughening   | RMS1   | Z70, X60, X280, EP310S, EP150 |  |
| PMMA/PC (Plexiglas) | Roughening   | Isopropanol  | Z70, X60, X280                | Bonding with dichloromethane is also possible  |
| Polyamide           | Roughening   | RMS1   | Z70, X60, X280                | If adhesion problems occur, prior treatment with hydrogen peroxide may be useful   |
| Polyethylene (PE)   | Roughen with wet fine emery cloth and/or oxygen plasma | Remove dust, if necessary wash with household detergent, rinse thoroughly with de-ionized water, dry | Z70                           | Despite this pre-treatment process, there may still be problems with some blends of PE. Please ask for our book "Practical hints for the installation of strain gages". P16/17 provide detailed information about the etching of this material |
| PVC                 | Roughening   | RMS1   | Z70, X60, X280                |  |
| Polyurethane        | Roughening   | Isopropanol  | Z70, X60, X280                |  |
| Epoxy resin         | Roughen with 220-320 grain and/or oxygen plasma        | RMS1   | Z70, X60, X280                |  |
| Fluoropolymer       | Etch with Tetra-Etch®1                                 |  | Z70                           |  |

Figura 37 - Tabela do fabricante Excel sensores indicando as colas recomendadas para seus extensômetros  
[ Fonte: excelsensores]

A *Figura 37* apresenta a tabela do fabricante para a utilização de adesivos para a fixação dos extensômetros.

Z-70 - A super cola de ação rápida que é o adesivo padrão para a análise experimental de deformação.

- Único componente;
- Cura fria (temperatura ambiente);
- Tempo de cura de um minuto com apenas a pressão do polegar;
- A temperatura de operação é entre -55°C e 100°C para medições estáticas (ou seja, o ponto zero é muito importante). A cola pode suportar até 120°C durante uma medição dinâmica. A humidade deve estar acima de 30%;

- Baixa viscosidade (adesivo fino).

X60 - Mistura de metacrilato:

- Multi componente - uma cola de dois componentes, contendo um pó e um líquido;
- Cura fria (temperatura ambiente);
- Tempo de cura: de 2 a 5 minutos;
- A temperatura de operação é entre -200°C e 80°C para medições dinâmicas;
- Alta viscosidade (cola espessa) - camada de 65 micrômetros.

X280 - Uma resina epoxy multi componente - dois componetes em pacotes easy-mix;

- Cura quente ou fria com pressão definida;
- Tempo de cura de 8 horas em temperatura ambiente; 1 hora de cura aquecido a 95°C;
- Temperatura de operação de até 200°C para medições estáticas; 280°C para medições dinâmicas;
- Alta viscosidade (cola espessa) - camada de 40 micrômetros.

Para este trabalho se utilizou uma cola a base de metacrilato para colar os extensômetros nos corpos de prova.

### ***Circuito de Aquisição***

A ponte de Wheatstone é o circuito mais utilizado em extensometria, tanto para medidas de deformações estáticas quanto dinâmicas. Este tipo de circuito permite eliminar com facilidade a influência da temperatura no extensômetro.

Este circuito é composto por quatro resistências dispostas como na *Figura 38* a seguir:

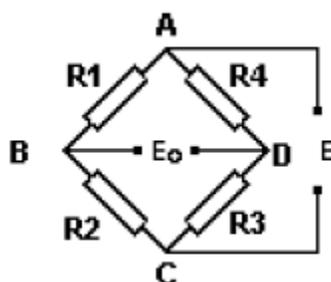


Figura 38 - Circuito de uma Ponte de Wheatstone  
[Fonte: (BARRETO JR)]

As resistências R1, R2, R3 e R4, indicadas no circuito da ponte de Wheatstone, são os extensômetros na configuração chamada de ponte completa. Na configuração denominada de meia-ponte (ou 1/2 ponte) apenas as Resistências indicadas no circuito como R1 e R2 que são extensômetros, enquanto que as Resistências R3 e R4 são Resistências complementares. Na configuração denominada de “um quarto de ponte” (ou 1/4 de ponte) apenas um resistor, do circuito apresentado, é extensômetro.

O valor E, indicado no circuito da ponte de wheatstone, é a tensão de alimentação do circuito e esse valor geralmente é 3V, 5V ou 10V. A leitura é feita no centro da ponte (E0) e indica a variação da tensão provocada pela deformação dos sensores. O valor medido pelo extensômetro é adimensional e comumente expresso em  $\mu V/V$ .

Para converter o valor em  $\mu V/V$  para variação de deslocamento em %, em ligações tipo 1/4 de ponte de Wheatstone , utiliza-se a expressão a seguir.

$$\frac{\Delta l}{l} = k * \left(\frac{\mu V}{V}\right) \quad ((9))$$

Aonde,

- $\frac{\mu V}{V}$  : Valor medido durante os ensaios
- $l$  : Comprimento inicial
- $A$  : Fator do StrainGauge, expresso pelo fabricante.

Um sistema de medidas de deformação consiste normalmente de: extensômetros elétricos de resistência, uma fonte de alimentação, um

amplificador e um terminal de leitura (BARRETO JR). A *Figura 39* apresenta uma ilustração esquemática de um sistema de medidas com a presença do resistor de calibração ( $R_c$ ):

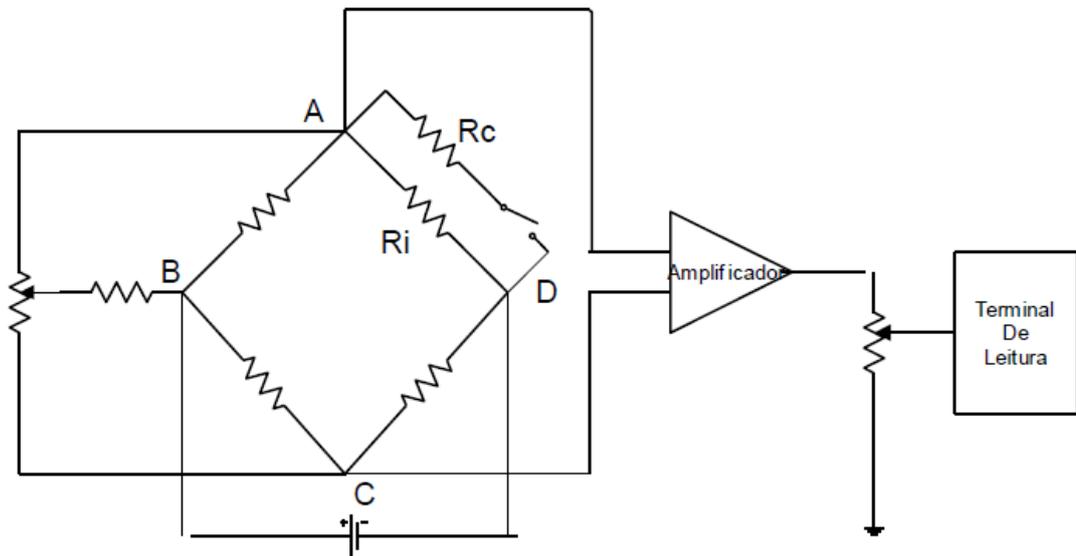


Figura 39 - diagrama de calibração de medição com o extensômetro com acréscimo de uma resistência em paralelo.  
[Fonte: (BARRETO JR)]

Um dos métodos utilizados para calibração do sistema consiste em se colocar em paralelo com um dos braços da ponte de Wheatstone, uma resistência com valor elevado que modifica a resistência do braço considerado, simulando uma deformação (BARRETO JR).

Por definição temos:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad ((9))$$

Aonde,

- $K$  : Fator do extensômetro
- $R$  : Resistência do extensômetro em Ohms
- $\varepsilon$  : Deformação em  $\mu\text{m/m}$

A variação provocada pela resistência colocada em paralelo com o extensômetro é indicada pela figura a seguir.

| <b>Extensômetro</b>      | <b>Resistência em Ohms</b> | <b>Deformação em <math>\mu\text{m/m}</math></b> |
|--------------------------|----------------------------|---|
| 120 Ohms<br>Fator = 2,00 | 5.880                      | 10.000  |
|                          | 11.880                     | 5.000   |
|                          | 14.880                     | 4.000   |
|                          | 19.880                     | 3.000   |
|                          | 29.880                     | 2.000   |
|                          | 59.880                     | 1.000   |
|                          | 119.880                    | 500   |
|                          | 599.880                    | 100   |

Figura 40 - Tabela do valor da resistência adicionada e da Deformação simulada.

A *Figura 40* apresenta a resistência em Ohms e a respectiva deformação que deve ser medida para calibrar o circuito da ponte de Wheatstone utilizando extensômetros de 120 Ohms.

### **3.3 Fabricação da placa Compósita**

Para a realização dos testes nas garras de cisalhamento foi necessário o desenvolvimento de uma placa compósita. A placa escolhida para obter os corpos de prova foi uma placa de fibra de vidro com resina poliéster com fibras aleatórias e dimensões 300 mm x 300 mm. O teor de fibras foi desconsiderado.

A placa compósita que foi adquirida para fabricação dos corpos de prova de cisalhamento foi fabricada pela técnica hand Lay-Up e posterior laminação manual. As placas possuem reforço de fibra de vidro-E com fibras curtas aleatórias. Esse material foi fornecido pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA., localizada no Distrito Industrial da cidade de Campina Grande. A resina utilizada como matriz do compósito foi a resina poliéster.

### **3.4 Simulação Computacional dos corpos de prova**

Uma das formas de determinar a direção e intensidade para os corpos de prova de cisalhamento é através de métodos numéricos. O método numérico pode ser desenvolvido com o auxílio de softwares de simulação computacional.

Neste trabalho, para verificar o comportamento do corpo de prova no dispositivo desenvolvido foram feitas análises computacionais.

## Simulação do corpo de prova losipescu

O primeiro corpo de prova a ser simulado computacionalmente foi o corpo de prova losipescu.

A Figura 41, a seguir, apresenta o resultado da simulação computacional realizada no software Autodesk Inventor ® Versão Student.

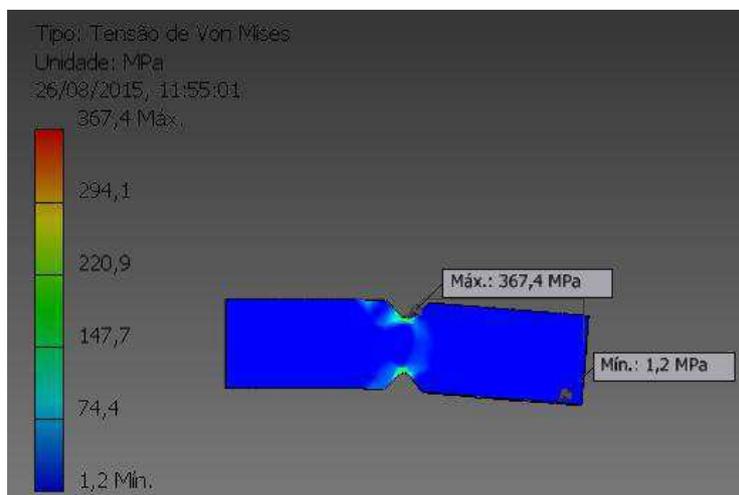


Figura 41 - simulação computacional do corpo de prova losipescu

É apresentado a tensão de Von Mises que é um critério de falha utilizado para materiais dúcteis. Apesar disso foi utilizado este critério para determinar os possíveis valores de carregamento. Os níveis de carregamento obtidos foram para um corpo de prova de aço, pela biblioteca de materiais do próprio software, para obter um carregamento maior que o que seria produzido pelos compósitos. É possível observar que a maior tensão ocorre na região dos entalhes.

Isto acontece por que o carregamento distribuído na seção transversal central do corpo de prova, por ser a região de área reduzida, é intensificada pela presença dos entalhes.

SUN (SUN, et al., 2013) analisou computacionalmente a influência do ângulo do entalhe para a tensão de cisalhamento ao longo da linha central do corpo de prova, através dos entalhes, durante a realização do ensaio losipescu.

A Figura 42, a seguir, apresenta o resultado do estudo da influência do ângulo do entalhe, do corpo de prova losipescu, na distribuição do carregamento ao longo da seção transversal.

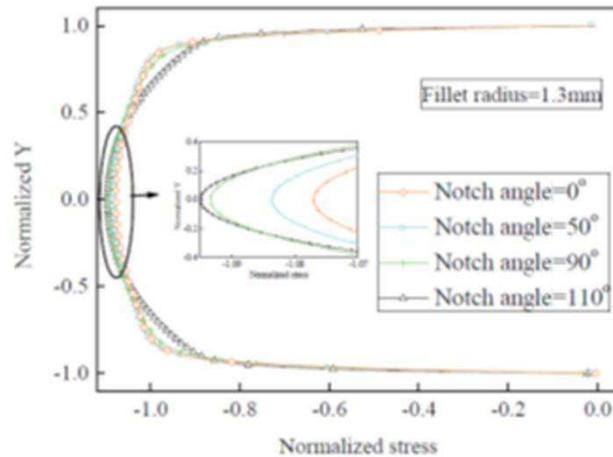


Figura 42 - Análise computacional (FEA) da influência do ângulo do entalhe do corpo de prova losipescu. [Fonte: (SUN, et al., 2013)]

SUN utilizou em suas simulações o ângulo de entalhe como o representado na Figura 43, a seguir.

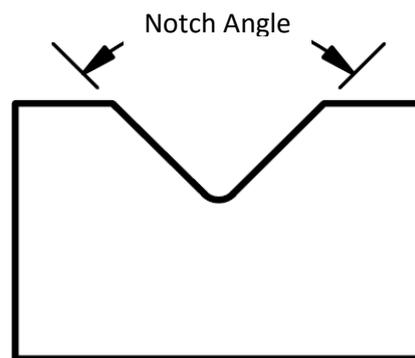


Figura 43 - Representação esquemática do ângulo de entalhe considerado por SUN.

É possível observar, na Figura 42, uma maior uniformidade de carregamento na região central do corpo de prova o que justifica o posicionamento dos extensômetros nesta localização. Para facilitar a visualização do comportamento do cisalhamento no centro do corpo de prova, foi reproduzida a simulação computacional realizada por SUN.

O ângulo de entalhe foi definido como ângulo  $\alpha$ . A figura a seguir apresenta a representação esquemática do ângulo utilizado na simulação computacional realizada no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA).

A Figura 44 apresenta a configuração utilizada na simulação computacional.

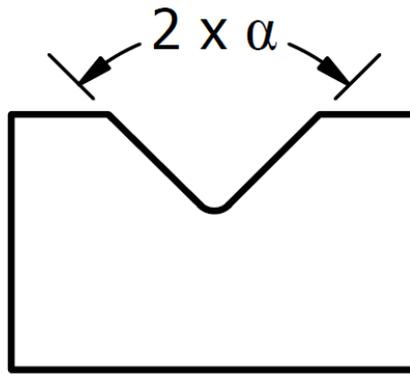


Figura 44 - Definição do ângulo de entalhe na simulação computacional realizada no LaMMEA.

Para compor a geometria do corpo de prova na simulação computacional, o ângulo do entalhe foi dividido em dois ângulos ( $\alpha$ ).

Para facilitar a observação, o corpo de prova foi seccionado no eixo central longitudinal.

A Figura 45, a seguir, apresenta o resultado gráfico da simulação realizada pelo autor desta dissertação.

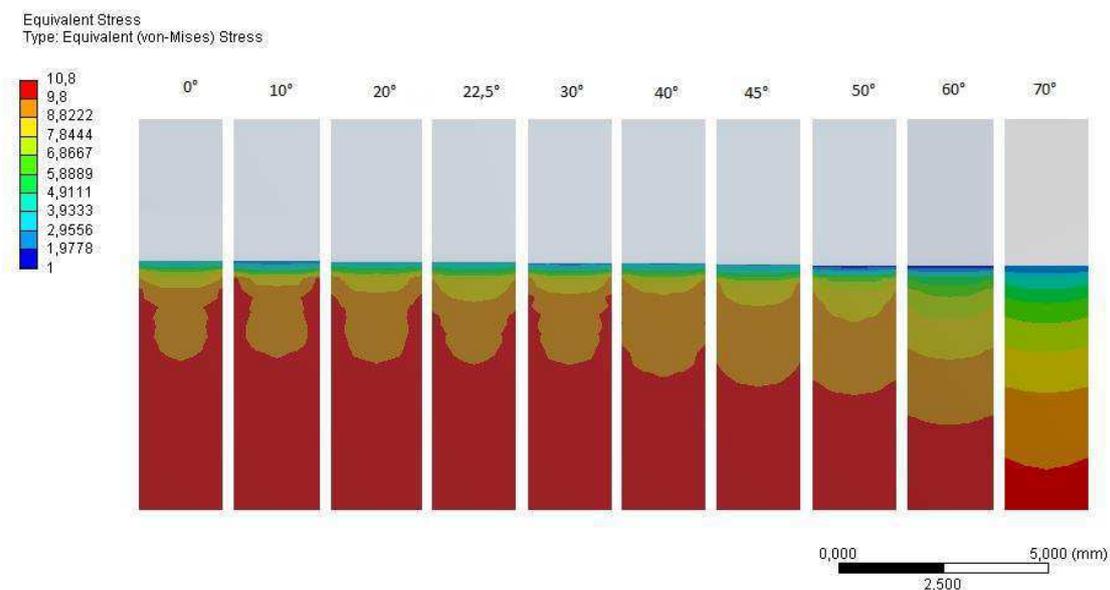


Figura 45 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova Iosipescu.

O perfil apresentado localiza-se na região central do entalhe. Foi atribuído o mesmo nível de carregamento em todas as simulações. A simulação foi obtida utilizando o Software Ansys V15.0, módulo Workbench. Cada cor representa o nível de cisalhamento na região do corpo de prova sendo a região vermelha o cisalhamento máximo e a região azulada a região de cisalhamento mínimo.

Para facilitar a interpretação dos resultados a foi dividida em duas partes, a primeira parte (*Figura 46*) com ângulos de entalhe menores que o especificado

pela norma ASTM D5379 ( $\alpha = 45^\circ$ ) e a segunda parte (*Figura 47*) com ângulos de entalhe maiores que o especificado pela norma.

A seguir é apresentada a *Figura 46* que mostra o perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos  $\alpha$  menores que  $45^\circ$ .

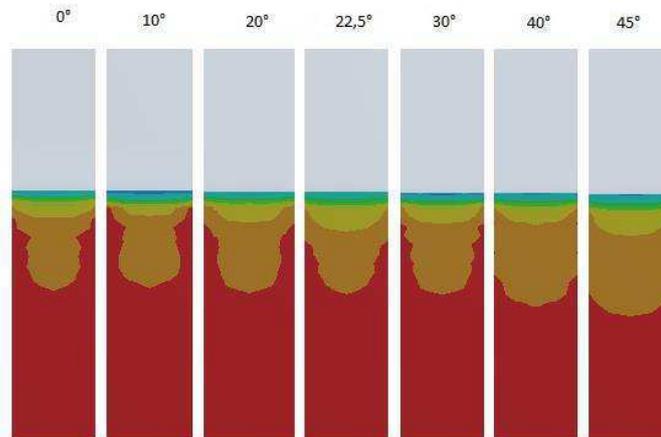


Figura 46 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos  $\alpha$  menores que  $45^\circ$ .

É possível observar que ângulos a partir de  $30^\circ$  não afetam, de forma significativa, o perfil de cisalhamento na linha central do corpo de prova. O efeito da espessura do corpo de prova não foi investigado neste trabalho.

A seguir é apresentado a *Figura 47* que mostra o perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos  $\alpha$  maiores que  $45^\circ$ .

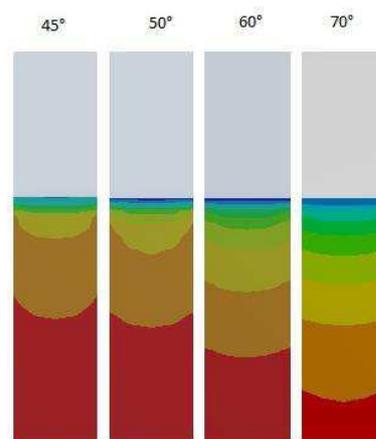


Figura 47 - Perfil de tensão da região central do corpo de prova losipescu com ângulos  $\alpha$  maiores que  $45^\circ$ .

É possível observar que ângulos maiores que  $50^\circ$  alteram o perfil do carregamento e são prejudiciais ao ensaio por que reduzem a região de medição (região vermelha na imagem).

A Figura 48 mostra a comparação entre a tensão de cisalhamento para os ângulos simulados, com valor menor ao ângulo especificado pela norma ASTM 5379.

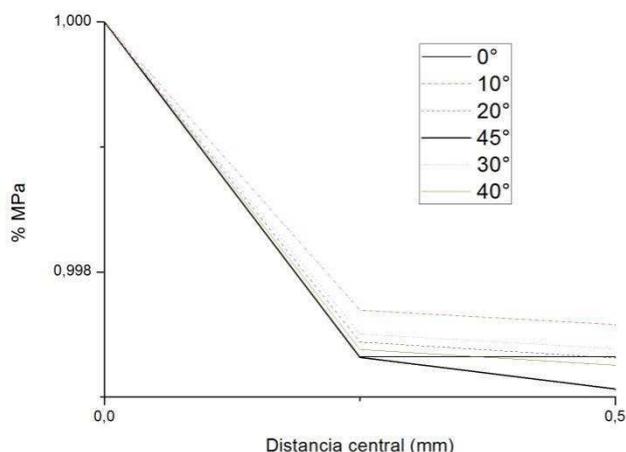


Figura 48 - comparação entre o valor simulado do cisalhamento e a distância do centro do corpo de prova.

A distância central representa a distância para o centro do corpo de prova em direção ao centro do entalhe. Os resultados mostram que a uma distância menor que 1mm da linha central do corpo de prova a variação do cisalhamento normalizado é menor que 1%.

Para obter o perfil de cisalhamento ao longo de todo corpo de prova foram realizadas simulações computacionais com o método dos elementos finitos (FEA), considerando a estrutura como sendo formada por uma estrutura compósita laminar.

A Figura 49, abaixo, apresenta o resultado da simulação computacional realizada no software ANSYS® V15.0 pelo autor desta dissertação. A simulação foi feita com o módulo APDL do ANSYS.

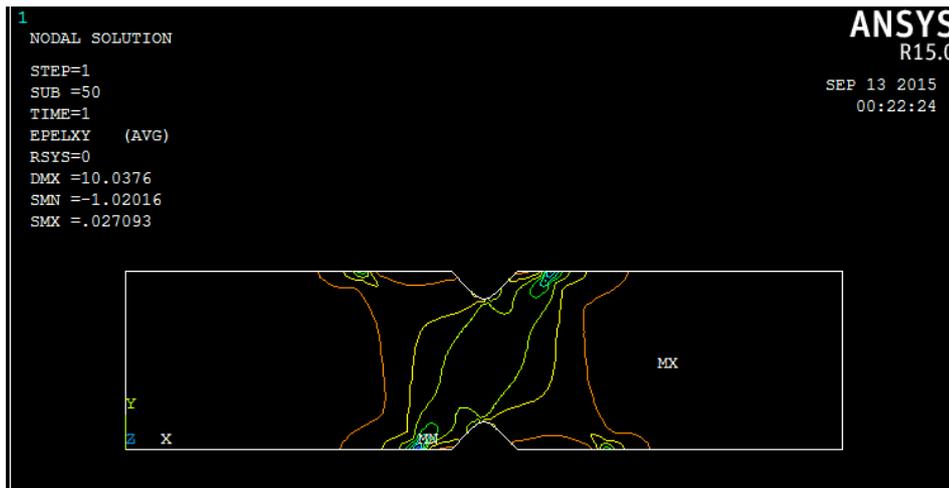


Figura 49 - Simulação computacional do corpo de prova tipo Iosipescu.

É possível observar na as linhas de tensão uniforme da simulação computacional. O resultado foi expresso desta maneira para comparar com o valor encontrado na literatura.

A Figura 50, a seguir, apresenta o detalhe ampliado da região central do corpo de prova simulado.

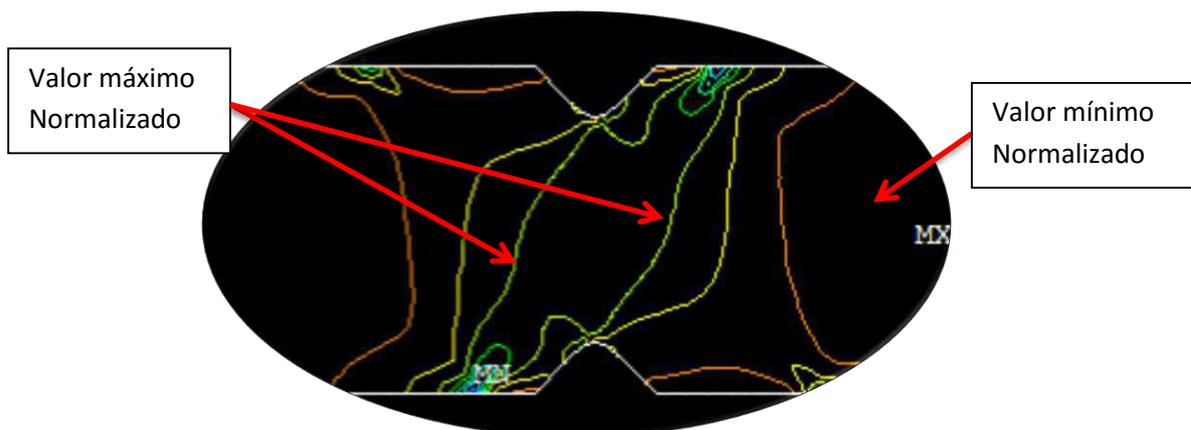


Figura 50 - detalhe da Região central do corpo de prova Iosipescu Simulado.

É possível notar uma região de cisalhamento uniforme na região central do corpo de prova, entre os entalhes.

Na *Figura 51* , a seguir, é apresentado um resultado similar encontrado na literatura.

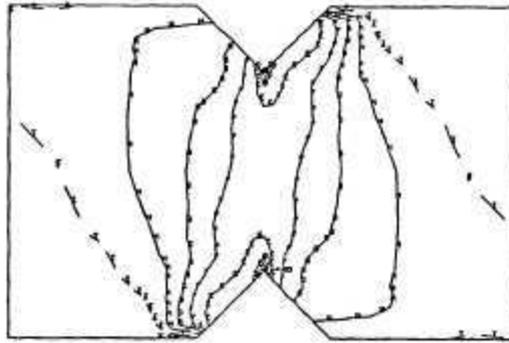


Figura 51 - Simulação computacional do corpo de prova losipescu  
[Fonte: (SPIGEL, et al., 1986) ]

É possível observar uma semelhança entre o resultado obtido pela simulação realizada e a simulação computacional realizada por SPIGEL. (Spigel, et al., 1986)

### Simulação do corpo de prova V-Notched Rail Shear

Para o ensaio V-Notched Rail Shear foram feitas simulações computacionais para tentar reproduzir o comportamento do material quando submetido ao carregamento.

A Figura 52, a seguir, mostra uma simulação computacional realizada no software Autodesk Inventor ® Versão Student.

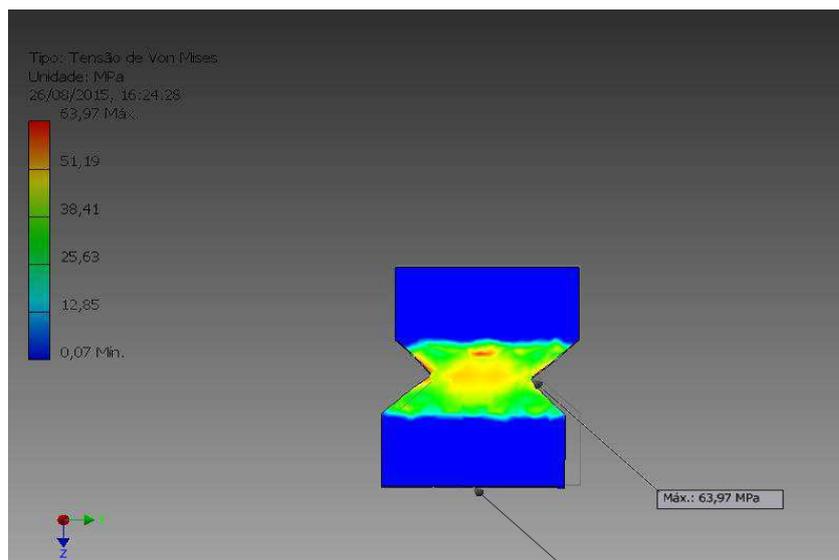


Figura 52 - Simulação Computacional do Corpo de Prova V-Notched Rail Shear.

É possível observar o perfil de carregamento de um corpo de prova V-Notched Rail Shear quando submetido ao esforço do ensaio. Semelhante ao

corpo de prova tipo Iosipescu a simulação computacional preliminar do corpo de prova tipo V-Notched Rail Shear foi inicialmente obtida com o material tipo aço, aço genérico presente na biblioteca do software, e espessura do corpo de prova de 2mm.

A Figura 53 apresenta a simulação computacional obtida por ADAMS (ADAMS, et al., 2002) para o corpo de prova VNRS.

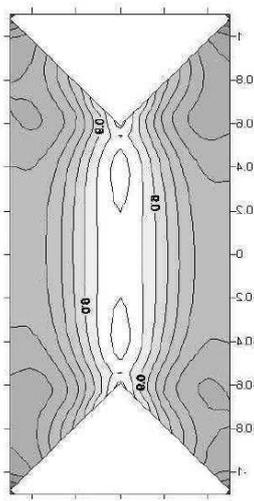


Figura 53 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS.  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2002)]

É possível observar duas pequenas regiões de cisalhamento máximo próximo ao centro do corpo de prova.

Para investigar a ocorrência de uma tensão de cisalhamento máxima distante do centro do corpo de prova o autor desta dissertação realizou diversas simulações computacionais.

A Figura 54 apresenta o resultado da simulação computacional realizada no software ANSYS ® V15.0 pelo autor desta dissertação, considerando um material laminado, com restrições de movimento vertical e de rotação do lado esquerdo da amostra e deslocando o lado direito para baixo semelhante ao que ocorre no ensaio real. A simulação foi feita com o módulo APDL do ANSYS.

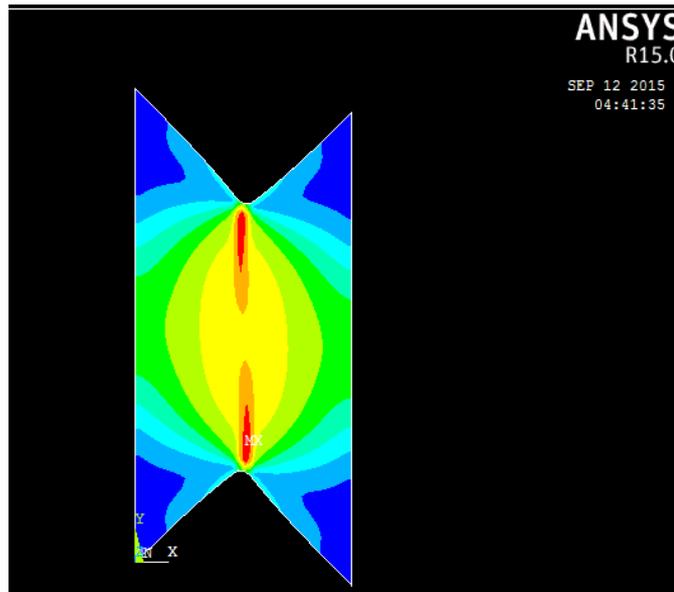


Figura 54 - Resultado da simulação computacional do corpo de prova V-Notched Rail Shear

É possível observar a semelhança entre o resultado obtido pelo autor desta dissertação e o resultado obtido por ADAMS (ADAMS, et al., 2002). Também foram obtidas duas regiões de cisalhamento máximo distantes do centro do corpo de prova.

SENEVIRATNE (SENEVIRATNE, et al.) analisou computacionalmente a substituição do entalhe em “V” por um entalhe circular.

A Figura 55 apresenta o resultado da simulação computacional do corpo de prova VNRS com o entalhe circular realizada por SENEVIRATNE.

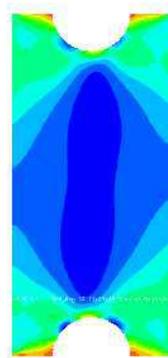


Figura 55 - simulação computacional do entalhe circular no corpo de prova VNRS  
[Fonte: (SENEVIRATNE, et al.) ]

Os níveis máximos de cisalhamento foram expressos na cor azul. É possível observar uma região de cisalhamento uniforme na região central do corpo de prova.

A seguir é apresentado a simulação computacional realizada para avaliar o efeito do arredondamento do entalhe em “V. A simulação foi realizada no software ANSYS ® v15.0

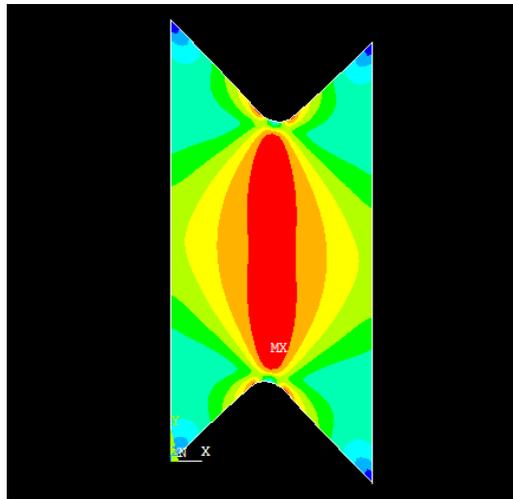


Figura 56 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS.

A Figura 56 apresenta o resultado da simulação computacional da geometria do corpo de prova tipo VNRS com o raio do entalhe similar ao raio proposto por SENEVIRATNE. Observa-se grande semelhança entre o resultado obtido pela simulação computacional realizada pelo autor desta dissertação e o resultado encontrado por SENEVIRATNE.

A Figura 57, a seguir, apresenta um resultado encontrado na literatura da simulação computacional do corpo de prova VNRS com a geometria especificada pela norma ASTM D 7078.

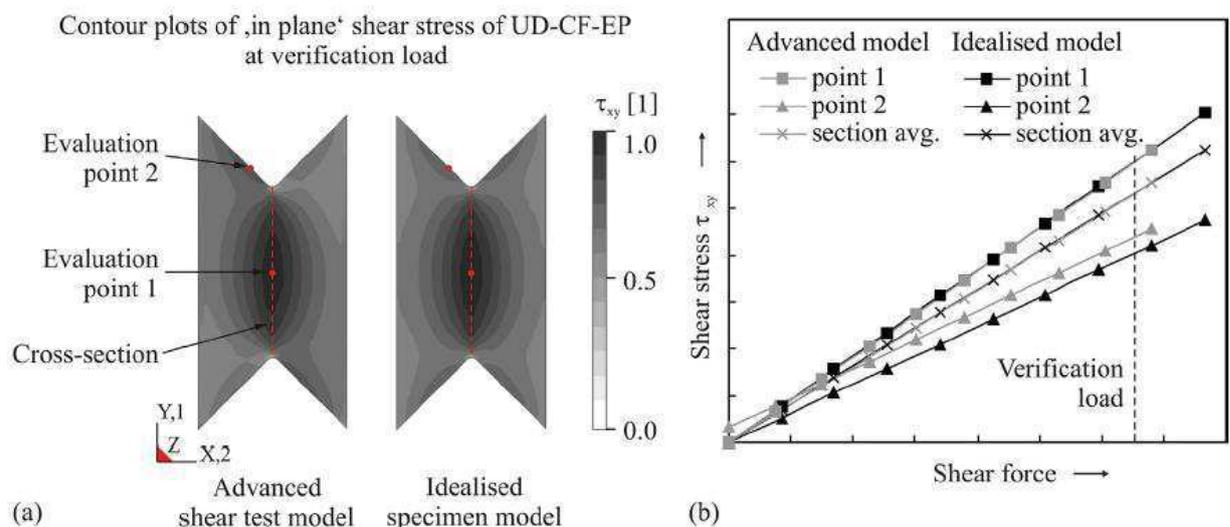


Figura 57 - Simulação computacional do corpo de prova VNRS. [Fonte: (GUDE, et al., 2015)]

A simulação computacional da geometria do corpo de prova realizada por GUDE (GUDE, et al., 2015) mostra que o maior cisalhamento ocorre no centro do corpo de prova.

É possível observar a concentração da tensão de cisalhamento no centro do corpo de prova.

Semelhante ao que acontece no ensaio losipescu, a localização de medição do cisalhamento, e de colar o extensômetro, é na região central do corpo de prova.

## **CAPITULO IV – Resultados e discussões**

### **4. Resultados e Discussão**

O tempo utilizado para realizar esse projeto foi de vinte e quatro meses, gerando dois dispositivos que foram testados em laboratório.

#### **4.1 Projeto do dispositivo losipescu**

O primeiro projeto apresentado neste trabalho é o projeto para utilização do corpo de prova conhecido como losipescu. A norma utilizada para confecção do corpo de prova losipescu é a ASTM 5379. Esse ensaio está classificado na categoria *V-Notched shear* (cisalhamento com entalhe em “V”, tradução livre).

##### ***4.1.1 Projeto Informacional do dispositivo losipescu***

Para entender como funciona o ensaio losipescu foram analisados os dispositivos encontrados nas universidades de Iasi, na Romênia, Royal Institute of Technology, na Suécia, Universidade de Wyoming, EUA, Universidade de Madison, EUA e Escola de Mines de Saint-Etienne, França.

##### **Dispositivo utilizado na Universidade de Iasi, na Romênia.**

É possível observar, na Figura 58, o dispositivo utilizado na Universidade de Iasi, na Romênia.

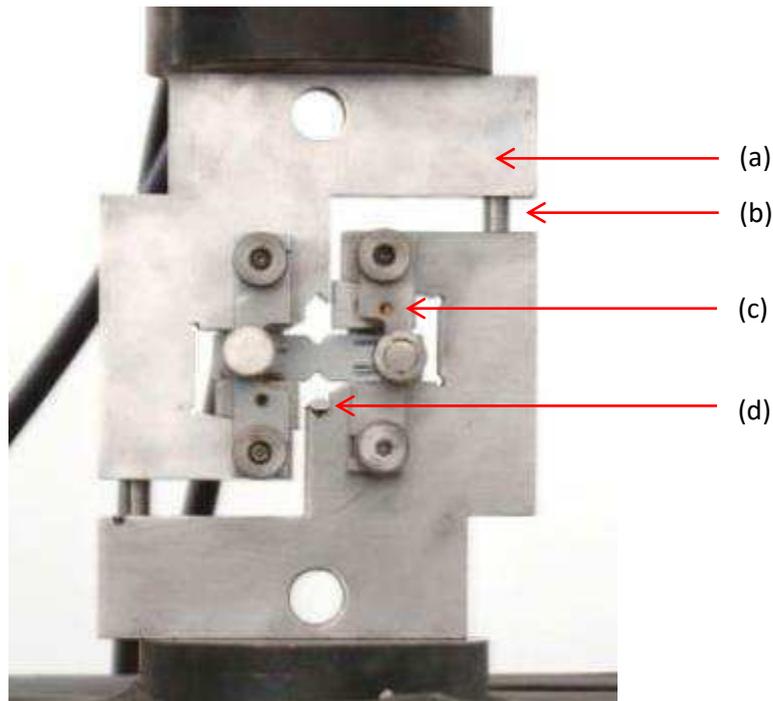


Figura 58 - Dispositivo Iosipescu Utilizado na Universidade de Iasi, Romenia. (a) fixador; (b) guia linear; (c) sistema de cunhas; (d) sistema de alinhamento  
[ Fonte: (MIHAI, 2013)]

Este dispositivo é composto por dois fixadores idênticos (a). o dispositivo conta com duas guias lineares (b) que impedem o movimento de rotação dos fixadores. A cunha (c) utilizada é uma cunha simples com um sistema de alinhamento para o corpo de prova.

Para facilitar a análise das características presentes em cada dispositivo é apresentado, posteriormente a cada dispositivo, uma imagem roteiro para os detalhes que foram ampliados.

A seguir, na Figura 59, é apresentado o roteiro do dispositivo Iasi.

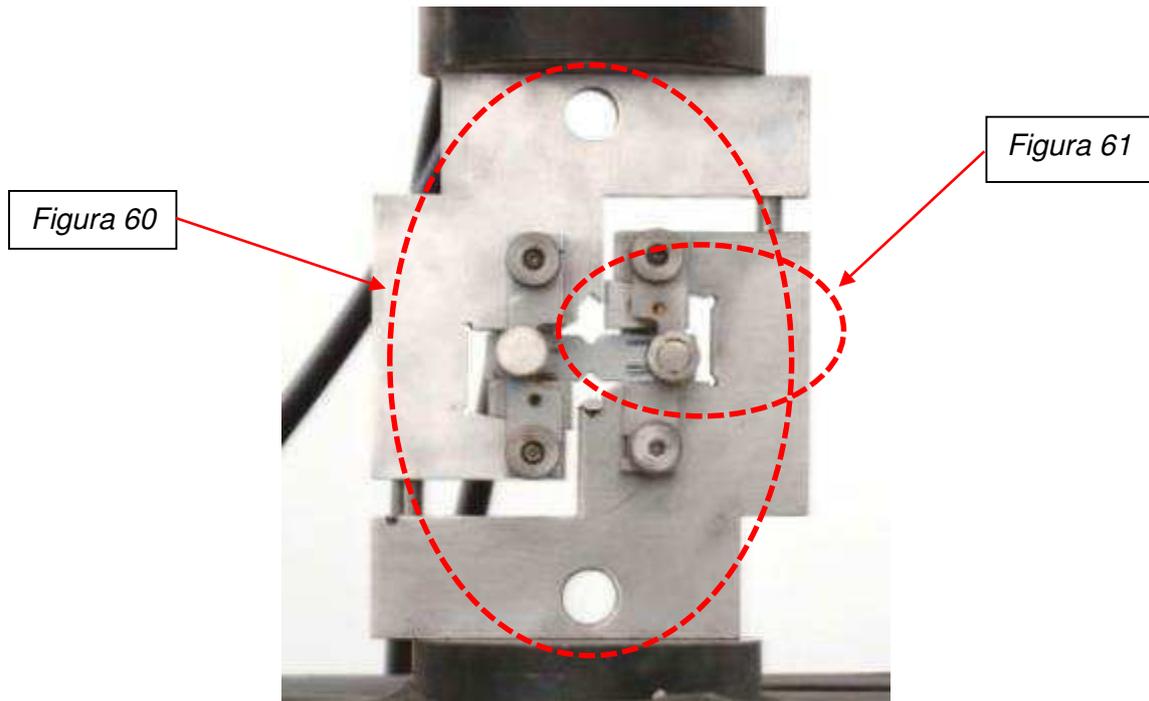


Figura 59 - roteiro para as ampliações realizadas no dispositivo de lasi.

O fixador é a denominação do elemento que suporta o corpo de prova. Neste dispositivo o fixador é o maior elemento do conjunto.

