

**Faculdade de Tecnologia de São Paulo**

**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS**

**ESTUDO DETALHADO DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO  
TUBULAR CILÍNDRICO**

**VINÍCIUS CARVALHO MORAIS**

São Paulo - SP

2024

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

VINÍCIUS CARVALHO MORAIS

**ESTUDO DETALHADO DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO  
TUBULAR CILÍNDRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para a  
conclusão do curso Superior de Tecnologia  
em Microeletrônica da Faculdade de  
Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo - SP

2024

Dedico este trabalho à minha família e a todos amigos que conheci durante todo este período da minha graduação.

## *Agradecimentos*

Gostaria de iniciar os agradecimentos dedicando, primeiramente, aos membros de minha família, principalmente aos meus pais (Eliana Tenório Carvalho Morais e Edson Marques Morais) e as minhas irmãs (Bianca Carvalho Morais e Ágata Carvalho Morais), que apesar de não terem me auxiliado diretamente no desenvolvimento do meu TCC, foram fundamentais para me inspirar e motivar a seguir caminhando por uma ponte desafiadora. Agradeço por toda infraestrutura e apoio que recebi em todo o período da minha vida.

Agradeço ao professor Doutor Francisco Tadeu Degasperi por ter aberto as portas do Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV) para eu realizar o meu trabalho, pela orientação, recomendações e grande incentivo a continuar me empenhando cada vez mais ao trabalho.

Agradeço à professora Doutora Regina Maria Ricotta por ter auxiliado no entendimento da modelagem teórica do campo de pressão de um sistema tubular.

Agradeço aos meus caros colegas Henrique Chaves Gulino, Raphael de Carvalho Gonçalves e a todos os outros membros e ex-membros do Laboratório de Tecnologia em Materiais Fotônicos e Optoeletrônicos (LTMFO), por todos os momentos divertidos que tivemos durante todos estes dois anos pós pandemia e também pelo grande acolhimento.

Gostaria por último de agradecer a minha linda namorada Paulla Zaine Fidelis Lopes, por ter feito minha vida muito mais feliz, mesmo em momentos ruins, também pelo esforço em me estimular a permanecer no meu curso, mesmo quando pensei em largá-lo.

*Toda a conquista, todo o passo adiante no conhecimento é  
**consequência** da coragem, da dureza em relação a si mesmo*

*Friedrich Wilhelm Nietzsche (1844 - 1900)*

## LISTA DE EQUAÇÕES

Eq 2.1 .....	51
Eq 2.2 .....	52
Eq 2.3 .....	53
Eq 2.4 .....	55
Eq 2.5 .....	56
Eq 2.6 .....	56
Eq 2.7 .....	58
Eq 2.8 .....	59
Eq 2.9 .....	60
Eq 2.10 .....	60
Eq 2.11 .....	61
Eq 2.12 .....	62
Eq 2.13 .....	63
Eq 2.14 .....	63

<b>Eq 2.15</b> .....	<b>64</b>
<b>Eq 2.16</b> .....	<b>65</b>
<b>Eq 2.17</b> .....	<b>66</b>
<b>Eq 2.18</b> .....	<b>66</b>
<b>Eq 2.19</b> .....	<b>67</b>
<b>Eq 2.20</b> .....	<b>68</b>
<b>Eq 2.21</b> .....	<b>69</b>
<b>Eq 2.22</b> .....	<b>69</b>
<b>Eq 2.23</b> .....	<b>70</b>
<b>Eq 2.24</b> .....	<b>70</b>
<b>Eq 2.25</b> .....	<b>70</b>
<b>Eq 2.26</b> .....	<b>71</b>
<b>Eq 2.27</b> .....	<b>71</b>
<b>Eq 2.28</b> .....	<b>81</b>
<b>Eq 2.29</b> .....	<b>82</b>
<b>Eq 2.30</b> .....	<b>84</b>

<b>Eq 2.31</b> .....	<b>85</b>
<b>Eq 2.32</b> .....	<b>85</b>
<b>Eq 2.33</b> .....	<b>85</b>
<b>Eq 2.34</b> .....	<b>86</b>
<b>Eq 2.35</b> .....	<b>86</b>
<b>Eq 2.36</b> .....	<b>86</b>
<b>Eq 2.37</b> .....	<b>86</b>
<b>Eq 2.38</b> .....	<b>88</b>
<b>Eq 2.39</b> .....	<b>88</b>
<b>Eq 2.40</b> .....	<b>88</b>
<b>Eq 2.41</b> .....	<b>89</b>
<b>Eq 2.42</b> .....	<b>89</b>
<b>Eq 2.43</b> .....	<b>89</b>
<b>Eq 2.44</b> .....	<b>89</b>
<b>Eq 2.45</b> .....	<b>89</b>

<b>Eq 2.46</b> .....	<b>90</b>
<b>Eq 2.47</b> .....	<b>90</b>
<b>Eq 2.48</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.49</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.50</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.51</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.52</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.53</b> .....	<b>91</b>
<b>Eq 2.54</b> .....	<b>92</b>
<b>Eq 2.55</b> .....	<b>92</b>
<b>Eq 2.56</b> .....	<b>93</b>
<b>Eq 2.57</b> .....	<b>93</b>
<b>Eq 2.58</b> .....	<b>93</b>
<b>Eq 2.59</b> .....	<b>94</b>
<b>Eq 2.60</b> .....	<b>94</b>
<b>Eq 2.61</b> .....	<b>95</b>

<b>Eq 2.62</b> .....	<b>103</b>
<b>Eq 2.63</b> .....	<b>104</b>
<b>Eq 2.64</b> .....	<b>104</b>
<b>Eq 2.65</b> .....	<b>105</b>
<b>Eq 2.66</b> .....	<b>110</b>
<b>Eq 3.1</b> .....	<b>184</b>
<b>Eq 3.2</b> .....	<b>185</b>
<b>Eq 3.3</b> .....	<b>190</b>
<b>Eq 3.4</b> .....	<b>190</b>
<b>Eq 3.5</b> .....	<b>190</b>
<b>Eq 3.6</b> .....	<b>190</b>
<b>Eq 3.7</b> .....	<b>197</b>
<b>Eq 4.1</b> .....	<b>207</b>
<b>Eq 4.2</b> .....	<b>207</b>
<b>Eq 4.3</b> .....	<b>209</b>

<b>Eq 4.4</b> .....	<b>211</b>
<b>Eq 4.5</b> .....	<b>212</b>
<b>Eq 4.6</b> .....	<b>212</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Experiência de Torricelli (1608-1647) demonstrando que a altura da coluna de mercúrio dos tubos unilaterais não dependia da geometria e inclinação dos tubos. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 2: Demonstração do experimento de Magdeburgo. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 3: Grande Colisor de Hádrons (LHC) do CERN. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 4: Mapa da Organização Européia para Investigação Nuclear (CERN)...</b>	<b>46</b>
<b>Figura 5: Esquema de um sistema de vácuo simples. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 6: Trajetória de uma molécula entre sucessivas colisões com outras partículas de um mesmo gás. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 7 - Regimes de escoamento. (a) Regime viscoso turbulento; (b) Regime viscoso laminar; (c) Regime intermediário; (d) Regime molecular. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 8: Relação entre circuitos elétricos e sistemas de vácuo. ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 9: Sistema de vácuo com dois tubos em paralelo com suas respectivas condutâncias e throughput. ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 10: Sistema de vácuo com dois tubos em série com suas respectivas condutâncias. ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 11: Desenho esquemático de uma câmara de vácuo com as possíveis fontes de gases de vapores. ....</b>	<b>66</b>

<b>Figura 12: Permeação dos gases da atmosfera por meio das paredes do sistema de vácuo. ....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 13: Etapas da modelagem matemática de problemas físicos. ....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 14: Sistema de vácuo geral com as suas respectivas condições de contorno e inicial. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 15: Mecanismos de condução de calor para diferentes fases de uma determinada substância. ....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 16: Transferência de calor da superfície quente de um bloco para o ar por convecção. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 17: Transferência de calor por radiação entre uma superfície e superfícies vizinhas. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 18: Processo de transferência de calor por condução. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 19: Volume de controle diferencial para análise de condução em coordenadas cartesianas. ....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 20: Analogia entre transferência de calor e massa. ....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 21: Discretização de uma forma geométrica. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 22: Formas geométricas possíveis para elementos finitos. (a) unidimensional; (b) bidimensional; (c) tridimensional. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 23: Faixa de funcionamento dos diferentes tipos de medidores de vácuo. ....</b>	<b>101</b>

<b>Figura 24: Classificação dos medidores diretos e indiretos. ....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 25: (a) - Diafragma com bordas fixadas por forças perpendiculares; (b) - Diafragma deformado durante exposição a uma diferença de pressão sobre ele. ....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 26: Esquema simplificado de um medidor de membrana capacitiva. ....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 27: Circuito Wheatstone do medidor Pirani. ....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 28: Desenho esquemático do medidor Penning. ....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 29: Curva de calibração do medidor Penning demonstrando a descontinuidade da curva corrente de descarga x pressão. ....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 30: Representação de um medidor de catodo frio tipo magnetron invertido. 1 – Anodo; 2 – Catodo auxiliar; 3 – Coletor de íons; 4 – Amplificador de corrente de íons. ....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 31: Curva de calibração do medidor do tipo magnetron invertido. ....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 32: Medidor do tipo magnetron. 1 – Dois Cátodos paralelos; 2 – Dois eletrodos de proteção. ....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 33: Classificação dos diferentes tipos de bombas de vácuo. ....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 34: Componentes de uma bomba mecânica de palhetas. ....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 35: Etapas de bombeamento de uma bomba mecânica de palhetas. ....</b>	<b>118</b>

<b>Figura 36: Bomba mecânica de palhetas com válvula de deslocamento de gás. 1 - Conexão da entrada da câmara de bombeamento; 2 - Gás comprimido; 3 - Válvula de deslocamento de gás; 4 - Válvula de saída. ....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 37: Bomba mecânica de palhetas de duplo estágio. 1 – Válvula que impede vazamento de óleo no sistema de vácuo; 2 – Entrada; 3 – Conexão interna entre primeiro e segundo estágios; 4 – Porta de saída; 5 – Válvula de descarga de gás; 6 – Válvula de lastro de gás; 7 – Invólucro da bomba; 8 – motor elétrico; 9 – Rotor do segundo estágio; 10 – Palhetas; 11 – Rotor do primeiro estágio. ....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 38: Curvas de velocidade de bombeamento de bombas de um e dois estágios. ....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 39: Configuração de uma bomba molecular tipo drag. ....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 40: Velocidade de bombeamento de uma Bomba Turbo Drag. ....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 41: Exemplo de modelamento por wireframe. ....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 42: Exemplo de modelamento de superfície. ....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 43: Exemplo de modelo sólido. ....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 44: Exemplo de uma extrusão. ....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 45: Exemplo de revolução. ....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 46: Exemplo de transição. ....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 47: Exemplo de varredura. ....</b>	<b>135</b>

<b>Figura 48: Etapas de construção do protótipo. ....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 49: Tubo 4 com uma das suas extremidades soldadas com uma conexão ISO KF 16.....</b>	<b>140</b>
<b>Figura 50: Bomba Turbo-Drag MDP 5011 (PDF 1.01) conectada ao adaptador de ISO K 63 para KF 16 (PDL 1.8).....</b>	<b>141</b>
<b>Figura 51: Impressão 3D do suporte da bomba turbo-drag.....</b>	<b>142</b>
<b>Figura 52: Sistema tubular de alto-vácuo. ....</b>	<b>143</b>
<b>Figura 53: Ambientes do Autodesk Inventor. a- Ambiente para modelagem de objetos 2D e 3D; b- Ambiente para montagem de objetos 2D e 3D; c - Ambiente para desenho de detalhamento; d- Ambiente para projeção explodida de uma montagem. ....</b>	<b>145</b>
<b>Figura 54: Criação do esboço (sketch) 2D. 1 - Ícone para habilitar ferramentas de esboço 2D; 2- Escolha do plano. ....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 55: Ferramentas de esboço 2D. 1- Padrões de repetição no plano do esboço; 2- Ferramentas de criação de geometrias; 3- Ferramentas de modificação de geometrias; 4- Restrições do desenho; 5- Exportação de arquivos para o plano; 6- Formato da linha; 7- Finalização do esboço. ....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 56: Ferramentas para formas 3D. 1- Criação de geometrias primitivas; 2- Ferramentas de criação de geometrais 3D; 3- Ferramentas de modificação de geometrias 3D; 4- Padrões de repetição em geometrias 3D. ....</b>	<b>147</b>
<b>Figura 57: Transformação de uma geometria 2D em um modelo 3D. ....</b>	<b>147</b>

<b>Figura 58: Ambiente de montagem do software Autodesk Inventor. ....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 59: Opções para inserir arquivos CAD no arquivo .iam. a- Inserir arquivo CAD da biblioteca local do computador; b - Inserir arquivos da biblioteca do software Autodesk Inventor; c- Importar arquivo de peça em outro formato CAD; d- Inserir componente do iLogic. ....</b>	<b>149</b>
<b>Figura 60: Seleção de peças para inserir no ambiente de montagem. ....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 61: Componente inserido no ambiente de montagem. ....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 62: Seleção de peças da biblioteca interna do software Autodesk Inventor para inserir no ambiente de montagem. ....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 63 - Componente da biblioteca interna do software inserida na bancada do sistema de vácuo.....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 64: Ícones das ferramentas de restrição. ....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 65: Peças restringidas entre si. ....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 66: Ícones das ferramentas de padrão de repetição na montagem.....</b>	<b>155</b>
<b>Figura 67: Desenho de conjunto com diversas peças acopladas.....</b>	<b>156</b>
<b>Figura 68: Projeções de um desenho técnico. a- Vista em perspectiva; b- Vistas ortográficas.....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 69: Ambiente de desenho de detalhamento do Autodesk Inventor. ....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 70: Ícone para importar arquivos CAD para o ambiente de desenho. ....</b>	<b>158</b>

<b>Figura 71: Janela da Vista do desenho. 1 - Ícone de busca de arquivo; 2 - Estilo de apresentação do desenho; 3- Escala de medida do desenho. ....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 72: Seleção do arquivo. ....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 73: Inserção vistas do item no ambiente de desenho técnico. ....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 74: Ferramentas de anotação no ambiente de desenho. 1- Guia para selecionar ferramentas de anotação; 2- Adicionar ou editar cotas; 3- Adicionar ou editar texto; 4- Ícones para Inserção de linha de centro; 5- Inserir ou editar tabela peças (para montagem); 6- Balão de referência para ordem da montagem. ....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 75: Inserção das cotas e textos no desenho técnico do objeto selecionado. ....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 76: Desenho técnico do item selecionado finalizado. ....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 77: Pissetas com os produtos químicos utilizados no projeto. a- Detergente alcalino; b- Detergente neutro; c- Álcool etílico. ....</b>	<b>164</b>
<b>Figura 78: Identificação da presença de possíveis vias para vazamento real. ....</b>	<b>165</b>
<b>Figura 79: Polimento de uma conexão do sistema. ....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 80: Escova helicoidal. ....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 81: Etapas utilizadas para limpeza dos componentes do sistema tubular. ....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 82: Câmara de ultrassom utilizada para a limpeza ultrassônica das peças. ....</b>	<b>168</b>
<b>Figura 83: Processo de limpeza da cuba ultrassônica. ....</b>	<b>169</b>

<b>Figura 84: Limpeza dos componentes com álcool isopropílico. ....</b>	<b>170</b>
<b>Figura 85: Embalagem do componente do sistema de vácuo. ....</b>	<b>170</b>
<b>Figura 86: Sistema tubular. ....</b>	<b>172</b>
<b>Figura 87: Carrinho para transporte de cargas. ....</b>	<b>173</b>
<b>Figura 88: Fixação da mesa aos carrinhos utilizando grampos. ....</b>	<b>174</b>
<b>Figura 89: Pontos de fixação entre as tábuas de madeira e o carrinho. ....</b>	<b>175</b>
<b>Figura 90: Processo seguido para realização dos furos na mesa. ....</b>	<b>175</b>
<b>Figura 91: Suporte da turbo-drag servindo como guia para posicionamento um suporte do tubo. ....</b>	<b>176</b>
<b>Figura 92: Furo com folga para alinhamento manual em cada um dos suportes do sistema tubular. ....</b>	<b>177</b>
<b>Figura 93: Arranjos utilizados para obtenções das pressão de referência e taxas de degaseificação de cada um dos tubos. a - pressão de referência; b- tubos 1 e 2; c- tubo 3; d- tubo 4. ....</b>	<b>178</b>
<b>Figura 94: Sistema de pré-vácuo. A – bomba mecânica TRIVAC D8A; B – válvula de membrana; C – Filtro de ar; D – adaptador de KF 25 para KF 16; E – fole metálico; F – filtro de evacuação. ....</b>	<b>179</b>
<b>Figura 95: Bomba turbodrag utilizada no sistema tubular. ....</b>	<b>180</b>

<b>Figura 96: Arranjo de identificação de possíveis vazamentos reais nos tubos do sistema tubular. ....</b>	<b>182</b>
<b>Figura 97: Medição da pressão de referência na conexão <math>T_1</math>. ....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 98: Medições da pressão no ponto de referência de cada um dos tubos do sistema tubular. a- tubo 1; b- tubo 2; c- tubo 3; d- tubo 4. ....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 99: Medida do comprimento dos tubos utilizada na Eq 3.1. ....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 100: Arranjo para conferir a proximidade de medição da pressão entre os dois medidores Penning disponibilizados pelo laboratório. ....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 101: Diferentes formas de montagem do sistema tubular utilizadas neste trabalho. a- Arranjo 1; b- Arranjo 2; c- Arranjo 3. ....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 102: Obtenção do ponto experimental em um dos arranjos do sistema tubular. ....</b>	<b>188</b>
<b>Figura 103: Termopar fixado ao tubo com um suporte para medição da temperatura do tubo. ....</b>	<b>189</b>
<b>Figura 104: Sistema tubular com taxa de desgaseificação constante, temperatura ambiente e preenchida por gás nitrogênio (<math>N_2</math>). ....</b>	<b>190</b>
<b>Figura 105: Definição da malha gráfica no software matlab. ....</b>	<b>191</b>
<b>Figura 106: Seleção do ambiente de modelagem. ....</b>	<b>192</b>
<b>Figura 107: Seleção do ambiente estacionário. ....</b>	<b>193</b>

<b>Figura 108: Ferramentas de modelagem. a- Definições globais; b- Componente; c- condições de contorno; d- Definição da malha; e- Solucionador estacionário; f- resultado da modelagem.....</b>	<b>194</b>
<b>Figura 109: Definição da geometria do sistema tubular. a- Configurações da geometria; b- geometrias primitivas. ....</b>	<b>195</b>
<b>Figura 110: Definição da geometria do cilindro. ....</b>	<b>196</b>
<b>Figura 111: Geometria do sistema tubular definida. ....</b>	<b>196</b>
<b>Figura 112: Definição das condições de contorno. a- definição da massa molecular do gás; b- Temperatura superficial do sistema; c- taxa de desgaseificação específica do sistema; d- definição da velocidade de bombeamento.....</b>	<b>197</b>
<b>Figura 113: Definição da malha. a- configuração da malha; b- malha gráfica. ...</b>	<b>198</b>
<b>Figura 114: Cálculo da pressão do sistema tubular. a- seleção do solucionador; b- campo de pressão resultante. ....</b>	<b>198</b>
<b>Figura 115: Seleção do gráfico unidimensional. ....</b>	<b>199</b>
<b>Figura 116: Configuração dos eixos do gráfico.....</b>	<b>199</b>
<b>Figura 117: Configuração do gráfico linear para o sistema tubular. ....</b>	<b>200</b>
<b>Figura 118: Adição da seção transversal do sistema tubular. a- selecionando a ferramenta "Create Shaope"; b- criando a seção transversal circular; c- geometria inserida no ambiente de simulação. ....</b>	<b>201</b>
<b>Figura 119: Extrusão da seção transversal. a- Seleção da ferramenta "Extrude"; b- configurando a extrusão do tubo; c- geometria do sistema tubular definida..</b>	<b>202</b>

<b>Figura 120: Definição das condições de contorno. a- Seleção das facetas de "entrada" das partículas teste; b- definição da taxa de desgaseificação; c- seleção da faceta onde é posicionada a bomba de alto-vácuo; d- definição da velocidade de bombeamento. ....</b>	<b>203</b>
<b>Figura 121: Ferramentas de plotagem. a- escala de textura linear; b- escala de textura logarítmica; c- gráfico linear; d- gráfico logarítmico. ....</b>	<b>203</b>
<b>Figura 122: Valores de pressão obtidos durante o primeiro teste de vazamento no tubo1. a - medição no ponto de referência; b- medição na extremidade do tubo. ....</b>	<b>205</b>
<b>Figura 123: Medida experimental da pressão final no ponto de referência durante o segundo teste de vazamento real nos tubos do sistema tubular. ....</b>	<b>206</b>
<b>Figura 124: Taxa de desgaseificação de materiais em função do tempo. ....</b>	<b>208</b>
<b>Figura 125: Campo de pressão obtido de forma analítica. a- gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica.....</b>	<b>210</b>
<b>Figura 126: Campo de pressão obtido a partir da simulação no software molflow. a- gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica. ....</b>	<b>211</b>
<b>Figura 127: Campo de pressão obtido a partir da simulação no software Comsol. a- gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica. ....</b>	<b>211</b>
<b>Figura 128: Gráfico dos pontos experimentais obtidos no laboratório de tecnologia do vácuo juntamente com a linha de tendência. a – gráfico com escala linear; b – gráfico com escala logra .....</b>	<b>213</b>

<b>Figura 129: Gráfico comparacional com os valores obtidos de forma analítica, numérica e experimental. a - gráfico com escala linear; b - gráfico com escala logarítmica. ....</b>	<b>214</b>
<b>Figura 130: Descrição dos componentes de uma bomba turbo drag MDP 5011..</b>	<b>222</b>
<b>Figura 131: Curva característica de velocidade de bombeamento da bomba MDP 5011. ....</b>	<b>222</b>
<b>Figura 132: Curva característica de velocidade de bombeamento da bomba MDP 5011. ....</b>	<b>223</b>
<b>Figura 133: Especificações técnicas da bomba MDP 5011. ....</b>	<b>223</b>
<b>Figura 134: Curva de funcionamento do medidor APG-MP-NW16. ....</b>	<b>224</b>
<b>Figura 135: Cotas de medida do medidor APG-MP-NW16. ....</b>	<b>224</b>
<b>Figura 136: Especificações técnicas do medidor APG-MP-NW16. ....</b>	<b>225</b>
<b>Figura 137: Componentes do Medidor AIM-S-NW25. 1 – Extremidade; 2 – Flange ISO KF 16; 3 – Tubo; 4 – Invólucro magnético; 5 – Conector do cabo; 6 – Entrada do conector do medidor AIM. ....</b>	<b>226</b>
<b>Figura 138: Dimensões do medidor AIM-S-NW 25. ....</b>	<b>226</b>
<b>Figura 139: Vista explodida do medidor AIM. 1 – Invólucro magnético; 2 – Colar; 3 – Anodo do conjunto; 4 – O’ring; 5 – Tubo; 6 – Placa catódica; 7 – Tubo catódico; 8 – Anel de segurança. ....</b>	<b>227</b>
<b>Figura 140: Curva de funcionamento do medidor AIM-S-NW 25. ....</b>	<b>227</b>

<b>Figura 141: Especificações técnicas do medidor AIM-S-NW 25.....</b>	<b>228</b>
<b>Figura 142: Vista de corte do medidor CP25-S. 1- plano magnético; 2- Ímãs; 3- Mola; 4- Inserção radioativa; 5- O'ring; 6- Porca de plástico; 7- Tampa de aterramento; 8- Montagem principal; 9- Conector; 10- Montagem do anodo; 11- Placa de catodo; 12- Capa moldada; 13- Arruela estrela; 14- Sonda S/S; 15- Acoplamento de protetor; 16- Tubo do corpo; 17- Parafusos de retenção. ....</b>	<b>229</b>
<b>Figura 143: Curva de funcionamento do medidor CP25-S. ....</b>	<b>230</b>
<b>Figura 144: Especificações técnicas do medidor CP25-S. ....</b>	<b>231</b>
<b>Figura 145: Especificações técnicas do medidor CMX0. ....</b>	<b>232</b>
<b>Figura 146: Dimensões do medidor CMX0. ....</b>	<b>233</b>
<b>Figura 147: Peça PSTA 1.01 - Tubo 500 mm. ....</b>	<b>235</b>
<b>Figura 148: Peça PSTA 1.02 – Tubo 980 mm. ....</b>	<b>236</b>
<b>Figura 149: Peça PSTA 1.03 – Tubo 1200 mm. ....</b>	<b>237</b>
<b>Figura 150: Peça PSTA 1.04 - Conexão KF 16 para os tubos.....</b>	<b>238</b>
<b>Figura 151: Peça PSTA 1.05 - Base do suporte para os tubos. ....</b>	<b>239</b>
<b>Figura 152: PSTA 1.06 - Encaixe do suporte dos tubos. ....</b>	<b>240</b>
<b>Figura 153: Peça PSTA 1.07 - Base do suporte da bomba turbo-drag MDP 5011. ....</b>	<b>241</b>

<b>Figura 154: Peça PSTA 1.08 - Encaixe do suporte da bomba turbo-drag MDP 5011. ....</b>	<b>242</b>
<b>Figura 155: Peça 1.09 - Suporte do termopar. ....</b>	<b>243</b>
<b>Figura 156: Peça 1.10 - Sinalizador.....</b>	<b>244</b>
<b>Figura 157: Peça PSTA 1.11 - Tábua de madeira.....</b>	<b>245</b>
<b>Figura 158: Montagem PSTA 1.12 - Tubo 520 mm montado.....</b>	<b>246</b>
<b>Figura 159: Montagem PSTA 1.13 - Tubo 1000 mm montado.....</b>	<b>247</b>
<b>Figura 160: Montagem PSTA 1.14 - Tubo 1220 mm montado.....</b>	<b>248</b>
<b>Figura 161: Montagem PSTA 1.15 - Suporte dos tubos montado.....</b>	<b>249</b>
<b>Figura 162: Montagem PSTA 1.16 - Suporte da bomba turbo-drag MDP 5011 montado. ....</b>	<b>250</b>
<b>Figura 163: Montagem 1.17 - Bancada montada.....</b>	<b>251</b>
<b>Figura 164: Montagem 1.18 – Arranjo 1. ....</b>	<b>252</b>
<b>Figura 165: Montagem 1.19 – Arranjo 2. ....</b>	<b>253</b>
<b>Figura 166: Montagem 1.20 – Arranjo 3. ....</b>	<b>254</b>
<b>Figura 167: Montagem 1.21 – Arranjo 4. ....</b>	<b>255</b>

<b>Figura 168: Montagem PSTA 1.22 - Sistema tubular montado. ....</b>	<b>256</b>
<b>Figura 169: Resumo apresentado no XXIV Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT 2022). ....</b>	<b>258</b>
<b>Figura 170: Resumo apresentado no XXV Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT 2023). ....</b>	<b>259</b>
<b>Figura 171: Resumo apresentado no XLIV Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e Ciência (CBrAVIC 2023). ....</b>	<b>260</b>
<b>Figura 172: Resumo apresentado no XLIV Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e Ciência (CBrAVIC 2023). ....</b>	<b>261</b>
<b>Figura 173: Resumo apresentado no V Simpósio de Iniciação Científica Tecnológica CPS/CPS.....</b>	<b>262</b>
<b>Figura 174: Resumo apresentado no V Simpósio de Iniciação Científica Tecnológica CPS/CPS.....</b>	<b>263</b>
<b>Figura 175: Resumo apresentado no Encontro de Outono 2024 da SBF. ....</b>	<b>264</b>
<b>Figura 176: Solicitação da patente MOVIMENTADOR MAGNÉTICO COM CONSTRUÇÃO EM IMPRESSORA 3D.....</b>	<b>266</b>
<b>Figura 177: Solicitação da patente DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE LÂMPADAS ESPECIAIS.....</b>	<b>267</b>
<b>Figura 178: Gráfico analítico, numérico e experimental do sistema tubular. ....</b>	<b>269</b>
<b>Figura 179: Arranjo para obtenção da taxa de degaseificação do tubo 1.....</b>	<b>271</b>

<b>Figura 180: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 2.....</b>	<b>272</b>
<b>Figura 181: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 3.....</b>	<b>273</b>
<b>Figura 182: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 4.....</b>	<b>274</b>
<b>Figura 183: Arranjo 1 do sistema tubular.....</b>	<b>277</b>
<b>Figura 184: Arranjo 2 do sistema tubular.....</b>	<b>277</b>
<b>Figura 185: Arranjo 3 do sistema tubular.....</b>	<b>277</b>
<b>Figura 186: Arranjo 4 do sistema tubular.....</b>	<b>277</b>
<b>Figura 187: Arranjo 5 do sistema tubular.....</b>	<b>278</b>
<b>Figura 188: Arranjo 6 do sistema tubular.....</b>	<b>278</b>
<b>Figura 189: Medidas das cavidades ressonantes do sistema tubular. ....</b>	<b>278</b>
<b>Figura 190: Arranjo 1 do sistema com cavidades ressonantes. ....</b>	<b>278</b>
<b>Figura 191: Campo de pressão obtido do arranjo 1. ....</b>	<b>279</b>
<b>Figura 192: Arranjo 2 do sistema com cavidades ressonantes. ....</b>	<b>279</b>
<b>Figura 193: Campo de pressão obtido do arranjo 2. ....</b>	<b>279</b>
<b>Figura 194: Arranjo 3 do sistema com cavidades ressonantes. ....</b>	<b>279</b>

<b>Figura 195: Campo de pressão obtido do arranjo 3. ....</b>	<b>280</b>
<b>Figura 196: Arranjo 4 do sistema com cavidades ressonantes. ....</b>	<b>280</b>
<b>Figura 197: Campo de pressão obtido do arranjo 4. ....</b>	<b>280</b>
<b>Figura 198: Arranjo 5 do sistema com cavidades ressonantes. ....</b>	<b>281</b>
<b>Figura 199: Campo de pressão obtido do arranjo 5. ....</b>	<b>281</b>
<b>Figura 200: Gráfico comparativo. ....</b>	<b>281</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Principais eventos históricos que marcaram o desenvolvimento da tecnologia do vácuo. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 2: Regimes de escoamento de gases. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 3: Cálculos de condutâncias para os regimes de escoamento, sobre uma atmosfera de nitrogênio em temperatura de 20°C (293K).....</b>	<b>62</b>
<b>Tabela 4: Lista de peças utilizadas para montar o sistema de vácuo do Projeto de um Sistema Tubular de Alto Vácuo (PSTA). ....</b>	<b>138</b>
<b>Tabela 5: Código de cores das pissetas. ....</b>	<b>164</b>
<b>Tabela 6: Etapas de montagem do Projeto do Movimentador Magnético em Vácuo. ....</b>	<b>172</b>
<b>Tabela 7: Variação no comprimento de cada tubo antes e depois do retrabalho.</b>	<b>182</b>
<b>Tabela 8: Medidas das conexões T do sistema tubular. ....</b>	<b>187</b>
<b>Tabela 9: Medidas dos tubos do sistema tubular.....</b>	<b>187</b>
<b>Tabela 10: Taxas de degaseificação para cada um dos tubos do sistema tubular. ....</b>	<b>207</b>
<b>Tabela 11: Dados experimentais obtidos a partir do medidor CP-25-S e dos termopares fixados aos tubos do sistema tubular. ....</b>	<b>212</b>

**Tabela 12: Especificações técnicas da bomba mecânica de palhetas TRIVAC D8 B.**  
..... 221

## RESUMO

Existem diversos processos encontrados tanto na indústria quanto na ciência onde é necessário e, em muitos casos, só é possível realizá-los em uma atmosfera com baixíssima concentração de partículas ou moléculas contaminantes ou residuais presentes em um ambiente. Por este motivo são projetados equipamentos e dispositivos que são capazes de reduzir a concentração de gases a um nível desejável para uma certa aplicação. Estes sistemas são comumente chamados de sistemas de vácuo e são, em princípio, compostos por bombas de vácuo, linha de bombeamento e uma câmara de vácuo, podendo possuir diferentes tamanhos e formas geométricas.

Em certas aplicações é necessário operar em alto-vácuo, que é uma faixa de pressão que atua entre  $10^{-3}$  mbar até  $10^{-7}$  mbar e é caracterizado pelas partículas presentes na câmara colidirem mais entre as paredes do que entre elas (algo que diminui ainda mais quanto menor for a pressão). Este é um regime escoamento conhecido particularmente como regime molecular, tendo duas principais características importantes para a modelagem analítica e numérica que é de as partículas terem propagações completamente aleatórias e de se comportar como um fenômeno difusivo. Desta forma, é possível realizar soluções, no ponto de vista da modelagem contínua, utilizando as ferramentas equação de difusão (analítica ou numérica), podendo resolver como um fenômeno de transporte de calor por difusão, Monte-Carlo (numérica) e coleta do valor de pressão com medidores (experimental).

Este trabalho teve como objetivo modelar um sistema de alto-vácuo de geometria tubular cilíndrica, que é uma forma muito comum utilizada tanto na indústria como na ciência, utilizando métodos analítico, numérico e experimental, tendo como resultado um campo de pressão de forma parabólica, onde é possível verificar o gradiente formado que representa o sentido em que as partículas e moléculas do sistema escoam.

**Palavras-chave:** Sistema Tubular, Alto-vácuo, Campo de Pressão.

## ABSTRACT

There are various processes found both in industry and science where it is necessary, and in many cases only possible, to carry them out in an atmosphere with a very low concentration of contaminant or residual particles or molecules present in an environment. For this reason, equipment and devices are designed to reduce the concentration of gases to a desirable level for a certain application. These systems are commonly called vacuum systems and are, in principle, composed of vacuum pumps, pumping lines, and a vacuum chamber, and can have different sizes and geometric shapes.

In certain applications, it is necessary to operate in high vacuum, which ranges from  $10^{-3}$  mbar to  $10^{-7}$  mbar and is characterized by particles in the chamber colliding more with the walls than with each other (something that decreases even more as the pressure decreases). This is a flow regime particularly known as the molecular regime, having two main important characteristics for analytical and numerical modeling: the particles propagate completely randomly and behave as a diffusive phenomenon. In this way, it is possible to use continuous modeling solutions and employ diffusion equation tools (analytical or numerical), solving it as a heat transport phenomenon by diffusion, Monte Carlo (numerical).

This work aimed to model a high-vacuum system with cylindrical tubular geometry, a very common shape used in both industry and science, using analytical, numerical, and experimental methods. The result was a parabolic pressure field, where it is possible to verify the gradient formed that represents the direction in which the particles and molecules in the system flow.

**Keywords:** Pipe System, High Vacuum, Pressure Profile.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	3
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>1.1 Contexto histórico .....</b>	<b>38</b>
<b>1.2 Sistema tubular .....</b>	<b>46</b>
<b>2. REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>47</b>
<b>2.1 Tecnologia do vácuo.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1.1 Teoria cinética dos gases .....</b>	<b>49</b>
<b>2.1.2 Livre caminho médio .....</b>	<b>52</b>
<b>2.1.3 Regimes de escoamento .....</b>	<b>54</b>
<b>2.1.4 Condutância .....</b>	<b>57</b>
<b>2.1.5 Taxa de transferência de gás (<i>throughput</i>) .....</b>	<b>63</b>
<b>2.1.6 Fontes de Gases e Vapores em um Sistema de Vácuo .....</b>	<b>64</b>
<b>2.1.7 Modelagem contínua de sistemas de vácuo .....</b>	<b>74</b>

2.1.6.1	Equação de difusão .....	77
2.1.6.1.1	Lei de Fick .....	86
2.1.6.2	Monte Carlo .....	92
2.1.6.3	Método dos elementos finitos .....	95
2.1.8	Limpeza de componentes para vácuo .....	97
2.1.7.1	Limpeza Ultrassônica .....	99
2.1.9	Medidores de vácuo .....	100
2.1.6.1	Medidor de Membrana Capacitiva .....	102
2.1.6.2	Medidor de Condução Térmica .....	106
2.1.6.3	Medidor de Catodo Frio .....	108
2.1.10	Bombas de Vácuo.....	114
3.1.7.1	Bomba Mecânica de Palhetas .....	116
3.1.7.2	Bomba Turbo-Drag .....	121
2.2	Projetos Mecânicos .....	124

2.2.1	Aço Inoxidável AISI 304-L .....	126
2.2.2	Software CAD, Autodesk Inventor .....	128
2.2.3	Alumínio 5052 .....	135
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	136
3.1	Elaboração do projeto .....	136
3.1.1	Seleção dos Materiais .....	137
3.1.2	Desenho do projeto em software CAD.....	143
3.2	Arranjo experimental .....	162
3.2.1	Limpeza dos componentes .....	163
3.2.2	Montagem do sistema tubular .....	171
3.2.2.1	Montagem da bancada experimental .....	173
3.2.2.2	Arranjo para obtenção da taxa de degaseificação dos tubos.....	177
3.2.2.3	Montagem do sistema tubular .....	185
3.2.3	Modelagem analítica.....	189

3.2.4	Simulação computacional .....	191
3.2.4.1	COMSOL MULTIPHYSICS.....	191
3.2.4.2	Molflow .....	200
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	204
4.1	Teste de vazamento real .....	204
4.2	Taxa de degaseificação dos tubos .....	206
4.3	Campo de pressão .....	208
5.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	215
	ANEXO 1: DETALHES DA BOMBA <i>TRIVAC D8-A</i> .....	221
	ANEXO 2: DETALHES DA BOMBA <i>TURBO-DRAG MDP 5011 DN ISO K 63</i> .....	222
	ANEXO 3: DETALHES SOBRE O MEDIDOR <i>APG-MP-NW16 (PIRANI)</i> .....	224
	ANEXO 4: DETALHES SOBRE O MEDIDOR <i>AIM-S-NW 25 (PENNING)</i> .....	226
	ANEXO 5: DETALHES SOBRE O MEDIDOR <i>CP25-S (PENNING)</i> .....	229
	ANEXO 6: DETALHES SOBRE O MEDIDOR <i>CMX0</i> .....	232

<b>APÊNDICE 1: Desenhos técnicos do Projeto do Sistema Tubular .....</b>	<b>234</b>
<b>APÊNDICE 2: Trabalhos apresentados durante a graduação.....</b>	<b>257</b>
<b>APÊNDICE 3: Patentes submetidas durante o período de graduação.....</b>	<b>265</b>
<b>APÊNDICE 4: CÓDIGO MATLAB UTILIZADO PARA PLOTAR OS GRÁFICOS ANALÍTICO, NUMÉRICO, EXPERIMENTAL.....</b>	<b>268</b>
<b>APÊNDICE 5: DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULOS UTILIZADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA TUBULAR DE ALTO-VÁCUO.....</b>	<b>270</b>
<b>APÊNDICE 6: PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>277</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de vácuo constituem um conjunto de componentes que têm a finalidade de aprimorar os processos de fabricação, mesmo que sua presença não seja crucial para o funcionamento. Eles são capazes de realizar tarefas viáveis somente em condições de pressão inferior à atmosfera (cerca de 1013,25 mbar). Além disso, podem ser adaptados para operar em pressões atmosféricas ou superiores, incluindo altas pressões. Em contextos de aplicação desse tipo, o sistema de vácuo é empregado para retirar os gases de um determinado volume, possibilitando a posterior injeção de gases ou vapores <sup>[1]</sup>.

## 1.1 Contexto histórico

O termo “vácuo” vem sendo discutido desde a idade antiga, ainda na época de Aristóteles, definiam como uma região vazia, considerando, esta, uma impossibilidade lógica. Por muito tempo este significado foi bem aceito por boa parte da sociedade. Até que, no século XVII, Evangelista Torricelli, com sua experiência, observou que um tubo de vidro com mercúrio e seu orifício submerso em um recipiente cheio de mercúrio no nível do mar a coluna de mercúrio formada era de cerca de 76 cm, onde um orifício era tampado e o outro aberto para permitir a entrada de mercúrio no tubo, a Figura 1 mostra uma ilustração representativa que demonstra que a altura do mercúrio não depende da geometria do tubo. Este evento marcou além da descoberta de uma região “vazia”, também marca como sendo o primeiro medidor de vácuo da história, além de demonstrar que o ar atmosférico exerce uma pressão que, devido ao desenvolvimento desta tecnologia, é mensurável por meio da altura da coluna de mercúrio <sup>[2]</sup>. Com o desenvolvimento científico ao decorrer da história, atualmente é conhecido de que a região acima da coluna de mercúrio é preenchida pelo vapor de mercúrio, tendo, esta região, a pressão de vapor de mercúrio <sup>[1]</sup>. Foi com os estudos de Blaise Pascal que foi

possível demonstrar que a natureza não teme o vácuo, tornando a ideia grega uma forma equivocada de entender os fenômenos relacionados à gases rarefeitos. Com o barômetro de mercúrio (coluna de mercúrio), Pascal conseguiu demonstrar que era possível medir a altitude, contribuindo para muitas descobertas na área. A unidade de medida de pressão, segundo o SI, é o pascal (Pa), que é em homenagem à Blaise Pascal [3].

Figura 1: Experiência de Torricelli (1608-1647) demonstrando que a altura da coluna de mercúrio dos tubos unilaterais não dependia da geometria e inclinação dos tubos.

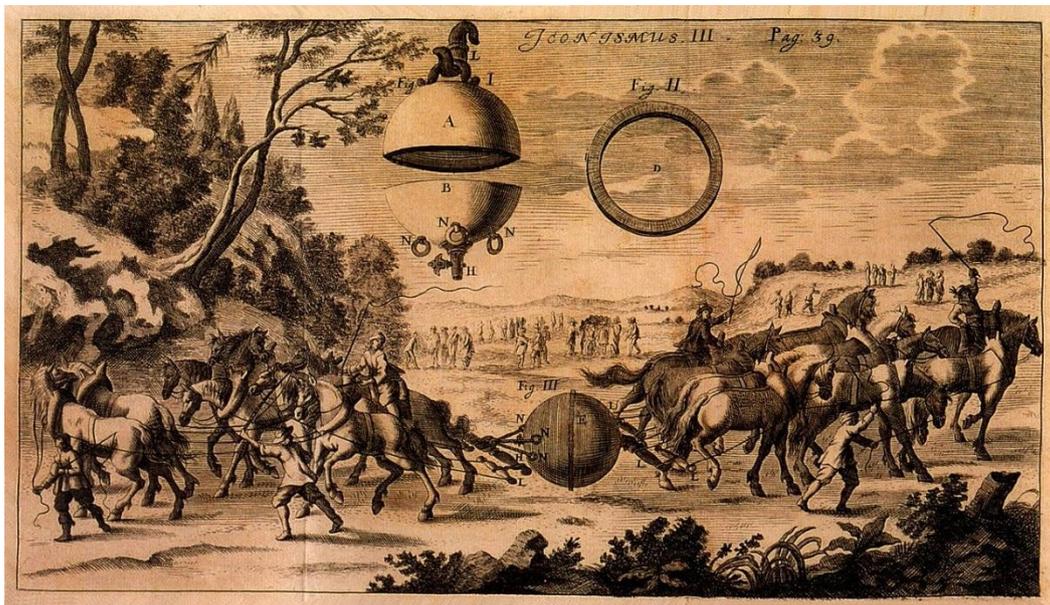


Fonte: TURNER, 1999.

O prefeito de Magdeburgo, Otto von Guericke, em 1650, desenvolveu a primeira bomba de vácuo da história. O objetivo inicial dos trabalhos de Guericke foi de desenvolver uma bomba d' água capaz de retirar água de um barril. Como uma maneira de facilitar o transporte da água ele, primeiramente, tentou adaptar a bomba d' água para retirar o ar do interior do barril, algo que se demonstrou ineficaz pela vedação não ser adequada. Para resolver isto, ele utilizou hemisférios de cobre selados com faixas de couro, que eram molhadas com uma mistura de cera e terebentina (aguarrás) [2]. Em 1654, em Regensburg (Alemanha), foi realizada a experiência (Figura 2) que o tornou famoso com os “hemisférios de Magdeburgo”, com 50 cm de diâmetro. A experiência

utilizou duas fileiras de cavalos, com oito cavalos presos em cada hemisfério, que exerceram forças em sentidos opostos. O resultado foi que os cavalos não conseguiram romper a ligação entre os hemisférios, evidenciando que os gases da atmosfera exercem forças sobre as superfícies dos hemisférios, impedindo que os hemisférios fossem abertos [3].

Figura 2: Demonstração do experimento de Magdeburgo.



Fonte: <https://www.meteorologiaenred.com/en/magdeburg-hemispheres.html>.

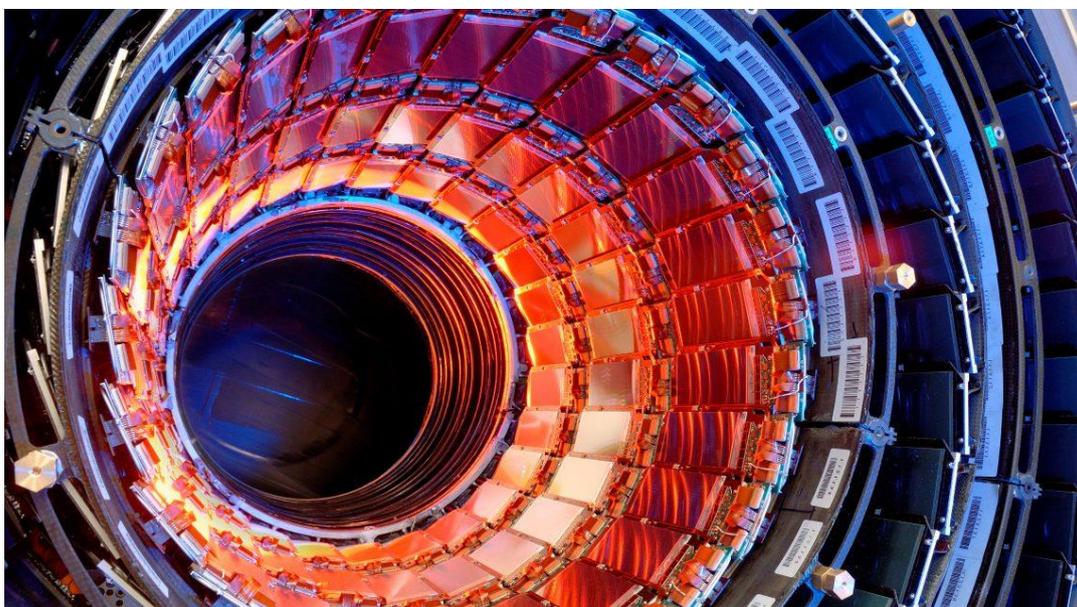
Robert Boyle e Edme Mariotte foram responsáveis por descreverem uma equação que viria contribuir no desenvolvimento de muitos sistemas e medidores que operam em gases em equilíbrio térmico, a lei de Boyle-Mariotte, também conhecida como equação fundamental dos gases perfeitos [3].

A invenção das bombas de vácuo levou ao desenvolvimento de diversos tipos de instrumentos tecnológicos na área, principalmente de medidores de vácuo, como o barômetro de Hg de Torricelli (desenvolvido por Boyle por volta dos anos 1660), o primeiro a ser desenvolvido que é capaz de medir até 0,001 mmHg. Posteriormente, em 1874, H. G. McLeod apresentou o seu medidor, que foi, por muito tempo, um medidor muito utilizado no padrão primário, na faixa de 1 até  $10^{-6}$  mmHg, utilizando da equação

de Boyle-Mariotte para determinar o valor de pressão absoluta. No início do século XX surgiram os medidores de condução térmica, que significou um grande avanço para a tecnologia do vácuo, tendo grande aceitação por ser fácil de operação e resistentes mecanicamente, sendo muito utilizados até hoje em dia. Ainda no início do século passado, surgiram dois medidores que se utilizavam da ionização do gás, como é caso dos medidores de cátodo quente ou triodo (1916) e cátodo frio (1937). Com o estudo dos medidores de cátodo quente, observou-se que a formação de raio-X limitava a pressão mínima que os medidores conseguiam operar, cerca de  $10^{-8}$  mmHg. Bayard e Alpert, em 1950, conseguiram reduzir as perdas geradas devido à formação de elétrons secundários, fazendo com que os triodos conseguissem alcançar até  $10^{-10}$  mmHg, sendo a primeira vez a mensurar a faixa do ultra alto-vácuo [2].

A evolução das bombas permitiu uma grande quantidade de aplicações e descobertas, como é o caso da descoberta do elétron em 1897 por J.J.Thomson e a invenção do tubo de raio X por Wilhelm Conrad Röntgen. Ainda por volta dos anos trinta, do século passado, houve a invenção de diversos tipos de aceleradores de partículas, que vem sendo desenvolvidos até hoje, que vão desde a aceleradores de pequenos laboratórios, a até aceleradores gigantes, como é o caso do Grande Colisor de Hádrons (LHC) mostrado na Figura 3 [3].

Figura 3: Grande Colisor de Hádrons (LHC) do CERN.



O desenvolvimento dos principais componentes que definem um sistema de vácuo, câmara de vácuo (recipiente onde é retirado o gás), tubulação (linha de bombeamento) e bomba de vácuo, contribuiu para o avanço de diversos outros componentes. Logo no início do desenvolvimento de bombas de vácuo, desenvolvida por Otto von Guericke, os componentes de vedação ganharam relevância por permitirem a estanqueidade do sistema. Inicialmente eram feitos com pedaços de pano ou couro embebidos em água ou óleo ou uma mistura de cera com aguarrás. Em sistemas de vidro eram utilizadas extremidades cônicas esmerilhadas ou lixadas e molhadas com óleo ou mercúrio (Hg). Em muitos casos os sistemas de vácuo de vidro eram soldados, por fusão, diretamente na bomba de vácuo. No final do século XIX o processo de cozimento (baking) passou a ser uma técnica adequada para alcançar pressões muito baixas, dando a energia necessária para as partículas “presas” às paredes se soltarem, rompendo as ligações fracas (processo de dessorção) que as mantinham fixa nas superfícies das paredes, e fossem exauridas pelas bombas de vácuo e sendo muito utilizado hoje em dia em alguns sistemas de ultra alto-vácuo. Durante a segunda guerra mundial os anéis de vedação, junto à evolução da aviação, passaram a ser padronizados, sendo fabricados de diversos tipos de polímeros, como é caso de silicone e Viton, sendo este último, adequado para sistemas onde é realizado “baking”, para a degaseificação artificial do sistema (será discutido na revisão bibliográfica). Para ultra alto-vácuo o sistema deve ser todo fabricado de metal, até mesmo os anéis de vedação que são mais comumente fabricados com cobre de alta pureza. Além destes, os passantes são importantes componentes capazes de transportar energia (de diversas formas) para o interior do sistema de vácuo [2]. A Tabela 1 mostra a linha do tempo que marcou a evolução da tecnologia do vácuo, citando alguns dos inventos e descobertas descritas no texto desta seção e alguns outros que não foram citados.

Tabela 1: Principais eventos históricos que marcaram o desenvolvimento da tecnologia do vácuo.

Ano	Autor	Descoberta
-----	-------	------------

1643-1644	Evangelista Torricelli	Experimento da coluna de mercúrio
1650	Blaise Pascal	Variação da altura da coluna de mercúrio com a altura
1654	Otto von Guericke	Bomba mecânica de pistão, hemisférios de Magdeburgo
1662	Robert Boyle e E. Mariotte	Lei da pressão e volume de gases ideais
1712	Thomas Newcomen	Bomba de água à base de vapor d'água
1775	A.L. Lavoisier	Ar atmosférico como mistura de nitrogênio e oxigênio
1783	Daniel Bernoulli	Teoria Cinética dos Gases
1802	J. A. Charles, J Gay-Lussac	Lei do volume e temperatura dos gases ideais
1811	Amedeo Avogadro	Número de Avogadro
1846	Isambard Brunel	Trem de propulsão atmosférica (vácuo)
1852	W. R. Grove	Primeira observação de evaporação catódica (sputtering)
1855/1862	Geissler & Töpler	Bomba de vácuo com coluna de mercúrio alternante
1865/1873	Sprengel	Bomba de vácuo por gotejamento de mercúrio
1874	H. G. McLeod	Medidor de vácuo por compressão de gás
1879	T. A. Edison	Lâmpada incandescente de filamento de carbono
1879	W. Crookes	Início do estudo de descargas elétricas em gases rarefeitos

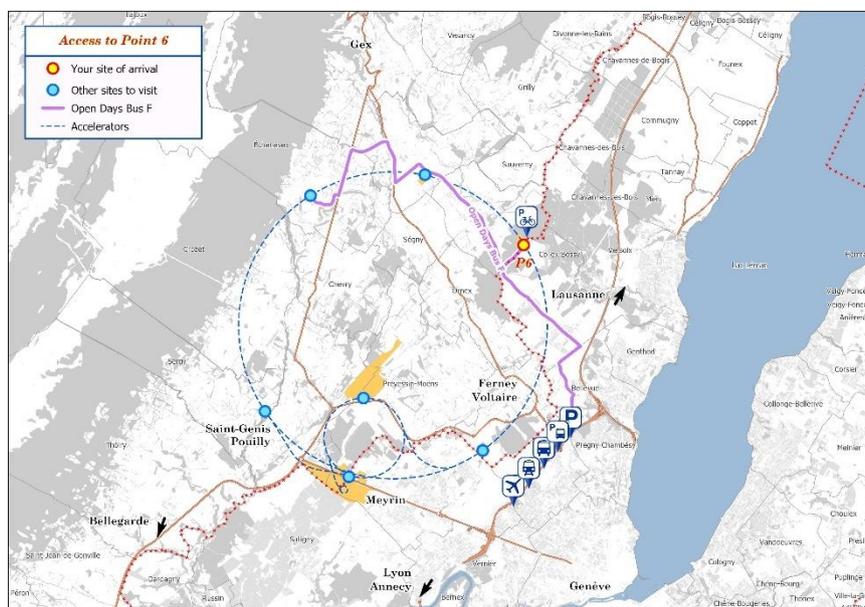
1880	Elster & Geitel	Observação de emissão termo-iônica
1881	J. van der Waals	Equação de estado de gases reais
1883	Wroblewski & Olszewski	Liquefação de oxigênio e nitrogênio
1892	James Dewar	Recipiente de paredes duplas com vácuo neste espaço (dewar)
1892	James Dewar	Sugestão de bomba de vácuo por adsorção em carvão crio-resfriado
1895	W. K. Röntgen	Descoberta dos Raios X
1902	A. Fleming	Invenção do diodo a vácuo
1904	Arthur Wehnelt	Catodo com óxido para emissão termo-iônica de elétrons
1905	Wofgang Gaede	Bomba de vácuo rotativa de mercúrio
1906	Marcelo Pirani	Medidor de vácuo por condutividade térmica
1907	Lee De Forest	Válvula triodo a vácuo
1909	W. D. Coolidge	Metalurgia do pó de tungstênio, lâmpada com filamento de W
1909	M. Knudsen	Descrição do movimento molecular dos gases
1913	W. Gaede	Sugestão de Bomba de vácuo por arraste molecular
1915	W. Gaede	Sugestão de Bomba de vácuo difusora (mercúrio)
1915	Irving Langmuir	Lâmpada incandescente com gás inerte
1916	Irving Langmuir	Bomba de vácuo por condensação (mercúrio)
1916	O. E. Buckley	Medidor de ionização de catodo quente

1917	W. W. Crawford	Primeira bomba de vácuo difusora realmente operacional
1923	F. Holweck	Bomba molecular (cilindro liso e carcaça tipo rosca variável)
1935	W. Gaede	Bomba mecânica com "gas balast" (lastro de gás)
1936	K. Hickman	Bomba difusora de óleo
1937	F. M. Penning	Medidor de ionização de catodo frio
1943	M. Siegbahn	Bomba molecular (disco liso e carcaça tipo rosca variável dupla)
1950	R. T. Bayard, D. Alpert	Medidor de ionização de catodo quente para ultra-alto vácuo
1952	P. della Porta	Desenvolvimento do primeiro anel aprisionador de liga de Ba (getter ring)
1953	H.J. Schwartz, R.G. Herb	Bomba de vácuo iônica
1956	W. Becker	Bomba turbomolecular (Arthur Pfeiffer GmbH)
1958	L. D. Hall	Bomba por evaporação catódica (diode sputter-ion pump)
1959	W.E. Gifford, H.O. McMahon	Máquina de refrigeração criogênica Gifford-McMahon (GM)
1962	P. della Porta	Bomba de aprisionador não evaporável (Nonevaporable Getter Pump)
1964	G. Kippling	Bomba criogênica de fluxo contínuo
1965	R. A. Douglas	Bomba de evaporação iônica tipo "Orbitron"
1966	W. E. Gifford	Bomba criogênica à base da máquina de

## 1.2 Sistema tubular

Os sistemas de forma tubular estão presentes em praticamente todos os sistemas de vácuo, sejam eles simples linhas de bombeamento a até mesmo o próprio sistema por completo ter este formato. Estes sistemas podem ir desde pequenos equipamentos de caracterização de laboratório, como é o caso dos microscópios de varredura, ou até mesmo ter dimensões gigantescas, maior que muitas pequenas cidades, como é o caso do grande laboratório da Organização Europeia para Investigação Nuclear ( mais conhecido pela sigla CERN), que fica localizado entre as fronteiras da França e da Suíça, como mostrado pela Figura 4, e é uma cooperação internacional de diversos países (incluindo o Brasil).