A Figura 60 apresenta o detalhe dos furos presentes nos fixadores.

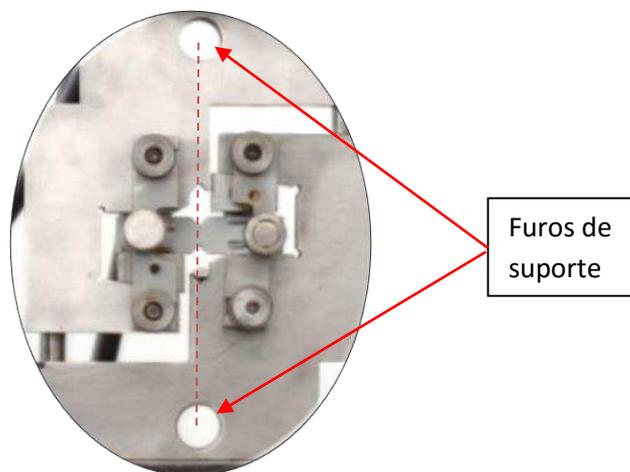


Figura 60 - Detalhe do dispositivo lasi mostrando os furos presentes nos fixadores.

Pelo posicionamento dos furos, alinhados com o centro do corpo de prova, é possível afirmar que este dispositivo pode ser utilizado fora da máquina de ensaio universal, suportado pelo furo superior e sendo carregado pelo furo inferior para a realização do ensaio. Ou seja, para realizar o ensaio com este dispositivo pode-se, por exemplo, fixar o elemento fixador superior e aplicar pesos manualmente ao elemento fixador inferior.

Pela simetria dos elementos que compõem o conjunto, é possível afirmar que o centro de gravidade do dispositivo de ensaio coincide com o centro de gravidade da amostra e ocorre na linha central, entre os entalhes.

O engaste à máquina de ensaios universal presente na Universidade de Iasi é feito através de um rabo de andorinha presente na parte superior do dispositivo de ensaio.

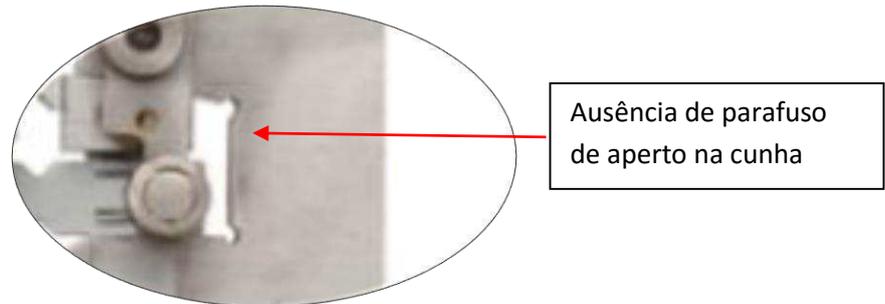


Figura 61 - detalhe da cunha utilizada no dispositivo Iasi

A Figura 61 mostra, em detalhe, a cunha de aperto do dispositivo da Universidade de Iasi e é possível observar que não existem parafusos para apertar as cunhas.

#### **Dispositivo utilizado no Royal Institute of Technology.**

A Figura 62 apresenta o dispositivo utilizado no Royal Institute of Technology, em Estocolmo, Suécia.

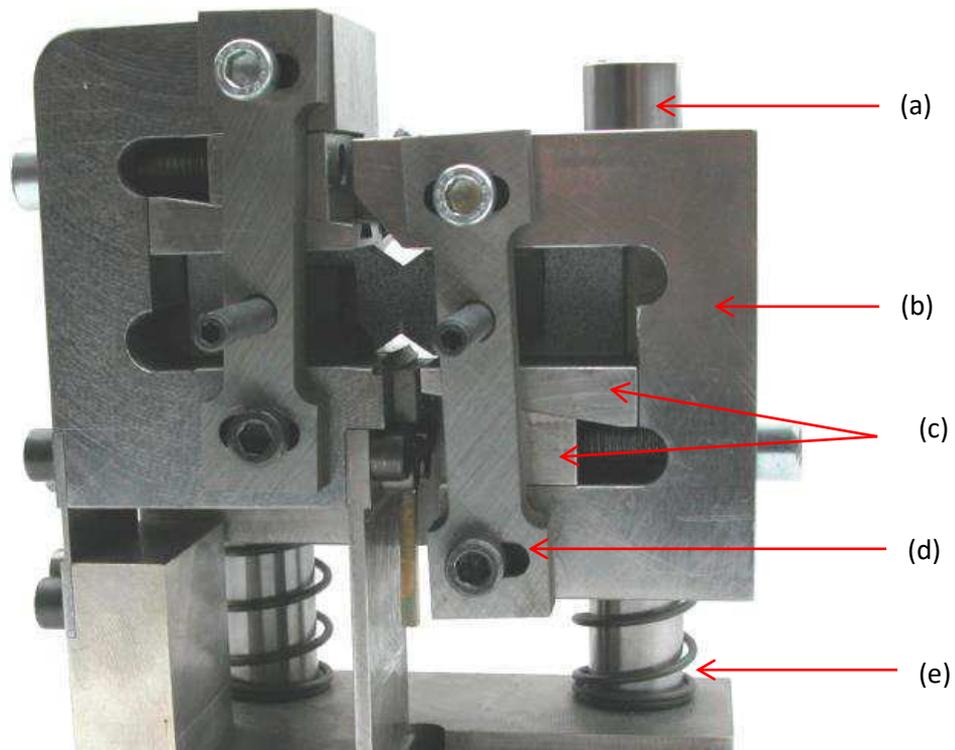


Figura 62 -Dispositivo Utilizado no Royal Institute of Technology, Suécia. (a) guia linear do dispositivo; (b) fixador; (c) sistema de cunhas duplas; (d) sistema de alinhamento da amostra; (e) sistema de molas; [Fonte: Melin, 2008]

É possível observar a utilização de guias lineares cilíndricas (a) para guiar o fixador móvel (b). O dispositivo foi construído com a utilização de cunhas duplas (c) o que proporciona um menor atrito na superfície da amostra. O sistema de alinhamento da amostra (d) é móvel e pode ser utilizado para fixação da amostra e retirado, ou não, durante a realização dos ensaios. O conjunto conta ainda com molas (e) que compensam o efeito do peso próprio dos fixadores.

A seguir, na *Figura 63*, é apresentado o roteiro do dispositivo lasi.

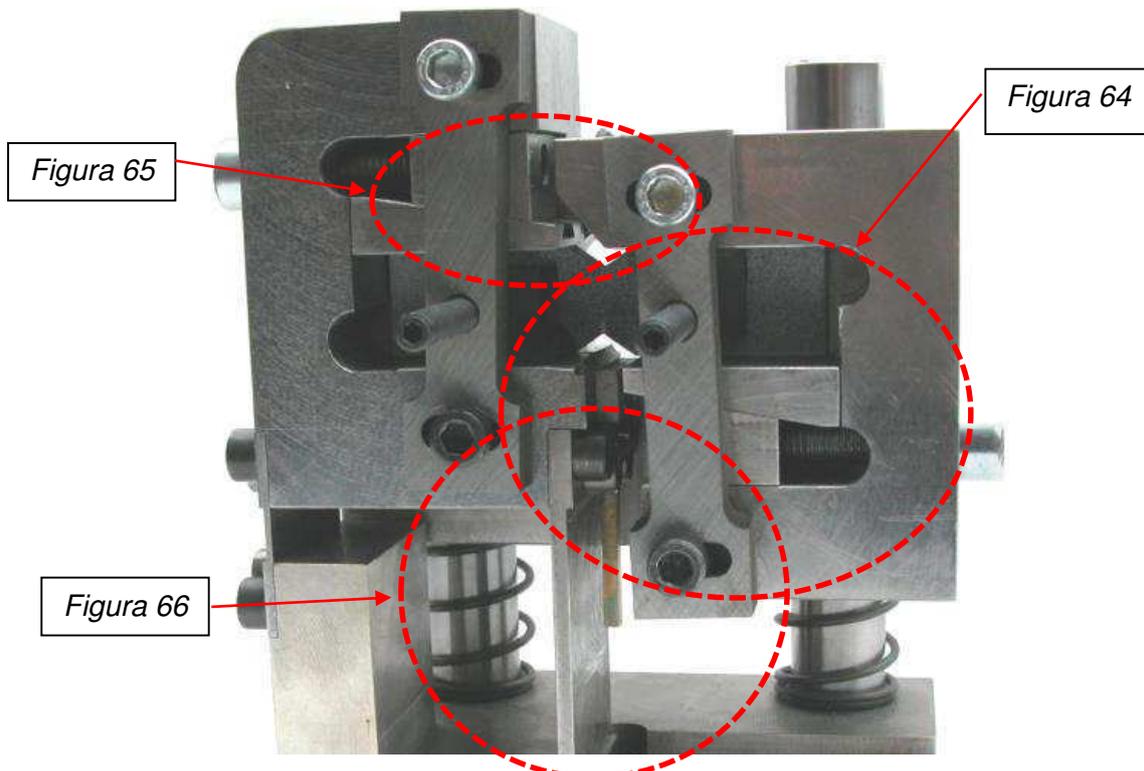


Figura 63 - roteiro do dispositivo Royal Institute of Technology

É possível observar no detalhe apresentado na Figura 64 a cunha utilizada no dispositivo presente no Royal Institute of Technology.

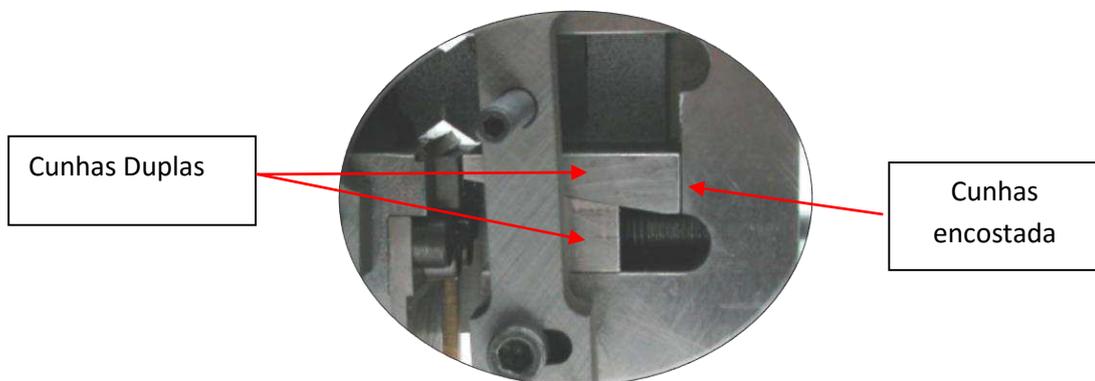


Figura 64 - Detalhe da cunha utilizada no dispositivo do Royal Institute of Technology

Este tipo de cunha dupla é utilizada como uma alternativa de eliminar o atrito entre a amostra e a cunha durante o aperto. É necessário que a cunha superior fique encostada ao fixador para não haver movimento relativo entre o corpo de prova e a cunha.

A Figura 65 mostra, em detalhe, a utilização de um rabo de andorinha entre as cunhas (a) e é apresentado uma representação esquemática da definição da geometria tipo rabo de andorinha.

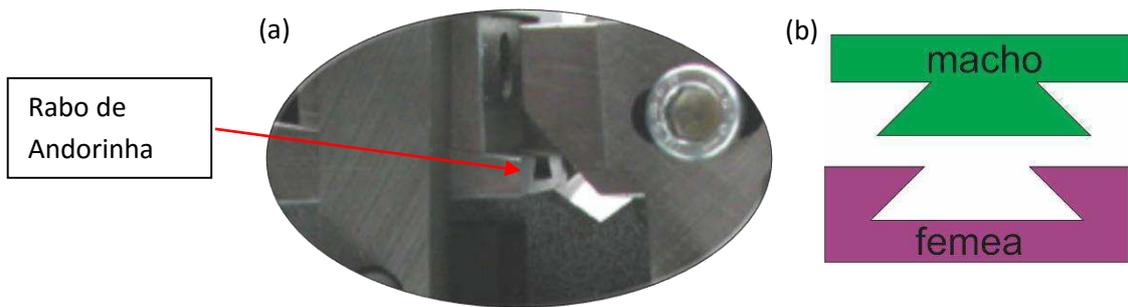


Figura 65 - Detalhe da utilização do (a) rabo de andorinha entre as cunhas (b) representação do rabo de andorinha.

Este tipo de geometria é utilizado para permitir o deslizamento entre as partes sem permitir a separação das mesmas.

Na Figura 66 é possível observar o detalhe do sistema de travamento do fixador.

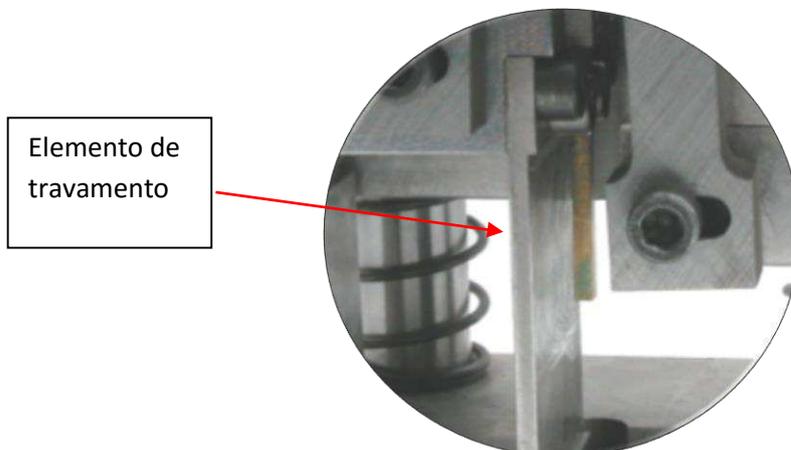


Figura 66 - Detalhe do travamento do fixador móvel.

Devido à esbeltez da placa de sustentação do elemento fixador é possível afirmar que este elemento funciona como elemento fusível para o carregamento do conjunto. O elemento funciona como elo fusível quer dizer que quando houver um carregamento acima do carregamento máximo de projeto, o elemento se sacrificará para manter a integridade dos outros elementos.

### Dispositivo utilizado na Universidade de Wyoming

O próximo dispositivo analisado é o primeiro dispositivo utilizado na universidade de Wyoming.

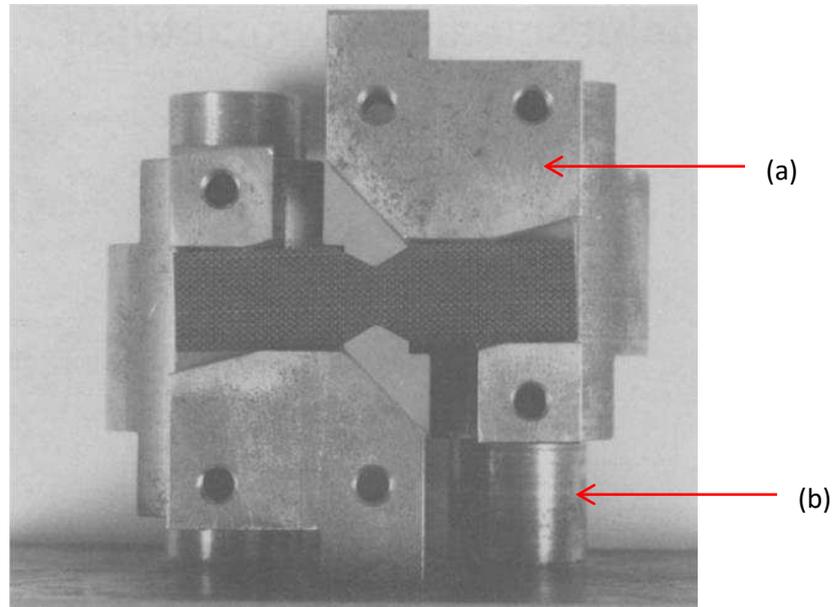


Figura 67 - Primeiro dispositivo losipescu da universidade de Wyoming.  
(a) fixador móvel; (b) guia linear;  
[Fonte: (Spigel, et al., 1986) ]

A **Figura 67** apresenta o primeiro dispositivo confeccionado na universidade de Wyoming para realização do ensaio losipescu. É possível observar no fixador móvel (a) a presença de chanfros nas bordas que entram em contato com a amostra. A guia linear (b) utilizada é uma guia cilíndrica.

A *Figura 68* apresenta o roteiro do dispositivo Wyoming.

Figura 69

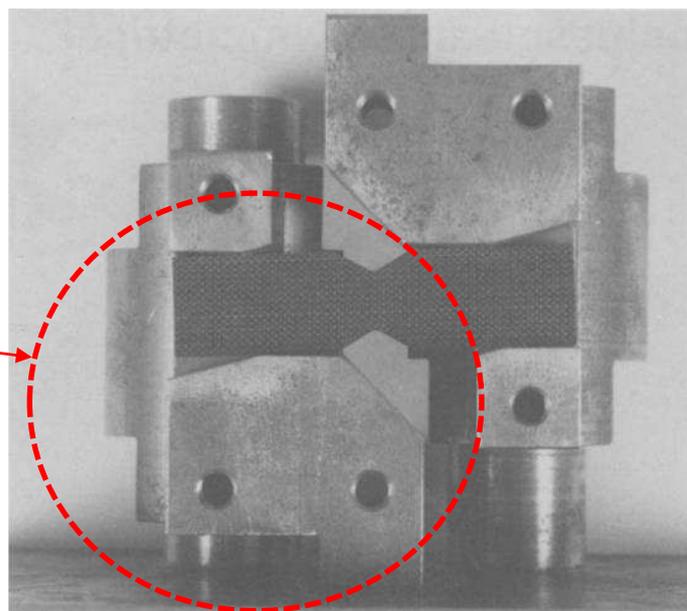


Figura 68 - Roteiro do dispositivo Wyoming

O detalhe, apresentado na *Figura 69*, mostra o fixador sem a utilização de cunhas.

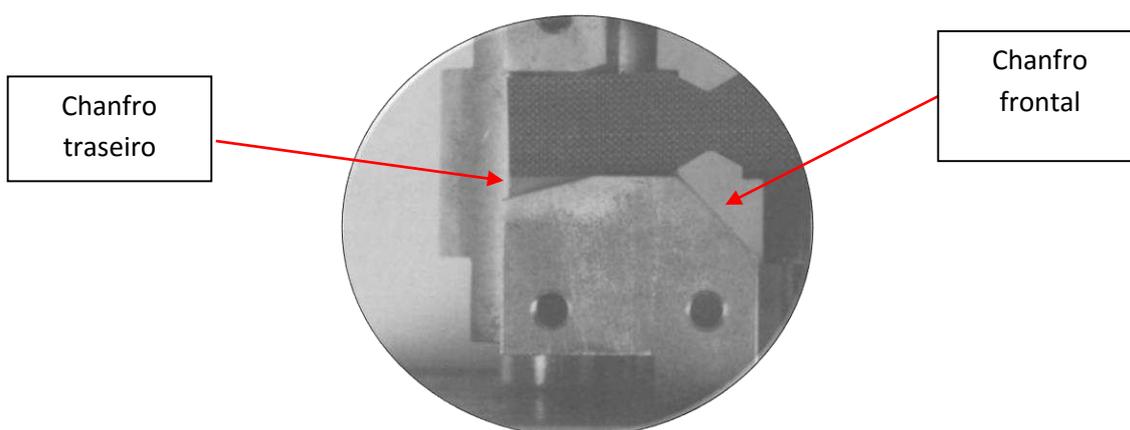


Figura 69 - Detalhe do fixador Dispositivo Iosipescu de Wyoming

O detalhe, apresentado na *Figura 69*, mostra o fixador sem a utilização de cunhas. É possível observar a presença de dois chanfros. O traseiro tem a função facilitar a introdução do corpo de prova. O chanfro frontal tem a finalidade de permitir a deformação do corpo de prova. Este chanfro é o de maior ângulo encontrado ( $45^\circ$ ) nos dispositivos Iosipescu e não é possível observar a presença de dispositivos de alinhamento para o entalhe.

### **Dispositivo utilizado na Universidade de Madison, EUA**

A seguir é apresentado o dispositivo da Universidade de Madison, EUA.

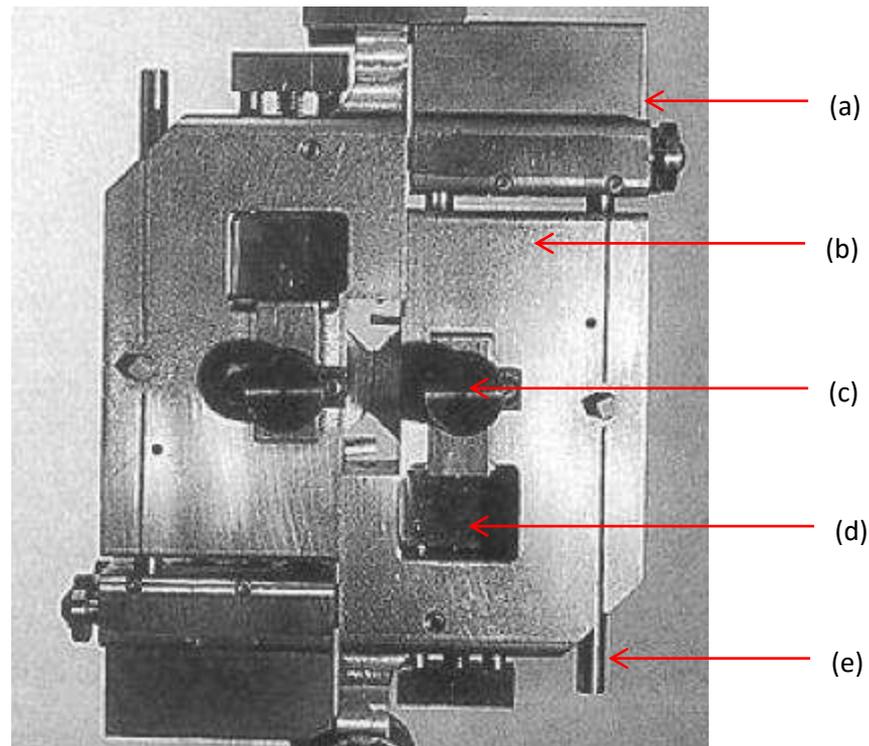


Figura 70 - Dispositivo Losipescu Utilizado em Madison  
.[Fonte: Liu, 1999]

(a) Sistema de alinhamento; (b) Fixador móvel; (c) Sistema de alinhamento do Corpo de prova; (d) Sistema de fixação do corpo de prova; (e) sistema de alinhamento do fixador;

A Figura 70 apresenta o dispositivo Losipescu utilizado na universidade de Madison, EUA. Este dispositivo possui duas partes idênticas e opostas e cada parte possui um sistema de alinhamento (a) e posicionamento do prendedor, um fixador (b), um sistema de alinhamento (c) para posicionar o corpo de prova, um sistema de fixação do corpo de prova (d) que impõe pressão sem atrito e o sistema de guias lineares (e) nos dois fixadores. Este dispositivo recebeu a denominação de dispositivo FPL (LIU, 2000).

A Figura 71 apresenta o roteiro do dispositivo da Universidade de Madison, EUA.

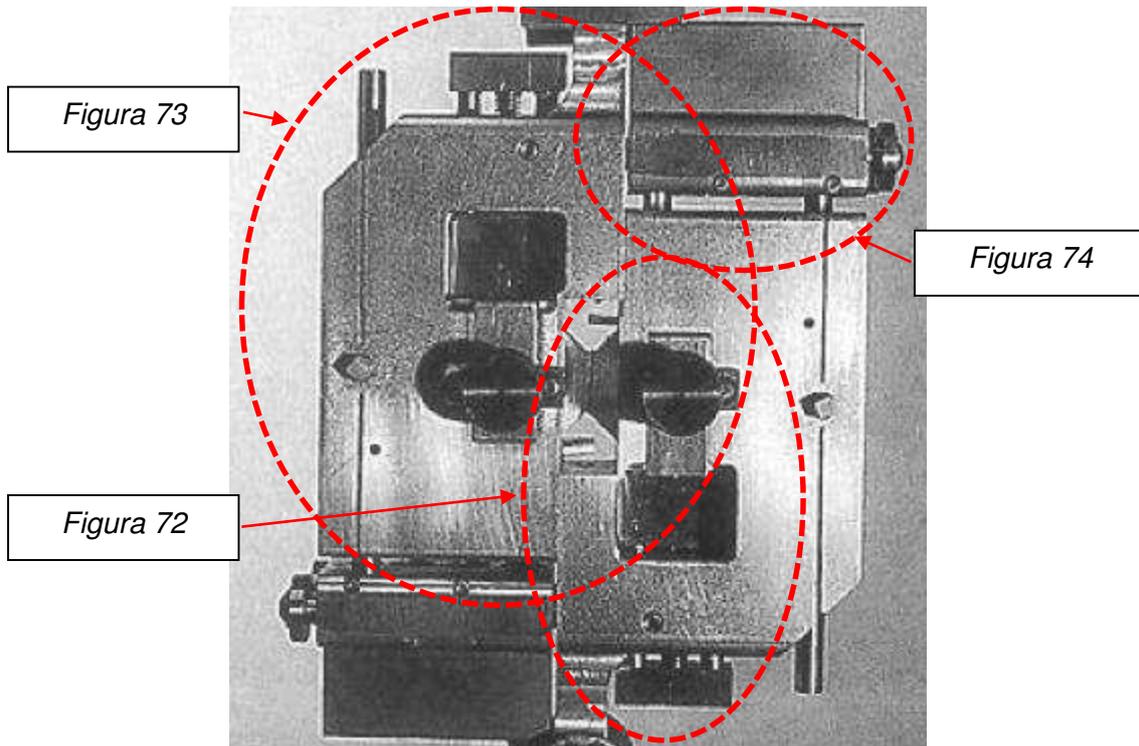


Figura 71 - Roteiro do dispositivo de Madison

A Figura 72 mostra o detalhe do sistema de fixação do corpo de prova utilizado no dispositivo da Universidade de Madison, EUA.

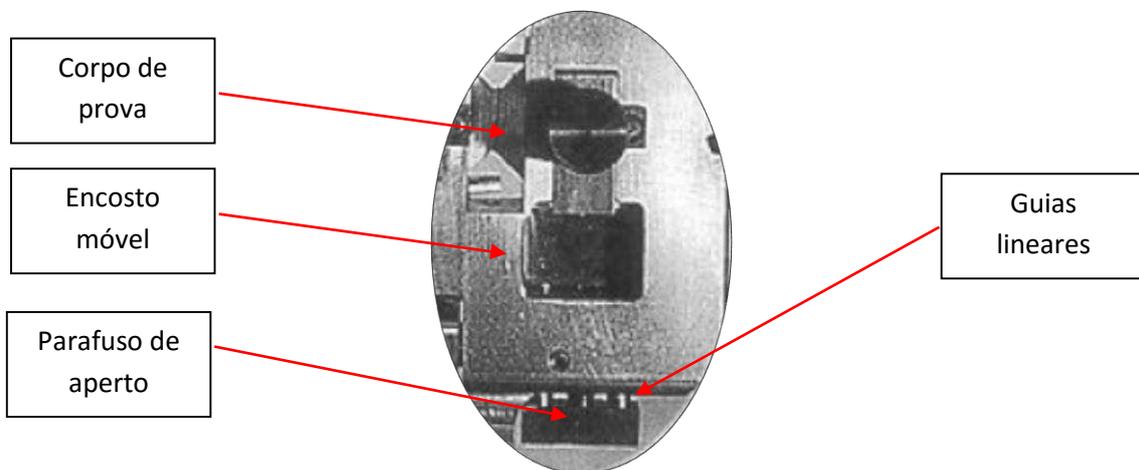


Figura 72 - Detalhe do Sistema de fixação do corpo de prova sem Cunhas.

Este sistema de fixação consiste em movimentar o encosto móvel contra a face do corpo de prova com a utilização de guias lineares que são, por sua vez movimentadas por um parafuso de aperto. Neste tipo de sistema de aperto não existe movimentação na superfície do corpo de prova que possa induzir falhas no momento da montagem do experimento.

A Figura 73 apresenta, em detalhe, o sistema de guias lineares utilizado no dispositivo da Universidade de Madison.

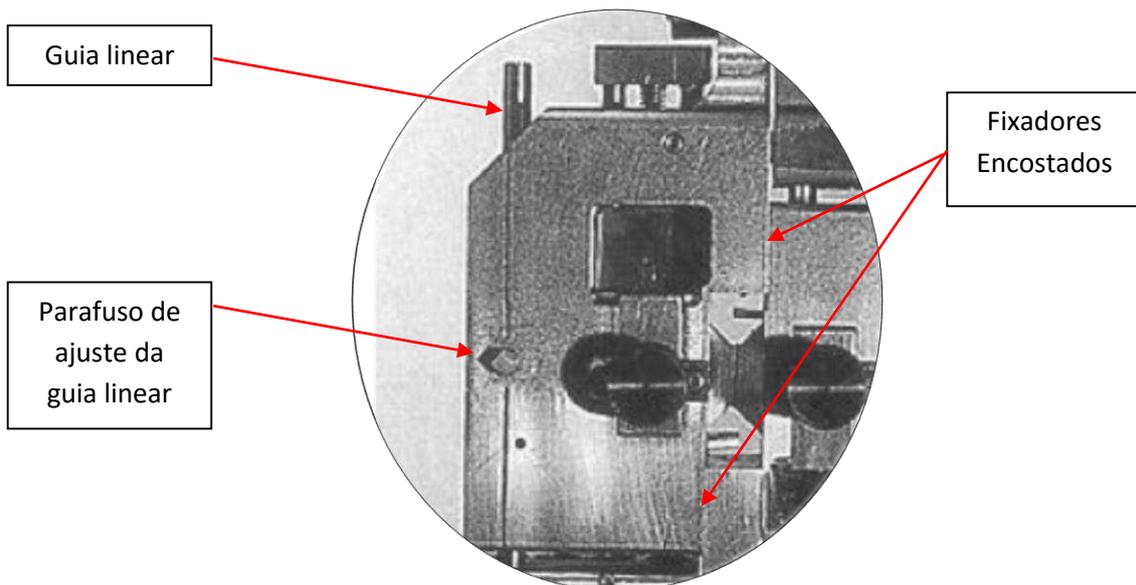


Figura 73 - Detalhe do sistema de guias lineares utilizado no dispositivo Madison

É utilizado uma guia linear em cada fixador. Para evitar a rotação dos fixadores, em conjunto com a guia linear, os fixadores ficam encostados na hora da realização do ensaio. Existe um parafuso com a função de ajustar o atrito entre o fixador e a guia linear.

A Figura 74 mostra o detalhe do mecanismo de sustentação e ajuste das guias lineares presente no dispositivo de Madison.

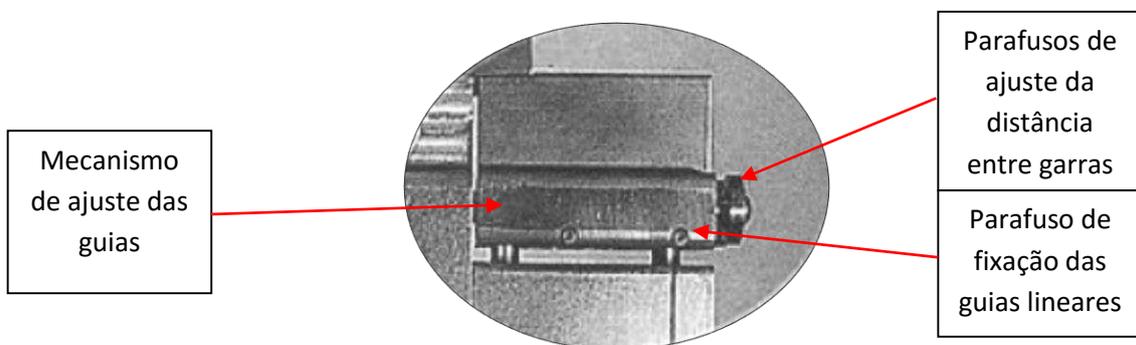


Figura 74 - Detalhe do dispositivo Madison mostrando o mecanismo de ajuste das guias lineares.

Neste dispositivo pode-se alterar a distancia entre os fixadores, que na imagem aparecem encostados. Pode, por opção do operador do ensaio, retirar as guias lineares, bastando retirar os parafusos de fixação das guias.

### **Dispositivo utilizado na Escole de Mines de Saint-Etienne.**

A seguir é apresentado o dispositivo de ensaio losipescu da Escole de Mines de Saint-Etienne.

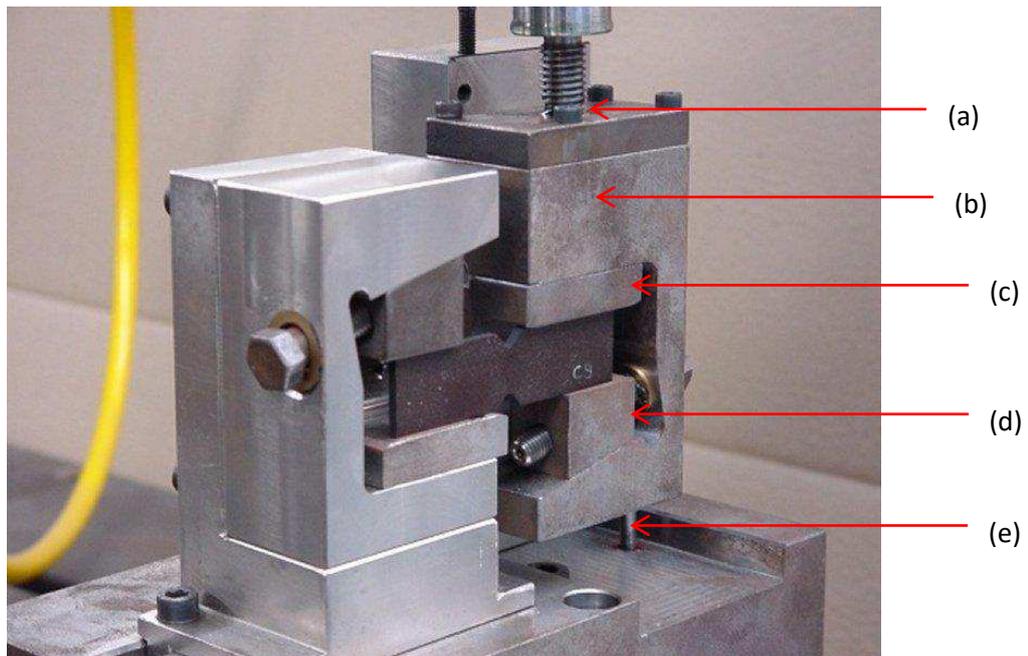


Figura 75 - Dispositivo para ensaio losipescu da Escola de Mines de Saint-Etienne.

[Fonte: (XAVIER, et al., 2004)]

(a) sistema de acoplamento; (b) fixador móvel; (c) sapata móvel; (d) cunha; (e) sistema de alinhamento;

A Figura 75 apresenta o dispositivo de ensaio losipescu utilizado Escola de Mines de Saint-Etienne. É possível observar o sistema de acoplamento (a) entre o dispositivo de ensaio e o dispositivo de aplicação do carregamento, o fixador móvel (b), a utilização de sapatas móveis (c) como alternativa para eliminar os concentradores de tensão na superfície do corpo de prova, a cunha (d) simples e o sistema de alinhamento do fixador móvel.

A Figura 76 apresenta o roteiro do dispositivo da *Escola de Mines de Saint-Etienne*

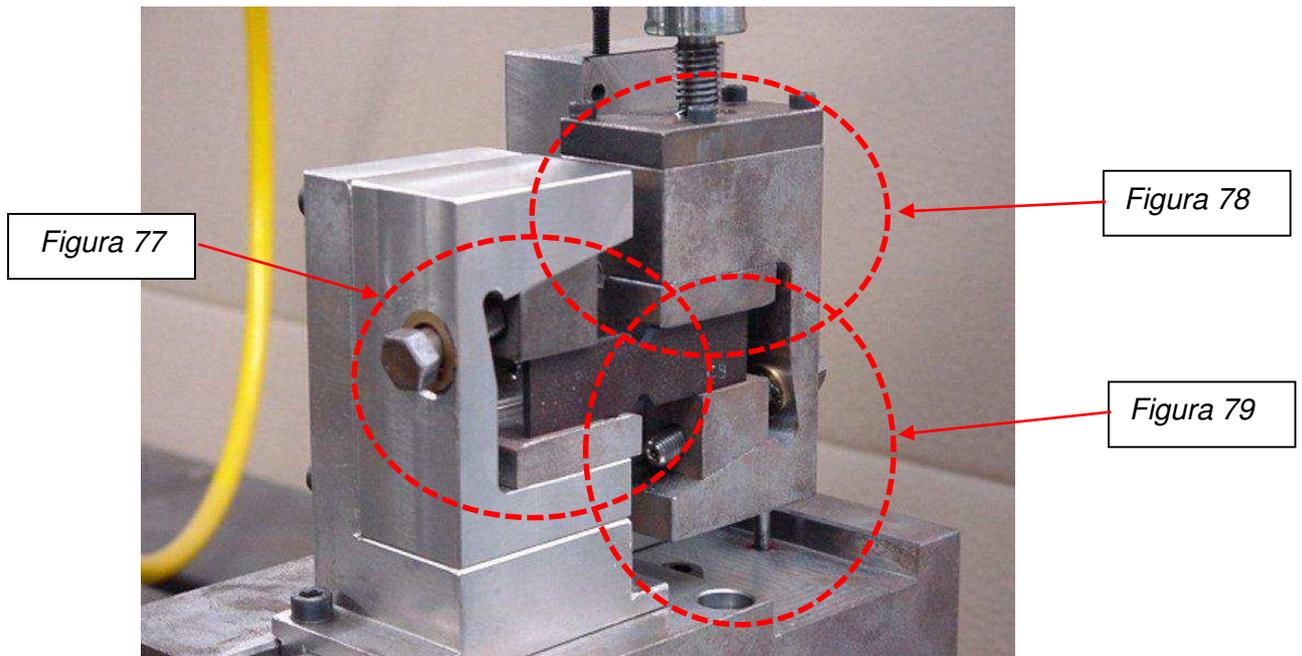


Figura 76 - Roteiro do dispositivo Saint-Etienne

A Figura 77 apresenta o detalhe do sistema de fixação utilizado no dispositivo Iosipescu da *Escole de Mines de Saint-Etienne*.

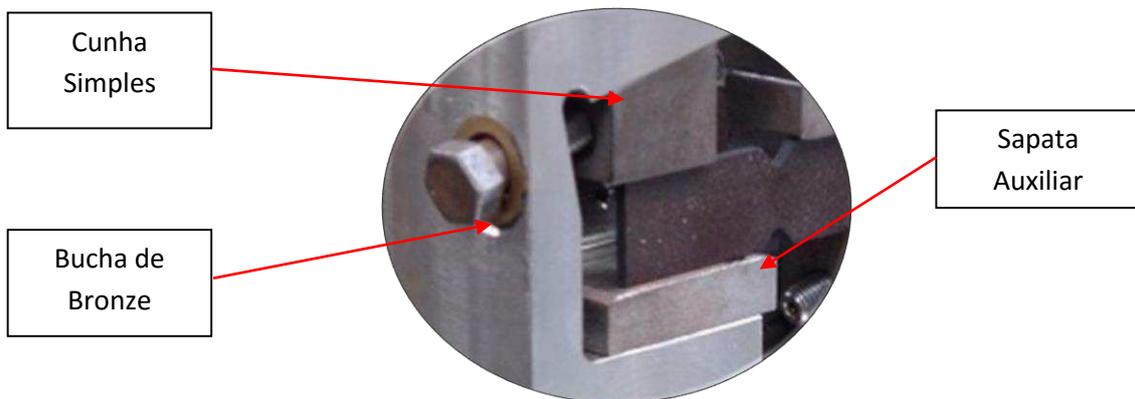


Figura 77 - Detalhe da cunha simples utilizado no dispositivo Saint-Etienne.

É possível observar que o dispositivo utiliza um sistema de cunha simples para fixar a amostra. Esse tipo de fixação costuma provocar o aparecimento de trincas superficiais, na região em que a cunha fica em contato com a amostra, durante a realização do aperto. Como alternativa de minimizar o surgimento destas trincas superficiais foi utilizado uma sapata auxiliar que pode se movimentar horizontalmente. Quando a cunha movimentar o corpo de prova este, por sua vez, movimentará a sapata auxiliar diminuindo a tensão de cisalhamento superficial que provoca o surgimento de trincas inesperadas.

A *Figura 78* apresenta o detalhe do sistema de carregamento do dispositivo da *Escole de Mines de Saint-Etienne*.

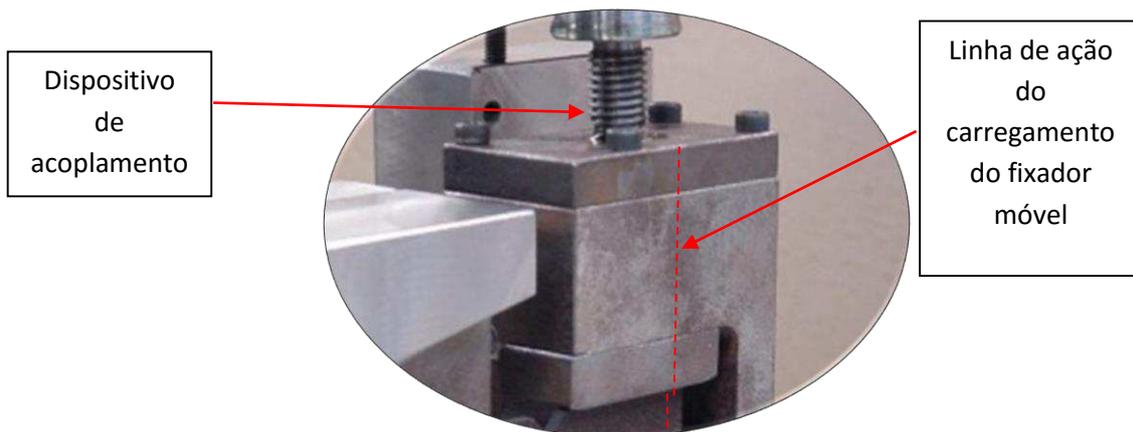


Figura 78 - Detalhe do sistema de Carregamento do dispositivo Saint-Etienne

É possível observar que o posicionamento do dispositivo de carregamento em relação ao entalhe acontece de forma diferente dos outros dispositivos apresentados. O carregamento ocorre na linha central do elemento fixador, aonde se encontra o centro de gravidade do elemento. Isto se dá como alternativa para diminuir o momento provocado pelo carregamento no momento de realização do ensaio.

A *Figura 79* apresenta um detalhe da guia linear utilizada no dispositivo da *Escole de Mines de Saint-Etienne*.

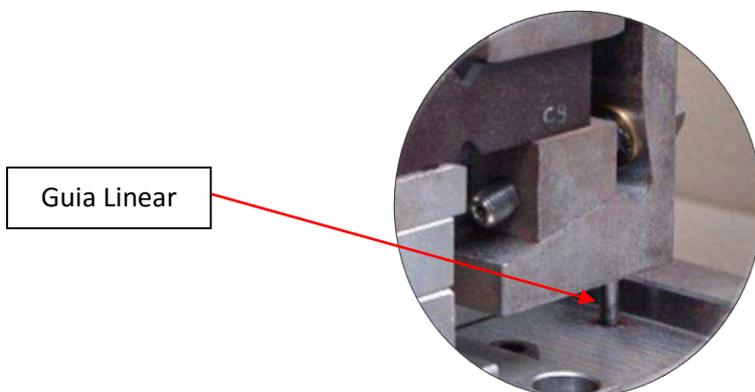


Figura 79 - detalhe da guia linear utilizada no dispositivo Saint-Etienne

A guia linear é cilíndrica, mas é delgada quando comparada com as guias lineares utilizadas nos outros conjuntos apresentados. Isto indica que o carregamento aplicado no centro do fixador diminui consideravelmente os momentos gerados na hora do ensaio.

Depois de analisar os dispositivos apresentados, concluiu-se que o dispositivo Iosipescu:

- O dispositivo Iosipescu pode ser complexo e exigir uma alta qualidade de usinagem de seus elementos.
- Pode ser sub-dividido em 10 conjuntos principais, apresentados na Figura 80, a seguir.

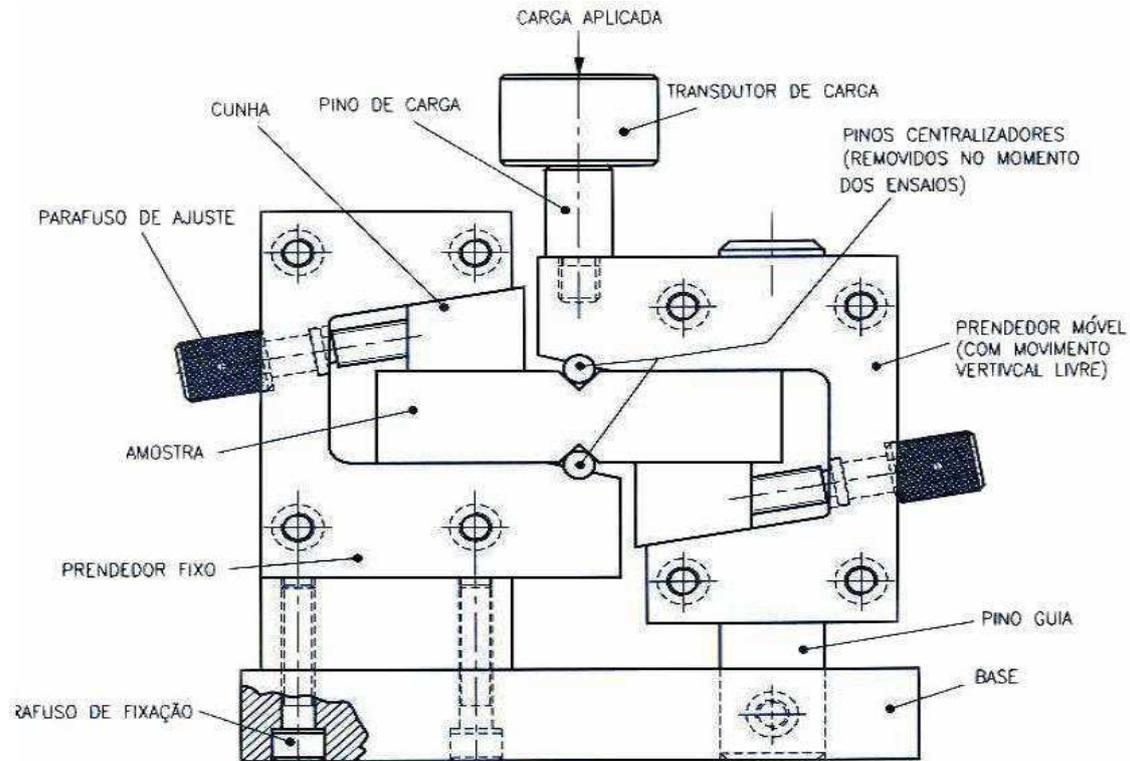


Figura 80 - Conjuntos do Dispositivo de Ensaio Iosipescu  
[Fonte: (SOUSA, 2006)]

1. *Cunha de Ajuste*: Têm a função de fixar a amostra no dispositivo para a realização do ensaio. Sua geometria é a responsável por induzir tensões superficiais no corpo de prova por atrito.
2. *Prendedores (móvel e fixo)*: Transmitem o carregamento para o corpo de prova. Deve-se evitar a rotação deste elemento.
3. *Subsistema de alinhamento*: responsável por manter o prendedor móvel alinhado com o prendedor fixo.
4. *Suporte de ligação*: Componente responsável por unir o prendedor móvel ao eixo guia.
5. *Eixo guia*: eixo em que o prendedor móvel se desloca
6. *Base*: elemento que sustenta os prendedores.
7. *Sistema de transferência de carga*: Equipamento responsável por impor o carregamento.

8. *Subsistema de acoplamento*: tem a função de unir o conjunto ao sistema de carregamento
9. *Subsistema anti-rotação*: conjunto que impede a rotação do prendedor móvel ao redor do eixo guia.
10. *Subsistema de compensação da pré-carga*: componente responsável por manter o prendedor móvel parado para a montagem do ensaio.

A Tabela 1 a seguir, apresenta a definição dos subsistemas, o tag utilizado para identificar o elemento, sua função principal de cada elemento e o pré-requisito de projeto do elemento.

Tabela 1 - Subsistemas do Conjunto Iosipescu com o tag utilizado neste trabalho, a função principal e o pré-requisito *de projeto*.

| <b>Definição do Subsistema</b>    | <b>Identificador</b> | <b>Função</b>   | <b>Pré-requisito</b>   |
|-----------------------------------|----------------------|---|--|
| Cunha de Ajuste                   | CA                   | Fixar o corpo de prova                                    | Baixo atrito com a superfície do Corpo de Prova                          |
| Prendedores (móvel e fixo)        | SF                   | Transmitir o carregamento ao corpo de prova               | Material Rígido o suficiente para não permitir rotação do Corpo de Prova |
| Subsistema de alinhamento         | AS                   | Evitar rotação do prendedor móvel                         | Mínimo atrito com o Eixo Guia e folgas mínimas.                          |
| Suporte de ligação                | SL                   | Fixar o prendedor móvel                                   | Rigidez compatível com os esforços                                       |
| Eixo guia                         | EG                   | Guiar o movimento do prendedor móvel                      | Bom acabamento Superficial   |
| Base                              | BS                   | Fixar o prendedor Fixo                                    | Estabilidade dimensional   |
| Sistema de transferência de carga | TC                   | Equipamento que transmitirá a carga ao sistema            | Controle preciso de movimento  |
| Subsistema de acoplamento         | SAC                  | Dispositivo de fixação do dispositivo à máquina de ensaio | Rigidez suficiente para não interferir no ensaio                         |

|   |     |  |   |
|---|-----|--|---|
| Subsistema anti-<br>rotação                 | SAR | Componente que<br>mantêm o<br>prendedor móvel<br>sem rotação | Fixar o prendedor<br>móvel alinhado<br>com o prendedor<br>fixo                            |
| Subsistema de<br>compensação da<br>precarga | SPC | Componente que<br>facilita a fixação do<br>corpo de prova    | Manter os<br>componentes na<br>posição correta<br>para introdução<br>do corpo de<br>prova |

#### 4.1.2 Projeto conceitual do dispositivo losipescu

##### Cunha de ajuste

A cunha de ajuste tem a função de prender o corpo de prova na posição correta do ensaio e, portanto, possui grande importância no funcionamento do conjunto. As cunhas são elementos feitos de ângulos agudos que servem para prender.

A primeira opção de cunha foi denominada com o tag CA1. O tag é um código para cada elemento para facilitar a nomeação de elementos constituintes em conjuntos com grande número de componentes.

A cunha CA1, apresentada na Figura 81 é formada por um único elemento.

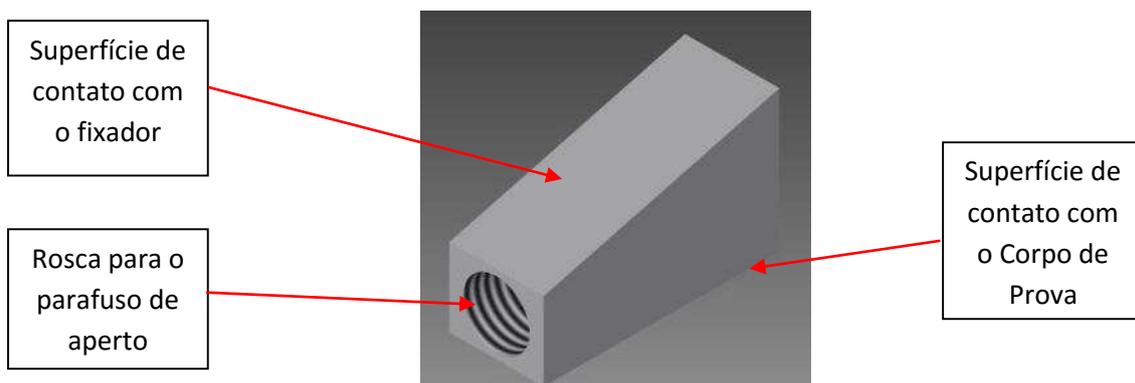
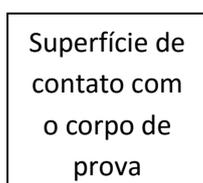


Figura 81 - Modelagem computacional da cunha de ajuste número 1 (CA1).

O elemento, assim concebido é de simples fabricação. A desvantagem desta concepção está no atrito superficial provocado no momento da fixação da amostra na região de contato da cunha com o corpo de prova.

A Figura 82, a seguir, é a cunha de ajuste número 2.



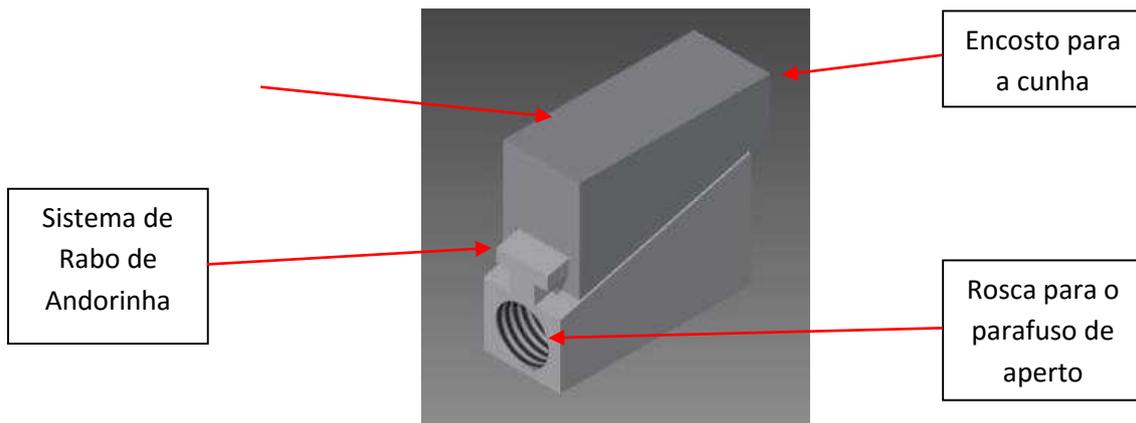


Figura 82 - modelagem computacional da cunha de ajuste número 2 (CA2).

Neste caso a cunha é formada por dois componentes. O componente superior é o componente que fica em contato com a amostra e o atrito fica no deslocamento relativo entre as duas partes. Com esta cunha, não existe movimento relativo entre a cunha e a amostra. A desvantagem deste elemento é a dificuldade de executar a usinagem da geometria conhecida como “Rabo de andorinha” para fixar uma cunha a outra.

### **Prendedor móvel e prendedor fixo.**

O prendedor móvel e o prendedor fixo possuem a mesma geometria e sofrem os mesmos esforços por isso foram agrupados sob o mesmo tag (SF). Os prendedores são os elementos responsáveis por distribuir o carregamento na amostra, juntamente com as cunhas. Por isso as cunhas ficam montadas nos fixadores. Para a apresentação dos prendedores não serão montadas as cunhas de ajuste.

O primeiro Fixador foi o proposto no projeto Wyoming. A **Figura 83**, a seguir, apresenta a modelagem computacional do par de elemento fixador.

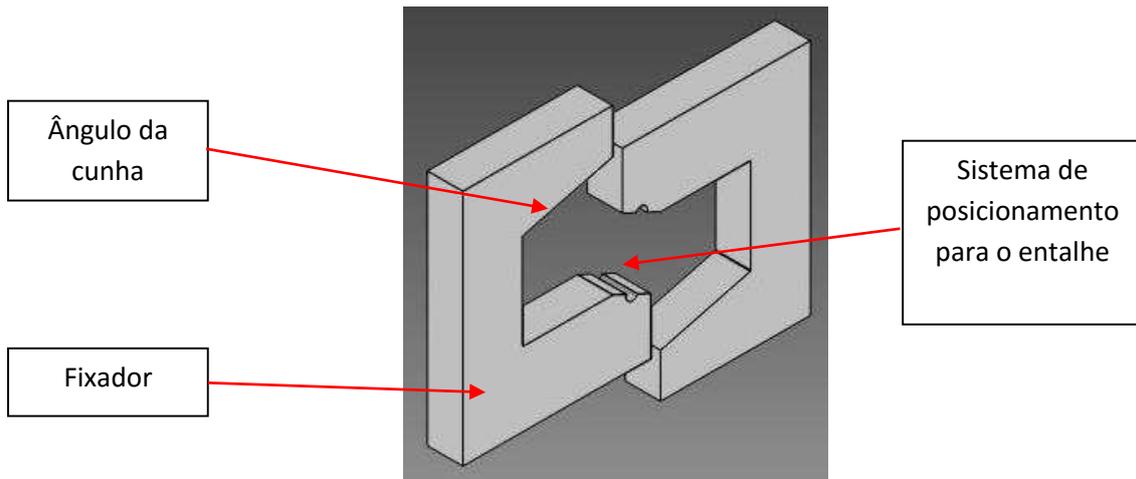


Figura 83 - modelagem computacional do prendedor fixo numero 1 (SF1)

É possível identificar o entalhe circular para posicionar a amostra. O sistema de posicionamento é utilizado para manter o entalhe do corpo de prova na posição correta para a realização do ensaio. A cunha de ajuste ideal para esse tipo de prendedor é a cunha de ajuste 1(CA1), que é uma cunha única e é necessário que o ângulo de cunha do fixador seja igual ao ângulo da cunha.

A Figura 84, a seguir, apresenta a modelagem computacional dos prendedores número 2.

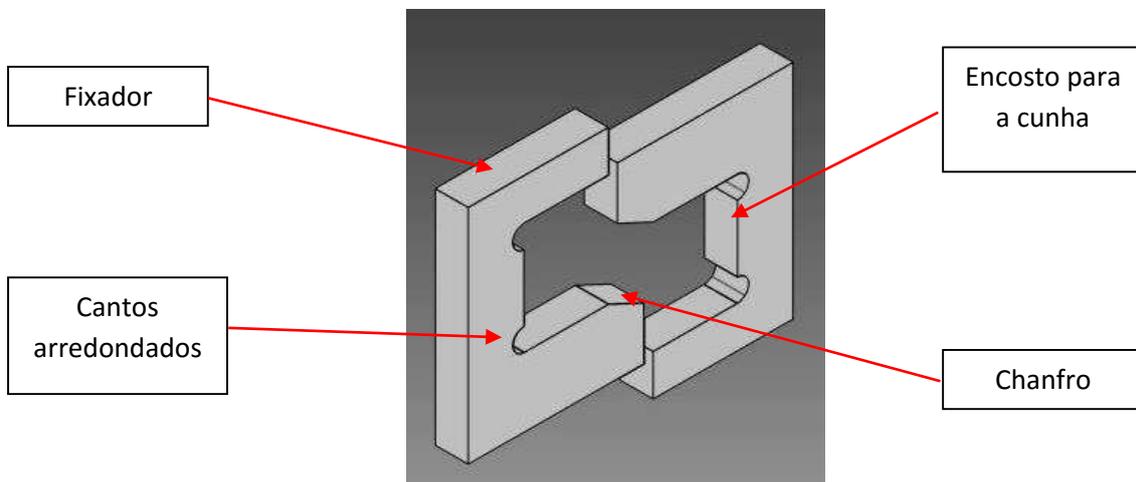


Figura 84 - modelagem computacional dos prendedores número 2(SF2).

Essa concepção é para a utilização da segunda cunha (CA2) e recebeu o tag SF2. Neste caso observa-se a presença de cantos arredondados, que facilitam a usinagem do elemento, e a inexistência de inclinação na região de fixação da amostra. A cunha CA2 necessita que exista uma face de encosto para evitar o movimento relativo entre a cunha e o corpo de prova.

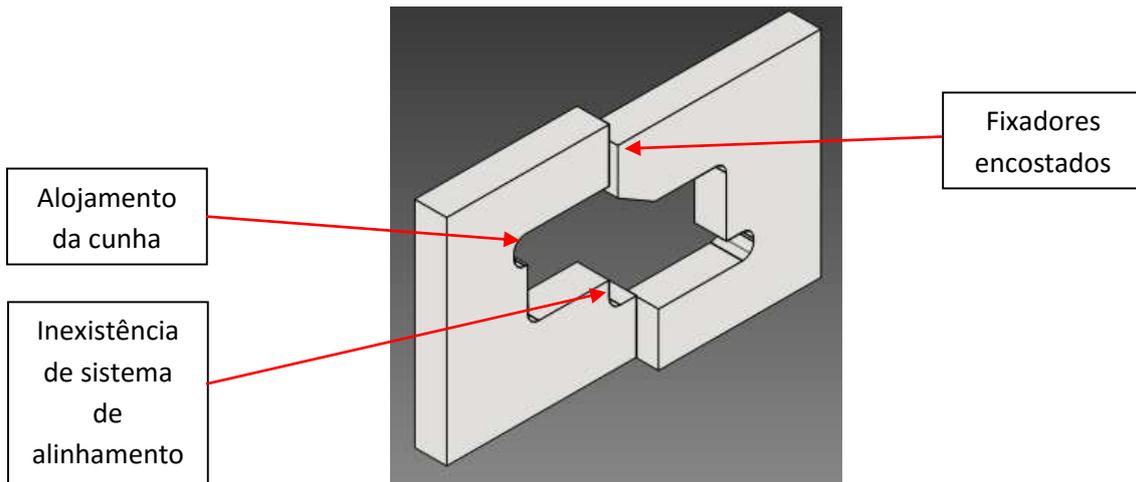


Figura 85 - modelagem computacional dos prendedores número 2 (SF3).

Esta idealização recebeu o tag SF3. É possível observar que, nesta concepção, os elementos Fixadores trabalham encostados. Neste tipo de prendedor se faz necessário a utilização da cunha número 2 (CA2) que é mais elaborada. Em um dos fixadores há a inexistência do sistema de alinhamento para que seja possível passar os fios utilizados no sistema de aquisição de um lado para o outro.

### Subsistema de alinhamento.

A primeira solução encontrada para o subsistema de alinhamento foi a utilização de guias lineares.

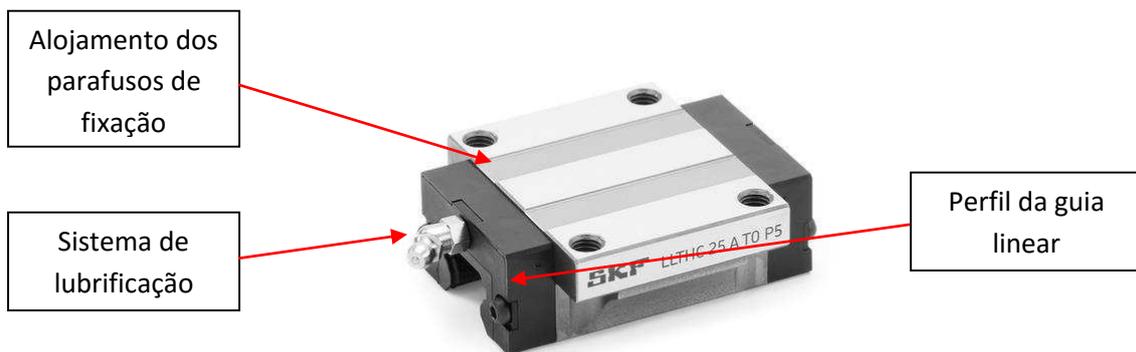


Figura 86 - guia linear SKF  
 [ Fonte: [www.skf.com](http://www.skf.com) acesso em 02/05/2014]

Esse tipo de guia linear promove a movimentação linear adequada para o dispositivo proposto, dando uma maior confiabilidade ao sistema. Essa solução

recebeu o tag SA1. É necessário que o eixo tenha bom ajuste dimensional e dureza superficial considerável.

A segunda solução encontrada foi a utilização de rolamentos lineares e recebeu o tag SA2.

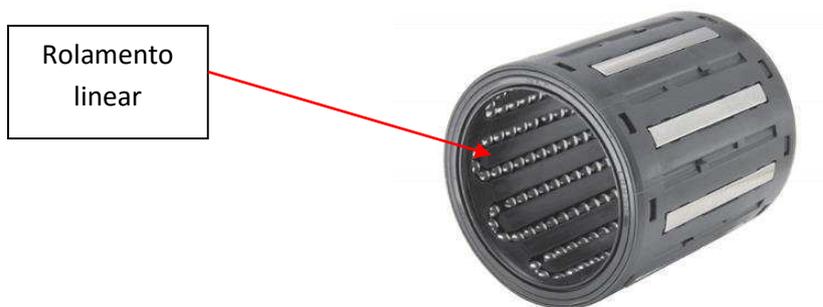


Figura 87 - Rolamentos Lineares  
[Fonte: [www.skf.com](http://www.skf.com) acesso em 03/05/2014]]

Esse tipo de rolamento permite a rotação em torno do eixo. É necessário que o eixo tenha bom ajuste dimensional e dureza superficial considerável.

A terceira solução encontrada foi a utilização de uma bucha de bronze. Essa solução recebeu o tag SA3.

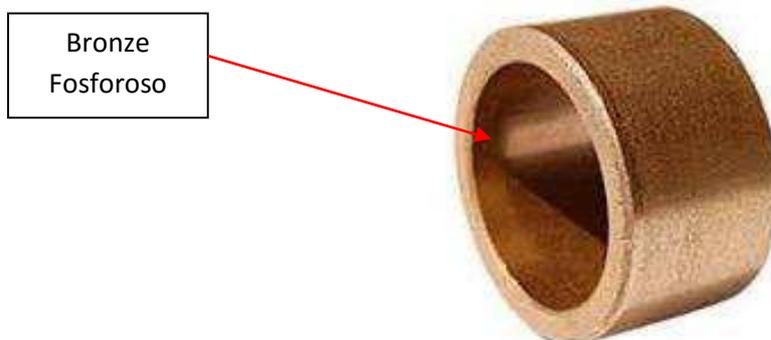


Figura 88 - Bucha de bronze  
[Fonte: [www.solucoesindustriais.com.br](http://www.solucoesindustriais.com.br)]

Esse tipo de solução é utilizado para suportar grandes esforços. É uma opção mais barata e possui a vantagem de não necessitar de lubrificação. Para isso é necessário a utilização de um eixo guia confeccionado de um aço temperável.

De acordo com o manual técnico do distribuidor de bronze COPPERMETAL (coppermetal, 2014), o material mais indicado para a confecção deste elemento é o Bronze Fosforoso

## Suporte de ligação.

Este componente é o responsável por promover a união entre a garra móvel o conjunto.

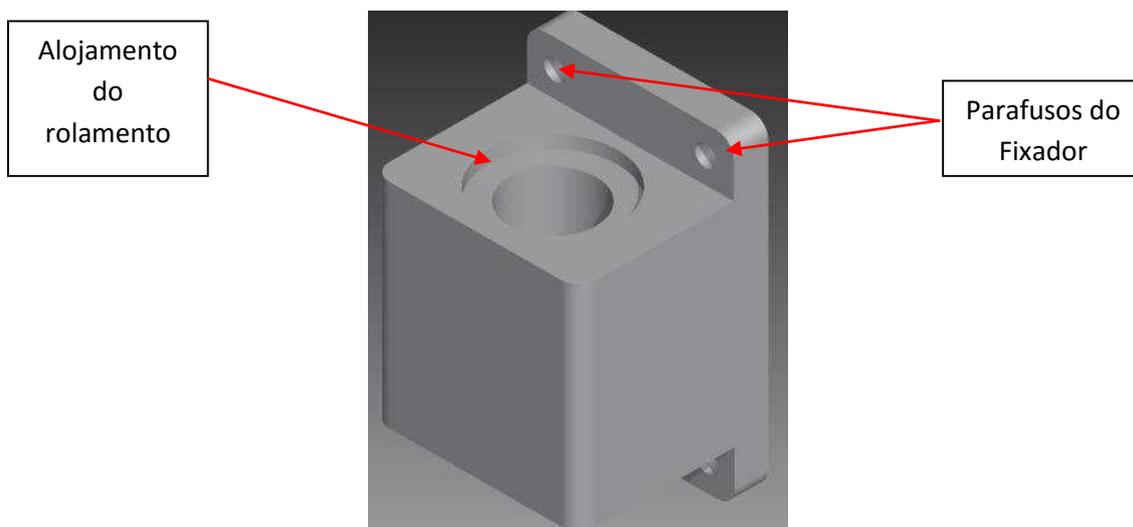


Figura 89 - modelagem computacional do suporte de ligação 1

A Figura 89 apresenta a modelagem computacional da concepção do elemento suporte de ligação 1 (SL1). Esse elemento é necessário para a utilização do Sistema de Alinhamento número 2 (SA2). O suporte de ligação 1 utiliza um rolamento linear e foi necessário criar um alojamento para este rolamento.

A segunda concepção para o suporte de ligação está apresentada a seguir e foi concebida para a utilização com o subsistema de alinhamento 1. Esta concepção recebeu a denominação Suporte de ligação 2 (SL2).

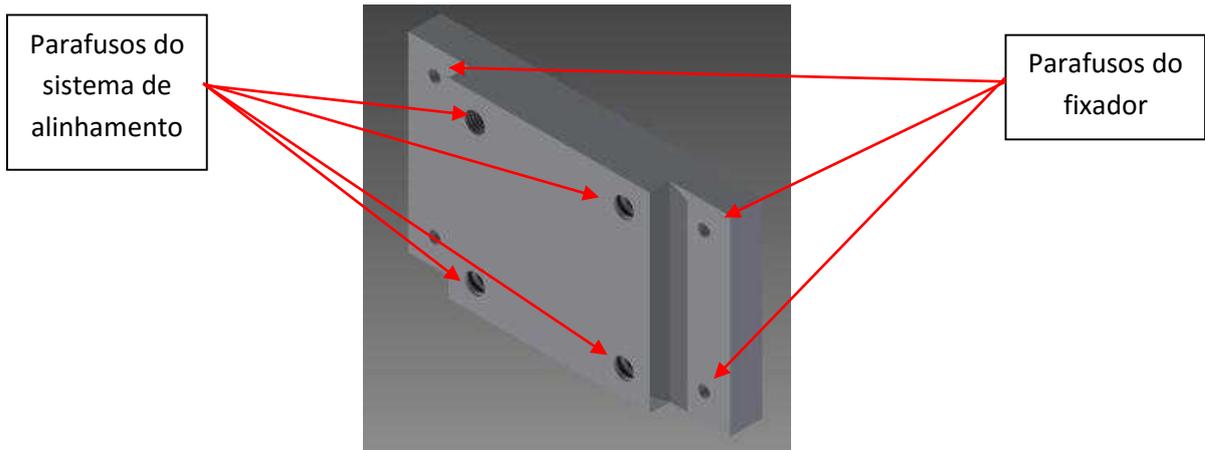


Figura 90 - modelagem computacional do suporte de ligação 2

Esse suporte de ligação apresentado na Figura 90 servirá para parafusar a guia linear ao sistema.

A terceira concepção para o suporte de ligação é apresentada a seguir.

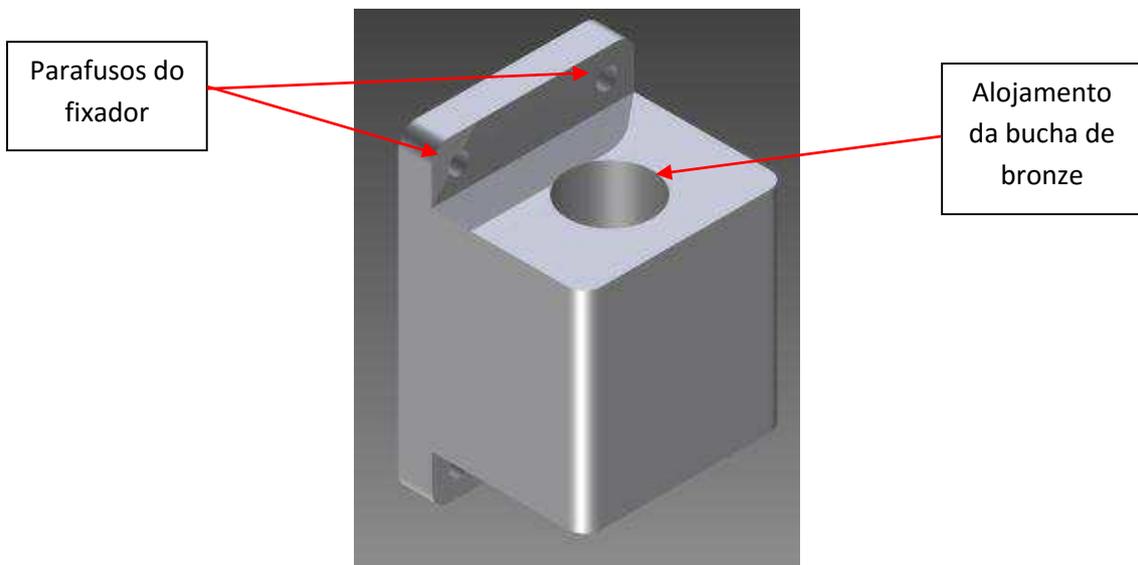


Figura 91 - modelagem computacional do suporte de ligação 3

A Figura 91 apresenta a modelagem computacional para a utilização do SA3. Esta concepção utiliza uma bucha de bronze. A bucha de bronze entrará no alojamento com um ajuste prensado.

### **Eixo Guia.**

O eixo guia é um elemento de geometria simples, portanto, de fácil fabricação. A única variação possível no elemento é a forma de engaste ao conjunto. O eixo guia com o engaste feito por pino recebeu o tag EG1 e o eixo guia com engaste roscado recebeu o tag EG2. A seguir é apresentado a modelagem computacional do elemento EG1.

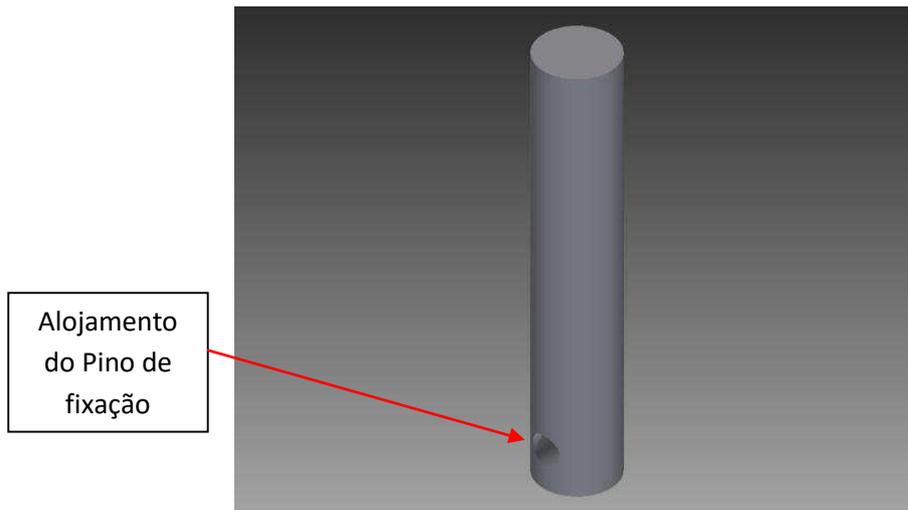


Figura 92 - modelagem computacional do elemento eixo guia 1(EG1)

O eixo guia 1 (EG1) é um elemento de fácil confecção e a proposta de fixação dele ao conjunto é de ser fixado por um pino.

Na Figura 93 é apresentado a segunda concepção para o eixo guia. Essa concepção pode ser utilizada com as propostas de sistema de alinhamento SA2 e SA3.

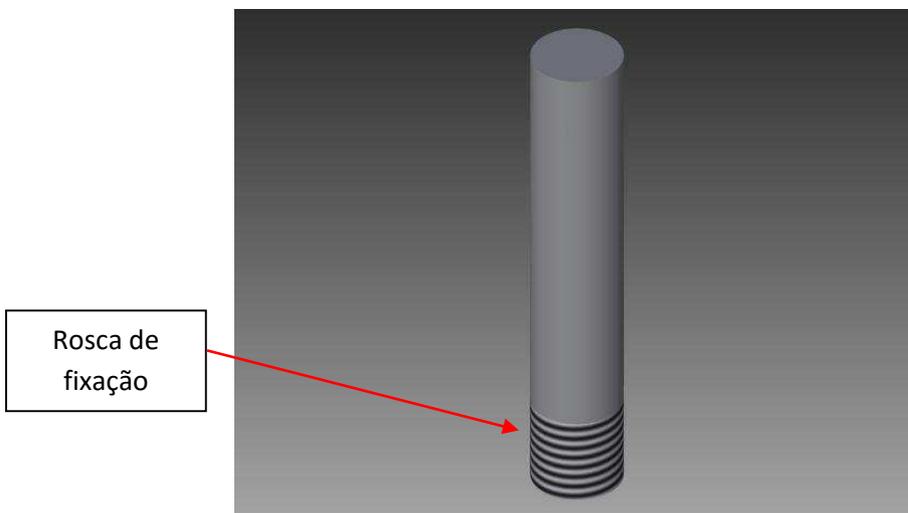


Figura 93 - modelagem computacional do elemento eixo guia 2 (EG2)

O elemento EG2, apresentado acima, possui uma rosca na extremidade que servirá de fixação deste elemento ao conjunto.

Se o conjunto for montado com guias lineares, é necessário que o eixo guia seja a própria guia linear, e não é necessário confeccionar este elemento. Comercialmente este elemento é conhecido como trilho e é apresentado na **Figura 94**.

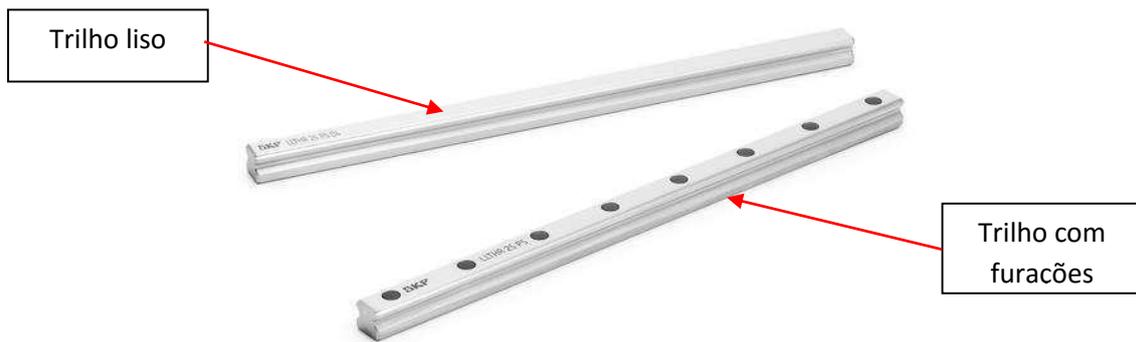


Figura 94 - trilho comercial para o conjunto guia linear  
 [Fonte: [www.skf.com](http://www.skf.com) acesso em 15/04/2015]

O elemento guia linear é comprado junto com seu trilho e é preciso especificar o seu comprimento. Para esse projeto 15 mm de comprimento é suficiente.

### Base

A primeira base idealizada recebeu o tag BS1. Esta base utiliza o eixo guia 1(EG1) e é apresentada na *Figura 95* a seguir.

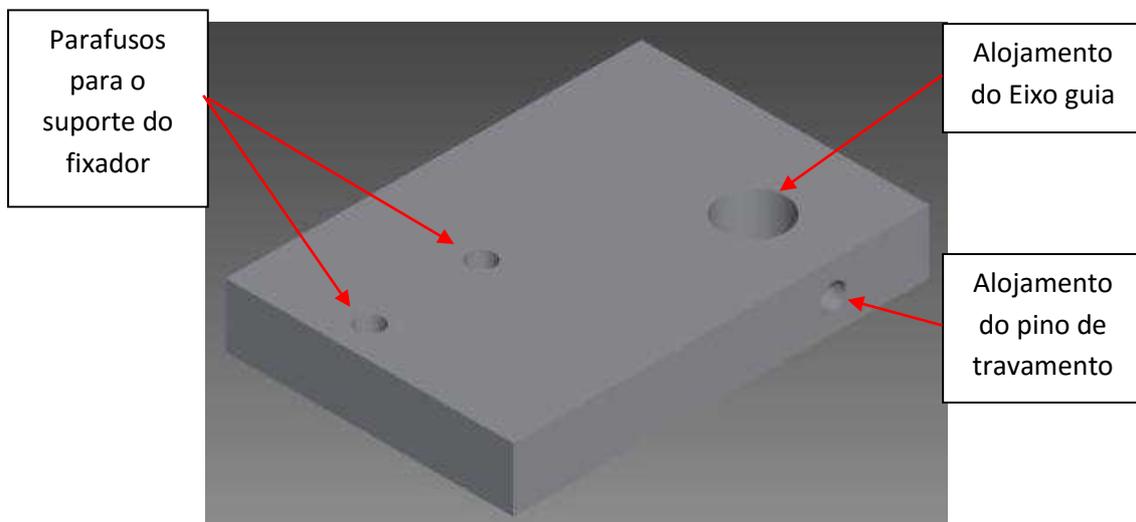


Figura 95 -modelagem computacional do elemento base 1 (BS1).

É possível observar que a base com o tag BS1 é de fácil construção, considerando que o elemento possui apenas furos passantes. O alojamento para o eixo guia 1(EG1) precisa ter uma tolerância dimensional compatível com o projeto.

A segunda concepção para o elemento base é apresentado na *Figura 96*, a seguir.

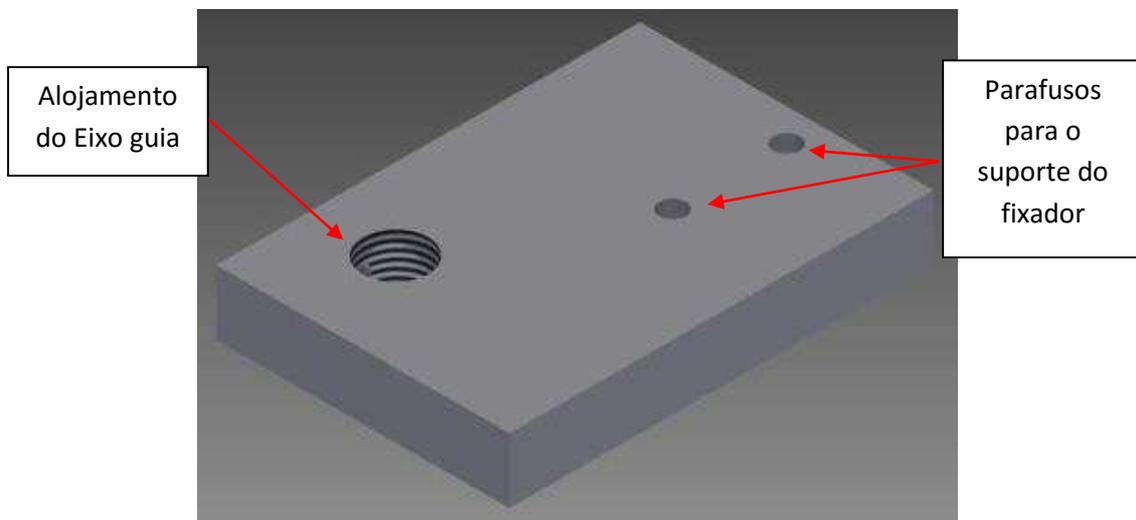


Figura 96 - modelagem computacional do elemento base 2 (BS2)

A configuração do elemento base 2 (BS2) foi elaborada para a utilização do eixo guia 2 (EG2) apresentado anteriormente, na *Figura 93*. É possível observar a presença de uma rosca no alojamento para o eixo guia.

A terceira configuração para o elemento base é apresentado na *Figura 97*,a seguir

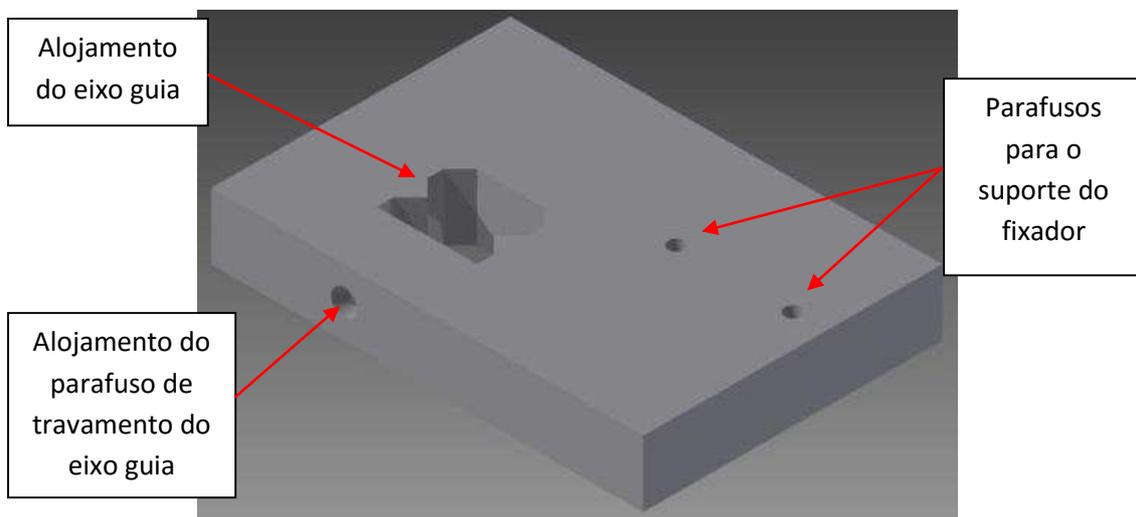


Figura 97 - modelagem computacional do elemento base 3(BS3)

A base 3 foi modelada computacionalmente para ser utilizada com o elemento EG3. É possível observar que esta configuração possui fabricação mais elaborada. O alojamento do trilho da guia linear precisa de uma tolerância

dimensional menor para garantir que o elemento tenha um engaste rígido no sistema.