Figura 4: Mapa da Organização Europeia para Investigação Nuclear (CERN).



Fonte: <https://opendays.cern/plan-your-visit/getting-here/point-6-lhc-accelerator>.

Esses tipos de sistemas de vácuo tem grande importância, uma vez que os que atuam na faixa do alto-vácuo ( $10^{-3}$  mbar até  $10^{-7}$  mbar) são predominantemente da forma tubular. Para esses tipos de estruturas serem tratadas como um problema discreto, ou seja, considerar apenas como um sistema composto por linha de bombeamento, câmara de vácuo e bomba de vácuo, é insuficiente. Uma vez que conforme a um distanciamento das bombas de vácuo, maior será o gradiente de pressão algo que pode impedir que certos eventos sejam realizados com maestria, como por exemplo a colisão entre dois feixes de partículas em estruturas tubulares. Podendo também estar presente em diversas outras aplicações, como: anéis de armazenamento e colisão, antenas gravitacionais, dispositivos eletrônicos de alta potência, equipamentos médicos, máquinas de litografia, entre muitas outras<sup>[40]</sup>.

Este trabalho, teve como objetivo principal realizar a modelagem analítico, numérica e experimental de um sistema tubular com geometria cilíndrica (que é muito encontrada em diversas aplicações) para obter o campo de pressão e o gradiente ao longo do comprimento do tubo, visando comparar estes resultados a partir de uma análise contínua.

## **2. REVISÃO TEÓRICA .**

Nesta seção serão apresentados os conteúdos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Estes conteúdos serão divididos em seções e subseções, que irão detalhar de maneira mais específica os tópicos fundamentais em que este trabalho foi embasado.

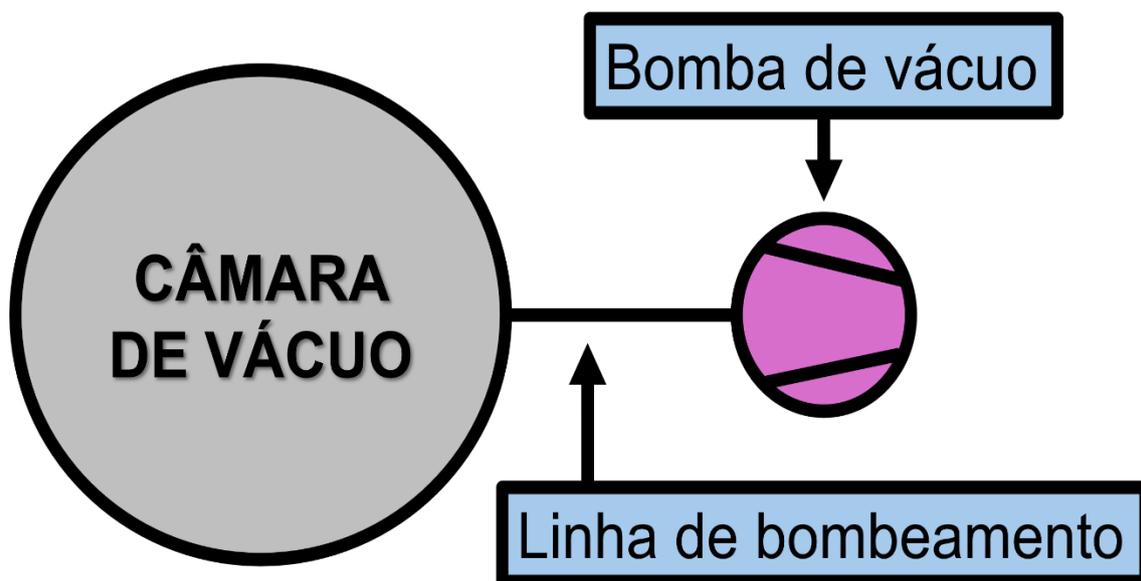
### **2.1 Tecnologia do vácuo**

Na tecnologia do vácuo, o termo “vácuo” é utilizado para descrever uma região do

espaço com pressão inferior à pressão atmosférica, conforme definido pela American Vacuum Society (1958). Sendo, a pressão atmosférica, equivalente à 101.325 Pa (unidade de pressão do Sistema Internacional de unidades). Em outras palavras, é uma região com uma densidade de moléculas inferior a  $2,5 \cdot 10^{19}$  moléculas/cm<sup>3</sup> [4]. No entanto, é importante ressaltar que um vácuo perfeito ou absoluto é fisicamente impossível. Embora o vácuo seja frequentemente associado ao conceito de vazio, ele não é exatamente desprovido de matéria, mas sim, um ambiente com uma concentração de matéria significativamente menor em comparação com a pressão atmosférica [1].

As aplicações da tecnologia do vácuo são encontradas em diversas áreas, indo além da física e engenharia. Ela é utilizada em processos de fabricação de vacinas, injeção de mercúrio em lâmpadas UV, fabricação de circuitos integrados, entre outros. A tecnologia do vácuo desempenha um papel fundamental na melhoria e viabilização de muitos processos que são afetados por contaminantes presentes na atmosfera local. Nem todas as aplicações requerem pressões abaixo da atmosférica (101.325 Pa ou 760 torr), muitas vezes envolvendo a remoção parcial dos gases de uma câmara, seguida pela introdução controlada de gases ou vapores para fins de processamento ou armazenamento. De forma geral, um sistema de vácuo consiste em três componentes principais, representados esquematicamente na Figura 5. Isso inclui um recipiente chamado de câmara de vácuo, onde o gás é removido para criar o vácuo necessário para realizar o processo científico ou industrial. Há também a tubulação que conecta a câmara vácuo à bomba de vácuo, conhecida como linha de bombeamento. Por fim, temos a bomba de vácuo, responsável pela variação do volume no sistema [1].

Figura 5: Esquema de um sistema de vácuo simples.



Fonte: Adaptador de - DEGASPERI, 2006.

### 2.1.1 Teoria cinética dos gases

A maioria das substâncias químicas apresenta pelo menos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. Esses estados da matéria são caracterizados pela mobilidade das moléculas, que depende da proximidade entre elas e das forças de atração e repulsão. Quando as partículas estão próximas, ocorre uma força de atração, levando-as a se aproximarem ainda mais. Por outro lado, quando as partículas estão muito próximas, ocorre uma força de repulsão, impedindo que duas partículas ocupem o mesmo espaço <sup>[5]</sup>.

**Estado sólido** – O estado sólido é caracterizado por uma baixa mobilidade das moléculas, bem como um volume e forma bem definidos. Isso ocorre devido à proximidade das moléculas umas das outras, o que resulta na predominância de forças de coesão.

**Estado líquido** – Quando calor é transmitido para uma substância, a energia

cinética das moléculas aumenta, resultando no aumento da mobilidade das moléculas, fazendo com que elas saiam de suas órbitas e passem a se movimentar de forma mais livre do que no estado sólido. Como resultado, a matéria no estado líquido preenche a forma de um recipiente, ou seja, os líquidos não possuem uma forma definida. No entanto, devido as moléculas não terem um movimento totalmente livre, elas ocupam um volume bem definido no recipiente. Apesar disso, as moléculas no estado líquido ainda estão fortemente ligadas às moléculas vizinhas, embora com maior liberdade de movimento.

**Estado gasoso** – Neste estado, as moléculas se movem livremente, resultando em uma falta de definição, tanto de volume, quanto de forma. Em outras palavras, elas ocupam completamente o volume e a forma de um recipiente. A alta velocidade, próxima a velocidade do som, explica de maneira simples porquê os gases se propagam rapidamente em um espaço “vazio”. As forças intermoleculares são muito fracas, o que impede as moléculas de serem “presas” em uma posição fixa (como nos sólidos) ou com movimentos restritos (como nos líquidos). Isso faz com que as partículas permaneçam soltas e distantes umas das outras. Essa mobilidade é essencial para permitir que os gases sejam conduzidos até as bombas e sejam exauridos de uma câmara de vácuo para a atmosfera ou para outra bomba de vácuo.

A compreensão dos eventos que ocorrem em regiões de atmosfera rarefeita (pressões baixas) é fundamental ao utilizar a teoria cinética dos gases, que serve como base teórica principal para a tecnologia do vácuo e para entender os fenômenos físicos presentes em ambientes de baixa pressão. A aplicação da teoria depende do contexto específico, mas, em geral, os conceitos básicos da teoria cinética dos gases são suficientes para elaborar a maioria dos eventos relacionados à tecnologia do vácuo. Para uma aplicação adequada dessa teoria, é essencial compreender conceitos importantes, como a interação entre gases e vapores em superfícies sólidas. Em baixas pressões, fenômenos como adsorção e dessorção resultam na liberação de gases da superfície (outgassing). É crucial entender esses processos corretamente, pois podem ser confundidos com vazamentos reais ao utilizar medidores de pressão. Além disso, é necessário considerar o transporte de gases nos quatro regimes de escoamento presentes em ambientes de vácuo <sup>[1]</sup>.

Uma maneira simples de compreender uma grande parte dos fenômenos de gases rarefeitos é através do estudo do comportamento dos gases ideais. Os gases ideais são caracterizados por terem temperatura acima da temperatura crítica e baixa densidade. Matematicamente, esses gases são descritos por meio da equação de Clapeyron-Mendeleev, conhecida como a equação dos gases perfeitos ou gases ideais, representada pela Eq 2.1. Essa equação é uma simplificação das leis de Boyle-Mariotte, que descreve a relação entre a variação de volume e pressão em um recipiente com temperatura constante. Essa lei estabelece que o produto da pressão e do volume é igual a uma constante (temperatura). A equação dos gases perfeitos engloba diversas grandezas, como a pressão ( $p$ ), o volume ocupado pelo gás ( $V$ ), geralmente em recipientes ou câmaras, a quantidade de gás em termos de número de mols ( $n$ ) ou número de moléculas ( $N$ ), a temperatura absoluta ( $T$ ), a constante universal dos gases perfeitos ( $R$ ) e a constante de Boltzmann ( $k$ ). Essas grandezas desempenham um papel importante na caracterização e compreensão dos gases ideais <sup>[1]</sup>.

$$pV = nRT \text{ ou } pV = NkT \qquad \text{Eq 2.1}$$

A esquematização apresentada anteriormente abrange a maioria das aplicações tecnológicas relacionadas ao estudo do comportamento de gases confinados em volumes específicos no vácuo. Embora seja simples, essa abordagem apresenta algumas imprecisões em certos casos, especialmente quando lidamos com gases a temperaturas inferiores à temperatura crítica e alta densidade. Em situações em que os gases estão abaixo da temperatura crítica, observamos a formação de líquidos no recipiente, o que resulta na presença de pressão de vapor. A pressão de vapor é a pressão exercida pelo vapor do líquido acima dele, e essa presença pode variar conforme a temperatura. Quando ocorre essa formação de líquido, não podemos mais utilizar a equação dos gases perfeitos para resolver os problemas. Em vez disso, precisamos recorrer a uma equação apropriada que leve em conta o cálculo da pressão de vapor. Para esses tipos de problemas, utilizamos a equação dos gases reais ou equação de Van der Waals. Os parâmetros presentes na Eq 2.2 dos gases reais são: os parâmetros relacionados ao tipo de gás ( $a$  e  $b$ ), o número de mols dos gases presentes na câmara ( $n$ ), o volume ocupado

pelo gás ou vapor (V), a temperatura absoluta (T), a constante universal dos gases perfeitos (R) e a pressão do gás ou vapor (p) [1].

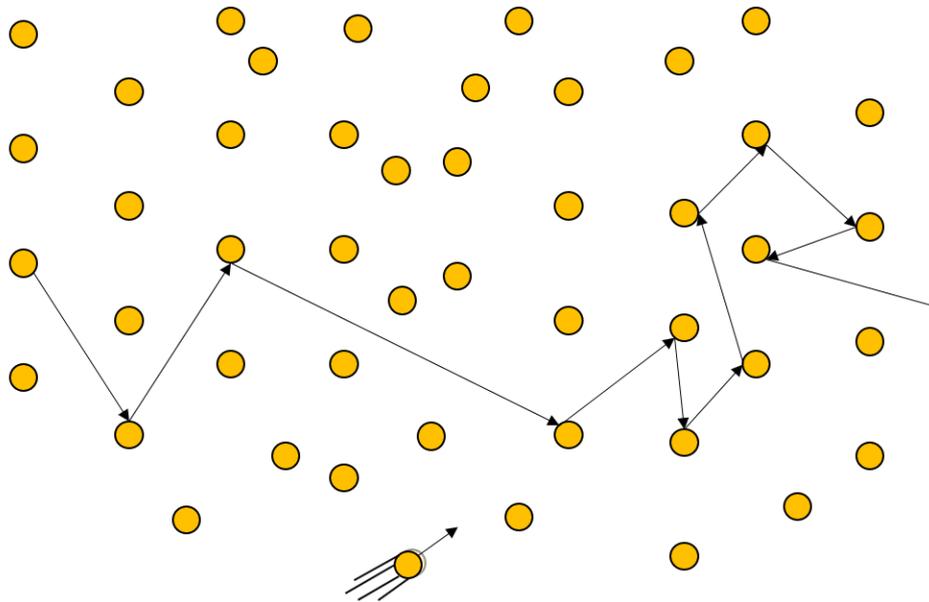
$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad \text{Eq 2.2}$$

Através da aplicação dessas equações da teoria cinética dos gases, é possível obter um entendimento adequado dos fenômenos que ocorrem nos gases. Essa compreensão é especialmente relevante em situações de baixa pressão, tornando-se fundamental para a resolução de problemas na área da tecnologia do vácuo. De fato, a teoria cinética dos gases representa uma das bases principais dessa tecnologia, permitindo o desenvolvimento de aplicações atuais e futuras nesse campo em constante evolução [1].

### 2.1.2 Livre caminho médio

No interior de um recipiente, as moléculas de um gás estão constantemente em movimento, colidindo umas com as outras e com as paredes no recipiente. Entre duas colisões consecutivas, uma molécula é capaz de percorrer uma certa distância sem colidir com outra molécula do mesmo tipo. Essa propriedade é de grande importância na tecnologia do vácuo, podendo ser controlada pela densidade do gás que está contida no recipiente. Denominamos essa distância média percorrida por uma molécula entre colisões consecutivas de livre caminho médio ou caminho livre médio. Essa grandeza representa a média das distâncias percorridas pelas moléculas durante suas trajetórias, como ilustrado na Figura 6<sup>[5]</sup>.

Figura 6: Trajetória de uma molécula entre sucessivas colisões com outras partículas de um mesmo gás.



Fonte: Adaptado de - Onusic, H. ; H. Medina, N.

Essa propriedade desempenha um papel fundamental na determinação de pressão em um sistema de vácuo, uma vez que a pressão está relacionada à quantidade de colisões entre moléculas e as paredes do sistema. A distância média percorrida pelas partículas entre colisões varia de acordo com a densidade do gás presente na câmara de vácuo, resultando em uma menor quantidade de colisões e pressão mais baixa em um gás menos denso. Em aplicações de alto vácuo, por exemplo, as trajetórias percorridas pelas moléculas são muito extensas, o que torna as colisões entre elas menos frequentes em comparação com pressões mais elevadas. Essa propriedade é de grande importância em aplicações que visam evitar a contaminação de etapas específicas em sistema de vácuo. Essa propriedade é descrita pela Eq 2.3<sup>[1]</sup>.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_m^2 \cdot \frac{N}{V}} \quad \text{Eq 2.3}$$

O diâmetro da molécula, representado por  $d_m$ , e a expressão  $\frac{N}{V}$ , que representa a

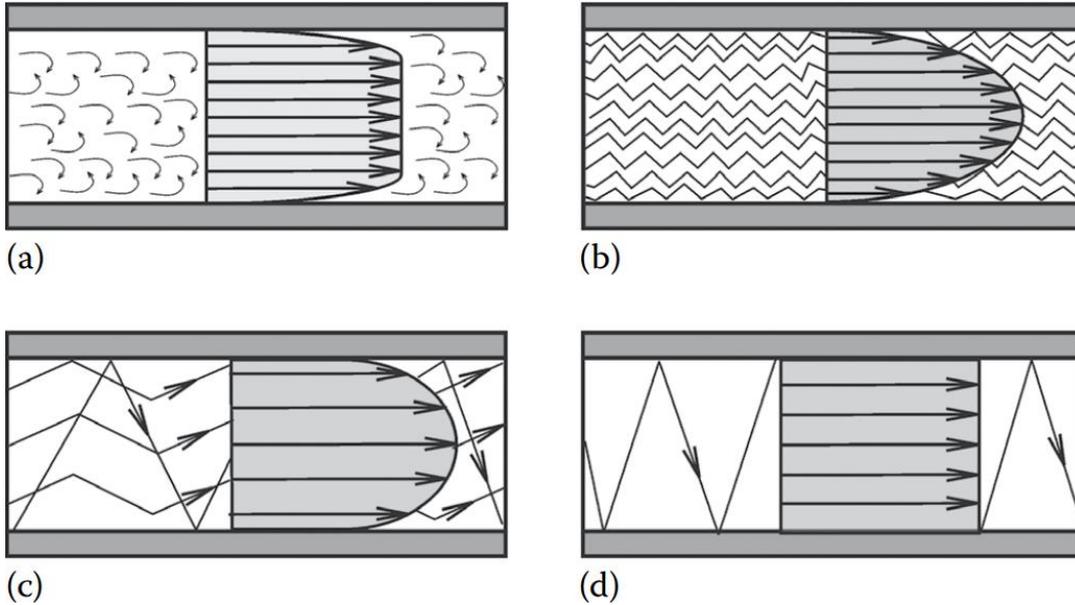
densidade de moléculas em um recipiente, desempenham um papel crucial no estudo de fenômenos relacionados a gases e vapores. O livre caminho médio ( $\lambda$ ) é uma medida importante que nos permite determinar diversas propriedades nessas áreas.

### 2.1.3 Regimes de escoamento

A maneira com que os gases presentes em um ambiente de vácuo se movem ao longo do sistema de vácuo, é definida como regime de escoamento, que basicamente define o tipo de fluxo de gás predominante ao longo de uma determinada trajetória conforme a natureza do gás e pela quantidade de gás presente no sistema [20]. Saber qual regime de escoamento um sistema irá ou está operando é um processo vital para entender o funcionamento do sistema, já que cada regime tem o seu cálculo específico, sua forma de compreensão específica e, por consequência, uma modelagem própria. Estes regimes são classificados, quanto ao tipo, a partir da forma com o qual o fluxo se comporta em um recipiente, podendo ser de fluxos contínuo ou molecular, como mostrado na Figura 7. Os fluxos contínuos são também conhecidos como regime viscoso e são divididos em fluxo viscoso laminar, ocorrendo quando as linhas de fluxo são paralelas e percorrem ao longo de uma distância sem sofrerem interferência além de apresentarem uma distribuição parabólica das velocidades, atingindo velocidade máxima no centro do tubo e velocidade mínima (zero) nas paredes do tubo, como mostra a Figura 7 (b) [4], e o fluxo viscoso turbulento, presente principalmente na pressão atmosférica (pressões altas), onde o livre caminho médio é muito pequeno e, por consequência disso, o movimento das partículas é limitado pela viscosidade, ocorrendo quando a velocidade excede um limite, do visto no regime laminar, isso resulta em linhas de fluxo em formato de vórtices (por meio de redemoinhos e turbilhões), que tem um movimento totalmente imprevisível, como mostrado na Figura 7 (a) [6]. O regime laminar e viscoso podem ser diferenciados a partir do número de Reynolds (que é em homenagem ao cientista britânico Osborne Reynolds), dado pela Eq

2.4. Resultando em um valor adimensional, e pelo número de Knudsen ( $K_n$ ), dado pela Eq 2.5, ou, de forma alternativa, também é possível utilizar o seu valor inverso ( $K_r$ ), dado pela Eq 2.6.

Figura 7 - Regimes de escoamento. (a) Regime viscoso turbulento; (b) Regime viscoso laminar; (c) Regime intermediário; (d) Regime molecular.



Fonte: (BELLO, 2018).

$$R_e = \frac{vD\rho}{\eta_d} \quad \text{Eq 2.4}$$

Onde:

- $R_e$  : Número de Reynolds;
- $v$  : Velocidade do gás;
- $D$  : Distância típica do sistema de vácuo, geralmente será o diâmetro do tubo que interliga a câmara de vácuo e a bomba de vácuo;
- $\rho$  : Densidade do gás;

- $\eta_d$  : Coeficiente de viscosidade dinâmica do gás em condições de baixo vácuo.

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad \text{Eq 2.5}$$

Onde:

- $\lambda$  : Livre caminho médio;
- L : Distância de referência em um sistema de vácuo.

$$K_r = \frac{L}{\lambda} \quad \text{Eq 2.6}$$

Com a diminuição da pressão, geralmente a partir de uma pressão abaixo de  $10^{-3}$  mbar, as colisões entre as partículas são menos suscetíveis de ocorrerem do que as partículas colidirem com as paredes do sistema, sendo apresentado um número de Knudsen superior a unidade. Nesta faixa de operação, os gases perdem totalmente as semelhanças entre gases e líquidos, fazendo com que cálculos que abordem mecânica de fluídos, sistemas contínuos, sejam inadequados serem utilizados nestas condições, por haver poucas colisões ou quase nenhuma (em pressões muito baixas, como no ultra alto-vácuo) <sup>[14]</sup>. Na faixa de  $0,01 < K_N < 1,0$  o fluxo é caracterizado como pertencente ao regime intermediário (entre o regime laminar e o molecular), apresentando tanto características do regime laminar como do regime molecular, como mostrado na Figura 7 (c), a velocidade de fluxo do gás apresenta um perfil parabólico (algo encontrado em gases no regime laminar), porém, com velocidade nas paredes não nula (algo que é característico do regime molecular) <sup>[4]</sup>. Na Tabela 2 são mostrados os regimes de escoamento dos gases e suas respectivas condições limite (número de Knudsen e número de Reynolds).

Tabela 2: Regimes de escoamento de gases.

Regime de escoamento		Condições limite
Fluxo contínuo (viscoso)	Regime turbulento	$Re > 2100$
	Regime laminar-turbulento de transição	$2100 > Re > 1100$
	Regime laminar	$Re < 1100$
Fluxo intermediário	-	$0,01 < K_N < 1,0$
Regime molecular	-	$K_N > 1,0$

Fonte: BELLO, 2018.

### 2.1.4 Condutância

Sistemas de vácuo podem ser compostos por diversos componentes, como câmaras de vácuo, válvulas, armadilhas e bombas. Estes componentes podem ser montados de formas seriadas e/ou paralelas, que influencia no quão complexo é o sistema. Uma das formas fundamentais, para ter uma certa previsibilidade sobre o comportamento destes sistemas é por meio de parâmetros fundamentais, tais como taxa de transferência de gás (*Throughput*), tempo de bombeamento e condutância [4]. A facilidade com que o gás pode atravessar um sistema, sobre uma determinada diferença de pressão, é definida como sendo a condutância. Ou seja, quanto maior for a condutância maior será a transferência de ao longo de uma certa a distância por um intervalo de tempo [14]. Podendo se desenvolver conforme o bombeamento, que forma a diferença de pressão entre a bomba e a câmara de vácuo, ou vazamento de gás no sistema de vácuo.

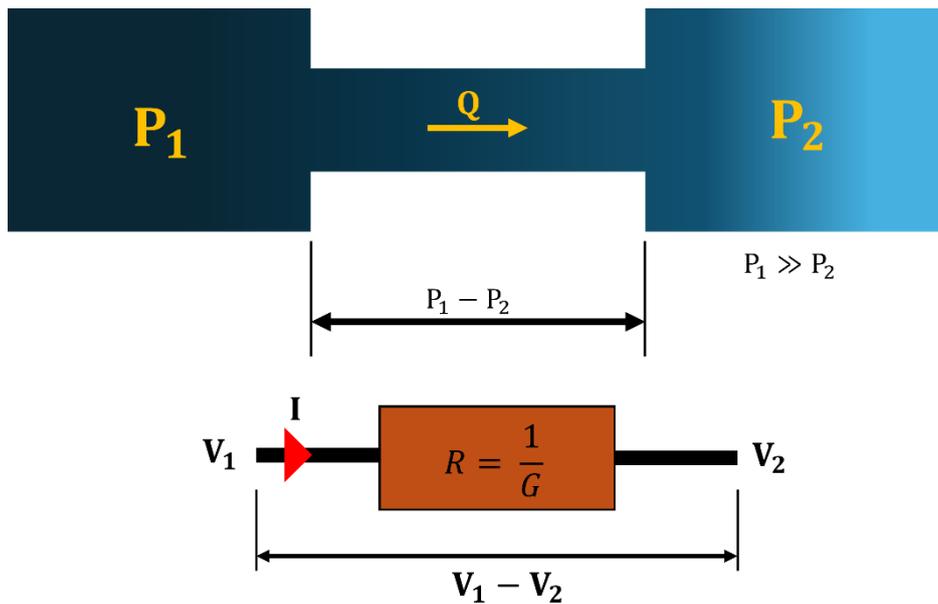
Na literatura, não é tão difícil encontrar uma relação entre componentes eletrônicos com componentes de vácuo. Na maioria dos exemplos é realizada uma analogia de uma corrente que atravessa uma resistência, que para o caso do vácuo são os tubos, a partir da aplicação de uma diferença de potencial entre os terminais da resistência. Ao invés da resistência se utiliza a condutância elétrica, como mostra a Eq 2.7 e representada pela Figura 8.

$$G = \frac{I}{V_1 - V_2} \quad \text{Eq 2.7}$$

Onde:

- G: Condutância elétrica (inverso da resistência elétrica);
- I: Corrente elétrica (fluxo ordenado de elétrons);
- $V_1 - V_2$ : Diferença de potencial.

Figura 8: Relação entre circuitos elétricos e sistemas de vácuo.



Fonte: O autor.

Assim como o funcionamento de um componente elétrico há uma corrente que surge devido a diferença de tensão entre dois terminais, da mesma forma em um sistema de vácuo uma quantidade de gás é transportada devido à diferença de pressão entre duas posições do espaço. Desta forma, a corrente e a diferença de potencial são análogos a diferença de pressão e à taxa de transferência de gás (*throughput*). Com isso, o semelhante da condutância elétrica é condutância do sistema de vácuo, que é calculada a partir da Eq 2.8 [4].

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2} [L.s^{-1}] \quad \text{Eq 2.8}$$

Onde:

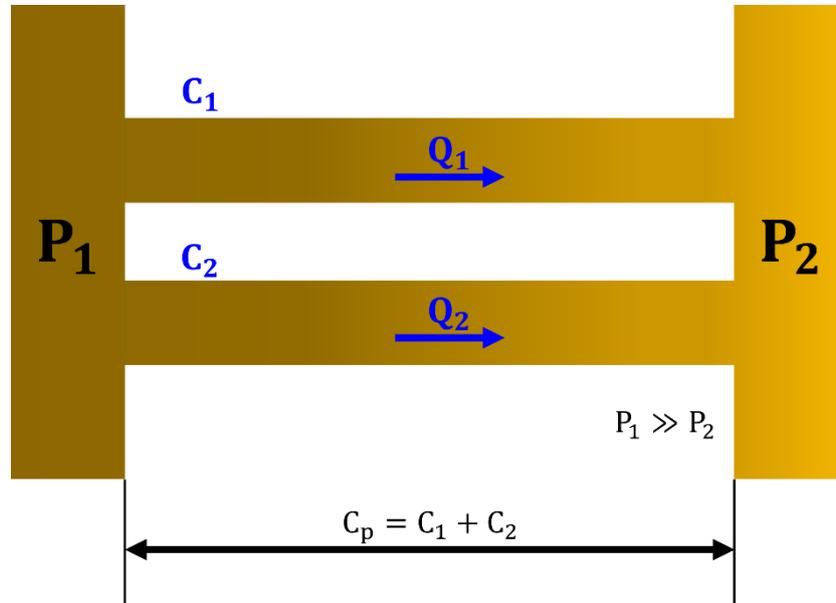
- C: Condutância da transferência de gás em um duto para um certo gás específico, a uma certa temperatura;
- Q: Taxa de transferência de gás;
- P1 – P2: Diferença de pressão.

A condutância é uma grandeza que afeta a pressão final, velocidade de bombeamento e tempo de bombeamento para obter a pressão final no sistema de vácuo, variando conforme a dimensão do tubo e o regime de escoamento do gás (algo que depende do livre caminho médio e dimensão do tubo). A partir desta grandeza é possível determinar as condições de pressão, velocidade de bombeamento efetivo em partes específicas do sistema e vazamentos de gás [4].

Por meio das relações que sistemas de vácuo têm com circuitos elétricos é possível determinar a condutância total em diferentes tipos de arranjos (série ou paralelo) [14]. Para tubos em paralelo, segue-se a mesma analogia de condutância elétrica, ou seja, é a soma das condutâncias dos tubos individuais, na Figura 9 é mostrado um retratado um exemplo de um sistema de vácuo com tubos paralelos. Para n tubos em paralelo, a condutância total é calculada a partir da soma de todas as condutâncias paralelas, conforme a Eq 2.9.

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_n \quad \text{Eq 2.9}$$

Figura 9: Sistema de vácuo com dois tubos em paralelo com suas respectivas condutâncias e *throughput*.

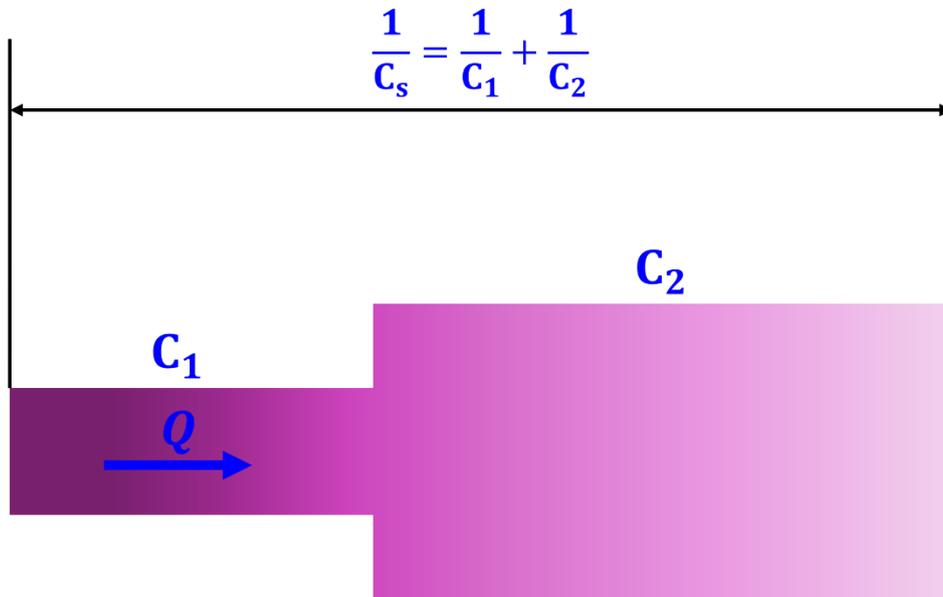


Fonte: O autor.

Da mesma forma, para tubos em série também é utilizada a condutância elétrica como uma analogia, ou seja, o inverso da condutância total dos tubos em série é a soma do inverso da condutância de cada tubo que está em série, como mostrado na Figura 10. Para  $n$  tubos, é utilizada a somatória do inverso das condutâncias em série, como mostrado na Eq 2.10.

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_n} \quad \text{Eq 2.10}$$

Figura 10: Sistema de vácuo com dois tubos em série com suas respectivas condutâncias.



Fonte: O autor.

Obter a condutância total é uma tarefa fundamental durante a modelagem de um sistema de vácuo, já que a partir dela se obtém a verdadeira velocidade de bombeamento ao longo de posições específicas ou mesmo ao longo de todo o sistema de vácuo projetado e uma vez que a velocidade de bombeamento efetivo é função da condutância total e da velocidade de bombeamento, como mostrada pela Eq 2.11.

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_T} \Rightarrow S_{ef} = \frac{S_{bv} \cdot C_T}{S_{bv} + C_T} \quad Eq 2.11$$

Como discutido anteriormente, a condutância pode variar conforme o tipo de regime de escoamento de gás. Na Tabela 3 são mostradas uma relação dos cálculos das condutâncias com seus correspondentes regimes de escoamentos, onde é baseado em um sistema de vácuo com atmosfera de nitrogênio à temperatura ambiente ( $\sim 293K$ ). Sendo um tubo de diâmetro  $D$  e comprimento  $L$ .

Tabela 3: Cálculos de condutâncias para os regimes de escoamento, sobre uma atmosfera de nitrogênio em temperatura de 20°C (293K).

Regime de escoamento	Cálculo da condutância
Viscoso laminar	$C_{Lam} = 136 \frac{D^4}{L} \left( \frac{P_1 + P_2}{2} \right)$
Intermediário	$C_{int} = \frac{D^3}{L} \left[ 136D \left( \frac{P_1 + P_2}{2} \right) + 12 \left( \frac{1 + 192D \left( \frac{P_1 + P_2}{2} \right)}{1 + 237D \left( \frac{P_1 + P_2}{2} \right)} \right) \right]$
Molecular	$C_{Mol} = 12 \frac{D^3}{L}$

Fonte: ROTEIRO DE ESTUDOS E EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO 4 – REEF 4.

No regime molecular, pelo fato de as moléculas praticamente não colidem entre elas, tendo uma trajetória percorrida através do espaço. Não há um fluxo contínuo de gás, uma vez que não comunicação de movimento entre as moléculas do gás. Sendo o gás, neste regime, composto por um grande número de moléculas que não interagem entre si, praticamente com a parede. Quando a uma abertura de orifício de um tubo, que apresenta um dificultador da passagem do gás, é necessário considerar esta condutância. Desta forma, a condutância do orifício de um tubo em regime molecular é calculado a partir da Eq 2.12.

$$C_{or} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A \quad Eq 2.12$$

Onde:

- R: Constante universal dos gases perfeitos
- T: Temperatura (em kelvin);
- M: Massa molecular;

- A: Área do orifício.

Para o gás nitrogênio sobre a temperatura 295 K substituídos na Eq 2.12 é obtida a Eq 2.13. Onde a unidade de área deve ser cm<sup>2</sup>.

$$C_{or} = 11,8A [L.s^{-1}] \quad Eq\ 2.13$$

### 2.1.5 Taxa de transferência de gás (*throughput*)

Na tecnologia do vácuo, uma das principais atividades é reduzir a densidade de gases em uma câmara de vácuo, o que envolve evacuar parte desses gases. Isso ocorre devido à diferença de pressão entre a câmara de vácuo e a bomba de vácuo, onde uma quantidade de massa é transportada, resultando na diminuição da quantidade de gás na câmara. O fluxo de gás que passa pela linha de bombeamento varia de acordo com a pressão e a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo. O *throughput*, representado pela letra Q, pode ser definido como a quantidade de gás (massa) que atravessa uma seção, geralmente a linha de bombeamento, por unidade de tempo. Essa relação é descrita pela Eq 2.14, que demonstra que o *throughput* é proporcional à taxa de variação da pressão em relação ao tempo, multiplicada pelo volume da câmara de vácuo. Nessa equação, as grandezas físicas pressão (p), volume (V) tempo (t) são fundamentais para descrever a taxa de fluxo de gás (*throughput*)<sup>[1]</sup>.

$$Q = \frac{dp}{dt} \cdot V \quad Eq\ 2.14$$

A unidade de watts é significativa, pois representa a energia necessária para transportar moléculas de um plano para outro, como ocorre no transporte de massa de um gás de uma câmara de vácuo, através da linha de bombeamento, até a bomba de

vácuo, onde são evacuados para a atmosfera ou para outra bomba de vácuo. Durante o fluxo do gás pela linha de bombeamento, a facilidade com que o gás flui pelo tubo é uma grandeza de extrema importância, conhecida como condutância específica (C). A capacidade do gás em atravessar um sistema de tubulação depende de propriedades cruciais, como temperatura, tipo de gás e, especialmente, das dimensões do percurso. A taxa de transferência de gás pode ser definida em termos de sua condutância pela Eq 2.15.

$$Q = C (P_2 - P_1) \quad \text{Eq 2.15}$$

Onde C representa a condutância e  $P_2 - P_1$  é a diferença de pressão entre dois pontos diferentes na tubulação. No sistema internacional de unidades (SI), o throughput é definido em watts (W). No entanto, na tecnologia do vácuo, convencionalmente são utilizadas duas unidades principais:  $\text{mbar.L.s}^{-1}$  ou  $\text{Torr.L.s}^{-1}$ .

### **2.1.6 Fontes de Gases e Vapores em um Sistema de Vácuo**

Um dos principais objetivos da tecnologia do vácuo é remover parte dos gases presentes no interior de uma câmara de vácuo, sendo que o tempo necessário para esse processo pode variar dependendo da quantidade de gás a ser retirada. No entanto, é impraticável remover todo o gás de uma câmara, mesmo que se tente por um tempo muito longo, devido às moléculas dos gases e vapores que ficam adsorvidas na superfície das paredes da câmara. Esse processo de dessorção é bastante lento. Frequentemente, os gases presentes na superfície da câmara podem limitar o alcance de uma pressão teoricamente esperada. Em uma câmara de vácuo ideal, não haveria alteração de pressão após a separação de vácuo, mantendo o vácuo estável. No entanto, em situações reais, sempre há algum grau de vazamento que impede que a pressão seja constantemente medida pelos sensores, seja devido às partículas que se soltam

gradualmente das paredes (como discutido anteriormente) ou outros tipos de vazamento que dificultam a obtenção de uma pressão adequada. Por esse motivo, é necessário identificar os vazamentos que interferem no processo de vácuo durante o projeto do sistema, como mostrado na Figura 11, que demonstra um sistema de vácuo com as possíveis fontes de gases e vapores na câmara de vácuo, e representa-los nos cálculos diferenciais, conforme apresentados nas Eq 2.16 e Eq 2.17. A Eq 2.16 envolve a soma das possíveis fontes de gases, enquanto a Eq 2.17 detalha as fontes de gases representadas pela somatória na Eq 2.16 [1].

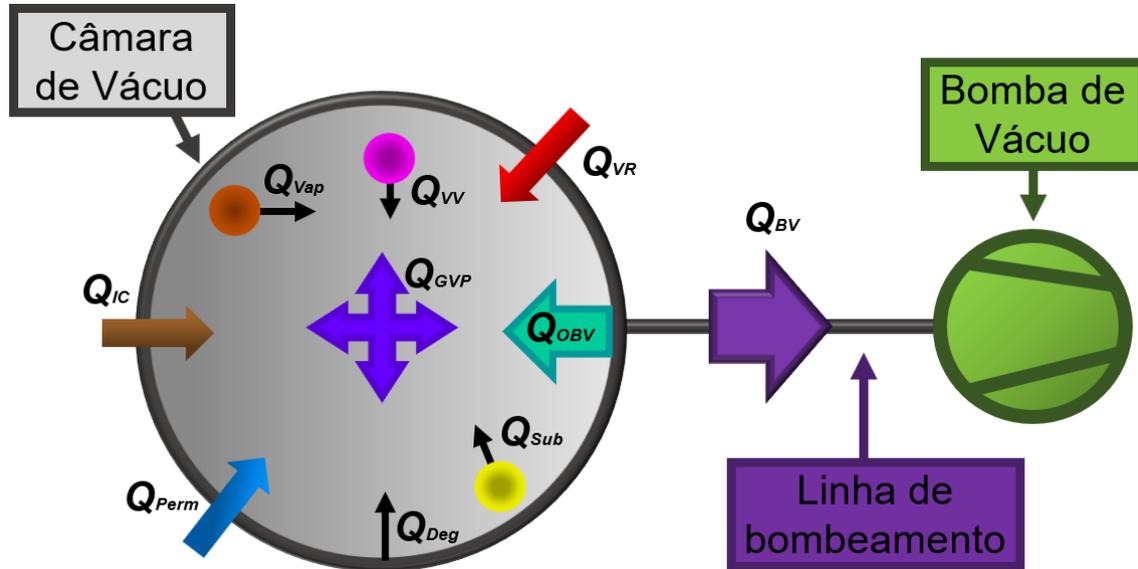
Para entender e modelar corretamente certos fenômenos que ocorrem em baixa pressão, é essencial considerar a presença de fontes de gases. Muitas dessas fontes são comuns em ambientes de vácuo e é importante defini-las adequadamente. A compreensão das diferentes fontes de gases se torna relevante de acordo com a faixa de pressão, permitindo que fontes com pouca influência nessa faixa sejam desprezadas. Compreender o tipo de fonte de gás que se aplica a uma determinada faixa de pressão é fundamental para o processo de modelagem. A identificação precisa das fontes gasosas de bombeamento depende dessa informação. Isso possibilita uma escolha mais precisa e adequada de equipamentos para diferentes aplicações [1].

$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = -S_{ef} p_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad \begin{array}{l} Eq \\ 2.16 \end{array}$$

Na equação fornecida, onde  $V_{CV}$  representa o volume da câmara de vácuo,  $p_{CV}(t)$  é a função da pressão na câmara de vácuo,  $S_{ef}$  é a velocidade efetiva de bombeamento e  $\sum_{i=1}^n Q_i$  é a soma das quantidades das possíveis fontes de gases do sistema de vácuo. Essas fontes gasosas incluem: vazamento real ( $Q_{VR}$ ), vazamento virtual ( $Q_{VV}$ ), vaporização ( $Q_{Vap}$ ), desgaseificação ( $Q_{Deg}$ ), permeação ( $Q_{Perm}$ ), origem da bomba de vácuo ( $Q_{OBV}$ ), gases e vapores do processo ( $Q_{GP}$ ) e injeção controlada de gases e vapores ( $Q_{IC}$ ) [1].

$$Q_{Total} = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{VR} + Q_{VV} + Q_{Vap} + Q_{Sub} + Q_{Deg} + Q_{Perm} + Q_{OBV} + Q_{GVP} + Q_{IC} \quad Eq 2.17$$

Figura 11: Desenho esquemático de uma câmara de vácuo com as possíveis fontes de gases de vapores.



Fonte: Adaptado de - DEGASPERI, 2006.

- **Vazamento real ( $Q_{VR}$ )** – O *Throughput*  $Q_{VR}$  representa a quantidade de gás que é trocada entre os meios interno e externo ao sistema de vácuo devido a imperfeições na estrutura mecânica dos componentes presentes que formam o sistema de vácuo, que permitem a entrada de gases indesejados no interior do arranjo. Esses gases penetram no sistema de vácuo devido a problemas de vedação, como vazamentos nas conexões dos tubos e rachaduras e trincas nas soldas. Em um sistema de vácuo ideal, teríamos uma vedação perfeita, resultando em nenhum aumento de pressão interna da câmara de vácuo após o isolamento da câmara e da bomba de vácuo. No entanto, essa fonte de gás não existe na prática, assim como alcançar uma pressão de vácuo absoluta igual a zero é impossível. Matematicamente, o throughput  $Q_{VR}$  é representado pela Eq 2.18 <sup>[1,6,7]</sup>.

$$Q_{VR} = C_{VR} (p_{atm} - p_{CV}) \quad Eq$$

Na equação fornecida, onde  $C_{VR}$  representa a condutância do vazamento real,  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica e  $p_{CV}$  é a pressão na câmara de vácuo. A Eq 2.18 é uma maneira formal de expressar matematicamente o vazamento real. No entanto, é impossível obter seus valores devido à falta de informação sobre as dimensões da passagem do vazamento real. Uma abordagem experimental para determinar esse *Throughput* é utilizando a velocidade efetiva de bombeamento e a pressão final, como mostrado na Eq 2.19, onde as outras fontes gasosas são subtraídas ou desprezadas. Para proceder, é recomendado verificar o sistema de vácuo por meio da plotagem de gráficos de pressão versus tempo. Essa análise experimental fornecerá insights sobre o comportamento do vazamento real no sistema [1.6].

$$Q_{VR} = S_{ef} p_{final} \quad Eq \quad 2.19$$

- **Vazamento virtual ( $Q_{VV}$ )** – O vazamento virtual é uma fonte de gás que ocorre devido à liberação de gás contido em um pequeno volume dentro do sistema de vácuo, conhecido como bolsão de gás. Esse bolsão de gás pode ficar aderido à parede da câmara devida à adsorção das moléculas na superfície e, devido à temperatura, podem adquirir energia para fazerem a dessorção. Essa fonte de gás pode ser altamente prejudicial para o desempenho do sistema de vácuo e pode comprometê-lo completamente. Quando a condutância do vazamento virtual é muito baixa, o bombeamento do gás retido pode ser significativamente atrasado, dificultando a diminuição da pressão na câmara. Em alto vácuo, pode ser desafiador identificar o vazamento virtual, pois ele pode se sobrepor aos efeitos da desgaseificação e do vazamento real. Muitas vezes, o vazamento virtual é confundido com o vazamento. No entanto, eles podem ser diferenciados com base em seus conceitos. O vazamento real ( $Q_{VR}$ ) ocorre devido à passagem constante de gás entre o meio externo (região atmosférica) e o meio interno (sistema de vácuo), resultando em um fluxo de gás

contínuo (*Throughput*), que alimenta o sistema de vácuo e causa um aumento a pressão interna. Por outro lado, o vazamento virtual varia à medida que é liberado do bolsão de gás, resultando em uma diminuição da pressão no interior da câmara de vácuo [1,7,8].

- **Vaporização ( $Q_{VAP}$ )** – Em processos realizados em temperaturas abaixo da temperatura crítica do gás, ou mesmo, abaixo da temperatura de ebulição de líquidos presentes no sistema de vácuo, é comum que haja a presença de vapor, que corresponde ao estado gasoso desse líquido. O vapor é resultante da presença de líquido no interior do sistema de vácuo, no qual algumas moléculas líquidas adquirem energia cinética suficiente para escapar na forma de vapor para a atmosfera do interior da câmara. Esse fenômeno pode ser acelerado pelo aumento da temperatura. Em um sistema de vácuo fechado, a pressão de vapor formada acima do líquido depende apenas da temperatura e das propriedades específicas do vapor, representadas pelas constantes “a” e “b”, que estão relacionadas ao tipo de substância, conforme demonstrado na Eq 2.2. Com a saturação do vapor, a pressão atmosférica se torna a pressão de vapor. Isso estabelece um equilíbrio dinâmico entre o número de moléculas gasosas e o número de moléculas líquidas. A presença de líquidos pode comprometer a pressão final nos sistemas de vácuo devido às suas altas pressões de vapor. Durante processos de limpeza, é essencial garantir a remoção completa dos líquidos, especialmente quando produtos líquidos como álcoois, acetonas, detergentes e água são comumente utilizados. Além dos processos de limpeza, frequentemente há uso de líquidos em sistemas de vácuo, como fluidos para lubrificação de bombas de vácuo e vedantes à base de graxa. No caso de aplicação de técnicas como secagem, liofilização e outros métodos que envolvem fenômenos de evaporação, é necessário monitorar a pressão de vapor. Em todos esses processos, é crucial um monitoramento cuidadoso, pois a pressão de vapor pode ser fundamental para certas operações ou pode impedir o bom andamento de outras. A quantidade de moléculas que evapora de uma superfície por unidade de área e unidade de tempo é representada matematicamente pela Eq 2.20 [1,6].

$$J_{Vap} = \frac{P_{vapor} N_A}{\sqrt{2\pi MRT}} = \frac{P_{vapor}}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad Eq 2.20$$

A equação anterior permite determinar o *throughput* resultante da evaporação em vácuo por unidade de área e unidade de tempo, representado pela Eq 2.21. Nessa equação  $p_{\text{vapor}}$  representa a pressão de vapor do líquido em questão<sup>[1]</sup>.

$$Q_{Vap} = J_{Vap} k T \quad \text{Eq 2.21}$$

Além de calcular o *throughput*, também é possível determinar o fluxo de massa ( $Fl_{VAP}$ ) do material líquido presente no sistema de vácuo. Esse fluxo de massa é expresso pela Eq 2.22 <sup>[1]</sup>.

$$Fl_{Vap} = J_{Vap} \cdot m = \frac{P_{\text{vapor}} N_A}{\sqrt{2\pi MRT}} m = P_{\text{vapor}} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \quad \text{Eq 2.22}$$

- **Sublimação ( $Q_{Sub}$ )** – Assim como no caso da evaporação, a sublimação também está relacionada ao fenômeno da pressão de vapor. No entanto, a sublimação se diferencia por envolver direção direta do estado sólido para o estado gasoso, sem passar pelo estado líquido intermediário. Tanto os materiais sólidos quanto os líquidos possuem uma pressão de vapor, embora dos sólidos seja geralmente menor. É importante levar em consideração a pressão de vapor ao escolher os materiais que estarão presentes no interior da câmara de vácuo, pois esses materiais podem afetar a capacidade do sistema de vácuo em atingir determinadas pressões. A pressão de vapor resultante do *throughput* devido à sublimação pode ser significativa em certos casos, dificultando, ou até mesmo, impedindo a obtenção da pressão final desejada ao sistema de vácuo. Além dos problemas associados a esse vazamento, a sublimação também possui aplicações, em que filmes finos de alumínio são depositados em dispositivos semicondutores. Assim como no caso da evaporação, a sublimação pode ser calculada através da quantidade de moléculas que sublimam por unidade de área e unidade de tempo, conforme representado pela Eq 2.23. É possível determinar o *throughput* devido à sublimação em vácuo por unidade de área utilizando a Eq 2.24, e também calcular o fluxo de massa ( $Fl_{Sub}$ ) do material sólido que está sublimando, utilizando a Eq 2.25 <sup>[1,6]</sup>.

$$J_{Sub} = \frac{P_{vapor} N_A}{\sqrt{2\pi MRT}} = \frac{P_{vapor}}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad Eq 2.23$$

$$Q_{Sub} = J_{Sub} k T \quad Eq 2.24$$

$$Fl_{Sub} = J_{Sub} \cdot m = \frac{P_{vapor} N_A}{\sqrt{2\pi MRT}} m = P_{vapor} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \quad Eq 2.25$$

- **Desgaseificação ( $Q_{Deg}$ )** – Esta fonte de gás é a mais comum em sistemas de vácuo e está associada à propriedade de dessorção de gases das paredes de uma câmara de vácuo e outros componentes presentes em ambientes de vácuo. Essa fonte é mais prevalente em pressões abaixo de  $10^{-3}$  mbar, e seu fenômeno deve ser monitorado de acordo com a intensidade, área exposta ao vácuo e volume de vácuo. Quando os materiais são expostos ao ambiente atmosférico, eles absorvem partículas presentes na atmosfera. Alguns materiais têm taxas de desgaseificação muito altas, como os materiais poliméricos, enquanto outros têm taxas menores, como certos materiais são mais adequados para a construção de câmaras de vácuo e outros componentes. Em determinadas temperaturas, para um dado material, gases e vapores, pressão, a quantidade de partículas adsorvidas pela superfície entra em equilíbrio. Quando expostas a um ambiente de vácuo, essas moléculas que estavam adsorvidas ou absorvidas pela superfície do material são liberadas para o sistema. Processos de limpeza e condicionamento visam reduzir a quantidade de gases e vapores provenientes da dessorção [1,9,10].

Os cálculos utilizados para representar a taxa de desgaseificação variam ao longo do tempo, com resultados distintos para processos com duração de até 10 horas e processos com mais de 11 horas de exposição do material ao vácuo. Esses resultados podem variar de acordo com o tratamento e o processo de limpeza aplicados ao material. No início do processo, nas primeiras 10 horas de exposição do material ao ambiente de vácuo, o throughput é altamente dependente do tipo de material exposto,

conforme expresso na Eq 2.26 [1,4].

$$q_{Deg}^a(t) = q_0' \frac{1}{t^a} \quad Eq\ 2.26$$

Onde  $q_0'$  é a taxa de desgaseificação no início do processo de bombeamento,  $t$  é o tempo dado em horas, e  $a$  é uma propriedade que depende do tipo de material sendo desgaseificado. Durante as primeiras horas, o processo de desgaseificação é mais rápido, pois depende principalmente da natureza e preparação da superfície do material. Esses comportamentos de desgaseificação podem ser observados em materiais como cobre, aço, liga de aço e vidro. No entanto, para obter resultados mais confiáveis, é necessário coletar dados experimentalmente. A partir da 11<sup>o</sup> hora, o processo de limpeza e condicionamento, juntamente com o tipo de material, passa a ter uma influência maior na taxa de desgaseificação, como detalhado matematicamente na Eq 2.27 [1,4].

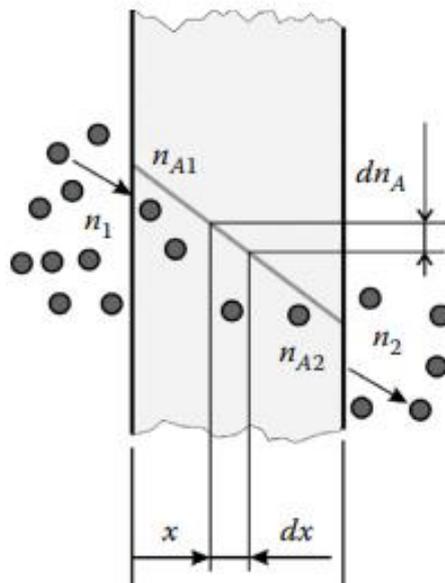
$$q_{Deg}^b(t) = q_0^b \exp[-\beta(t - t_c)] \quad Eq\ 2.27$$

Onde  $\beta$  está relacionado às propriedades do material, como sua natureza e grau de limpeza e condicionamento. Para expressar a continuidade na função matemática da Eq 2.27 podemos considerar  $q_0^b = q_{Deg}^a(t_c)$  onde  $t_c$  é igual a zero. O principal objetivo desses cálculos é destacar a influência significativa do processo de limpeza, que pode variar consideravelmente os resultados finais da taxa de desgaseificação, e dessa forma, a pressão teórica se aproxima mais da prática [1].

- **Permeação ( $Q_{Perm}$ )** – A permeação é uma fonte de gás que ocorre devido à passagem de uma porção do gás presente na atmosfera, que foi adsorvida pelas paredes externas do sistema de vácuo, para o interior do sistema. Mesmo na ausência de aberturas grandes que permitam um fluxo regular, esse fenômeno ocorre por meio da difusão, que é a transferência de massa de um meio mais concentrado para um meio menos concentrado através de um sólido. As moléculas da atmosfera são adsorvidas

pelas paredes externas e, dependendo da temperatura, algumas dessas partículas difundem-se através do material da parede do sistema de vácuo e, posteriormente, são desorvidas no interior do ambiente de vácuo, espessura das paredes do sistema de vácuo, tipo de material utilizado, pressão externa e o tipo de gás presente na atmosfera. A permeação desempenha um papel crucial em sistemas de ultra-alto vácuo, especialmente em sistemas com paredes muito finas, e varia de acordo com o tipo de material utilizado [1,4,6]. A Figura 12 está demonstrando de maneira esquemática o transporte de partículas do meio externo (atmosfera) até o meio interno (ambiente de vácuo), a partir de um meio sólido (parede do sistema).