### Sistema de transferência de carga.

O subsistema de transferência de carga tem fundamental importância neste projeto. Esse subsistema tem a função de imprimir o carregamento a amostra e a confecção de outros elementos dependem da escolha deste dispositivo.

Uma opção de dispositivo de transferência de carga é proposta por (SOUSA, 2006) em seu trabalho. A **Figura 98** apresenta este dispositivo.

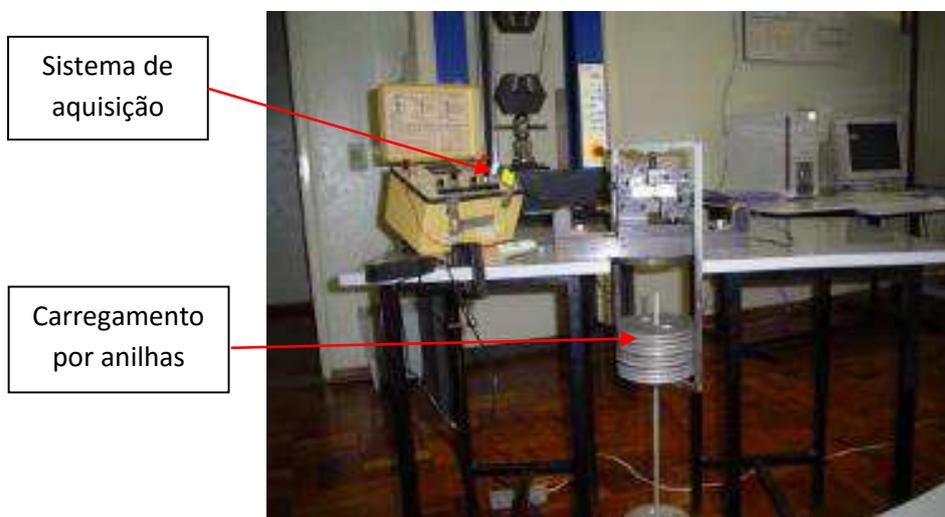


Figura 98 - dispositivo manual de carregamento.  
[Fonte: (Souza, 2006)]

É possível observar os pesos, ou anilhas, que são utilizados como carregamento. Com a adição de uma nova anilha o peso aumenta e o carregamento na amostra também. A desvantagem desse sistema é que o carregamento é feito em degraus. Essa configuração recebeu o tag TC1.

Outra opção de sistema de transferência de carga é substituir o carregamento manual por um elemento hidráulico. Essa configuração recebeu o tag TC2 e é apresentado na Figura 99.



Figura 99 - Elemento hidráulico para o sistema de transferência de carga.

Essa configuração fornece ao sistema um carregamento uma capacidade de carga maior (8 Toneladas de carregamento).

A terceira configuração para o sistema de carregamento é a utilização da máquina de ensaio universal.

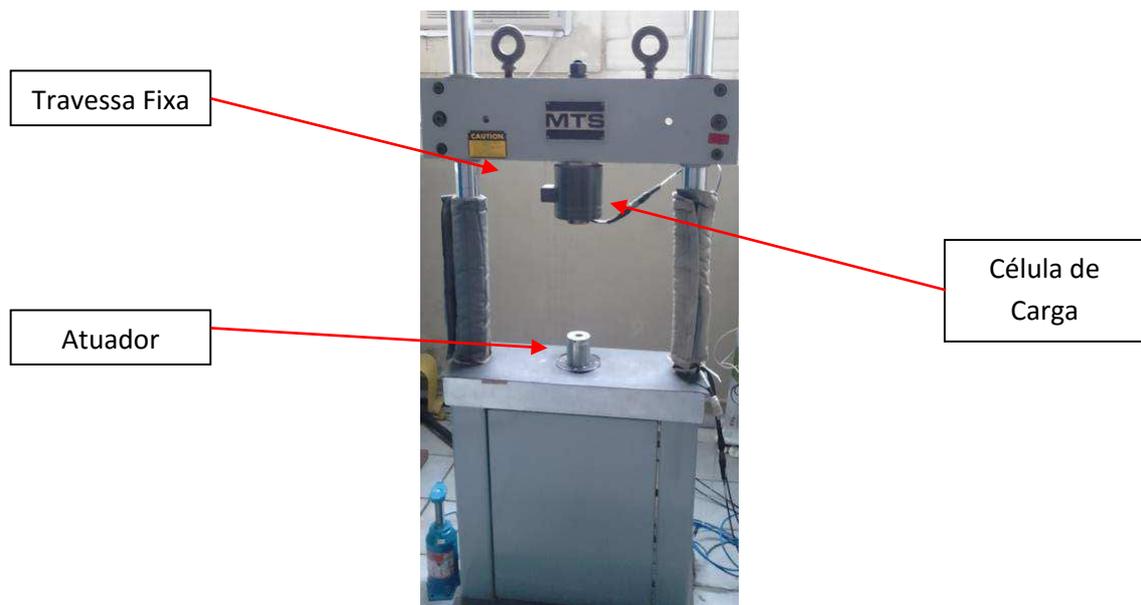


Figura 100 - máquina de ensaio universal

Este sistema de transferência de carga, apresentado na Figura 100, oferece ao sistema um elevado controle de deslocamento. Essa opção de sistema de transferência recebeu o tag TC3.

### **Subsistema de acoplamento.**

O sistema de acoplamento é componente responsável por fixar o conjunto ao sistema de transferência de carregamento.

Para a opção de carregamento TC1 foi proposto um acoplamento esférico para garantir a aplicação da carga no sentido perpendicular a amostra. Esse acoplamento foi identificado com o tag SAC1 e é apresentado na figura a seguir.

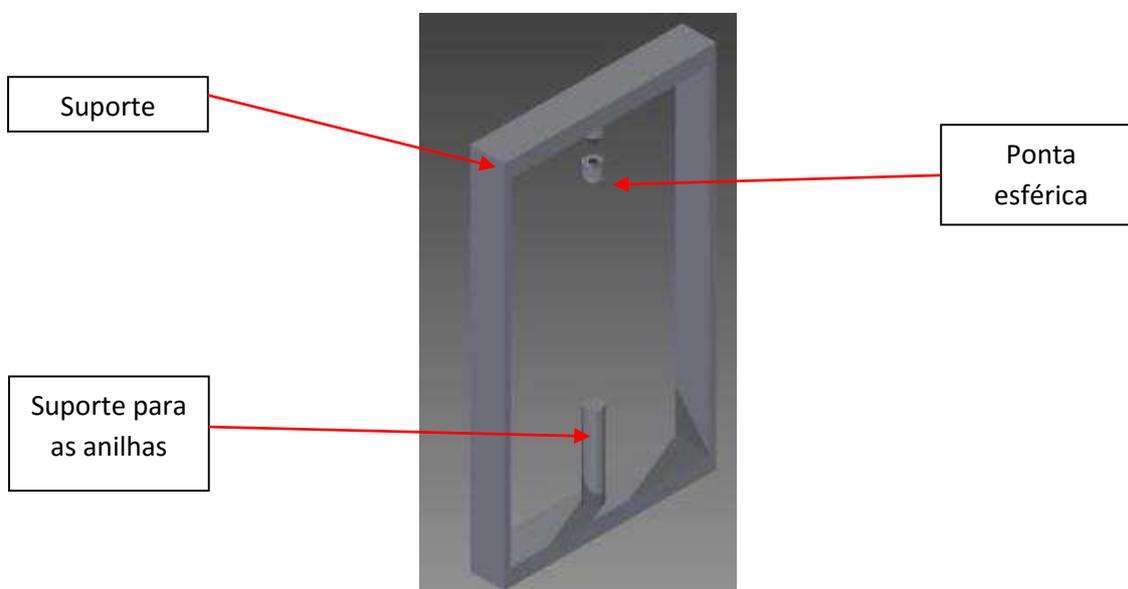


Figura 101 - Modelagem computacional do Subsistema de acoplamento1 (SAC1)

A Figura 101 apresenta a modelagem computacional do sistema de acoplamento SAC1 juntamente com o dispositivo TC1. Uma ponta esférica é responsável por transmitir o carregamento ao conjunto. Isso possibilita que o sistema tenha a liberdade de movimento para manter o carregamento na direção perpendicular.

O sistema acoplamento idealizado para o sistema de transferência de carga número dois é apresentado na Figura 102, a seguir.

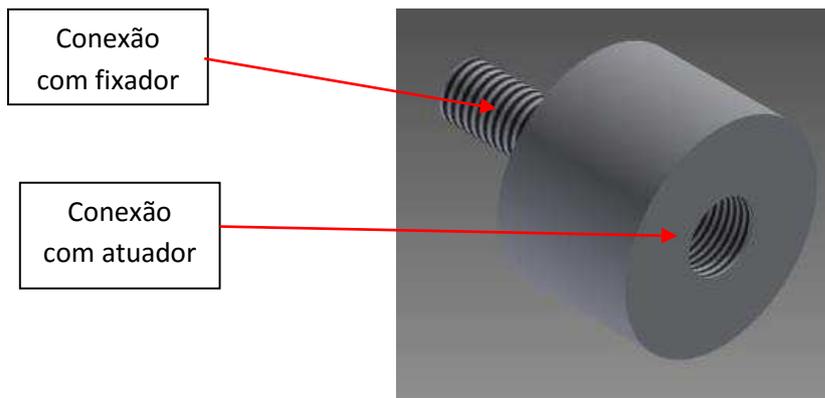


Figura 102 - Modelagem computacional do subsistema de acoplamento número 2 (SAC2)

Esse sistema recebeu a designação SAC2. Trata-se do acoplamento entre o prendedor móvel e o atuador hidráulico do TC2. A seguir é apresentado o acoplamento para o sistema de transferência de carga número 3, na Figura 103.

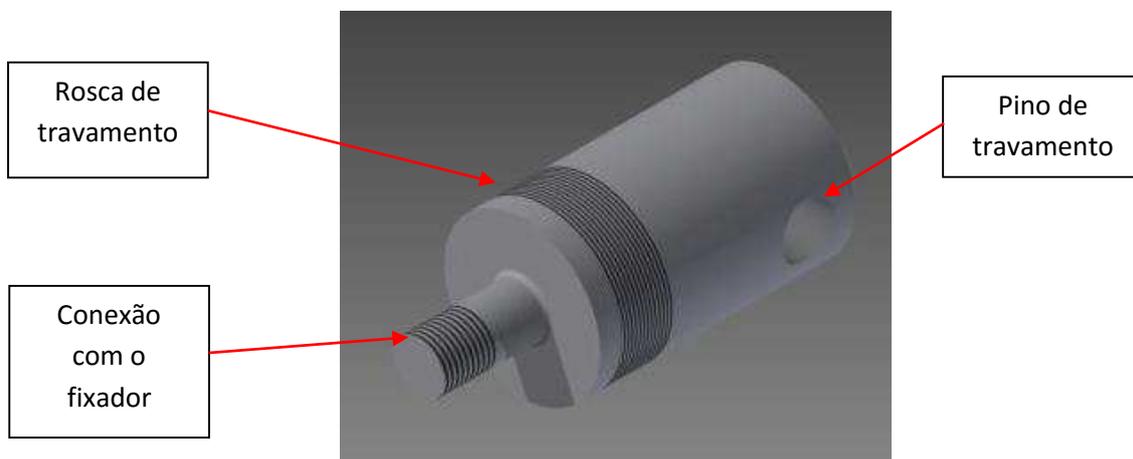


Figura 103 - Modelagem computacional do elemento Subsistema de acoplamento 3 (SAC3)

A Figura 103 ilustra a simplicidade de construção do elemento de acoplamento para a máquina de ensaios universal.

### **Subsistema anti-rotação.**

O subsistema anti-rotação é utilizado para evitar a rotação do sistema de transferência de carga e garantir que o carregamento acontecerá da forma correta. Uma forma de travamento mecânico é a utilização de contra porcas.

Esse sistema recebeu o tag SAR1 e é apresentado na figura a seguir.

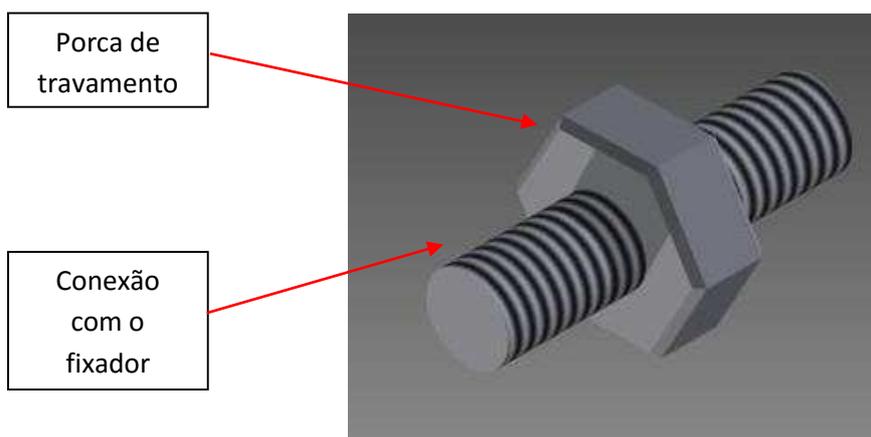


Figura 104 - modelagem computacional do sistema anti-rotação1 (SAR1)

A proposta desse sistema apresentado na Figura 104 é travar o dispositivo prendedor móvel com o auxílio de uma porca.

### **Compensação da precarga.**

O sistema de compensação da precarga é um sistema que permite a instalação do corpo de prova, antes de iniciar o carregamento. As concepções de sistema de transferência de carga TC2 e TC3 não necessitam desse sistema porque não há movimento do prendedor móvel na direção do carregamento devido ao calço hidráulico dos dois sistemas. O calço hidráulico acontece nos sistemas que utilizam óleo para o deslocamento (hidráulica). Como o óleo é considerado um fluido incompressível, só haverá deslocamento do dispositivo se o óleo vazar do sistema.

Para o sistema de transferência de carga TC1 foi idealizado a utilização de uma mola.

### **Definição da configuração do dispositivo.**

Definidas as prováveis configurações dos elementos que compõem o projeto, cabe ao projetista selecionar o conjunto de soluções que melhor se adequa ao conjunto projetado.

A Tabela 2 apresenta a matriz de projeto para o sistema losipescu. A utilização dos tag's facilita a exposição das soluções encontradas.

Tabela 2 - Matriz de projeto do sistema losipescu.

| Tipo de ensaio   | Dispositivo | Componente                             | Solução |      |      |
|------------------|-------------|--|---------|------|------|
|                  |             |  | CA1     | CA2  | -    |
| Ensaio ASTM 5379 | losipescu   | Cunhas de Ajuste                       | CA1     | CA2  | -    |
|                  |             | Prendedores                            | SF1     | SF2  | SF3  |
|                  |             | Subsistema de Alinhamento              | SA1     | SA2  | SA3  |
|                  |             | Suporte de ligação                     | SL1     | SL2  | SL3  |
|                  |             | Eixo Guia                              | EG1     | EG2  | EG4  |
|                  |             | Base                                   | BS1     | BS2  | BS3  |
|                  |             | Sistema de transferência de carga      | TC1     | TC2  | TC3  |
|                  |             | Subsistema de Acoplamento              | SAC1    | SAC2 | SAC3 |
|                  |             | Subsistema Anti-Rotação                | SAR1    | -    | -    |
|                  |             | Subsistema de compensação da pre-carga | SPC1    | -    | -    |

A construção da matriz de projeto da estrutura facilita a escolha da opção mais viável. Na Tabela 3 são expostas as soluções de construção escolhidas para a etapa de fabricação do protótipo.

Tabela 3 - Matriz de projeto do sistema losipescu com as opções escolhidas para construção.

| Tipo de ensaio   | Dispositivo | Componente                             | Solução |      |      |
|------------------|-------------|--|---------|------|------|
|                  |             |  | CA1     | CA2  | -    |
| Ensaio ASTM 5379 | losipescu   | Cunhas de Ajuste                       | CA1     | CA2  | -    |
|                  |             | Prendedores                            | SF1     | SF2  | SF3  |
|                  |             | Subsistema de Alinhamento              | SA1     | SA2  | SA3  |
|                  |             | Suporte de ligação                     | SL1     | SL2  | SL3  |
|                  |             | Eixo Guia                              | EG1     | EG2  | EG3  |
|                  |             | Base                                   | BS1     | BS2  | BS3  |
|                  |             | Sistema de transferência de carga      | TC1     | TC2  | TC3  |
|                  |             | Subsistema de Acoplamento              | SAC1    | SAC2 | SAC3 |
|                  |             | Subsistema Anti-Rotação                | SAR1    | -    | -    |
|                  |             | Subsistema de compensação da pre-carga | SPC1    | -    | -    |

A configuração definitiva é mostrada na figura a seguir. Esta configuração da matriz de projeto é a CA1, SF1, SA3, SL3, EG1, BS1, TC3, SAC3, SAR1, SPC1.

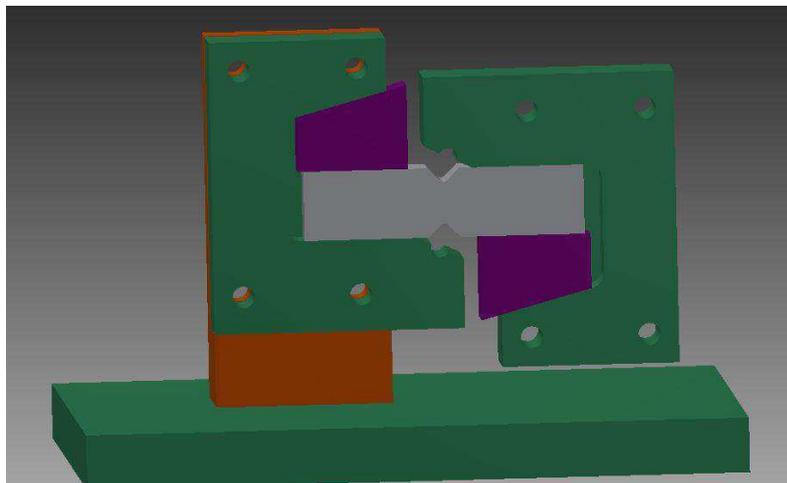


Figura 105 - Modelagem computacional do conjunto losipescu

Na Figura 105 é apresentada a montagem de todo o conjunto para o ensaio ASTM 5379.

Com a escolha das geometrias que melhor se adequam ao projeto, dimensionam-se os elementos que fazem parte do projeto.

### 4.1.3 Projeto Preliminar do dispositivo losipescu

Para dimensionar os componentes da garra tipo losipescu desenvolvida neste mestrado foi utilizada a ferramenta computacional de simulação do Autodesk® Inventor® versão de Estudante.

A análise computacional de tensões foi feita para um carregamento de 5kN e utilizado o módulo de Elementos Finitos (FEA) do software com o tipo de análise sendo análise estática.

Para o dimensionamento dos componentes foi considerado que o corpo de prova possui a maior dimensão suportada pela garra, 12 mm. Considerou-se também o material do corpo de prova como sendo um aço ao carbono AISI 1020 para que os níveis de carregamento obtidos pela simulação computacional sejam mais elevados que o real.

Os primeiros componentes dimensionados foram as cunhas. A Figura 106 apresenta a simulação computacional deste elemento. É possível observar o valor máximo de 268 MPa em sua tensão de Von Mises.

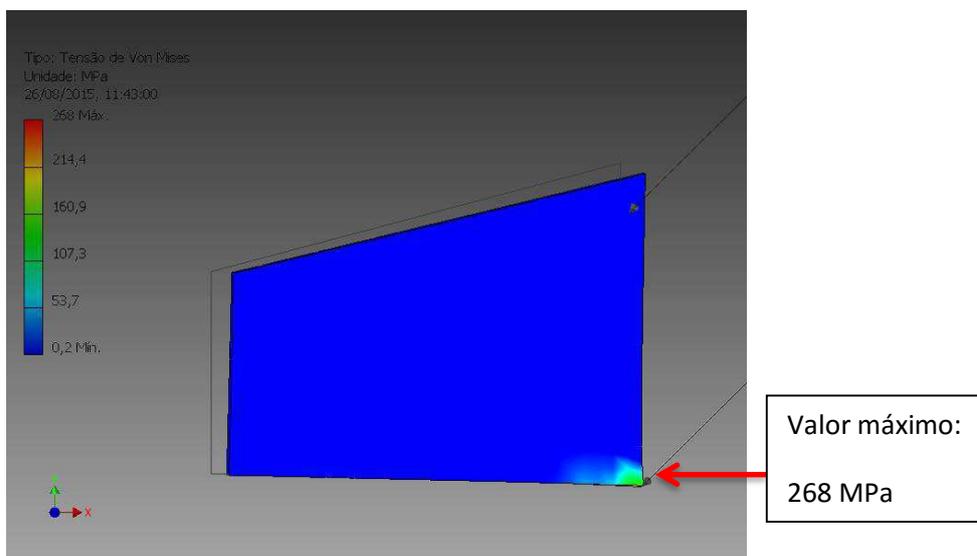


Figura 106 - Simulação computacional do elemento Cunha.

A Figura 107, a seguir, apresenta a simulação computacional do elemento que suporta o elemento fixador.

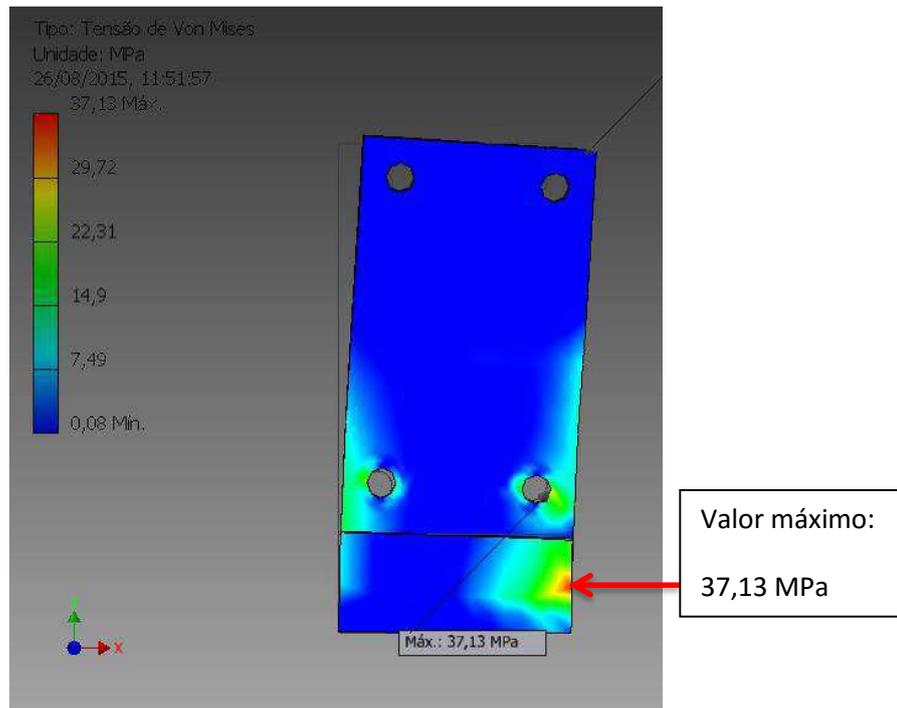


Figura 107 - Simulação computacional do elemento suporte do Fixador.

Na Figura 107 é possível observar a localização do máximo valor de tensão no elemento suporte do fixador. Este valor de 37,13 MPa ocorre no alojamento de um dos parafusos.

Este valor também pode ser utilizado para verificar o diâmetro dos parafusos de fixação. A Figura 108 apresenta a simulação computacional do elemento fixador.

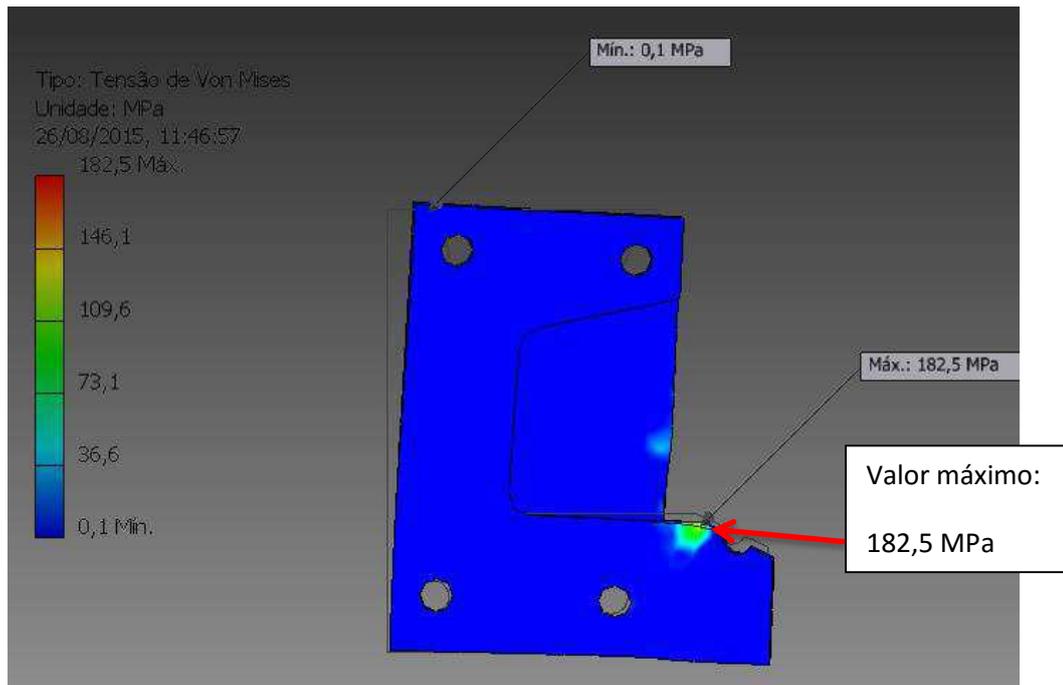


Figura 108 - Simulação Computacional do elemento Fixador.

Este elemento fica em contato com a amostra na hora da realização do ensaio. O valor máximo de tensão combinada para este elemento foi de 182,5 MPa.

Definidos os níveis de carregamento foi utilizado como critério de seleção a utilização aços ao carbono. A literatura apresenta os valores típicos de resistência para os aços.

Tabela 4 - Propriedades Mecânicas de aços esfriados lentamente em função do teor de Carbono [Fonte: (CHIAVERINI, 2005) ]

| Carbono | Limite de Escoamento |     | Limite de Resistência a tração |     | Alongamento em 2" % | Estricção % | Dureza Brinell |
|---------|----------------------|-----|--------------------------------|-----|---------------------|-------------|----------------|
|         | kgf/mm <sup>2</sup>  | MPa | kgf/mm <sup>2</sup>            | MPa |                     |             |                |
| 0,01    | 12,5                 | 125 | 28,5                           | 275 | 47                  | 71          | 90             |
| 0,20    | 25,0                 | 250 | 41,5                           | 405 | 37                  | 64          | 115            |
| 0,40    | 31,0                 | 300 | 52,5                           | 515 | 30                  | 48          | 145            |
| 0,60    | 35,0                 | 340 | 67,0                           | 660 | 23                  | 33          | 190            |
| 0,80    | 36,5                 | 355 | 80,5                           | 785 | 15                  | 22          | 220            |
| 1,00    | 36,5                 | 355 | 75,5                           | 745 | 22                  | 26          | 195            |
| 1,20    | 36,0                 | 350 | 71,5                           | 705 | 24                  | 39          | 200            |
| 1,40    | 35,0                 | 340 | 69,5                           | 685 | 19                  | 25          | 215            |

Os valores da Tabela 4, que apresenta os valores típicos de resistência para os aços ao carbono, foram transformados no gráfico a seguir.

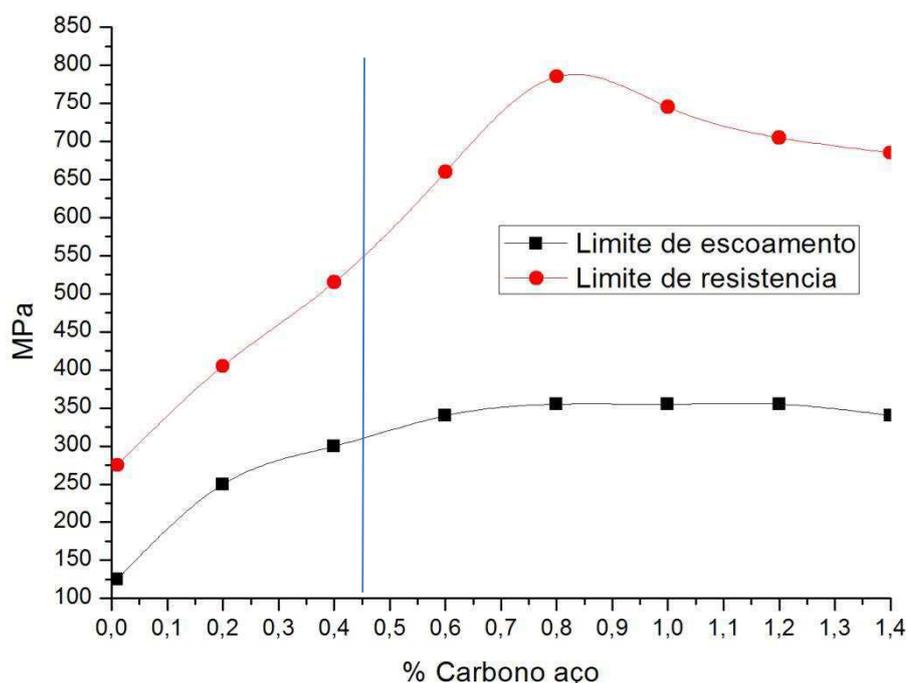


Figura 109 - Variação do Limite de resistência e do Limite de escoamento dos aços ao carbono

A **Figura 109** foi produzida através dos dados extraídos da tabela de propriedades dos aços resfriados lentamente. Apesar de os aços com médio carbono, 0,3% a 0,6%, apresentarem uma resistência baixa quando resfriados lentamente, estes podem ser temperados, o que aumenta consideravelmente sua resistência a penetração. Esse efeito não foi reproduzido no gráfico.

Analisando o valor da tensão encontrada para cada elemento através da simulação e comparando com o valor encontrado com o gráfico, foi escolhido o percentual de carbono exigido. O resultado está exposto na tabela a seguir.

Tabela 5—material selecionado após a simulação para o dispositivo losipescu.

| Elemento          | Valor Máximo simulado MPa | % carbono mínimo | % carbono escolhida | Limite Escoamento | % Escoamento | Fator de Segurança Escoamento | Fator Segurança Resistencia |
|-------------------|---------------------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Cunha             | 268,0                     | 0,344            | 0,45                | 310               | 86,45        | 1,15                          | 2                           |
| Fixador prendedor | 37,13                     | 0,01             | 0,20                | 250               | 14,85        | 6,76                          | 10                          |
| Fixadores         | 182,5                     | 0,0974           | 0,45                | 310               | 58,87        | 1,7                           | 3                           |

A cunha e os fixadores apresentaram um fator de segurança reduzido quando considerado o aço escolhido resfriado lentamente.

Foi verificado que o esforço máximo de carregamento destes elementos é de compressão. Uma operação de tempera e revenido é suficiente para viabilizar a construção destes dispositivos de modo a não interferirem no ensaio.

Para a seleccionar o material do elemento subsistema de alinhamento foram utilizados catálogos de fornecedores de Bronze.

A Figura 110 apresenta parte de um catalogo de fornecedor de Bronze.

|        | Fosforoso | C52100 | Bobinas, Chapas, Tiras | Boa conformabilidade a frio e ruim conformabilidade a quente. Excelente soldabilidade e brasagem.  | Hélices de agitadores, foles, discos de fricção, chavetas, diafragmas, porcas e rebites, arruelas de pressão, componentes para indústrias Químicas, Têxtil e de Papel. Molas, contatos, peças para interruptores, porta fusíveis. |
|--------|-----------|--------|------------------------|--|---|
| CuSn   | SAE 65    | C90700 | Buchas,                | Dureza tenaz com boa resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga superficial. Permite trabalhar com cargas específicas elevadas. Importante estarem bem lubrificadas. | Engrenagens, buchas, mancais, coroas, guias deslizantes, anéis de pistão.   |
|        | Bz 12     | C90800 | Tarugos, Barras        |  |   |
|        | Bz 14     | C91000 | Retangulares           |  |   |
| CuSnZn | SAE 62    | C90500 | Buchas,                | Resistente à corrosão e à água do mar. Permite trabalhar com cargas específicas médias.  | Anéis de vedação, válvulas, sede de hastes, flanges e conexões, carcaça e rotores de bombas, peças resistentes à pressão e à temperatura.   |
|        | SAE 620   | C90300 | Tarugos,               |  |   |
|        | SAE 622   | C92200 | Barras Retangulares    |  |   |

Figura 110 - catalogo distribuidor metaiscoppermetal

[Fonte: [www.coppermetal.com.br](http://www.coppermetal.com.br) catálogo de produtos acesso em 22 agosto 2014]

O fornecedor analisado especifica que o melhor tipo de bronze para fabricar buchas e deslizantes é o SAE65.

Após definir todos os materiais dos elementos que vão ser fabricados foi concebida a tabela a seguir.

Tabela 6- Definição dos materiais de fabricação

| Definição do Subsistema    | Identificador | Material Selecionado |
|----------------------------|---------------|----------------------|
| Cunha de Ajuste            | CA            | Aço AISI 1045        |
| Prendedores (móvel e fixo) | SF            | Aço AISI 1045        |
| Subsistema de alinhamento  | SA            | Bronze SAE65         |
| Suporte de ligação         | SL            | Aço AISI 1045        |
| Eixo guia                  | EG            | Aço AISI 1045        |
| Base                       | BS            | Aço AISI 1020        |
| Subsistema de acoplamento  | SAC           | Aço AISI 1045        |

A Tabela 6 apresenta os materiais selecionados para a fabricação da garra de ensaio mecânico tipo losipescu.

A seguir é apresentada a concepção final do dispositivo de ensaio losipescu.

A Figura 111 apresenta a concepção final para o conjunto de ensaios tipo losipescu.

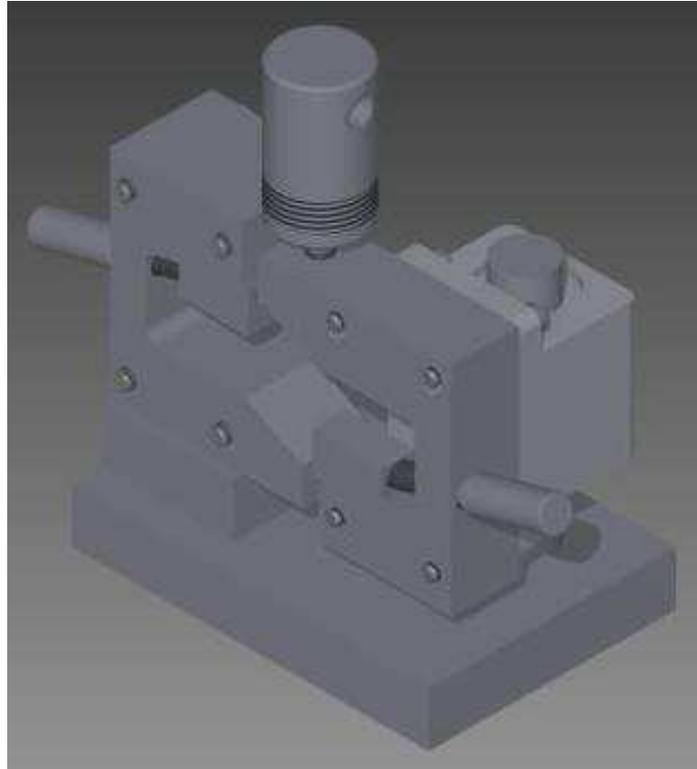


Figura 111 - Concepção final do dispositivo losipescu.

Ao final desta etapa, elabora-se os desenhos definitivos com a descrição de todos os detalhes de fabricação.

#### ***4.1.4 Projeto Detalhado do dispositivo losipescu***

O projeto detalhado do Dispositivo losipescu desenvolvido é apresentado no Anexo I.

#### ***4.1.5 Fabricação do dispositivo losipescu***

Após a etapa do projeto preliminar com o dimensionamento de todos os subsistemas e da etapa do projeto detalhado com os respectivos desenhos e instruções de fabricação dá-se início a fabricação do protótipo do dispositivo de ensaio.

A fabricação do dispositivo losipescu foi realizada na empresa Mecânica Nossa Senhora Abadia, que fica sediada no Distrito dos Mecânicos na cidade de Campina Grande – PB.

Foi repassado para empresa o projeto detalhado do dispositivo losipescu desenvolvido com todos os desenhos e indicações de fabricação dos subsistemas, onde a empresa se comprometeu a seguir todas as recomendações do projeto.

O protótipo desenvolvido para o ensaio tipo losipescu é apresentado a seguir.



Figura 112 - Protótipo confeccionado para o ensaio ASTM 5379.

A Figura 112 apresenta o protótipo confeccionado e montado.

O limite de carregamento para este dispositivo é de 5kN. Este nível de carregamento pode ser aumentado se o acoplamento do dispositivo for modificado.

#### **4.1.6 Fabricação do corpo de prova losipescu**

Para a usinagem dos corpos de prova SOUSA (SOUSA, 2006) sugere que os corpos de prova sejam cortados utilizando uma serra de fita a uma distância do contorno das amostras e, posteriormente, fresada cuidadosamente, bem como os entalhes, evitando deformação permanente por calor durante o processo de acabamento.

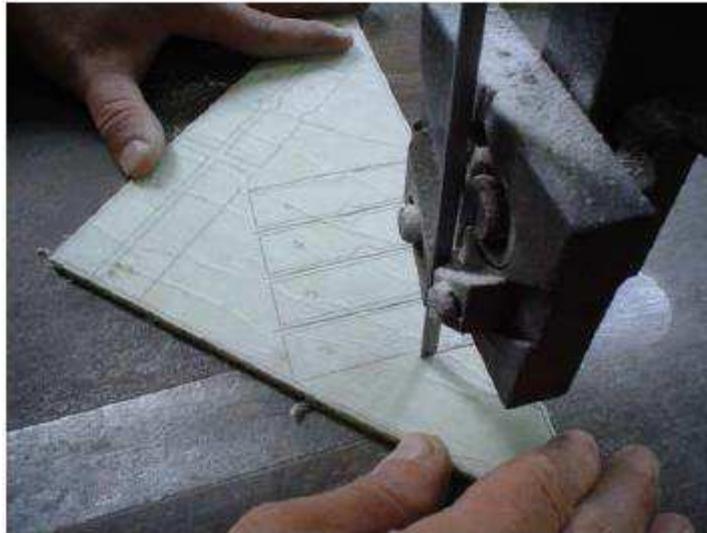


Figura 113 - Corte das amostras realizado por Sousa  
[Fonte: (Souza, 2006)]

A Figura 113 mostra o procedimento de corte utilizando uma serra de fita para a fabricação dos corpos de prova. Essa operação pode delaminar o material. Para evitar a separação das camadas e para facilitar o corte das amostras a placa compósita foi envolta com fita adesiva. Esta técnica se mostrou pouco eficiente para a obtenção dos corpos de prova por causa do descarte muito elevado de material.

Para minimizar os efeitos de delaminação provocados pelo corte realizado por ferramentas, preferiu-se utilizar o corte a laser de CO<sub>2</sub>. Os cortes dos corpos de prova foram realizados na empresa Kromme, que fica sediada no Centro comercial da cidade de Campina Grande – PB.

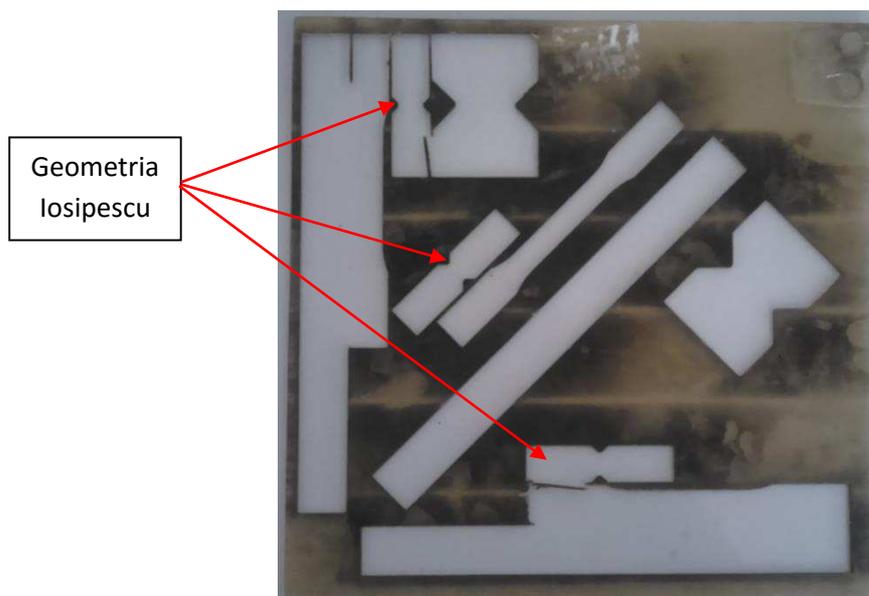


Figura 114 - placa compósita cortada a laser de CO<sub>2</sub>.

A *Figura 114* mostra a placa compósita de epóxi com fibra de vidro cortada a laser. As áreas mais claras na imagem são os vazios deixados pela retirada dos corpos de prova. A potência do laser foi ajustada para a menor possível. Cortes realizados com 40% da potência máxima do laser foram suficientes para desprender todo o contorno da peça cortada. A espessura da placa cortada foi de 4 mm.

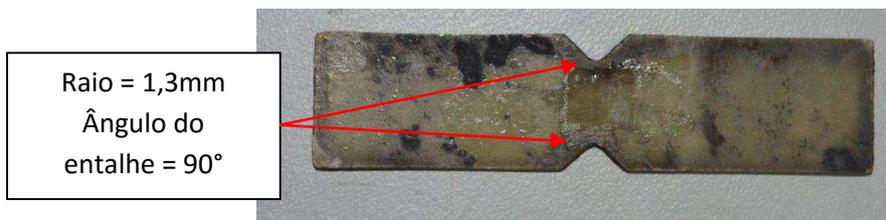


Figura 115 - corpo de prova losipescu cortado a laser.

A *Figura 115* mostra o corpo de prova losipescu cortado a laser. O corte foi realizado sem envolver a placa com fita adesiva.

Normalmente, as deformações específicas são avaliadas através da colagem de dois sensores de deformação - sensor de  $\epsilon$  (strain-gauge), sendo um em cada face da amostra em posição oposta, orientados a 45°. A leitura destas deformações é facilmente registrada, através da leitura do sinal elétrico em uma ponte de Wheatstone (1/2 ou 1/4 de ponte), convertendo o sinal elétrico em deformação mecânica (SOUSA, 2006).

Para isso foram colados dois extensômetros tipo roseta tripla, um em cada lado do corpo de prova. A seguir é apresentado o teste do dispositivo losipescu.

#### 4.1.7 Teste do dispositivo losipescu

A figura a seguir apresenta o dispositivo montado, com o corpo de prova já posicionado, pronto para a realização do ensaio.

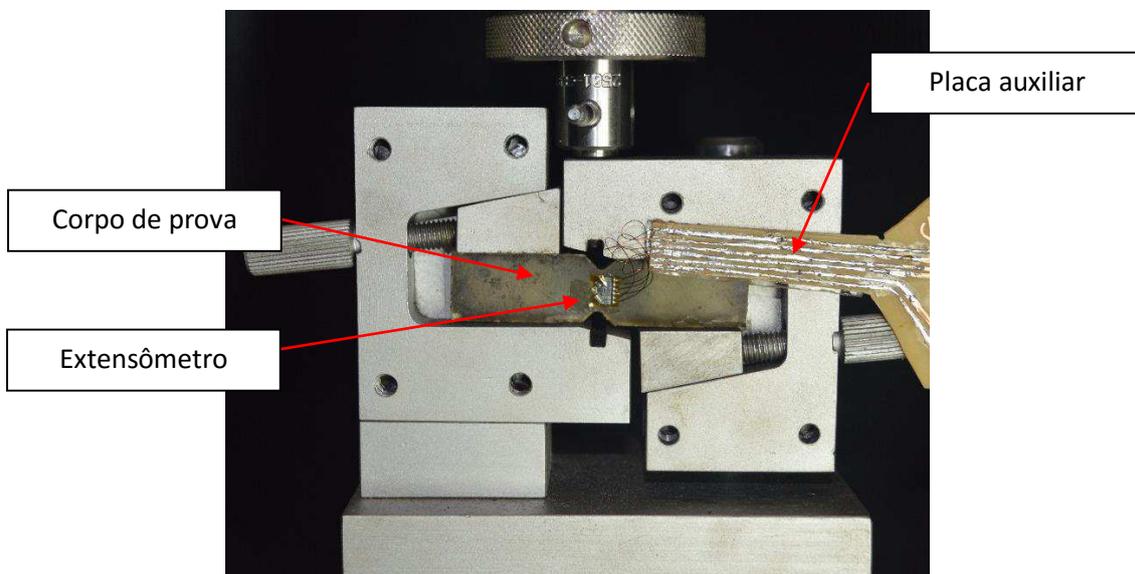


Figura 116 - montagem do ensaio losipescu.

É possível observar o corpo de prova montado no dispositivo, com uma placa auxiliar confeccionada para sustentar o peso dos cabos que se conectam no sistema de aquisição. Com a utilização desta placa auxiliar não foi necessário adicionar resina de proteção para segurar os fios de cobre dos extensômetros.

A placa confeccionada é apresentada em detalhes na figura a seguir.

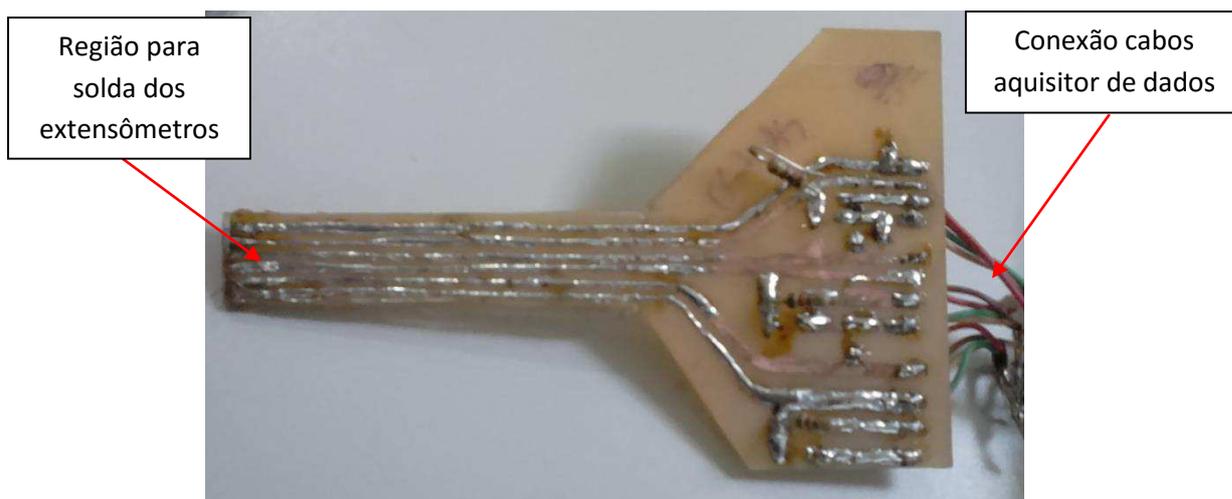


Figura 117 - Placa eletrônica confeccionada para sustentação dos cabos do sistema de aquisição.

O circuito eletrônico apresentado na Figura 117 foi confeccionado para possibilitar a sustentação dos cabos que conectam os extensômetros ao aquisitor de dados. Sem a utilização desta placa eletrônica, o peso dos cabos de

conexão danificaria os extensômetros ou, então, quando os cabos fossem fixados a amostra, a utilização de resina na região dos cabos aumentaria a área da seção transversal alterando a geometria da amostra ensaiada e portanto os resultados obtidos.

A placa de circuito foi confeccionada pelo método manual que consiste de três etapas básicas: a) esboço das trilhas (trilha é o nome dado para o circuito de cobre que deve permanecer na placa de fenolite) b) o desenho do circuito e c) transferência do desenho a placa. O desenho elaborado para o circuito, depois de verificado a possível existência de erros, é transmitido para a placa de fenolite. A tinta utilizada para transferir o desenho deve permanecer quando a placa for imersa no meio corrosivo. O meio corrosivo utilizado foi uma solução aquosa de percloroeto de ferro. O percloroeto irá retirar o cobre que não é desejado e a placa de circuito estará pronta para ser soldada.



Figura 118 - sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio losipescu para aquisição Extensométrica.

A Figura 118 apresenta o sistema de aquisição de dados utilizado.

Para a aquisição dos dados do ensaio losipescu foi utilizado uma taxa de aquisição de dados de 10 Hz. A seguir é apresentado o circuito recomendado pelo fabricante do Spider8®.

### 3.1.3 Single S/G using three-wire connection

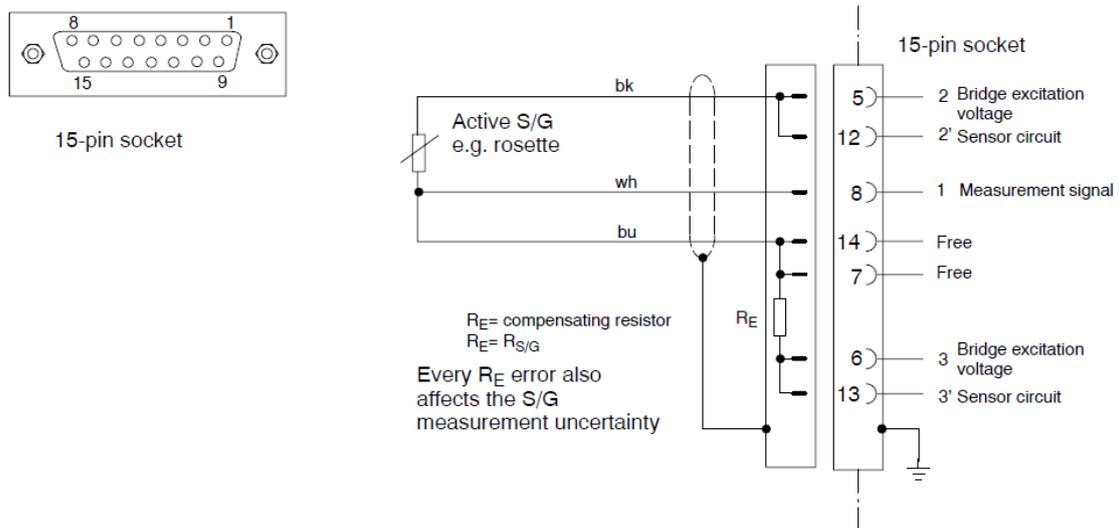


Figura 119 - circuito recomendado pelo fabricante do aquisitor de dados para aquisição com extensômetros na configuração 1/4 ponte [Fonte: HBM]

A Figura 119 apresenta o diagrama do circuito recomendado pelo fabricante do aquisitor Spider8®. O aquisitor possui apenas 4 portas, numeradas de 0 a 3, e cada porta conecta apenas um sensor. Quando utilizado uma configuração em meia ponte, suportada pelo dispositivo, será apresentado o valor da subtração da deformação de um strain gage pelo outro.

A figura a seguir apresenta o resultado dos ensaios realizados com o corpo de prova tipo losipescu.

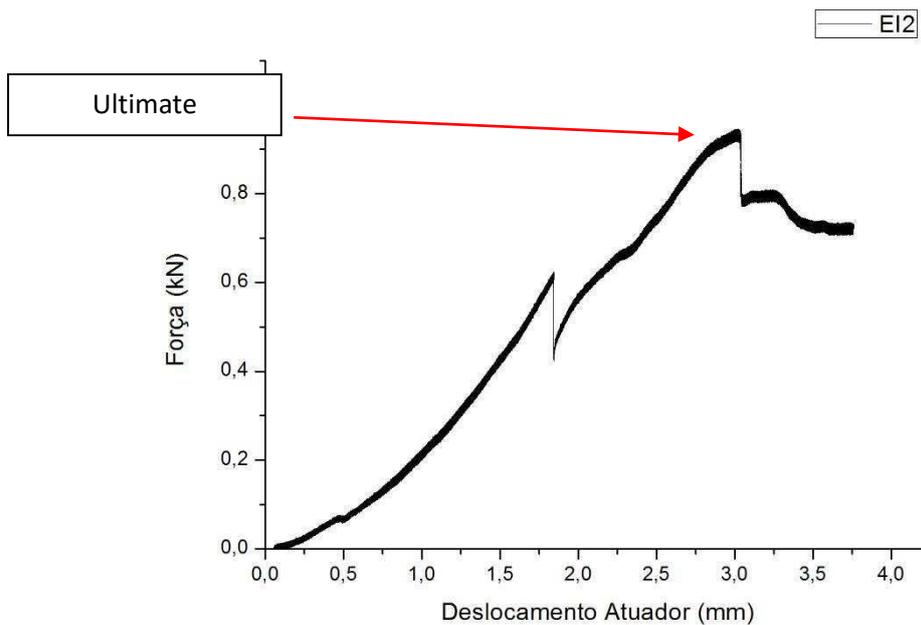


Figura 120 - Gráfico Força x Deslocamento do Ensaio losipescu.

A Figura 120 apresenta o gráfico força x deslocamento do atuador do ensaio losipescu. O valor da descontinuidade do gráfico antes da ruptura é definido, pela norma ASTM 5379, como “*ultimate*” ou limite de resistência ao cisalhamento. A área da secção transversal do corpo de prova é de  $3,6 \times 10^{-5} \text{mm}^2$ .

A tabela a seguir apresenta uma comparação com os valores obtidos neste tipo de ensaio.

Tabela 7 - Apresentação dos Resultados dos Ensaio losipescu

| Ensaio | Limite de Resistencia ao Cisalhamento | Valor encontrado na literatura | % variação |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------|------------|
| CP1    | 25                                    | 22                             | 13%        |

O desvio acentuado do resultado do corpo de prova CP2 indica que o resultado apresentado não é valido ou que cisalhamento pode ter ocorrido por um elevado número de vazios na amostra.

A seguir é apresentado um corpo de prova losipescu após o ensaio.

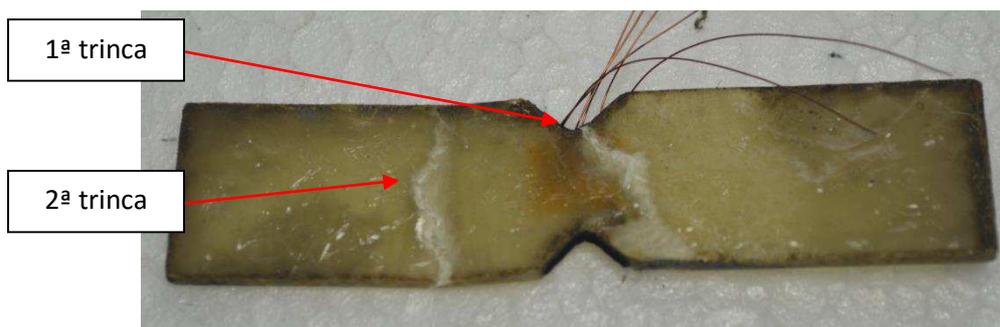


Figura 121 - Corpo de prova losipescu depois de ensaiado

Observou-se a propagação de duas trincas. Uma vertical, na região lateral do corpo de prova (side) e proveniente da base da amostra denominada pela norma como “VSE” ocorrendo no segundo instante do ensaio. No primeiro momento foi propagado uma trinca inclinada (angle) da região do entalhe (notch) e entre os entalhes (between Notches) denominada “ANN”.

A Figura 122 mostra os caracteres utilizados na classificação da fratura dos corpos de prova.

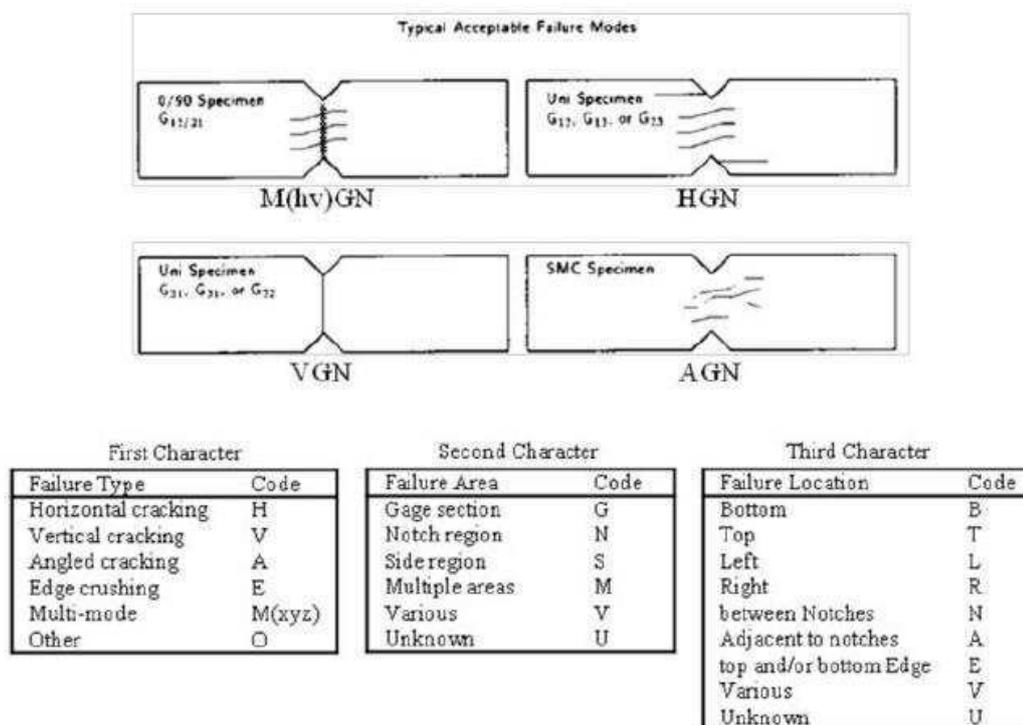


Figura 122 - Classificação do tipo de fratura do corpo de prova losipescu

A Figura 123 apresenta o corpo de prova losipescu depois de ensaiado com o extensômetro colado na superfície da amostra.

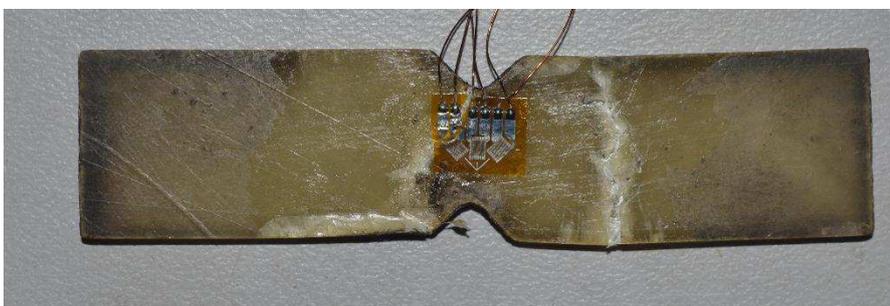


Figura 123 - Corpo de prova losipescu depois de ensaiado.

A Figura 124 apresenta o detalhe da superfície que fica em contato com o dispositivo fixador após a realização do ensaio.



Figura 124 - Detalhe da superfície de contato do corpo de prova com o fixador após a realização do ensaio.

É possível observar que o carregamento provoca uma ruptura localizada no corpo de prova devido as forças de compressão produzidas na realização do ensaio.

A Figura 125 apresenta o extensômetro colado na superfície do corpo de prova após a realização do ensaio de cisalhamento.

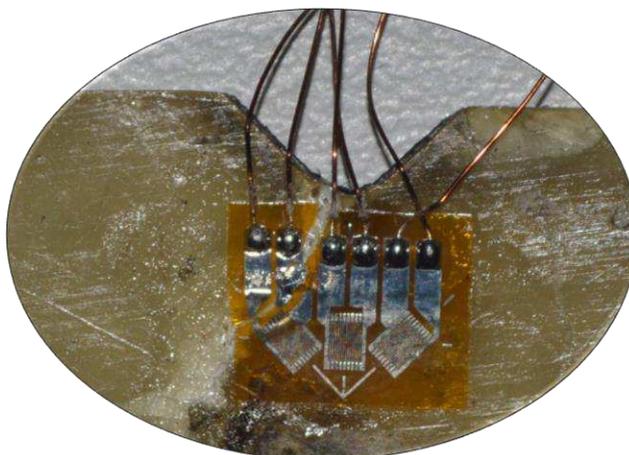


Figura 125 - extensômetro colado na superfície do corpo de prova após a realização do ensaio.

É possível observar que a trinca atravessou o extensômetro na região dos terminais. O fato de a trinca atravessar o extensômetro mostra que a técnica de colagem foi eficiente e o resultado obtido para o deslocamento é próximo ao deslocamento real.

## **4.2 Projeto do dispositivo V-Notched Rail Shear**

O segundo projeto apresentado neste trabalho é o projeto para utilização do corpo de prova conhecido como V-Notched Rail Shear. A norma utilizada para confecção do corpo de prova é a ASTM D 7078. Esse ensaio também está classificado na categoria *V-Notched shear* (cisalhamento com entalhe em “V”, tradução livre).

### **4.2.1 Projeto Informacional do dispositivo V-Notched Rail Shear**

Para analisar o funcionamento dos dispositivo V-Notched Rail Shear foram analisados trabalhos acadêmicos que referenciavam este tipo de ensaio. Foram analisados trabalhos da Technische Universität Dresden, na Alemanha, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), da Universidade de Usak,

na Turquia, da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, da NASA e do Wyoming Test Fixtures Inc, EUA.

### **Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na Universidade de Dresden, Alemanha.**

A Figura 126 apresenta o dispositivo desenvolvido na Universidade de Dresden, na Alemanha, com as partes constituintes segundo o autor (GUDE, et al., 2015).

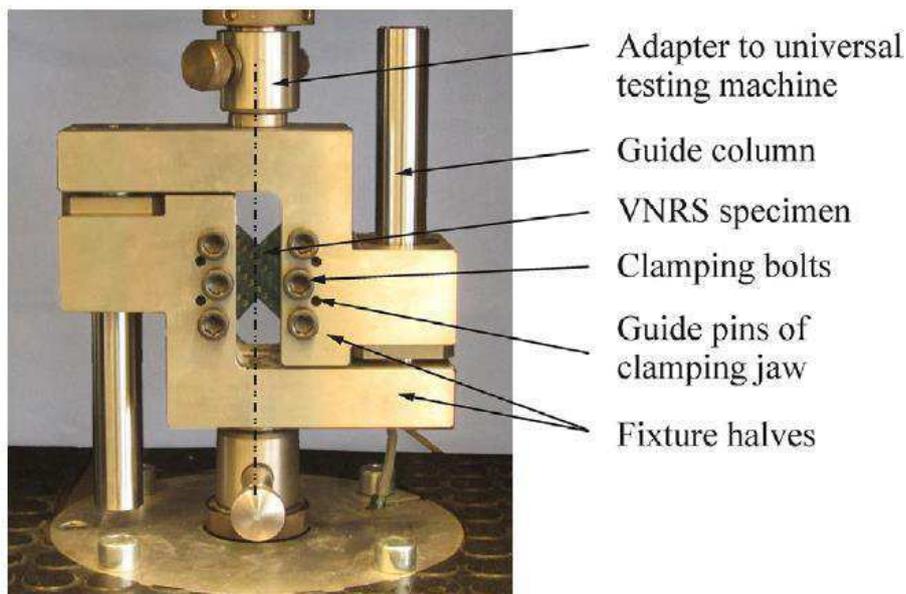


Figura 126 - Dispositivo V-NotchedRailShear da Technische Universität Dresden, Alemanha.  
[Fonte: (GUDE, et al., 2015)]

Verifica-se que o dispositivo foi dividido em seis partes fundamentais. O Elemento “*Adapter to universal testing machine*” (adaptador para máquina universal de testes) serve como sistema de acoplamento e tem a função de fixar o dispositivo ao sistema de carregamento, no caso deste conjunto foi utilizada uma máquina universal de testes. O “*guide column*” (coluna guia) é o dispositivo responsável por evitar a rotação do sistema. A amostra, “*VNRS specimen*”, (amostra VNRS, Abreviação de V-Notched Rail Shear) e aparece assim definida pelo autor como parte integrante do sistema. “*Clamping bolts*” (parafusos de fixação) é o elemento de fixação do corpo de prova. “*Guide pins of clamping jaw*” (pinos guias dos batentes de aperto) é o elemento responsável por manter os batentes de apertos alinhados na vertical. Os elementos definidos por “*Fixture halves*” (dispositivo de fixação) são os fixadores deste conjunto.

A seguir, na *Figura 127*, é apresentado o roteiro do dispositivo Technische Universität.

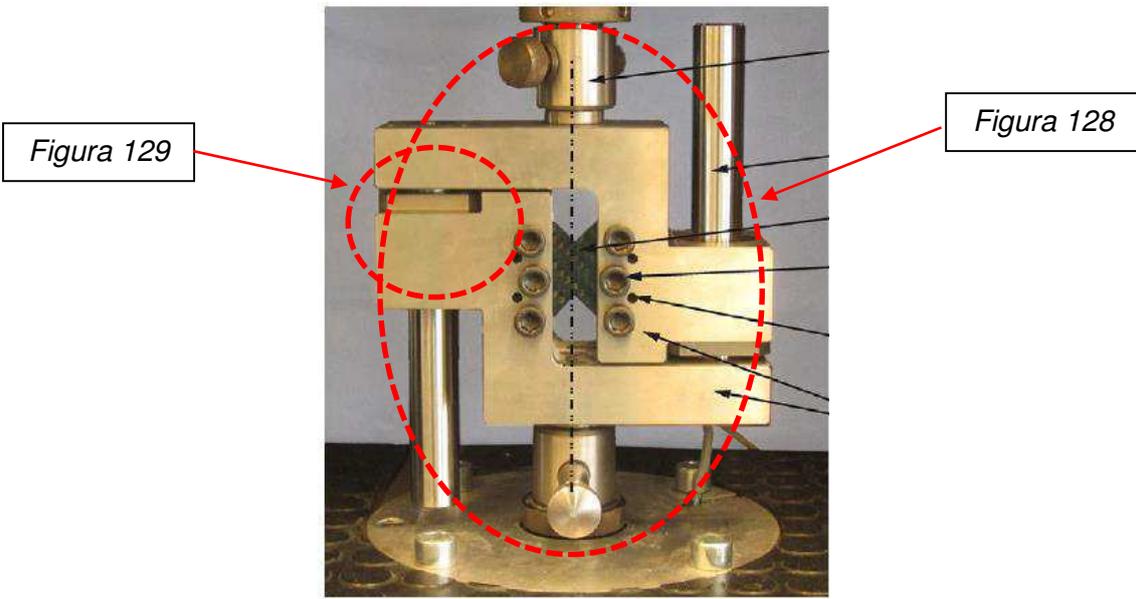


Figura 127 - roteiro do dispositivo Technische.

A Figura 128 mostra em detalhe o dispositivo da Technische Universität, na Alemanha.

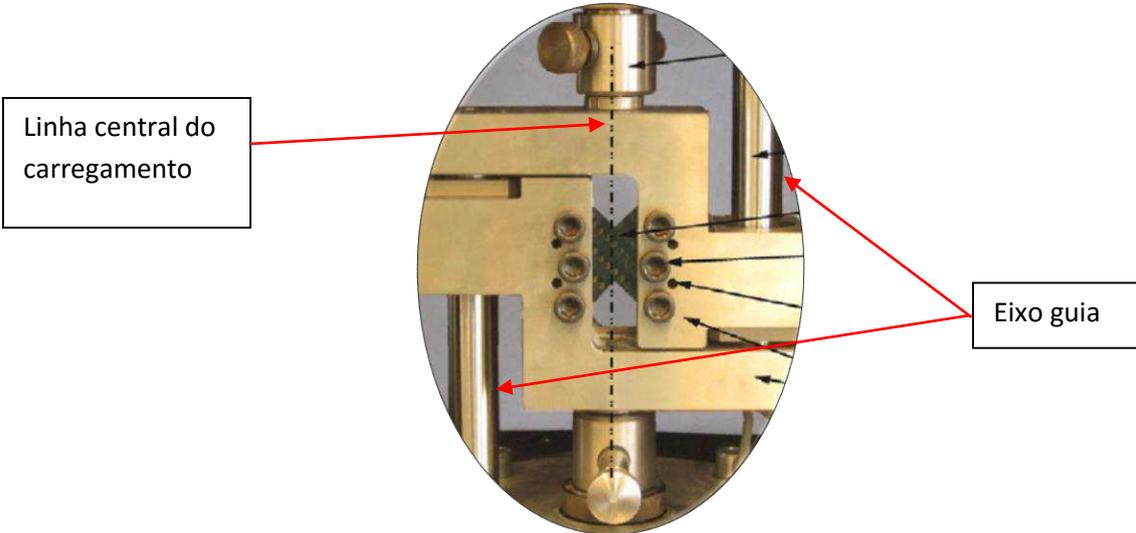


Figura 128 - Detalhe do dispositivo da Technische Universität Dresden.

É possível observar que a linha de carregamento ocorre na linha central do corpo de prova. Neste dispositivo há a utilização de eixos guias para evitar a rotação dos fixadores. O atrito das guias lineares com os elementos fixadores pode aumentar o valor medido do carregamento. Com a utilização de guias lineares os ensaios com este dispositivo precisam ser quase-estáticos.

Na Figura 129 é possível observar, em detalhe, o tipo de dispositivo para reduzir o atrito com a guia linear.

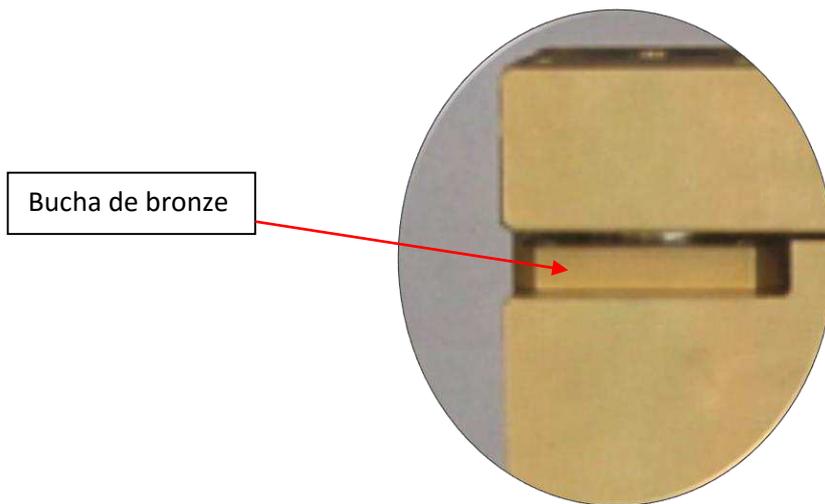


Figura 129 - detalhe do tipo de guia linear utilizada no dispositivo Dresden.

Na figura é possível observar um tom amarelado para o material que fica em contato com a guia. Isto indica a utilização de uma liga de bronze para reduzir o atrito com a guia linear. O bronze mais indicado para esse tipo de elemento, bucha de bronze, é o bronze fosforoso.

### Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na UFRGS

O segundo dispositivo analisado para o desenvolvimento do dispositivo de ensaio VNRS (V-Notched Rail Shear) foi o utilizado na UFRGS e apresentado na Figura 130.

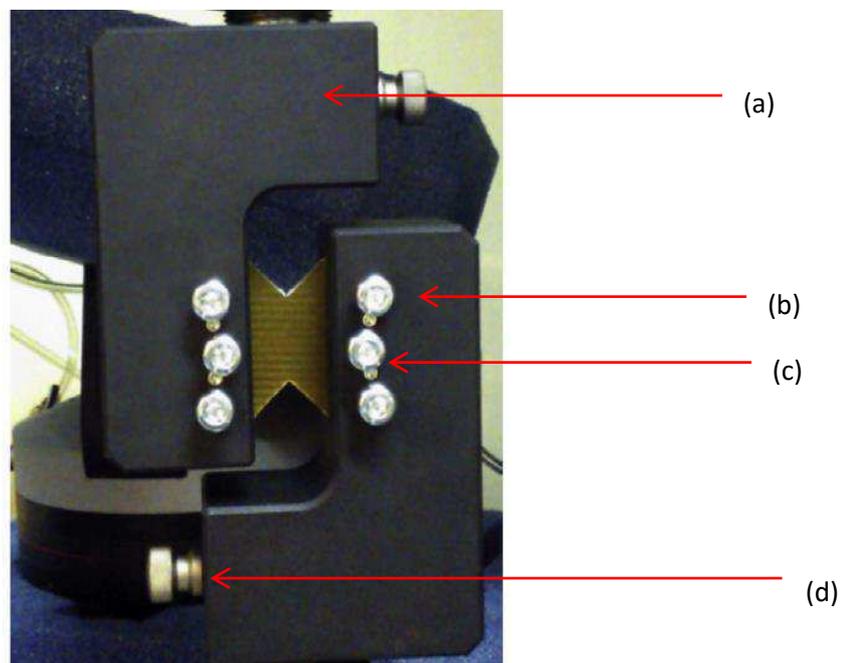


Figura 130 - dispositivo V-NotchedRailShear da UFRGS

[Fonte: (ALMEIDA JR, et al., 2014)]

(a) Fixador;(b) parafusos de aperto; (c) guias lineares para os encostos; (d) fixação do conjunto a máquina de ensaio;

A Figura 130 apresenta o dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Neste dispositivo, os fixadores (a) mais robustos que os dos dispositivo de ensaio das demais universidades. O sistema de fixação utilizado possui parafusos de aperto (b) e sapatas móveis. Utiliza também guias lineares para os encostos móveis (c) e o sistema de acoplamento (d) da garra com o sistema de carregamento é feito através de pinos.

Na *Figura 131* é apresentado o roteiro do dispositivo UFRGS.

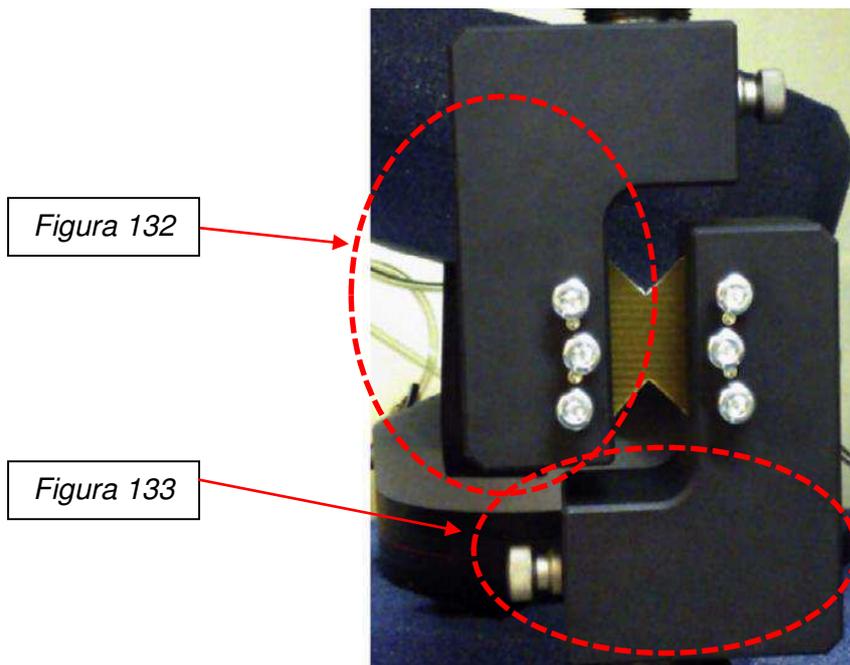


Figura 131 - Roteiro do dispositivo UFRGS.

Na Figura 132 é possível observar em detalhe o sistema de fixação do dispositivo.

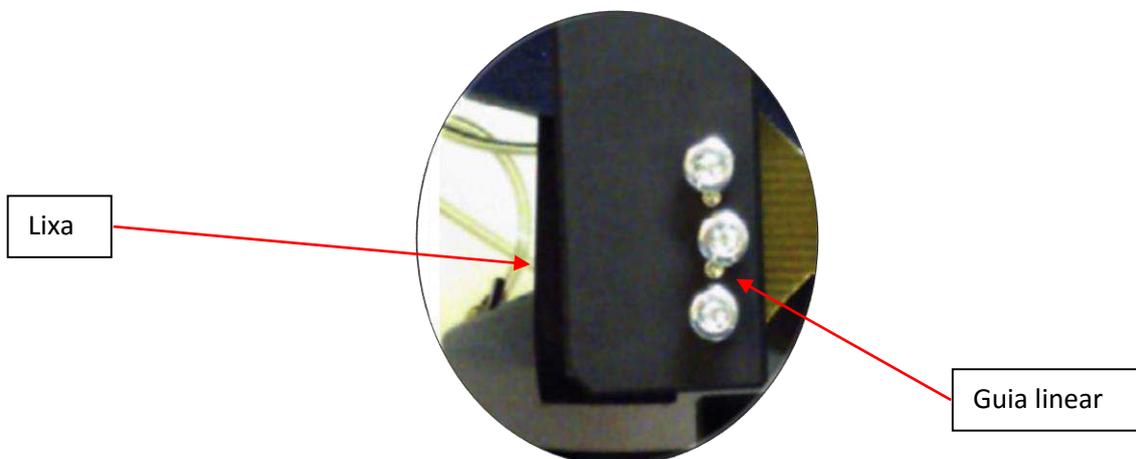


Figura 132 - Detalhe do sistema de fixação dispositivo VNRS da UFRGS

A presença de uma mancha escura na imagem indica a utilização de uma lixa montada com a amostra. Essa lixa é utilizada como um método alternativo para aumentar o atrito entre o corpo de prova e o batente de aperto. Isto indica que o corpo de prova é inserido pela parte lateral do elemento fixador.

A Figura 133 apresenta em detalhe o pino utilizado no fixador do dispositivo VNRS da UFRGS.

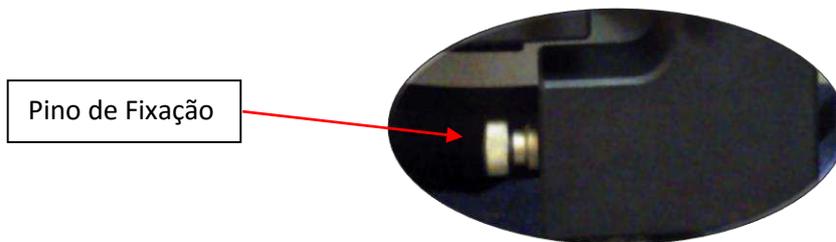


Figura 133 - detalhe do sistema de acoplamento entre o fixador e a máquina de ensaio da UFRGS.

Este tipo de fixação permite um engate mais fácil entre o dispositivo e a máquina de ensaio. Este elemento determina a força máxima que o dispositivo suporta. A força máxima é obtida pela tensão máxima que o material suporta dividido pela área do elemento. O pino de acoplamento pode ser utilizado como elemento fusível para evitar deformações plásticas nos fixadores.

### Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na UFF

Uma geometria alternativa para o ensaio V-Notched Rail Shear. É uma proposta de dispositivo elaborado na Universidade Federal Fluminense (UFF) e ilustrada na figura 134.

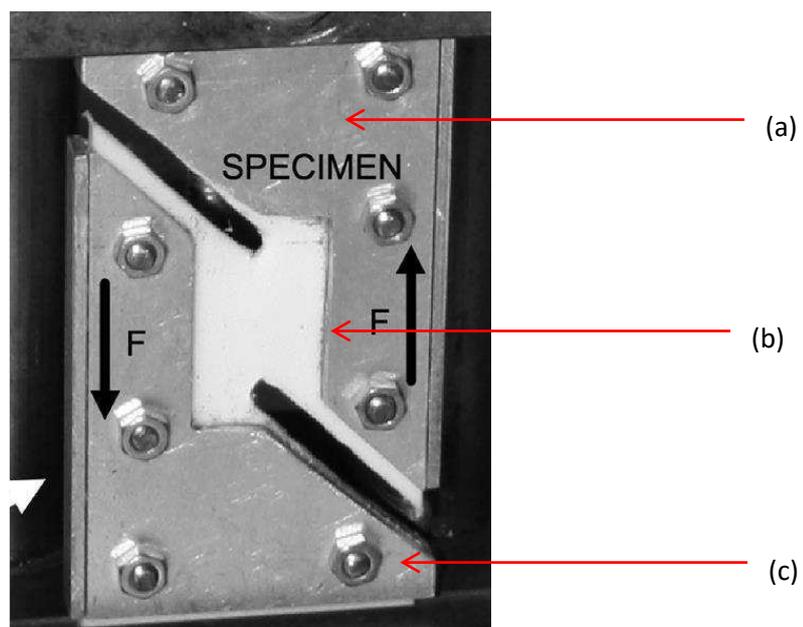


Figura 134 - dispositivo desenvolvido na UFF como uma modificação para o ensaio

[Fonte: (NUNES, 2015)]

(a) Fixador; (b) corpo de prova; (c) parafusos de fixação

Os fixadores (a) são formados por duas chapas de aço e é necessário que o corpo de prova (b) tenha as mesmas furações dos fixadores, além do chanfro na região central do elemento. A fixação do corpo de prova é feita por oito parafusos (c).

A vantagem deste dispositivo é a facilidade de construção. A desvantagem está no tamanho do corpo de prova, que tem a largura e comprimento dos fixadores.

A Figura 135 apresenta o corpo de prova utilizado no dispositivo alternativo idealizado na UFF.

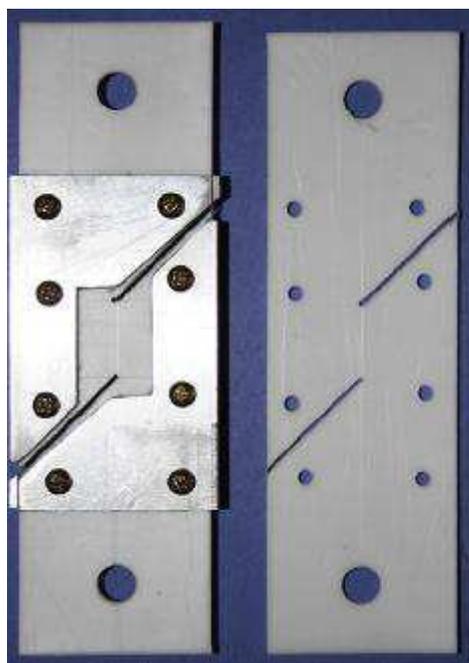


Figura 135 - corpo de prova utilizado no dispositivo alternativo VNRS da UFF

É possível observar que para utilizar este dispositivo o corpo de prova necessita ter as furações necessárias para que os parafusos de fixação possam passar.

### **Segundo dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na UFF**

Um segundo dispositivo utilizado pela Universidade Federal Fluminense é apresentado na Figura 136 onde é possível observar a presença de guias lineares (a) que evitam a rotação do sistema. Suportes de fixação (b) são

elementos próprios da máquina de ensaio utilizada na UFF. Os fixadores possuem sistemas de alinhamento (c) que guiam os fixadores pelas guias lineares. São utilizados seis parafusos de fixação (d) para as amostras e um fixador (e) formado de duas partes. O pino de acoplamento (f) é o elemento que acopla o dispositivo de ensaio ao sistema de aquisição de dados.