Figura 12: Permeação dos gases da atmosfera por meio das paredes do sistema de vácuo.



Fonte: BELLO, 2018.

- **Origem na bomba de vácuo ( $Q_{OBV}$ )** – Esta fonte de gás é originada das bombas de vácuo, nas quais o fluxo de gases e vapores são transportados para a câmara de vácuo, resultando no aumento da pressão no sistema. O *throughput* geralmente é causado pela evaporação de fluidos presentes na bomba de vácuo, porém pode ser minimizado através do uso de armadilhas ou outros métodos. O valor do *throughput* dessa fonte varia de acordo com o tipo de bomba de vácuo, os processos de operação, o

estado de manutenção da bomba e seus componentes internos, bem como o número de bombas conectadas ao sistema de vácuo. Portanto, a taxa de *throughput* pode variar consideravelmente devido a uma série de propriedades que influenciam o resultado final. Geralmente, os vapores de óleo estão presentes em sistemas que utilizam bombas mecânicas ou bombas difusoras, sendo extremamente prejudiciais para atingir uma pressão final desejada. No entanto, esses vapores podem ser reduzidos com os usos de armadilhas geladas e fluidos com baixa pressão de vapor <sup>[1,11]</sup>.

- **Gases e Vapores de Processo ( $Q_{GVP}$ )** – Essa fonte de gás se origina dos processos realizados no ambiente de vácuo, e depende dos gases e vapores formados durante esses processos. Para identificar a origem do *throughput*, é necessário ter um conhecimento detalhado do sistema do processo e, em seguida, analisar o sistema para tratar essa fonte de gás e vapor. No entanto, em certos processos, não é possível resolver o problema apenas com tratamento teórico, especialmente quando a geometria física do sistema é muito complexa. Nesses casos, é necessário recorrer a soluções experimentais para abordar o problema de forma efetiva <sup>[1,12]</sup>.

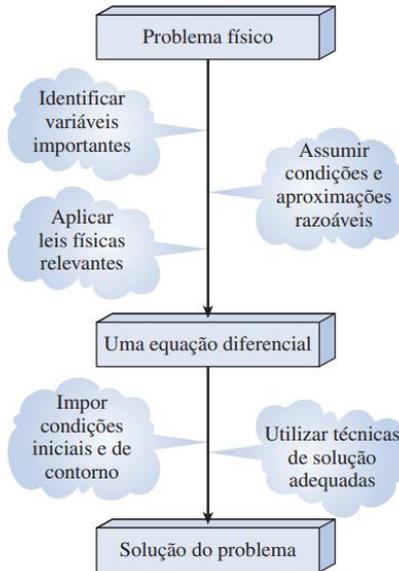
- **Injeção controlada de gases ( $Q_{IC}$ )** – Existem aplicações que requerem uma quantidade controlada de gases e vapores específicos, exigindo a injeção precisa dessas substâncias, com monitoramento cuidadoso dos momentos e duração da injeção. Geralmente, esse procedimento é realizado conectando um sistema de válvulas à fonte de gás, que controla a condutância e determina os momentos de abertura e fechamento da passagem do gás. Existem dois tipos de injeção controlada: gás e vapor, cada um com suas particularidades. No caso da injeção controlada de vapor, é crucial que a temperatura da linha de transporte seja mantida igual à temperatura da fonte de vapor. Isso evita o entupimento do sistema de injeção devido à condensação do vapor. Por outro lado, na injeção de gases, considera-se que a pressão dos gases que saem da câmara é igual à pressão atmosférica, enquanto os gases que entram na câmara têm pressão próxima a zero. Em muitas aplicações, o *throughput* da injeção de gases e vapores não depende do valor da pressão dentro da câmara de vácuo, mas sim de outros fatores, como temperatura e área de acesso do gás e vapor à câmara. No caso da injeção de vapores, que é proveniente de uma fonte líquida, a pressão do vapor antes de entrar na câmara é determinada pelo tipo de material líquido presente na fonte. Sendo

necessário informar o valor da temperatura deste material. Essa fonte de gás desempenha um papel crucial na microeletrônica, especialmente na formação de filmes finos para aplicações específicas, onde é utilizada a técnica de Sputtering <sup>[1,12]</sup>.

### **2.1.7 Modelagem contínua de sistemas de vácuo**

As análises de problemas científicos são expressas, boa parte das vezes, a partir de equações que descrevem a relação entre variáveis grande impacto para a questão abordada. Para o estudo de algum fenômeno físico, deve primeiramente identificar as variáveis fundamentais para a resolução do problema, fazendo-se aproximações que não interfiram drasticamente na solução e é levado em consideração a relação de dependência mútua entre essas variáveis. A partir disso, as leis e os princípios são identificados, de forma que os problemas sejam formulados matematicamente. Posteriormente, o problema é resolvido e os resultados são interpretados de forma devida <sup>[35]</sup>. Este passo-a-passo da modelagem matemática é mostrado por meio da Figura 13.

Figura 13: Etapas da modelagem matemática de problemas físicos.



Fonte: ÇENGEL, GHAJAR,2012.

Para a modelagem de sistemas de vácuo podem seguir duas principais maneiras de análise de problemas, que vão depender do tipo de aplicação a qual esse sistema será utilizado. Podendo ser descrito por uma análise discreta ou contínua <sup>[1]</sup>.

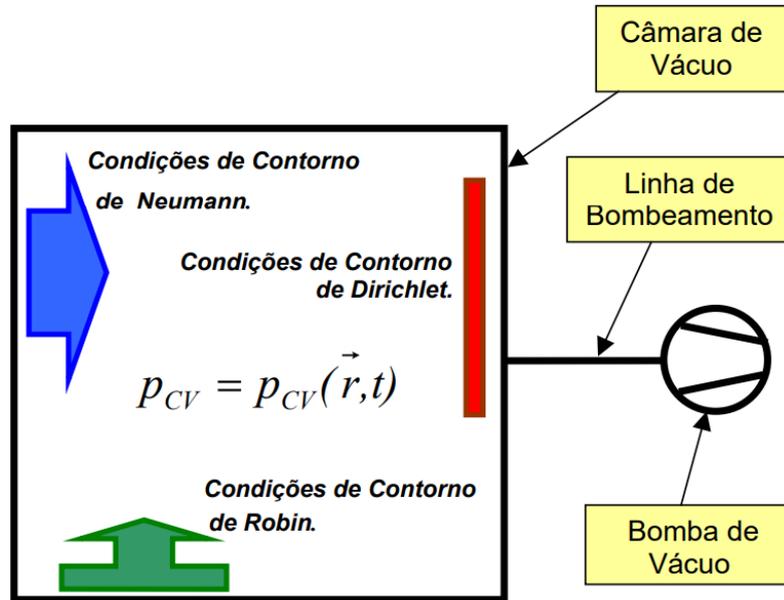
A forma discreta separa o sistema em três partes distintas, como: câmara de vácuo, linha de bombeamento e as bombas de vácuo. Devendo descrever as fontes de gases e vapores relevantes durante o processo de realização do vácuo. Posteriormente, é considerada a velocidade de bombeamento, sendo muito útil para estimar o tempo aproximado para alcançar a pressão final do sistema. E, por fim, é determinada a condutância do sistema, sendo útil para definir a velocidade de bombeamento efetiva ao longo do sistema. Este modelo, por ter uma forma simplista de resolução de problemas, faz com que seja muito utilizada em diversos projetos em que é possível considerar o sistema de vácuo formado por componentes pontuais. O fato de este método considerar apenas a variação da pressão ao longo do tempo –  $P_{cv} = P_{cv}(t)$  – na câmara de vácuo, é uma grande limitação pra certos problemas <sup>[1]</sup>. Uma vez que, se houver grandes variações de pressão ao longo de uma distância, em forma de gradiente, como no caso de sistemas tubulares com diâmetro pequeno e com comprimento grande.

Por outro lado, a partir da modelagem contínua é obtido o campo de pressão transiente (dependente do tempo) ou estacionário (não depende do tempo). Nesta análise, o sistema será composto por vários pontos, que representam a posição dos sistemas, onde será obtido o valor de pressão para cada ponto no espaço, podendo haver uma modelagem unidimensional, bidimensional ou tridimensional. Este tipo de modelagem é válido para todos os regimes de escoamento, onde, para cada tipo de regime, haverá uma resolução específica. No regime laminar é possível utilizar mecânica de fluidos, uma vez que tem um comportamento contínuo, que é a equação de *Navier-Stokes*. Para o regime intermediário, que é o regime entre o molecular e o laminar, é utilizada a equação de *Boltzmann*, considerando a teoria de colisão de partículas e moléculas, que tem uma solução complicada e os softwares exigem muito processamento do computador <sup>[1]</sup>.

O regime molecular é tipicamente encontrado em diversas aplicações, como em aceleradores de partículas, microscópios eletrônicos de varredura, sistemas de fabricação de lâmpadas, em diversos equipamentos da indústria de microeletrônica, entre outros. Devido sua viscosidade muito pequena, não há uma continuidade tal qual apresentados por problemas de mecânica de fluidos. As partículas têm um livre caminho tão grande que mal colidem entre si, tendo uma trajetória aleatória quando estas colidem com a paredes, podendo ser interpretado como um problema probabilístico <sup>[36]</sup>. Para resolver estes problemas é necessário detalhar a geometria do sistema, além também de detalhar onde as bombas de vácuo estão posicionadas e também informar a magnitude das fontes de gases e vapores. A partir da modelagem são obtidas equações diferenciais parciais e, aplicando as condições de contorno e a condição inicial são obtidas as soluções por métodos analíticos ou numéricos. A utilização da equação de difusão para modelagem sistemas de alto e ultra alto-vácuo apresenta grande vantagem, por ter a mesma solução matemática que um problema de condução térmica, é possível utilizar softwares computacionais de transferência de calor por condução <sup>[1]</sup>. Na Figura 14, é mostrada de uma forma representativa um desenho de um sistema de vácuo geral, onde pode a modelagem contínua pode ser realizada em qualquer componente do sistema de vácuo, na câmara, linha de bombeamento ou bomba de vácuo, onde são encontrados as condições de contorno que detalham as fontes de gases e a parte de bombeamento do

sistema.

Figura 14: Sistema de vácuo geral com as suas respectivas condições de contorno e inicial.



Fonte: DEGASPERI, 2006.

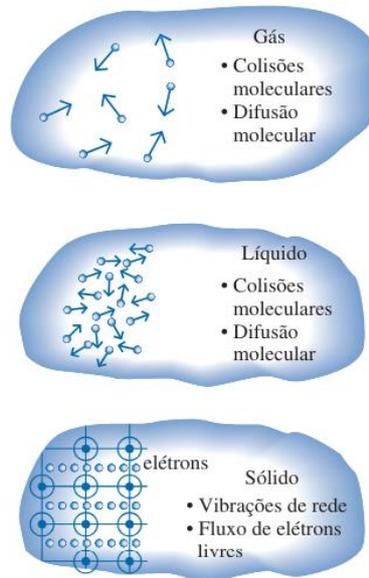
### 2.1.6.1 Equação de difusão

Um dos fenômenos de transporte mais bem desenvolvidos teoricamente é o transporte de calor. Ocorrendo devido a diferença de temperatura no espaço, podendo ocorrer em um meio, por meio da interação entre dois ou mais ou em alguns casos sem necessitar de um meio (no caso da radiação térmica). Existindo, em particular, três mecanismos de transporte fundamentais <sup>[29]</sup>, onde todos dependem da diferença de temperatura e sempre ocorre o transporte da maior temperatura para a menor temperatura <sup>[34]</sup>. Abaixo são apresentados os três tipos de transporte de calor.

- **Condução:** Está relacionada com interações atômicas e moleculares, ocorrendo transferência de energia térmica das partículas mais energéticas para partículas vizinhas

adjacentes menos energéticas. Podendo ocorrer em sólidos, líquidos ou gases [34]. Assim como apresentado na Figura 15.

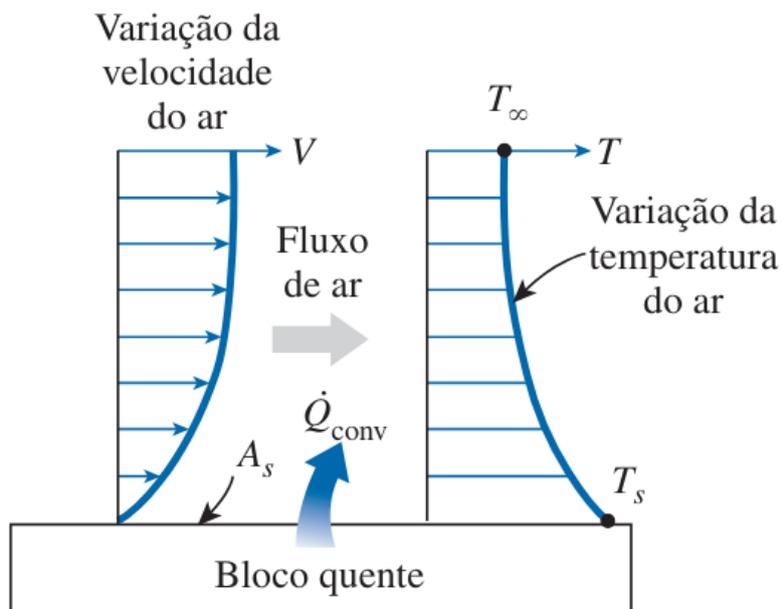
Figura 15: Mecanismos de condução de calor para diferentes fases de uma determinada substância.



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR. 2012

- **Convecção:** Ocorre por meio da transferência de calor de uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás) adjacente, ocorrendo uma combinação do fenômeno de condução (nos meios individualmente) e da movimentação de um fluido. Se não houver movimentação de um fluido em contato com a superfície, a transferência entre o fluido e a superfície do sólido ocorrerá apenas por meio de condução térmica. Porém, a transferência de calor pode ser amplificada com a movimentação do fluido [34]. Como demonstrado pela Figura 16.

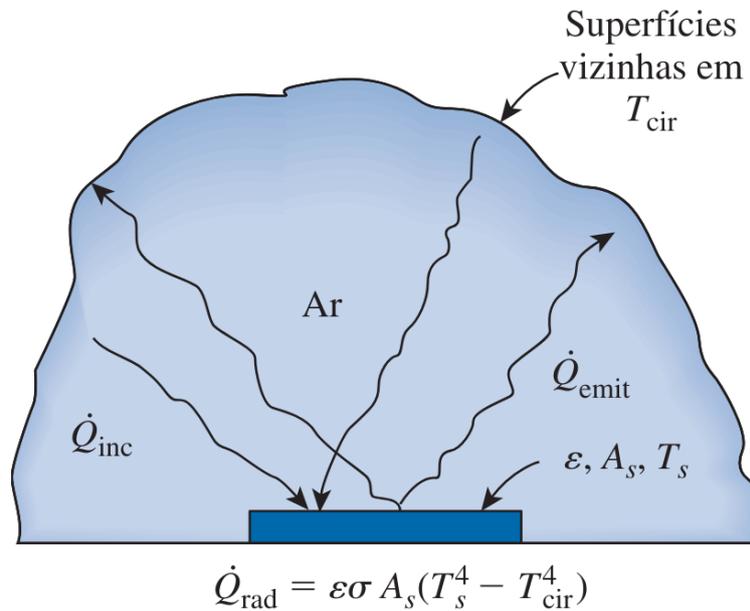
Figura 16: Transferência de calor da superfície quente de um bloco para o ar por convecção.



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR. 2012

- Radiação: A matéria tem como uma das suas características emitir energia em forma de radiação eletromagnética, quando sua temperatura está acima do zero absoluto ( $> 0 \text{ K}$ ), como consequência das variações nas configurações eletrônicas ocorridas no interior de átomos ou moléculas de sólidos, líquidos ou gases. Neste tipo de transferência de calor não há uma dependência de um meio, já que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, não sendo amenizada mesmo que haja uma alteração na atmosfera em que o átomo ou molécula esteja emergido, com maior ou menor concentração de partículas. Além também de se propagar na velocidade da luz <sup>[34]</sup>. Como mostra a Figura 17.

Figura 17: Transferência de calor por radiação entre uma superfície e superfícies vizinhas.



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR. 2012

Em diversos tipos de problemas do cotidiano, ocorre o evento de condução térmica, como no caso das estruturas de dissipadores, que devem conduzir o calor até a superfície das aletas para que ele seja dissipado por fenômeno de convecção. Este fenômeno está baseado, fundamentalmente, pela transferência de energia térmica de partículas mais energéticas para aquelas menos energéticas. Esses processos ocorrem devido às interações entre partículas e moléculas, e podem acontecer tanto em sólidos, como em fluidos (líquidos ou gases) [29].

No caso de líquido e gases, que são tipos de fluidos, a condução de calor ocorre por meio de colisões e difusões [34], onde a energia das moléculas está relacionada ao movimento de translação aleatório, bem como movimentos internos de rotação e vibração das moléculas [29].

Nesse contexto, o transporte de calor acontece através das colisões entre moléculas vizinhas, resultando na transferência de energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas. Durante o processo de condução do calor, o gradiente de temperatura tem o sentido de diminuição da temperatura, mesmo que não haja colisões, ocorrendo por um processo denominado como “transferência líquida”, e

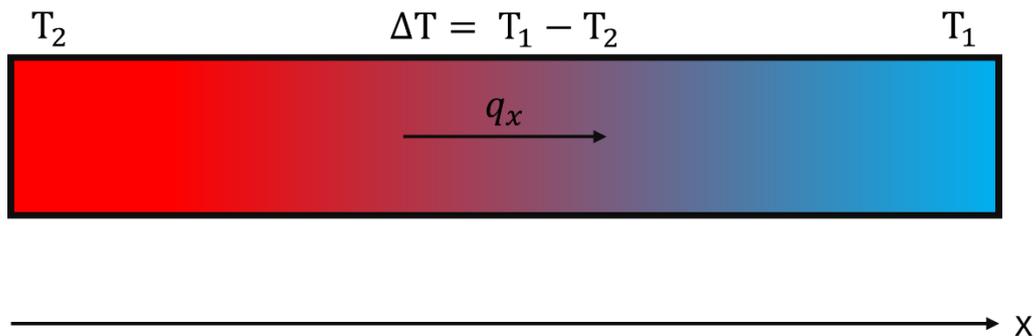
que pode ter melhor eficiência na transferência de energia quando ocorrem colisões entre as partículas. A Figura 18 descreve o processo de condução de calor de um gás que está entre duas superfícies com temperaturas diferentes ( $T_1 > T_2$ ) [29]. Este processo é quantificado a partir da lei de Fourier, onde para parede plana unidimensional é descrita pela Eq 2.28.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad \text{Eq 2.28}$$

Onde:

- $q_x''$  – taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção de transferência;
- $k$  – condutividade térmica;
- $dT/dx$  – gradiente de temperatura na direção x.

Figura 18: Processo de transferência de calor por condução.



Fonte: Adaptado de – BERGMAN, 2014.

Nestes tipos de exemplos, é a diferença de temperatura ( $T_2 > T_1$ ) que causa a transferência de calor por condução no sentido positivo do eixo x sendo cessada quando ambas as regiões entram em equilíbrio térmico (se  $T_1 = T_2$ ). A partir de medidas experimentais, tais como foram utilizados para confeccionar este tipo de equação, é

notável que a taxa de condução de calor através face da plana é proporcional à diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre dois pontos na face do tubo e a área ( $A$ ) da transferência de calor, porém, por outro lado, é inversamente proporcional à distância do tubo <sup>[34]</sup>. Além destas informações, pode ser observado que mantendo as demais informações anteriores, por meio da alteração de materiais, é observado que existe uma constante para cada tipo de material que influenciará diretamente proporcional com a taxa de transferência de calor ( $q''_x$ ) em que esta propriedade é definida como condutividade térmica ( $k$ ), que basicamente é a capacidade do material conduzir calor. Vale ressaltar que o sinal de menos na lei de Fourier, encontrado na Eq 2.28, deve estar sempre presente nos problemas de transferência de calor por ele se propagar no sentido da diminuição das temperatura, assegurando que a transferência de calor no sentido positivo de  $x$  sempre tem valor positivo <sup>[29]</sup>.

O fluxo de calor é uma grandeza direcional que pode ser expresso de uma maneira mais geral a partir da consideração de que o sentido e a direção do escoamento do calor sempre é normal a uma superfície de temperatura constante, denominada como superfície isotérmica. Uma vez que o fluxo de condução térmica é considerado como uma grandeza vetorial, é possível escrever o problema de uma forma mais geral a partir da Eq 2.29.

$$q'' = -k \nabla T = -k \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Eq 2.29}$$

Onde:

- $\nabla T$  – Operador gradiente tridimensional de temperatura;
- $T(x,y,z)$  – Campo escalar de temperaturas.

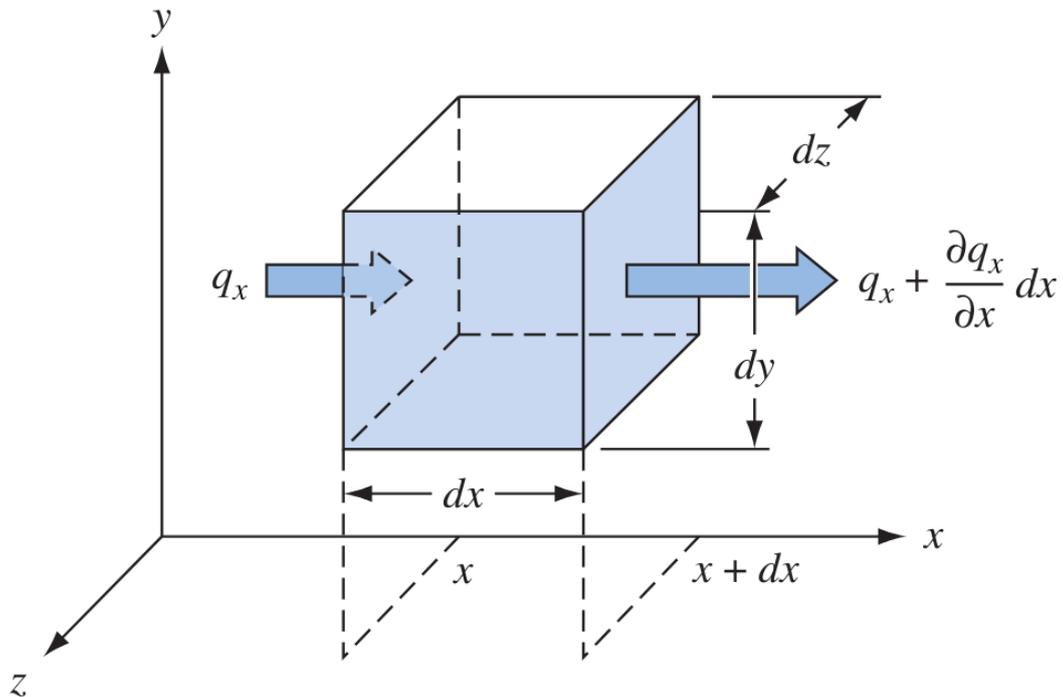
Um dos principais objetivos em problemas de condução térmica é a modelagem do campo de temperaturas em um meio resultante das condições de contorno impostas. Desta forma, é obtida a temperatura para cada posição no meio, verificando a variação de temperatura ao longo de uma certa distância. A partir da obtenção deste campo, é possível determinar o fluxo de calor por condução em qualquer posição ou intervalo

(distância) no meio <sup>[29]</sup>. Podendo servir para dimensionar máquinas térmicas, determinar a espessura de um material isolante, avaliar a integridade estrutural de um objeto, como nos casos de: muro de uma casa, vidro de uma janela grande, chapa metálica de uma passadeira de ferro, tubulação de vapor, elemento cilíndrico para combustível nuclear, fio de resistência elétrica, superfície de um recipiente esférico de metal temperado ou resfriado <sup>[34]</sup>.

A forma como a distribuição de temperatura é calculada deve proceder conforme a primeira lei da termodinâmica, que trata que a energia total de um sistema é conservada. Para este tipo de modelagem é definido um volume de controle diferencial, sendo identificados os processos de transferência de energia relevantes e submetidos as equações apropriadas. Isto resulta em uma equação diferencial que é solucionada especificando as suas condições de contorno, obtendo-se, assim, a distribuição de temperatura <sup>[29]</sup>.

Para um meio homogêneo, onde não ocorre movimento macroscópico (advecção) e o campo de temperatura é representado a partir coordenadas cartesianas. Adotando a exigência que a conservação de energia impõe, é definido um volume de controle muito pequeno (tendendo a zero),  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$ , como mostrado na Figura 19. A segunda etapa da modelagem é definir os processos energéticos relevantes para o volume de controle. Quando o movimento mecânico é nulo ou constante, não há trabalho sendo feito no sistema. De forma que apenas as formas térmicas de energia sejam consideradas <sup>[29]</sup>.

Figura 19: Volume de controle diferencial para análise de condução em coordenadas cartesianas.



Fonte: Kreith; Manglik; Bohn, 2011.

Uma das formas de se obter energia térmica durante o processo de condução é a conversão de energia mecânica, elétrica, nuclear ou química <sup>[34]</sup>. A fonte de geração calor está diretamente associado à taxa de geração de energia térmica, como está demonstrado na Eq 2.30<sup>[29]</sup>.

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad \text{Eq 2.30}$$

Onde:

- $\dot{q}$ – Taxa de energia gerada por unidade do volume do meio (W/m<sup>3</sup>);

Além da geração de energia térmica, também é possível variar a quantidade de energia armazenada no interior de um volume de controle. Quando a variação de fase não é presente o acúmulo de energia ela pode ser escrita por meio da Eq 2.31.

$$\dot{E}_{Acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad Eq 2.31$$

Onde:

- $\rho c_p$  – Capacidade térmica de um material;
- $\partial T / \partial t$  – Taxa de variação com o tempo da energia sensível do meio.

A última etapa, após a definição de cada elemento da equação de conservação de energia. A forma geral da exigência da conservação de energia é descrita pela Eq 2.32.

$$\dot{E}_{Acu} = \dot{E}_{Ent} + \dot{E}_{Ger} - \dot{E}_{Sai} \quad Eq 2.32$$

Onde:

- $\dot{E}_{Ent}$  – Entrada de energia
- $\dot{E}_{Sai}$  – Saída de energia

Substituindo as equações Eq 2.30 e Eq 2.31 na Eq 2.32. Sendo esta uma forma simplificada, onde a condutividade térmica é constante

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad Eq 2.33$$

Onde:

- $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  – Difusividade térmica ou velocidade com que o calor se difunde por meio de um material.

Para casos particulares é possível adicionar mais simplificações. A derivada parcial da Eq 2.33 é substituída por uma equação ordinária para cada caso particular, como mostradas nas equações unidimensionais das Eq 2.34 (regime estacionário), Eq 2.35 (regime transiente sem geração de calor) e Eq 2.36 (regime estacionário sem

geração de calor).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{\dot{q}}{k} \left( \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right) \quad \text{Eq 2.34}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \left( \dot{E}_g = 0 \right) \quad \text{Eq 2.35}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \left( \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \text{ e } \dot{E}_g = 0 \right) \quad \text{Eq 2.36}$$

#### 2.1.6.1.1 Lei de Fick

Toda vez que surge um desequilíbrio de uma certa substância em um meio, naturalmente ela é redistribuída até alcançar um equilíbrio de massa por todo o meio, assim como no transporte de calor. A quantidade de substância por unidade de volume é definida como sendo a concentração dessa substância, onde o fluxo da substância sempre tem sentido e direção da redução. Uma vez que a redistribuição causa o espalhamento de uma dada substância, ela se torna um processo difusivo. A taxa de fluxo de massa é definido a partir da Eq 2.37.

$$\dot{Q} = -k_{dif} A \frac{dC}{dx} \quad \text{Eq 2.37}$$

Onde:

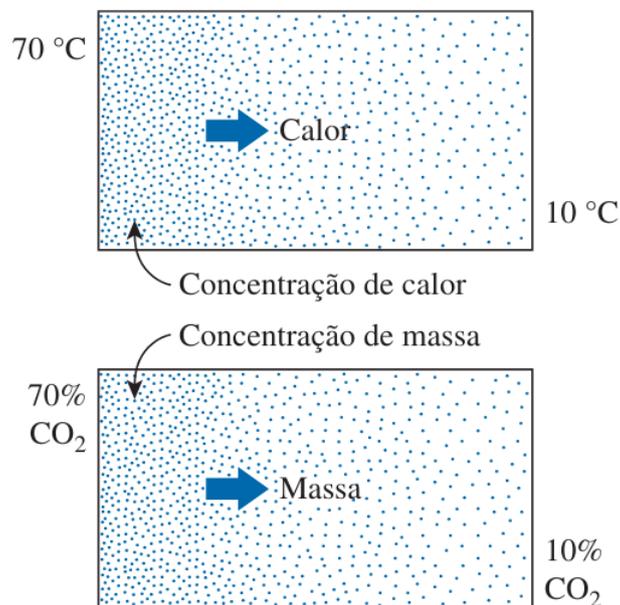
- $k_{dif}$  – Coeficiente de difusão do meio;
- $A$  – Área normal à direção do fluxo;

- $dC/dx$  – Gradiente de concentração.

O processo de difusão ocorre tanto para sólidos quanto para fluídos (líquidos e gases). Porém, por um dos parâmetros que influenciam muito a difusão ser o espaçamento molecular, a taxa de difusão é muito maior em gases do que em líquidos e sólidos [34].

A lei de Fick, para transferência de massa, é análoga a lei de Fourier, para transferência de calor. É possível fazer um paralelo entre as duas formas de transferência já que em ambos os casos a força motriz surge quando há um desequilíbrio de uma certa concentração de energia entre dois pontos no espaço. Para ambos os casos o transporte ocorre de uma região de maior concentração (calor ou massa) para um de menor concentração, como demonstrado na Figura 20. Desta forma, também é certo dizer, para ambos os casos, que quando é atingido ou simplesmente existe um equilíbrio de concentração entre diferentes parte do meio, então não há transferência de massa.

Figura 20: Analogia entre transferência de calor e massa.



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR. 2012

Diferente do calor que pode ser transportado por condução, convecção e radiação,

a massa pode ser apenas por condução (difusão) e convecção. Não existindo uma radiação de massa. Além disso, a forma das equações diferenciais de calor (Eq 2.28) e de massa (Eq 2.37) são iguais. O que torna possível obter a solução de problemas de difusão de massa a partir da solução a partir da equação de condução de calor, devendo ambos terem as mesmas condições de contorno <sup>[34]</sup>. Sendo uma característica muito importante na hora da simulação computacional quando se trata de transporte de massa, já que é possível resolver os problemas simulando um transporte calor.

Assim como as demais características, também há uma semelhança quanto a geração de calor e a geração de massa. Podendo ser originada a partir de reações homogêneas, causando a geração de uma espécie no interior do meio, e reações heterogêneas, quando a geração de espécie é formada na superfície <sup>[34]</sup>.

Apesar de a concentração de uma espécie significar a quantidade de moléculas por unidade de volume, existem diversas formas de representar essa grandeza <sup>[34]</sup>. Sendo duas principais formas de representar:

- Concentração mássica: A concentração é expressa em densidade (concentração de massa), que é a razão da massa. Para um volume  $V$  preenchido por uma mistura de gases, onde cada espécie tem uma densidade (Eq 2.38). A somatória da densidade de cada uma das espécies resulta na densidade total da mistura de gases (Eq 2.39). Além dessas duas representações, também é possível expressar a concentração de uma forma adimensional a partir da fração de massa, demonstrado na Eq 2.40 <sup>[34]</sup>.

$$\rho_i = \frac{m_i}{V} \quad \text{Eq 2.38}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \sum \rho_i \quad \text{Eq 2.39}$$

$$W_i = \frac{m_i}{m} = \frac{m_i/V}{m/V} = \frac{\rho_i}{\rho} \quad \text{Eq 2.40}$$

- Concentração molar: A concentração é expressa em concentração molar, que equivale ao número de moléculas (quantidade de gás) por volume. Para um volume  $V$  preenchido por uma mistura de gases, em que há uma certa quantidade de moléculas de uma espécie, calculada a partir da Eq 2.41. A soma de cada concentração molar das espécies presentes em uma mistura resulta na concentração molar da mistura (Eq 2.42). Assim como no caso concentração mássica, é possível representar a concentração molar de uma forma adimensional utilizando a fração molar, mostrado na Eq 2.43 <sup>[34]</sup>.

$$C_i = \frac{N_i}{V} \quad \text{Eq 2.41}$$

$$C = \frac{N}{V} = \sum N_i \quad \text{Eq 2.42}$$

$$X_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i/V}{N/V} = \frac{C_i}{C} \quad \text{Eq 2.43}$$

Na tecnologia do vácuo ao invés de utilizar a concentração de massa ou concentração molar, se utiliza a pressão parcial. Por meio da lei do gás ideal, demonstrado na Eq 2.1, é possível traçar uma relação entre as concentrações de massa (Eq 2.44) e molar (Eq 2.45) e a pressão <sup>[29]</sup>.

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_i T} \quad \text{Eq 2.44}$$

$$C_i = \frac{p_i}{RT} \quad \text{Eq 2.45}$$

Onde

- $R$  – Constante universal dos gases perfeitos;
- $R_i$  – Constante dos gases para a espécie  $i$ .

Anteriormente foi dito que a taxa de difusão aumenta com o espaçamento, tornando muito eficiente para modelagem de sistema de alto e ultra alto-vácuo, por estarem no regime molecular (onde as partículas praticamente colidem com as paredes internas do sistema). Desta forma, é possível considerar os fenômenos de transporte de gases no regime molecular como um fenômeno difusivo [1].

Com isso, é possível utilizar uma forma adaptada da lei de Fick para modelagem de sistemas de alto e ultra alto-vácuo. Como exemplo, os sistemas tubulares, que são estruturas muito utilizados tanto na ciência como também na indústria, podem ser modeladas, assim como mostrado no transporte de calor, por meio de casos particulares como: sistema com taxa de desgaseificação constante (Eq 2.46), sistema com taxa de desgaseificação transiente (Eq 2.47) [1].

$$\frac{d^2p(x,t)}{dx^2} = -\frac{q(x)}{c} \quad \text{Eq 2.46}$$

$$c \frac{d^2p(x,t)}{dx^2} = -q(x,t) + A \frac{dp(x,t)}{dt} \quad \text{Eq 2.47}$$

Onde:

- $c = CL$  – condutância específica;
- $q(x,t)$  – quantidade de gás em termos de *throughput* específico ou *throughput* por unidade de comprimento do tubo;
- $A = \frac{V}{L}$  – Volume por unidade de comprimento, algo que coincide com a área da seção transversal.

Para obter a solução da modelagem de algum problema, é necessário definir as condições de contorno e a condição inicial, que são:

- *Contorno de Dirichlet* – A pressão especificada é representada em um determinado ponto do sistema tubular, mostrado na Eq 2.48 [1];

$$p(x_A, t) = p_A(t), \forall t \geq t' \quad \text{Eq 2.48}$$

Em diversos casos de modelagem a pressão permanece constante, de forma que tenha o formato da Eq 2.49.

$$p(x_A, t) = p_A \quad \text{Eq 2.49}$$

- *Condição de Neumann* – O *throughput* é especificado em algum ponto do sistema tubular, mostrado na Eq 2.50 <sup>[1]</sup>;

$$-c \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_A} = q_A(t) \quad \text{Eq 2.50}$$

Na maioria dos casos o *throughput* é constante no tempo, tendo a forma  $q(t) = q_A$ . A condição de Neumann é muito utilizada para garantir a continuidade do *throughput* ao longo do sistema, passando por regiões do tubo que tem condutâncias específicas diferentes do restante. Ainda servindo para juntar regiões do arranjo que tiverem diferentes taxas de desgaseificação. Estes casos podem ser representados a partir das Eq 2.51, Eq 2.52, Eq 2.53.

$$c \frac{dp(x, t)}{dx} \Big|_{x=x_A} = q_A \quad \text{Eq 2.51}$$

$$c_1 \frac{dp_1(x, t)}{dx} \Big|_{x=x_A} = c_2 \frac{dp_2(x, t)}{dx} \Big|_{x=x_A} \quad \text{Eq 2.52}$$

$$c \frac{\partial p_1(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_A} = c \frac{\partial p_2(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_A} \Rightarrow \quad \text{Eq 2.53}$$

$$\frac{dp_1(x, t)}{dx} \Big|_{x=x_A} = \frac{dp_2(x, t)}{dx} \Big|_{x=x_A}$$

Também é possível estabelecer, por meio desta condição de contorno, um ponto no sistema que tenha *throughput* igual a zero, mostrado na Eq 2.54. Esse ponto pode ser uma tampa ou válvula que impede a passagem de átomos ou moléculas ou ser um ponto máximo do sistema <sup>[1]</sup>.

$$\left. \frac{dp(x, t)}{dx} \right|_{x=x_A} = 0 \quad \text{Eq 2.54}$$

- *Condição de Robin* – Existe uma dependência entre o valor da pressão e o valor do *throughput* no mesmo ponto do sistema tubular, como mostrado pela Eq 2.55 <sup>[1]</sup>.

$$\pm c \left. \frac{dp(x, t)}{dx} \right|_{x=x_A} = S_A p_A \quad \text{Eq 2.55}$$

### 2.1.6.2 Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um sistema estatístico computacional muito utilizado em simulações de sistemas físicos e matemáticos (e demais outros). Este método é baseado na geração aleatória de números com o objetivo de solucionar problemas. Por se tratar de um grande solucionador de diversos problemas existem diversos programas que implementam essa ferramenta, alguns sendo compatíveis até mesmo em computadores pessoais <sup>[37]</sup>.

O método utilizado para dinâmica de gases rarefeitos é o TPMC que é uma adaptação do modo mais geral do método de Monte Carlo, que é o DSMC, sendo ideal para o regime molecular. Este modelo tem como base a geração de moléculas com posições iniciais aleatórias, distribuição de velocidade, reflexão nas paredes e probabilidade de sorção <sup>[37]</sup>. Por meio desta técnica é possível resolver problemas, que

seriam muito complexos por meio analítico. As partículas são detectadas quando elas se colidem, tendo uma probabilidade de deixar superfície calculada por meio da Eq 2.56, com uma parede, sendo refletida de acordo com a lei Knudsen, como mostrada nas Eq 2.57 e Eq 2.58. Após as sucessivas colisões a partícula deixa o sistema a partir de um orifício, onde são posicionadas as bombas de vácuo <sup>[36]</sup>.

$$ds = d\omega\pi \cdot \cos\theta \quad \text{Eq 2.56}$$

Onde:

- $ds$  – Probabilidade de uma molécula deixar uma superfície;
- $d\omega$  – Ângulo sólido;
- $\theta$  – Ângulo entre o vetor de direção da partícula e a normal da superfície.

$$\varphi = r \text{nd} \cdot 2\pi \quad \text{Eq 2.57}$$

$$\theta = \text{sen}^{-1}(\sqrt{r\text{nd}}) \quad \text{Eq 2.58}$$

Onde:

- $\varphi$  e  $\theta$  – Ângulos azimute;
- $\text{rnd}$  – Número pseudo-aleatório gerado, por algoritmo Mersenne-Twister, uniformemente entre 0 e 1.

Em problemas reais a distribuição das velocidades das moléculas em um volume de um gás ideal, que é descrita a partir da distribuição Maxwell-Boltzmann, as partículas quando colidem com a parede ficam por um intervalo nela até entrar em equilíbrio térmico, fazendo com que quando ela é refletida tem a velocidade alterada. Na simulação isso é feito de forma que uma velocidade é gerada para cada colisão que as partículas têm com a parede <sup>[36]</sup>. A função de densidade de probabilidade das

velocidades moleculares em um volume é calculado a partir da .

$$f(v) = v^3 \exp\left(-\frac{v^2}{2a^2}\right) \frac{1}{2a^4} \quad \text{Eq 2.59}$$

Onde:

- $a = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$

Na simulação a bomba é definida a partir da probabilidade de uma partícula incidente em uma superfície ser absorvida (stick factor, que vai de 0 até 1), sendo esta a superfície selecionada para a bomba. Outra forma é adicionar a velocidade de bombeamento em uma face. As duas propriedades podem ser convertidas uma na outra, a partir da Eq 2.60 [36].

$$S = s \cdot \frac{1}{4} v_{mol} \cdot A \quad \text{Eq 2.60}$$

Onde:

- $v_{mol}$  – velocidade da molécula;
- $A$  – Área da seção;
- $s$  – parâmetro que determina se a partícula vai ser removida, que é quando um número pseudo-aleatório é menor que esse parâmetro;

A partícula quando colide com uma parede a taxa de momentum variada gera uma força aplicada sobre área, que define a pressão. Sendo assim, a soma das taxa de variação do momentum é armazenado em um contador dedicado, o passo seguinte para obter o valor da pressão é escalar o valor (da mudança de momentum) com o fator de proporção  $K_{\frac{real}{virtual}}$  e, por último, dividir pela área da face, como mostrado pela Eq 2.61

[36].

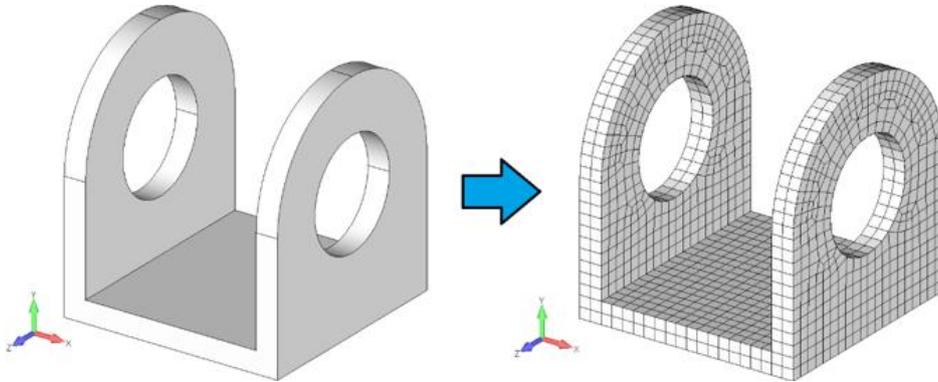
$$p = \frac{\sum dI}{dt \cdot A} = \frac{\sum I_{\perp} \cdot K_{\frac{real}{virtual}}}{A} \quad Eq 2.61$$

### 2.1.6.3 Método dos elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica matemática de análise e resolução de problemas científicos e de engenharia. Esta técnica procura solucionar sistemas, que no ponto de vista analítico, são muito complexos, para diversas áreas do conhecimento (química, física, microeletrônica, etc.). Sendo esta uma ferramenta de método numérico [38].

O MEF simplifica um sistema complexo, reduzindo o espaço geométrico (domínio) do problema em um número finito de componentes individuais, dividindo o domínio em diversos elementos menores (malha), sendo este um processo de discretização (como mostrado na Figura 21), onde é obtida a solução do problema [39]. Estes tipos de problemas muitas vezes exigem o uso de computadores. Já que por meio do uso métodos computacionais muitos problemas, principalmente os discretos, passaram a ser resolvidos sem muita dificuldade, mesmo quando há muitos elementos. Porém, os problemas contínuos, por exigirem muito do desempenho dos processadores, dependem muito da capacidade destas máquinas [40].

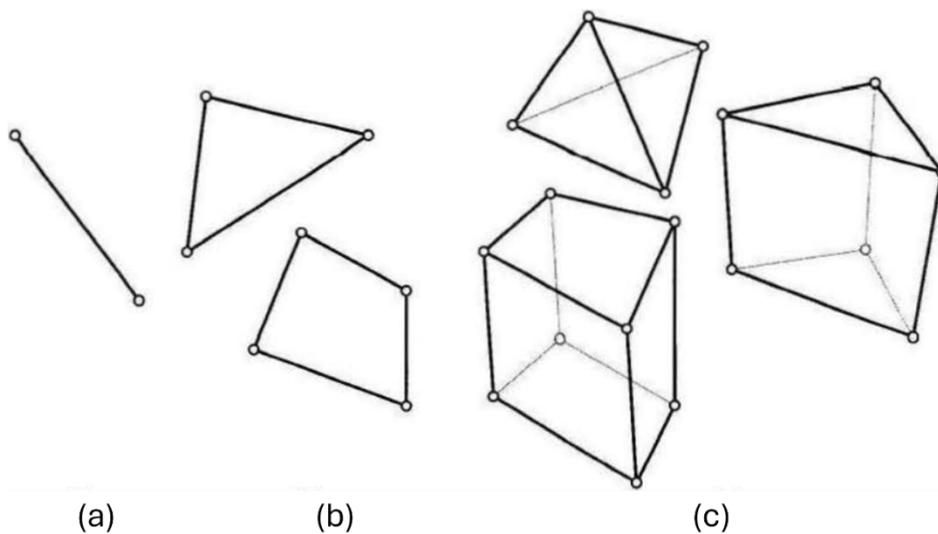
Figura 21: Discretização de uma forma geométrica.



Fonte: <https://kotengenharia.com.br/para-leigos-entenda-o-metodo-dos-elementos-finitos/>.

Antes da sua invenção, era muito comum utilizar o método de diferenças finitas, que tinha uma malha formada fileiras e colunas de linhas ortogonais <sup>[39]</sup>. Nos elementos finitos cada elemento pode ter diversos tipos de formas, como mostrado na Figura 22. Em problemas unidimensionais são utilizados elementos em forma de segmento. Pros bidimensionais geralmente os elementos são quadriláteros ou triângulos. Para problemas tridimensionais os elementos podem ser hexaedros, tetraedros ou pentaedros <sup>[38]</sup>.

Figura 22: Formas geométricas possíveis para elementos finitos. (a) unidimensional; (b) bidimensional; (c) tridimensional.



Fonte: DIAS, 2010.

Após a geração da malha, a variação da grandeza física (como por exemplo, temperatura, pressão de um gás, deformação, etc.), obtidas por equação diferencial ordinária (EDO) ou por uma equação diferencial parcial (EDP), é transformada em uma função algébrica simples, tendo variáveis dependentes dos nós de cada elemento <sup>[41]</sup>.

Por fim, as equações de cada elemento são reunidas em um sistema global de equações algébricas e são solucionados a partir dos valores nodais da grandeza física (para o caso de sistemas de vácuo a grandeza é a pressão). Estes valores nodais podem ser utilizados para estudar o sistema como um todo ou regiões específicas do domínio geométrico da questão estudada <sup>[41]</sup>.

Atualmente, existem muitas ferramentas de modelagem computacional (simulação) que utilizam do MEF para resolver problemas de diferentes níveis de dificuldades (simples ou complexos). Existem diversos exemplos destes tipos de ferramentas desde solucionadores matemáticas generalizados, como o caso do MATHCAD, MAPLE e MATLAB, até softwares com interface gráfica de usuário bem desenvolvidas, como o caso do COMSOL Multiphysics® <sup>[41]</sup>.

### **2.1.8 Limpeza de componentes para vácuo**

Um dos processos essenciais para alcançar níveis muito baixos de vácuo em um sistema é garantir que todos os componentes passem por etapas de limpeza rigorosas. O objetivo é minimizar as possíveis fontes de gás e vapor na câmara de vácuo, removendo impurezas que se aderem às superfícies dos componentes, como óleo, pó, limalhas, graxa, corantes, impressões digitais e resíduos de reações químicas, como óxidos e sulfetos. Independentemente da pressão final desejada, é fundamental levar essa etapa a sério e ter um cuidado extremo para reduzir ao máximo as fontes de impurezas nos processos realizados em ambientes de vácuo. Quanto menor a pressão final desejada, mais crucial se torna garantir um alto grau de limpeza dos componentes, como destacado na Eq 2.27, onde o parâmetro  $\beta$  está relacionado ao grau de limpeza e está

diretamente ligada à taxa de desgaseificação de um material exposto ao ambiente de vácuo, especialmente em processos de alto vácuo e ultra-alto vácuo. Em certas aplicações, como aceleradores de partículas, a limpeza é vital, pois algumas fontes de gases podem reduzir a vida útil dos materiais das paredes, comprometer a resposta dos detectores e, até mesmo, afetar os fenômenos ocorridos no acelerador [6,13,14,15].

Para a remover camadas superficiais, como finas camadas de óxido sobre o componente de vácuo, são necessários processos mecânicos e/ou químicos, tais como jateamento abrasivo, escova de aço e corrosão. É crucial considerar que essas etapas devem evitar danos à superfície dos materiais e a formação de depósitos de vapor, que podem dificultar a obtenção das pressões finais projetadas. Portanto, é necessário realizar a limpeza antes da montagem do sistema, pois juntas, superfícies parafusadas e juntas deslizantes podem formar bolsões de gás, potencialmente causando vazamentos virtuais no sistema. Antes da montagem, cada peça deve ser limpa individualmente para garantir um nível mínimo de impurezas no sistema. Para o processo de desgaseificação, recomenda-se o uso de detergentes neutros ou alcalinos para remover a contaminação grossa. Em casos de óleos e graxas de origem animal ou vegetal, podem ser utilizadas soluções químicas que formem sabões solúveis em água. Já para óleos minerais, são apropriadas soluções que dissolvam em solventes orgânicos. É essencial que o projeto do sistema seja adequado para permitir a limpeza após determinado tempo de uso, a fim de manter a confiabilidade, segurança e redução de contaminantes durante os processos de vácuo. Além disso, a seleção de materiais apropriados para a limpeza é fundamental, evitando especialmente materiais porosos que possam reter os fluídos de limpeza. Um dos métodos básicos de limpeza para sistemas de vácuo é o uso de detergentes, água e álcool isopropílico, que garantem uma limpeza eficaz. Todas as etapas de limpeza devem ser realizadas utilizando luvas cirúrgicas de látex para evitar a contaminação dos componentes com gorduras e outras sujeiras presentes nas mãos, que podem aderir às superfícies do sistema. Ao concluir o processo, é necessário tampar os orifícios com papel alumínio e permitir que os componentes sequem naturalmente [14,15].

### 2.1.7.1 Limpeza Ultrassônica

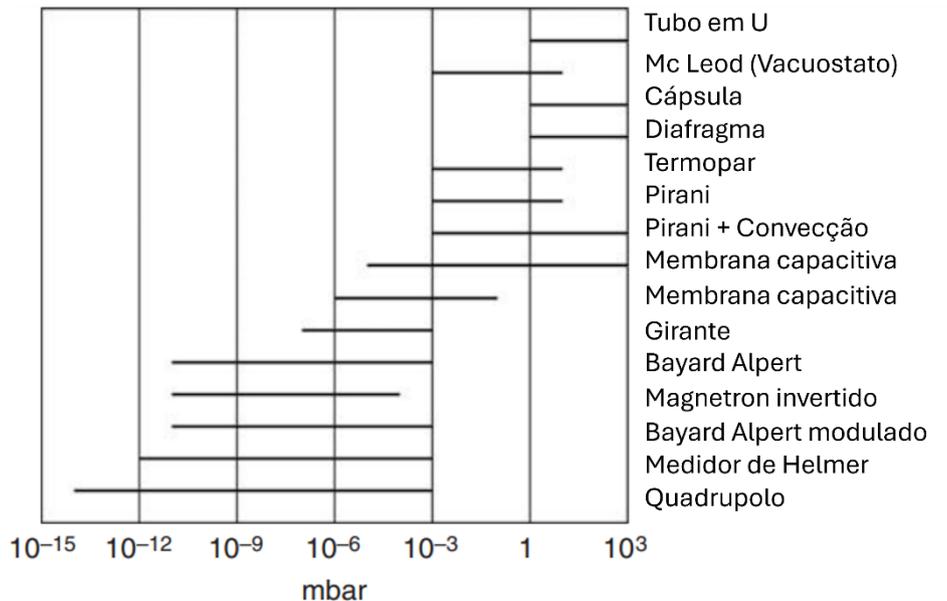
Para componentes de vácuo com formas complexas, é essencial utilizar técnicas precisas para a remoção de contaminantes superficiais, especialmente em sistemas de alto vácuo e ultra-alto vácuo, nos quais a limpeza dos itens expostos ao ambiente de vácuo é de extrema importância. Para reduzir a presença de impurezas nessas estruturas, é empregada uma técnica que envolve a imersão dos objetos em um banho de solventes e detergentes, com a aplicação de agitação ultrassônica. A agitação ultrassônica é gerada por transdutores piezoelétricos, que produzem pequenas bolhas (com cerca de 10 a 100 microns) que colidem com a superfície dos componentes, liberando energia capaz de alcançar até mesmo os orifícios mais estreitos. Dessa forma, os contaminantes superficiais são removidos, inclusive aqueles presentes em fendas ou cavidades. Essa técnica oferece uma abordagem precisa e eficiente para garantir a limpeza adequada de componentes de vácuo, assegurando que os requisitos de pureza sejam atendidos. A agitação ultrassônica proporciona uma ação minuciosa, capaz de alcançar áreas de difícil acesso, resultando em uma superfície livre de contaminantes que possam comprometer o desempenho e a confiabilidade do sistema de vácuo. Ao adotar essa técnica, é possível obter um alto nível de limpeza e preparar os componentes para operarem em condições de vácuo com total confiabilidade. É importante ressaltar que a seleção adequada de solventes e detergentes é fundamental para garantir uma remoção eficaz dos contaminantes sem prejudicar os materiais ou introduzir novas impurezas no processo de limpeza. Portanto, ao aplicar a técnica de agitação ultrassônica em um banho de solventes e detergentes, é possível alcançar um alto grau de limpeza, removendo de forma eficiente os contaminantes superficiais, mesmo em áreas de difícil acesso, e garantindo a qualidade e a integridade dos componentes utilizados em sistemas de vácuo <sup>[13]</sup>.

### 2.1.9 Medidores de vácuo

Atualmente, existem dispositivos na tecnologia do vácuo que são capazes de medir a certos intervalos de pressões, onde a faixa de pressão vai de 1013 mbar (pressão atmosférica) a  $10^{-12}$  mbar, sendo mais de 15 ordens de grandeza mensuráveis [28].

Para medir toda a faixa de vácuo é necessário utilizar diferentes tipos de medidores, por ser impossível utilizar um único instrumento para medir toda a faixa de vácuo. Cada um deles geralmente mede em um grande intervalo de ordens de grandeza [28]. Apesar de a pressão ser utilizada como referência nos medidores de vácuo, o seu conceito é aplicado apenas em aplicações para baixo vácuo. A maior parte das aplicações na ciência e tecnologia do vácuo está relacionada à quantidade de matéria ( $n$ ), ou seja, a densidade do gás presente em uma câmara de vácuo que irá determinar os fenômenos físicos no ambiente de vácuo. A equação dos gases ideais demonstra que há uma relação de proporcionalidade entre  $n$  e  $p$ , como descrito na Eq 2.1, uma vez que é considerada uma temperatura fixa como referência, temperatura ambiente, 295 K, fazendo com que a pressão sirva como uma medida de vácuo em toda a faixa<sup>[14]</sup>. Na Figura 23 estão alguns exemplos de medidores com suas faixas de funcionamento.

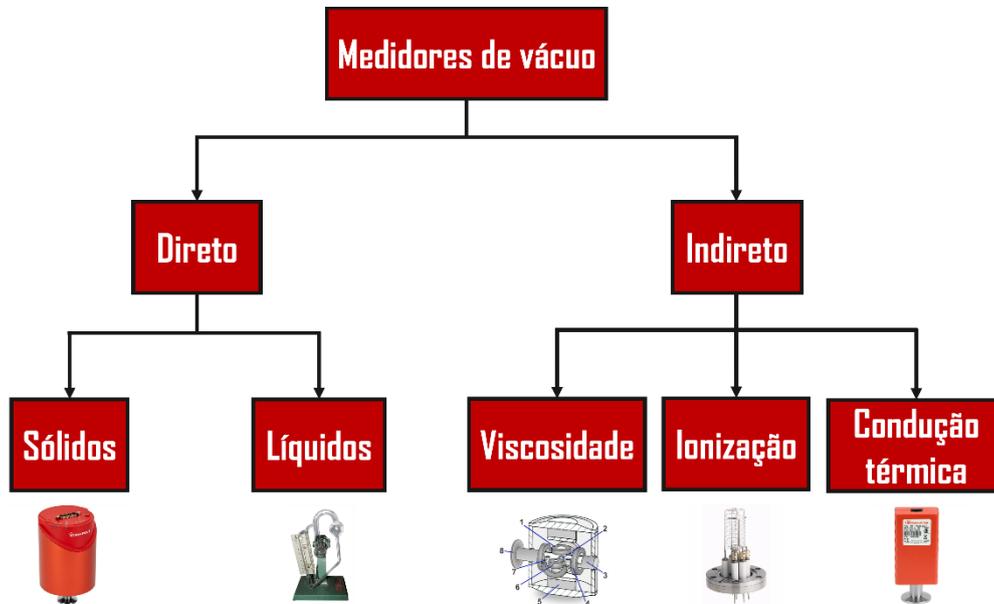
Figura 23: Faixa de funcionamento dos diferentes tipos de medidores de vácuo.