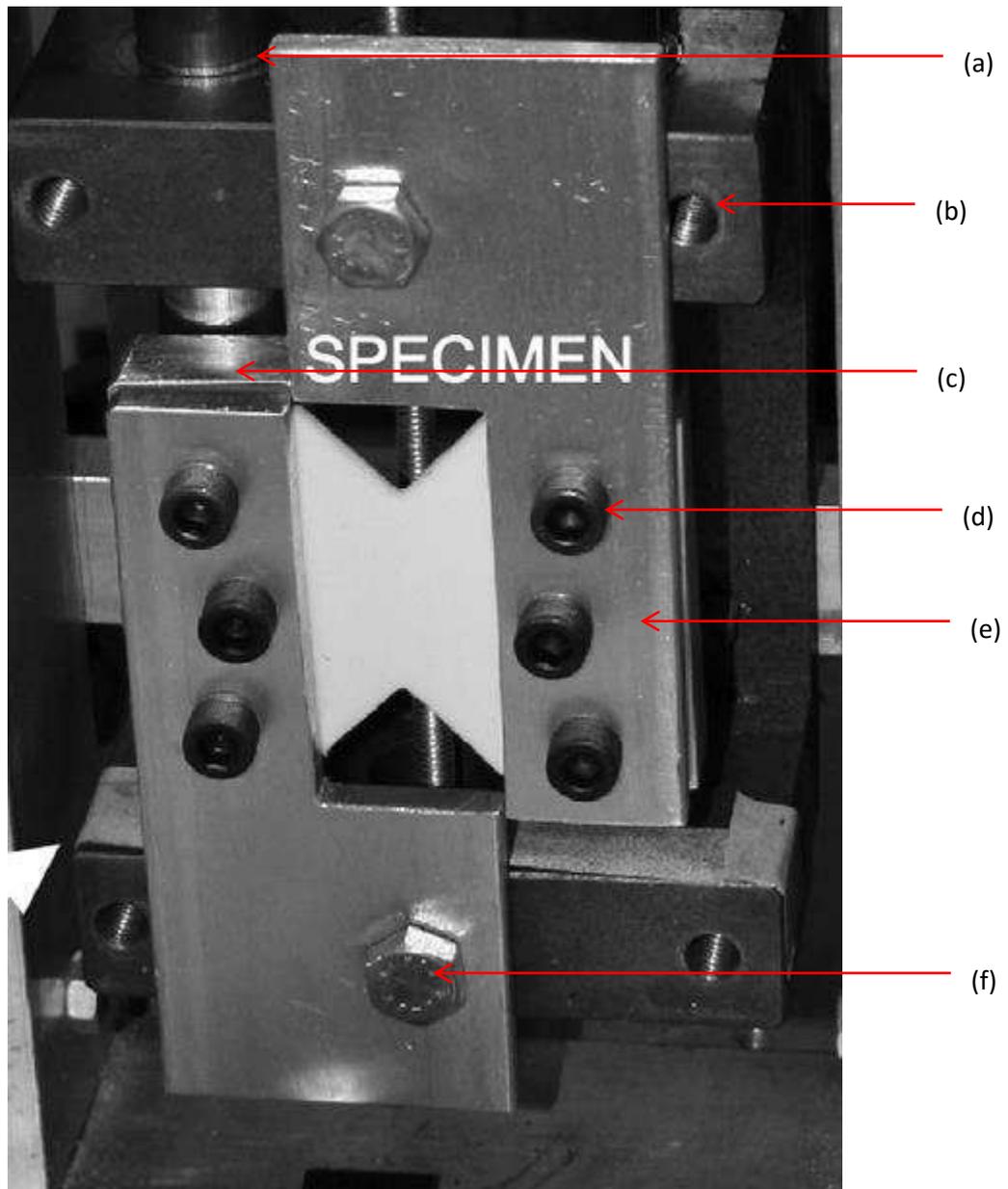
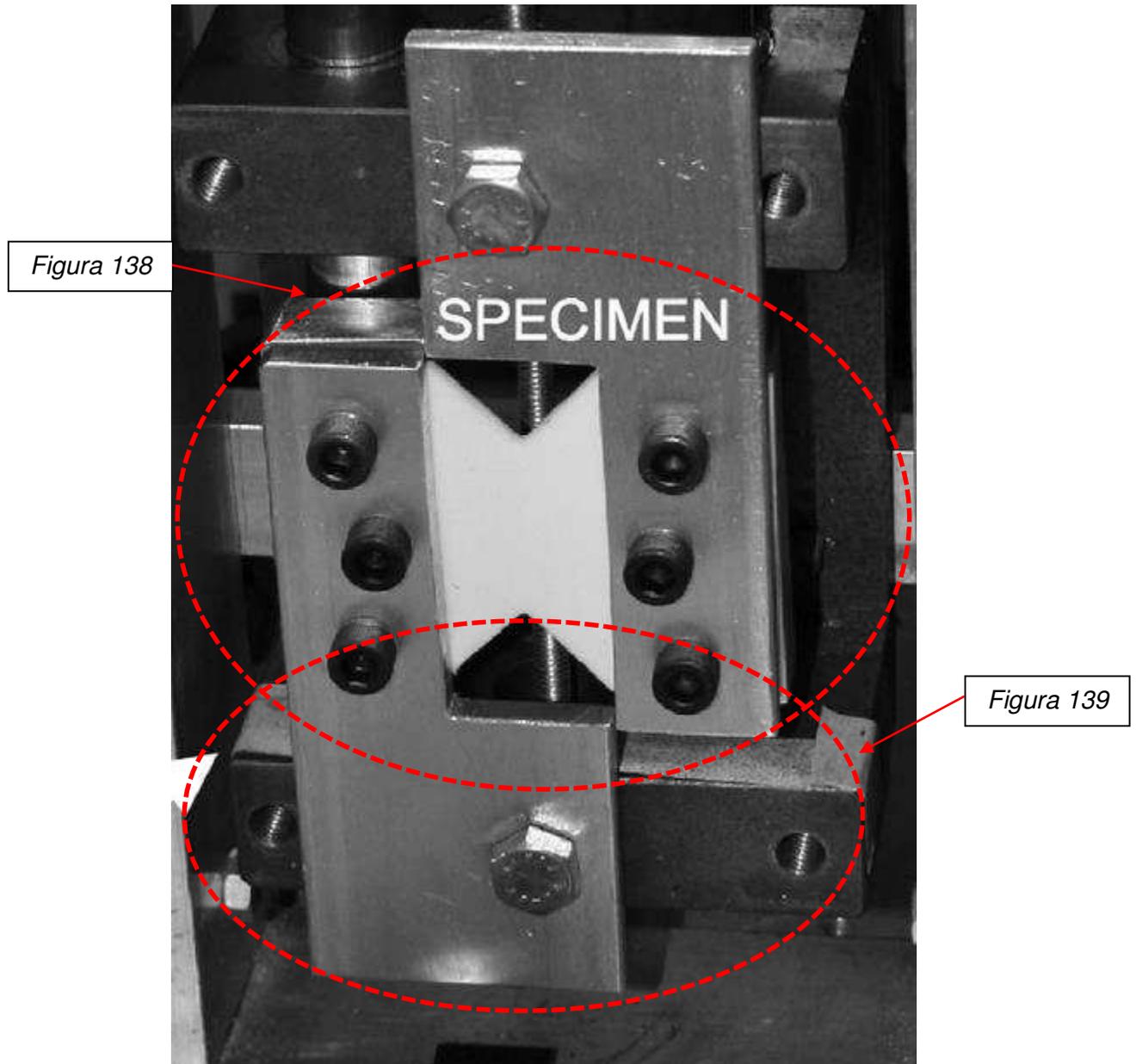


Figura 136 - dispositivo desenvolvido na UFF  
[Fonte: (NUNES, 2015)]

(a) guia linear ;(b) Suporte de fixação ;(c) sistema de alinhamento;(d) parafusos de fixação;  
(e) fixador; (f) pino de acoplamento;

Este dispositivo também foi elaborado pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, e é o dispositivo V-Notched Rail Shear encontrado com mais subsistemas.

Na *Figura 137* é apresentado o roteiro do dispositivo UFF.



*Figura 137* - Roteiro do dispositivo da UFF.

A *Figura 138* mostra em detalhe o sistema de fixação do corpo de prova VNRS da UFF.

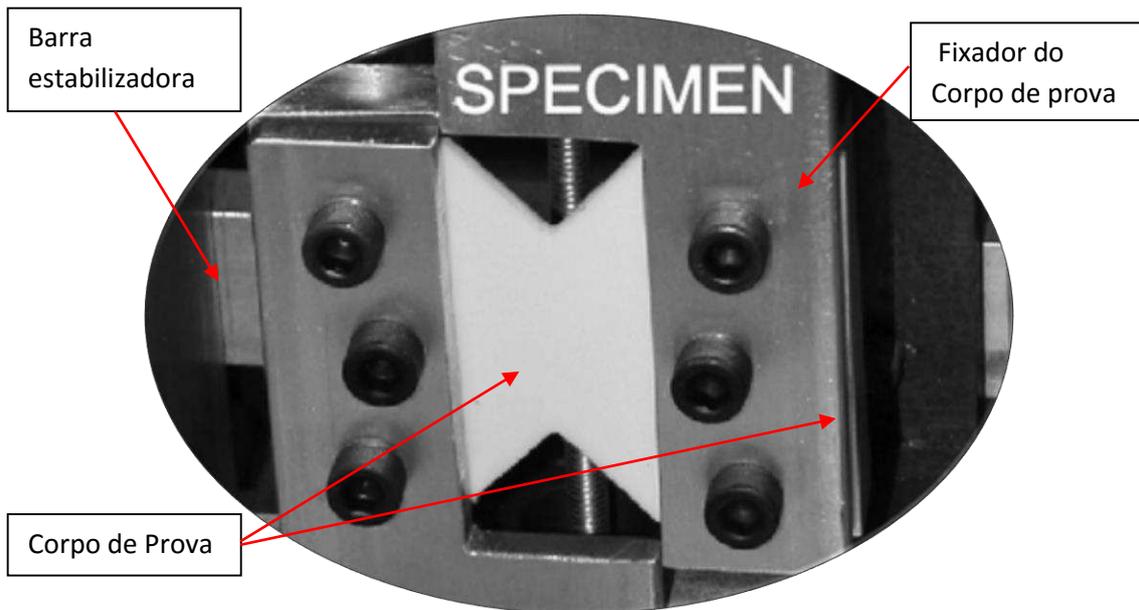


Figura 138 - Detalhe da Fixação do corpo de prova no dispositivo VNRS da UFF

Esse sistema utiliza uma barra estabilizadora para evitar rotação do sistema de fixadores. O fixador é bi-partido, ou seja, é formado por duas partes. Os parafusos utilizados para apertar o corpo de prova são os mesmos que unem as partes dos fixadores. O detalhe mostra ainda que o corpo de prova é ligeiramente maior que o fixador o que mostra que é necessário a realização de furos no corpo de prova para a passagem dos parafusos.

A Figura 139 apresenta o detalhe do acoplamento entre o dispositivo VNRS e a máquina de ensaios utilizada na UFF.

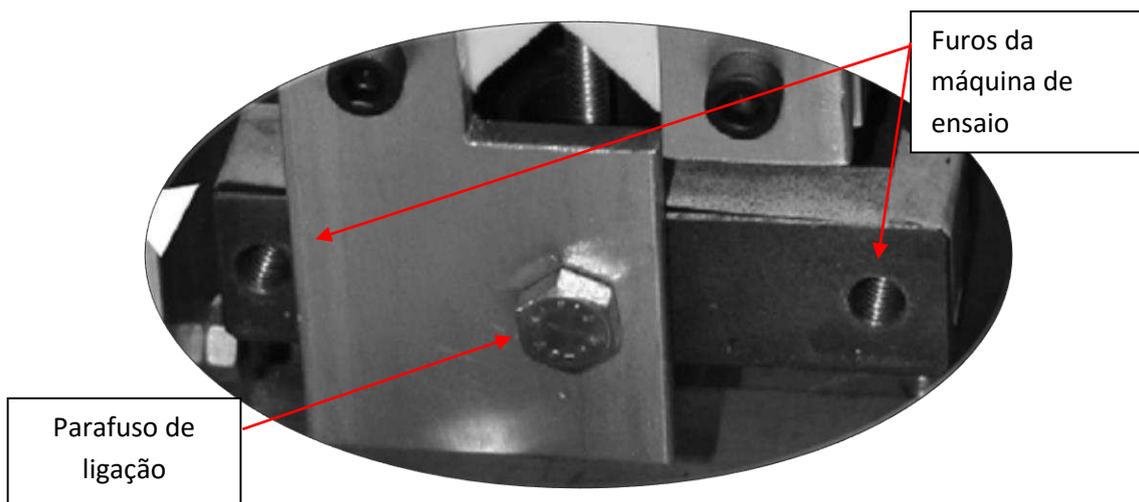


Figura 139 - Detalhe do acoplamento entre o dispositivo VNRS da UFF e a máquina de ensaio.

É possível observar que a ligação entre o fixador e a máquina de ensaio é realizada por um único parafuso. O detalhe mostra também a presença de outros furos, que são utilizados pelo dispositivo alternativo de ensaio de cisalhamento.

## Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na Universidade de Usak, na Turquia

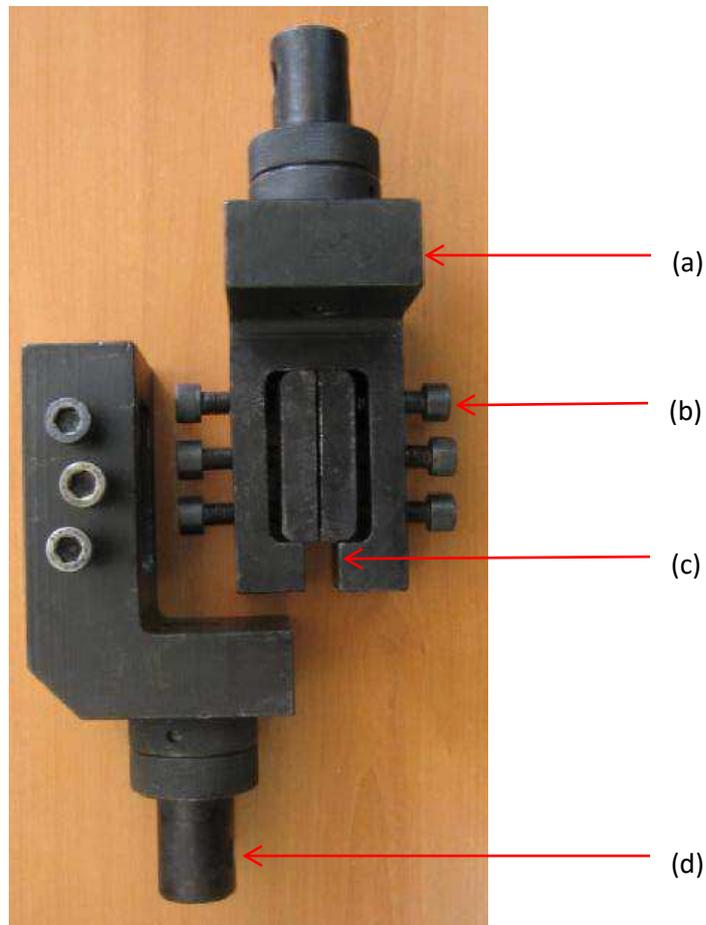


Figura 140 - dispositivo utilizado na Universidade de Usak, Turquia  
[Fonte: (AKTAS, *et al.*, 2010)]

(a) fixador; (b) sistema de fixação das amostras; (c) abertura para introdução do corpo de prova; (d) acoplamento;

A Figura 140 acima mostra o dispositivo utilizado na Universidade de Usak na Turquia. Os fixadores (a) não possuem guias lineares. O sistema de fixação das amostras (b) utilizado é o de sapatas móveis. Existe uma abertura para introdução das amostras (c) neste conjunto o que exige que o sistema de carregamento tenha um deslocamento mínimo maior que o comprimento da amostra. O sistema de acoplamento (d) utilizado indica a utilização de uma máquina de ensaios universal.

Na *Figura 141* é apresentado o roteiro do dispositivo Usak.

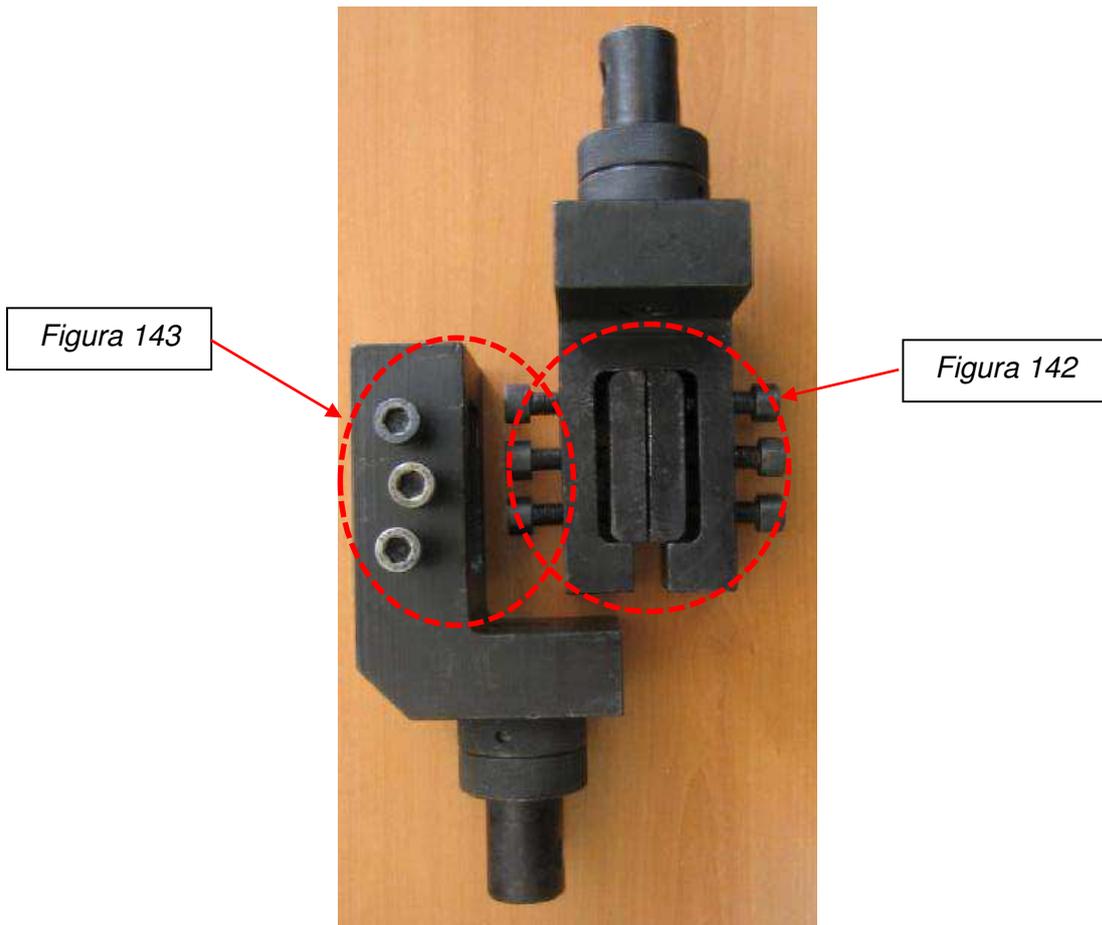


Figura 141 - Roteiro do dispositivo Usak

A Figura 142 mostra o detalhe do sistema de fixação utilizado no dispositivo de ensaio VNRS de Usak.

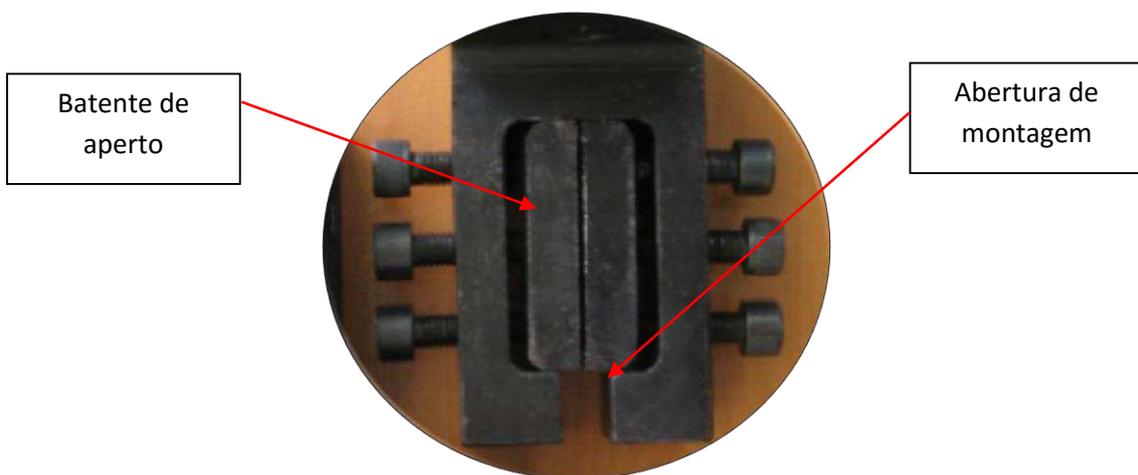


Figura 142 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo de Usak

É possível observar a presença de um rasgo passante na parte inferior do dispositivo que é utilizado para que o conjunto possa ser montado para a realização do ensaio.

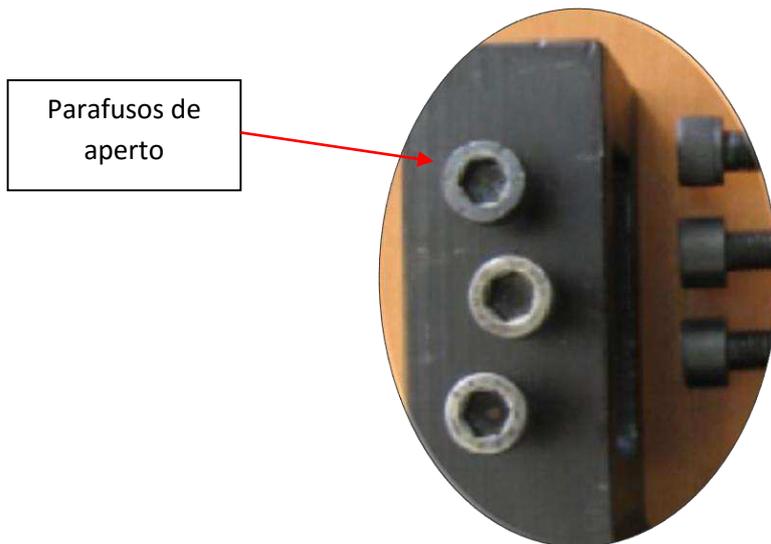


Figura 143 -Detalhe do dispositivo de ensaio VNRS mostrando os parafusos de aperto

A Figura 143 mostra a utilização de três parafusos em cada batente de aperto do dispositivo. Neste dispositivo os batentes de aperto não possuem guias lineares.

**Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado na NASA, EUA**

A seguir é apresentado mais um dispositivo de ensaio VNRS (V-Notched Rail Shear).

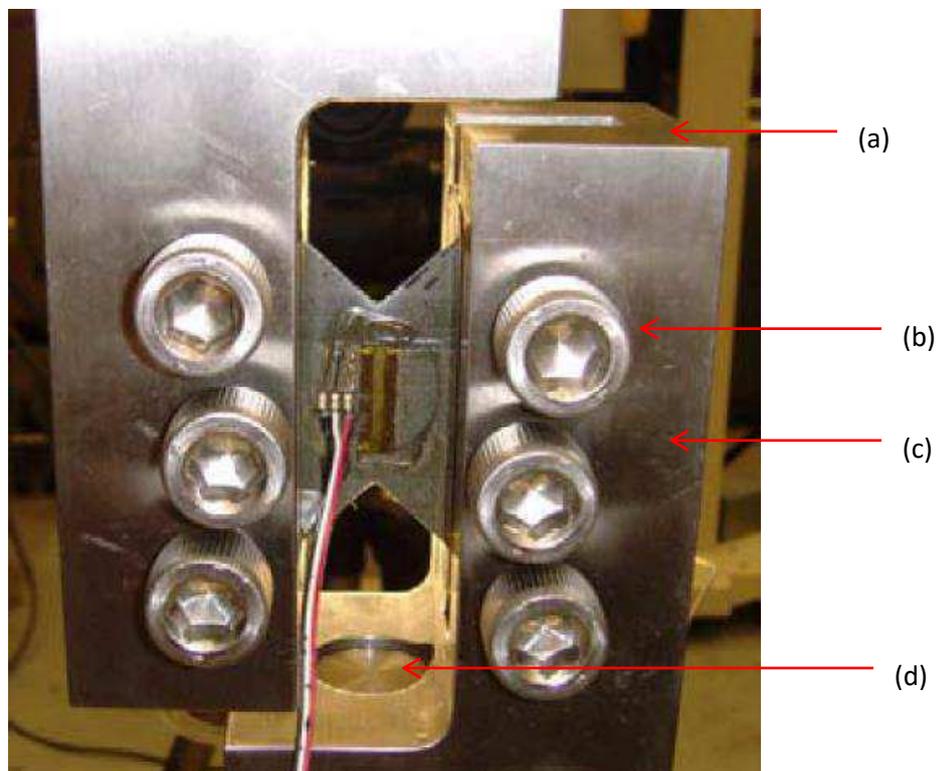


Figura 144 - Dispositivo Utilizado na NASA  
[Fonte: (HILL, et al., 2011)]

(a) abertura para introdução das amostras; (b) parafusos de aperto; (c) fixadores; (d) sistema de acoplamento;

A Figura 144 apresenta o dispositivo VNRS utilizado na NASA. Trata-se de um dispositivo semelhante ao utilizado na Turquia. A abertura para introdução das amostras (a), diferentemente do dispositivo apresentado anteriormente, não atravessa todo o fixador. O sistema de fixação das amostras utiliza parafusos de aperto (b) dos dois lados do fixador (c). O acoplamento do fixador com o sistema de carregamento possui um sistema de acoplamento (d) feito por pino.

Na Figura 145 é apresentado o roteiro do dispositivo NASA.

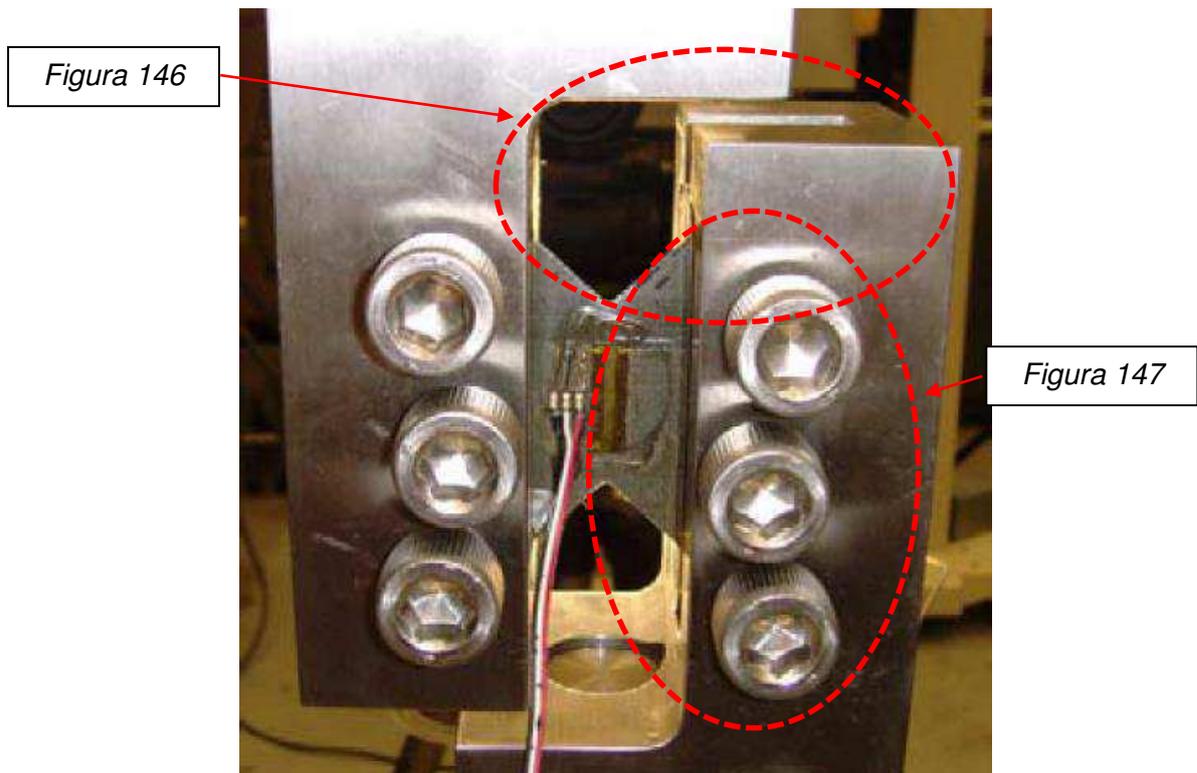


Figura 145 - Roteiro do dispositivo NASA

A Figura 146 mostra o detalhe do sistema de fixação do dispositivo de ensaio V-Notched Rail Shear.

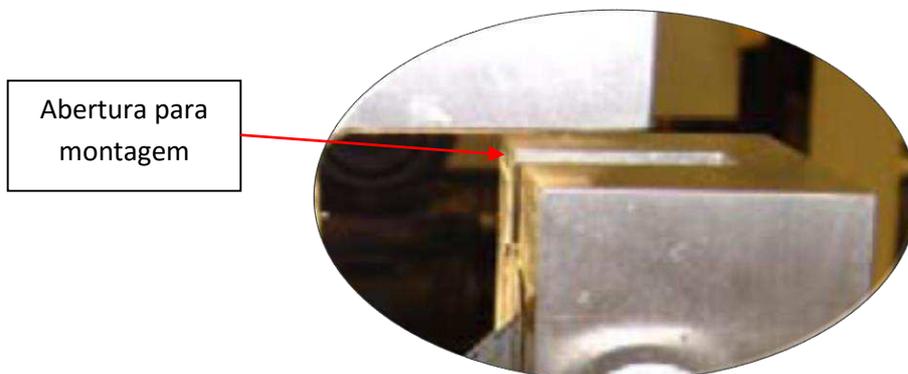


Figura 146 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo NASA.

É possível observar o rasgo para inserção das amostras na hora da montagem do ensaio. Neste dispositivo o rasgo não é passante.

A Figura 147 mostra o detalhe do sistema de fixação do dispositivo de ensaio VNRS utilizado na NASA, EUA.

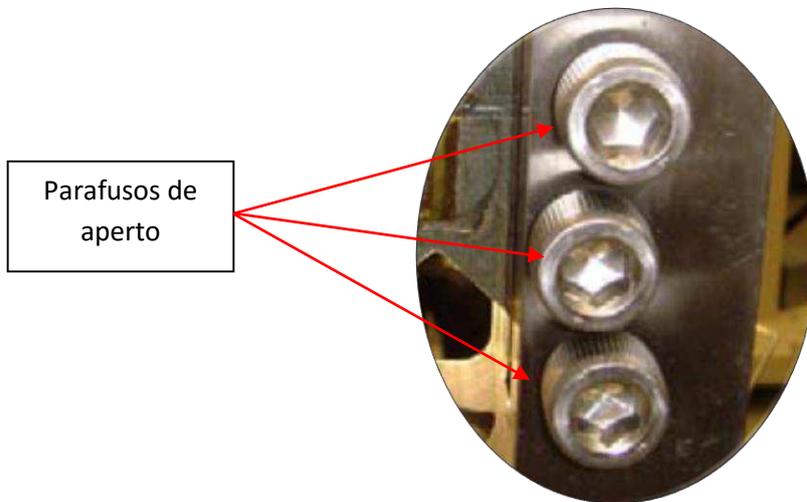


Figura 147 - detalhe do sistema de fixação do dispositivo da NASA.

Esse dispositivo possui três parafusos de aperto, mas não possui guias lineares nos batentes de aperto.

### Dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado no Wyoming Test Fixtures Inc

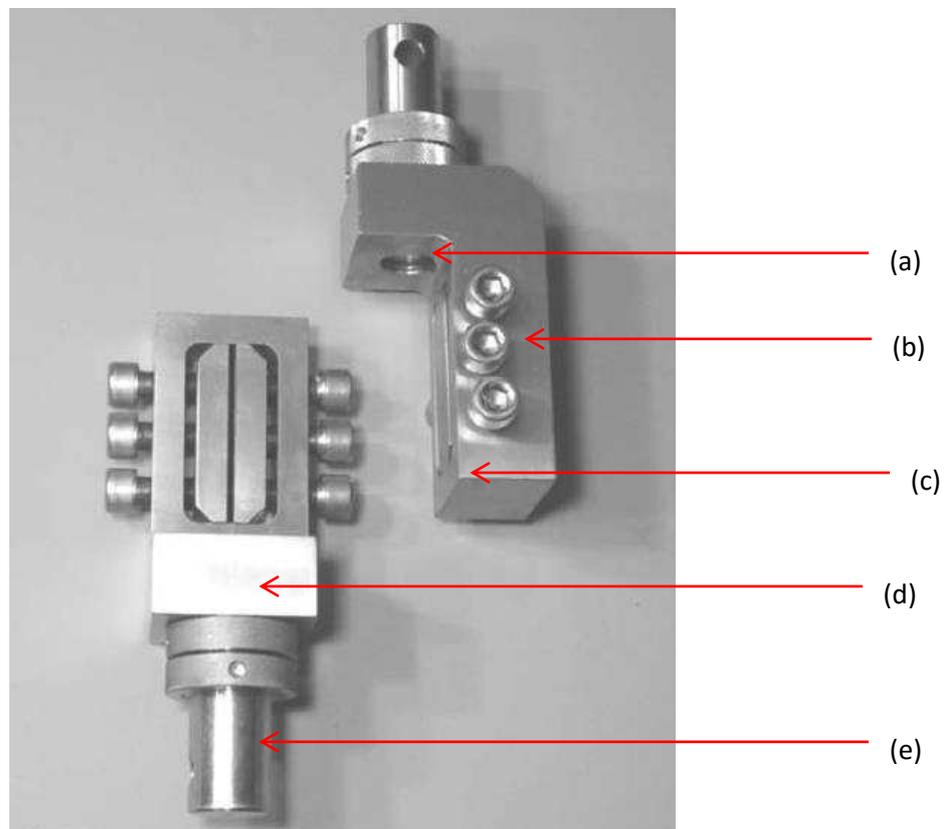


Figura 148 - Dispositivo utilizado no Wyoming Test Fixtures Inc, Salt Lake City, EUA  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2005)]

(a) parafuso de acoplamento; (b) sistema de fixação das amostras; (c) rasgo para introdução das amostras inexistente; (d) fixador; (e) sistema de acoplamento.

O dispositivo apresentado na Figura 148, é aquele utilizado no Wyoming Test Fixture Inc, EUA. Ele utiliza um parafuso de acoplamento (a) para unir o fixador ao sistema de acoplamento. O sistema de fixação das amostras (b) empregado é o sistema de fixação com sapatas móveis com a utilização de pinos guias. Este conjunto para ensaios V-Notched Rail Shear não possui rasgo para introdução das amostras (c) o que sugere que a amostra precisa ser montada ao sistema antes de o mesmo ser acoplado no sistema de carregamento. Este sistema utiliza fixadores (d) idênticos sem a utilização de guias lineares para evitar a rotação do elemento. Possui um sistema de acoplamento (e) que sugere a utilização de uma máquina de ensaios universal.

Na *Figura 149* é apresentado o roteiro do dispositivo Wyoming.

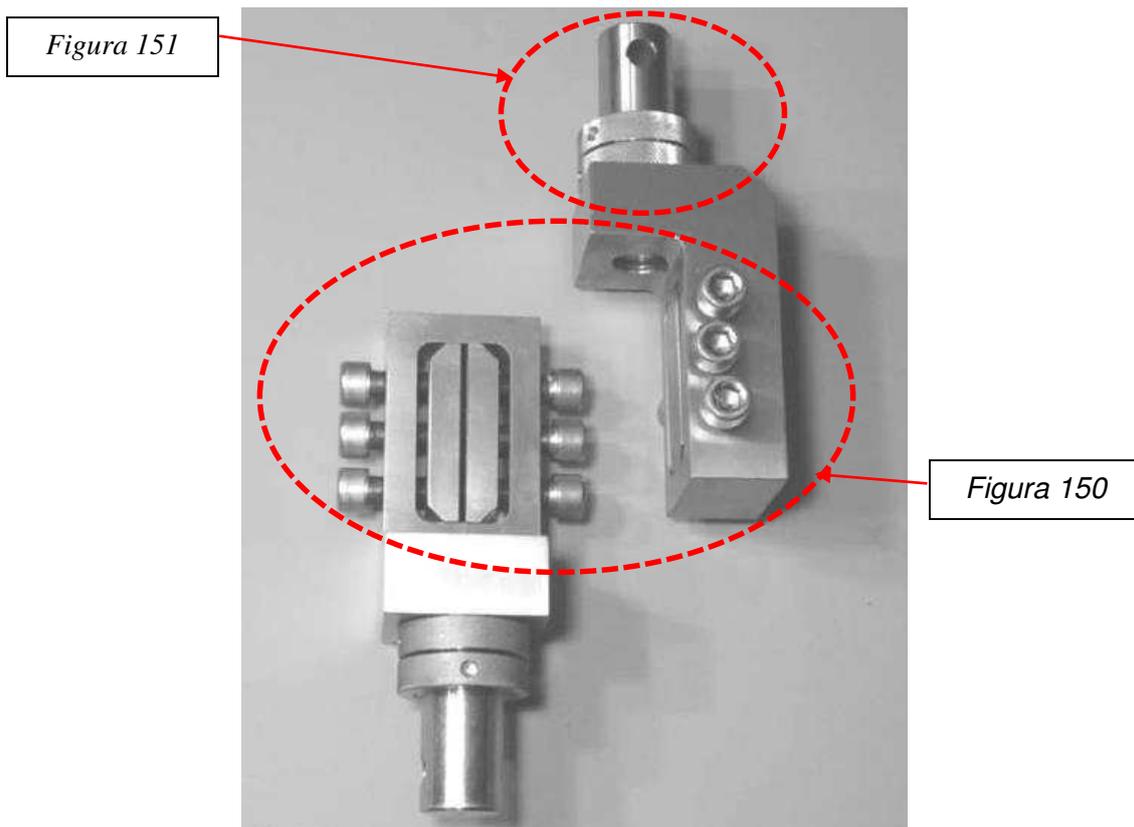


Figura 149 - Roteiro do dispositivo Wyoming.

A Figura 150 mostra o detalhe do sistema de fixação do dispositivo de ensaio VNRS do Wyoming Test Fixture Inc.

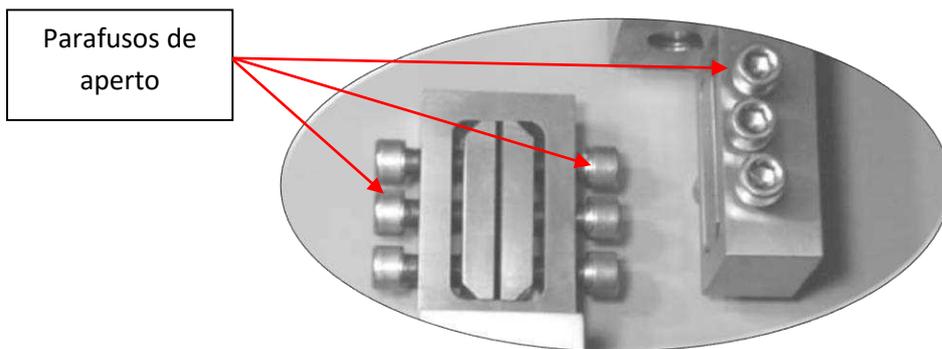


Figura 150 - detalhe do sistema de fixação das amostras do dispositivo Wyoming.

O dispositivo emprega conjuntos de três parafusos para apertar os batentes de aperto. Não é possível observar a presença de rasgos nos fixadores que auxiliem na introdução do corpo de prova na hora do ensaio. Isto indica que há um rasgo para inserção do corpo de prova na parte traseira do elemento.

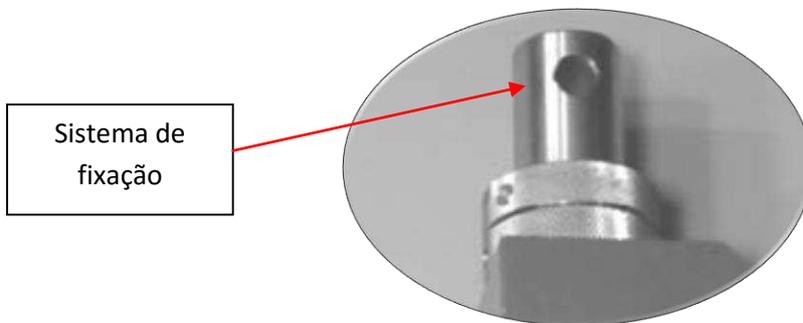


Figura 151 - Detalhe do sistema de fixação do dispositivo Wyoming.

A *Figura 151* apresenta o detalhe do sistema de fixação utilizado no dispositivo Wyoming de ensaio VNRS. É possível observar a presença de um engaste feito com pinos. Este tipo de engaste é comumente utilizado em máquinas de ensaio universais. O diâmetro do pino pode funcionar como elo fusível para o dispositivo de ensaio.

### **Segundo dispositivo V-Notched Rail Shear utilizado no Wyoming Test Fixture Inc**

A *Figura 152* mostra um dispositivo alternativo de ensaio VNRS desenvolvido no Wyoming Test Fixture Inc, EUA.

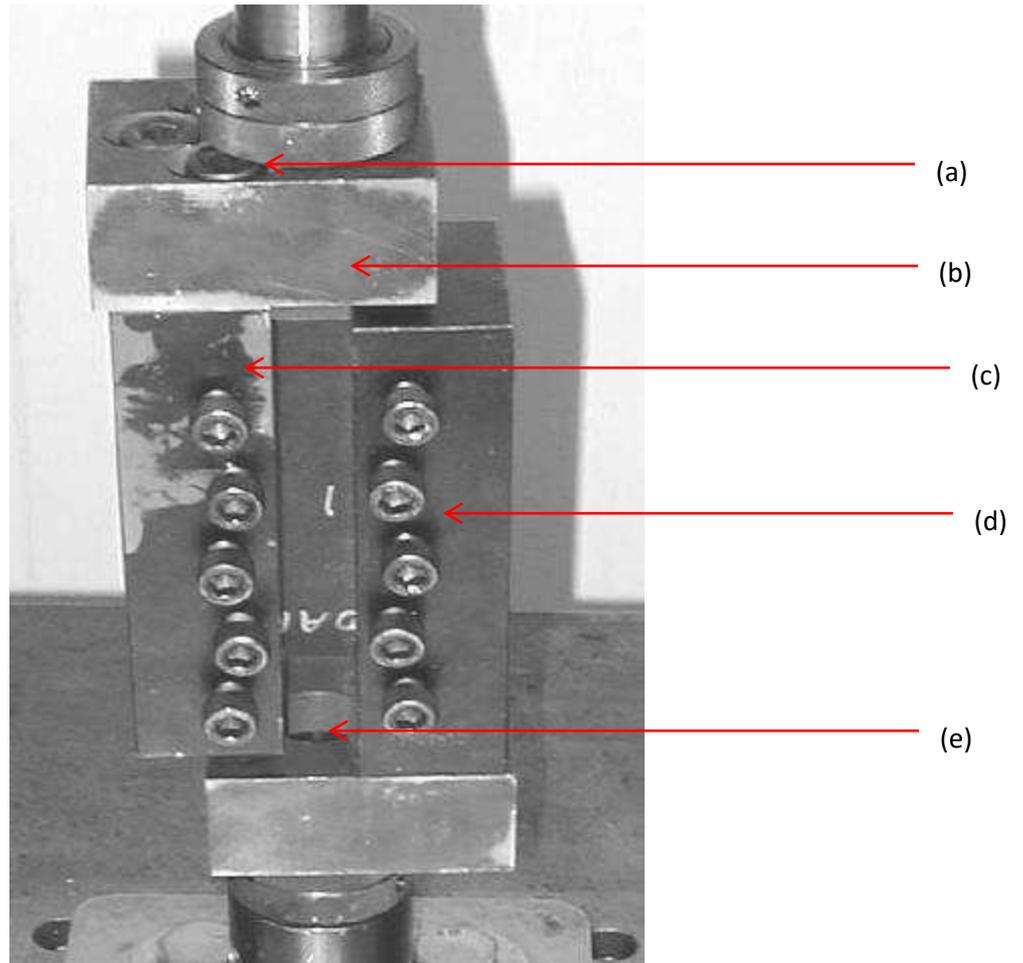


Figura 152 - Dispositivo desenvolvido no Wyoming Test Fixture, Inc, Salt Lake City  
[Fonte: (ADAMS, et al., 2002)]

(a) parafusos de ajuste do fixador; (b) parte superior do fixador; (c) parte lateral do fixador; (d) sistema de fixação das amostras; (e) pino de acoplamento.

Nesse sistema é possível observar a presença de parafusos de ajuste do fixador (a). O fixador foi dividido em duas partes, a parte superior do fixador (b) e a parte lateral (c) e o conjunto é formado por dois fixadores idênticos. O sistema de fixação das amostras (d) utilizado é o sistema de fixação por sapatas móveis. O acoplamento entre o fixador e o sistema de acoplamento ao sistema de transferência de carga é feito através de um pino de acoplamento (e).

Na *Figura 153* é apresentado o roteiro do dispositivo Wyoming.

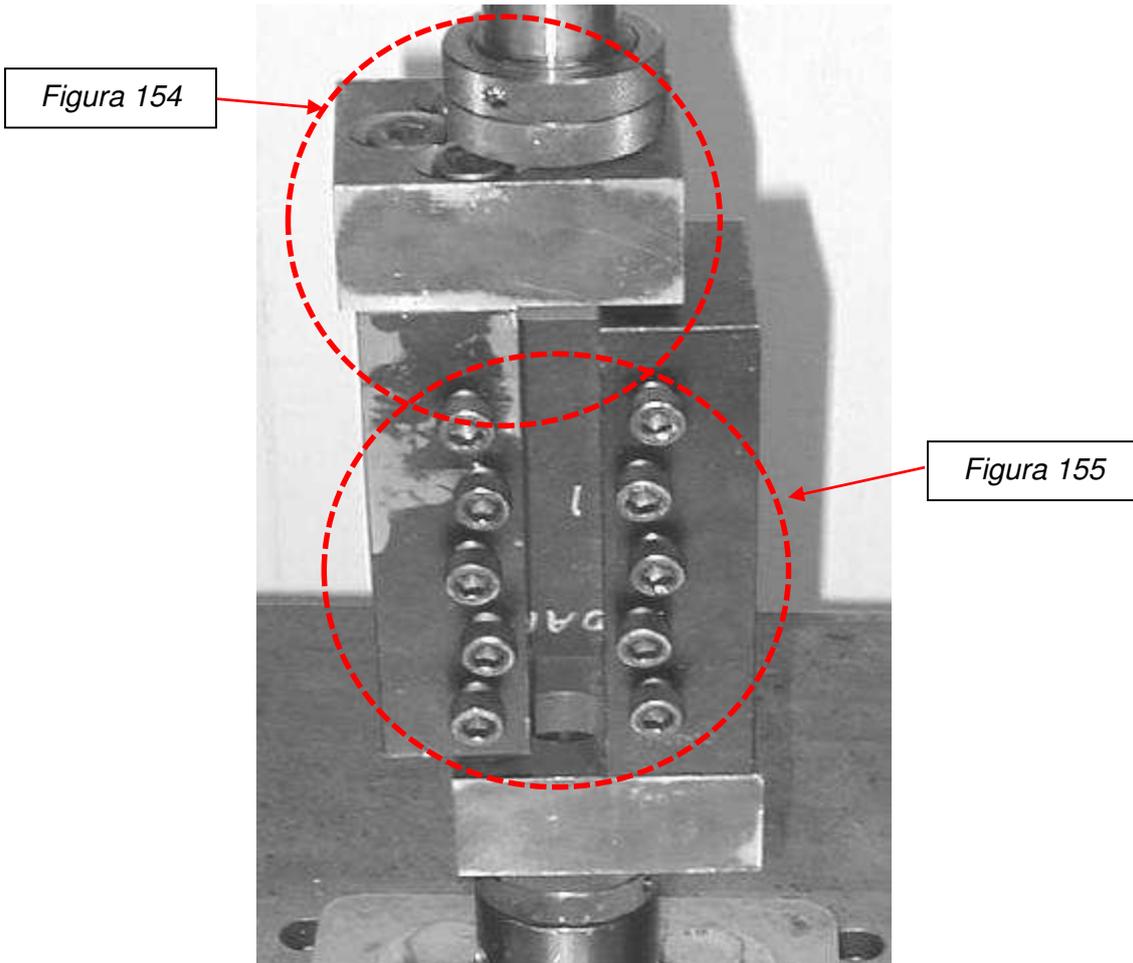


Figura 153 - Roteiro do dispositivo híbrido Wyoming

A Figura 154 apresenta o detalhe do elemento fixador do dispositivo alternativo do Wyoming Test Fixture Inc.

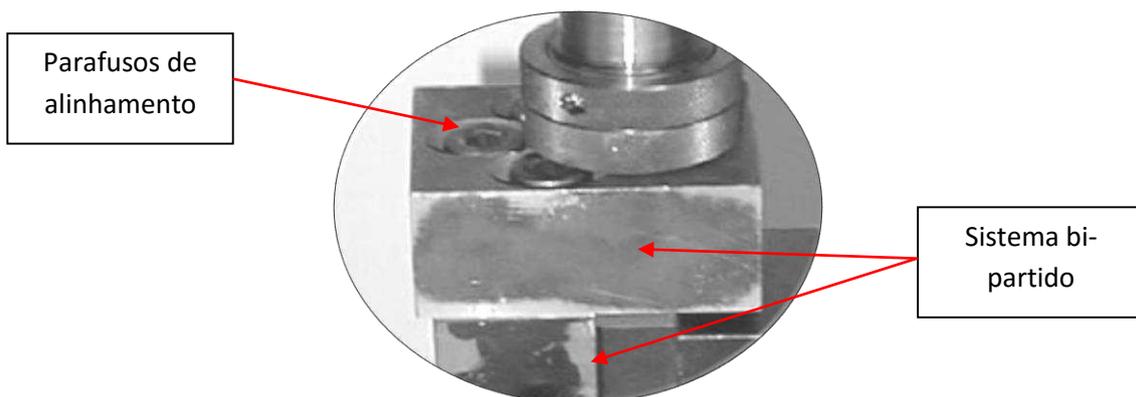


Figura 154 - Detalhe mostrando os parafusos de ajuste do dispositivo Wyoming alternativo

É possível observar a presença de parafusos de ajuste em cada fixador. Estes parafusos de ajuste permitem que seja alterado a distância livre entre os fixadores. Isto exige que o fixador seja formado por duas partes.

A *Figura 155* mostra o detalhe do sistema de aperto formado por conjuntos de cinco parafusos.

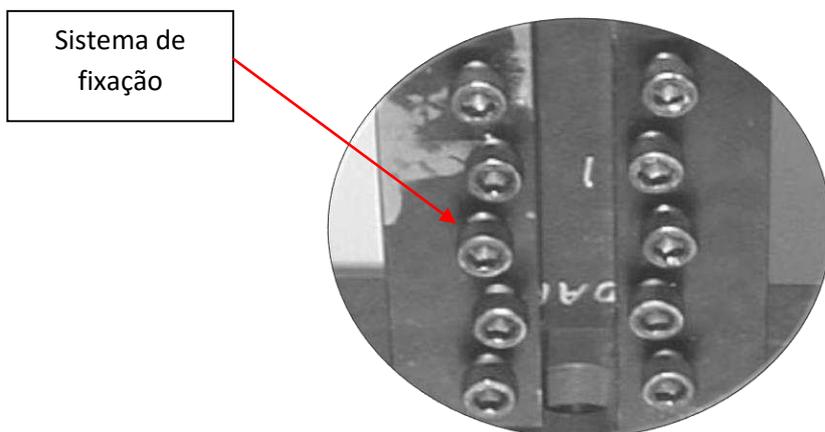


Figura 155 - detalhe mostrando o sistema de parafusos de aperto utilizado no dispositivo alternativo Wyoming

Este dispositivo permite a utilização de amostras maiores. Este dispositivo tenta reproduzir o ensaio Two Rail Shear em corpos de prova sem entalhes.

Analisando as soluções para a concepção do dispositivo apresentadas anteriormente, chegou-se à conclusão que:

- Os dispositivos de cisalhamento interlaminar (ILSS) que utilizam o sistema V-Notched Rail Shear são menos elaborados que o sistema losipescu.
- Não existe movimento relativo entre o sistema de fixação da amostra e a própria amostra o que diminui a ocorrência de trincas superficiais.
- Pode ocorrer o escorregamento do corpo de prova durante a realização dos ensaios, mas este defeito é eliminado com a utilização de extensômetros colados no corpo da amostra.
- São utilizados três parafusos para os batentes de aperto o que proporciona um aperto mais uniforme.
- Devido à proximidade dos parafusos no dispositivo, é fundamental que estes parafusos sejam tipo Allen ou parafusos sem cabeça. Parafusos sextavados necessitam de um espaço lateral entre os parafusos para a utilização da chave de aperto.

Tabela 8 - subsistemas do dispositivo "V-NotchedRailShear"

| <b>Definição do Subsistema</b> | <b>Identificador</b> | <b>Função</b>                                  | <b>Pré-requisito</b>                              |
|--------------------------------|----------------------|--|---|
| Acoplamento                    | SAJ                  | Fixar o dispositivo ao sistema de carregamento | Rigidez suficiente para não interferir no ensaio  |
| Fixadores                      | FXJ                  | Fixar as amostras e transmitir o carregamento  | Rigidez suficiente para não interferir no ensaio  |
| Sistema de contatos            | SCJ                  | Mantem o contato com o corpo de prova          | Acabamento superficial com atrito elevado         |
| Sistema de alinhamento         | PAJ                  | Fazer o ajuste do corpo de prova               | Manter o corpo de prova no centro do dispositivo  |
| Sistema de carregamento        | SCJ                  | Impor o carregamento no momento do ensaio      | Rigidez suficiente para não interferir no ensaio. |

Após definir os sistemas fundamentais do dispositivo de ensaio V-Notched Rail Shear, parte-se para o projeto conceitual do dispositivo.

#### 4.2.2 Projeto conceitual do dispositivo V-Notch Rail Shear

No projeto conceitual é que são definidas as melhores formas para o conjunto.

#### Fixadores

Os fixadores são os elementos que suportam todo o conjunto.

A primeira concepção do elemento fixador foi utilizar dois elementos iguais e bipartidos para permitir a fixação do corpo de prova. Esta configuração é apresentada na figura a seguir.

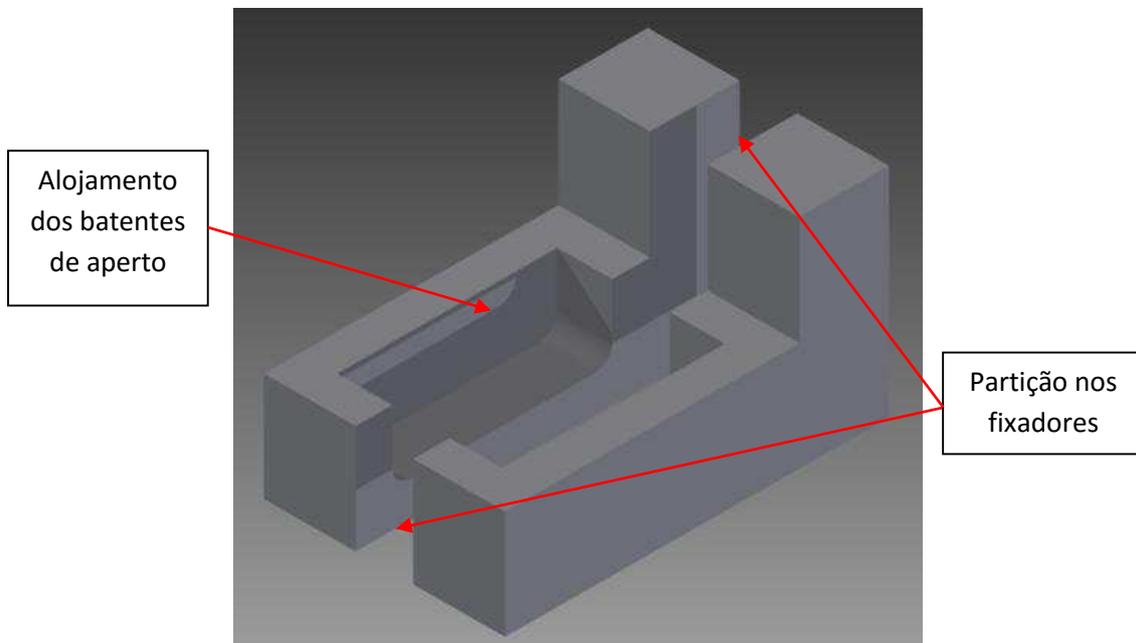


Figura 156 - modelagem computacional do elemento fixador numero 1 (FXJ1)

Essa concepção apresentada na Figura 156 recebeu o tag FXJ1. É possível observar uma dificuldade no momento da fixação do corpo de prova.

A desvantagem desta concepção é a presença de muitos parafusos para unir as metades dos fixadores. Existe a possibilidade desta concepção não fornecer um carregamento uniforme à face da amostra.

A segunda concepção do elemento fixador recebeu o tag FXJ2 e é apresentada na figura a seguir.

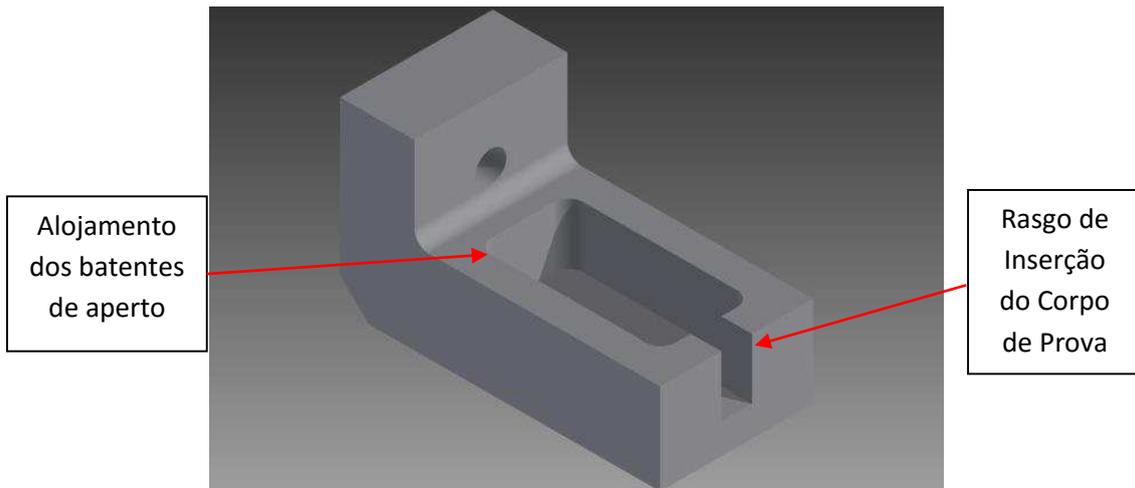


Figura 157 - Modelagem computacional do elemento fixador 2(FXJ2)

A Figura 157 apresenta a modelagem computacional da segunda concepção para o elemento fixador. É possível observar um entalhe na parte inferior do corpo de prova para ser possível a realização do ensaio. O inconveniente dessa configuração é a necessidade de um deslocamento do sistema de carregamento que seja maior que o comprimento do conjunto.

O terceiro dispositivo idealizado apresenta uma abertura lateral para a introdução do corpo de prova. Essa configuração recebeu o tag FXJ3 e é apresentado a seguir.

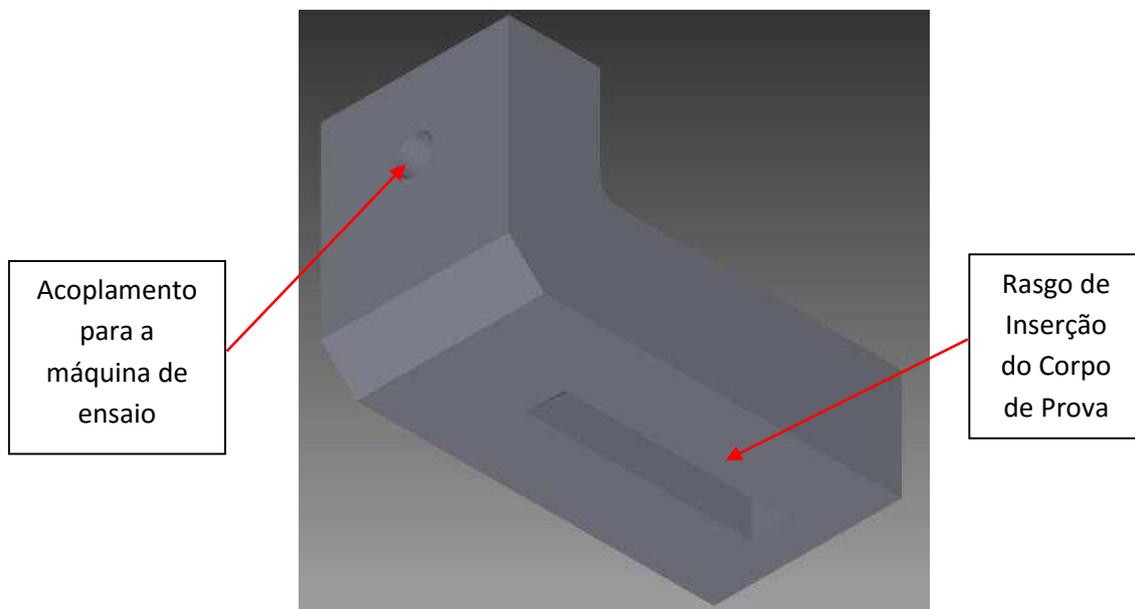


Figura 158 - Modelagem computacional do elemento fixador 3 (FXJ3)

A Figura 158 apresenta a modelagem computacional da terceira concepção para o dispositivo fixador. Nessa idealização não é necessário um deslocamento

do conjunto para a montagem do experimento. O corpo de prova pode ser introduzido pela parte traseira antes da realização do ensaio.

### Batentes de Aperto

Este elemento fica em contato com o corpo de prova e é responsável por evitar o deslizamento da amostra no momento de realização do ensaio.

A primeira ideia do elemento de contato recebeu o tag SCJ1. A Figura 159 apresenta a modelagem computacional do elemento de contato idealizado.

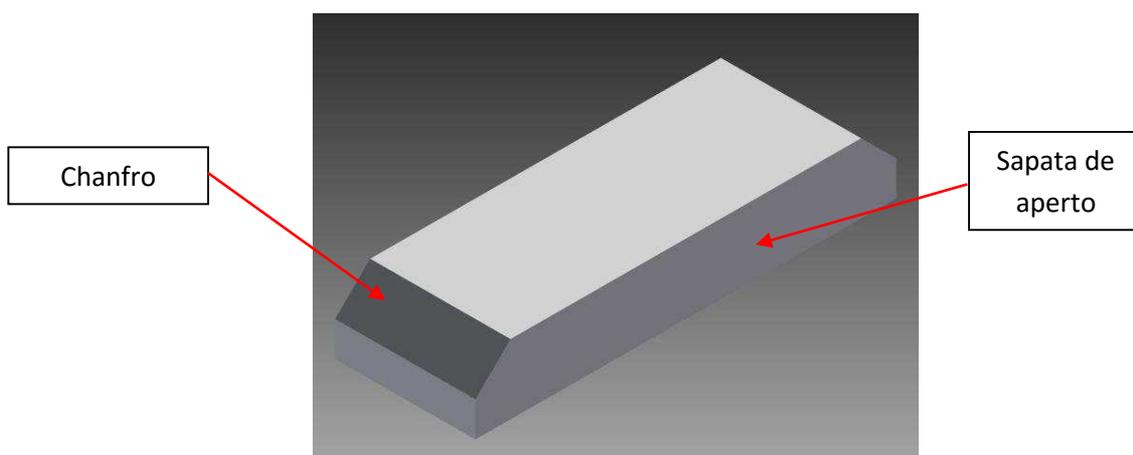


Figura 159 - modelagem computacional do elemento de contato número 1 (SCJ1)

É possível observar que este elemento é de construção simples. Para permitir um maior deslocamento dos batentes de aperto, dentro do alojamento presente nos fixadores

A segunda idealização para o sistema de contatos recebeu o tag SCJ2 e é apresentado na Figura 160, a seguir.

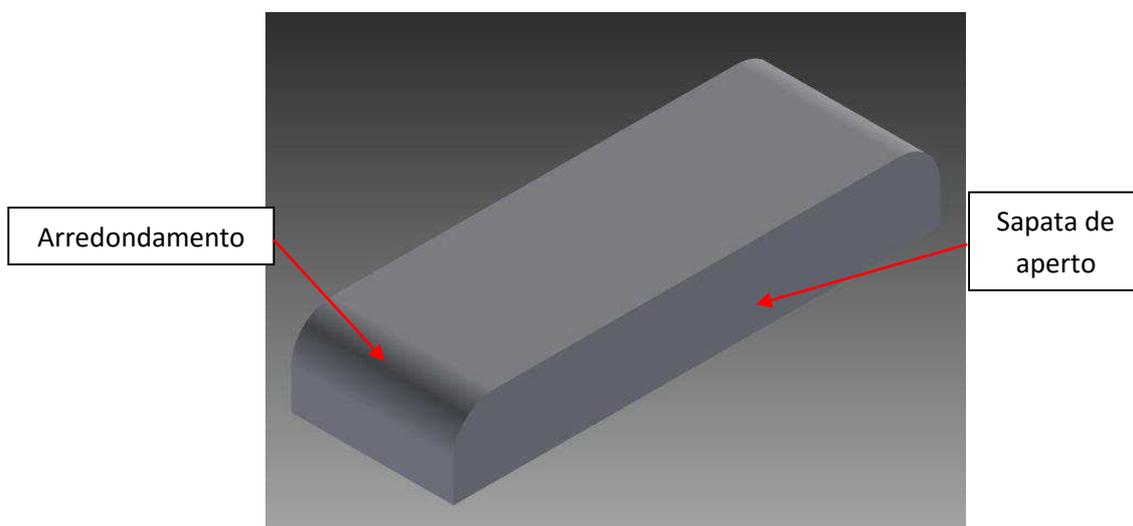


Figura 160 - Modelagem computacional do elemento contato número 2 (SCJ2)

O diferencial são os cantos arredondados e a rugosidade da face que fica em contato com o material. Para aumentar o atrito com o corpo de prova foi proposta a confecção de uma superfície recartilhada cruzada na face que ficará em contato com a amostra.

### Sistema de alinhamento

Como há o requisito de o carregamento ser imposto de uma maneira alinhada com o corpo de prova, surgiu a necessidade de conferir o alinhamento do corpo de prova com o centro do Fixador.

A proposta é apresentada na **Figura 161**, a seguir.

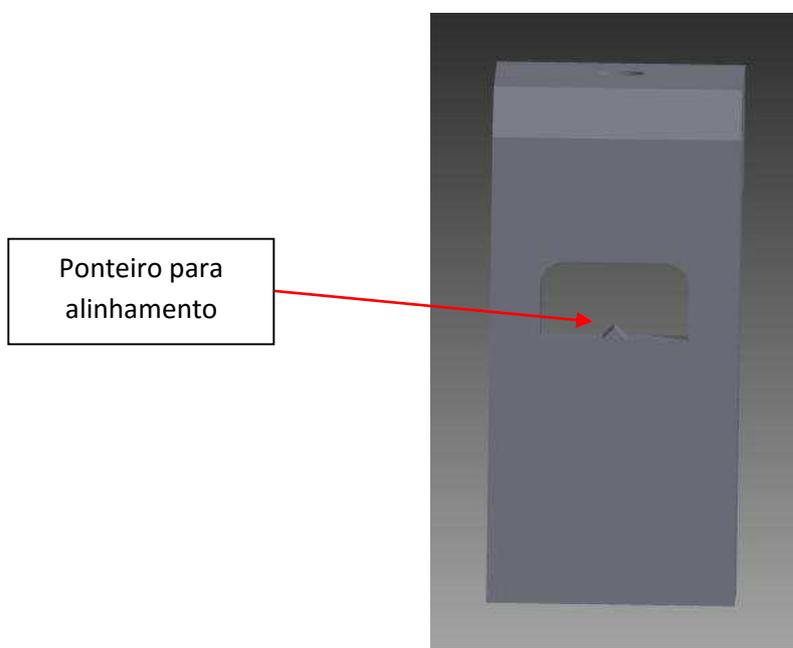


Figura 161 - Modelagem computacional do elemento de alinhamento 1 (PAJ1)

Essa concepção recebeu o tag PAJ1, e possui um sistema de alinhamento por ponteiro na parte traseira do fixador. É necessário que o operador observe o corpo de prova de uma maneira perpendicular ao fixador para evitar um erro conhecido como erro de paralaxe.

### Acoplamento

A seguir é apresentado a modelagem computacional do sistema de acoplamento entre o fixador e o subsistema de carregamento. Para esse dispositivo o sistema de acoplamento recebeu o tag SAJ1.

A Figura 162 apresenta o sistema de acoplamento selecionado para o sistema de ensaios V-Notched Rail Shear.

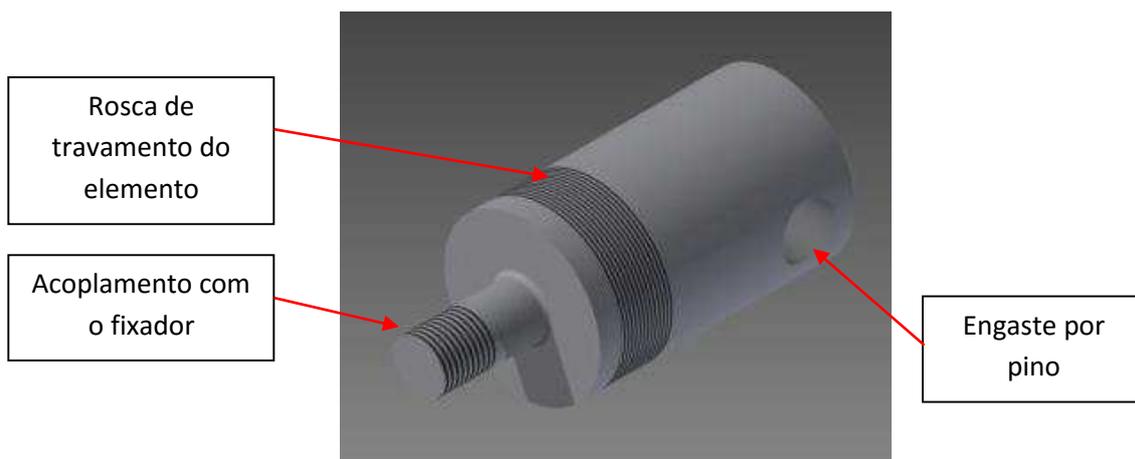


Figura 162 - Modelagem computacional do elemento Subsistema de acoplamento 1 (SAJ1)

O acoplamento com o fixador é dimensionado pela carga máxima do dispositivo para que a rosca não se deteriore durante a realização do ensaio. Para não acontecer a ruptura dos filetes da rosca de acoplamento o pino de engaste precisa ser dimensionado para funcionar como elo fusível deste sistema.

### **Sistema de carregamento.**

Para a realização deste ensaio o sistema de carregamento idealizado foi a utilização da Máquina de ensaio universal.

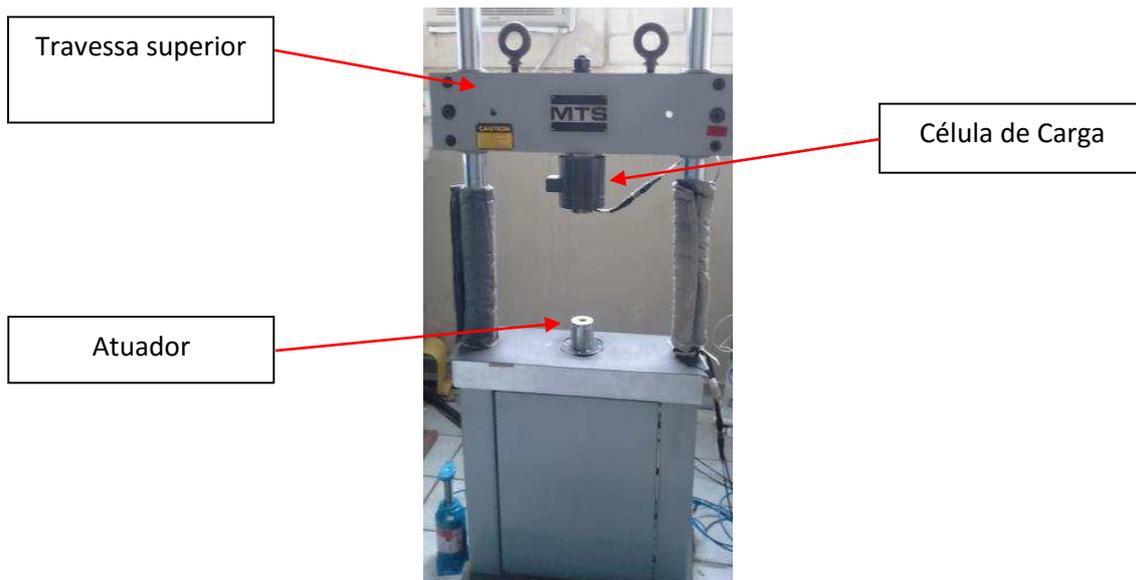


Figura 163 - máquina de ensaio universal presente na UFCG.

Esse dispositivo apresentado na Figura 163 , para esta concepção de projeto, recebeu o tag SCJ1.

O segundo sistema de carregamento proposto é a utilização de anilhas para impor o carregamento. Essa concepção recebeu o tag SCJ2 e esta apresentado na figura a seguir.

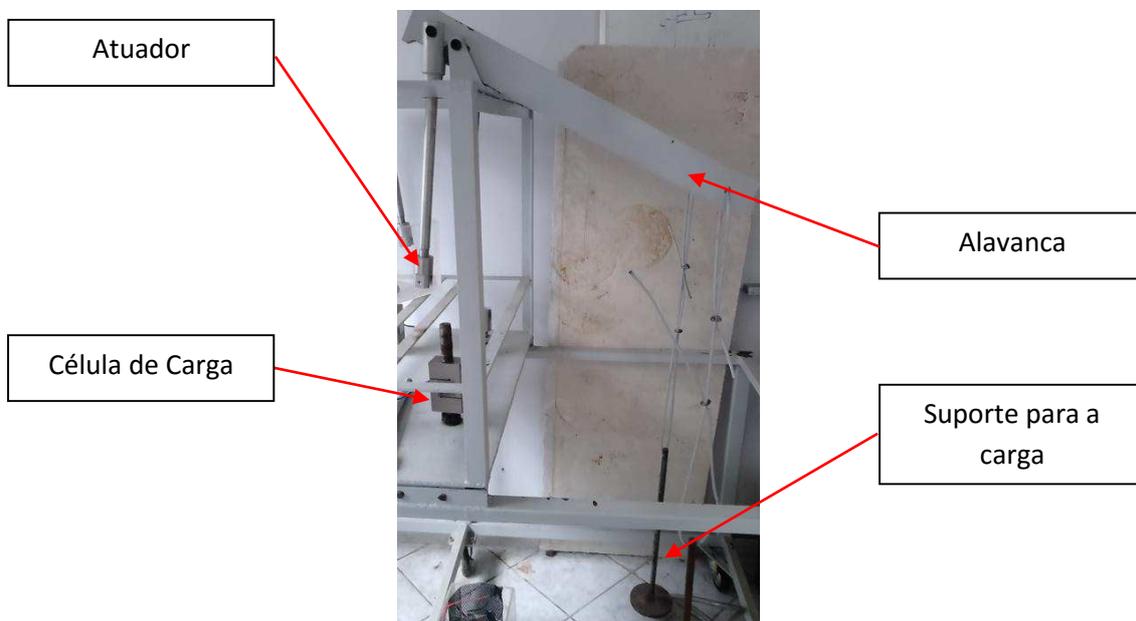


Figura 164 - idealização do sistema de carregamento manual por anilhas (SCJ2).

A Figura 164 apresenta um sistema de carregamento por anilha presente nos laboratórios da UFCG que pode ser utilizado neste tipo de ensaio.

### Definição da configuração do ensaio

Depois de apresentar as opções de configuração para a garra V-Notched Rail Shear Test, a Tabela 9 apresenta a matriz de projeto para este sistema com todas as opções de confecção dos elementos.

Tabela 9 - matriz de projeto para o conjunto “V-Notched Rail Shear”.

| Tipo de ensaio   | Dispositivo                 | Componente              | Solução |      |      |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|---------|------|------|
|                  |                             |                         |         |      |      |
| Ensaio ASTM 7078 | V-Notched Rail Shear “VNRS” | Fixadores               | FXJ1    | FXJ2 | FXJ3 |
|                  |                             | Batentes de Aperto      | SCJ1    | SCJ2 |      |
|                  |                             | Sistema de Alinhamento  | PAJ1    |      |      |
|                  |                             | Acoplamento             | SAJ1    |      |      |
|                  |                             | Sistema de carregamento | SCJ1    | SCJ2 |      |

A matriz de projeto apresentada na *Tabela 9 - matriz de projeto para o conjunto “V-Notched Rail Shear”*. possui as configurações para os dispositivos que foram idealizados para esse tipo de ensaio.

Definido as prováveis geometrias para os elementos do projeto, a próxima etapa da metodologia é a escolha final dos componentes, ver Tabela 10.

Tabela 10 - matriz de projeto para o conjunto “V-Notched Rail Shear” com as opções selecionadas.

| Tipo de ensaio   | Dispositivo                 | Componente              | Solução |      |      |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|---------|------|------|
|                  |                             |                         |         |      |      |
| Ensaio ASTM 7078 | V-Notched Rail Shear “VNRS” | Fixadores               | FXJ1    | FXJ2 | FXJ3 |
|                  |                             | Sistema de contatos     | SCJ1    | SCJ2 |      |
|                  |                             | Sistema de Alinhamento  | PAJ1    |      |      |
|                  |                             | Acoplamento             | SAJ1    |      |      |
|                  |                             | Sistema de carregamento | SCJ1    | SCJ2 |      |

Na **Tabela 10** apresentada estão marcados as opções selecionadas para a construção do protótipo para o dispositivo de ensaio V-Notched Rail Shear

#### **4.2.3 Projeto Preliminar do dispositivo V-Notched Rail Shear**

Do mesmo modo que o realizado no dispositivo de ensaio losipescu, foram realizadas simulações computacionais para determinar os níveis de carregamento nos elementos que constituem o conjunto de ensaio V-Notched Rail Shear.

A Figura 165 apresenta o resultado da simulação computacional do elemento Fixador móvel aplicado o carregamento. Esta simulação foi realizada no software Autodesk Inventor 2014®, versão educacional. Foi utilizado o material tipo aço presente na biblioteca do software.

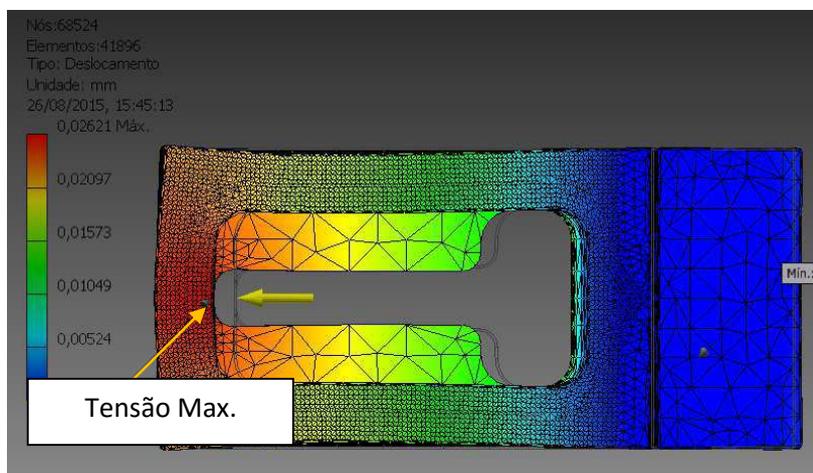


Figura 165 - Simulação computacional do elemento Fixador móvel.

O valor de 0,02621mm de deformação obtido na simulação representa uma deformação da ordem de 0,23% em relação ao comprimento do dispositivo.

A Figura 166 apresenta o resultado da simulação quanto a tensão.

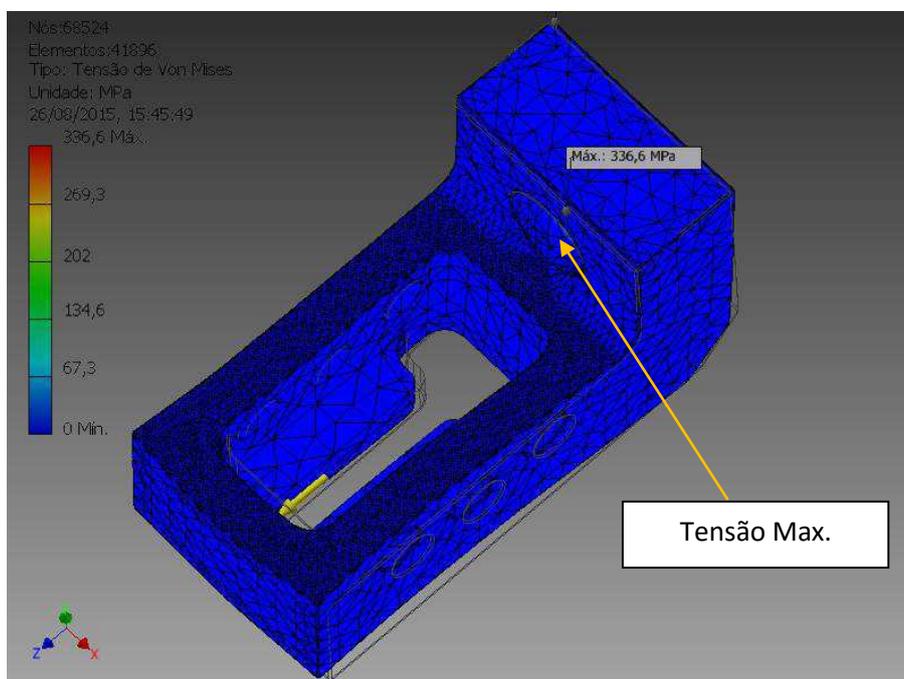


Figura 166 - simulação computacional do elemento fixador móvel quanto a tensão.

É possível observar que o valor de tensão máximo, 336,6 MPa, ocorre na região de acoplamento deste elemento com o sistema de carregamento.

A figura a seguir mostra o elemento fixador móvel, suprimido a tensão provocada pelo acoplamento.

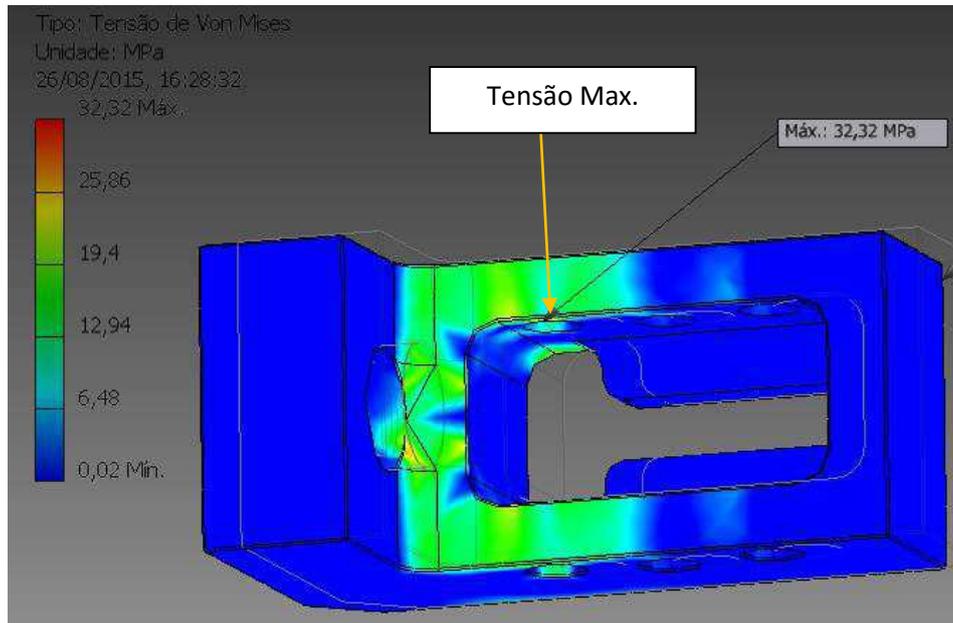


Figura 167 -simulação computacional do elemento Fixador móvel.

A Figura 167 mostra que o valor da tensão, quando são suprimidos os efeitos do elemento de acoplamento, é da ordem de 32,32MPa.

No conjunto V-NotchedRailShear desenvolvido neste trabalho, os fixadores possuem geometrias diferentes, um possui o rasgo para introdução do corpo de prova e o outro não possui este rasgo, o que tornou necessário a realização da simulação do segundo Fixador.

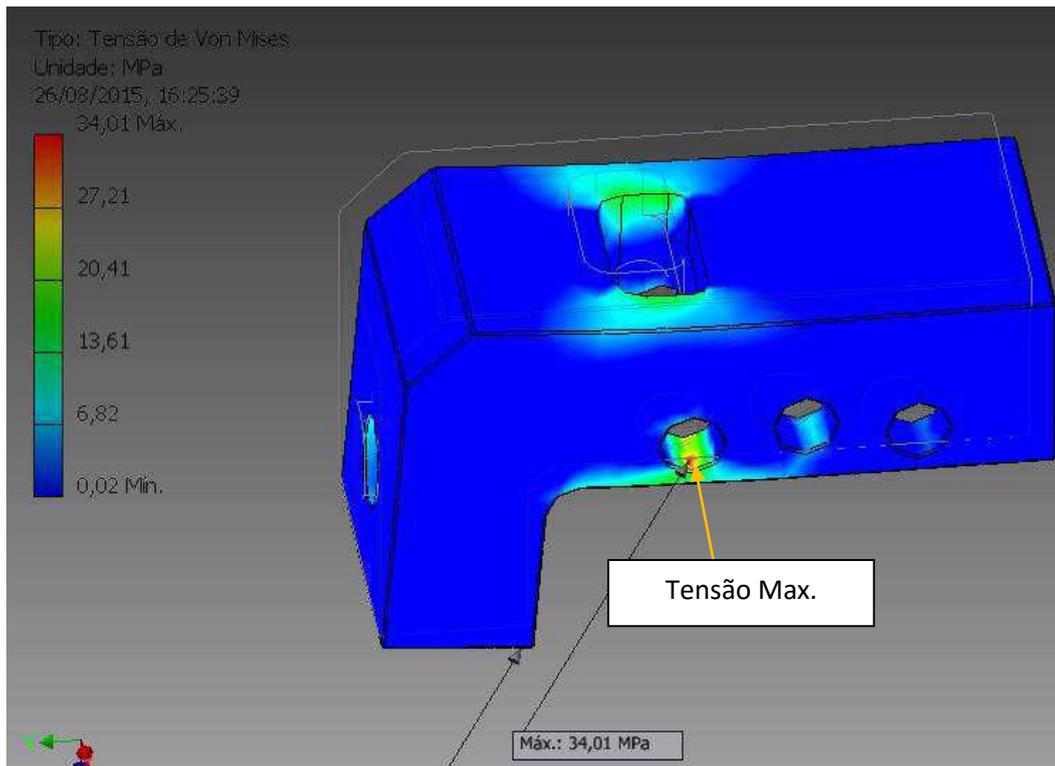


Figura 168 -simulação computacional do elemento fixador.