Fonte: CHAMBERS, 2004.

Existem duas formas de classificar um medidor com base na sua abordagem para medir a pressão: medidor direto ou indireto. Os medidores diretos realizam medições da força aplicada em uma determinada área de maneira direta, sendo independentes do tipo de gás e incapazes de medir pressões superiores a  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar <sup>[13]</sup>. Por outro lado, existem medidores que realizam a medição a partir de propriedades que dependem de n como por exemplo medidores que utilizam a ionização de gases dependem muito do tipo de gás, por terem certos gases muito mais fáceis de serem ionizados do que outros. Medidores que utilizam de modelos como esses são denominados como medidores indiretos, por não medirem a pressão diretamente <sup>[14]</sup>. A Figura 24 mostra alguns medidores comumente utilizados com base na classificação direta ou indireta.

Figura 24: Classificação dos medidores diretos e indiretos.



Fonte: Adaptado de - HOFFMAN; THOMAS; SINGH, 1997.

### 2.1.6.1 Medidor de Membrana Capacitiva

Os medidores diretos utilizam materiais elásticos que, expostos à uma diferença de pressão, são deformados a uma certa distância que irá depender da magnitude da pressão em que a superfície do medidor é exposta. A pressão então é medida a partir do uso de um transdutor mecânico onde os valores serão escalados a partir de um ponteiro que se move sobre uma escala com os valores de pressão ou por um transdutor eletromecânico que converte a deformação do material em um sinal elétrico, onde pode ser descrito em um painel eletrônico com o valor de pressão. Essa pressão descrita pelos medidores é medida em relação a outra pressão de referência, que pode ser uma pressão atmosférica ou também uma pressão de vácuo. Estes tipos de medidores obtêm os valores de pressão no vácuo independentemente do tipo de gás presente na atmosfera do sistema de vácuo [4].

O medidor de membrana capacitiva é um tipo de medidor que é constituído de um diafragma que pode se deformar elasticamente quando há uma diferença de pressão sobre ele, de forma que a deformação seja detectada por um transdutor de capacitância, sendo uma técnica de alta precisão. Estes tipos de medidores medem a pressão diretamente e de forma absoluta, sendo muito sensível, confiável e alta repetibilidade. Por este motivo eles são muito utilizados na indústria e nas pesquisas científica e tecnológica. Quando a pressão medida é inferior à pressão de referência, a pressão de referência é considerada nula, sendo assim o dispositivo lê um valor de pressão absoluta. A temperatura do diafragma é mantida constante para que seja obtido valores com boa precisão [4]. A maneira com que o diafragma vai se deformar quando é exposta a uma diferença de pressão depende se a borda é suportada e se é ou não pré-pressionada. Na Figura 25 está demonstrado, de maneira esquemática, duas maneiras de configuração dos diafragmas ambos estão fixados. Na Figura 25 (a) as bordas do diafragma estão fixadas por forças perpendiculares, fazendo com que quando a diferença de pressão é nula não é apresentada nenhuma tensão e nenhuma deformação no diafragma, sendo utilizada a Eq 2.62 para determinar a deformação máxima, pegando como referencial a distância máxima  $x_0$  que o centro desloca. Por outro lado no exemplo da Figura 25 (b) o diafragma é fixado por meio da aplicação de uma forte tensão apontada no sentido T por unidade de comprimento da borda, que está apontando para fora, de maneira que cause uma tensão radial no diafragma, de maneira que a deformação diminui quanto mais perto da borda. Desta forma a maior distância que o centro do diafragma desloca  $x_0$  é dada na Eq 2.63 [14].

$$x_0 = \frac{3}{16} \frac{(1 - \sigma^2)R^4}{E t^3} \Delta p \quad \text{Eq 2.62}$$

Onde:

- $X_0$ : Máximo deslocamento do centro do diafragma.
- $\sigma$ : Coeficiente de Poisson;

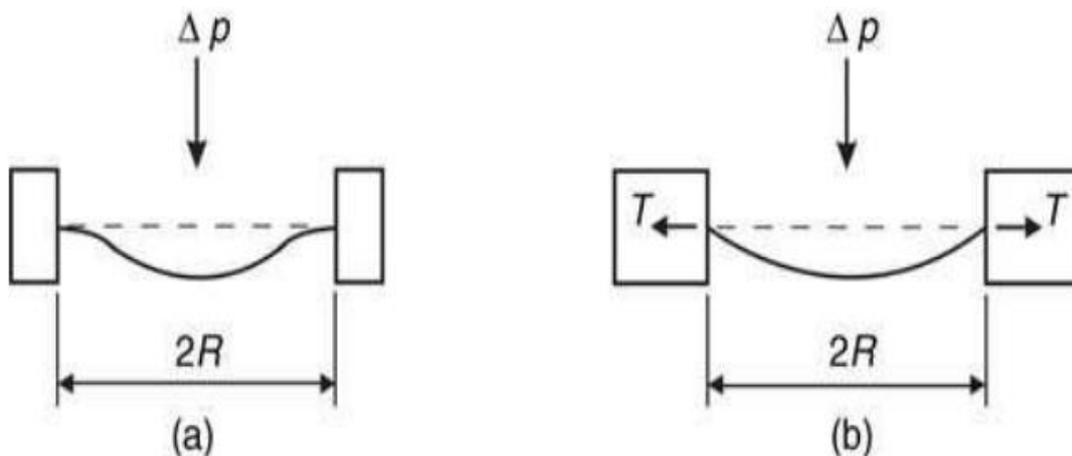
- $E$ : Módulo de elasticidade de Young;
- $t$ : Espessura do diafragma;
- $\Delta p$ : Diferença de pressão.
- $R$ : Raio da membrana.

$$x_0 = \frac{R^2}{4T} \Delta p \quad \text{Eq 2.63}$$

De forma que a frequência  $f$  de vibração de um diafragma tensionado de um dado material com densidade  $\rho$  é calculada a partir da Eq 2.64 [14].

$$f = \frac{0,7655}{2R} \sqrt{\frac{T}{\rho t}} \quad \text{Eq 2.64}$$

Figura 25: (a) - Diafragma com bordas fixadas por forças perpendiculares; (b) - Diafragma deformado durante exposição a uma diferença de pressão sobre ele.



Fonte: CHAMBERS, 2004.

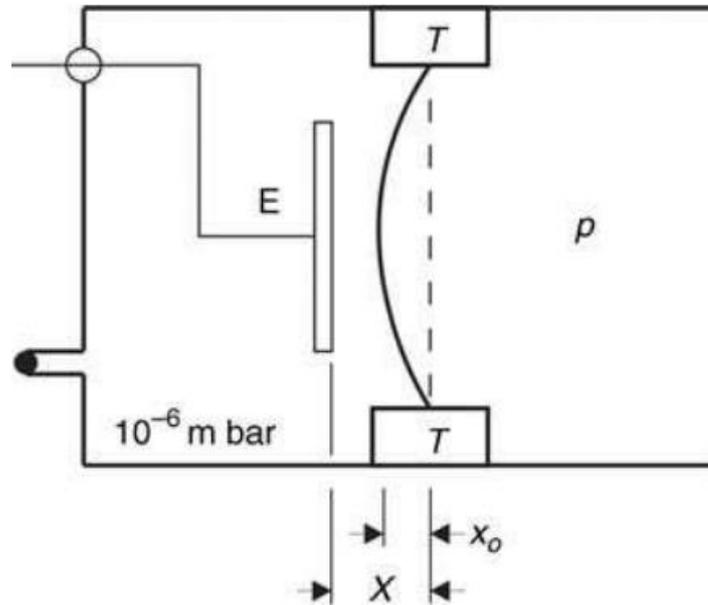
Na Figura 26 está representado os principais componentes para o funcionamento de um medidor de membrana capacitiva simples, sendo construído por uma membrana tensionado nos sentidos TT, de raio R e espessura  $t$  isola duas regiões com pressões distintas, no lado esquerdo está a alto-vácuo (aproximadamente  $10^{-6}$  mbar) e no lado direito é exposto a uma pressão  $p$ , que será a pressão que deve ser medida pelo sensor. Funcionando de uma maneira diferencial, onde o lado esquerdo serve como pressão de referência diferente de zero, fazendo com que  $\Delta p$  seja detectado. Um eletrodo E com uma área A é fixado do lado esquerdo, próximo à membrana, a pressão  $p$  deforma a membrana em direção a ele, fazendo com que a variação dessa pressão altere a capacitância. O diafragma quando não está deformado fica paralelo ao eletrodo E, fazendo com que o funcionamento seja comparado a um capacitor de placas paralelas, onde a distância  $x$  entre o centro do diafragma e o eletrodo serve como parâmetro de medida da capacitância <sup>[14]</sup>. A Eq 2.65 demonstra que a membrana serve como uma das placas de um capacitor, fazendo com que sua deflexão irá ser convertida em um sinal elétrico, que por consequência, será convertido em uma leitura da pressão  $p$  exposta no lado direito da membrana da Figura 26.

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{x - x_0} \quad \text{Eq 2.65}$$

Onde:

- $\epsilon_0$ : permissividade elétrica do vácuo ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>);
- A: Área do eletrodo;
- $x$ : Distância entre posição inicial do diafragma e o eletrodo;
- $x_0$ : Distância da deformação do diafragma.

Figura 26: Esquema simplificado de um medidor de membrana capacitiva.



Fonte: CHAMBERS, 2004.

### 2.1.6.2 Medidor de Condução Térmica

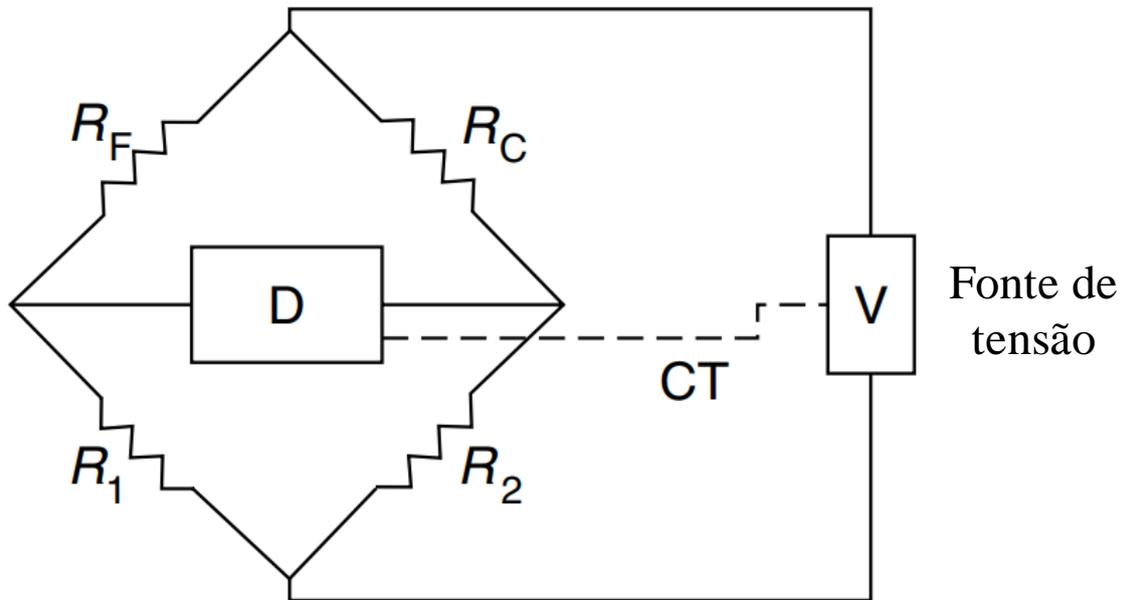
Os medidores de condutividade térmica são dispositivos usados para medição da pressão ao medir a taxa de transferência de calor entre um fio quente e o ambiente [6]. Marcello Stefano Pirani foi o responsável pelo desenvolvimento de uma técnica de medição que utilizava lâmpadas para medir pressões baixas. Os filamentos das lâmpadas eram usados como sensores de sinais elétricos, que variavam de acordo com as mudanças de pressão. Essas variações nos sinais elétricos estão relacionadas à troca de calor por condução entre o filamento e o ambiente de gás rarefeito [4].

Um medidor de condutividade térmica consiste em uma resistência metálica que é aquecida por uma corrente elétrica e um invólucro do medidor. O calor é conduzido do filamento quente para as paredes do invólucro (que estão mais frias que o filamento) através das moléculas do gás presente no invólucro. À medida que a pressão diminui, a

densidade de moléculas de gás no invólucro também diminui, o que reduz a dissipação de calor pelas moléculas e resulta em uma perda de temperatura menor no filamento. Com o aumento da temperatura no filamento metálico, também ocorre um aumento na resistência elétrica, o que resulta em uma diminuição da corrente. A corrente elétrica que passa por um resistor é utilizada para medir a densidade de moléculas no ambiente de vácuo, o que é proporcional à pressão <sup>[4]</sup>. Esses tipos de medidores baseados nesse fenômeno de transporte de energia podem medir faixas de vácuo que variam de aproximadamente 100 até um pouco menos de  $10^{-3}$  mbar <sup>[14]</sup>.

O medidor Pirani utiliza um filamento (fio), resistência elétrica  $R_F$  exposta ao ambiente de vácuo, que faz parte de um ramo de um circuito de Wheatstone, como está representado na Figura 27. A fonte de alimentação de corrente contínua (CC) de tensão  $V$  fornece corrente por meio dos ramos  $(R_F + R_1)$  e  $(R_C + R_2)$ . A corrente que atravessa o primeiro ramo  $(R_F + R_1)$  mantém o filamento com resistência  $R_F$  a uma temperatura que varia entre 100 e 150 °C acima da temperatura ambiente. O segundo ramo  $(R_C + R_2)$  utiliza ou um filamento “falso”  $R_C$  isolado e encapsulado a vácuo próximo ao do resistor de medição, ou um resistor de compensação, para que haja variação na temperatura ambiente de forma que ocorra um desequilíbrio na ponte. O medidor  $D$  serve para detectar a corrente quando está em desequilíbrio. A maneira mais fácil de medir pressão é utilizando uma tensão de condução constante  $V$ . A ponte fica equilibrada em alto vácuo onde boa parte da perda de energia é devido radiação e convecção de calor, o processo de condução térmica é irrelevante para essa faixa de pressão. Essa faixa de pressão opera abaixo do nível em que o medidor não é sensível. Para pressões acima de  $10^{-3}$  mbar a condução de calor é eficiente para que haja a perda de calor do filamento, diminuindo a temperatura no fio. Isso resulta na diminuição da resistência do filamento, de maneira que ponte entre em desequilíbrio, fazendo com que o sinal de saída emita um valor de pressão acima do limiar de sensibilidade. Os materiais utilizados para fabricar os filamentos devem ser refratários puros, geralmente são fabricados com tungstênio, a resistência elétrica desse material está fortemente relacionada com a temperatura <sup>[14]</sup>.

Figura 27: Circuito Wheatstone do medidor Pirani.



Fonte: CHAMBERS, 2004.

Nos medidores Pirani mais modernos é possível utilizar duas maneiras de configuração podendo ser por meio do fornecimento de uma corrente constante para o sistema, de maneira que é medida a resistência que irá variar conforme haja diminuição ou aumento da pressão, por outro lado, quando a temperatura é constante a potência para o filamento é medida com resistência elétrica do filamento sendo constante [14]. O sinal de saída do valor de pressão é dado eletronicamente a partir da potência fornecida [15].

### 2.1.6.3 Medidor de Catodo Frio

Em pressões muito baixas se torna impossível medir a pressão diretamente, dessa forma, é necessário utilizar de técnicas de medição indireta, ou seja, que utilizam técnicas sejam proporcionais com a variação da densidade de gases presentes em uma

câmara de vácuo. A utilização de medidores que medem a taxa ionização de gases, a partir da colisão de elétrons em gases neutros, proporciona uma técnica prática e economicamente viável na faixa do alto e ultra alto-vácuo. O medidor funciona com um sistema fechado com gás ideal, fazendo com que seja possível utilizar a lei dos gases perfeitos, descrita na Eq 2.1, para fornecer a leitura da pressão indireta <sup>[13]</sup>.

Mesmo que haja outras maneiras de ionizar um gás neutro a forma mais comercialmente viável, por ser uma técnica mais barata do que as outras, para realizar medições é por meio do uso de elétrons, que provocam um efeito cascata de ionização de um gás <sup>[13]</sup>. A maneira com que esse elétron é induzido depende da configuração adotada para a construção do medidor por ionização. A aparição de uma corrente elétrica é consequência da ionização de um gás, quando expostos a campos elétricos suficientemente altos. Essa corrente é composta por íons e elétrons que tem uma trajetória em direção aos eletrodos. A corrente elétrica é proporcional à densidade do gás no sistema, servindo como uma medida indireta da pressão. Durante o processo de ionização e excitação, ocorrem processos de relaxação e recombinação, quando uma parte das partículas ionizadas tem um elétron de uma camada externa que migra para uma camada mais interna de um átomo, isso faz com que resulte na liberação de radiação. A taxa de liberação de radiação durante esses processos está relacionada com a faixa do vácuo, também servindo como uma medida de pressão <sup>[4]</sup>.

Frans Michel Penning, em 1937, foi responsável por desenvolver o medidor de catodo frio sendo utilizado para medir pressões inferiores à faixa do pré-vácuo ( $10^{-3}$  mbar). Ele utilizou um tubo de Crookes onde a pressões abaixo de  $10^{-3}$  mbar o livre caminho médio é muito grande, fazendo com que as partículas dificilmente se colidam, isso dificulta o processo de ionização do gás. Para resolver isso ele utilizou campos magnéticos paralelos para aumentar a taxa de ionização, fazendo que elétrons e íons percorram a mesma trajetória helicoidal <sup>[22]</sup>. A Figura 28 demonstra de maneira esquemática um medidor Penning (catodo frio), onde um anodo em formato de cilíndrico (design mais modernos) está entre duas placas de catodo planas, que estão paralelas, com um campo magnético axial fornecido por um ímã permanente. Quando a descarga é estabilizada a pressão se torna proporcional à corrente de descarga  $i$ , como demonstrado na Eq 2.66 <sup>[15]</sup>.

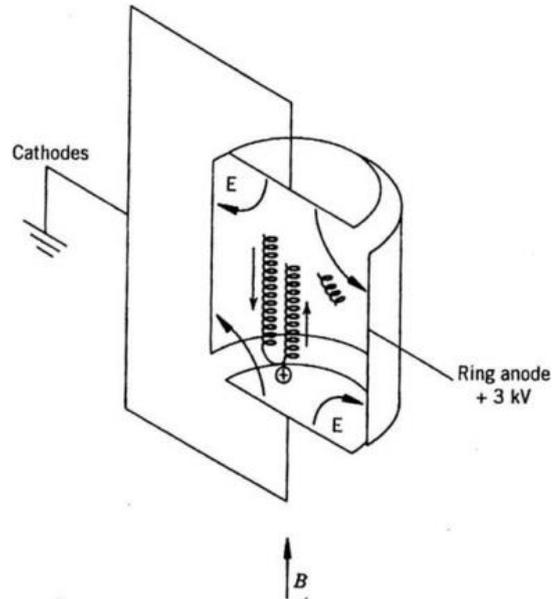
$$i = k p^n$$

Eq 2.66

Onde:

- $i$ : corrente de descarga;
- $p$ : pressão medida;
- $k$  e  $n$ : constantes.

Figura 28: Desenho esquemático do medidor Penning.

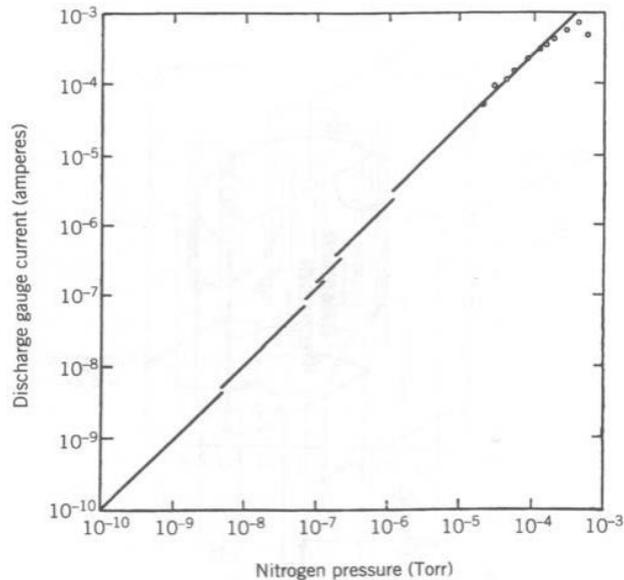


Fonte: BRANDT, 2006.

Esse tipo de medidor, durante os anos de 1937 até 1960, foi muito utilizado comercialmente para aplicações de até  $10^{-6}$  mbar por ser mais viável que outros medidores de alto vácuo, mesmo que os valores de pressão indicados pelo medidor não sejam muito precisos. De maneira que em boa parte dos sistemas de vácuo que operam nessa faixa de pressão são utilizados um medidor Pirani, de condutividade térmica, para indicar a pressão na faixa da pressão atmosférica até  $10^{-3}$  mbar e um medidor Penning para indicar a pressão na faixa de  $10^{-3}$  até  $10^{-6}$  mbar. Na Figura 29 está demonstrada a

curva corrente de descarga x pressão, demonstrando um dos problemas deste tipo de medidor que acaba apresentando uma descontinuidade em certas faixas do vácuo [2].

Figura 29: Curva de calibração do medidor Penning demonstrando a descontinuidade da curva corrente de descarga x pressão.

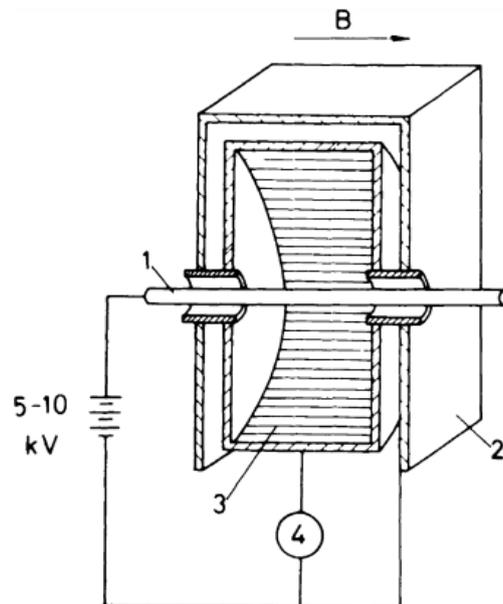


Fonte: GAMA, 2002.

Como maneira de reduzir esse problema o medidor de magnetron invertido, que também é um medidor de cátodo frio, foi desenvolvido em 1958 por Redhead e Hobson, fazendo com que este tipo de medidor alcançasse a faixa do UHV (ultra alto-vácuo). A Figura 30 está apresentado um desenho esquemático de um medidor de magnetron invertido. Um ímã permanente é responsável por fornecer um campo magnético axial para os eletrodos com geometrias cilíndricas, o cilindro externo é o cátodo e a haste central é o anodo com um potencial que varia entre 5 e 10 kV. O cátodo auxiliar é responsável por atrair as correntes de emissão de campo ao invés do cátodo, que é responsável por coletar a corrente de íons. O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético. Assim como no medidor Penning, os campos cruzados ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) fazem com que alongue a trajetória dos elétrons, seguindo em uma forma de saltos cicloidais em uma direção circunferencial. Os íons que originam durante este, por serem muito mais

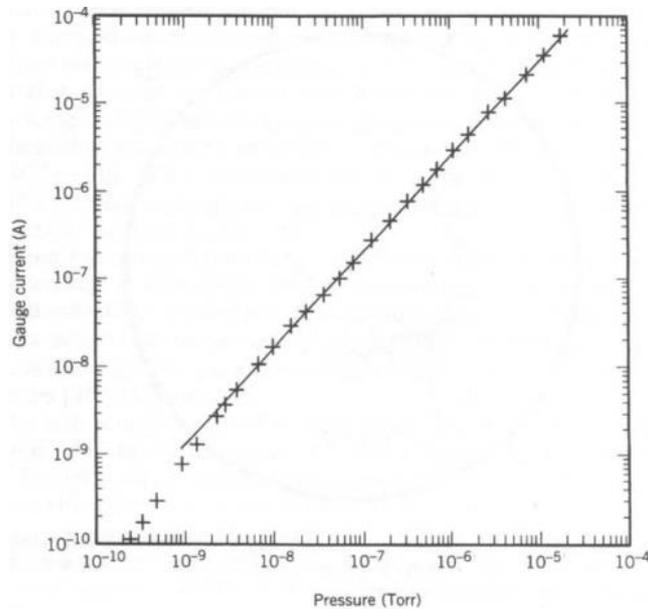
pesados que os elétrons, seguem em direção ao cátodo. Onde a proporção corrente e corrente está de acordo com a Eq 2.66,  $n$  está na faixa entre 1,05 e 1,25. Geralmente  $k$  tem um valor de algumas  $\text{mbar}^{-1}$  até  $10^{-6}$   $\text{mbar}$ , fazendo com que  $n$  seja aproximadamente 1 nessa pressão, onde os medidores deste tipo podem alcançar pressões de  $10^{-10}$   $\text{mbar}$  ou menor. O tempo para se estabelecer uma descarga em pressões baixas é longa, fazendo com que, com preferência, os medidores devam ser iniciados em alto-vácuo <sup>[14]</sup>. Este tipo de medidor não possui o mesmo problema que o medidor Penning, como demonstrado na curva da Figura 31, apresentando uma apresentação contínua da pressão <sup>[2]</sup>.

Figura 30: Representação de um medidor de catodo frio tipo magnetron invertido. 1 – Anodo; 2 – Catodo auxiliar; 3 – Coletor de íons; 4 – Amplificador de corrente de íons.



Fonte: ROTH, 1998.

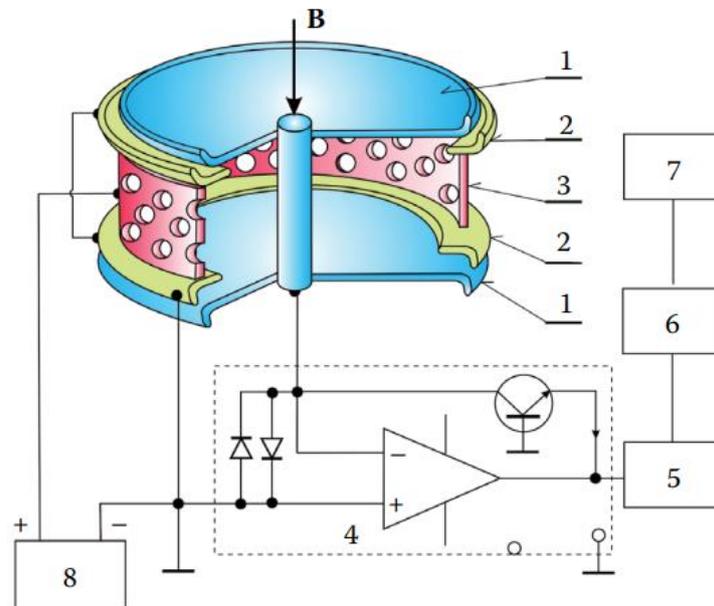
Figura 31: Curva de calibração do medidor do tipo magnetron invertido.



Fonte: GAMA, 2002.

Em 1957 Redhead desenvolveu outro tipo de medidor, semelhante ao medidor do tipo catodo frio de magnetron invertido, porém com as posições do anodo e cátodo trocados. Como está demonstrado na Figura 32, que também recebe o nome de medidor do tipo magnetron. Ele é formado por um anodo cilíndrico perfurado, para que melhore o fluxo de gás, e de um catodo com uma geometria de carretel. Assim como em todos os outros medidores de catodo frio, os campos cruzados servem para que os elétrons tenham longas trajetórias entre os eletrodos, para haver uma maior probabilidade de ionizar o gás presente no volume do medidor. Porém com uma diferença em que além dos elétrons e íons, também se somam elétrons secundários surgidos da colisão entre os íons e a superfície do catodo. Isso faz com que esse medidor consiga operar na faixa entre  $10^{-7}$  até  $10^{-13}$  mbar, acima da pressão de  $10^{-10}$  mbar ele apresenta linearidade entre corrente de descarga e pressão. Além disso, acima dessa pressão ( $10^{-10}$  mbar) esse medidor tem 10 vezes mais sensibilidade do que o do tipo magnetron invertido [2].

Figura 32: Medidor do tipo magnetron. 1 – Dois Cátodos paralelos; 2 – Dois eletrodos de proteção.



Fonte: BELLO, 2018.

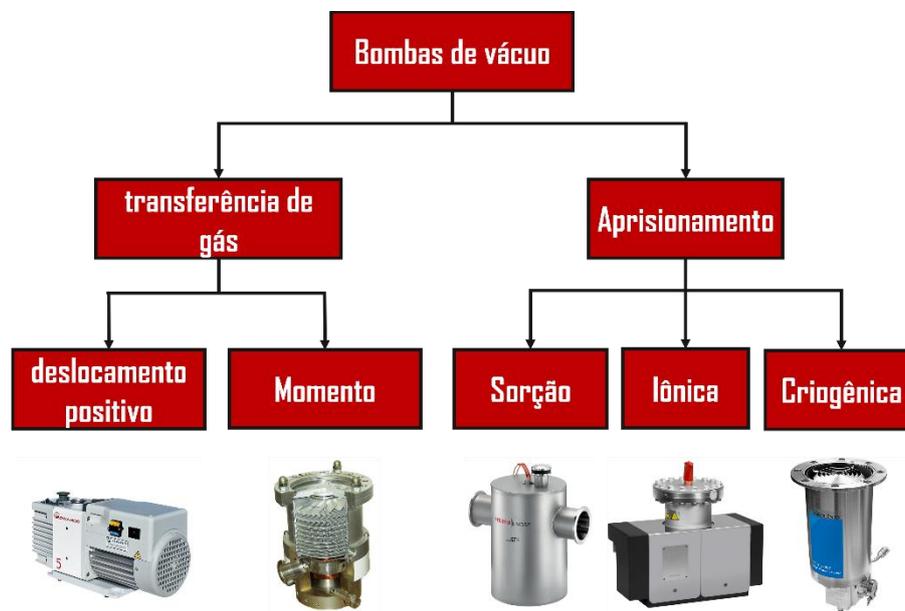
### 2.1.10 Bombas de Vácuo

Para obter um ambiente de vácuo, geralmente, é necessário retirar uma parte do gás presente em um recipiente com um dado volume. Na área da tecnologia do vácuo, há o estudo e desenvolvimento de tecnologias capazes reduzir a pressão atmosférica em até 15 ordens de magnitude (de  $10^3$  até  $10^{-12}$  mbar). Com a redução da pressão, existem fenômenos físicos que dificultam alcançar pressões muito baixas, como foi abordado anteriormente em Fontes de Gases e Vapores em um Sistema de Vácuo. Para alcançar pressões muito baixas em uma câmara é necessário, geralmente, utilizar mais que um tipo de bomba, por esses dispositivos terem uma faixa de pressão que operam com um desempenho adequado, tamanho, peso, nível de ruído, custo, etc. Por exemplo, para alcançar uma pressão final na faixa do alto-vácuo, geralmente, são utilizados pelo menos dois tipos de bombas. Sendo uma utilizada para remover a maior parte do gás no recipiente, sendo chamada de bomba de pré vácuo (grosseiro), e outra utilizada para

reduzir a pressão no recipiente a partir da remoção dos gases adsorvidos pelas paredes dos componentes de um sistema de vácuo [22].

Estes dispositivos podem ser classificados em dois grupos, podendo ser bombas que transferem o gás do volume de um recipiente para a atmosfera ou para outra bomba capaz de exaurir o gás para a atmosfera, estas são chamadas de bombas de transferência, e também podem ser classificadas como bombas de aprisionamento que transporta as moléculas de um recipiente até uma parede porosa, onde as moléculas serão adsorvidas, para ficarem presas por processos físicos ou químicos [2]. A Figura 33, de uma maneira mais ampla, a classificação dos diferentes tipos de bombas em grupos e subgrupos.

Figura 33: Classificação dos diferentes tipos de bombas de vácuo.



Fonte: Adaptado de CHAMBERS; FITCH; HALLIDAY, 1998

As bombas de transferência de gás são divididas em dois subgrupos. Sendo elas:

- **Bombas de deslocamento positivo:** realizam movimentos mecânicos repetitivos a uma certa frequência, em uma região responsável por variar o volume, fazendo com que o gás se transporte da entrada até a saída, esse processo ocorre várias vezes, tendo alta repetição. O movimento de repetição pode ser realizado por palhetas rotativas, por

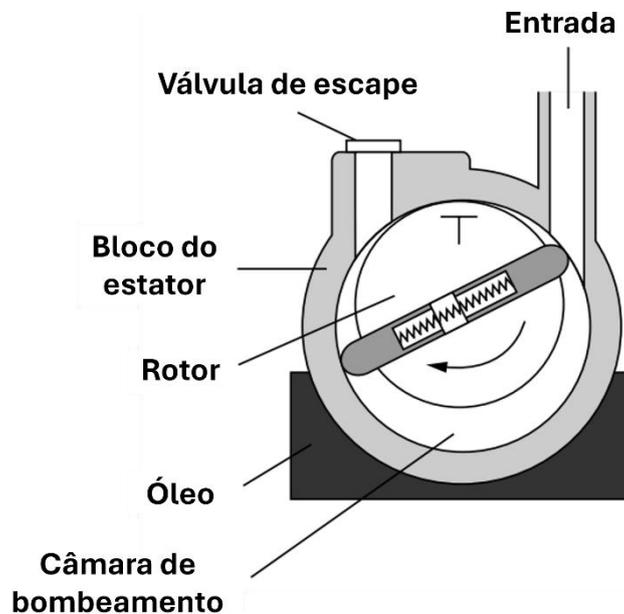
movimento de diafragmas, garras, parafusos e rolos <sup>[14]</sup>.

- **Bombas de transferência de momento:** Utilizam fluido em um fluxo de alta velocidade ou superfícies sólidas em movimento muito rápido, para que desta forma o gás se desloque da entrada para a saída continuamente, que é geralmente é uma pressão muito baixa. Muitas vezes na saída é adicionada uma bomba de deslocamento positivo tal como a bomba mecânica de palhetas, por ser uma bomba capaz de exaurir o gás para a atmosfera <sup>[14]</sup>.

### 3.1.7.1 Bomba Mecânica de Palhetas

Esta é uma das principais bombas utilizadas tanto na indústria como na ciência do vácuo, sendo amplamente utilizada como bomba primária ou como bomba de pré-vácuo em sistemas compostos <sup>[6]</sup>. Na Figura 34 está expressa os componentes principais de uma bomba mecânica de palhetas. Ela é constituída por um bloco metálico do estator imerso em óleo, uma câmara de bombeamento no formato cilíndrico, com um rotor posicionado fora do centro. O rotor possui duas fendas passantes, onde são encaixadas palhetas deslizantes que são forçadas no sentido das paredes do estator por molas, fazendo com que elas entrem em contato com as paredes. Os movimentos circulares das palhetas junto com o efeito da gravidade fazem com que seja distribuído um filme fino de óleo por toda a superfície interna da câmara de bombeamento, fazendo com que as palhetas sejam lubrificadas e as lacunas sejam estancadas. A vedação superior do rotor faz com que a entrada e a saída sejam isoladas. O tubo que liga a bomba de palhetas com o recipiente que ter a pressão reduzida serve como linha de bombeamento por onde o gás é transportado até a entrada da câmara de bombeamento. Na saída da bomba se encontra uma válvula de escape, por onde o gás é exaurido. Sendo esta, uma simples aba que se abre quando a pressão interna é maior que a pressão externa. O rotor é acoplado a um motor elétrico que rotaciona por volta de 1500 rpm. As forças centrífugas auxiliam no contato das palhetas com a parede do estator <sup>[14]</sup>.

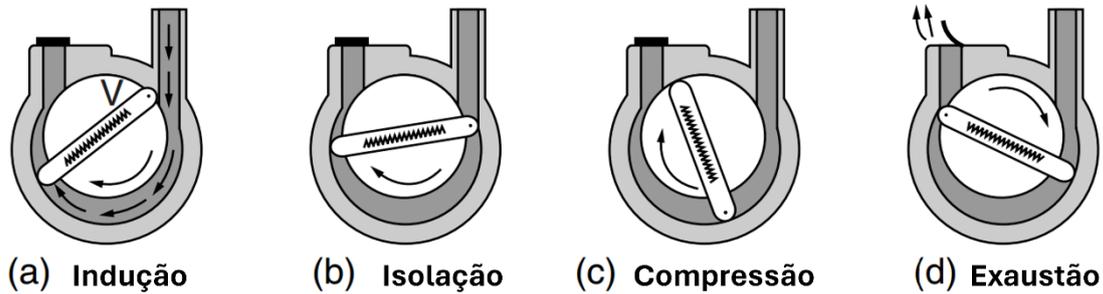
Figura 34: Componentes de uma bomba mecânica de palhetas.



Fonte: CHAMBERS, 2004.

A Figura 35 demonstra as etapas do processo bombeamento de um determinado gás pela bomba mecânica de palhetas. Na primeira etapa, Figura 35(a), o volume total se expande de maneira com que na região de menor concentração de gás, que está localizada na câmara de bombeamento, seja preenchida pelo gás presente no recipiente (região de maior concentração de gás). Esta diferença de pressão faz com que haja um gradiente no sentido positivo da bomba, região de maior para a de menor concentração de massa. Com o movimento da palheta V ela passa da posição da entrada, como na Figura 35(b), isolando o gás em forma crescente. Conforme a palheta vai rotacionando mais o volume vai diminuindo, fazendo que a pressão e a temperatura presente na região isolada do gás aumentem, como demonstrado na Figura 35(c), até chegar ao ponto mostrado na Figura 35(d) quando a pressão é grande o bastante para que a válvula de exaustão abra e o gás comprimido pelas palhetas sejam exauridos para a atmosfera. Essa etapa é realizada duas vezes a cada rotação completa <sup>[14]</sup>.

Figura 35: Etapas de bombeamento de uma bomba mecânica de palhetas.



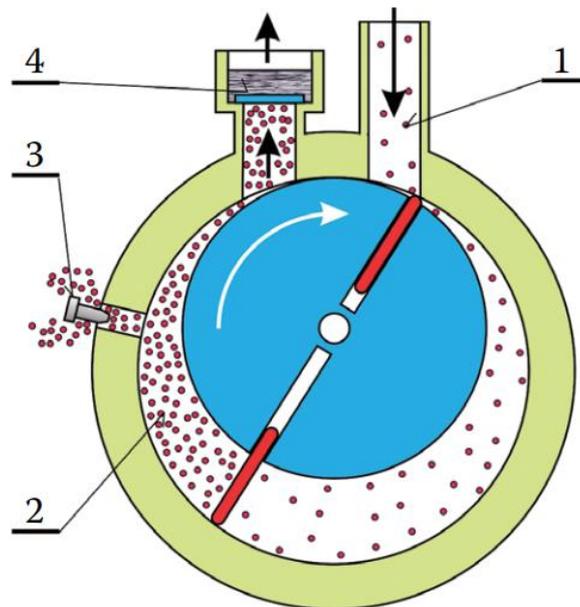
Fonte: CHAMBERS, 2004.

Além de servir como meio de lubrificação o óleo permite a transmissão de calor das palhetas, de maneira que permita o resfriamento da bomba. O atrito entre as palhetas e as paredes do estator prejudica o desempenho do óleo, por acabar se degradando, ocasionando no aumento da pressão de vapor do óleo e refluxo de vapores de óleo em direção à câmara de vácuo. São esses tipos de fontes de vazamento que determinam uma pressão final que pode ser alcançado em uma câmara ligada a este modelo de bomba, limitando o funcionamento da bomba até essa certa pressão <sup>[4]</sup>. Neste limite de pressão, a bomba não tem mais capacidade de abrir a válvula para a saída do gás, fazendo com que o gás fique preso no interior da câmara de bombeamento, fazendo com que a bomba consiga apenas re-expandir e re-comprimir este mesmo gás, sem que seja possível baixar mais a pressão do recipiente conectado à bomba <sup>[2]</sup>.

A presença de certos vapores durante o processo de bombeamento prejudica o funcionamento da bomba, principalmente quando na atmosfera de um dado volume de um recipiente contenha vapor de água, podendo ocorrer o processo de condensação (passagem do estado gasoso para o líquido) da água. A água no estado líquido deteriora o óleo, que perde a propriedade de lubrificar e resfriar as palhetas do sistema <sup>[14]</sup>. Além disso, pela água se condensar a uma pressão de 199,5 mbar, quando a bomba está a 60 ° C, o processo de evacuar o vapor da água se torna complicado. Principalmente pela transição da água em vapor para água líquida ocorre em uma pressão bem inferior a pressão necessária para abrir a válvula de saída do gás <sup>[4]</sup>.

Para solucionar isso é necessário utilizar válvulas, como a descrita na Figura 36, capazes de injetar gases da atmosfera, que deve ocorrer durante a etapa pós isolamento, servindo para comprimir o gás presente na fase de isolamento. Este processo foi introduzido por Wolfgang Gaede em 1935, onde serviu para facilitar a expulsão de certos vapores do interior da câmara de bombeamento até ao reservatório de óleo. Este processo aumenta a vida útil do óleo presente na câmara de bombeamento e permite a evacuação de parte dos gases que seriam dissolvidos pelo óleo [4].

Figura 36: Bomba mecânica de palhetas com válvula de deslocamento de gás. 1 - Conexão da entrada da câmara de bombeamento; 2 - Gás comprimido; 3 - Válvula de deslocamento de gás; 4 - Válvula de saída.



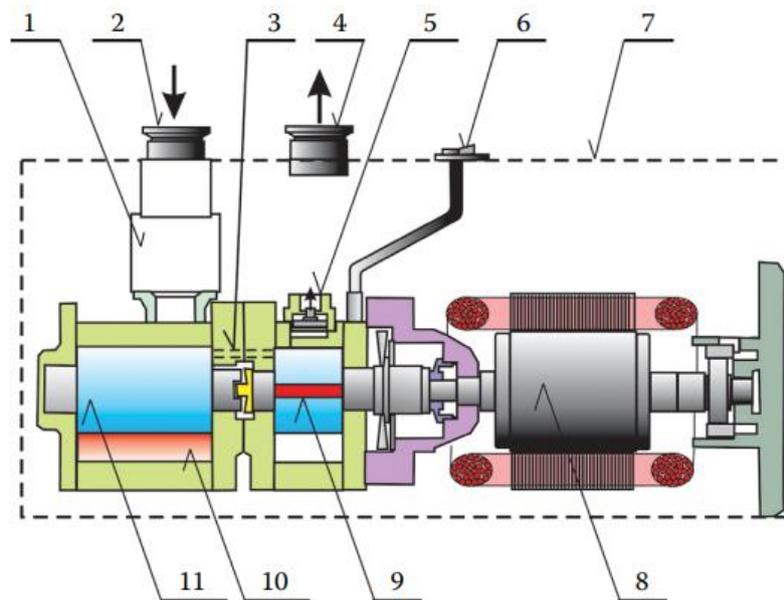
Fonte: BELLO, 2018.

O volume da câmara de bombeamento e a frequência relacionada à rotação das palhetas determinam a quantidade de gás que a bomba consegue exaurir de um sistema. Nos modelos mais simples de bombas desse tipo (um estágio) o desempenho de bombeamento de um determinado gás é quase constante até pressões de entradas, por volta de 10 mbar (aproximadamente 80% da capacidade de deslocar os gases de um recipiente), e conforme a pressão o desempenho da bomba cai até zero em uma pressão final de  $10^{-1}$  mbar. O recuo do gás contribui para isso ocorrer, além dos gases

desorvidos pelo óleo serem liberados na atmosfera do vácuo [14].

Como meio de alcançar uma pressão mínima, ainda menor do que nas bombas de um estágio, foi desenvolvido uma bomba com o mesmo mecanismo onde se utilizaram dois estágios em série não sendo necessária a utilização de uma válvula de deslocamento de gás entre os dois estágios, como expresso na Figura 37 [14]. A bomba de dois estágios é constituída de uma bomba de alto-vácuo (primeiro estágio) e um estágio de baixo vácuo (segundo estágio). O primeiro estágio é responsável por evacuar os gases transportados no interior de uma câmara de vácuo enquanto o segundo estágio serve de apoio para o primeiro estágio, utilizando uma válvula para evacuar os gases para a atmosfera. Por ambos os rotores serem acoplados a um mesmo eixo as rotações são as mesmas. Essas bombas são configuradas de maneira que quando o primeiro estágio está expulsando o gás o segundo estágio está admitindo [4].

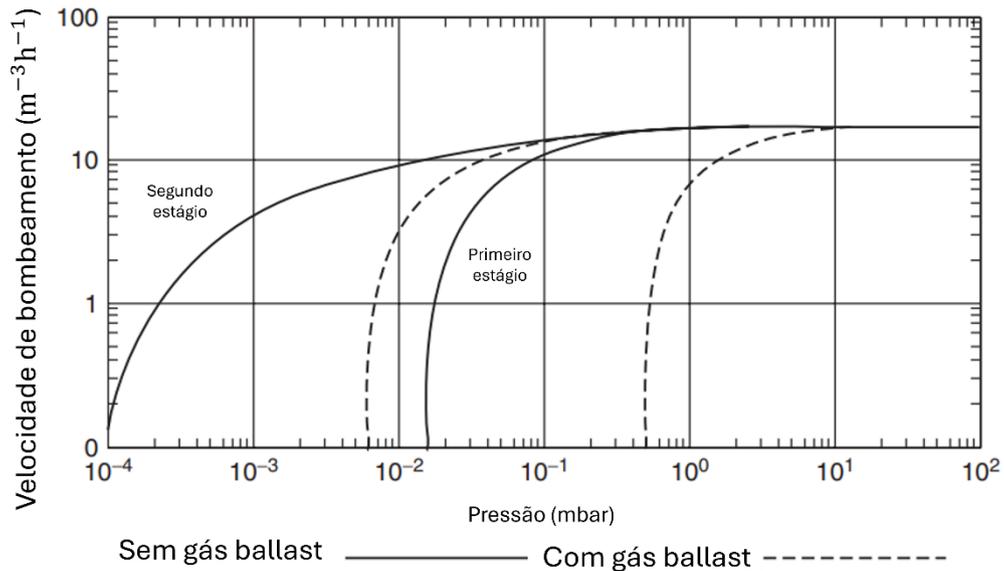
Figura 37: Bomba mecânica de palhetas de duplo estágio. 1 – Válvula que impede vazamento de óleo no sistema de vácuo; 2 – Entrada; 3 – Conexão interna entre primeiro e segundo estágios; 4 – Porta de saída; 5 – Válvula de descarga de gás; 6 – Válvula de lastro de gás; 7 – Invólucro da bomba; 8 – motor elétrico; 9 – Rotor do segundo estágio; 10 – Palhetas; 11 – Rotor do primeiro estágio.



Fonte: BELLO, 2018.

As curvas obtidas de modelos de bombas mecânicas de palhetas para aplicações laboratoriais são exibidas na Figura 38, onde também está exposta as curvas referentes às bombas que utilizam válvulas de deslocamento de gás (gas ballast).

Figura 38: Curvas de velocidade de bombeamento de bombas de um e dois estágios.



Fonte: CHAMBERS, 2004

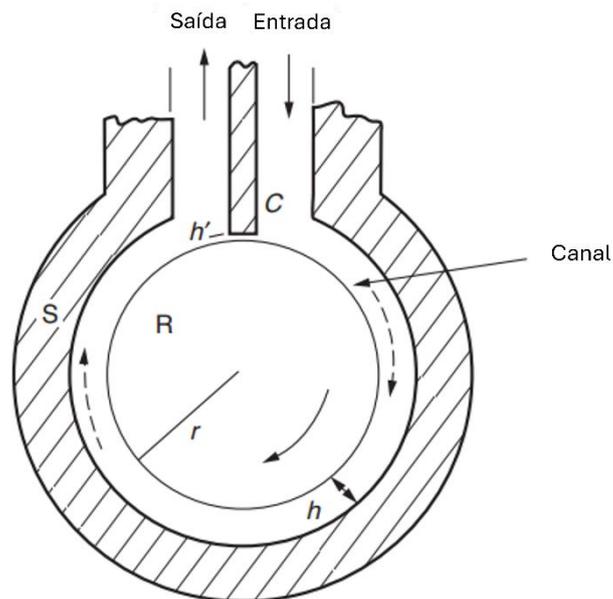
### 3.1.7.2 Bomba Turbo-Drag

No regime de escoamento molecular, as partículas se movimentam livremente e tem trajetórias aleatórias geralmente acabam se colidindo mais entre as paredes do que entre outras partículas, as partículas se atritam com as paredes e acabam desacelerando. Com uma superfície em movimento rápido é possível utilizar o mesmo fenômeno de atrito para evacuar partículas por arraste. Este tipo de fenômeno é a base física de funcionamento de bombas moleculares do tipo Drag <sup>[4]</sup>. Este modelo de bomba foi criado por Gaede em 1913 e por muito tempo foi deixado para trás por ser mais

complicado de ser fabricar do que a bomba difusora, que dominou o mercado do alto-vácuo por mais de 70 anos. Porém teve uma grande ampliação na utilização destes modelos de bombas ultimamente, conforme o campo da computação voltada a usinagem evoluiu [14]. A velocidade de bombeamento desse tipo de bomba é quantificada a partir da geometria do canal intermediário e a velocidade da parede da bomba em movimento [30].

O funcionamento de uma bomba molecular tipo drag está descrita no corte de seção transversal da Figura 39. No processo de bombeamento o rotor cilíndrico R rotaciona em alta velocidade no interior de um estator cilíndrico oco S, coaxial, onde o gás percorre o canal entre R e S, na direção representada pelas setas, por efeito do arraste que é causado pelo rotor. O componente C é conhecido como “Skimmer” e serve para isolar a entrada da saída da bomba.  $h$  é a espessura do canal por onde o gás atravessa o sistema da bomba [14]. Existem muitos tipos de moleculares por arraste, porém todas tem o mesmo princípio de transferir o momento das superfícies em movimento rápido para partículas gasosas [4].

Figura 39: Configuração de uma bomba molecular tipo drag.



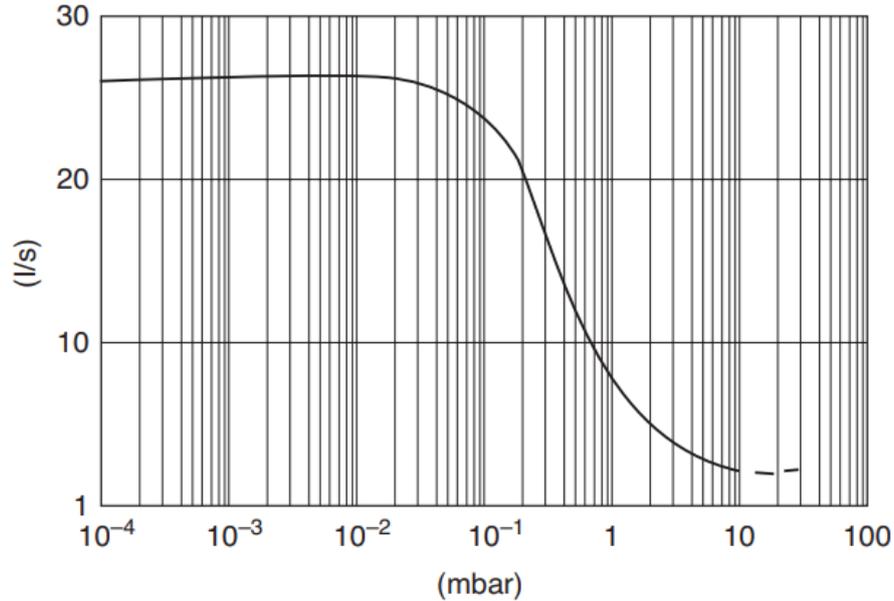
Fonte: CHAMBERS, 2004.

Uma grande vantagem desse tipo de bomba é que elas conseguem operar no regime de escoamento laminar, entre  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$  mbar a bomba tem funcionamento máximo. Permitindo uma pressão de entrada de operação contínua de aproximadamente 10 mbar e uma pressão de exaustão de cerca de 50 mbar, isso faz com que ela não consiga “expulsar” o gás para atmosfera sozinha sendo necessário a assistência de uma bomba semelhante à bomba mecânica de palhetas [4].

A capacidade que a bomba tem de comprimir o gás no regime molecular varia exponencialmente da relação entre o comprimento do caminho de bombeamento e a espessura do canal. A pequena espessura faz com que a condutância por onde o gás passa seja muito pequena, isso é um fator limitador da velocidade de bombeamento. Uma das maneiras de aumentar a velocidade de bombeamento é aumentando a espessura do canal por onde o gás percorre da entrada até a exaustão do gás. Evitando com que haja o retorno de algumas partículas devido a condutância do canal ter aumentado [4]. Na Figura 40 está representada a faixa em que uma bomba do tipo Drag consegue exaurir o gás.

As bombas de arraste, em comparação com outras bombas de alto-vácuo, tem uma velocidade de bombeamento muito mais baixo além também da rotação que geralmente alcança até 20.000 rpm e uma velocidade de bombeamento entre 0,5 e 75 L/s. Como uma opção mais moderna, existem hoje em dia bombas híbridas que acoplam a bomba de arraste como um segundo estágio da bomba turbomolecular. Este tipo de construção aumenta a área de bombeamento, além de ter uma velocidade de rotação alta, entre 30.000 e 60.000 rpm. A pressão final (mínima) que essas bombas conseguem alcançar é de até  $10^{-6}$  mbar [4].

Figura 40: Velocidade de bombeamento de uma Bomba Turbo Drag.



Fonte: BELLO, 2018

## 2.2 Projetos Mecânicos

Um projeto é uma série de atividades que são planejadas com uma data de início e término, com o objetivo de atingir metas específicas, geralmente relacionadas ao desenvolvimento de produtos e serviços. Essas metas são estabelecidas com base em propostas preliminares de recursos e devem levar em consideração limites e restrições relacionadas ao trabalho a ser realizado. Para concluir o projeto e entregar o produto final, é fundamental especificar o custo, a qualidade e o prazo dos resultados das atividades. Em um projeto, é essencial definir claramente o escopo, os objetivos e as expectativas do cliente ou stakeholders envolvidos. Isso inclui estabelecer os recursos necessários, como mão de obra, materiais e equipamentos, e determinar uma estimativa realista de tempo e custo para a conclusão das atividades. Além disso, a qualidade é um elemento crucial em um projeto, garantindo que os resultados atendam aos requisitos e padrões estabelecidos. Isso envolve a definição de critérios de qualidade, o

estabelecimento de processos de controle e a realização de testes ao longo do projeto. Por fim, o prazo é um aspecto fundamental a ser considerado em um projeto. É necessário estabelecer um cronograma claro, com marcos e prazos intermediários, a fim de garantir o progresso adequado e a conclusão dentro do prazo estipulado. O gerenciamento eficiente do tempo é essencial para evitar atrasos e garantir a entrega pontual do produto final <sup>[12]</sup>.

O projeto mecânico é uma abordagem eficiente para a criação de peças, objetos ou novos equipamentos, com base em dados fundamentais que impulsionam o desenvolvimento eficaz de um produto. É uma disciplina que visa a administração de soluções e possíveis imprevistos, com o objetivo de projetar um equipamento que não apenas cumpra as funções estabelecidas, mas também garanta a segurança por meio de cálculos estruturais e dimensionamento adequado das peças, resultando em um design robusto e confiável. Durante o processo de projeto mecânico, uma parte significativa das etapas é realizada com o auxílio de softwares reconhecidos pelo mercado. Essas ferramentas digitais permitem a modelagem tridimensional, a simulação de forças e movimento, além de facilitarem a análise estrutural e a avaliação de desempenho do equipamento em diferentes cenários. Ao utilizar software especializado, os engenheiros podem explorar virtualmente diversas soluções, otimizar o design, identificar potenciais problemas e realizar ajustes necessários antes da fabricação física do equipamento. Isso resulta em maior eficiência, economia de tempo e redução de custos ao longo do processo de desenvolvimento. No entanto, vale ressaltar que o uso de softwares não substitui o conhecimento e a experiência dos engenheiros no projeto mecânico. Eles desempenham um papel crucial na interpretação dos resultados, na tomada de decisões informadas e na consideração de fatores não quantificáveis, como a estética e a ergonomia. Em suma, o projeto mecânico é uma abordagem eficiente e detalhada para a criação de equipamentos, utilizando dados fundamentais e ferramentas de software especializadas. Ele permite a garantia de segurança, o cumprimento das especificações funcionais e a otimização do design, resultando em produtos confiáveis, eficientes e de alta qualidade <sup>[16,17]</sup>.

A utilização de softwares durante os projetos proporciona uma representação mais realista e visualmente atraente das ideias. Os desenhos técnicos gerados permitem um

melhor entendimento da execução e funcionamento dos componentes mecânicos. Além disso, esses desenhos são essenciais para fornecer dados fundamentais do projeto, como representações gráficas precisas das medidas dimensionais e formas, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Ao adotar essa abordagem, os clientes e os profissionais de diversos setores envolvidos no projeto podem compreender de forma clara e concisa os detalhes do projeto final. Os desenhos técnicos ajudam a eliminar ambiguidades e possíveis interpretações equivocadas, contribuindo para uma comunicação eficiente entre todas as partes interessadas. Ao seguir o padrão da ABNT, as representações gráficas no desenho técnico são padronizadas, facilitando a leitura e a interpretação por parte dos envolvidos. Isso garante uma consistência nas informações e ajuda a evitar erros durante a fabricação ou montagem do equipamento. Além disso, os softwares de projeto permitem a criação de visualizações tridimensionais, animações e até simulações de movimento, proporcionando uma representação mais realista do funcionamento do projeto. Isso é especialmente útil para a validação de conceitos, a identificação de interferências e a otimização do design antes da fase de produção [12,16].

### **2.2.1 Aço Inoxidável AISI 304-L**

Em 1936, a publicação abrangente de Springer em Berlim marcou um marco significativo ao abordar os materiais adequados para aplicações em ambiente de alto vácuo. Neste trabalho pioneiro, foi destacado que os materiais destinados à tecnologia do vácuo deveriam apresentar características específicas, como facilidade de degaseificação, resistência adequada a baixas e altas temperaturas, coeficientes de expansão térmica correspondentes e alta pureza. Inicialmente, os principais materiais utilizados eram vidros e cerâmicos. No entanto, nos últimos tempos, houve um redirecionamento nos materiais de referência, com ênfase crescente em metais, em particular o aço inoxidável austenítico. Dentre os materiais metálicos, o aço inoxidável

austenítico se destaca como o mais adequado e amplamente utilizado em dispositivos de vácuo. O aço inoxidável austenítico apresenta uma combinação de propriedades que o tornam ideal para aplicações em vácuo. Em primeiro lugar, sua resistência à corrosão é notável, o que é fundamental em ambientes de vácuo onde a presença de umidade e gases pode acelerar a corrosão de materiais. Além disso, o aço inoxidável austenítico exibe boa resistência mecânica tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas de serviço. Outra vantagem do aço inoxidável austenítico é a sua superfície, que é relativamente fácil de limpar, sendo um atributo valioso na tecnologia do vácuo. Sua tenacidade, capacidade de manter as propriedades durante o serviço, características magnéticas, rigidez e estabilidade dimensional também são fatores essenciais que o tornam uma escolha preferencial para aplicações em vácuo <sup>[13]</sup>.

O aço inoxidável é um tipo de aço altamente resistente à corrosão, incluindo a corrosão conhecida como ferrugem, mesmo quando exposto a diversos ambientes, especialmente a atmosfera ambiente. Sua composição é principalmente baseada em cromo (Cr), com uma concentração mínima de 11% de cromo. No entanto, a adição de níquel (Ni) e molibdênio (Mo) pode melhorar ainda mais a resistência à corrosão. Essas adições reduzem a reatividade da estrutura do aço, impedindo que impurezas se liguem à sua superfície. Isso desempenha um papel fundamental na obtenção de uma alta resistência à corrosão. É importante mencionar que o aço inoxidável pode ser classificado em três principais categorias: martensíticos, ferríticos e austeníticos. Essas classificações variam de acordo com a composição química, propriedades mecânicas típicas e aplicações específicas <sup>[12,18]</sup>.

- **Martensíticos** – Os aços inoxidáveis do tipo Fe-Cr-C são conhecidos por possuírem uma estrutura martensítica quando endurecidos. Além disso, eles apresentam propriedades ferromagnéticas e uma notável resistência à corrosão em ambientes agressivos. A concentração de cromo nesses aços varia entre 10,5% e 18%, sendo importante controlar a concentração de carbono para que não ultrapasse 1,2%. Esses aços têm a maior quantidade de carbono em comparação com outros grupos de aços inoxidáveis. Os teores de cromo e carbono desempenham um papel crucial na manutenção da estrutura martensítica, tornando fundamental o cuidado com a concentração desses elementos principais. Além disso, elementos adicionais podem ser

utilizados para complementar as propriedades desses materiais. Por exemplo, pode-se adicionar nióbio (Nb), silício (Si), tungstênio (W) e vanádio (V), ou até mesmo pequena quantidade de níquel (Ni), que é um elemento extremamente útil para melhorar a resistência à corrosão. Também é possível adicionar enxofre (S) e selênio (Se) para facilitar a usinagem do material [12,19].

- **Ferríticos** – Os aços inoxidáveis são ligas compostas principalmente por ferro e cromo, com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). O teor de cromo nesses aços varia de aproximadamente 11% a 30% na composição das ferritas, sendo acompanhado por baixos teores de carbono, inferiores a 0,5%. Outros materiais aditivos em quantidades menores são adicionados para modificar as propriedades químicas e físicas dessas ligas. Além disso, a adição de enxofre e selênio também desempenha um papel significativo, assim como nos materiais martensíticos, ao facilitar os processos de usinagem. Esses elementos auxiliam na melhora da usinabilidade desses aços, tornando-os mais fáceis de serem trabalhados [12,19].

- **Austeníticos** – Essa classe de aços inoxidáveis é extremamente importante devido à sua capacidade de não magnetização mesmo quando exposta a um campo magnético externo, graças ao processo de recozimento. Além disso, esses aços apresentam uma ampla gama de aplicações e variedades, tornando-os a classe mais comum de aços inoxidáveis em termos de diversidade de uso. Eles possuem excelentes propriedades criogênicas, mecânicas e de resistência à corrosão em altas temperaturas. A concentração de cromo nesses aços varia de 17% a 26%, enquanto o teor de níquel deve ser igual ou inferior a 35% e o de manganês deve ser igual ou inferior a 15%. Para aprimorar a resistência à corrosão, podem ser adicionados elementos como molibdênio, cobre silício, alumínio, titânio e nióbio. Essas adições contribuem para melhorar as propriedades de resistência à corrosão desses aços em ambientes desafiadores [12,19].

## 2.2.2 Software CAD, Autodesk Inventor

Os desenhos voltados para trabalhos de engenharia e tecnologia, também conhecidos como desenhos técnicos, devem expressar de forma completa um item de engenharia, seguindo normas de padronização relacionadas ao layout, nomenclatura, aparência, tamanho, entre outros aspectos [20].

Com o avanço das tecnologias empregadas no projeto de desenhos técnicos, os processos que antes dependiam de instrumentos como régua, lapiseira e esquadro, exigindo alta precisão, passaram a ser automatizados e simplificados por meio do uso de softwares baseados no sistema de desenho assistido por computador (CAD) [20].

O CAD, sigla em inglês para Computer Aided Design, traduzido para o português como desenho assistido por computador, é uma tecnologia utilizada para criar projetos em 3D com o auxílio de um software de computador. O Autodesk Inventor, desenvolvido pela empresa Autodesk Inc., é um software que oferece um pacote CAD completo, com diversas ferramentas de engenharia e design. Além de possibilitar o projeto de peças em 2D e 3D, o software permite realizar simulações de movimento, velocidade, aceleração e análise do funcionamento da peça, bem como fenômenos de estresse mecânico. É possível selecionar diversos componentes da biblioteca interna do software para utilização em um projeto. Todos os componentes simulam e auxiliam na criação de peças semelhantes às que serão produzidas no mundo físico [12,20].

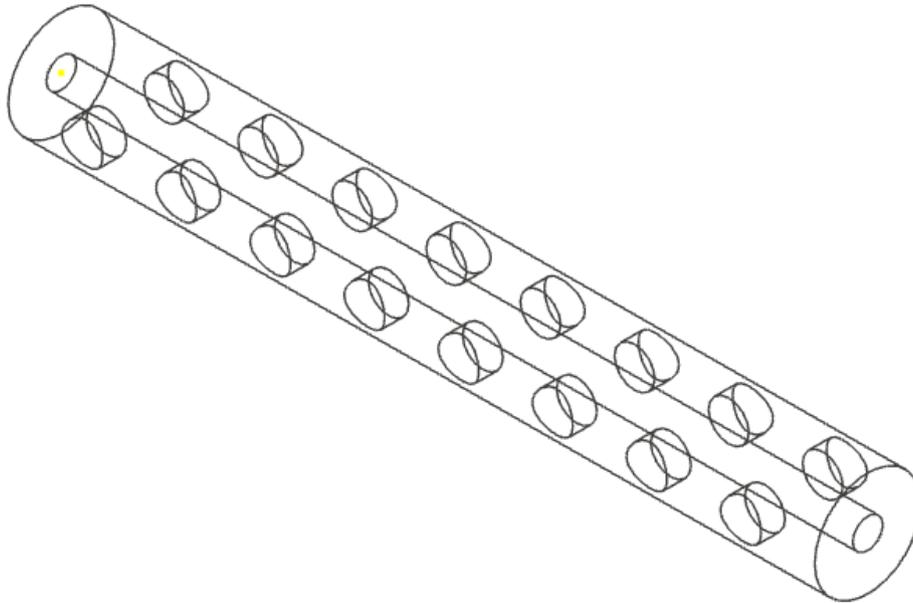
Todos os sistemas CAD têm como base a construção vetorial de formas, permitindo o projeto de curvas bidimensionais (gerando desenhos 2D) e formas tridimensionais (criando modelos 3D). O Autodesk Inventor oferece duas opções de criação, utilizando método de modelagem ou o método de construção [12].

O método de modelagem é uma técnica que permite o programa trabalhar com geometrias tridimensionais. Nos sistemas CAD, é possível desenvolver formas tridimensionais de três tipos distintos [12].

- **Estrutura de arame (*wireframes*)** – Os modelos formados por arestas e pontos permitem a criação de modelos 3D. Através da conexão de arestas em pontos específicos, é possível construir uma representação econômica de um objeto tridimensional. O banco de dados do computador contém as coordenadas necessárias para desenvolver essa forma, permitindo a visualização do modelo 3D em várias

direções. Esses modelos não possuem superfície e frequentemente apresentam problemas de ambiguidade. Na Figura 41, é mostrada uma estrutura de arame resultante da conexão de arestas [12,20].

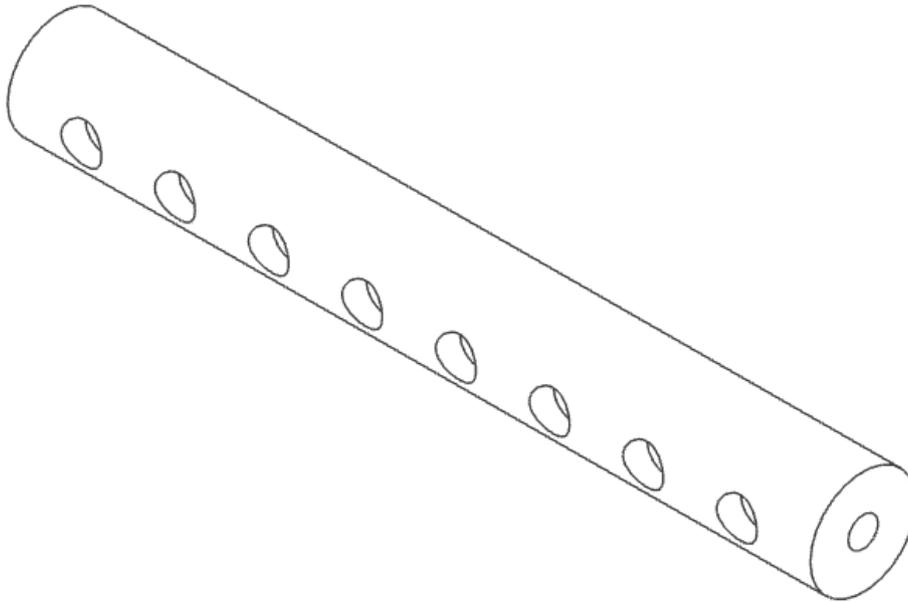
Figura 41: Exemplo de modelamento por wireframe.



Fonte: autor.

- **Superfície** – Nesse tipo de modelo, a estrutura de arame (wireframes) é organizada e agrupada para formar a superfície do objeto tridimensional. Essa técnica se concentra apenas na representação da superfície, sem preencher o volume interno do modelo um exemplo dessa abordagem é ilustrado na Figura 42 [20].

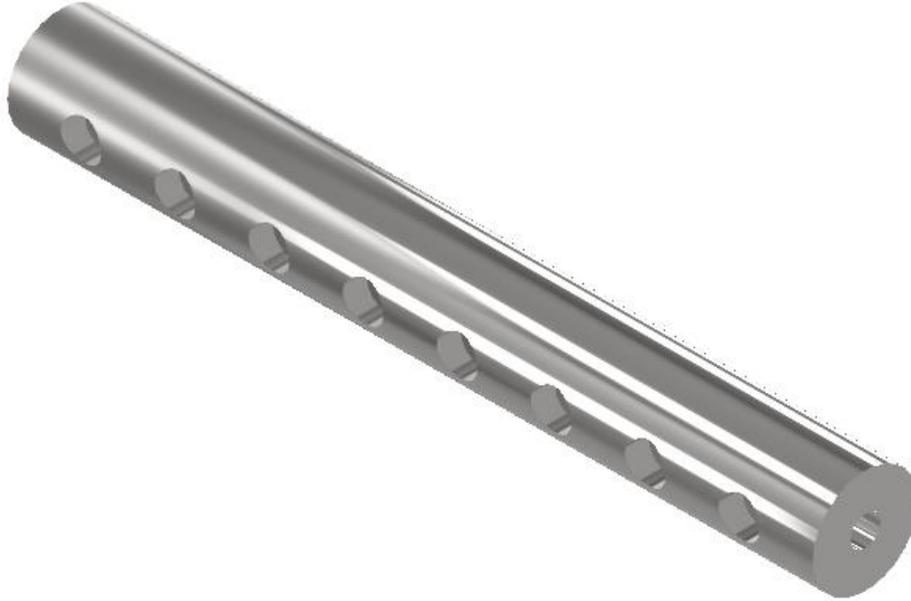
Figura 42: Exemplo de modelamento de superfície.



Fonte: autor.

- **Sólidos** – A modelagem de sólidos consiste na representação matemática complexa de um volume fechado e preenchido, utilizando nós, arestas e superfícies, ou uma combinação desses elementos. Esse método permite a criação de formas tridimensionais complexas de maneira precisa. Para obter um sólido, são utilizadas operações booleanas, como união, subtração e intersecção, que permitem unificar todas as superfícies de forma precisa. Dessa forma, é possível criar objetos em 3D com formas detalhadas e sofisticadas, como no exemplo da Figura 43 <sup>[12,20]</sup>.

Figura 43: Exemplo de modelo sólido.

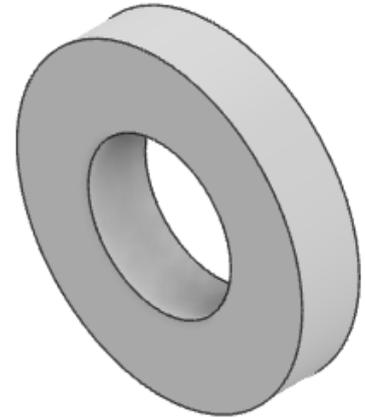
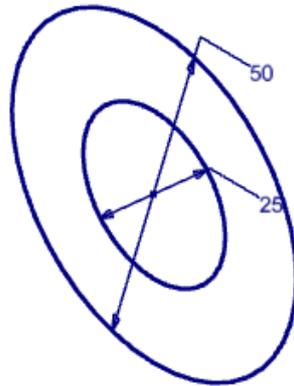
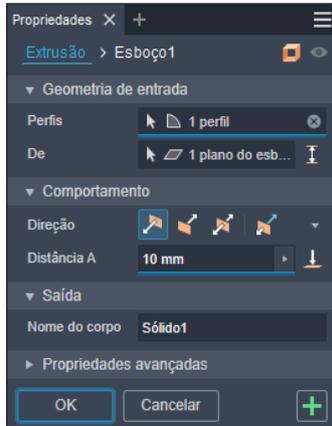


Fonte: autor.

O modelamento por construção é uma abordagem que utiliza ferramentas de desenho 2D para a criação de formas tridimensionais. Essa técnica permite transformar um objeto 2D em um objeto 3D, utilizando uma variedade de ferramentas específicas<sup>[12]</sup>. A seguir, serão descritas as principais ferramentas utilizadas para a modelagem de sólidos:

- Extrusão – A ferramenta de extrusão permite adicionar profundidade a um plano 2D para criar uma forma tridimensional. Essa ferramenta também pode ser utilizada para cortar, unir ou realizar interseções entre objetos <sup>[12,21]</sup>. Na Figura 44, é mostrado um perfil que é utilizado para realizar a extrusão e transformá-lo em um objeto tridimensional.

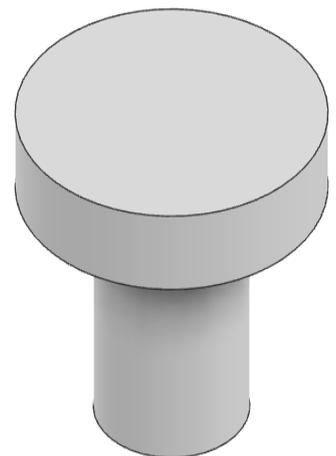
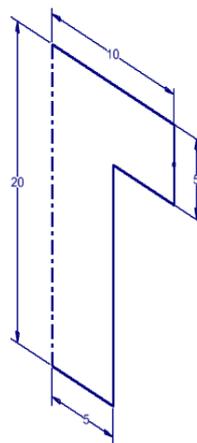
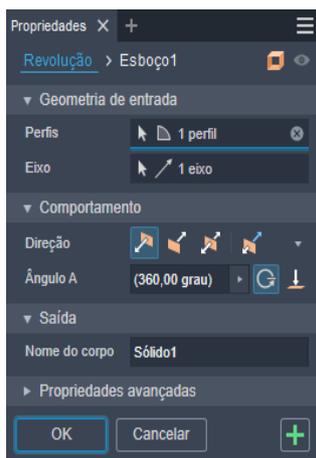
Figura 44: Exemplo de uma extrusão.



Fonte: autor.

- **Revolução** – Esta ferramenta utiliza um perfil 2D que será rotacionado em torno de um eixo central para criar uma forma tridimensional. O eixo e o perfil devem estar no mesmo plano. Além de criar formas 3D, a ferramenta de revolução também pode ser usada para realizar cortes em materiais, funcionando como uma ferramenta de corte<sup>[12,21]</sup>. A Figura 45 está demonstrando um processo de criação de uma forma tridimensional, a partir de um esboço em um plano (perfil) que foi rotacionado para formar a geometria final.

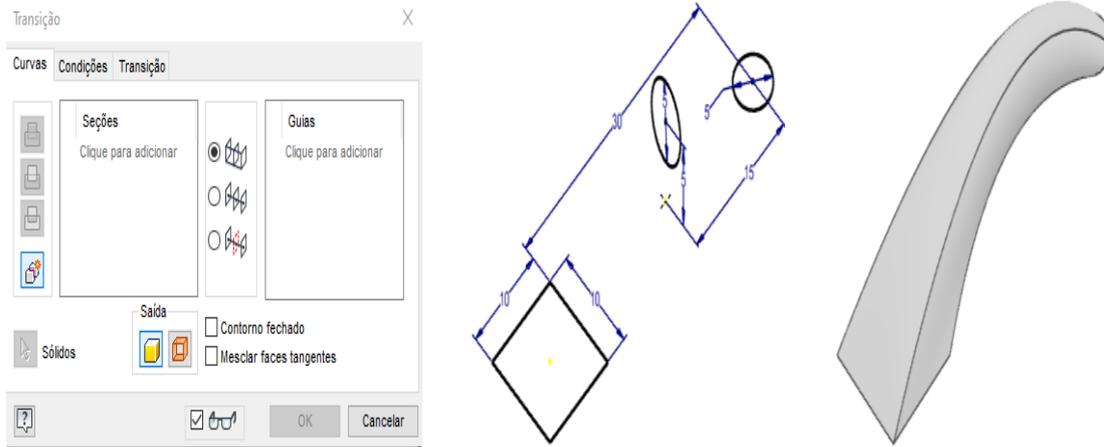
Figura 45: Exemplo de revolução.



Fonte: autor.

- Transição – A ferramenta de transição é utilizada para unir dois ou mais perfis de planos diferentes, resultando na criação de um modelo tridimensional suave entre esses planos. Essa ferramenta é ideal para desenvolver estruturas complexas. O formato da transição é controlado pela posição dos planos e pela geometria 2D presente nesses planos, que definem o caminho de ligação entre os perfis [12,21]. Na Figura 46, são utilizados três perfis em três planos diferentes para realizar a “ligação” entre eles, resultando em uma geometria tridimensional complexa.

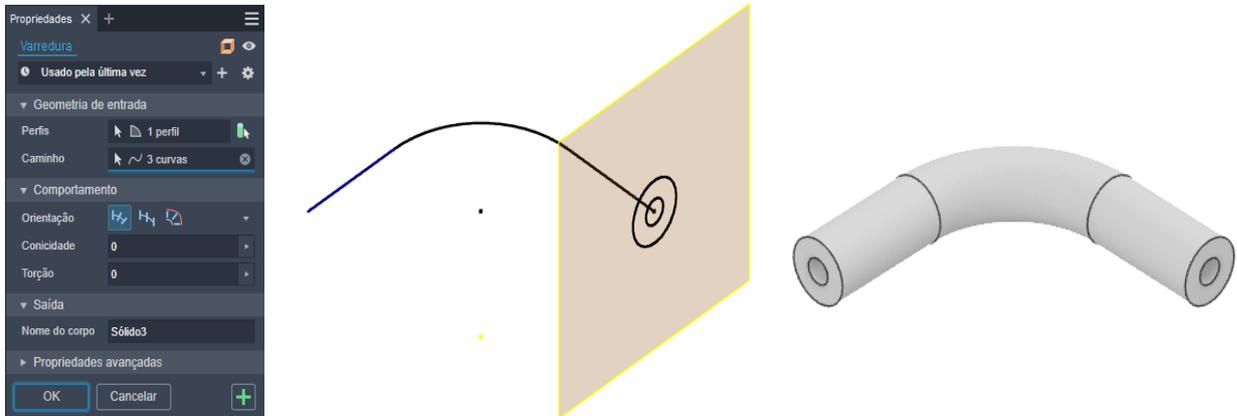
Figura 46: Exemplo de transição.



Fonte: autor.

- Varredura – A técnica de varredura realiza uma extrusão especial na qual um perfil 2D é movido ao longo de um caminho para formar um objeto sólido tridimensional. É importante que o caminho esteja completamente contido no perfil para garantir a precisão do modelo resultante [21]. Na Figura 47, é ilustrado o uso de uma trajetória para modelar uma tubulação utilizando a técnica de varredura.

Figura 47: Exemplo de varredura.



Fonte: autor.

### 2.2.3 Alumínio 5052

O alumínio (Al) é um material metálico de baixa densidade ( $2,7 \text{ g/cm}^3$  em comparação com  $7,9 \text{ g/cm}^3$  para o aço), com alta condutividade elétrica e térmica, além de ser resistente à corrosão. As ligas de alumínio possuem alta ductilidade, o que facilita sua conformação. Essa característica é atribuída à sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), que permite a manutenção da ductilidade mesmo em temperaturas muito baixas. Para aumentar a resistência mecânica desse material, são adicionados elementos como cobre (Cu), magnésio (Mg), silício (Si), manganês (Mn) e zinco (Zn) para formar ligas [18].

A liga de alumínio 5052 faz parte da série 5XXX, que engloba ligas de alumínio não tratáveis termicamente e que devem ser endurecidas por processos mecânicos. Essa liga possui uma composição de 97,5% de alumínio (Al) e 2,5% de magnésio (Mg), pertencendo ao grupo das ligas Al-Mg. A adição de magnésio ao alumínio confere melhorias em diversas propriedades, como o aumento da resistência mecânica, alta ductilidade, resistência à corrosão e boa soldabilidade. Essas características tornam a liga de alumínio 5052 adequada para várias aplicações industriais [12].

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

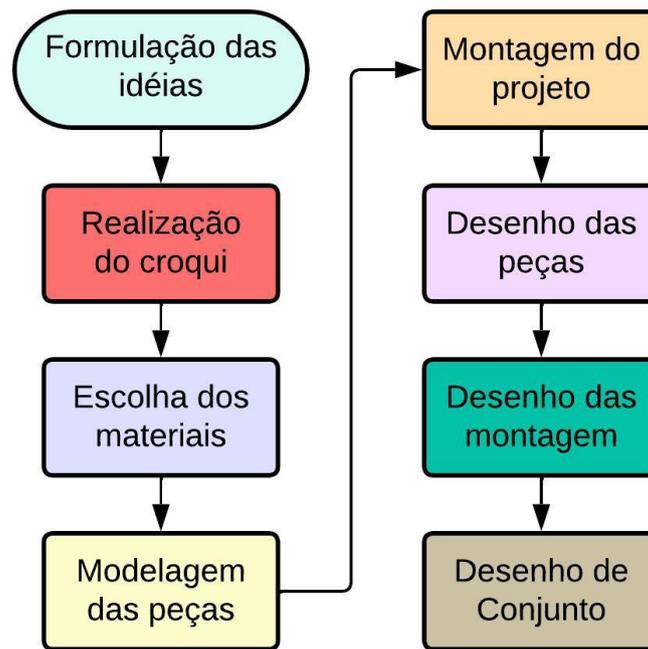
Todo o desenvolvimento teórico (analítico e numérico) e experimental deste trabalho de conclusão de curso foi baseado no projeto de bolsa PIBIC, de iniciação científica, fornecida pelo órgão fomentador CNPq, iniciado em março de 2022, que foi inscrito com o título “Desenvolvimento, projeto, construção e testes de desempenho de passadores de movimento em sistemas de vácuo”.

Esta seção é dedicada a detalhar todos os processos de análise, desenvolvimento, escolha de materiais, simulação e experimentos físicos com o objetivo de obter os resultados adequados, sempre baseando nos fundamentos teóricos, mostrados na seção anterior.

#### **3.1 Elaboração do projeto**

Para garantir que o sistema tubular de alto-vácuo funcione de forma adequada, é necessário que além dos materiais escolhidos, design de cada componente e construção sejam muito adequados, já que possíveis defeitos mecânicos podem implicar em taxas de vazamento tão altas que impeçam que o sistema alcance a faixa de pressão adequada. Na Figura 48, é descrita as etapas utilizadas durante o desenvolvimento do Projeto de um Sistema Tubular de Alto Vácuo (PSTA).

Figura 48: Etapas de construção do protótipo.



Fonte: O autor.

### 3.1.1 Seleção dos Materiais

A seleção dos materiais de cada componente presente no Projeto de um Sistema Tubular de Alto Vácuo (PSTA), tiveram base na função em que este item foi empregado. Durante a confecção do esboço do projeto, foram reunidos quais componentes seriam necessários para garantir suporte e sustentação, os utensílios para medição de pressão, componentes que iriam ser expostos ao vácuo, componentes auxiliares, etc. Com isso, foi definido cada função que estes componentes iriam operar e a influência que iria agir sobre o sistema. Além também das peças fabricadas, também foram selecionadas peças já disponíveis no Laboratório de Tecnologia do Vácuo (LTV) da FATEC-SP, onde este projeto foi realizado. Por se tratar de um sistema de alto-vácuo, obviamente, foi necessário tomar muito cuidado com quais materiais poderiam ser expostos, de forma a garantir que o sistema alcance a pressão adequada (Entre  $10^{-3}$

até  $10^{-6}$  mbar). Para isso, é necessário ter muito cuidado com o tipo de material exposto à atmosfera de alto-vácuo, assim como tempo de exposição e grau de limpeza e condicionamento, que também surte um efeito mais ou menos eficiente dependendo do material, como foi explicado na seção anterior onde foram apresentadas duas fórmulas referentes ao fenômeno de desgaseificação do material (Eq 2.26 e Eq 2.27). Na Tabela 4, são descritas as informações, de forma detalhada, de todos os equipamentos, peças construídas ou disponibilizadas pelo laboratório, assim como item, quantidade (QTD), número de peça, descrição e materiais utilizados para compor o arranjo final.

Tabela 4: Lista de peças utilizadas para montar o sistema de vácuo do Projeto de um Sistema Tubular de Alto Vácuo (PSTA).

LISTA DE PEÇAS				
ITEM	QTD	NÚMERO DE PEÇA	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	2	PSTA 1.01	Tubo de 500 mm	Aço 304 L
2	1	PSTA 1.02	Tubo de 980 mm	Aço 304 L
3	1	PSTA 1.03	Tubo de 1200 mm	Aço 304 L
4	8	PSTA 1.04	KF 16 para os tubos	Aço 304 L
5	10	PSTA 1.05	Base do suporte dos tubos	PLA
6	10	PSTA 1.06	Encaixe do suporte dos tubos	PLA
7	1	PSTA 1.07	Suporte da bomba Turbo-Drag MDP 5011	PLA
8	1	PSTA 1.08	Encaixe da bomba Turbo-Drag MDP 5011	PLA
9	4	PSTA 1.09	Fixador do termopar	PLA
10	8	PSTA 1.10	Sinalizador dos tubos	PLA
11	2	PSTA 1.11	Tábua para mesa da bancada	Madeira
12	1	PDL 1.01	Bomba Turbo-Drag Adixen MDP 5011	Alumínio
13	1	PDL 1.02	Bomba mecânica de palhetas Leybold D8-A	-
14	4	PDL 1.03	Conexões T	Aço 304-L
15	1	PDL 1.04	Fole metálico	Aço 304-L
16	1	PDL 1.05	Válvula Diafragma NW-25 - Edwards	Aço 304-L
17	1	PDL 1.06	Filtro	Aço 304-L

18	4	PDL 1.07	Termopar	-
19	20	PDL 1.08	Parafuso M6	Aço
20	20	PDL 1.09	Porca M6	Aço
21	40	PDL 1.10	Arruela M6	Aço
22	4	PDL 1.11	Parafuso M8	Aço
23	4	PDL 1.12	Porca M8	Aço
24	8	PDL 1.13	Arruela M8	Aço
25	1	PDL 1.14	Medidor CP-25-S (Penning) - Edwards	-
26	1	PDL 1.15	Medidor NW-25 (Penning) - Edwards	-
27	1	PDL 1.16	Medidor APG/MP/NW16ST/ST (Pirani) - Edwards	-
28	2	PDL 1.17	Adaptador KF 25 para KF16	Aço 304-L
29	1	PDL 1.18	Adaptador ISO K 63 para KF 16	Alumínio
30	3	PDL 1.19	Presilha ISO K 63	Alumínio
31	1	PDL 1.20	Anel de centragem ISO K 63	Alumínio
32	1	PDL 1.21	O'ring ISSO K 63	Viton
33	17	PDL 1.22	Anel centragem KF 16	Aço 304-L
34	17	PDL 1.23	O'ring KF 16	Viton
35	5	PDL 1.24	Anel centragem KF 25	Aço 304-L
36	5	PDL 1.25	O'ring KF 25	Viton/Neoprene
37	4	PDL 1.26	Cotovelo KF 16	Aço 304-L
38	4	PDL 1.27	KF 16 cego	Aço 304-L
39	17	PDL 1.28	Presilha KF 16	Alumínio
40	5	PDL 1.29	Presilha KF 25	Alumínio
41	12	PDL 1.30	Parafuso rosca máquina cabeça redonda 3/8"	Aço

Onde:

- PSTA – São as peças projetas e construídas para o projeto;
- PDL – Peças doadas pelo laboratório para execução do projeto.

Para a elaboração de sistemas tubulares que operam na faixa do alto-vácuo, assim como para qualquer outro sistema de vácuo (de diversas formas geométricas e funções

de operação), é muito importante se atentar ao material adequado para compor os materiais do projeto. Uma vez que é necessário que estes materiais não tenham taxa de desgaseificação muito altas, como no caso de muitos polímeros (grandes emissores de gases em ambiente de vácuo), e também não acarretem na dificuldade de realizar a limpeza da superfície (algo que deve ser realizado para reparar o sistema). Na seção anterior, foi mencionado do aço inox austenítico (304-L), que além de ter ótimas propriedades para aplicações realizadas em alto-vácuo também tem características muito interessantes, como é o caso da sua alta soldabilidade. Uma vez que este material amplamente utilizado para sistemas de alto-vácuo, inclusive sistemas tubulares (como no caso de muitos aceleradores de partícula), e os tubos projetados tiveram conexões KF 16 soldadas em suas extremidades, como o exemplo da Figura 49, tornando muito justificável o uso deste material para fabricação. Além da fabricação, também tiveram itens de aço inox austenítico que estavam disponíveis no laboratório e que foram expostos à atmosfera do alto-vácuo, como o caso de anéis de centragem (PDL 1.20, PDL 1.22 e PDL 1.24) e as conexões T (PDL 1.03).

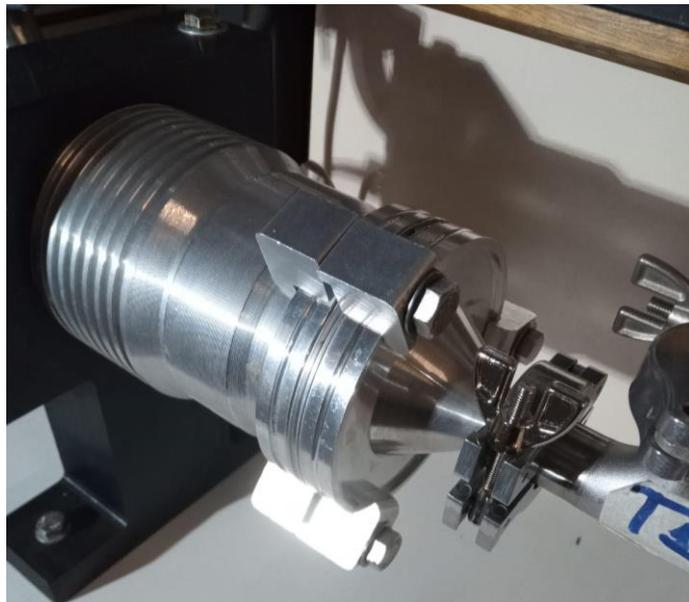
Figura 49: Tubo 4 com uma das suas extremidades soldadas com uma conexão ISO KF 16



Fonte: O autor.

Além do aço inoxidável 304 L, também foram utilizados alguns componentes, que estavam disponíveis no laboratório, de alumínio. Sendo este um material também muito adequado para sistemas de alto-vácuo, uma vez que este também é um material que tem taxa de desgaseificação muito baixa (ainda menor que o do aço inox austenítico). Porém, estes componentes são construídos em uma peça contínua, já que o alumínio tem baixa soldabilidade. Segundo a American Welding Society (AWS), a soldabilidade é uma propriedade definida como “a capacidade de um material ser soldada nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Após a soldagem componentes deste tipo de material, podem apresentar alguns problemas na região soldada, como: apresentar uma superfície porosa, devido à exposição a atmosfera de hidrogênio (H<sub>2</sub>) quando o alumínio está no estado líquido, formação de trincas e diminuição da resistência mecânica <sup>[31]</sup>. Na Figura 50, são mostrados dois componentes, a bomba Turbo-Drag MDP 5011 da Adixen (PDL 1.01) e o adaptador de conexão ISO K 63 para KF 16 (PDL 1.18), que foram expostos diretamente à atmosfera de alto-vácuo.

Figura 50: Bomba Turbo-Drag MDP 5011 (PDF 1.01) conectada ao adaptador de ISO K 63 para KF 16 (PDL 1.8).



Fonte: O autor.

Para a fabricação dos componentes de sustentação da bomba turbo-drag e linha de bombeamento (tubos) do sistema de vácuo, assim como também dos suportes dos termopares e os sinalizadores dos tubos, foi adotado o processo de fabricação por manufatura aditiva utilizando uma impressora 3D, por extrusão do material (FDM), modelo Creality 3 V2. A manufatura aditiva ou impressão 3D é uma técnica em que as etapas de processo contribuem para construção de uma peça de forma aditiva a partir de um modelo digital, geralmente projetado em software CAD (Desenho Assistido por Computador). Todo o processo de conversão do modelo sólido virtual para MA e a deposição do material são controladas por computador. Segundo a ISO-ASTM 52900, a sigla MA é o “processo de unir materiais para criar peças a partir de dados de modelo 3D, geralmente camada por camada, em oposição aos métodos de fabricação subtrativa e formativa” [32]. Caso esses componentes fossem fabricados por técnicas clássicas de produção, como é o caso da usinagem, fresagem, injeção de material, dentre outras, o preço seria muito maior já que os tamanhos de cada peça foram todos personalizados para o tipo de sistema utilizado. Na Figura 51 há uma fotografia do processo de fabricação do suporte que projetado e impresso para conseguir sustentar uma bomba turbo-drag MDP 5011 da Adixen.

Figura 51: Impressão 3D do suporte da bomba turbo-drag.

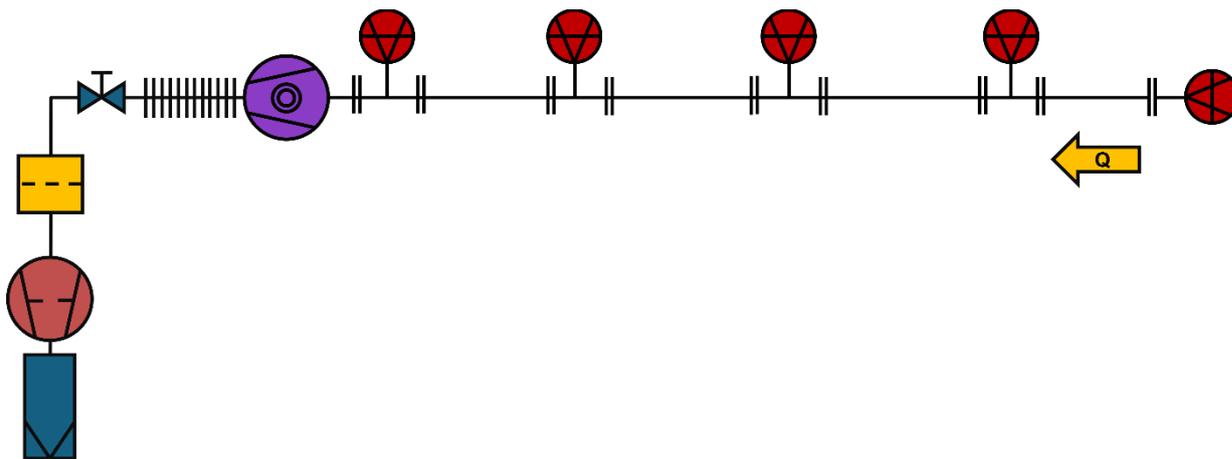


Fonte: O autor.

### 3.1.2 Desenho do projeto em software CAD

Para determinar que tipos de materiais fossem utilizados, a maneira com que o sistema precisava ser arranjado, o componente, dentre outras coisas do tipo, foi necessário realizar um esboço inicial do sistema que viria a auxiliar em todo o projeto, principalmente na hora na montagem. O sistema tubular de alto-vácuo foi projetado, conforme a Figura 52, para que pudesse ter no mínimo cinco pontos experimentais para medição da pressão final em cinco posições diferentes, porém com a liberdade de rearranjar, da maneira que for possível, para coletar mais pontos experimentais do que os cinco primeiros.

Figura 52: Sistema tubular de alto-vácuo.



Fonte: O autor.

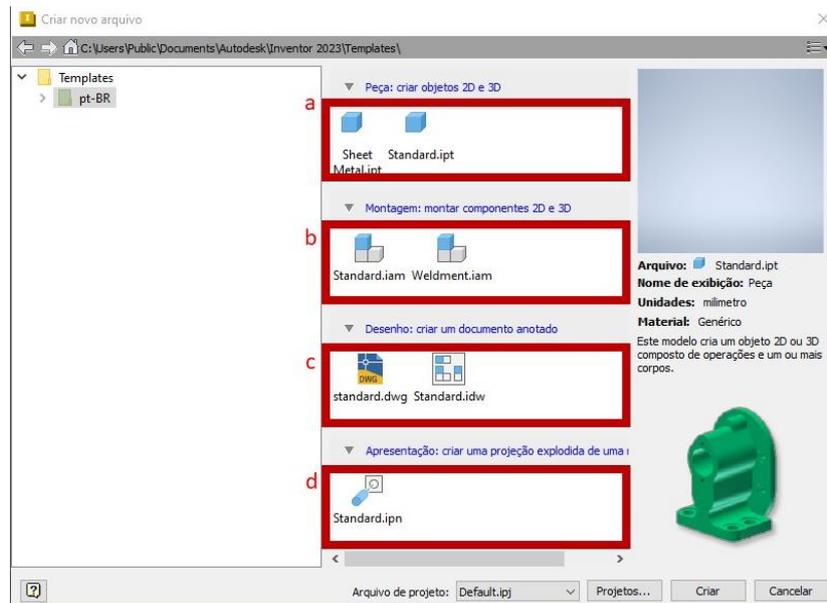
Para projetar o sistema de vácuo do Projeto de um Sistema Tubular de Alto Vácuo (PMMV) foi necessário projetar cada peça individualmente, para só após isso realizar a montagem delas e, posteriormente, realizar os desenhos técnicos. O software CAD utilizado para realizar as etapas de modelagem 3D, montagem e desenho detalhado dos componentes deste trabalho foi o Autodesk Inventor 2024, já que a empresa deste software (que é a Autodesk) fornece uma licença gratuita para estudantes utilizarem para projetos educacionais, como é o caso deste trabalho. A versão utilizada do software

foi a versão portuguesa com a unidade de medida milímetro, que é o padrão para desenhos técnicos.

O design dos componentes que foram fabricados no software CAD, foram projetados de forma que fossem flexíveis durante a montagem, possibilitando que sejam facilmente reparados, limpos e montados e remontados com facilidade. Já que este sistema foi projetado para obter valores de pressão final para várias posições ao longo do comprimento total do sistema, para obter isso na prática é necessário realizar várias formas de montagem, aproveitando que existem muitas possibilidades de montar o arranjo. Além também da geometria cilíndrica dos tubos, seguir um formato muito utilizado em diversos sistemas tubulares ou mesmo em linhas de bombeamento.

O software Autodesk Inventor disponibiliza uma série de ambientes com ferramentas CAD que possibilitam projetar uma infinidade de coisas, onde a interface altera de ambiente para ambiente. Dentre as possibilidades há como projetar peças individuais, realizar a montagem de um arranjo a partir da junção de peças individuais, animações de montagem, criação de vista explodida, desenho técnico, simulação com elementos infinitos, dentre muitos outros. A escolha do ambiente é o que marca o início da jornada para projetar algum arranjo no Autodesk Inventor, para acessar algum dos ambientes é necessário selecionar a aba “novo”, localizada na interface inicial do programa, que abre um guia como o da Figura 53.

Figura 53: Ambientes do Autodesk Inventor. a- Ambiente para modelagem de objetos 2D e 3D; b- Ambiente para montagem de objetos 2D e 3D; c - Ambiente para desenho de detalhamento; d- Ambiente para projeção explodida de uma montagem.

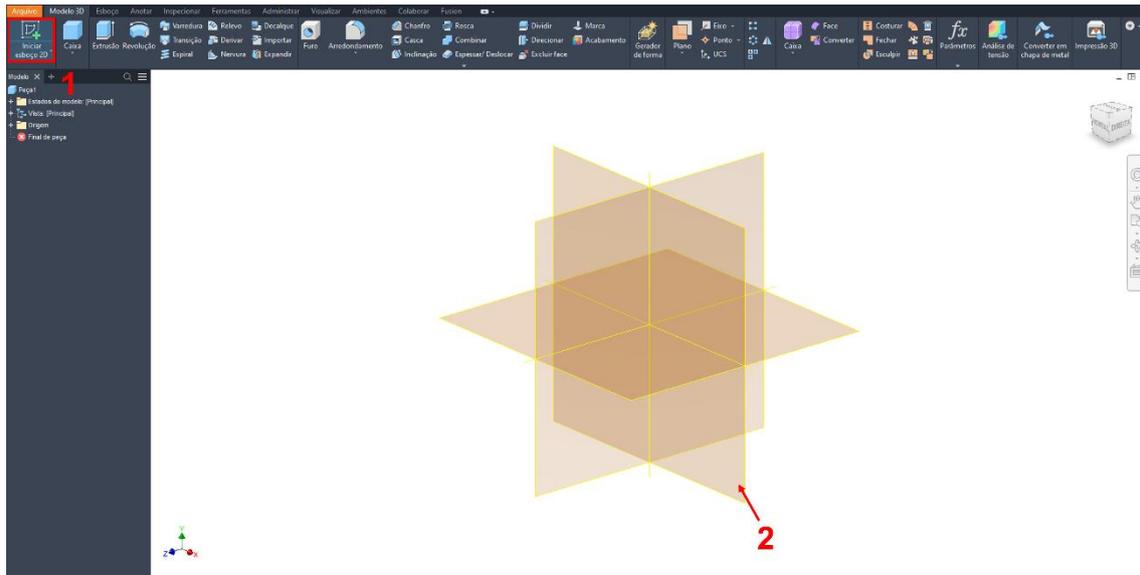


Fonte: O autor.

- **Modelagem 3D de peças.**

Para a construção de todas as peças, nesse trabalho, foi utilizado o ícone Standard.ipt (Padrão.ipt) ambiente de criação de peças 2D e 3D, como mostrado na Figura 53 (a). Durante a construção das peças no software CAD é necessário criar um esboço 2D, para então, transformá-lo em uma estrutura 3D, a partir de umas das ferramentas disponibilizadas pelo programa. Por uma questão de preferência (os desenhos podem iniciados por qualquer plano), os desenhos 2D foram esboçados no plano XY, como está representado na Figura 54. Após clicar no ícone “Iniciar esboço 2D” (1) é necessário escolher o plano onde o esboço será feito (2).

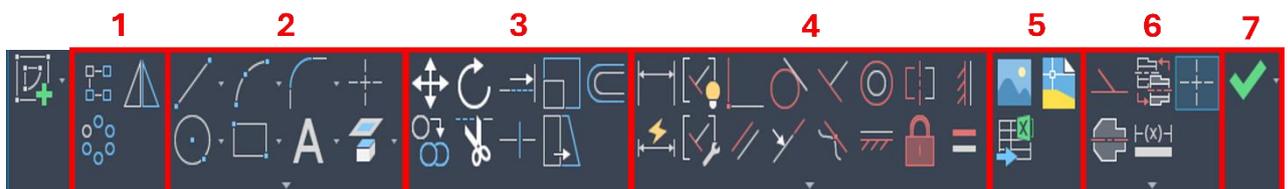
Figura 54: Criação do esboço (sketch) 2D. 1 - Ícone para habilitar ferramentas de esboço 2D; 2- Escolha do plano.



Fonte: O autor.

Para a realização dos desenhos 2D das peças foi necessário utilizar as ferramentas de esboço 2D, como estão todas indicadas na Figura 55, disponibilizadas pelo software para descrever no plano XY (da Figura 54) a geometria, que serão transformadas em uma peça tridimensional. Após finalizar o esboço basta selecionar o ícone “Encerrar Esboço”.

Figura 55: Ferramentas de esboço 2D. 1- Padrões de repetição no plano do esboço; 2- Ferramentas de criação de geometrias; 3- Ferramentas de modificação de geometrias; 4- Restrições do desenho; 5- Exportação de arquivos para o plano; 6- Formato da linha; 7- Finalização do esboço.

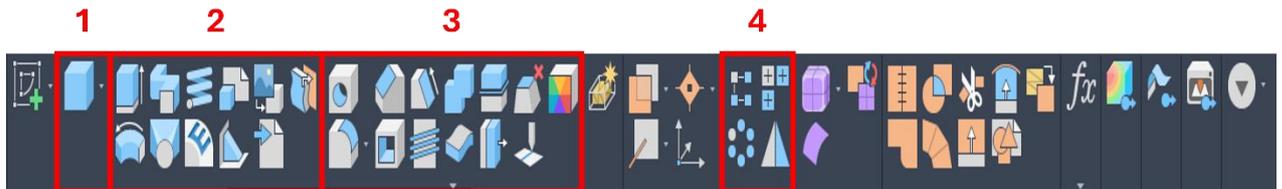


Fonte: O autor.

Após o encerramento dessa etapa (construção da peça em 2D), a transição de geometria bidimensional (2D) para geometria tridimensional (3D) pode ser realizada de

diferentes maneiras, conforme o tipo de geometria da peça que está sendo modelada. Esta etapa é feita utilizando as ferramentas da Figura 56.

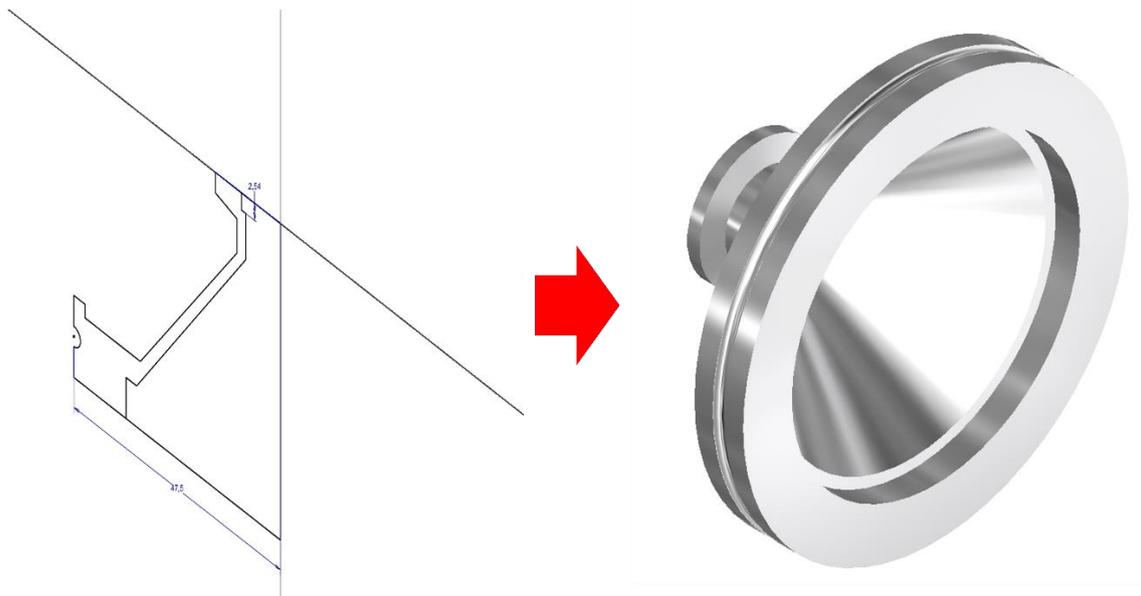
Figura 56: Ferramentas para formas 3D. 1- Criação de geometrias primitivas; 2- Ferramentas de criação de geometrais 3D; 3- Ferramentas de modificação de geometrias 3D; 4- Padrões de repetição em geometrias 3D.



Fonte: O autor.

A partir do uso das ferramentas das Figura 55 e Figura 56 foi possível modelar todas as peças do sistema de vácuo deste trabalho, utilizando diferentes ferramentas de criação, modificação e repetição de geometria. A Figura 57 demonstra o processo de transformação de um esboço 2D para um modelo 3D utilizada para a modelagem em CAD das peças individuais do projeto, feitas para fabricação ou como representação dos demais outros componentes que foram disponibilizados pelo laboratório ou doados por empresas.

Figura 57: Transformação de uma geometria 2D em um modelo 3D.



Fonte: O autor.

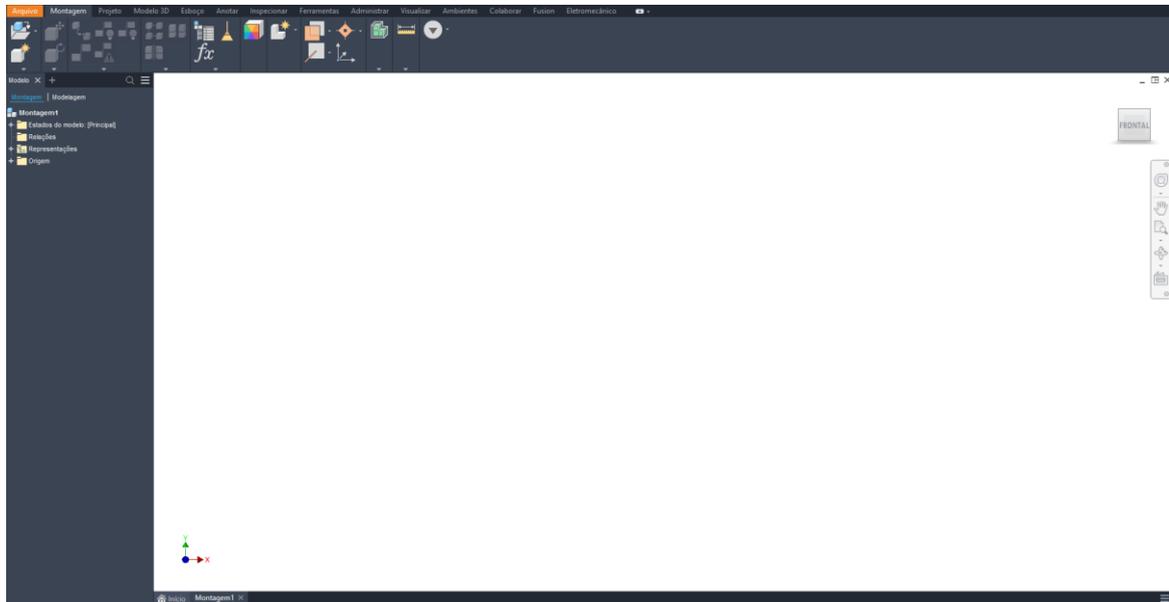
- **Montagem do sistema de vácuo**

O processo de montagem é o ato de juntar ou fixar duas ou mais peças individuais, resultando em um arranjo, para que isso seja feito é necessário que seja inserir alguns arquivos, seja da biblioteca pessoal do computador ou da biblioteca do próprio software, dentro do ambiente de montagem para que isso seja possível realizar a montagem do sistema de vácuo. Isso possibilita a identificação de possíveis erros de projeto, como por exemplo o dimensionamento de uma peça ou até mesmo a simulação da distribuição de tensão mecânica ao longo do arranjo utilizando o método de elementos finitos. Se necessária

Após finalizar a modelagem de todas as peças é necessário realizar uma etapa muito importante, a montagem do sistema de vácuo, se for necessário a etapa anterior (modelagem de peças) deve ser refeita. Este ambiente, assim como todos os outros destacado na Figura 53, é encontrado logo após selecionar o ícone “novo” na interface inicial, o ambiente mostrado na Figura 53 (b) descrito como “Montagem: montar componentes 2D e 3D”, onde as peças (feitas na etapa anterior) são acopladas até formarem o desenho de conjunto. O ambiente de montagem escolhido foi o Standard.iam (Padrão.iam).