A Figura 168 apresenta o resultado da simulação computacional no segundo elemento fixador. É possível observar que o maior valor da tensão, 34,01MPa, ocorre na região de alojamento dos parafusos de aperto.

Utilizando os valores apresentados na *Tabela 4 - Propriedades Mecânicas de aços esfriados lentamente em função do teor de Carbono*, apresentada anteriormente, no projeto preliminar do dispositivo losipescu, foi construída a seguinte tabela.

Tabela 11- Aços ao carbono selecionados para o dispositivo V-Notched Rail Shear após a simulação computacional.

| Elemento    | Valor Máximo simulado MPa | % carbono mínimo | % carbono escolhida | Limite Escoamento | % Escoamento | Fator de Segurança Escoamento | Fator Segurança Resistencia |
|-------------|---------------------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Acoplamento | 336,6                     | 0,60             | 0,45                | 310               | -8,58        | 0,92                          | 1,63                        |
| Fixador 1   | 34,01                     | 0,01             | 0,45                | 310               | 10,97        | 9,11                          | 16                          |
| Fixador 2   | 32,32                     | 0,01             | 0,45                | 310               | 10,42        | 9,59                          | 16                          |

A Tabela 11 apresenta a porcentagem de carbono escolhida para a confecção dos elementos do dispositivo V-Notched Rail Shear. O dispositivo acoplamento se apresenta com uma tensão superior ao limite escoamento do

material. Isto indica que este elemento irá deformar plasticamente após a aplicação do carregamento máximo do dispositivo.

O resultado da simulação mostra que este valor de tensão ocorre pontualmente na posição de restrição de deslocamento do ensaio. É importante lembrar, também, que os valores apresentados na Tabela 4 são para aços ao carbono resfriados lentamente, e a opção de aço escolhida para a fabricação pode ser temperada, o que aumenta significativamente a resistência do material.

A figura a seguir apresenta a concepção final do dispositivo V-Notched Rail Shear.

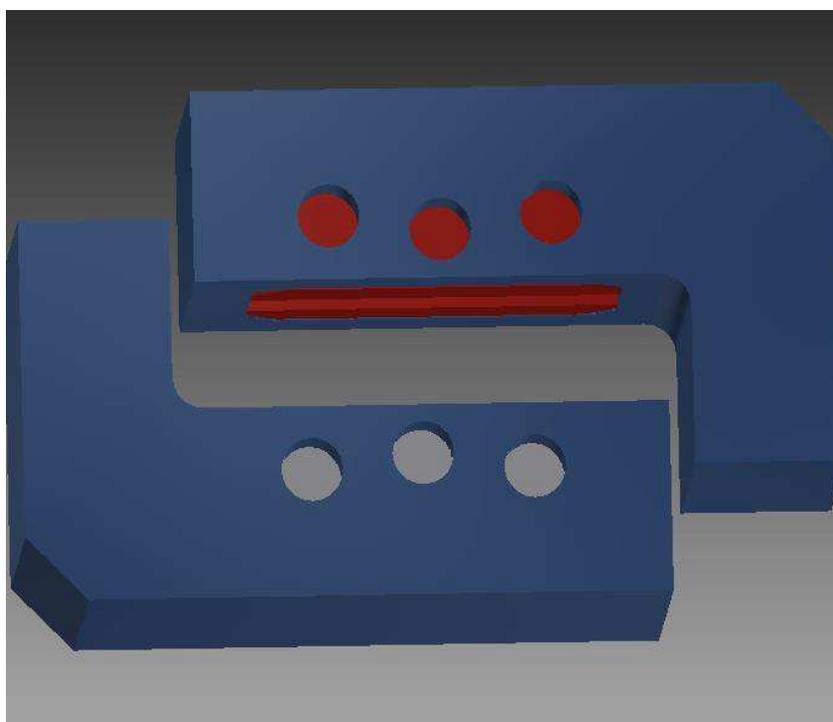


Figura 169 - Concepção final do conjunto de ensaio V-Notched Rail Shear.

Ao final da etapa do projeto preliminar o conjunto de ensaio V-Notched Rail Shear está apto para a próxima fase do projeto.

#### **4.2.4 Projeto Detalhado do dispositivo V-Notched Rail Shear**

O projeto detalhado do Dispositivo V-Notched Rail Shear é apresentado no Anexo II.

#### **4.2.5 Fabricação do dispositivo V-NotchRailShear.**

A primeira alternativa de fabricação foi a utilização da máquina de corte por eletroerosão a fio. A máquina utilizada é apresentada na figura a seguir.

A Figura 170 apresenta a máquina de corte por eletroerosão a fio CNC utilizada como alternativa para a confecção do dispositivo de ensaio V-Notched Rail Shear.

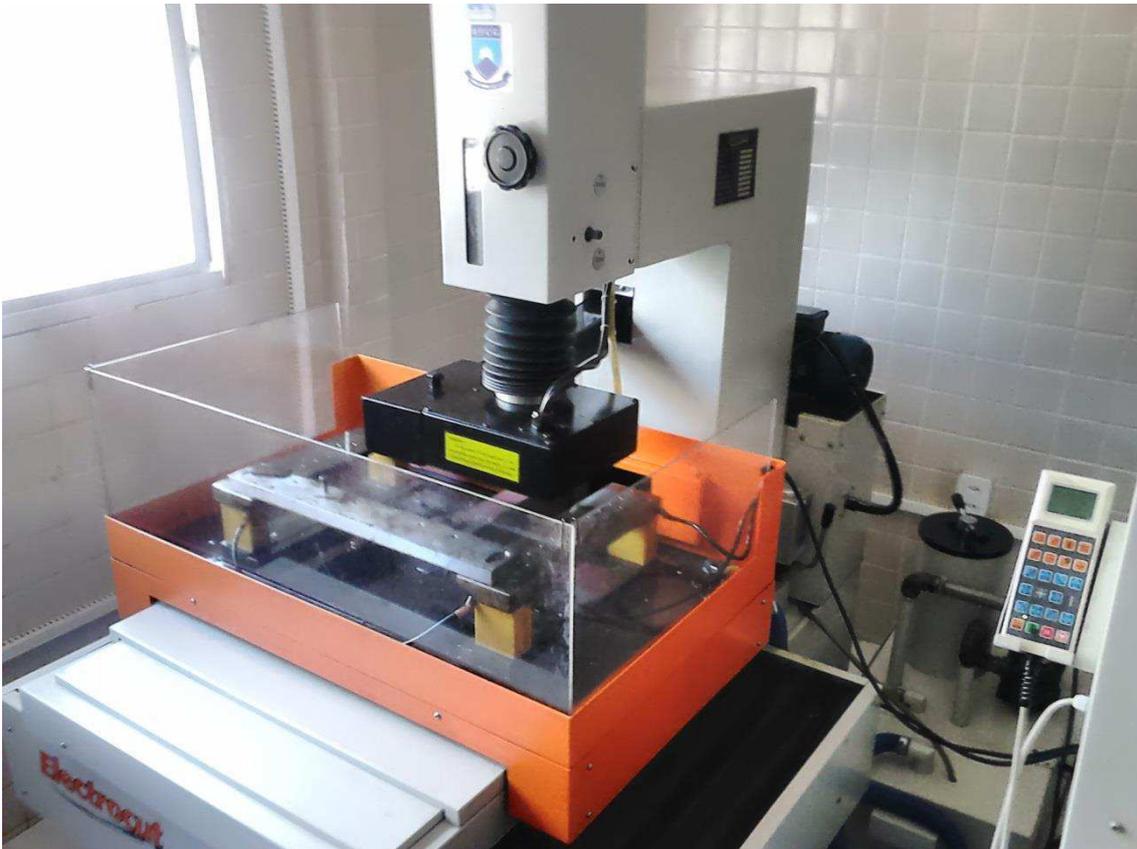


Figura 170 - Máquina de Eletro-erosão a fio da UFCG.

A primeira alternativa de usinagem se mostrou eficiente na tolerância dimensional. O primeiro corte realizado terminou com o tempo de 32 horas, aproximadamente.

Para confeccionar todo o dispositivo com este processo, seriam necessárias 128 horas, o que tornou o método de usinagem não recomendado para esta geometria.

A segunda alternativa utilizada foi a fresagem manual. A fresadora utilizada foi uma fresadora universal da oficina mecânica da UFCG. A fresadora é apresentada na **Figura 171**.



Figura 171 - Dispositivo V-Notched Rail Shear sendo usinado na Fresadora Universal da UFCG.

Na Figura 171 é possível observar a peça, semi-acabada, sendo realizada a operação de fresar o alojamento do corpo de prova.

Para certificar que os raios fiquem com a medida especificada no projeto, foram feitos furos, com uma broca do diâmetro especificado no projeto, na posição final de usinagem. Esses furos serviram para aliviar a fresa na operação de entrada na peça, e serviram para confeccionar o raio definitivo do alojamento do corpo de prova. Esta estratégia de usinagem está apresentada na figura a seguir.



Figura 172 - Dispositivo V-Notched Rail Shear sendo usinado na Fresadora Universal da UFCG.

É possível observar na **Figura 172** os furos realizados na peça semi-acabada para a confecção do alojamento do corpo de prova.

A operação de fresar ocorre com a ferramenta rotacionando e a peça sendo movimentada de encontro a fresa (ferramenta). Para esta operação não danificar a ferramenta é necessário que a rotação da máquina seja otimizada.

O cálculo da rotação da ferramenta, em RPM, é dado por:

$$RPM = \frac{V_c * 1000}{\pi * d} \quad ((9))$$

Aonde,

$RPM$  : Rotação da Ferramenta em Rotações Por Minuto  
 $V_c$  : Velocidade de Corte[m/min]  
 $d$  : Diâmetro da ferramenta [mm]

A Velocidade de corte é retirada de catálogos do fabricante da ferramenta e depende do material. Para a usinagem deste dispositivo, por ser aço, a velocidade de corte utilizada foi 25 m/min.

Ao final do processo de fresagem, faltam as operações de furação dos alojamentos dos parafusos e de abertura de rosca com o macho. As sapatas móveis só precisam ser fresadas.

O dispositivo confeccionado é apresentado a seguir.



Figura 173 - dispositivo V-Notched Rail Shear fabricado na UFCG.

A Figura 173 apresenta o dispositivo V-Notched Rail Shear depois da etapa de fabricação do protótipo. Depois que o protótipo é fabricado, parte-se para a etapa de testes.

#### **4.2.6 Desenvolvimento do corpo de prova V-Notched Rail Shear**

O corpo de prova VNRS fabricado pelo processo de corte a Laser de CO<sub>2</sub> é apresentado a seguir.



Figura 174 - corpo de prova V-Notched Rail Shear.

A Figura 174 apresenta o corpo de prova V-Notched Rail Shear confeccionado para os ensaios de teste do dispositivo. Para diminuir a probabilidade de surgimento de trincas superficiais resultantes do processo de usinagem da geometria do corpo de prova, optou-se por cortar a laser.

#### **4.2.7 Teste do dispositivo V-Notched Rail Shear**

Para minimizar a possibilidade de interferência na geometria do corpo de prova provocada pela resina utilizada na fixação dos terminais do extensômetro, foi utilizado a placa auxiliar de aquisição neste ensaio.

A figura a seguir apresenta o dispositivo pronto para a realização do experimento com a placa auxiliar de aquisição. É possível observar, na Figura 175, que há a fixação da mesma placa de circuito do dispositivo Iosipescu, o que significa que a placa pode ser utilizada nos dois ensaios.

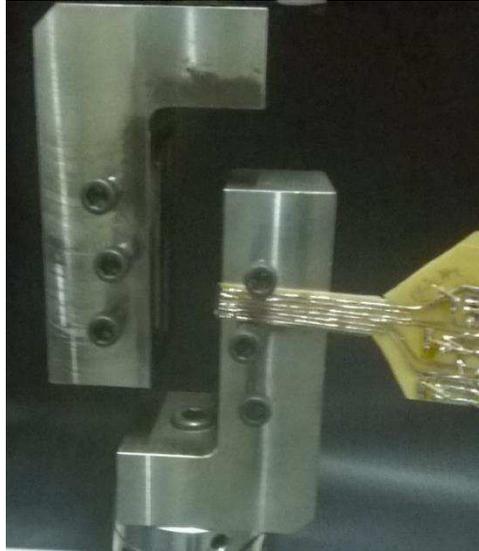


Figura 175 - Dispositivo V-Notched Rail Shear antes da realização do ensaio.

Para o ensaio ASTM 7078 o resultado é apresentado a seguir. A Figura 176 apresenta o resultado experimental do ensaio da garra “VNRS”.

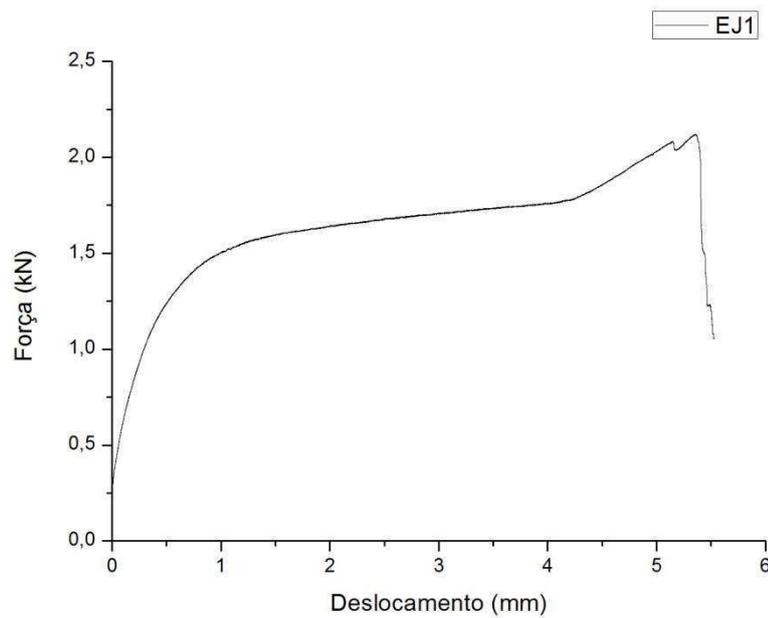


Figura 176 - Resultado do ensaio realizado com a norma ASTM 7078.

É possível observar um deslocamento acentuado antes de atingir o limite de resistência ao cisalhamento do corpo de prova.

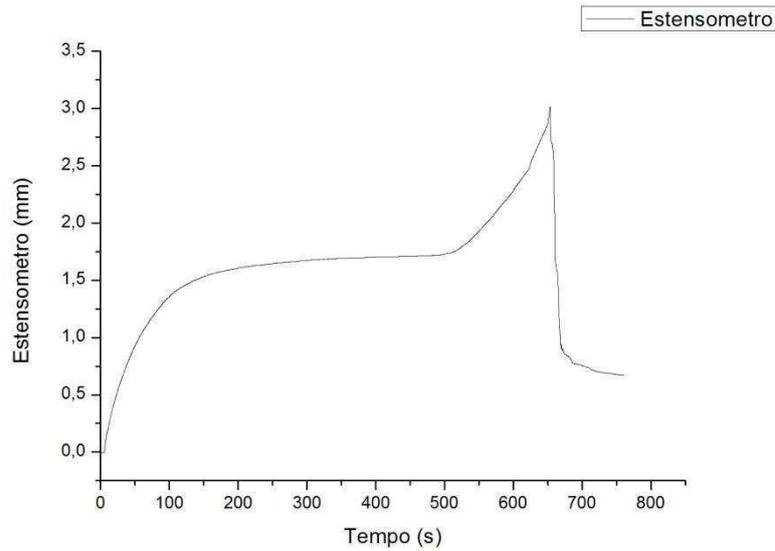


Figura 177 - Gráfico da extensometria realizada na amostra ASTM D7078

A figura acima apresenta o resultado da aquisição do extensômetro colado na superfície da amostra.

A Figura 178 apresenta o resultado típico de ensaios com entalhe em V.

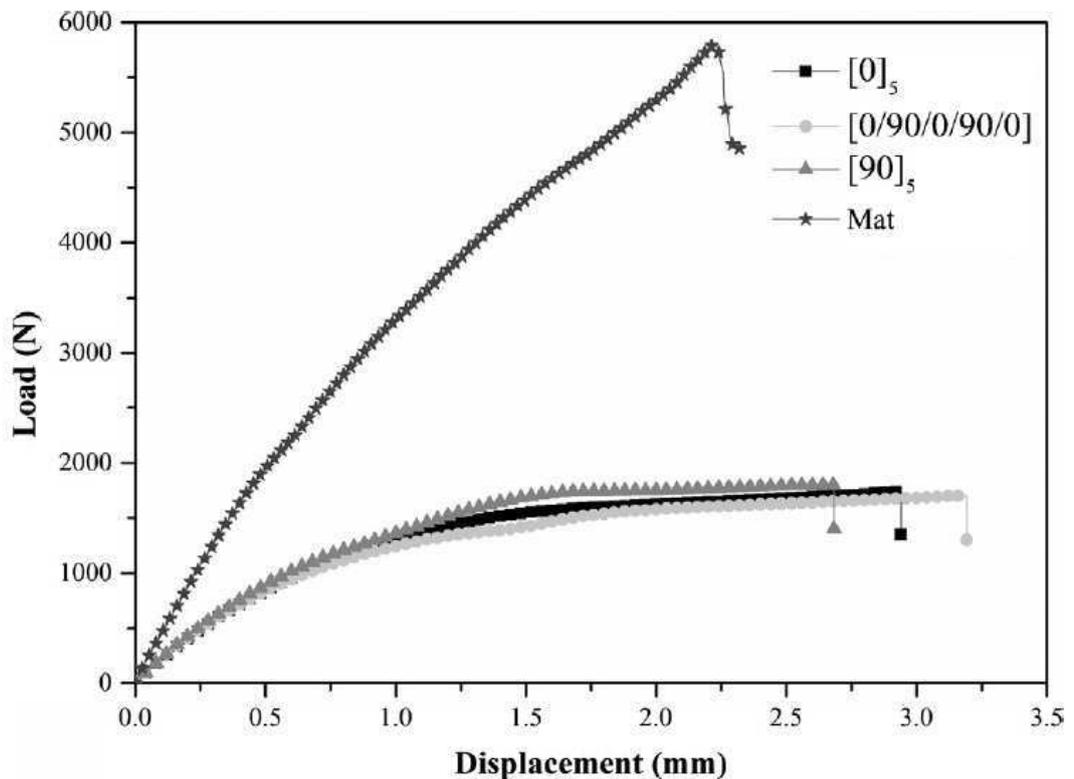


Figura 178 - Curvas típicas dos ensaios de cisalhamento com entalhe em V.  
[Fonte: (ALMEIDA JR, et al., 2014)]

É possível observar uma semelhança entre os resultados obtidos por ALMEIDA JR e os obtidos com o dispositivo V-Notched Rail Shear desenvolvido.

O corpo de Prova ensaiado e considerado válido é apresentado a seguir. Na Figura 179 é possível observar que a trinca, induzida pelo ensaio, iniciou no centro do entalhe.



Figura 179 - corpo de prova V-Notched Rail Shear ensaiado.

Este tipo de ensaio é definido pela norma ASTM D7078 como sendo Vertical (Vertical), ocorrido na região do entalhe (Gage Section) e ocorrido entre os entalhes (between Notches). A norma especifica que este tipo de fratura deve ser apresentado com o código “VGN”.

A apresenta a nomenclatura típica do ensaio VNRS de acordo com a norma ASTM D7078.

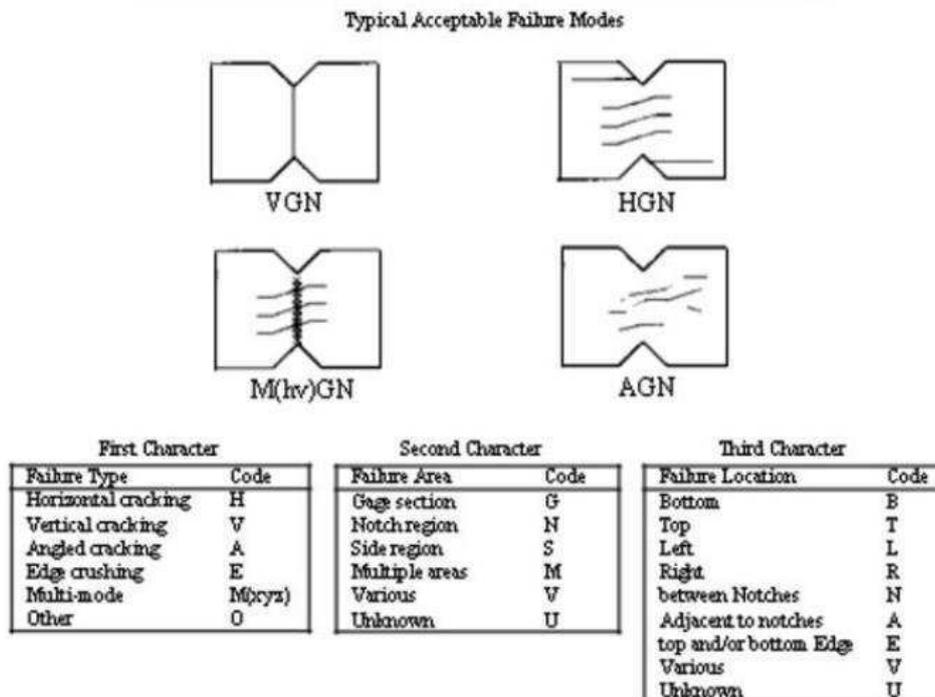


Figura 180 - Classificação do tipo de fratura segundo a norma ASTM D7078.

A *Tabela 12* apresenta a comparação com os resultados encontrados por ALMEIDA JR (ALMEIDA JR, et al., 2014).

A área do corpo de prova é  $9,18 \times 10^{-5} \text{mm}^2$ .

Tabela 12 - Apresentação dos Resultados dos Ensaios V-Notched Rail Shear com corpo de prova de poliéster reforçado com fibra de vidro.

| <b>Ensaio</b> | <b>Limite de Resistencia ao Cisalhamento MPa</b> | <b>Valor encontrado na literatura MPa</b> | <b>% variação</b> |
|---------------|--|---|-------------------|
| CP1           | 22,8   | 22  | 3,98 %            |

## **CAPITULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5. Conclusões**

Foi possível cumprir todas as etapas de projeto (Projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e teste do dispositivo) do dispositivo tipo losipescu. Os resultados preliminares foram compatíveis com os resultados encontrados na bibliografia analisada para este trabalho.

Foi possível, também, cumprir todas as etapas de projeto do dispositivo tipo V-Notched Rail Shear. Os resultados preliminares encontrados foram comparados com valores encontrados na bibliografia analisada para este trabalho e estão compatíveis com o esperado para o material utilizado.

Foi possível a montagem de um sistema de instrumentação capaz de medir a deformação localizada na região central do corpo de prova com a utilização de extensômetros colados na superfície do corpo de prova. Essa pesquisa mostrou que o melhor extensômetro para obter o valor do cisalhamento é o extensômetro tipo roseta tripla de 2 mm de comprimento. O dispositivo auxiliar de medição desenvolvido, quando utilizado corretamente, possibilita minimizar a influência causada pelo peso próprio dos cabos de conexão com os sensores utilizados.

O método de usinagem não convencional de corte por eletroerosão se mostrou eficiente quanto a precisão dimensional, mas se mostrou muito demorado. O que o torna ideal para a realização de operações de acabamento em peças pré-usinadas.

## **6.Recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros**

Implementar um melhor sistema anti-rotação para a parte móvel da garra iosipescu. Apesar de o sistema de carregamento utilizado não permitir a rotação do conjunto móvel, não foi possível avaliar os outros sistemas por causa dessa limitação.

Avaliar a possível utilização de corpos de prova tipo iosipescu na garra ASTM 7078.

Acoplar uma célula de carga ao sistema de aquisição com os extensômetros colados para obter resultados mais satisfatórios

Verificar a influência do corte por laser de CO<sub>2</sub> nos ensaios de cisalhamento.

## Referências Bibliográficas

skf. – Acesso em 22 de Junho de 2014. - [www.skf.com](http://www.skf.com).

soluções industriais. – Acesso em 15 de Fevereiro de 2015. - [www.solucoesindustriais.com.br](http://www.solucoesindustriais.com.br).

**ADAMS D.** Shear test methods: Iosipescu vs. V-Notched Rail Shear Composite World. – Acesso em 3 de Dezembro de 2009. - 14 de 04 de 2015. - <http://www.compositesworld.com/articles/shear-test-methods-iosipescu-vs-v-notched-rail>.

**ADAMS D.O., GALLEGOS A. M. e MORIARTY J. M.** A V-Notched Rail Shear Test for Composite Laminates. - Utah : Department of Mechanical Engineering University of Utah, 2002.

**ADAMS D.O., MORIARTY J.M. e GALLEGOS A.M.** The V-Notched Rail Shear Test. - Salt Lake City : Journal of Composite Materials, 2005.

**ADAMS Danie O.** ; Development and Evaluation of the V-Notched Rail Shear Test for composite Laminates. - Springfield, 2003.

**AKTAS M. e DENIZ M.E.** Determination of In-Plane Properties of Composite Laminates . - Usak : Electronic Journal of Machine Technologies, 2010.

**ALMEIDA JR J. H.S.** ; Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites . - Porto Alegre : Elsevier Materials and Design, 2014. - Vol. 65. - pp. 789-795.

**ALMEIDA S. F.M. e NETO Z. S.N.** Effect of void content on the strength of composite laminates Composite Structures. - São José dos Campos - SP : Elsevier Science Limited, 1994. - Vol. 28. - pp. 139-148.

**AMORIM JÚNIOR W. F.** PROCESSAMENTO DE PLACA ESPESSA DE COMPÓSITO ATRAVÉS DE MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA. - Rio de Janeiro : Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

**ANCELOTTI JR A.C.** Efeitos da Porosidade na Resistência ao Cisalhamento e nas Propriedades Dinâmicas de Compósitos de Fibra de Carbono/Resina Epoxi . - São José dos Campos : Dissertação de Mestrado ITA/CTA, 2006.

**ASHBY M.F. e JONES D. R.H.** Engenharia de Materiais: Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto. - São Paulo-SP , 2007.

**ASTM D 5379** Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method American Society for Testing and Materials. - West Conshohocken, 1993.

**ASTM:D5379-M98** Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.

**ASTM:D7078** Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method . - 2012.

**ASTM D-4255** Guide for Testing In-Plane Shear Properties of Composite Laminates . - West Conshocken, 1994.

**Back Nelson** Metodologia de Projeto de produtos industriais . - Rio de Janeiro : Guanabara Dois, 1983.

**Barnes J.A., Kumosa M. e Hull D.** On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminate tools manufact. - 1995. - pp. 251-268.

**BARRETO JR E.** Conhecendo o extensômetro elétrico de Resistencia - Manual Prático.

**BONFIM G. A.** Metodologia de Projeto - Recife : Setor de Publicações da Universidade Federal de Pernambuco, 1984.

**BOTELHO E. C. e REZENDE M. C.** CARACTERIZAÇÃO MECANICA DE COMPÓSITOS DE POLIAMIDA/FIBRA DE CARBONO VIA ENSAIOS DE CISALHAMENTO INTERLAMINAR E DE MECANICA DA FRATURA . - São José dos Campos : Polímeros: Ciencia e Tecnologia, 2002. - Vols. Vol 12, nº 3.

**CANTWELL W. J. e MORTON J.** The Significance of Damage and Defects and Their Detection in composite materials: A review . - Lousanne : Journal of strain analysis, 1991. - Vol. 27.

**CHAMIS C. C. e SINCLAIR J. H.** Ten-deg Off-axis Test for Shear Properties in Fiber Composites. - 1977.

**CHIAVERINI VICENTE** Aços e Ferros Fundidos . - São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. - Vol. 7ª ed.ampl. e rev..

**CONANT N.R. e ODOM E.M.** A improved Iosipescu shear test Fixture . - 1995.

**COSTA M.L., ALMEIDA S. F.M. e REZENDE M. C.** Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de Compósitos com Resina Epóxi com Diferentes Arranjos das Fibras na Presença de Vazios Polimeros: Ciencia e Tecnologia. - São José dos Campos, 2001. - 4 : Vol. 11. - pp. 182-189.

**CUNHA J. A.P., COSTA M. L. e REZENDE M. C.** INFLUENCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS NA RESISTENCIA À TRAÇÃO DE COMPOSITOS DE FIBRA DE CARBONO/EPOXI . - São José dos Campos : Polimeros: ciencia e tecnologia, 2006. - Vol. 16.

Excel sensores . - Excel sensores. – Acesso em 20 de Janeiro de 2015. - <http://www.excelsensor.com.br>

**GUDE M.** Modified V-notched Rail Shear test fixture for shear characterisation of textile-reinforced composite materials . - Dresden : Polymer Testing, 2015. - Vol. 43. - pp. 147-153.

**HAWONG J.S., SHIN D.C. e BAEK U.C.** Validation of pure shear test device using finite element method and experimental methods Engineering Fracture Mechanics. - 2004. - pp. 233-243.

**HILL C.S. e OLIVERAS J.** EFFECTS OF SPECIMEN DIMENSION ON DISPLACEMENT FIELD IN V-NOTCH RAIL SHEAR TEST . - NASA, 2011.

<http://www.coppermetal.com.br>, Catálogo de produtos. - coppermetal, 2015. – Acesso em 22 de Agosto de 2014. - Apresenta os produtos distribuídos pela empresa.

**Hussain A.K. e Adams D.F.** An Analytical and Experimental Evaluation of the Two-Rail Shear Test for Composite Materials . - Wyoming : Materials Research Group Report UW-CMRG-R-98-1055, 1998.

**LIU J.Y.** Improved Arcan Shear Test for Wood . - Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1996.

**LIU J.Y.** Shear Test Fixture Design for Orthotropic Materials. Internacional Community for Composite Engineering - ICCE. - Denver , 2-8 de Julho de 2000.

**Liu Jen Y.** Effects of Shear Coupling on Shear Properties of Wood . - Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1999.

**MARIBONDO J. F.** Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares . - Florianópolis, Santa Catarina, 2000.

**MELIN N.** A Modified Iosipescu Shear Test for Orthotropic Material, Numerical and Experimental Investigation with Varying Notch-Opening Angle M. Sc. Thesis. Department of Solid Mechanics. - Stockholm : KTH, 2003.

**MELIN N.** A modified Iosipescu Test for Anisotropic Composite Panels Department of Solid Mechanics. - Stockholm : Royal Institute of Technology.

**MELIN N.** The modified Iosipescu shear test for orthotropic materials. - Estocolmo : Tese de Doutorado do Department of Solid Mechanics of Royal Institute of Technology, 2008.

**Melin Niklas** The modified Iosipescu Shear Test for Orthotropic Materials . - Stockhom : Department of Solid Mechanics of Royal Institute of Technology, 2008.

**MIHAI Petru** Structural Response of Composite Pultruded elements Subjected to Shear . - Iasi, 2013.

**MOROZOV E.V. e VASILIEV V.V.** Determination of the shear modulus of orthotropic materials from off-axis tension tests . - Durban : Composite Structures 62, 2003.

**NUNES L.C.S.** Modified Slotted shear test for a thin sheet of solid polymer under large deformations . - Niteroi : Elsevier Polymer Testing, 2015. - Vol. 45. - pp. 20-30.

**PIERROW F. e VAUTRIN A.** Accurate comparative determination of the in-plane shear modulus of T300/914 by the Iosipescu and 45° off-axis tests Composite Science Technology. - 1994. - Vol. 52. - pp. 61-72.

**PROVENZA Francesco** Desenhista de Máquinas . - São Paulo : F. PROVENZA, 1991.

racml . – Acesso em 22 de Maio de 2015. - www.racml.com.

**RAJU K. S., DANDAYUDHAPANI S. e THORBOLE C. K.** Characterization of In-Plane Shear Properties of Laminated Composites at Medium Strain Rates Journal of Aircraft. - Kansas, Abril de 2008. - Vol. 45. - DOI: 10.2514/1.30026.

**SANTOS José A.** Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira . - Guimarães : Universidade do Minho, 2007.

**SENEVIRATNE W., TOMBLIN J. e DAVIES C.** ALTERNATIVE METHOD FOR ADHESIVE CHARACTERIZATION . - Kansas.

**SHIGLEY J.E.** Elementos de máquinas 1 . - São Paulo, 1984. - 2ª.

**SOUSA E.B.** Resistencia ao Cisalhamento Iosipescu do Compósito Laminado Reforçado com tecido de Fibras de Vidro/Epoxi Dissertação de Mestrado. - Itajubá : Universidade de Itajubá, 2006.

**Souza E. B.** Resistencia ao Cisalhamento Iosipescu do Compósito Reforçado com Tecido de Fibras de Vidro/Epoxi . - Itajubá : Dissertação de Mestrado - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

**Souza Emerson Bonafé** Resistencia ao Cisalhamento Iosipescu do Compósito Laminado Reforçado com Tecido de Fibras de Vidro/Epoxi . - Itajubá, 2006.

**Spigel B. S., PRABHAKARAN R. e SAWYER J. W.** An Investigation of the Iosipescu and Asymmetrical Four-Point Bend Tests . - Las Vegas : SEM Spring Conference on Experimental Mechanics held, 1986.

**SUN Y. T.** ;Stress State Analysis of Iosipescu Shear Specimens for Aerogel Composite with Different Properties in Tension and Compression . - Changsha : Procedia Engineering, 2013. - 7th ARCATS 2013. - Vol. 67.

**TATIPALLI V.R.** ANALYTICAL MODIFICATION OF THE V-NOTCHED RAIL SHEAR APPARATUS FOR DYNAMIC TESTING . - India : Jawaharlal Nehru Technological University, Dissertação de Mestrado, 2008.

**Van Vlack Laurence Hall** PRINCÍPIO DE CIENCIA DOS MATERIAIS . - EDGARD BLÜCHER, 1970.

**VASILEV V. e MOROZOV E.** Mechanics and analysis of composite materials. - Oxford, UK : Elsevier, 2001.

**VINSON & SIERAKOWSKI** Behavior of structures composed of composite materials Martins Nijhoff, Inc. - Dordrecht, 1986.

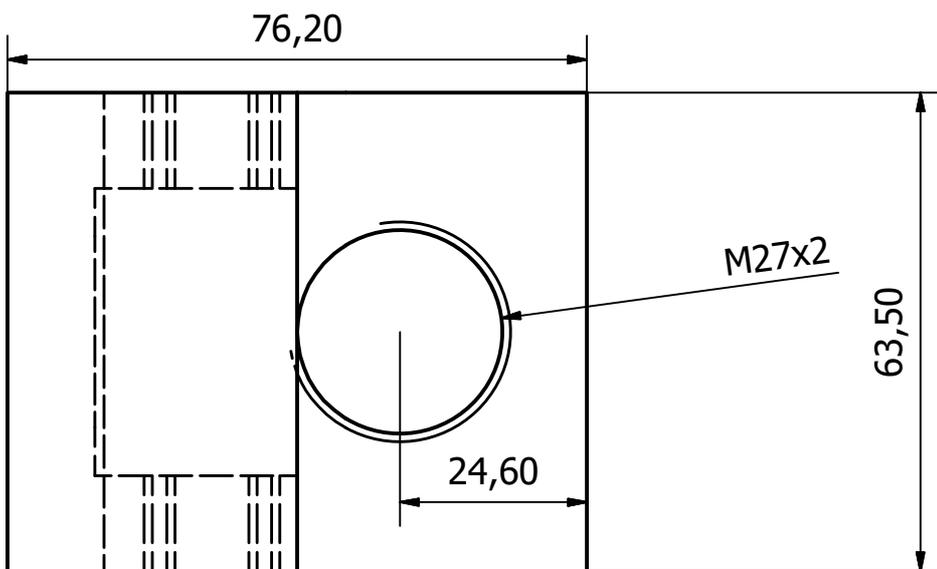
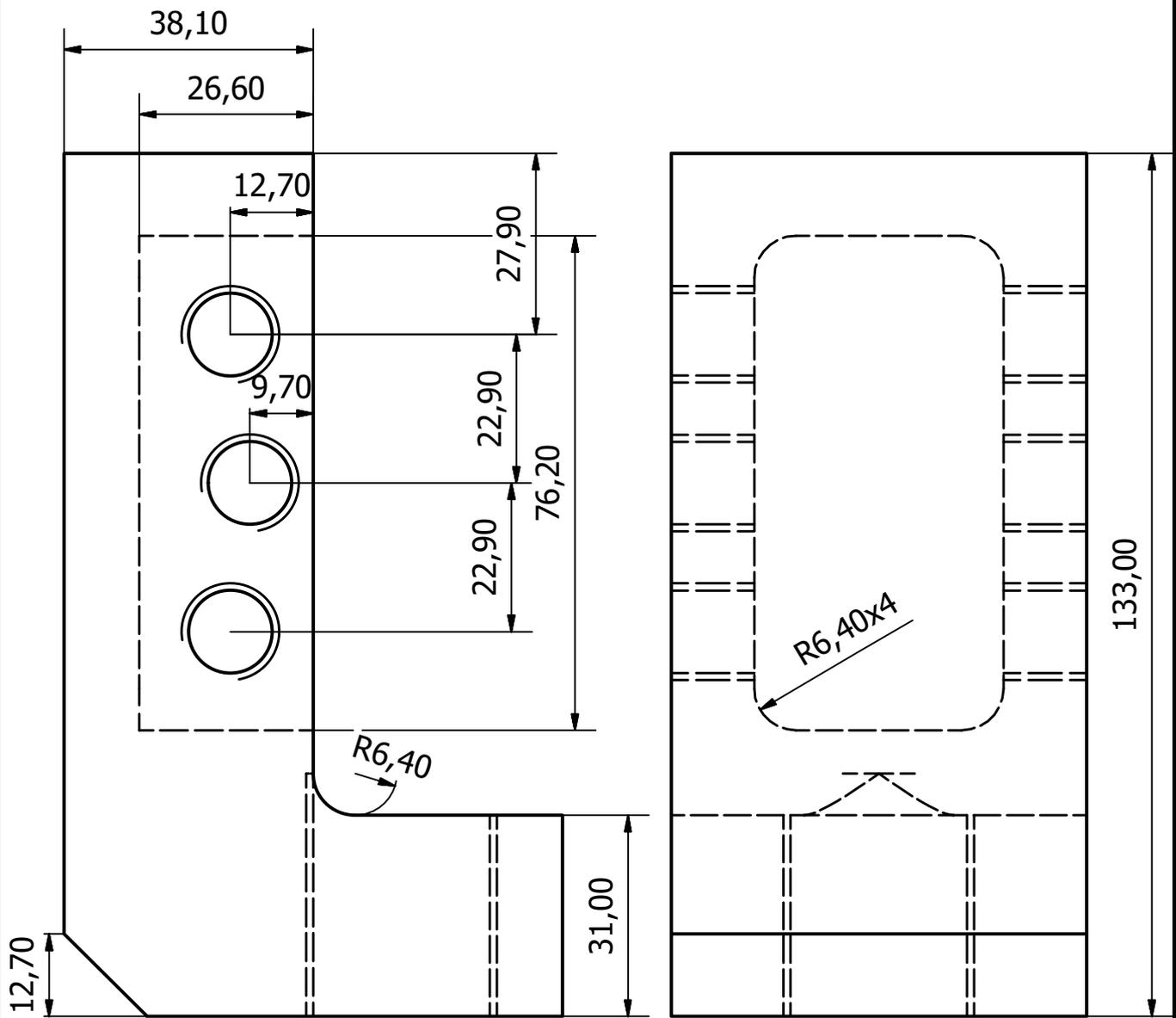
**WISNOM M.R., REYNOLDS T. e GWILLIAM N.** Reduction in Interlaminar Shear Strength by discrete and distributed Voids . - Bristol : Composite Science and Technology, 1996. - Vol. 56.

**XAVIER J.C.** ; A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait . - Vila Real : Elsevier, Composites: Part A, 2004.

**ZHU H. Y.;** Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy laminates . - Harbin : Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009. - Vol. 19.

## Anexo I

### Desenhos dos dispositivos



Material: AISI 4340



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Programa de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

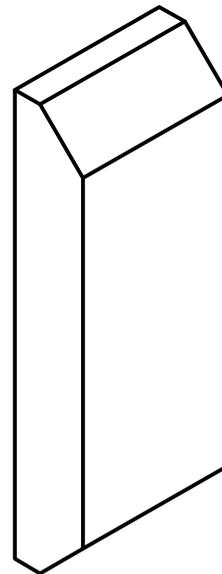
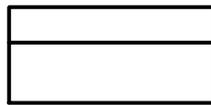
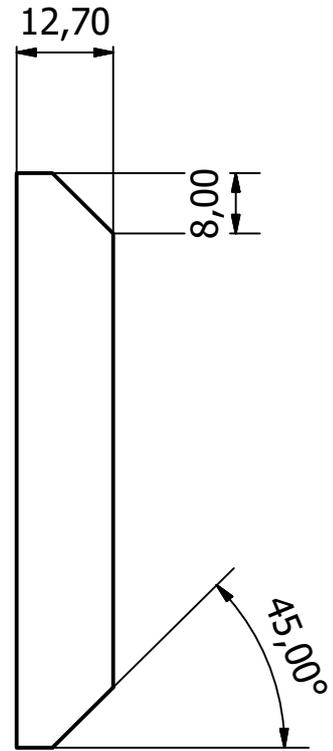
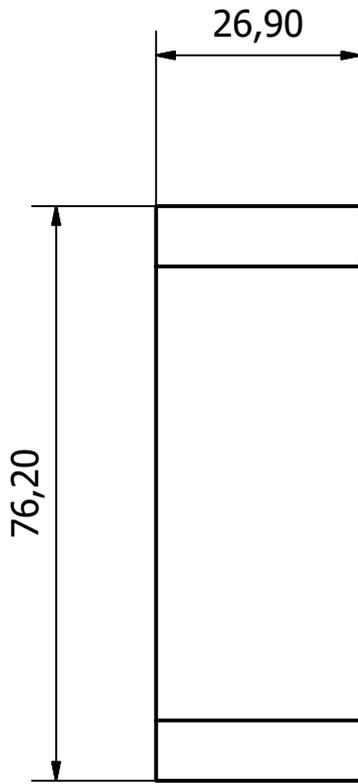
João Vitor Q. Marques

Garra V-Notched Rail Shear

Escala: 1:1

Dimensões em mm

Página: 1 / 2



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Programa de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM

João Vitor Q. Marques

Garra V-Notched Rail Shear

Escala: 1:1

Dimensões em mm

Página: 2 / 2