Ao selecionar o ícone Standard.iam é aberta a interface do ambiente de montagem, demonstrado na Figura 58.

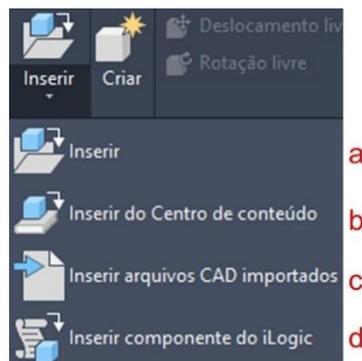
Figura 58: Ambiente de montagem do software Autodesk Inventor.



Fonte: O autor.

Para realizar as etapas de montagem é necessário exportar arquivos da biblioteca do computador onde o software está instalado, podendo ser arquivos modelados no *Autodesk Inventor* ou não (desde que sejam compatíveis). No ícone “Inserir” na barra de ferramentas, localizado na guia de montagem, como mostra a Figura 59.

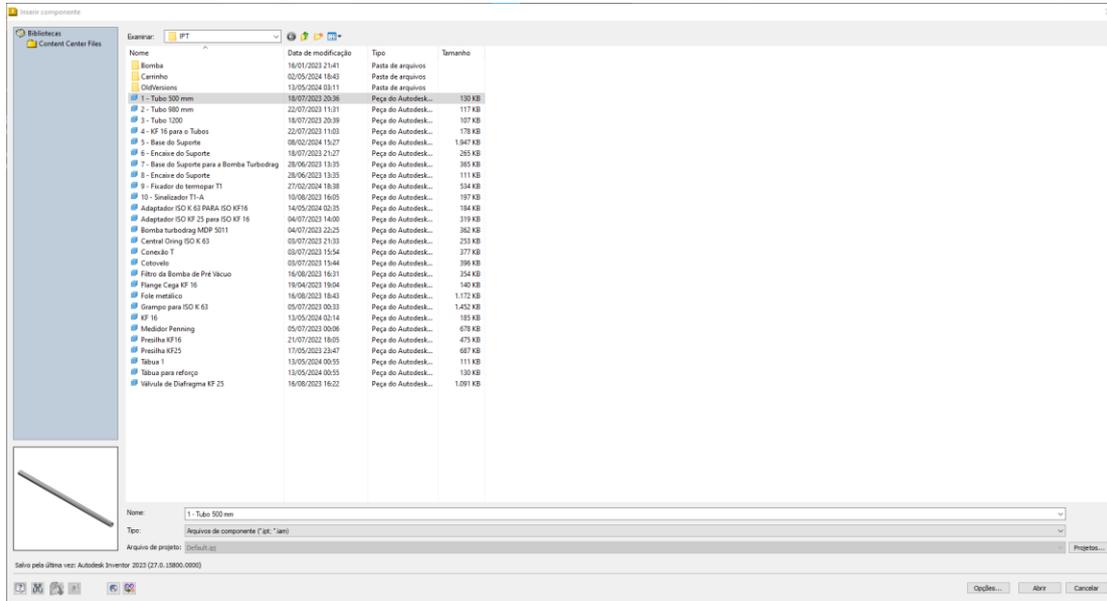
Figura 59: Opções para inserir arquivos CAD no arquivo .iam. a - Inserir arquivo CAD da biblioteca local do computador; b - Inserir arquivos da biblioteca do software Autodesk Inventor; c - Importar arquivo de peça em outro formato CAD; d - Inserir componente do iLogic.



Fonte: O autor.

Ao selecionar o ícone “Inserir”, mostrado na Figura 59 (a), é aberta uma guia da pasta de arquivos do computador, onde é necessário localizar e escolher as peças que serão importadas para o ambiente de montagem, como mostrado na Figura 60.

Figura 60: Seleção de peças para inserir no ambiente de montagem.



Fonte: O autor.

Após esta etapa, o arquivo selecionado é inserido no ambiente onde será realizada a montagem. Como exibido na Figura 61.

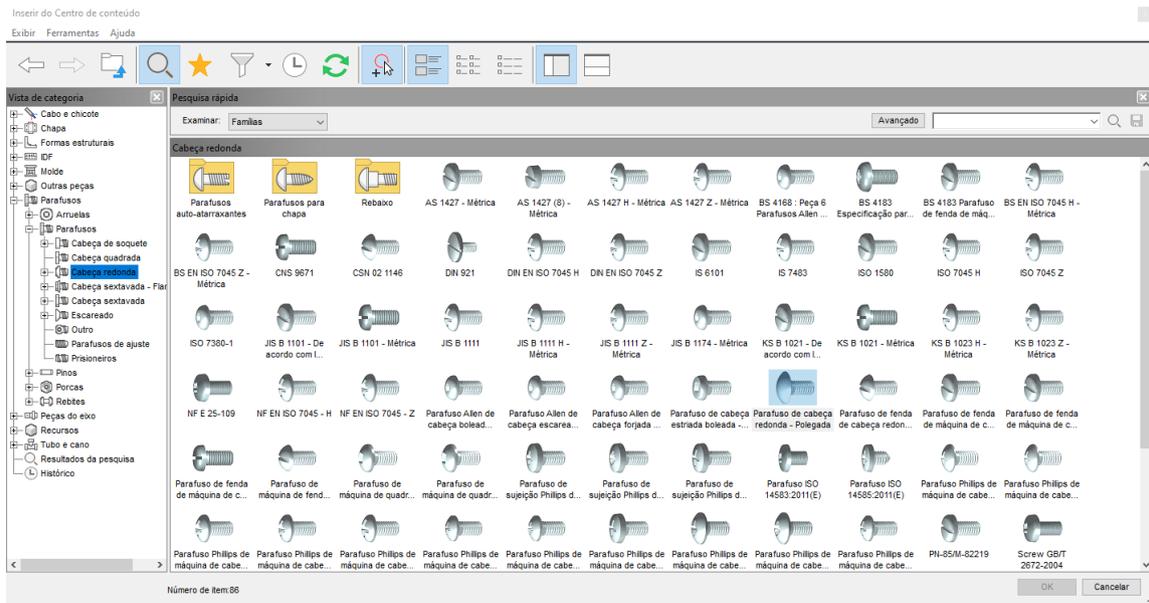
Figura 61: Componente inserido no ambiente de montagem.



Fonte: O autor.

Além das próprias peças individuais da biblioteca pessoal, houve no decorrer deste trabalho o uso de algumas peças disponibilizadas no banco de arquivos do software, disponibilizadas pelos desenvolvedores do programa. Para isso, é necessário selecionar o ícone “Inserir do Centro de conteúdo” da Figura 59 (b), onde o usuário é direcionado para um guia da pasta de arquivos do software, onde é necessário selecionar algum arquivo para que ele seja inserido ao ambiente de montagem, como mostrado na Figura 62.

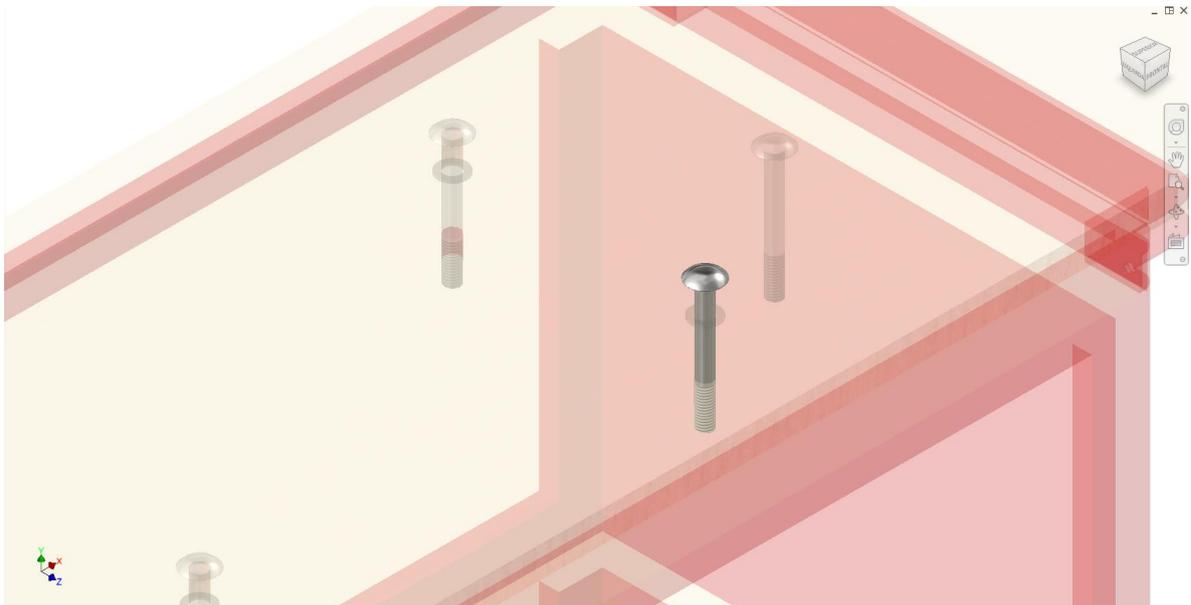
Figura 62: Seleção de peças da biblioteca interna do software Autodesk Inventor para inserir no ambiente de montagem.



Fonte: O autor.

Com isso, assim as peças são inseridas ao ambiente de montagem onde é realizado o processo de montagem. Como mostrado no exemplo da Figura 63.

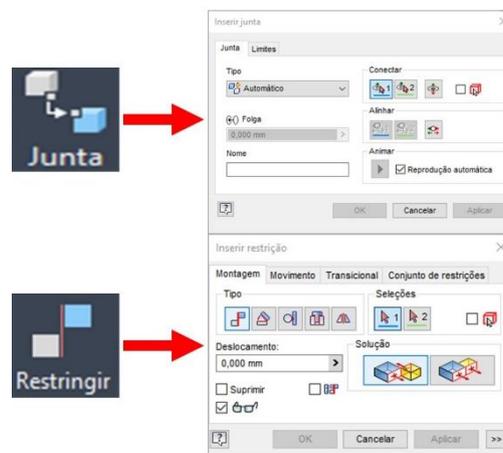
Figura 63 - Componente da biblioteca interna do software inserida na bancada do sistema de vácuo.



Fonte: O autor.

Para posicionar as peças de maneira que seja formado um conjunto de peças é necessário utilizar as ferramentas de montagem. Tendo algumas maneiras possíveis de realizar isso, podendo ser por meio da realização da restrição do movimento entre duas peças, fazendo um alinhamento entre duas geometrias. Na barra de montagem existem duas ferramentas de restrição que podem servir para realizar a montagem dos componentes, como está demonstrado na Figura 64.

Figura 64: Ícones das ferramentas de restrição.



Fonte: O autor.

Ao selecionar duas peças, com uma das ferramentas acima (Figura 64), é possível aplicar uma restrição entre as duas peças, de maneira que elas sejam acopladas. Como na Figura 65 onde duas peças foram acopladas com a ferramenta “restringir”.

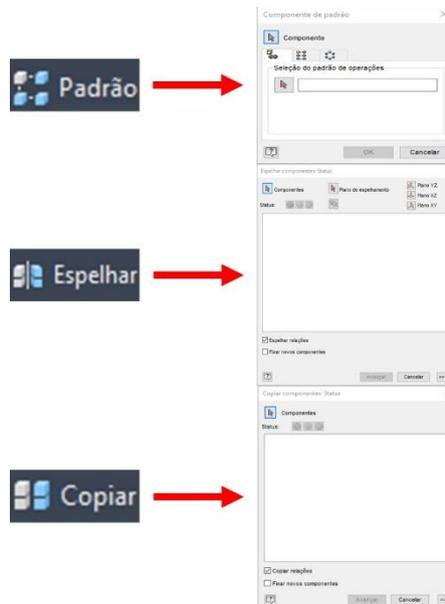
Figura 65: Peças restringidas entre si.



Fonte: O autor.

Caso for utilizar apenas as ferramentas de restrição, o processo fica muito lento, pois, as peças são montadas individualmente. Como modo de agilizar, quando necessário, foram utilizadas as ferramentas de padrões de repetição, que a partir de um padrão (restrição entre duas ou mais peças) é possível replicar uma certa quantidade de componentes semelhantes ao que foi selecionado. Na Figura 66 estas ferramentas de padrões de repetição são apresentados, com seus respectivos ícones.

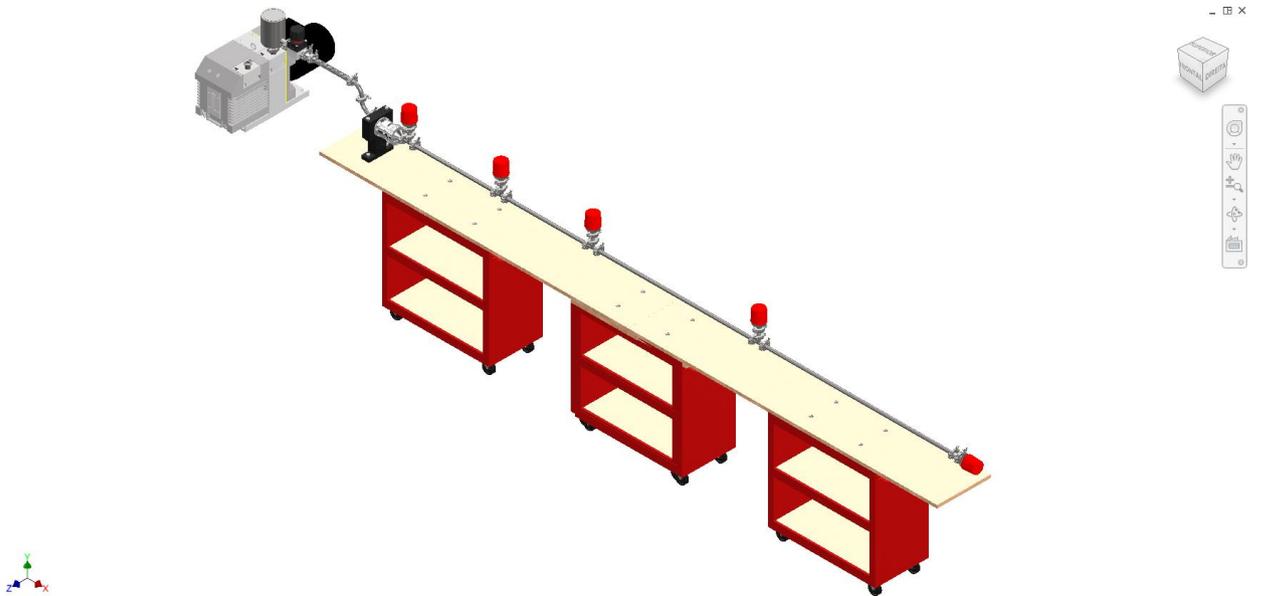
Figura 66: Ícones das ferramentas de padrão de repetição na montagem.



Fonte: O autor.

Desta forma, os componentes necessários para montagem do sistema são inseridos no ambiente, as restrições são aplicadas e quando necessário as repetições de padrão são realizadas. Na Figura 67 o sistema de vácuo está montado com uma grande quantidade de peças, onde alguns componentes (como uma forma de facilitar o processo) foram montados em diferentes ambientes e posteriormente foram inseridos em outro ambiente de montagem, inclusive no ambiente de montagem, já que é possível inserir um arquivo de montagem (.iam) como se fosse uma peça individual em uma montagem.

Figura 67: Desenho de conjunto com diversas peças acopladas.

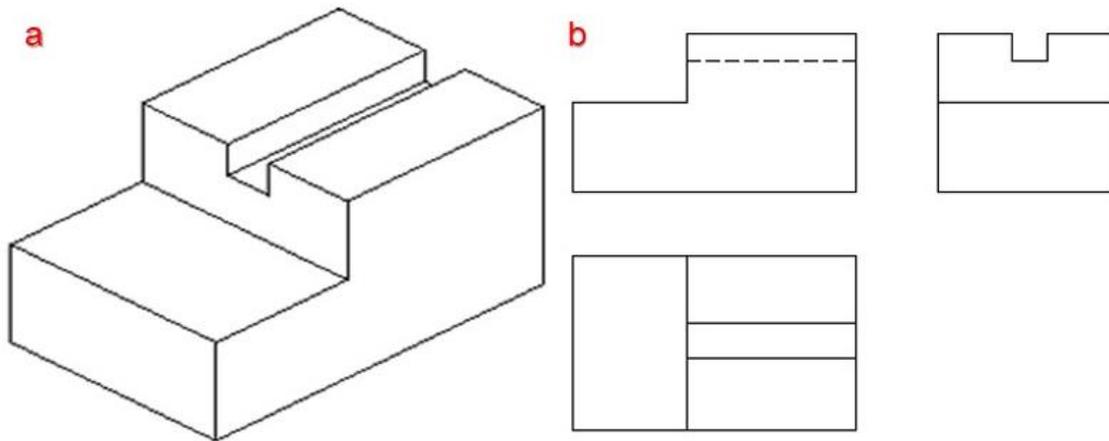


Fonte: O autor.

- **Desenho técnico.**

O desenho técnico é a maneira formal e padrão utilizada por engenheiros e técnicos, como maneira de comunicar de uma forma simples e objetiva detalhes sobre ideias e projetos. Esta maneira de um projeto comunicar entre diferentes profissionais para fazerem uma leitura e interpretação correta sobre a aplicação de um certo produto [33]. As ideias são detalhadas por meio das projeções do desenho, sendo representadas por desenhos em perspectiva, sendo uma vista que permite uma visão global do desenho, e desenhos ortográficos, que representam as dimensões precisas do projeto [34]. Na Figura 68 estas projeções são representadas e se adequam ao modelo padrão desenhos técnicos mecânicos.

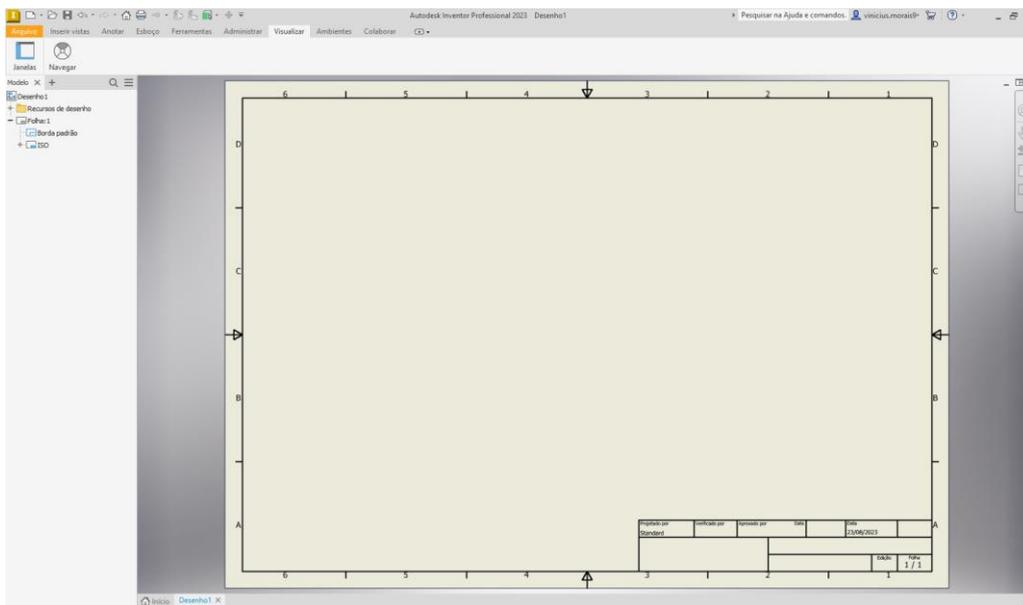
Figura 68: Projeções de um desenho técnico. a- Vista em perspectiva; b- Vistas ortográficas.



Fonte: FORTULAN, 2017.

Acessando a ícone “novo”, na interface inicial, é aberta a janela onde deve ser selecionado o ícone do ambiente de desenho, como apresentado na Figura 53(c). O ícone Standard.idw (Padrão.idw) dá acesso ao ambiente de “Desenho: criar um documento anotado”, espaço esse onde deve ser utilizado para formalizar e documentar as peças modeladas em 3D para este projeto, como mostrado na Figura 69.

Figura 69: Ambiente de desenho de detalhamento do Autodesk Inventor.



Fonte: O autor.

O ícone “Base” é selecionado para a importar um arquivo, podendo ser de peça (.idw), montagem (.iam) ou de vista explodida (.ipn), que será projetado no plano da folha. Na Figura 70 este ícone está destacado por um contorno vermelho.

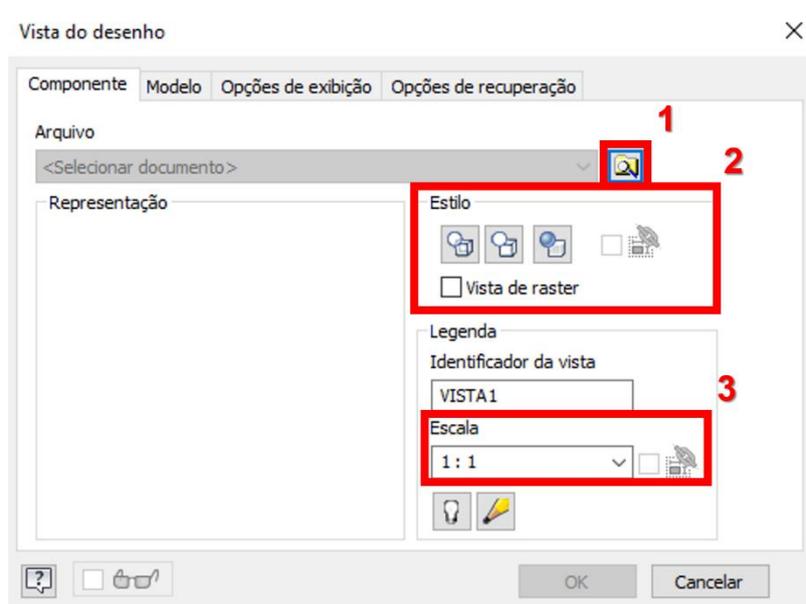
Figura 70: Ícone para importar arquivos CAD para o ambiente de desenho.



Fonte: O autor.

Ao selecionar o ícone “Base”, destacado na Figura 70, o programa abre uma janela “Vista do desenho”, onde deve ser selecionado ícone de busca de arquivo, item 1, da Figura 71 para abrir a pasta local de arquivos (do computador onde o software foi instalado), como demonstrado na Figura 72. Os itens 2 e 3 da Figura 71 servem para modificar o estilo de apresentação e a escala dimensional da peça, montagem ou vista explodida.

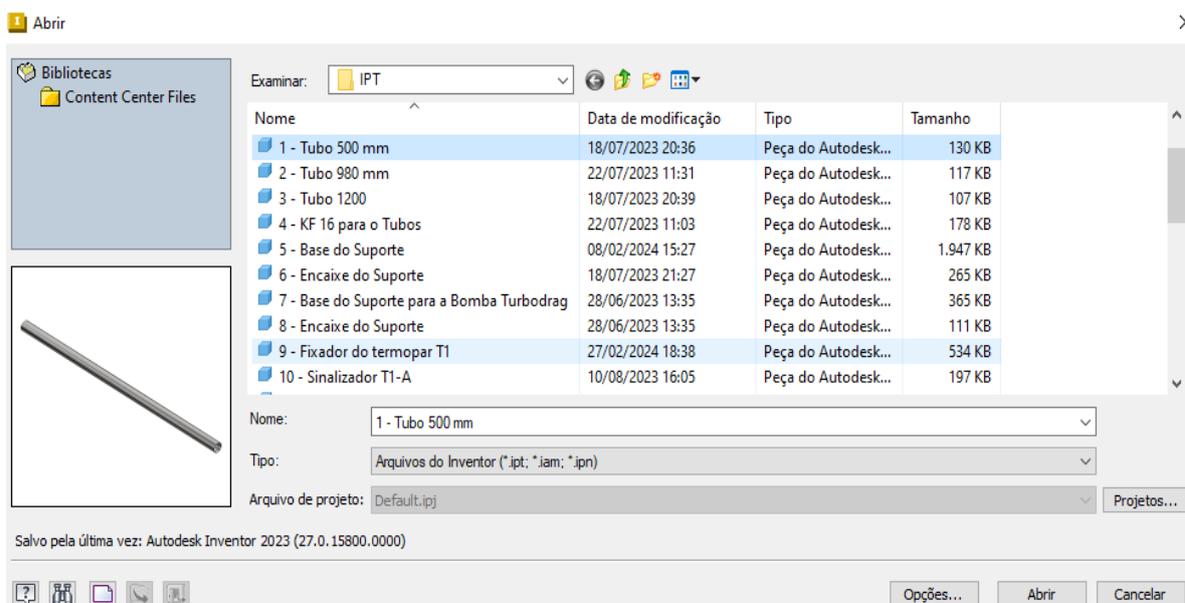
Figura 71: Janela da Vista do desenho. 1 - Ícone de busca de arquivo; 2 - Estilo de apresentação do desenho; 3 - Escala de medida do desenho.



Fonte: O autor.

A Figura 72 apresenta a seleção de um arquivo importado para o ambiente .idw do *Autodesk Inventor*, para que ele seja documentado.

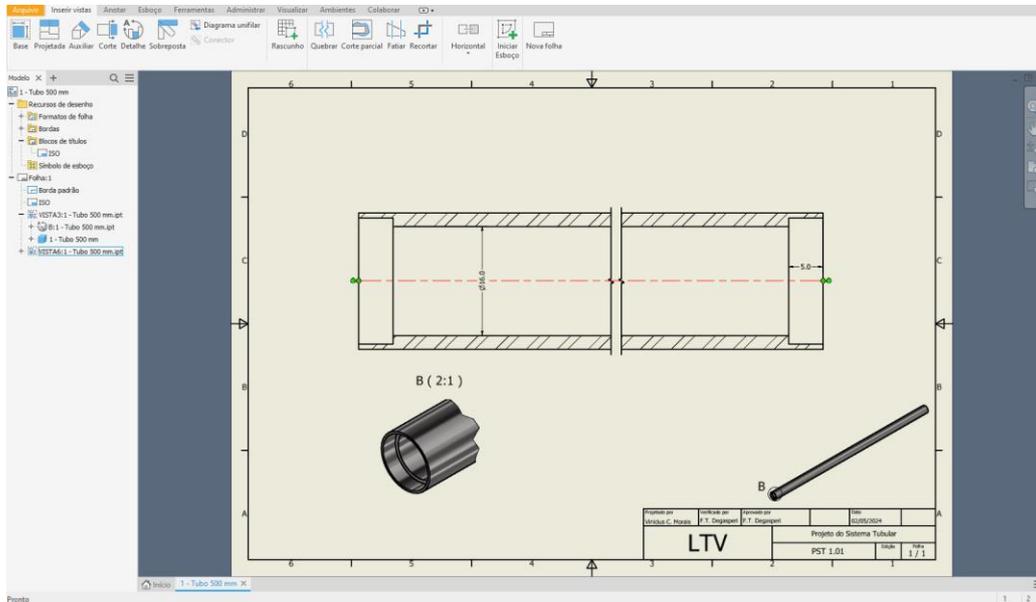
Figura 72: Seleção do arquivo.



Fonte: O autor.

Com a importação do item selecionado, é necessário configurar a maneira com que as projeções do item selecionado serão apresentados na folha de desenho técnico, para isso é possível ajustar o estilo, na Figura 71 (2), e a escala do objeto, na Figura 71 (3). Após isso basta projetar as vistas do objeto na folha, como na Figura 73.

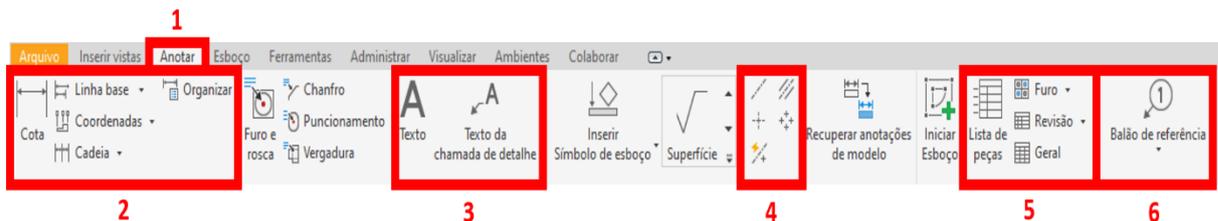
Figura 73: Inserção vistas do item no ambiente de desenho técnico.



Fonte: O autor.

Ao selecionar o guia “Anotar” é aberta uma barra de ferramentas para inserir anotações no desenho, podendo servir para adicionar ou editar medidas das peças, selecionando um dos ícones de “Cota”, para que seja representado visualmente valores de comprimento, espessura, diâmetro de uma peça cilíndrica, entre outros, além de servir para inserir texto, tabelas balões de referência de estágios de uma montagem, entre outras ferramentas. Na Figura 74 estas ferramentas são apresentadas, destacadas por um retângulo vermelho.

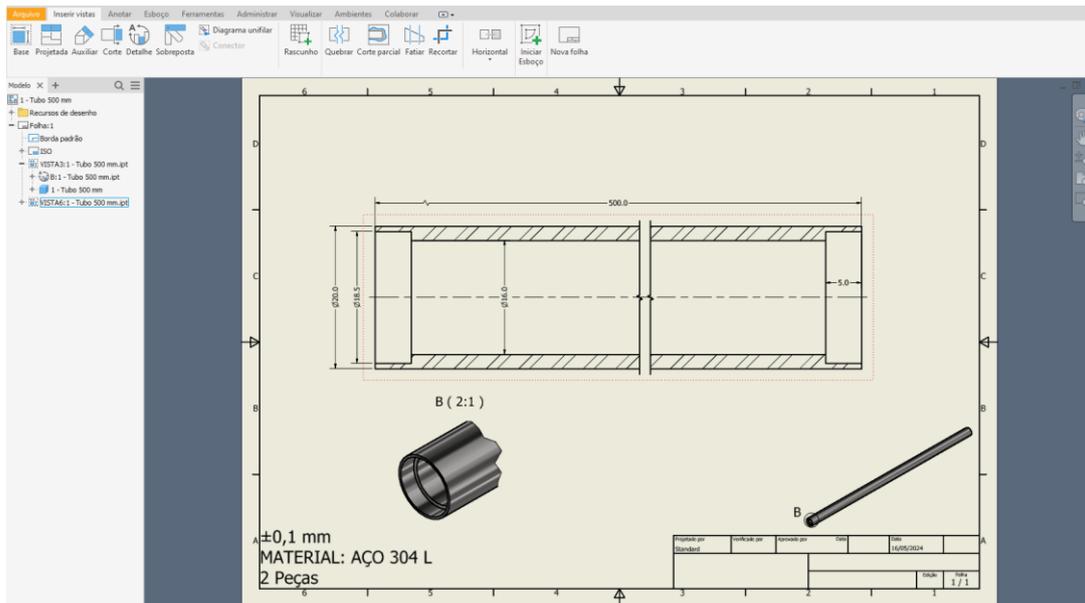
Figura 74: Ferramentas de anotação no ambiente de desenho. 1- Guia para selecionar ferramentas de anotação; 2- Adicionar ou editar cotas; 3- Adicionar ou editar texto; 4- Ícones para Inserção de linha de centro; 5- Inserir ou editar tabela peças (para montagem); 6- Balão de referência para ordem da montagem.



Fonte: O autor.

Utilizando as ferramentas apresentadas anteriormente, na Figura 74, são realizadas as anotações, de dimensão, tipo de material e tolerância, utilizadas como base para a fabricação das peças e, posteriormente, a montagem delas. Na Figura 75, já com as cotas e textos necessários para a fabricação.

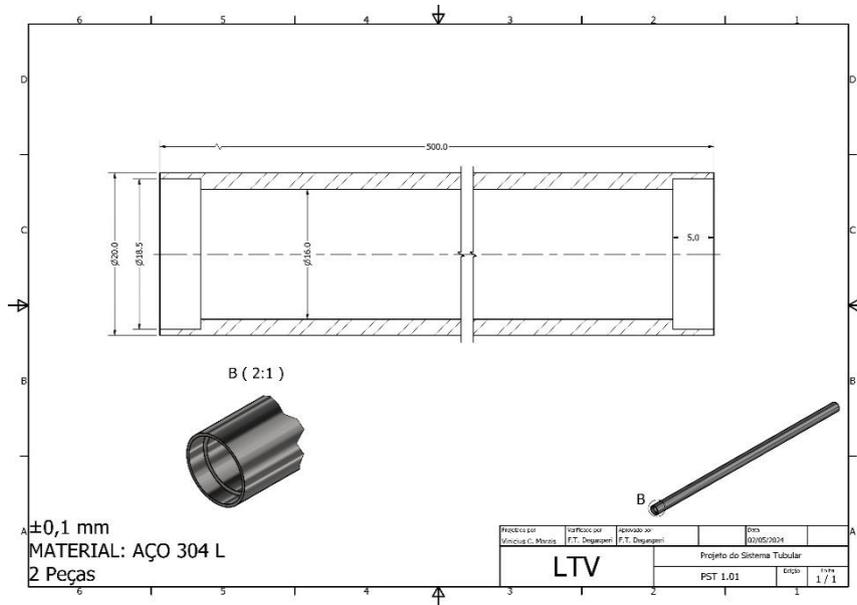
Figura 75: Inserção das cotas e textos no desenho técnico do objeto selecionado.



Fonte: O autor.

A legenda dos projetos contém os dados necessários para identificar a peça que está sendo fabricada, ao inseri-la o desenho técnico, de maneira formalizada, está pronto para a fabricação, onde o desenho pode ser adaptado para um certo tipo de construção conforme o fabricante. A Figura 76 mostra o desenho definitivo pronto para ser fabricado.

Figura 76: Desenho técnico do item selecionado finalizado.



Fonte: O autor.

### 3.2 Arranjo experimental

Neste trabalho procurou-se estabelecer um formato padronizado para todos os componentes, uma vez que no decorrer da coleta dos pontos experimentais foi necessário levar em consideração que alterações no padrão, por exemplo, de limpeza podem resultar em um dado nada confiante. Já que a limpeza dos materiais, a forma com que eles são montados e o próprio modo de armazenar os componentes influencia muito no resultado experimental de um sistema de alto-vácuo. Desta forma, seguiu-se uma sequência de montagem e testagem individualmente para cada tubo do sistema, para que desta verificasse uma possível falha no sistema e eliminá-la. Estas falhas podem comprometer muito o sistema, uma vez que introduzidas ao sistema de vácuo elas podem servir como uma grande fonte de gás indesejável, como é o caso de: riscos nas conexões, falhas de montagem, mal posicionamento das peças, limpeza inadequada, solda de má qualidade (sendo necessário utilizar soldagem TIG), estruturas formadoras de vazamento virtual, dentre outros. Com a montagem pronta, com os devidos processos

realizados, foi possível prosseguir para a etapa de determinação da taxa de desgaseificação de cada tubo, obtendo um valor estimado da taxa de desgaseificação total do arranjo montado, e encontrar o campo de pressão ao longo do sistema tubular cilíndrico.

### **3.2.1 Limpeza dos componentes**

O processo de limpeza é um dos processos mais importantes para tornar uma medição de pressão em um sistema de vácuo confiável, caso contrário o dado não tem validade alguma. Principalmente quando se trata da determinação da taxa de desgaseificação, como já dito anteriormente, além do tipo de material, a classe da limpeza e do condicionamento são muito influentes na magnitude da desgaseificação das superfícies expostas à atmosfera de vácuo. Além também da determinação da desgaseificação do sistema, esse dado impreciso acarreta e uma pressão final totalmente imprevisível, já que como as superfícies não estão limpas qualquer material pode estar presente, desde fuligem, pedaços de pano, dentre outras coisas. Além também da taxa de desgaseificação, também existem outras fontes de gases que podem ser reduzidas com o processo de limpeza, como é o caso das fontes de vapor. Tais materiais quando presentes nas superfícies das paredes dos componentes podem dificultar que a pressão final do sistema alcance um valor desejado, principalmente se a faixa estiver no alto ou ultra alto-vácuo. Estes materiais podem ser originados do processo ou da fabricação, como é o caso dos aditivos orgânicos, óleos, graxas e resíduos de embalagem [13]. Sendo este processo, um método de controle realizado antes da montagem dos dispositivos e exposição ao ambiente de vácuo.

Visando reduzir e, até mesmo, eliminar algumas fontes de gases ou vapores foram utilizados detergentes, compostos por moléculas tensoativas capazes de formarem ligações químicas com grupos químicos hidrofóbicos e hidrofílicos, que em alguns casos são difíceis de serem removidos apenas com água, encapsulando estes compostos em micelas (agregados de moléculas) para impedir que eles adsorvidos novamente pelas superfícies do sistema, que se tornam solúveis à água (solvente) [13]. O processo de

enxágue após a exposição ao detergente, na superfície, serve para que resquícios de detergente sejam removidos junto com os contaminantes. Este processo serve como uma limpeza grosseira, e deve ser prosseguida com a aplicação de um solvente volátil, no caso deste trabalho foi utilizado álcool isopropílico (99,8%). Como forma de organização do laboratório, seguiram-se o uso das pissetas de detergente alcalino (azul), de detergente neutro (verde) e álcool isopropílico (amarelo), conforme mostrado pela Figura 77. A Tabela 4, indica a código de cores adotado pelo laboratório de tecnologia do vácuo (LTV) para identificação das pissetas dos produtos de limpeza dos sistemas de vácuo.

Figura 77: Pissetas com os produtos químicos utilizados no projeto. a- Detergente alcalino; b- Detergente neutro; c- Álcool etílico.



Fonte: O autor.

Tabela 5: Código de cores das pissetas.

Cor	Produto
Verde	Detergente neutro
Azul	Detergente alcalino
Vermelho	Álcool etílico – 70%
Amarelo	Álcool isopropílico

Fonte: O autor.

Antes do processo da limpeza com solventes, foi necessário identificar se haviam trincas nas conexões dos tubos e componentes que serão expostos ao ambiente de vácuo. A presença de trincas no cordão de solda ou riscos nas conexões são vias que possibilitam a presença de um vazamento real, ou seja, gases presentes do meio externo entram no meio interno (sistema de vácuo) resultando em um aumento da pressão. Na Figura 78 está sendo mostrado um exemplo de uma conexão onde foram encontrados riscos na região de vedação do flange.

Figura 78: Identificação da presença de possíveis vias para vazamento real.



Fonte: O autor.

Esses tipos de defeitos quando identificados, devem ser eliminados. Como forma de minimizar, as peças foram polidas com o uso de lixas d'água lubrificadas com detergente neutro. Onde, deve ser realizado um movimento circular para que sejam formados riscos em todas as direções, evitando diminuindo muito a condutância do vazamento real naquela região, uma vez que estas trajetórias irão aumentar a distância em que uma partícula tem para entrar no sistema de vácuo, ou seja, a taxa de vazamento real é diminuída. Este processo é demonstrado na Figura 79.

Figura 79: Polimento de uma conexão do sistema.



Fonte: O autor.

Para o processo de limpeza grosseiro foi utilizado uma escova com formato helicoidal, mostrada na Figura 80, com o uso dessa escova é possível alcançar alguns cantos que seriam difíceis de serem alcançados com um pano ou outros instrumentos.

Figura 80: Escova helicoidal.



Fonte: O autor.

Com isso, são realizados a sequência de limpeza que resulta na diminuição dos possíveis contaminantes, fontes de vapor e gás, dos componentes do sistema de vácuo, peça a peça, individualmente. É necessário realizar o processo de limpeza de cada peça individualmente para que seja evitado a formação de algum bolsão de gás originados dos processos de limpeza. Primeiramente os contaminantes mais grosseiros são removidos da superfície dos componentes utilizando as etapas da Figura 81.

Figura 81: Etapas utilizadas para limpeza dos componentes do sistema tubular.



Fonte: O autor.

Como uma forma de ter uma maior garantia que o processo de limpeza alcance regiões de difícil acesso, as peças foram imersas em uma solução de água com detergente neutro dentro de uma cuba ultrassônica. Esta técnica já foi introduzida na seção de fundamentos teóricos, onde basicamente é um sistema que cria microbolhas que quando estouram emitem ondas de energia ultrassônicas que são capazes de remover componentes que estiverem fixados, mesmo que seja por ligações fracas, às superfícies dos componentes. Neste trabalho foi utilizada uma cuba ultrassônica da marca cristófoli, como mostrada na Figura 82, que é capaz de alcançar até 65 °C e realizar um processo de limpeza de até 8 minutos.

Figura 82: Câmara de ultrassom utilizada para a limpeza ultrassônica das peças.



Fonte: O autor.

Para garantir que a limpeza ultrassônica seja realmente eficiente é necessário seguir as recomendações que a empresa CRISTÓFOLI recomenda em seu manual, quanto à limpeza e manutenção do equipamento. Já que conforme são realizados processos de limpeza, um em seguida do outro, os contaminantes que são eliminados dos componentes que passaram pela limpeza ficam imersos no meio líquido da cuba. Desta forma, a limpeza recomendada pelo fabricante é passar pelo processo detalhado pela Figura 83, utilizando detergente neutro para desengordurar a superfície da cuba, seguindo por um enxágue para remover detergente da superfície, passando pela limpeza

com álcool isopropílico e finalizando com o processo de degaseificação, que é realizado toda vez em que o processo de troca da água ou solução, como meio de conservar a eficiência do equipamento.

Figura 83: Processo de limpeza da cuba ultrassônica.



Fonte: O autor.

A última etapa do processo de limpeza é realizada utilizando uma flanela, que não solta fiapos, embebida em álcool isopropílico. Não necessitando ser seguido de um enxágue ou mesmo que seque os componentes, uma vez que ele é uma substância muito volátil. Este processo final é fundamental para eliminar os resíduos que continuaram presentes na superfície das peças, mesmo após várias etapas de limpeza, como graxas, gotículas de óleo, poeira e fuligem. O fato de ser uma substância muito volátil é muito vantajosa, uma vez que basta realizar o armazenamento adequado e esperar que todo produto volátil seja removido, algo que é só uma questão de tempo, evitando que haja presença de uma grande fonte de vapor no sistema de vácuo. A Figura 84 mostra este processo de limpeza sendo realizado em uma das conexões T do sistema tubular.

Figura 84: Limpeza dos componentes com álcool isopropílico.



Fonte: O autor.

Após realizar todos os processos de limpeza e polimento, quando necessário, os componentes devem ser armazenados e embalados de maneira correta, permitindo que vapores saiam do interior do recipiente, fazendo com que as superfícies fiquem secas. Para isso, os orifícios dos componentes foram embalados com papel alumínio como mostra a Figura 85.

Figura 85: Embalagem do componente do sistema de vácuo.



Fonte: O autor.

### 3.2.2 Montagem do sistema tubular

Um sistema tubular pode ser caracterizado como uma região específica de um sistema, como é o caso da maioria das linhas de bombeamento, ou mesmo o sistema de vácuo ter a forma tubular, como é caso de uma série de aplicações científicas e tecnológicas, talvez a mais conhecida seja os grandes aceleradores de partículas principalmente devido à grande fama de alguns laboratórios como é caso do CERN e do SIRIUS (nacional). Este é um tipo de sistema muito encontrado em sistemas de alto e ultra alto-vácuo desde a aplicações industriais, como é o caso da fabricação de lâmpadas UV, e também pesquisas, como é o caso deste arranjo. O processo de montagem seguiu os desenhos técnicos realizados e anexados no APÊNDICE 1: Desenhos técnicos do Projeto do Sistema Tubular.

O sistema tubular é constituído por quatro tubos e quatro conexões T, todas de aço de inoxidável austenítico 304-L (material muito bem difundido na indústria e na ciência) de forma que, teoricamente, o sistema de vácuo tenha uma taxa de desgaseificação constante ao longo de toda sua extensão. O processo de montagem foi realizado diversas vezes, de forma que fosse possível obter os valores da taxa de desgaseificação de cada tubo, individualmente, e também a coleta dos valores de pressão ao longo de várias posições do perfil de pressão. Desta forma, os materiais que foram adotados, tanto os projetados quanto os disponibilizados pelo laboratório, garantiram que houvesse uma grande flexibilidade contra a coleta de dados experimentais.

A Tabela 4 lista todos os componentes, com seus respectivos materiais, quantidade e descrição, utilizados para a construção dos arranjos experimentais para obtenção das taxas de desgaseificação por comprimento, de cada tubo, e do campo de pressão do sistema montado, mostrado na Figura 86.

Figura 86: Sistema tubular.



Fonte: O autor.

Na Tabela 6 é listada as etapas que foram adotadas para montagem do sistema, procurando primeiro montar a bancada experimental, onde toda a parte experimental deste trabalho foi realizado, depois prosseguir para montagem do arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação, uma vez que esta grandeza é fundamental para confeccionar os cálculos teóricos (analítico e numéricos) de campo de pressão, e, por último, realizar a montagem do sistema tubular, como uma forma de obter os valores experimentais medidos com um medidor de alto-vácuo tipo Penning em cada uma das conexões T e na extremidade do tubo, esta etapa pode ser realizada várias vezes. O próprio fato de o sistema ser bem flexível, torna a montagem do sistema ser realizada de diversas formas, quantas vezes forem possíveis já que, teoricamente, como o comprimento total não varia a taxa de desgaseificação por comprimento total também não varia. Algo que na realidade sempre varia um pouco, já que com a abertura do sistema para a atmosfera local, diversos elementos contaminantes presentes no ar são adsorvidos e/ou absorvidos pelas paredes dos componentes.

Tabela 6: Etapas de montagem do Projeto do Movimentador Magnético em Vácuo.

Etapas	Detalhes das etapas
--------	---------------------

1	Montagem da bancada experimental
2	Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação dos tubos
3	Montagem do sistema tubular

Fonte: O autor.

### 3.2.2.1 Montagem da bancada experimental

A bancada experimental do sistema tubular consistiu de uma mesa com comprimento total, de uma ponta a outra, de quatro metros e trinta e cinco centímetros de profundidade, como mostrado nos desenhos técnicos mostrados no APÊNDICE 1: Desenhos técnicos do Projeto do Sistema Tubular. Esta mesa foi construída sobre três carrinhos bem distribuídos ao longo da mesa, para que não houvesse nenhuma curvatura na mesa, algo que poderia ser muito prejudicial na hora de garantir o alinhamento dos suportes dos tubos. O carrinho utilizado serve como sustentação da mesa e também como um meio de mover com facilidade, além de servir como prateleiras para armazenar os componentes do sistema. A Figura 87 mostra o carrinho da marca FORTG, utilizado como suporte principal da mesa.

Figura 87: Carrinho para transporte de cargas.



Fonte: O autor.

Para iniciar a montagem da mesa, os carrinhos foram enfileirados com as distâncias adequados para que não houvesse risco de a madeira encurvar, principalmente se for posicionado um componente muito pesado (podendo ser uma câmara de vácuo ou uma bomba de vácuo). Com isso, a madeira foi brevemente fixada aos carrinhos utilizando uma série de grampos, como mostrado na Figura 88.

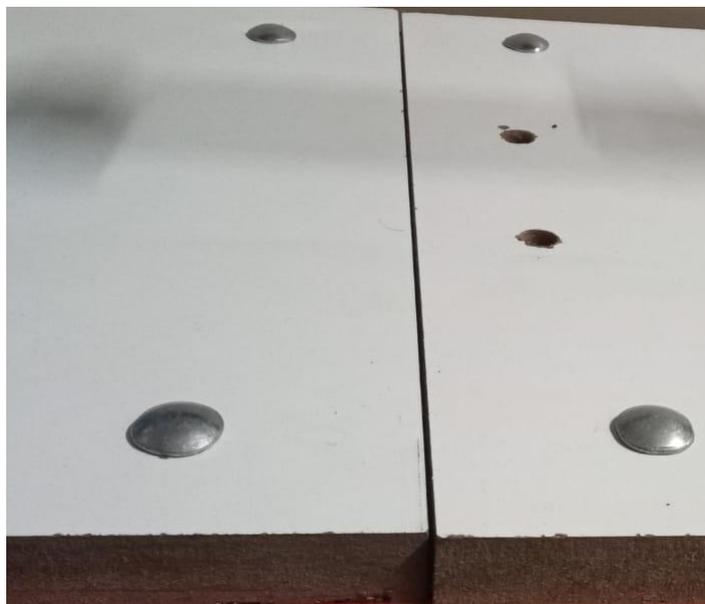
Figura 88: Fixação da mesa aos carrinhos utilizando grampos.



Fonte: O autor.

A partir desta fixação, foram realizadas as marcações para os furos de fixação entre a madeira e o carrinho e posteriormente furados utilizando uma broca GSB 13 RE da BOSCH. Foram adotados pontos de fixação para cada carrinho, como mostrado na Figura 89. Garantindo assim, que a mesa não desalinhasse o sistema quando houvesse algum movimento dos carrinhos.

Figura 89: Pontos de fixação entre as tábuas de madeira e o carrinho.



Fonte: O autor.

Como forma de garantir que não houvesse a formação de rachaduras na madeira, ou até mesmo a queima, os furos grandes foram feitos iniciando-se com o uso de uma punção de centro e um martelo para marcar os pontos de furo e prosseguiu-se com a realização de furos, iniciando com uma broca de diâmetro menor e aumentando até alcançar o diâmetro de furo desejado. Este processo é mostrado na Figura 90.

Figura 90: Processo seguido para realização dos furos na mesa.

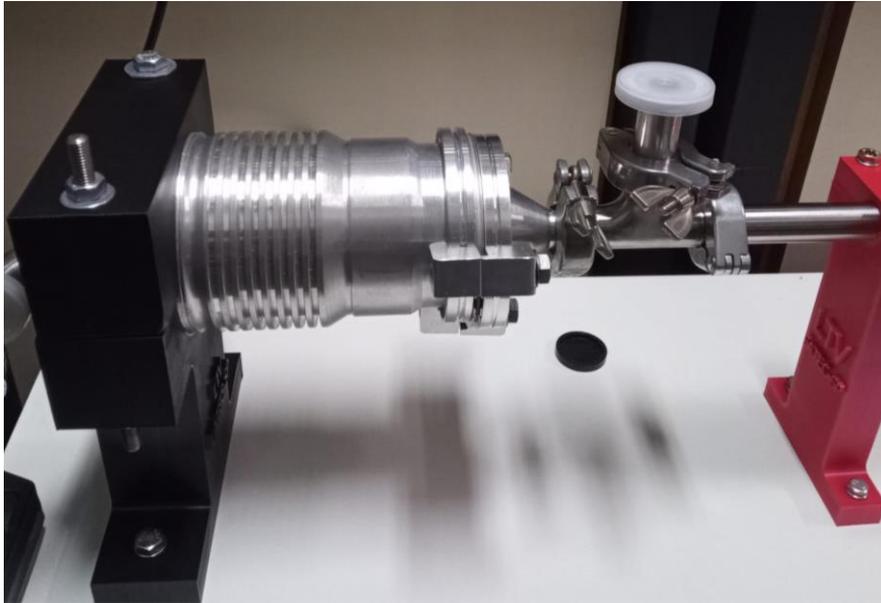


Fonte: O autor.

Para a realização dos furos para cada suporte, foi necessário fixar um suporte principal, que serviu como guia para os demais furos. O suporte da bomba turbodrag

serviu como o guia, uma vez que o sistema poderia ser montado parte a parte para que fosse ajustada a posição adequada para cada suporte, como mostrado na Figura 91.

Figura 91: Suporte da turbo-drag servindo como guia para posicionamento um suporte do tubo.



Fonte: O autor.

Como uma forma de melhorar ainda mais a montagem, foram feitos furos maiores para cada suporte de forma que fosse possível ajustar o sistema. Se o sistema não for ajustado corretamente, por exemplo: ele começa a se encurvar ou mesmo entortar ao longo do comprimento, pode haver uma presença gigantesca de vazamento real, ou seja, a entrada de gás da atmosfera por meio de aberturas nas conexões dos tubos. É fundamental que um sistema tubular seja muito bem alinhado, qualquer desalinhamento pode causar algum dano às conexões ou mesmo, no pior dos casos, abrir um vazamento que só pode ser resolvido com a reconstrução da peça. Desta forma foram adotados os furos mostrados na Figura 92, desta forma é possível realizar o alinhamento ao longo do sistema durante o processo de montagem do sistema tubular.

Figura 92: Furo com folga para alinhamento manual em cada um dos suportes do sistema tubular.



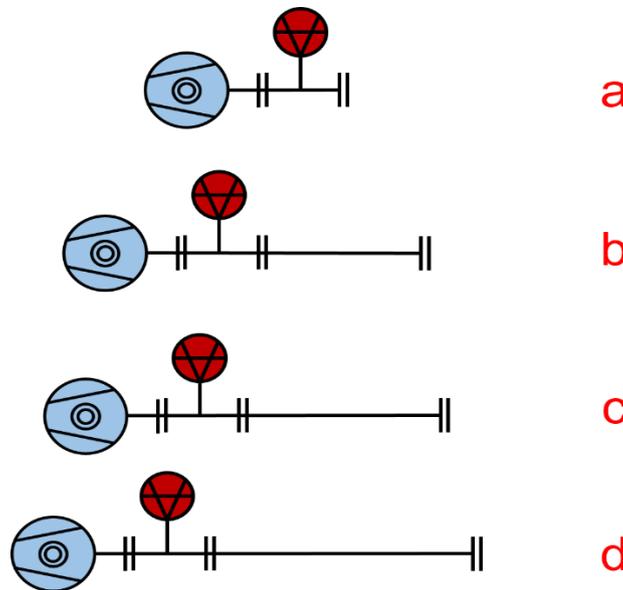
Fonte: O autor.

### **3.2.2.2 Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação dos tubos**

A obtenção da taxa de desgaseificação experimental é uma medida muito importante para um sistema de vácuo, principalmente se ele for de alto ou ultra alto-vácuo, uma vez que gases originados da superfície do sistema tem muita influência nessa faixa do vácuo. Por este motivo, a montagem dos tubos deve ser feita de forma a não deixar os componentes muito expostos ao ar por um tempo prolongado, principalmente pela presença de contaminantes na atmosfera que podem interferir no resultado. Como uma forma adicional de cuidado, toda a montagem foi realizada com luvas de látex, para que gorduras presentes nas mãos não se aderissem as paredes internas dos componentes, algo que causaria um aumento significativo da taxa de desgaseificação. Desta forma, manter a limpeza do componente garante que ao calcular a taxa de desgaseificação dos componentes, relativo ao tipo de material e o grau de limpeza da peça.

A forma com que os arranjos para obtenção da taxa de desgaseificação foram montados precisaram de um ponto em comum que serviria para padronizar as medições, sendo este ponto considerado o ponto zero ( $P_o$ ), que no caso prático foi a conexão T1. Esta peça assim como todo este sistema tubular foi construído com aço austenítico 304-L e passou pelo mesmo processo de limpeza e condicionamento que todos os demais também passaram, o comprimento deste tubo é de 7,8 cm e não é desconsiderado na hora do cálculo da throughput, a Figura 93 mostra os esboços que representam as formas em que cada arranjo foi montado com o objetivo de servir para obtenção da pressão de referência (pressão na saída da bomba turbo-drag) Figura 93 (a) e para obtenção das taxas de desgaseificação dos tubos Figura 93 (b, c e d). Na Figura 93 é mostrada apenas a bomba turbo-drag, porém o sistema na prática tem uma bomba mecânica de palhetas para evacuar o gás da saída da MDP 5011 (bomba de alto-vácuo representada na figura).

Figura 93: Arranjos utilizados para obtenções das pressão de referência e taxas de desgaseificação de cada um dos tubos. a - pressão de referência; b- tubos 1 e 2; c- tubo 3; d- tubo 4.



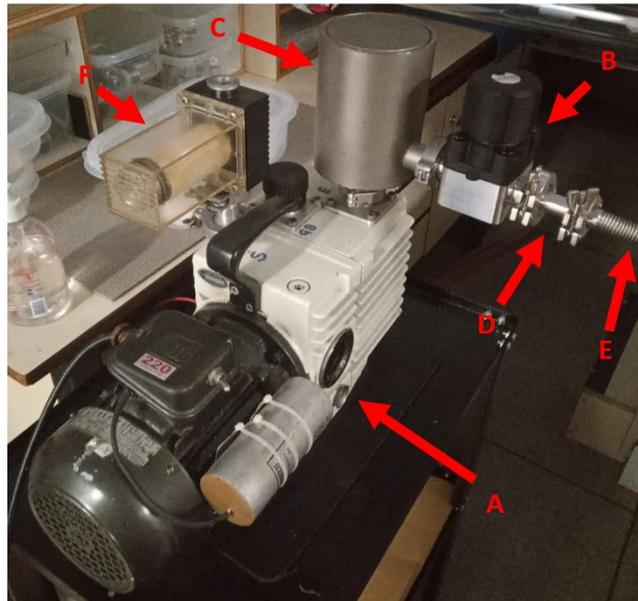
Fonte: O autor.

A partir dos desenhos representativos da Figura 93, foram realizados os desenhos técnicos mostrados no APÊNDICE 1: Desenhos técnicos do Projeto do Sistema

Tubular. Os arquivos anexados neste apêndice detalham os componentes e as suas medidas projetadas, ou seja, não são as medidas obtidas na prática.

Assim como mencionado anteriormente é necessário o uso de uma bomba mecânica de palhetas para exaurir os gases do sistema para a atmosfera, já que o processo de compressão do gás no interior da bomba faz com que a pressão aumente substancialmente até abrir a válvula de exaustão (que expulsa o gás do sistema). A bomba de alto-vácuo não é capaz de fazer isso, por este motivo foi necessário conectar um sistema de pré-vácuo na saída da bomba de alto-vácuo. Este sistema é formado por uma bomba TRIVAC D8A, que é detalhado no ANEXO 1: DETALHES DA BOMBA TRIVAC D8-A, um filtro de evacuação, filtro de ar, adaptador de KF 25 para KF 16, entre outros componentes secundários (como elementos de vedação e presilhas) que são mostrados na Figura 94.

Figura 94: Sistema de pré-vácuo. A – bomba mecânica TRIVAC D8A; B – válvula de membrana; C – Filtro de ar; D – adaptador de KF 25 para KF 16; E – fole metálico; F – filtro de evacuação.



Fonte: O autor.

Com isso, obviamente, que para o sistema alcançar a faixa do alto-vácuo (que é entre  $10^{-3}$  até  $10^{-6}$  mbar) é necessário utilizar uma bomba de alto-vácuo, que no caso deste trabalho foi uma bomba turbo-drag modelo MDP 5011 da empresa ALCATEL (que atualmente pertence a Pfeiffer Vacuum), que é bem detalhada no ANEXO 2:

DETALHES DA BOMBA TURBO-DRAG *MDP 5011 DN ISO K 63*. Como discutido na seção de fundamentos teóricos estes tipos de bomba são utilizados principalmente para que seja possível remover parte dos gases adsorvidos pelas paredes, que no caso deste trabalho é para remover os gases presente nas paredes dos tubos para alcançar uma pressão adequada para o projeto. A Figura 95 mostra a bomba utilizada no projeto do sistema tubular.

Figura 95: Bomba turbodrag utilizada no sistema tubular.



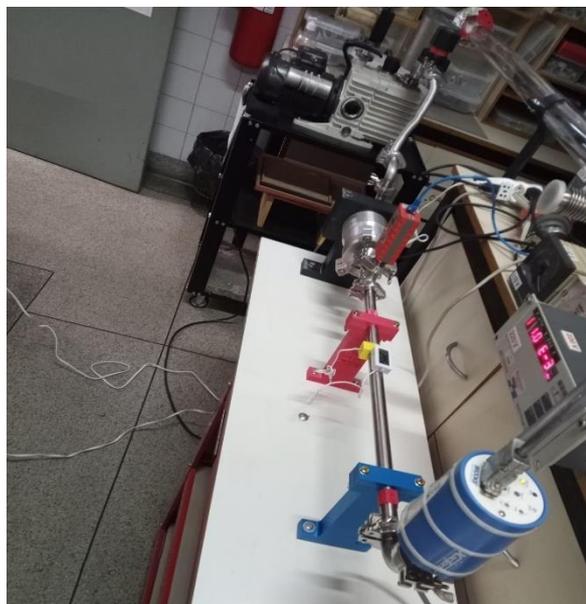
Fonte: O autor.

Como este trabalho se baseou no projeto de iniciação científica, já mencionado anteriormente, que teve como principal objetivo o desenvolvimento de um dispositivo de movimentação de cargas no interior de um sistema de alto-vácuo utilizando a relação de campos magnéticos entre ímãs de neodímio encaixados em dois acopladores, um externo e um interno, foi adotado a mesma meta de pressão mínima, que é próximo à  $10^{-6}$  mbar. Esta pressão é justificável, pois este dispositivo foi projetado para atuar na fabricação de lâmpadas de emissão de luz ultravioleta, necessitando de uma atmosfera muito limpa para garantir que não haja muitos contaminantes que afetem a vida útil e o funcionamento destes dispositivos. Apesar deste trabalho ter sido projetado para uma aplicação em específico, ela também pode servir como base para outros trabalhos

relacionados a sistemas tubulares, que são as geometrias mais utilizadas na faixa do alto e ultra alto-vácuo, como no caso de uma grande quantidade de tipos de aceleradores, microscópios eletrônicos, em projetos do tipo Tokamak (como no caso do TCA-BR), entre outros. Este trabalho teve uma parceria com a empresa Global UV rendeu uma patente que é mostrada na Figura 177 no APÊNDICE 3: Patentes submetidas durante o período de graduação..

Antes que houvesse qualquer medição na faixa do alto-vácuo, foi verificado se havia algum defeito de fabricação que afetaria drasticamente no desempenho do sistema, como por exemplo um vazamento real na região das soldas entre o um tubo e as suas conexões. Com a aparição de qualquer valor relevante de vazamento real seria necessário encaminhar para o fabricante dos tubos, algo que foi realizado por ter sido identificado alterações muito grandes de pressão quando foi espirrado álcool isopropílico na região das soldas (que provocou uma grande elevação de pressão). Isto foi identificado em todos os tubos que foram fabricados, provavelmente devido ao fabricante ter utilizado na primeira fabricação (antes do retrabalho) soldagem MIG (Metal Inert Gas), sendo que o recomendado é solda TIG (Tungsten Inert Gas). O tipo de verificação adotado não é o dos melhores, já que é muito grosseiro, o mais recomendado é utilizar gás hélio já que os átomos deste gás são capazes de passar por frestas muito pequenas, algo que dificilmente seria detectado utilizando o álcool isopropílico. Porém, apesar de não ser um dos melhores métodos, foi possível identificar defeitos grosseiros que estavam impedindo que a pressão do sistema com os tubos alcançasse uma pressão adequada. Sendo assim, este processo foi realizado para cada um dos arranjos da Figura 93, utilizando um medidor de pré-vácuo, Active Pirani Gauge APG-MP-NW16 ST/ST da marca Edwards e uma bomba TRIVAC D8A da marca Leybold GmbH, que foi posicionado no ponto de referência (na conexão  $T_1$ ) e um medidor de membrana capacitiva na extremidade dos tubos, modelo CMX0 da marca Brooks Instrument, ambos detalhados nos ANEXO 3: DETALHES SOBRE O MEDIDOR APG-MP-NW16 (PIRANI). (Pirani) e ANEXO 5 (Membrana capacitiva). Na Figura 96 é demonstrado uns dos arranjos utilizados para verificar a presença de vazamentos reais nas regiões das soldas nos tubos 1, 2, 3 e 4.

Figura 96: Arranjo de identificação de possíveis vazamentos reais nos tubos do sistema tubular.



Fonte: O autor.

Como mencionado anteriormente, foram encontrados vazamentos reais muito significativos quando os arranjos os primeiros testes foram realizados (logo após a fabricação das peças). Algo que tornaria o sistema tubular, compostos por estes tubos, fosse impossível de ser testado em alto-vácuo levando ao retrabalho de todos os tubos. Onde as conexões tiveram que ser removidas das extremidades dos tubos e foram soldadas com a técnica TIG, que é a recomendada para ser utilizada em sistemas de vácuo. Com isso, a partir da Tabela 7 são mostradas as variações no comprimento de cada tubo antes do retrabalho ( $L_o$ ) e depois do retrabalho ( $L$ ).

Tabela 7: Variação no comprimento de cada tubo antes e depois do retrabalho.

Tubo	$L_o$ (cm)	$L$ (cm)
1	52,2	51,2
2	52,3	51,3
3	100,2	99,2
4	122	121,1

Fonte: O autor.

Com a identificação de nenhum vazamento real relevante em todos os tubos pertencentes ao arranjo do sistema tubular, o trabalho prossegue para a medição da pressão final para realização do cálculo para obtenção da taxa de desgaseificação experimental de cada um dos tubos. Para isso foi primeiramente obtido o valor da pressão final no ponto zero do sistema, que é o ponto de referência na conexão  $T_1$ , utilizando um medidor de Penning (catodo frio), modelo AIM-S-NW25 da marca Edwards Vacuum, como mostrado pela Figura 97.

Figura 97: Medição da pressão de referência na conexão  $T_1$ .



Fonte: O autor.

Posteriormente, foram realizadas as medições da pressão no ponto de referência de cada um dos tubos que compõem o projeto do sistema tubular, como mostrado pela Figura 98.

Figura 98: Medições da pressão no ponto de referência de cada um dos tubos do sistema tubular. a- tubo 1; b- tubo 2; c- tubo 3; d- tubo 4.



Fonte: O autor.

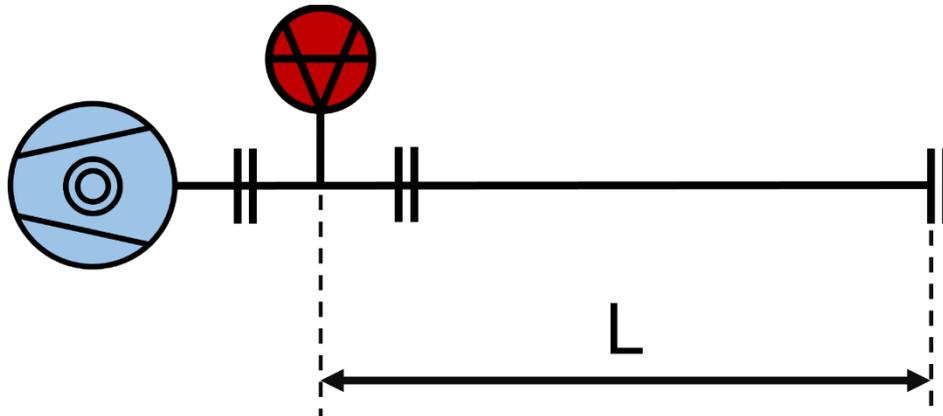
Com os dados coletados foi utilizada a Eq 3.1 para calcular o valor da taxa de desgaseificação por comprimento de cada um dos tubos do sistema, onde o comprimento considerado é mostrado conforme a Figura 99.

$$q_s = \frac{S_{ef} \cdot p_o}{L} \quad Eq\ 3.1$$

Onde:

- $S_{ef}$  – Velocidade de bombeamento efetiva do sistema;
- $L$  – comprimento do tubo;
- $P_o$  – Pressão no ponto de referência.

Figura 99: Medida do comprimento dos tubos utilizada na Eq 3.1.



Fonte: O autor.

A taxa de desgaseificação por comprimento do sistema tubular é calculada a partir da média das taxas desgaseificação por comprimento de cada tubo, assim como mostrado na Eq 3.2.

$$q_{ST} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{n} \quad \text{Eq 3.2}$$

### 3.2.2.3 Montagem do sistema tubular

Com todos os valores das taxas de desgaseificação dos tubos obtidos de forma experimental, é possível utilizá-los para a resolução do campo de pressão do sistema tubular de forma analítica e numérica e compará-los com os valores obtidos experimentalmente, utilizando o medidor de alto-vácuo CP-25-S da marca Edwards Vacuum. O outro medidor utilizado para obtenção das taxas de desgaseificação dos tubos teve que ser trocado devido a problemas técnicos, porém antes dele ser danificado havia sido feito uma medida comparativa entre estes dois medidores Penning sobre uma distância muito pequena entre os dois para verificar a diferença de valores de pressão que eram obtidos em ambos, o arranjo mencionado é mostrado na Figura 100.

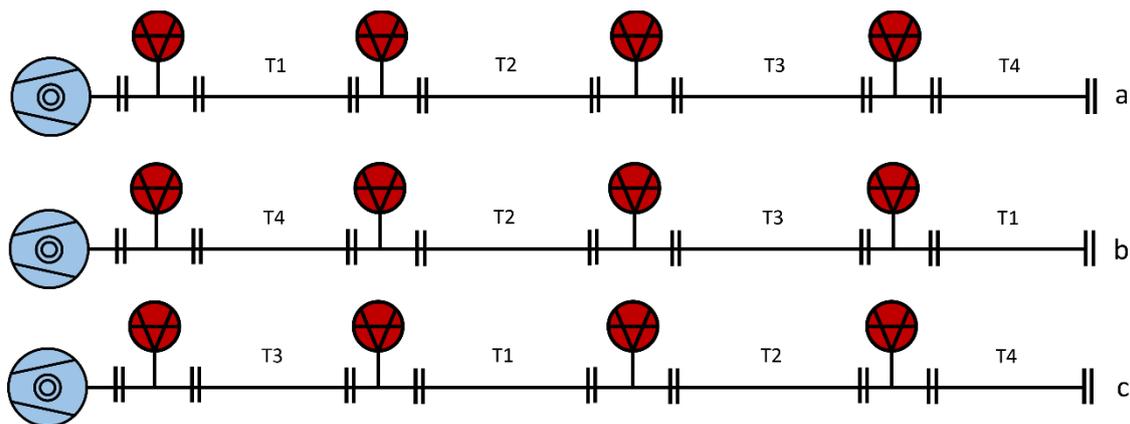
Figura 100: Arranjo para conferir a proximidade de medição da pressão entre os dois medidores Penning disponibilizados pelo laboratório.



Fonte: O autor.

Como já mencionado anteriormente este sistema foi projetado para garantir que tivesse boa flexibilidade, para que dessa forma fosse possível obter muitos dados experimentais. Uma vez que quando são obtidos todos os valores experimentais de um arranjo, basta desmontar este arranjo e remontar de outra maneira, reposicionando os lugares de cada tubo. Algo que também é importante mencionar é que este tipo de sistema possibilita que sejam utilizadas até cinco bombas com diversos tipos de configuração, como mostrado pela Figura 101, algo que seria muito caro de ser obtido experimentalmente (principalmente se todas fossem de alto-vácuo), porém pode ser facilmente simulado nos softwares COMSOL e molflow e também poderia ser calculado de forma analítica. Durante a obtenção dos dados experimentais o sistema tubular foi montado de três formas diferentes, como mostrado pela Figura 101. Este processo de montar e remontar teoricamente não deveria afetar o sistema, já que não há adição de nenhuma peça a mais, a não ser o fato de que toda vez em que as peças são desmontadas elas são expostas à atmosfera que possui partículas contaminantes que podem ser adsorvidas ou absorvidas pelas paredes dos componentes, o comprimento se mantém igual em todas as montagens (que é cerca de 349 cm).

Figura 101: Diferentes formas de montagem do sistema tubular utilizadas neste trabalho. a- Arranjo 1; b- Arranjo 2; c- Arranjo 3.



Fonte: O autor.

Neste trabalho foram utilizados quatro conexões T, onde suas medidas realizadas com um paquímetro analógico são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8: Medidas das conexões T do sistema tubular.

Conexão T	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
1	$7,765 \pm 0,005$	$1,52 \pm 0,005$
2	$6,76 \pm 0,005$	$1,37 \pm 0,005$
3	$7,77 \pm 0,005$	$1,5 \pm 0,005$
4	$7,75 \pm 0,005$	$1,49 \pm 0,005$

Fonte: O autor.

Também vale relacionar as variações de diâmetros que podem afetar bastante na conta da condutância total do sistema tubular. Dito isto, a Tabela 9 mostra as medidas obtidas dos tubos e suas respectivas incertezas, onde o comprimento dos tubos foi medido com uma trena e o diâmetro foi medido com paquímetro analógico.

Tabela 9: Medidas dos tubos do sistema tubular..

Tubo	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
1	$51,2 \pm 0,01$	$1,57 \pm 0,005$
2	$51,3 \pm 0,01$	$1,6 \pm 0,005$

3	$99,2 \pm 0,01$	$1,595 \pm 0,005$
4	$121,1 \pm 0,01$	$1,6 \pm 0,005$

Fonte: O autor.

Vale ressaltar que apesar de nos desenhos da Figura 101 serem representados 5 medidores de vácuo no total esta representação apenas mostra as posições em que foram medidos os valores pressão, pois havia apenas um medidor de alto-vácuo disponível no laboratório. Desta forma, estes resultados tiveram que ser obtidos cada um individualmente utilizando apenas o medidor CP 25-S da Edwards, onde o tempo de bombeamento para cada medida foi padronizado como sendo duas horas (já que foi ao mesmo tempo utilizado para obter a taxa de desgaseificação), algo muito importante de ser dito uma vez que o modelo utilizado neste trabalho foi uma medida da pressão estacionária e como a taxa de desgaseificação varia com o tempo, é necessário ter um como padrão pro trabalho.

Figura 102: Obtenção do ponto experimental em um dos arranjos do sistema tubular.



Fonte: O autor.

Com isso os dados são plotados em um gráfico da pressão em função do tempo, que tem um formato parabólico, e os resultados são discutidos na próxima seção. Vale mencionar também que foram coletadas as temperaturas dos tubos utilizando

termopares que forma encaixados utilizando um suporte feito em uma impressora 3D, como mostrado na Figura 103.

Figura 103: Termopar fixado ao tubo com um suporte para medição da temperatura do tubo.



Fonte: O autor.

### 3.2.3 Modelagem analítica

Algo que já foi mencionado anteriormente é que o sistema tubular deste trabalho foi todo construído do mesmo material, o aço inoxidável 304-L, além também de ter sido adotados todos os processos de limpeza de forma igual para todos os componentes do sistema tubular. Tornando um sistema que pode ser modelado como um tubo com taxa de desgaseificação constante e estacionário, já que foi adotado um tempo específico para anotação dos dados experimentais e a partir disto foi montado o gráfico experimental.

Para a modelar o sistema tubular de forma analítica não é necessário considerar a presença de nenhum dos medidores, sendo assim o arranjo é definido apenas como um cilindro preenchido com gás nitrogênio ( $M_{N_2}=28$ ) em temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$  ou  $293,15\text{ K}$ ) e em regime molecular ( $K_N > 1,0$ ), na figura é mostrada uma representação

do problema do sistema tubular deste trabalho. A função do campo de pressão é obtida a partir da aplicação de um integral dupla na Eq 2.46, resultando na obtenção de dois coeficientes (A e B) que são mostrados na Eq 3.3.

Figura 104: Sistema tubular com taxa de desgaseificação constante, temperatura ambiente e preenchida por gás nitrogênio (N2).



Fonte: O autor.

$$\iint \frac{d^2 p(x)}{dx^2} = p(x) = -\frac{q}{2c} x^2 + Ax + B \quad \text{Eq 3.3}$$

A solução do problema é resolvido a partir da aplicação das duas condições de contorno, desta forma são obtidos os valores dos coeficientes A e B. Tendo como noção de que pressão mínima é na posição zero (de referência) e a posição fica na extremidade oposta a bomba turbo-drag. Desta forma as condições de contorno são impostas conforme as Eq 3.4 e Eq 3.5.

$$p(0) = B = \frac{q \cdot L}{S_{ef}} \quad \text{Eq 3.4}$$

$$\left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=L} = -\frac{q \cdot L}{c} + A = 0 \Leftrightarrow A = \frac{q \cdot L}{c} \quad \text{Eq 3.5}$$

Substituindo as Eq 3.4 e Eq 3.5 na Eq 3.3 é obtida a solução do campo de pressão de forma analítica, como mostrado na Eq 3.6.

$$p(x) = -\frac{q}{2c} x^2 + \frac{q \cdot L}{c} x + \frac{q \cdot L}{S_{ef}} \quad \text{Eq 3.6}$$

Como forma de tornar a solução gráfica com uma solução gráfica com boa resolução foi optado por utilizar o software matlab, onde foi definida uma malha para plotar um gráfico com 3490 pontos, como mostrado pela Figura 105. O código inteiro é detalhado no APÊNDICE 4: CÓDIGO MATLAB UTILIZADO PARA PLOTAR OS GRÁFICOS ANALÍTICO, NUMÉRICO, EXPERIMENTAL..

Figura 105: Definição da malha gráfica no software matlab.

```
%Definição da malha  
x = linspace(0, 349, 3490);
```

Fonte: O autor.

### 3.2.4 Simulação computacional

#### 3.2.4.1 COMSOL MULTIPHYSICS

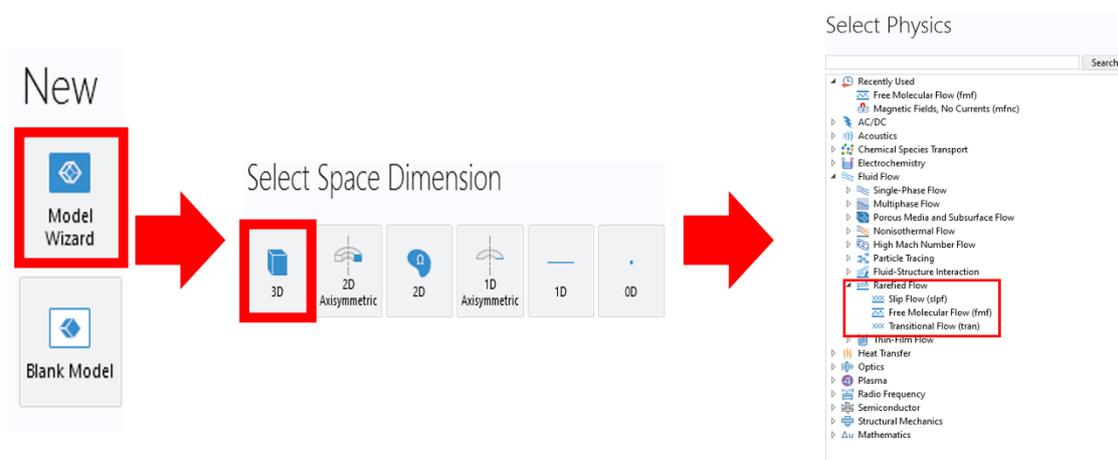
O COMSOL é um software multifísico onde é possível modelar diversos tipos de problemas tanto da ciência quanto da tecnologia. Nos fundamentos teóricos ele já mencionado como sendo um software que utiliza da técnica de elementos finitos, sendo capaz de acoplar em um único arranjo mais de um fenômeno físico em um problema, por exemplo: relacionar a dissipação térmica com um circuito eletrodinâmico.

Sendo que em cada tipo de problema são realizadas algumas etapas para obter os valores experimentais, passando por definição geométrica, definição das propriedades físicas de um dado problema (como taxa de desgaseificação, velocidade de bombeamento, entre outras), definição da malha e o compilamento das equações relacionadas ao tipo de problema sendo resolvido.

Para iniciar uma simulação no COMSOL é necessário escolher o ambiente onde o problema será modelado, estes diferentes tipos de ambientes são separados em módulos (que são vendidos individualmente na loja do software). Dentre os vários módulos, existentes o Molecular Flow Module (Módulo de Fluxo Molecular) é uma das várias

ferramentas físicas deste programa, sendo voltada para modelagem de problemas complexos relacionados a fenômenos de gases rarefeitos, que é muito útil para a ciência e tecnologia aeroespacial. Como mostrado na Figura 106, logo quando selecionado “New” é direcionado para a escolha do espaço dimensional (se a modelagem é unidimensional, bidimensional ou tridimensional), levando até a seleção do ambiente físico. Para a simulação do sistema tubular foi selecionado o ambiente 3D e a interface “Free Molecular Flow”, que faz a resolução dos problemas por coeficiente angular.

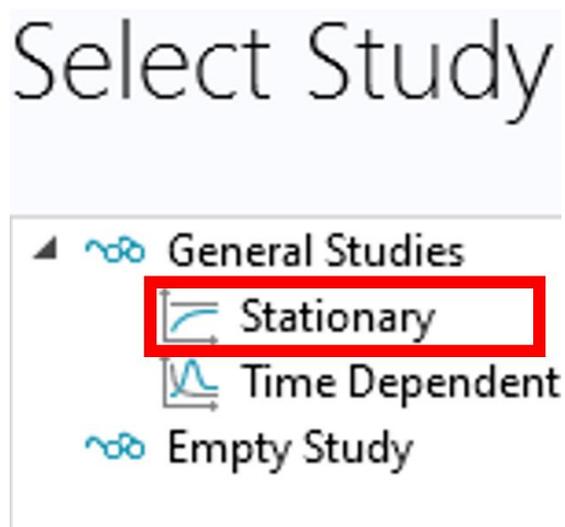
Figura 106: Seleção do ambiente de modelagem.



Fonte: O autor.

Assim como dito anteriormente, o tipo de modelagem utilizada para obtenção do campo de pressão é estacionário. Ou seja, como mostrado na Figura 107 o ambiente selecionado foi o “Stationary” (Estacionário), já que para este tipo de problema é obtido apenas a pressão final ao longo de cada posição do comprimento do tubo.

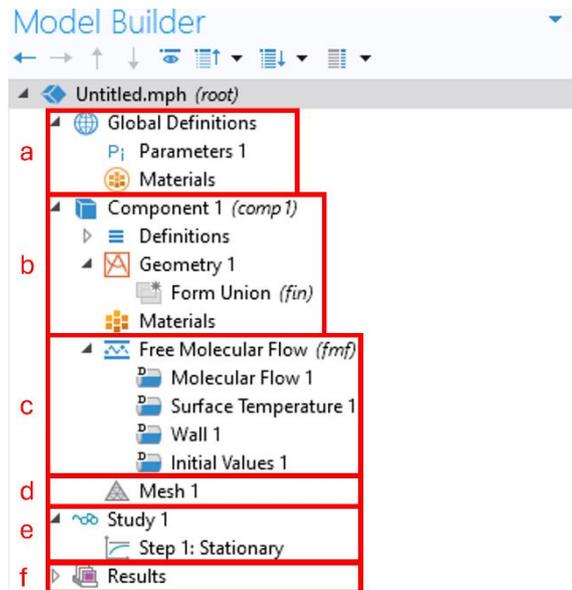
Figura 107: Seleção do ambiente estacionário.



Fonte: O autor.

Com a abertura da interface de regime molecular estacionário, o programa disponibiliza ferramentas para definir parâmetros globais, onde são definidas variáveis globais (Figura 108 (a)), com seus respectivos valores, podendo ser utilizados durante o processo da definição das condições de contorno, definir a geometria do componente (Figura 108 (b)), escolher as condições de contorno (Figura 108 (c)), como por exemplo: a posição da bomba de vácuo (e seu respectivo valor de velocidade de bombeamento), definição da malha gráfica ((Figura 108 (d)), solucionador estacionário ((Figura 108 (e)), que aplica as equações para cálculo da pressão em cada uma das malhas, e o resultado da modelagem (Figura 108 (f)), onde mostra a solução das equações que são aplicadas nas malhas do arranjo.

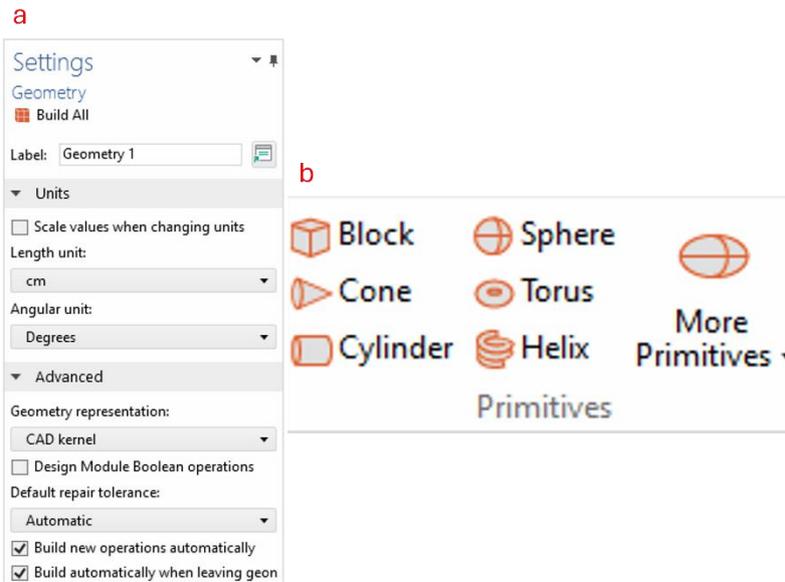
Figura 108: Ferramentas de modelagem. a- Definições globais; b- Componente; c- condições de contorno; d- Definição da malha; e- Solucionador estacionário; f- resultado da modelagem.



Fonte: O autor.

Como neste trabalho a ferramenta “Global Definitions”, a modelagem é iniciada a partir da definição da geometria do sistema tubular, como na Figura 109 (a). Pelo sistema ter uma geometria simples é possível utilizar as próprias “geometrias primitivas”, como os da Figura 109 (b), no sistema, já que o sistema pode ser modelado assim como na modelagem analítica, ou seja, um cilindro.

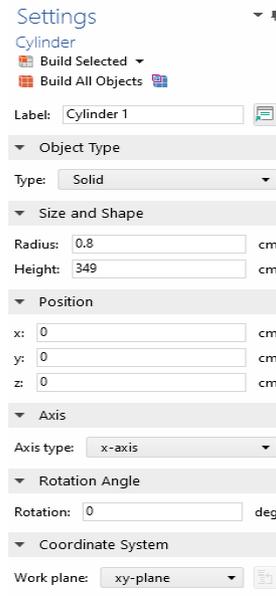
Figura 109: Definição da geometria do sistema tubular. a- Configurações da geometria; b- geometrias primitivas.



Fonte: O autor.

A partir da seleção da geometria primitiva “Cylinder” (cilindro), é aberta uma aba para definir as informações quanto à geometria do cilindro, como diâmetro e comprimento, e informações como direção em que a forma é posiciona e até mesmo a posição no espaço em que ela é construída, como mostrado pela Figura 110.

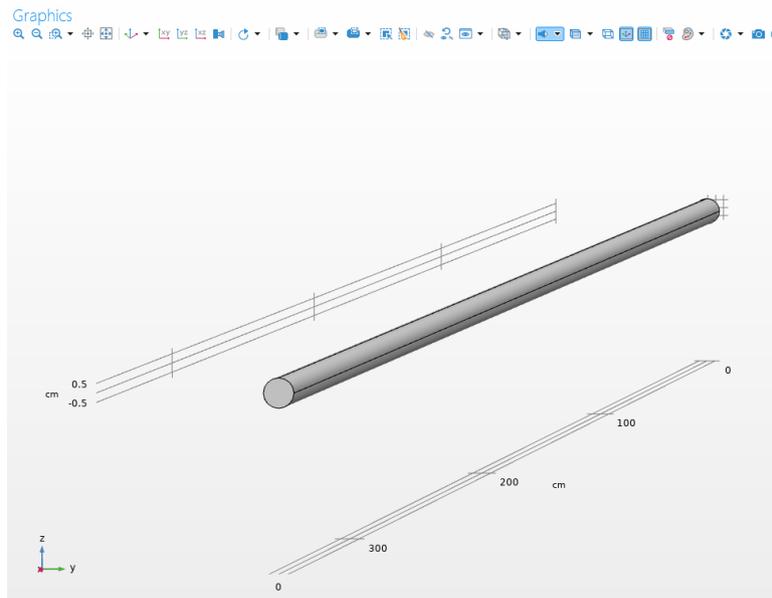
Figura 110: Definição da geometria do cilindro.



Fonte: O autor.

Selecionando “Build selected” da Figura 110, a geometria do sistema tubular é criada, como mostrado na Figura 111.

Figura 111: Geometria do sistema tubular definida.

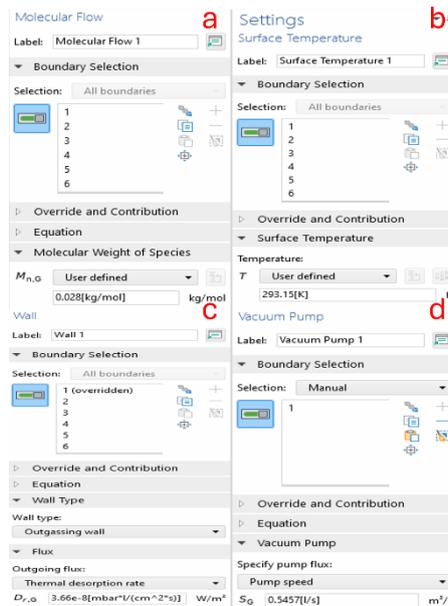


Fonte: O autor.

Com isso, são definidas as condições de contorno que descrevem o problema do sistema tubular e todas as grandezas importantes, como tipo de gás (onde foi escolhido o gás nitrogênio), temperatura superficial (temperatura ambiente, ou seja, 293,15 K), taxa de desgaseificação específica do sistema tubular (que foi de 3,66 mbar.l.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>), que é obtido a partir da Eq 3.7, e a velocidade de bombeamento efetivo (que foi de 0,5457 L.s<sup>-1</sup>). As definições das condições de contorno do sistema são mostradas pela Figura 112.

$$q_A = \frac{q_s}{\pi \cdot D} \quad \text{Eq 3.7}$$

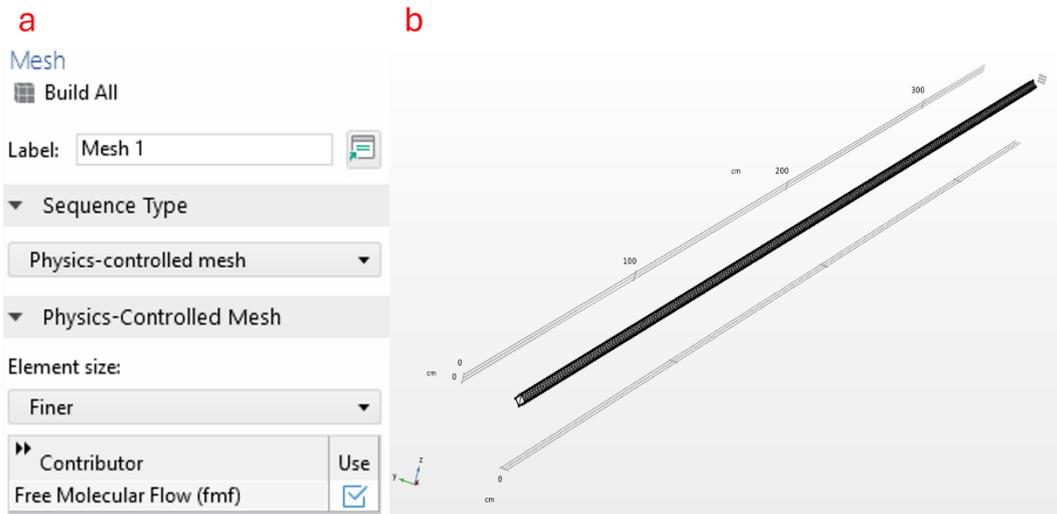
Figura 112: Definição das condições de contorno. a- definição da massa molecular do gás; b- Temperatura superficial do sistema; c- taxa de desgaseificação específica do sistema; d- definição da velocidade de bombeamento.



Fonte: O autor.

Após a definição das condições de contorno, é definida a resolução da malha gráfica. Normalmente é escolhido a malha mais fina possível, que vai depender do quão pesado é o arquivo e também da capacidade gráfica do trabalho. Para este trabalho foi utilizada uma malha “finer”, Figura 113 (a), resultando na malha da Figura 113 (b).

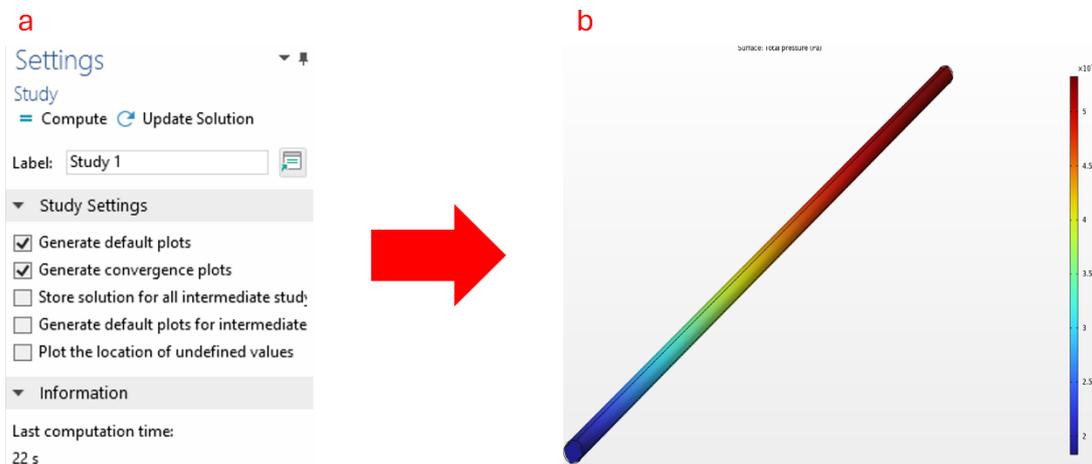
Figura 113: Definição da malha. a- configuração da malha; b- malha gráfica.



Fonte: O autor.

Com isso, o campo de pressão é obtido a partir da aplicação das equações da interface fmf nas malhas, isto é feito quando o botão “compute” na aba “study” é selecionada, como na . Com isso, o programa passa a calcular de forma contínua a pressão ao longo dos pontos do sistema tubular, onde esses pontos de cálculo são definidos pela malha da Figura 113, resultando na Figura 114 (b).

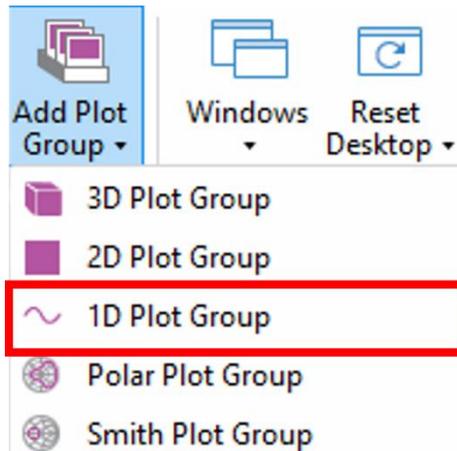
Figura 114: Cálculo da pressão do sistema tubular. a- seleção do solucionador; b- campo de pressão resultante.



Fonte: O autor.

Com isso, basta obter o gráfico da simulação no software COMSOL. Para isso é necessário configurá-lo, antes disso é necessário selecionar o tipo de gráfico que deve ser plotado, que no caso deste trabalho foi um gráfico unidimensional como mostrado pela Figura 115.

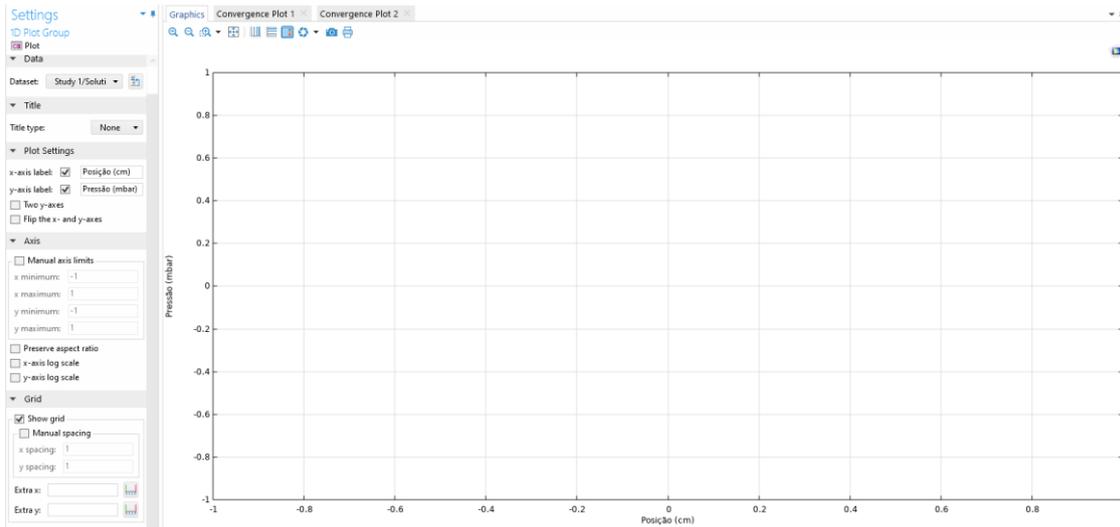
Figura 115: Seleção do gráfico unidimensional.



Fonte: O autor.

Primeiro são selecionadas e configuradas as informações quanto ao título do gráfico, marcado como “none” (nenhum), e os eixos x (comprimento em cm) e y (pressão em mbar), como mostra a Figura 116.

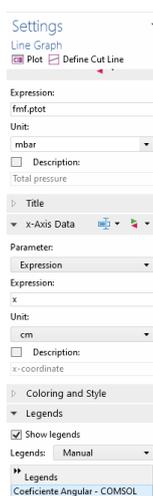
Figura 116: Configuração dos eixos do gráfico.



Fonte: O autor.

Com isso, basta configurar o gráfico linear, como mostrado pela figura Figura 117.

Figura 117: Configuração do gráfico linear para o sistema tubular.



Fonte: O autor.

### 3.2.4.2 Molflow

O molflow é um software gratuito, desenvolvido nos anos 1990 no CERN, sendo utilizado para calcular campo de pressão e condutância de sistemas no regime molecular (alto e ultra alto-vácuo), utilizando uma técnica de variáveis aleatórias denominada Método de Monte Carlo (MMC), que já foi introduzido na seção de fundamentos teóricos [34].

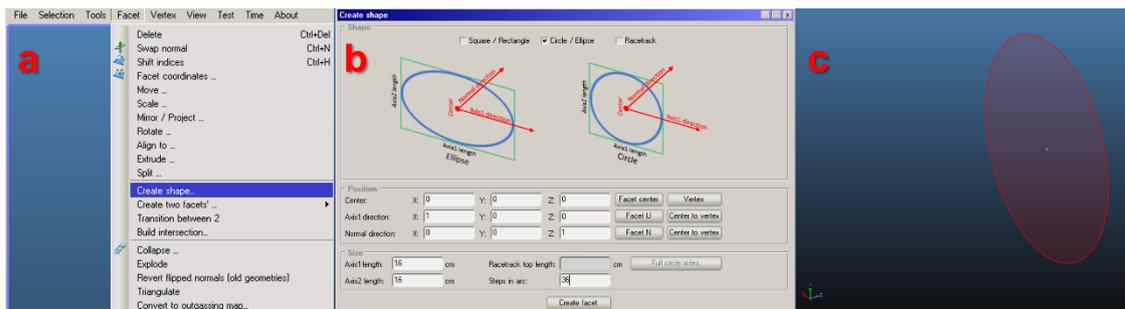
A simulação deve ser antecedida de processos parecidos com o realizado na simulação no software COMSOL, ou seja, é necessário definir uma geometria para o sistema tubular, que pode ser importada a partir de um arquivo compatível com o programa (por exemplo arquivos CAD no formato STL), que nesse programa é formada por polígonos (chamados de facetas). É necessário também definir regiões onde entram partículas teste (que são realizadas para realizar o cálculo do campo de pressão) e a

saída (ou as saídas) por onde o gás é “evacuado” do sistema de vácuo, que é onde são posicionadas as bombas de vácuo. Durante esse período entre entrada e saída de partículas, elas se colidem com a parede, algo que é registrado pelo programa. Sendo desconsiderado qualquer colisão entre moléculas [34].

Apesar de este software ter sido desenvolvido para simular sistema de aceleradores de partícula, também é possível utilizá-lo em diversas outras aplicações, como no caso deste trabalho. Apesar deste trabalho não ter o propósito de descrever a modelagem de um acelerador de partículas, ele pode muito bem ser melhorada para ser utilizado em trabalhos nesta área. Sendo assim, a versão do software molflow utilizada para a modelagem com MMC foi a 2.9.23 (lançada no dia 15 de maio de 2024), que atualmente é a versão mais recente do software e é disponibilizado gratuitamente no portal do CERN.

A primeira etapa para realizar a simulação, no molflow, é adicionar a geometria do sistema tubular. Para isso é selecionado a ferramenta “create shape” no guia “Facet”, que abre a aba mostrada na Figura 118 (a), onde são colocadas as informações quanto à seção transversal do sistema tubular (foi considerado um diâmetro interno ao longo de todo o tubo de 1,6 cm), como mostrado na Figura 118 (b). Selecionando o botão “Create facet” a seção transversal é introduzida no ambiente de simulação, como mostrado pela Figura 118 (c).

Figura 118: Adição da seção transversal do sistema tubular. a- selecionando a ferramenta "Create Shaope"; b- criando a seção transversal circular; c- geometria inserida no ambiente de simulação.

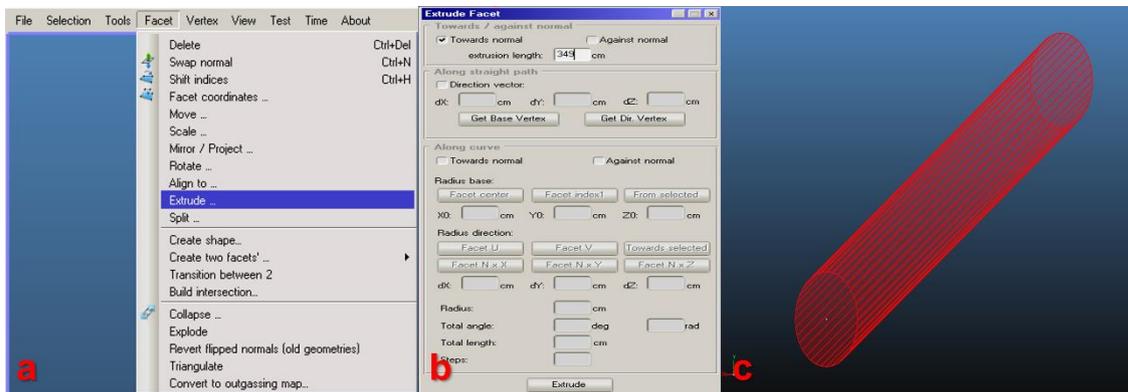


Fonte: O autor.

Apenas definir a seção transversal do tubo não é o suficiente, já que o software faz uma simulação 3D. Sendo assim é necessário fornecer um volume para formar a

geometria do tubo, que é um cilindro de 349 centímetros de comprimento e 1,6 cm de diâmetro interno. Para isso, foi utilizada a ferramenta “Extrude” (extrusão), mostrado na Figura 119 (a), novamente, no guia “Facet”, realizando uma adição de 349 centímetros como na Figura 119 (b). Desta forma é obtida a geometria do sistema tubular, Figura 119 (c).

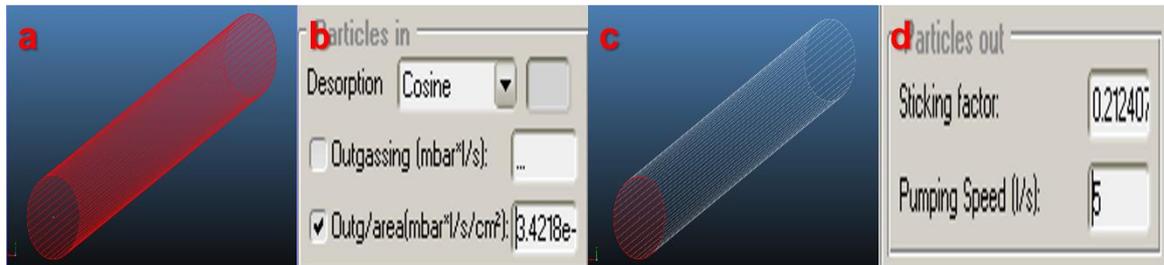
Figura 119: Extrusão da seção transversal. a - Seleção da ferramenta "Extrude"; b- configurando a extrusão do tubo; c- geometria do sistema tubular definida.



Fonte: O autor.

A próxima etapa da modelagem é definir as condições de contorno, que foram realizadas conforme as informações da Figura 120. Para realizar isto, primeiramente, selecionar todas as facetas, como na Figura 120 (a), para definir a taxa de desgaseificação, Figura 120 (b), e, por fim, deve ser selecionado a faceta onde a bomba de alto vácuo é posicionada (que é no ponto de referência ou ponto zero), mostrado na Figura 120 (c), e o valor de bombeamento nesta região é definida, conforme mostra a Figura 120 (d).

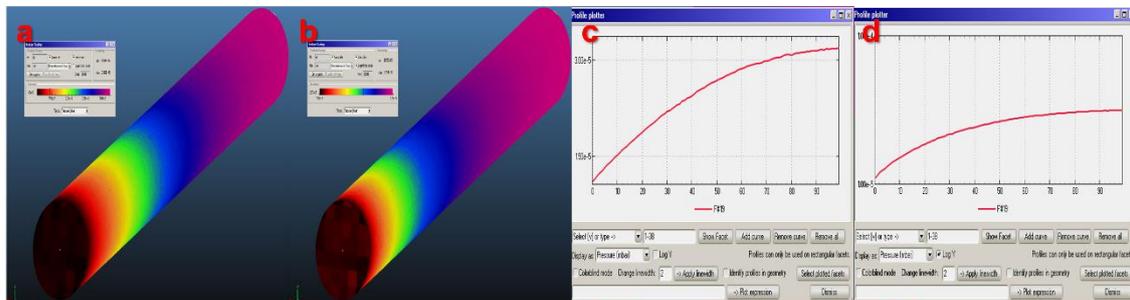
Figura 120: Definição das condições de contorno. a - Seleção das facetas de "entrada" das partículas teste; b- definição da taxa de desgaseificação; c- seleção da faceta onde é posicionada a bomba de alto-vácuo; d- definição da velocidade de bombeamento.



Fonte: O autor.

A pressão é calculada a partir de partículas que são desorvidos, absorvidos ou quando incidem na parede, é exercida uma força aplicada sobre a área desta faceta (parede), que em suma é definida como a grandeza pressão. Na faceta é possível configurar a resolução da textura (tamanho da célula), como mostrado na Figura 121 (a e b). Os valores de pressão obtidos em cada uma dessas células pode ser lidos a partir de uma plotagem gráfica ou por escala de cores linear ou logarítmica, como mostrado pela Figura 121 [34].

Figura 121: Ferramentas de plotagem. a- escala de textura linear; b- escala de textura logarítmica; c- gráfico linear; d- gráfico logarítmico.



Fonte: O autor.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Esta seção é dedicada para relatar os dados resultantes dos processos discutidos na seção anterior, onde o principal objetivo foi de confeccionar um sistema tubular de geometria cilíndrica de forma teórica (analítica), computacional (numérica) e experimental (medidas). Também sendo uma seção dedicada para discutir formas de melhorar o arranjo experimental e também as dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

### **4.1 Teste de vazamento real**

A primeira avaliação, que é muito importante para verificar o funcionamento adequado do sistema tubular e se ele deve ou não ser retrabalhado, já que a presença significativa de vazamentos reais, principalmente nos pontos de solda, implica no mal funcionamento do sistema e impede que a pressão desejada em que este trabalho teve objetivo de alcançar (faixa entre  $10^{-4}$  até  $10^{-6}$  mbar). Com isso, a partir dos arranjos da Figura 93, mostrados na seção de seção anterior de materiais e métodos (3.2.2.2), foi verificado se havia algum vazamento real significativo no sistema.

No primeiro teste, que foi realizado em setembro do ano de 2023 (antes da reconstrução dos tubos), foi verificado que todos os tubos apresentavam uma certa variação da pressão; quando foi espirrado álcool na região dos pontos de solda houve uma oscilação instantânea no indicador do medidor de vácuo, que foi uma indicação de que havia um grande vazamento nessas regiões (que foi encontrado em todos os quatro tubos do sistema). Por outro lado, as peças disponibilizadas pelo laboratório (conexões T) não apresentaram nenhuma variação na pressão quando testadas, demonstrando que o problema do vazamento estava ocorrendo apenas nos pontos de solda dos tubos. Tornando necessário que estes componentes fossem retrabalhados pelo torneiro mecânico.

Ligando a bomba turbomolecular MDP 5011 e utilizando, inicialmente, o medidor Penning, foi indicado no medidor que a pressão em cada um dos tubos não estava alcançando nem mesmo o alto-vácuo, ou seja, na verdade os tubos tinham uma pressão final na faixa do pré-vácuo (que é uma faixa entre a  $10^3$  mbar e  $10^{-3}$  mbar), sendo necessário utilizar um medidor Pirani na extremidade do tubo para detectar o valor da pressão em que cada um dos tubos como mostra a Figura 122, sendo este o “melhor cenário” testado que foi obtido com o tubo 1. Esta primeira versão dos tubos (antes da reconstrução) foi soldada por solda MIG, que não é uma opção recomendada para ser utilizada em sistemas de vácuo sendo esta, provavelmente, a causa da presença de um vazamento real significativo nas regiões das juntas. Com isso, os tubos foram reenviados para a empresa que fabricou os tubos, sendo solicitado que as pontas (conexões) fossem removidas e soldadas ao tubo (após a remoção) utilizando a técnica TIG, que esta sim é um técnica de soldagem recomendada para o uso em sistemas de vácuo. Na Figura 122 (a) é mostrada a pressão medida no ponto de referência (ponto zero ou simplesmente na conexão  $T_1$ ), enquanto na Figura 122 (b) é mostrada o valor de pressão obtido na extremidade do tubo.

Figura 122: Valores de pressão obtidos durante o primeiro teste de vazamento no tubo 1. a - medição no ponto de referência; b- medição na extremidade do tubo.



Fonte: O autor.

Após a retrabalho nos tubos 1, 2, 3 e 4 todos eles foram testados novamente. Com isso, foi possível identificar que o problema mencionado anteriormente foi resolvido. Uma vez que no segundo teste de vazamento não houve nenhuma oscilação no valor da pressão quando foi espirrado álcool sobre as regiões das junções soldadas, algo que demonstrou que realmente o processo de soldagem tinha sido realizado de maneira inadequada, conseguindo ser resolvida durante o processo de reconstrução dos tubos. Além disto, assim como no processo anterior, foi realizada a medição em alto-vácuo sendo obtido em todas as situações, na posição de referência, um valor de  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar, como mostra a Figura 123. Sendo um ótimo resultado já que, como apresentado no ANEXO 2: DETALHES DA BOMBA TURBO-DRAG MDP 5011 DN ISO K 63, este é um valor muito próximo a pressão final em que é possível alcançar utilizando a bomba turbo-drag MDP 5011.

Figura 123: Medida experimental da pressão final no ponto de referência durante o segundo teste de vazamento real nos tubos do sistema tubular.



Fonte: O autor.

## 4.2 Taxa de degaseificação dos tubos

Após verificar que a taxa de vazamento real nos tubos não era mais um problema, foi realizado o processo de obtenção da taxa de desgaseificação dos tubos, que assim como o teste anterior, foram realizados os arranjos da Figura 93. Com isso os valores das taxas de desgaseificação dos tubos, para o tempo de duas horas de exposição ao ambiente de vácuo, são mostrados na Tabela 10. O comprimento informado, considera a medida do comprimento conforme a Figura 99 (mencionada na seção materiais e metodologias).

Tabela 10: Taxas de desgaseificação para cada um dos tubos do sistema tubular.

Tubos	Comprimento	$q_{\text{desg}}$ (mbar.l.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> )
1	52,1	$2,66.10^{-8}$
2	52,3	$2,79.10^{-8}$
3	100,2	$7,94.10^{-9}$
4	122	$5,88.10^{-9}$

Fonte: O autor.

A partir das Eq 4.1 e Eq 4.2, foram obtidos os respectivos valores da taxa de desgaseificação por comprimento (Eq 4.1) e específica do tubo (Eq 4.2), para o sistema exposto ao ambiente de vácuo por 2 horas e com todos os processos de limpeza padronizados, garantindo assim que o sistema possa ser considerado como um problema de componentes (tubos e conexões T) com taxa de desgaseificação constante ao longo de todo o sistema, pois todos os materiais foram fabricados com o mesmo material (aço 304-L).

$$q_s = \frac{2,66.10^{-8} + 2,79.10^{-8} + 7,94.10^{-9} + 5,88.10^{-9}}{4} \quad \text{Eq 4.1}$$

$$= 1,71.10^{-8} \text{mbar.L.s}^{-1}.\text{cm}^{-1}$$

$$q_A = \frac{1,71.10^{-8}}{\pi \cdot 1,53} = 3,56.10^{-9} \text{mbar.L.s}^{-1}.\text{cm}^{-2} \quad \text{Eq 4.2}$$

Algo muito importante a ser ressaltado, algo que já foi inclusive discutido na metodologia e fundamentos teóricos deste trabalho, é que a taxa de desgaseificação tem muita relação com o histórico do componente, ou seja, o processos adotados durante a fabricação, as etapas de limpeza e condicionamento, o tempo de exposição ao vácuo, a temperatura em que ela foi exposta, o tempo exposição a atmosfera, dentre muitas outras variáveis que impactam no funcionamento e que podem interferir na veracidade dos dados obtidos. Durante todas as etapas, foram seguidas a rigor formas padronizadas em todos os componentes que compuseram o sistema tubular, sendo obtido um valor de taxa de desgaseificação muito baixo (em comparação com alguns textos da literatura). A medida da pressão foi realizada mais que uma vez, sendo que em todas as medidas foram obtidos os mesmos resultados (ou muito próximos). Desta forma, estes valores foram utilizados para a obtenção do campo de pressão analítico e numérico (simulação computacional). A Figura 124 mostra uma tabela, retirado da literatura, obtido a partir da medição da taxa de desgaseificação específica de uma série de tipos de materiais, incluindo o aço inox austenítico.

Figura 124: Taxa de desgaseificação de materiais em função do tempo.

At room temperature									
Standard values <sup>1</sup> (mbar · l · s <sup>-1</sup> · cm <sup>-2</sup> )	Metals 10 <sup>-9</sup> ... 10 <sup>-7</sup>					Nonmetals 10 <sup>-7</sup> ... 10 <sup>-5</sup>			
Outgassing rates (standard values) as a function of time									
Examples:	1/2 hr.	1 hr.	3 hr.	5 hr.	Examples:	1/2 hr.	1 hr.	3 hr.	5 hr.
Ag	1.5 · 10 <sup>-8</sup>	1.1 · 10 <sup>-8</sup>	2 · 10 <sup>-9</sup>		Silicone	1.5 · 10 <sup>-5</sup>	8 · 10 <sup>-6</sup>	3.5 · 10 <sup>-6</sup>	1.5 · 10 <sup>-6</sup>
Al	2 · 10 <sup>-8</sup>	6 · 10 <sup>-9</sup>			NBR	4 · 10 <sup>-6</sup>	3 · 10 <sup>-6</sup>	1.5 · 10 <sup>-6</sup>	1 · 10 <sup>-6</sup>
Cu	4 · 10 <sup>-8</sup>	2 · 10 <sup>-8</sup>	6 · 10 <sup>-9</sup>	3.5 · 10 <sup>-9</sup>	Acrylic glass	1.5 · 10 <sup>-6</sup>	1.2 · 10 <sup>-6</sup>	8 · 10 <sup>-7</sup>	5 · 10 <sup>-7</sup>
Stainless steel		9 · 10 <sup>-8</sup>	3.5 · 10 <sup>-8</sup>	2.5 · 10 <sup>-8</sup>	FPM, FKM	7 · 10 <sup>-7</sup>	4 · 10 <sup>-7</sup>	2 · 10 <sup>-7</sup>	1.5 · 10 <sup>-7</sup>

<sup>1</sup> All values depend largely on pretreatment!

Fonte: ADAM, 2016.

### 4.3 Campo de pressão

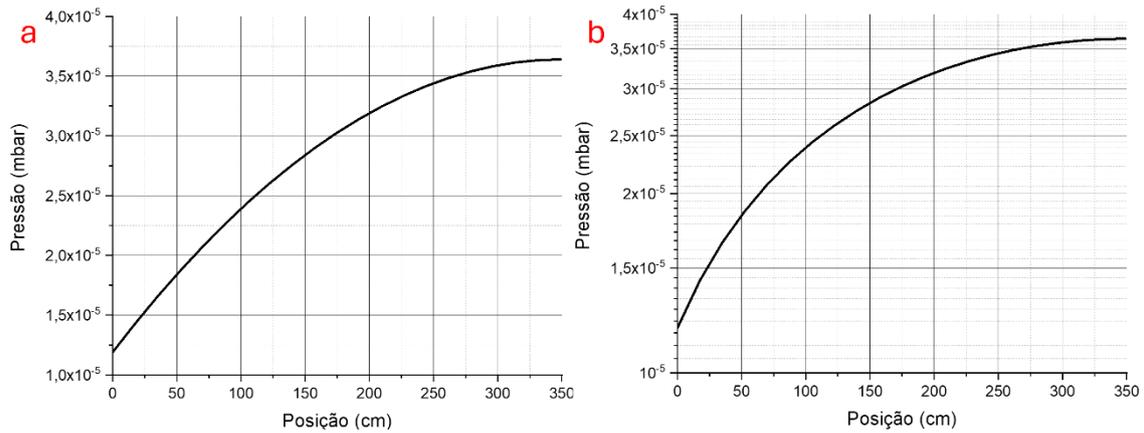
A partir da obtenção dos valores das taxas de desgaseificação dos tubos e o valor estimados da taxa desgaseificação do sistema tubular de alto-vácuo, foram obtidos os perfis de pressão ao longo das posições do sistema tubular a partir da imposição das

condições contorno, 3.2.3 (analítica) e 3.2.4 (simulação), e, posteriormente, a resolução da função a partir da substituição das variáveis, mostrado no APÊNDICE 5: DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULOS UTILIZADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA TUBULAR DE ALTO-VÁCUO, para o caso da modelagem analítica, e a simulação, para o caso da resolução por método numérico (molflow e COMSOL).

Com a substituição dos valores das variáveis na função da Eq 3.6, como mostrado na Eq 4.3 (onde o desenvolvimento foi realizado passo a passo no APÊNDICE 5: DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULOS UTILIZADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA TUBULAR DE ALTO-VÁCUO, é obtido um perfil de pressão de caráter parabólico, como mostrado pela Figura 125, algo que já era previsto em diversos resultados presentes na literatura, como mostrados por DEGASPERI<sup>[1]</sup>, BELLO<sup>[4]</sup>, BRANDT<sup>[13]</sup>, ADY<sup>[34]</sup>. A região de menor pressão corresponde à posição onde foi colocada a bomba de vácuo, enquanto a outra extremidade tem o maior valor de pressão, já que não há nenhuma bomba posicionada nesta região. Assim como já mencionado por DEGASPERI<sup>[1]</sup>, o gradiente formado no gráfico representa o sentido do escoamento dos átomos e moléculas do gás que ocupa a região do sistema tubular, ou seja, eles escoam no sentido da posição da bomba de vácuo ponto este em que podem ou não ser exauridas <sup>[1]</sup>, podendo por exemplo colidir com a parede e voltar para o sistema ou serem “ejetadas” para a bomba de vácuo, uma vez que este problema é tratado como um fenômeno difusivo (já que as moléculas se deslocam no sentido da região com maior concentração de átomos e moléculas para a de menor concentração).

$$p(x) = -2,00 \cdot 10^{-10}x^2 + 1,40 \cdot 10^{-7}x + 1,19 \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq 4.3}$$

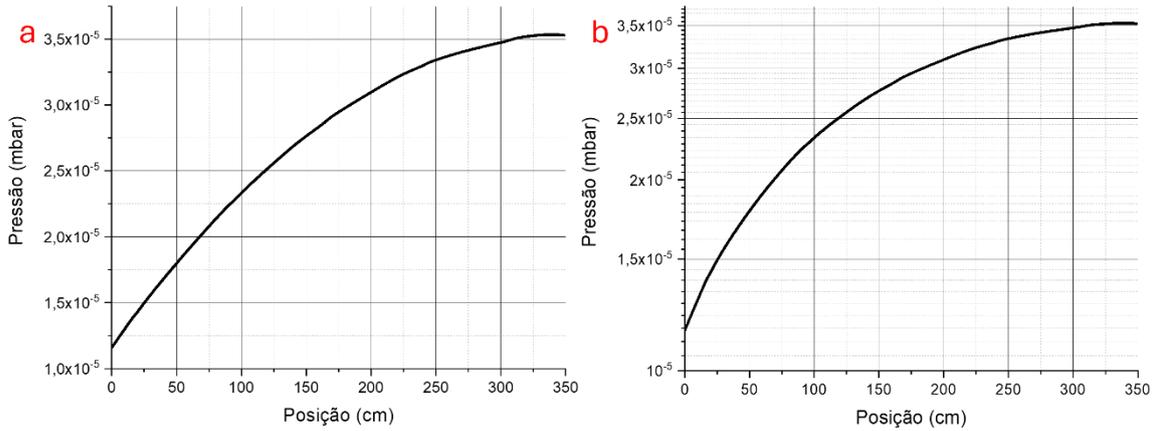
Figura 125: Campo de pressão obtido de forma analítica. a - gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica.



Fonte: O autor.

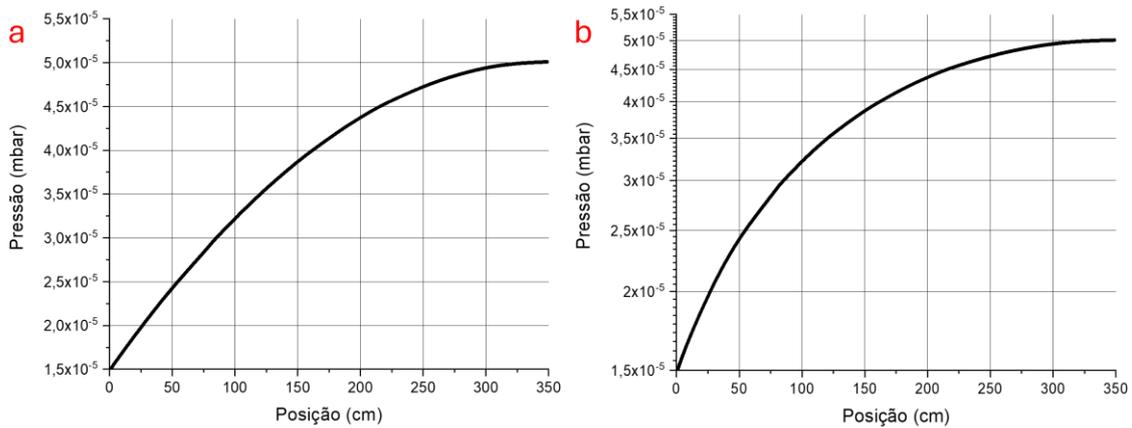
Por meio da simulação computacional foram obtidos dois campos de pressão, um para o molflow e outro para o Comsol, dois métodos que mesmo com as mesmas definições de contorno (mostradas na seção anterior) não tem uma semelhança tão grande entre os seus pontos. Na verdade, o software molflow consegue ter muita maior proximidade entre os valores obtidos pela equação de difusão, algo que é uma ótima informação, uma vez que o software molflow é um software muito bem desenvolvido e utilizado para modelagem de sistemas muito complexos, como por exemplo os sistemas de ultra alto-vácuo do CERN (que é atualmente um dos maiores laboratórios de ciência aplicada do mundo). Mesmo assim, foi importante trazer mais que um tipo de modelagem computacional como uma forma comparativa, algo que não fugiu totalmente da resolução do problema, ambas as simulações tiveram um caráter parabólico assim como na modelagem analítica. Nas Figura 126 e Figura 127, são apresentadas as curvas de pressão obtidos por meio do software molflow e comsol (Figura 127).

Figura 126: Campo de pressão obtido a partir da simulação no software molflow. a - gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica.



Fonte: O autor

Figura 127: Campo de pressão obtido a partir da simulação no software Comsol. a - gráfico com escala linear; b- gráfico com escala logarítmica.



Fonte: O autor.

Por meio das simulações foram obtidos muitos pontos, cerca de quinhentos em cada uma das duas escalas. Pela grande quantidade de dados obtidos foi utilizado o software Excel para obter as funções, por meio da regressão quadrática, das Eq 4.4 (Molflow) e Eq 4.5 (COMSOL).

$$p(x) = -1,94 \cdot 10^{-10}x^2 + 1,35 \cdot 10^{-7}x + 1,17 \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq 4.4}$$

$$p(x) = -2,90 \cdot 10^{-10}x^2 + 2,02 \cdot 10^{-7}x + 1,49 \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq 4.5}$$

Por último, os dados experimentais obtidos por meio do uso do medidor CP-25-S para cada uma das posições mostradas na Tabela 11, além também da medição da temperatura em cada um dos tubos para cada uma das medições. Onde, a regressão quadrática, realizada no excel, resultou na Eq 4.6. Por fim, o gráfico do campo de pressão obtido de forma experimental é mostrado na Figura 128, onde são mostrados os pontos experimentais e a linha de tendência obtida a partir da função da Eq 4.6.

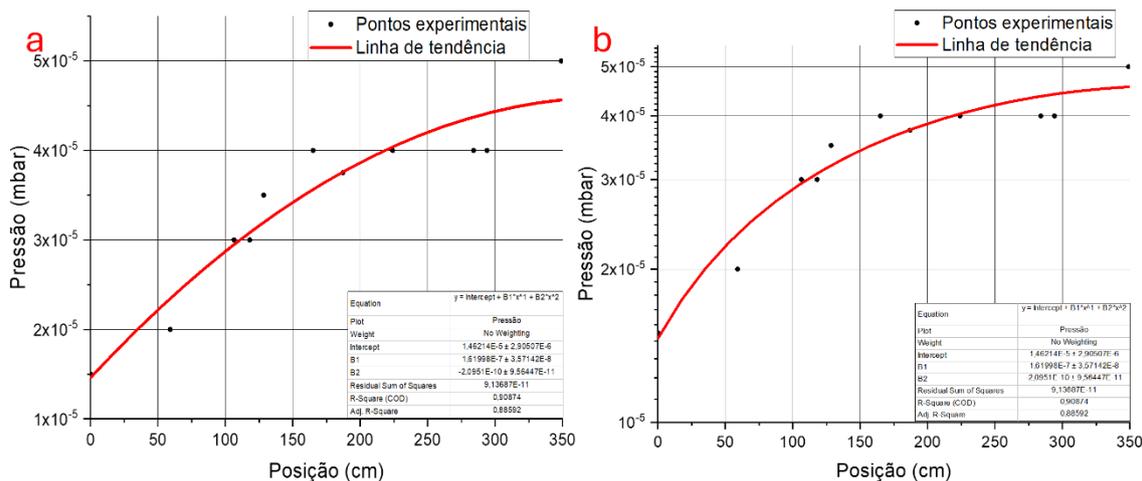
Tabela 11: Dados experimentais obtidos a partir do medidor CP-25-S e dos termopares fixados aos tubos do sistema tubular.

Posição (cm)	Pressão (mbar)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)
0	$1,5 \cdot 10^{-5}$	25,9	25,8	24,9	25,2
59	$2 \cdot 10^{-5}$	26,9	26	25,1	25,7
106,4	$3 \cdot 10^{-5}$	25,2	25,9	25,9	25,6
118,05	$3 \cdot 10^{-5}$	25,6	25,5	24	25,1
128,4	$3,5 \cdot 10^{-5}$	25,3	25,6	24,9	25,7
165	$4 \cdot 10^{-5}$	24,8	25,4	25,5	25,1
187	$3,75 \cdot 10^{-5}$	25,2	25,5	24,9	25,6
224	$4 \cdot 10^{-5}$	24,3	25	25,1	24,6
224,5	$4 \cdot 10^{-5}$	25,3	25,2	24,4	24,9
294	$4 \cdot 10^{-5}$	25,1	25,4	24,8	25,4
349	$5 \cdot 10^{-5}$	25,4	25,3	24,5	25

Fonte: O autor.

$$p(x) = -2,09 \cdot 10^{-10}x^2 + 1,62 \cdot 10^{-7}x + 1,46 \cdot 10^{-5} \quad \text{Eq 4.6}$$

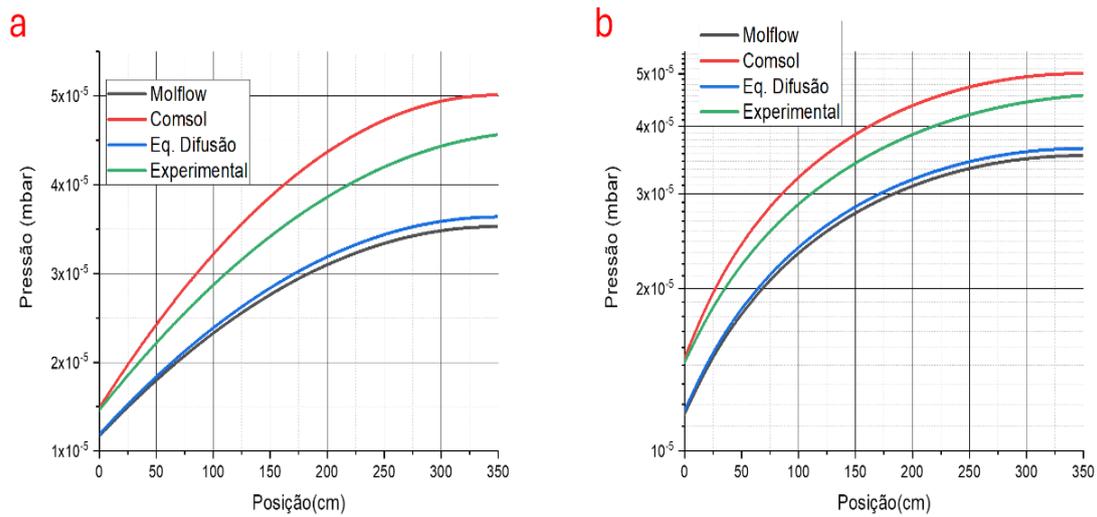
Figura 128: Gráfico dos pontos experimentais obtidos no laboratório de tecnologia do vácuo juntamente com a linha de tendência. a – gráfico com escala linear; b – gráfico com escala logra



Fonte: O autor.

Com isso, os valores de pressão são plotados em um único gráfico como forma de comparar todos os campos de pressão obtidos neste trabalho, como mostrado na Figura 129. Nele é possível verificar que os valores obtidos de forma analítica e por simulação com o software tiveram uma boa proximidade. Enquanto os valores obtidos pela simulação no software Comsol Multiphysics e com a coleta de dados experimentais tiveram maior proximidade. Apesar de uma certa variação entre alguns valores, o comportamento físico se apresentou com uma certa proximidade, uma vez que medições experimentais também tem o fator do erro percentual atribuído ao equipamento (neste caso o medidor CP-25-S).

Figura 129: Gráfico comparacional com os valores obtidos de forma analítica, numérica e experimental. a - gráfico com escala linear; b - gráfico com escala logarítmica.



Fonte: O autor.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso se propôs, em princípio, em obter um campo de pressão estacionário de um sistema tubular de forma cilíndrica com taxa de desgaseificação constante pelos métodos analítico, numérico e experimental. Inicialmente o objetivo era alcançar uma pressão mínima próximo de  $10^{-6}$  mbar, algo que não foi obtido muito provavelmente ao tamanho e diâmetro do tubo, porém, podem ter soluções que podem ser mais bem exploradas em trabalhos futuros. Como por exemplo, o uso de mais de uma bomba de alto-vácuo ao longo do comprimento do sistema tubular. No APÊNDICE 6: PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS, são apresentados alguns exemplos que podem ser mais bem estudados em trabalhos futuros, onde é possível acrescentar mais bombas de diferentes ou iguais velocidades de bombeamento, tamanho, velocidade efetiva ao longo do sistema, até mesmo um caso particular de sistema que utiliza cavidades ressonantes (muito utilizado em aceleradores que utilizam em projetos modernos).

Apesar, de um dos objetivos não terem sido atingido com tanta exatidão os valores calculados de forma analítica e numérica e os dados obtidos a partir da medição experimental foi possível obter valores que são relativamente próximos, levando em consideração que medidores de pressão não são ausentes de erros percentuais (principalmente medidores indiretos que necessitam estar bem calibrados). Apesar disso, estes dados podem e devem ser melhorados em trabalhos futuros, procurando ajustar melhor as curvas obtidas. Algo que para o ponto de vista da ciência e tecnologia do vácuo todos estes métodos se demonstraram eficientes, apesar de alguns serem mais imprecisos que outros.

A simulação Comsol em particular, apresentou uma certa incongruência com as demais outras simulações, mesmo com as mesmas definições de condições de contorno e condição inicial do sistema tubular e também as grandezas fundamentais.

Com isso, a partir deste trabalho é possível contribuir para diversos trabalhos que utilizam sistemas tubulares similares ou que possam ser resolvidos utilizando o mesmo

princípio físico, uma vez que estes problemas têm um ponto de partida parecido e vão se diferenciar conforme as condições de contorno que são atribuídas ao problema.

## REFERÊNCIAS

- 1 DEGASPERI, Francisco Tadeu. Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistemas de vácuo. 2006. 364 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1604829>. Acesso em: 16 out. 2023.
- 2 GAMA, Sergio. Introdução a ciência e tecnologia de vácuo. **Campinas, SP, Unicamp**, 2002.
- 3 TURNER, S. CAS CERN Accelerator School vacuum technology. Proceedings. **Snekersten , Helsingör , Dinamarca**, 1999.
- 4 BELLO, I. **Vacuum and Ultravacuum - Physics and Technology**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- 5 ONUSIC, H. ; H. MEDINA, N. **Curso de Tecnologia do Vácuo: Teoria Cinética**.<<https://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/TeoriaCinetica2017.pdf> > São Paulo : IFUSP. Acesso em 16 de out. 2023.
- 6 O'HANLON, J. F. **A User's Guide to Vacuum Technology**. Hoboken: WILEY INTERSCIENCE, 2003.
- 7 BEAVIS, L. C. **Real leaks and real leak detection**. Vacuum, Albuquerque, 20, n. 9, 17 April 1970., p. 233-245.
- 8 DEGASPERI, F. T. **Vazamento virtual: modelagem com solução analítica**. Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Set-Dez 2018., p. 145-155.
- 9 KNIGHT, R. D. **FÍSICA UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA**. São Paulo: bookman, 2009.
- 10 TELLES, D. D.; NETTO, J. M. **Física com aplicação tecnológica** - óptica, física moderna e fenômenos complexos. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, v. IV, 2020.
- 11 **O que é um projeto mecânico?** Disponível em:<<https://polijunior.com.br/blog/projetomecanicoempresa/#:~:text=Um%20projeto%20mec%C3%A2nico%20consiste%20em,o%20objetivo%20%C3%A9%20justamente%20facilitar>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2023>
- 12 CARDOSO, A. P.; DIAS, G. P. G. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE**

**PROTÓTIPOS DE PASSADORES DE MOVIMENTO.** Faculdade de Tecnologia de São Paulo. São Paulo, p. 129. 2021.

13 BRANDT, D. **Vacuum in accelerators.** Platja d'Aro: CERN Accelerator School, 2006.

14 CHAMBERS, A. **MODERN VACUUM PHYSICS.** Iorque: CRC Press Company, 2004.

15 CHAMBERS, A.; FITCH, R. K.; HALLIDAY, B. S. **Basic Vacuum Technology.** Bristol: CRC Press, 1998.

16 MOSCA, G.; TIPLER, P. A. **FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS.** Nova Iorque: LTC, 2009.

17 **O que é Projeto Mecânico e a importância do detalhamento.** Disponível em: <<https://www.redutoresibr.com.br/noticia/o-que-e-projeto-mecanico-e-a-importancia-do-detalhamento>. Acesso em: 26 fevereiro 2023.>

18 CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais - uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

19 BECK, D. **CURSO TÉCNICO EM MECÂNICA INDUSTRIAL.** Passo fundo: [s.n.], 2007.

20 ROTH, A. **Vacuum Technology.** 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1998.

21 LAFFERTY, J. M. **Foundations of Vacuum Science and Technology.** New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

22 HOFFMAN, D. M.; THOMAS, J. H.; SINGH, B. **Handbook of Vacuum Science and Technology.** Newport News: Elsevier Science & Technology Books, 1997.

23 MAPDATA. **Autodesk Inventor.** Disponível em: Disponível em: Acesso em: 20 fevereiro 2022.

24 GOUVÊA, Miriam Tvrzská. **Escoamento Compressível e Incompressível.** Disponível em: <[http://meusite.mackenzie.com.br/miriamtg/portfolio\\_FT\\_I/portfolio\\_copr\\_cavita.pdf](http://meusite.mackenzie.com.br/miriamtg/portfolio_FT_I/portfolio_copr_cavita.pdf). Acesso em: 27 de fevereiro 2023>

25 SHIH, R. H. **Autodesk Inventor 2020 and Engineering Graphics - An Integrated Approach.** Mission: SDC PUBLICATIONS, 2019.

26 ADAM, Hermann et al. **Fundamentals of Vacuum Technology.** Cologne:

Oerlikon leybold vacuum, 2016. 200 p.

27 BERGMAN, Theodore L. *et al.* **Fundamentos de TRANSFERÊNCIA de CALOR e de MASSA**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 1699 p.

28 HUCKNALL, D. J. **Vacuum Technology and Applications**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1991. 324 p.

29 MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 27 p.

30 LIU, Zi-Kui; ADERHOLD, R. **ASM Handbook: additive manufacturing processes**. 2. ed. Ohio: Asm International, 2020. 476 p.

31 MIRANDA, Charles Zanini. **Desenho Técnico Mecânico**. Indaial: Uniasselvi, 2019. 162 p.

32 FORTULAN, C. A. **Aula 02 –Projeção: tipos, vistas e diedros**. São Carlos: Usp São Carlos, 2017. 36 slides, color.

33 ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda., 2012. 927 p.

34 ADY, Marton. **MONTE CARLO SIMULATIONS OF ULTRA HIGH VACUUM AND SYNCHROTRON RADIATION FOR PARTICLE ACCELERATORS**. 2016. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Laboratoire de Physique Des Accélérateurs de Particules, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2016.

35 MALYSHEV, Oleg B.. **Vacuum in Particle Accelerators: modelling, design and operation of beam vacuum systems**. Weinheim: Wiley-Vch, 2020. 547 p.

36 DIAS, F.T. *et al.* **Metodo dos Elementos Finitos: técnicas de simulação numerica em engenharia**. 2. ed. Lisboa: Creativetech, 2010. 489 p.

37 PEPPER, Darrel W.; HEINRICH, Juan C.. **The Finite Element Method: basic concepts and applications with matlab®, maple, and comsol**. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2017. 628 p.

38 ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.. **El método de los elementos finitos: formulación básica y problemas lineales**. 4. ed. Barcelona: McGraw-Hill, 1994. 340 p. 1 v.

39 TABATABAIAN, Mehrzad. **COMSOL® FOR Engineers**. Dulles: Mercury

Learning And Information, 2014. 272 p.

40 Degasperi, F., Ricotta, R. High and Ultra-high Vacuum Pressure Profile and Its Gradient of the Conic Tube. *Braz J Phys* **53**, 44 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13538-023-01258-0>

## ANEXO 1: DETALHES DA BOMBA TRIVAC D8-A

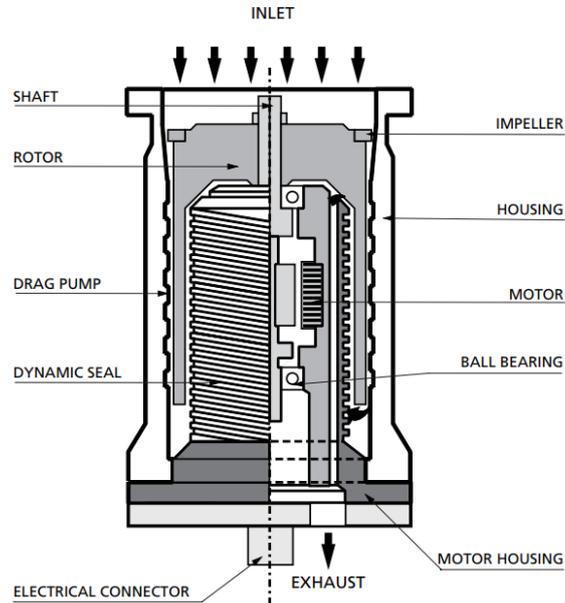
Tabela 12: Especificações técnicas da bomba mecânica de palhetas TRIVAC D8 B.

Pump Model	D2A	D4A	D8A	D16A	D30A	D60A	D90A
Displacement . . . . CFM	2.2	4.5	7.0	14.1	26.8	36.7	53.7
Displacement . . . . liters/minute	62.5	127	190	400	760	1030	1520
Ultimate partial pressure . . . . Torr	$3 \times 10^{-4}$						
Ultimate pressure with gas ballast . . . . Torr	$3 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$				
Water vapor tolerance . . . . Torr	30	15	30	15	40	20	20
Oil Capacity . . . . . quarts (Hydrocarbon) . . . . . lbs (perfluoropolyether)	0.5 2.5	0.75 3	1 4.2	1.25 5	3.5 13.7	4 16.8	4 16.8
Motor power . . . . hp	1/3	1/3	1	1	1-1/2	2.0	3.0
Pump rotational speed . . . . RPM	1725	1725	1725	1725	1725	1150	1725
Weight complete . . . . lb	41	45	80	85	163	210	210
Sound pressure level (max) at three feet with gas ballast closed . . . . dB(A)	50	50	60	62	59	60	60
Sound pressure level (ave) at three feet with gas ballast open . . . . dB(A)	54	56	57	60	62	63	63
Intake tube and exhaust port diameter . . . . mm	KF 16	KF 16	KF 25	KF 25	KF 40	KF 40	KF 40
Maximum ambient temperature	104°F (40°C)						

Fonte: [https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Leybold\\_A\\_Series\\_Pump\\_Service\\_Manual.pdf](https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Leybold_A_Series_Pump_Service_Manual.pdf).

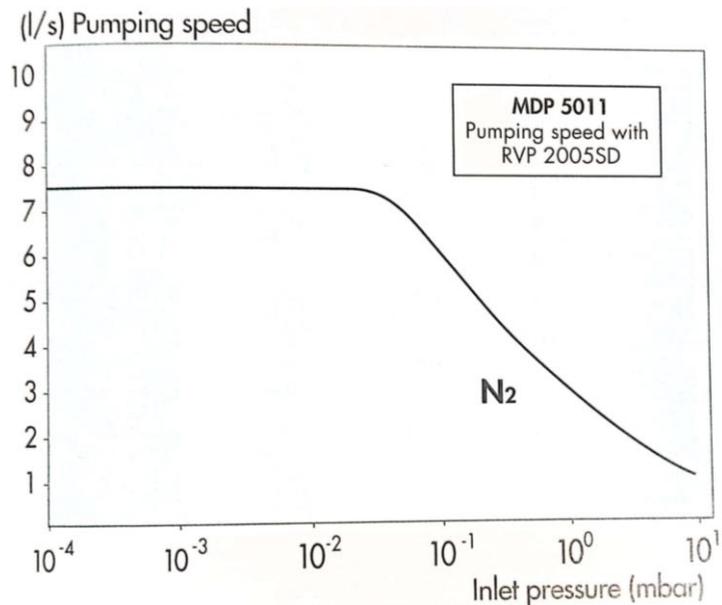
## ANEXO 2: DETALHES DA BOMBA TURBO-DRAG MDP 5011 DN ISO K 63

Figura 130: Descrição dos componentes de uma bomba turbo drag MDP 5011.



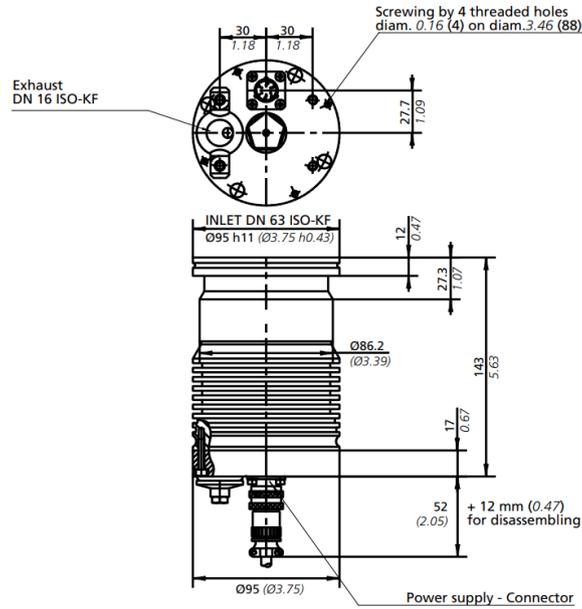
Fonte: [https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen\\_MDP5011\\_Manual\\_1.pdf](https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen_MDP5011_Manual_1.pdf).

Figura 131: Curva característica de velocidade de bombeamento da bomba MDP 5011.



Fonte: [https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen\\_MDP5011\\_Manual\\_1.pdf](https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen_MDP5011_Manual_1.pdf).

Figura 132: Curva característica de velocidade de bombeamento da bomba MDP 5011.



Fonte: [https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen\\_MDP5011\\_Manual\\_1.pdf](https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen_MDP5011_Manual_1.pdf).

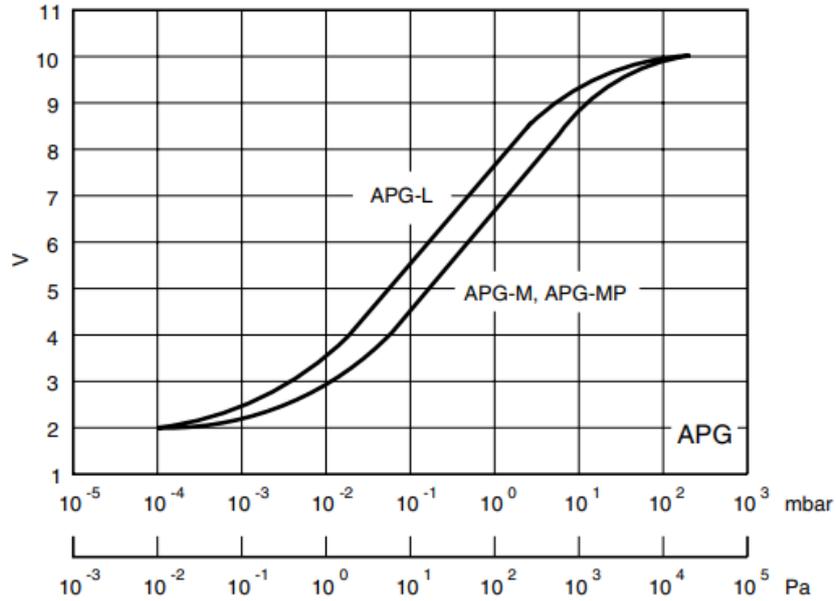
Figura 133: Especificações técnicas da bomba MDP 5011.

Characteristics		Units	MDP 5011	MDP 5011 CP
Inlet flange			DN 63 ISO-K	
Exhaust flange			DN 16 ISO-KF	
Rotation speed		tr/mn	27,000	
Starting time (0 to 27000 tr/mn)		mn	< 1	
Pumping speed	N2	L/s	7.5	
	He		4	
	H2		3	
Compression rate	N2		1x10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>6</sup>
	He		2x10 <sup>4</sup>	250
	H2		1x10 <sup>3</sup>	50
Ultimate pressure (CP with purge 50 sccm)*		mbar	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
Maximum pressure at inlet in continuous operation**	Natural convection	mbar	1x10 <sup>-1</sup>	
	Air cooling		10	
	Water cooling		10	
Maximum pressure at exhaust in continuous operation**	Natural convection	mbar	40	5
	Air cooling			
	Water cooling			
Ambient operating temperature	Natural convection	°C	5 to 35°C (41 to 95 °F)	
	Air cooling		5 to 35°C (41 to 95 °F)	
	Water cooling		5 to 50°C (41 to 122 °F)	
Recommended primary pump			Ultimate pressure < 20 mbar	
Weight	Natural convection	kg	2.3	
	Air cooling		3	
	Water cooling		2.5	
Environmental conditions:			IP 20 indoor use up to 2000m (6562 pied) 80 % for temp. up to 31°C (87°F) decreasing linearly to 50 % at 40°C (104°F) rate 2	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ingress Protection</li> <li>■ Use of the product</li> <li>■ Altitude</li> <li>■ Maximum relative humidity</li> <li>■ Pollution degree</li> </ul>				

Fonte: [https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen\\_MDP5011\\_Manual\\_1.pdf](https://www.idealvac.com/files/brochures/Adixen_MDP5011_Manual_1.pdf).

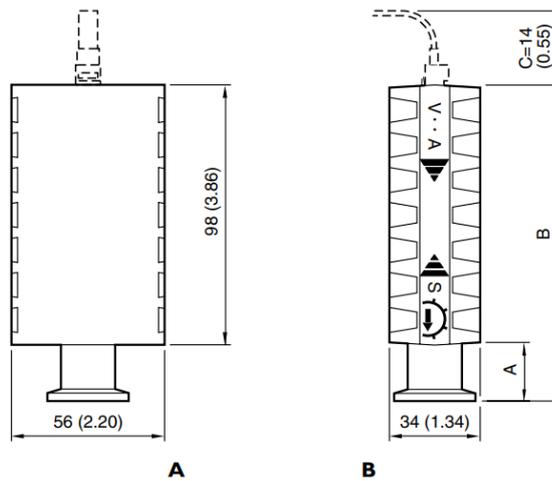
### ANEXO 3: DETALHES SOBRE O MEDIDOR APG-MP-NW16 (PIRANI).

Figura 134: Curva de funcionamento do medidor APG-MP-NW16.



Fonte: [https://www.ideaivac.com/files/brochures/Edwards\\_APG\\_Active\\_Pirani\\_Gauges.pdf](https://www.ideaivac.com/files/brochures/Edwards_APG_Active_Pirani_Gauges.pdf).

Figura 135: Cotas de medida do medidor APG-MP-NW16.



	A	B
NW16	22 mm/0.86 in	120 mm/4.72 in
NW25	22 mm/0.86 in	124 mm/4.88 in
15 mm OD	52 mm/2.05 in	150 mm/5.91 in

C = Allowance for cable and connector

Fonte: [https://www.ideaivac.com/files/brochures/Edwards\\_APG\\_Active\\_Pirani\\_Gauges.pdf](https://www.ideaivac.com/files/brochures/Edwards_APG_Active_Pirani_Gauges.pdf).

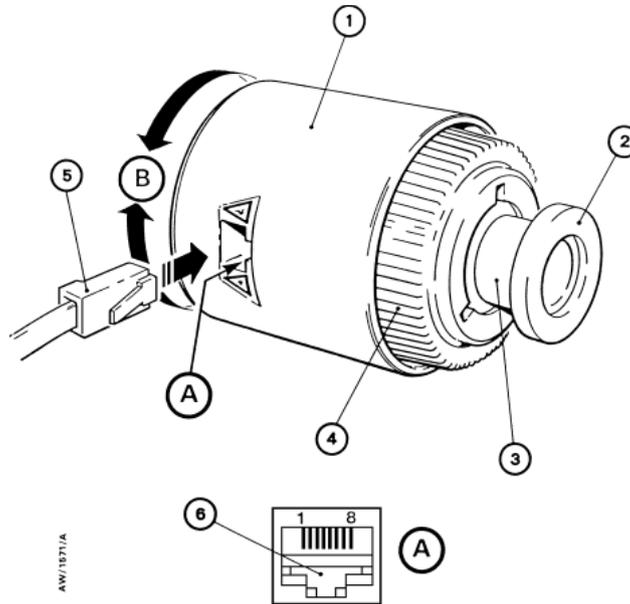
Figura 136: Especificações técnicas do medidor APG-MP-NW16.

<b>TECHNICAL DATA</b>	
<b>Pressure range</b>	
APG-M & APG-MP	Atmosphere to $10^{-3}$ mbar / Torr
APG-L	Atmosphere to $10^{-4}$ mbar / Torr
<b>Accuracy<sup>§</sup></b>	
APG-M & APG-MP	Typically $\pm 15\%$ at $<100$ mbar / Torr
APG-L	Typically $\pm 15\%$ at $<10$ mbar / Torr
<b>Maximum over pressure</b>	
	10 bar absolute (145 psi)
<b>Power supply</b>	
	+20 to +36 V d.c. (max 1 V ripple)
<b>Power consumption</b>	
	1.5 W max
<b>Output signal</b>	
	2 to 10 V d.c.
<b>Adjustments</b>	
	Set vacuum and set atmosphere
<b>Set-point</b>	
	Open collector transistor
Range of set-point	5% to 95% full-scale voltage
Fixed hysteresis	7% full-scale voltage
Level setting resolution	$\pm 2\%$ full-scale voltage
Rating	40 V d.c., 100mA max
<b>Temperature range</b>	
Operating	+5 to +60 °C
Storage	-30 to +70 °C
<b>Materials exposed to vacuum</b>	
Aluminum tube	Aluminum, nickel, fluoroelastomer, PTFE
Stainless steel tube	Stainless steel (316), nickel, fluoroelastomer, PTFE
<b>Filament</b>	
APG-M, APG-L	Gold-coated tungsten
APG-MP	Platinum / rhodium (90/10)
<b>Internal volume</b>	
	NW: $6 \text{ cm}^3$ 15 mm O.D.: $10 \text{ cm}^3$
<b>Weight</b>	
Aluminum	0.12 kg
Stainless steel	0.2 kg
<b>External interface connector</b>	
	8 way FCC68 / RJ45 socket
<b>Vacuum fitting</b>	
	NW16, NW25 or 15 mm O.D.

Fonte: [https://www.idealvac.com/files/brochures/Edwards\\_APG\\_Active\\_Pirani\\_Gauges.pdf](https://www.idealvac.com/files/brochures/Edwards_APG_Active_Pirani_Gauges.pdf).

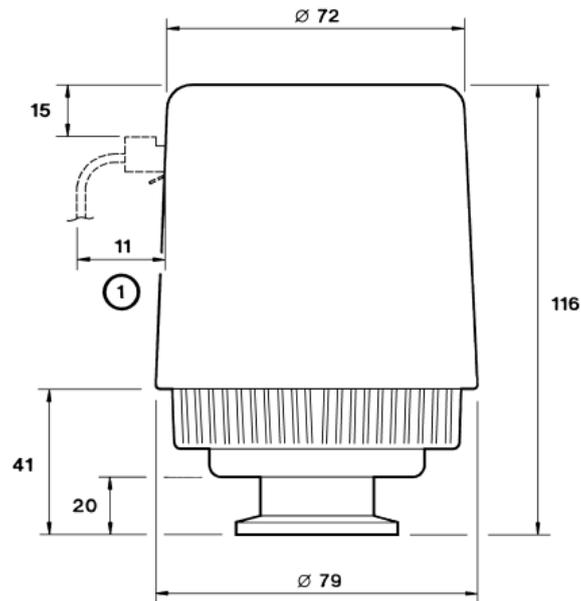
## ANEXO 4: DETALHES SOBRE O MEDIDOR AIM-S-NW 25 (PENNING).

Figura 137: Componentes do Medidor AIM-S-NW25. 1 – Extremidade; 2 – Flange ISO KF 16; 3 – Tubo; 4 – Invólucro magnético; 5 – Conector do cabo; 6 – Entrada do conector do medidor AIM.



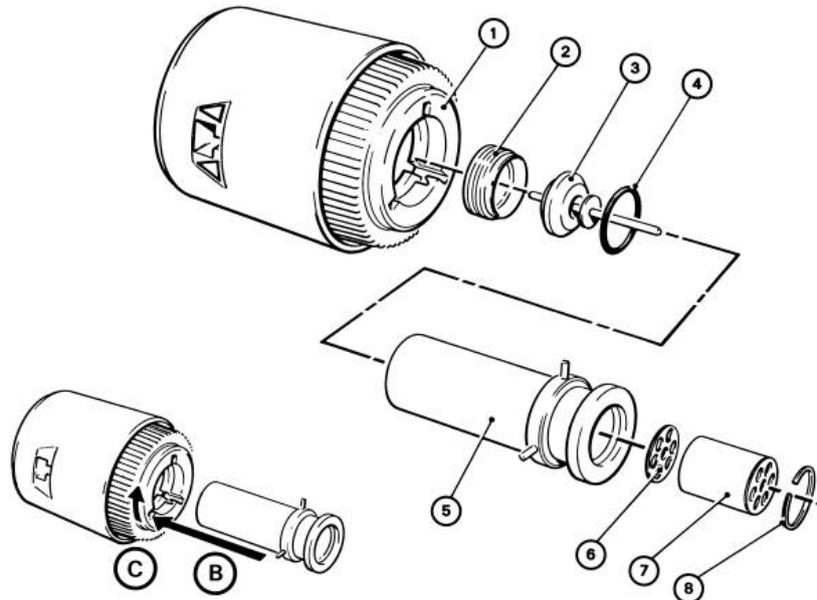
Fonte: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-AIM-Active-Inverted-Magnetron-Gauge-3601-0166-01.pdf>.

Figura 138: Dimensões do medidor AIM-S-NW 25.



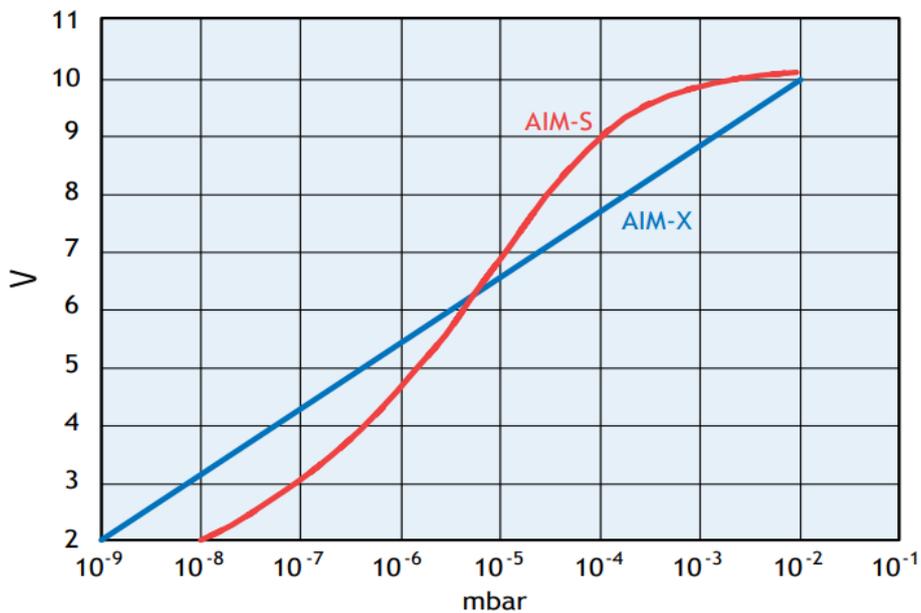
Fonte: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-AIM-Active-Inverted-Magnetron-Gauge-3601-0166-01.pdf>.

Figura 139: Vista explodida do medidor AIM. 1 – Invólucro magnético; 2 – Colar; 3 – Anodo do conjunto; 4 – O’ring; 5 – Tubo; 6 – Placa catódica; 7 – Tubo catódico; 8 – Anel de segurança.



Fonte: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-AIM-Active-Inverted-Magnetron-Gauge-3601-0166-01.pdf>.

Figura 140: Curva de funcionamento do medidor AIM-S-NW 25.



Fonte: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-AIM-Active-Inverted-Magnetron-Gauge-3601-0166-01.pdf>.

Figura 141: Especificações técnicas do medidor AIM-S-NW 25.

<b>Pressure range</b>	
AIM-S	10 <sup>-2</sup> to 10 <sup>-8</sup> mbar
AIM-X	10 <sup>-2</sup> to 10 <sup>-9</sup> mbar
Accuracy*	Typically ±30%
Maximum overpressure	10 bar absolute (145 psi)
Power supply	+13.5 to +36 V dc (max 1 V ripple)
Power consumption	2 W maximum
Output signal	2 to 10 V dc
Set point	Open collector transistor
Maximum voltage	40 V dc
Current	100 mA max
<b>Temperature range</b>	
Operating	+5 to +60°C
Storage	+0 to +70°C
Baking	+300°C
(DN40CF versions only)	(with electronics podule removed)

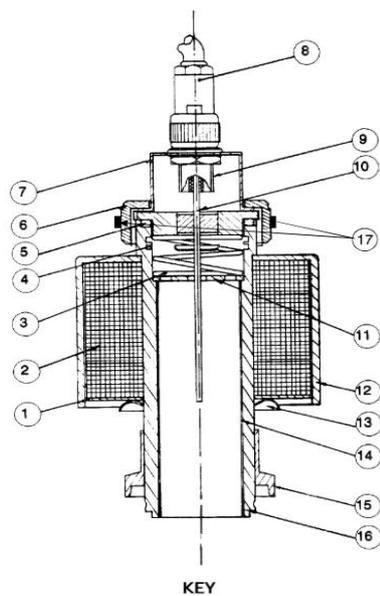
\*Accuracy is reduced at the limits of the measuring range

<b>Materials exposed to vacuum</b>	
NW25 versions	Stainless steel 304 & 306 & 347 fluoroelastomer, glass
DN40CF	Stainless steel 304, 316 & 347, copper, ceramic
Internal volume	26 cm <sup>3</sup>
<b>Weight</b>	
NW25	0.81 kg
DN40CF	1.09 kg
External interface connector	8-way FCC68/RJ45 socket
Vacuum fitting	NW25 or DN40CF
<b>Standards</b>	
Electromagnetic compatibility	EN 61326 (Class B Emissions)
Enclosure rating	IP40

Fonte: <https://www.edwardsvacuum.com/content/dam/brands/edwards-vacuum/edwards-website-assets/scientific-vacuum/documents/datasheets/Edwards-AIM-Active-Inverted-Magnetron-Gauge-3601-0166-01.pdf>.

## ANEXO 5: DETALHES SOBRE O MEDIDOR CP25-S (PENNING)

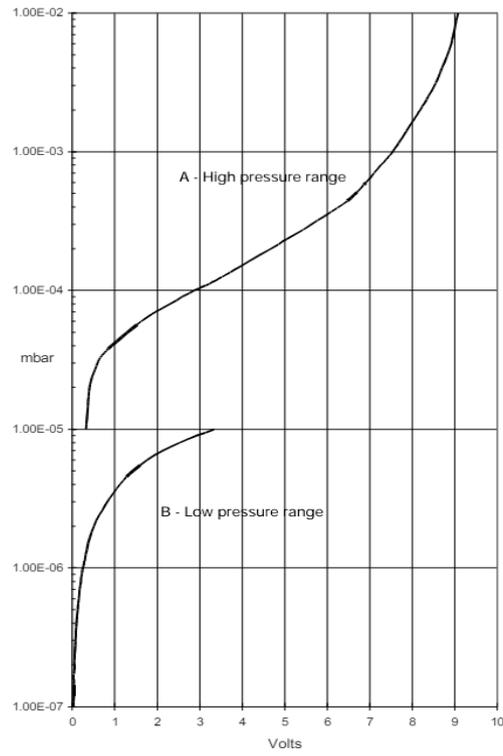
Figura 142: Vista de corte do medidor CP25-S. 1- plano magnético; 2- Ímãs; 3- Mola; 4- Inserção radioativa; 5- O-ring; 6- Porca de plástico; 7- Tampa de aterramento; 8- Montagem principal; 9- Conector; 10- Montagem do anodo; 11- Placa de catodo; 12- Capa moldada; 13- Arruela estrela; 14- Sonda S/S; 15- Acoplamento de protetor; 16- Tubo do corpo; 17- Parafusos de retenção.



Fonte:

[https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Edwards\\_CP25K\\_Cold\\_Cathode\\_Gauge\\_Sensor\\_Manual.pdf](https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Edwards_CP25K_Cold_Cathode_Gauge_Sensor_Manual.pdf).

Figura 143: Curva de funcionamento do medidor CP25-S.



Fonte:

[https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Edwards\\_CP25K\\_Cold\\_Cathode\\_Gauge\\_Sensor\\_Manual.pdf](https://www.idealvac.com/files/ManualsII/Edwards_CP25K_Cold_Cathode_Gauge_Sensor_Manual.pdf).

Figura 144: Especificações técnicas do medidor CP25-S.

### **Operating conditions**

Temperature range	0 to 70 °C
Relative humidity (non condensing)	10 - 90 %
Maximum operating altitude	2000 m

### **Performance**

Pressure measuring range (mbar)	$10^{-2}$ to $5 \times 10^{-8}$
Maximum internal pressure	2 bar absolute

### **Mechanical data**

Dimensions mm	
Length	117
Lead (integral)	1800
Diameter	63
Internal volume (cm <sup>3</sup> )	32.8
Weight including lead	800g
Mounting	NW25
Coupling flange	

### **Electrical data**

Operating voltage	+ 2300 V at 0.7mA
-------------------	-------------------

### **Materials exposed to vacuum**

Stainless steel	AISI 304, 347, 321, 302
Soda-Lime-Barium glass	
Fluroelastomer	
Nickel 63	
Nickel	

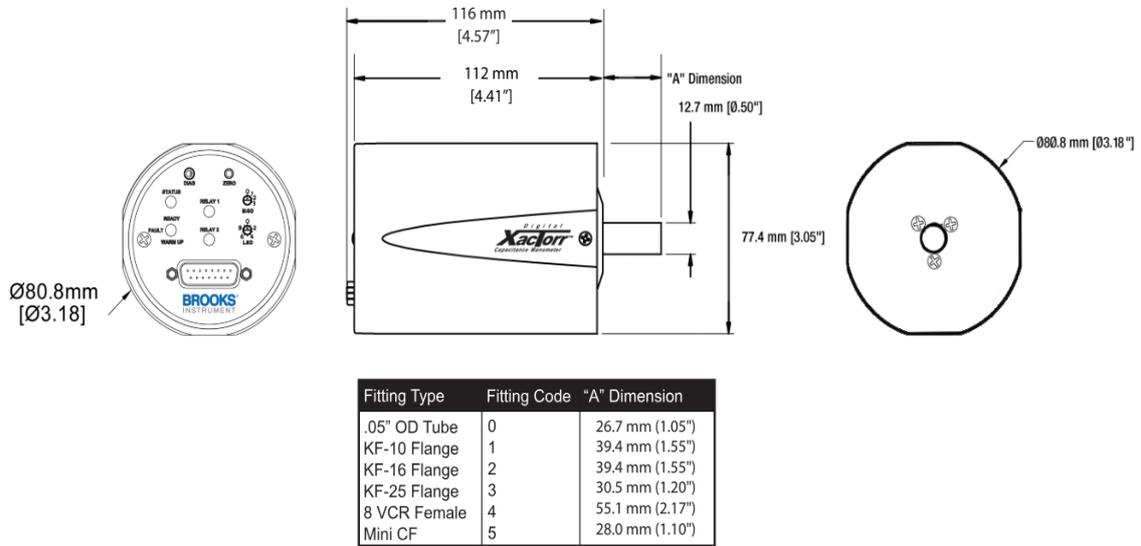
## ANEXO 6: DETALHES SOBRE O MEDIDOR CMX0

Figura 145: Especificações técnicas do medidor CMX0.

PERFORMANCE		
Operating Temperatures:		
CMX0	Ambient	
CMX45	45°C	
CMX100	100°C	
Full Scale Ranges	0.1, 1, 2, 10, 20, 100, 1000 Torr	
Accuracy <sup>1</sup>	CMX0: 0.25% of Reading CMX1, CMX2: 0.15% of Reading	
Measurement Range	4 Decades	
Temperature Effect on Zero	0.002% F.S./°C	
Temperature Effect on Span	0.02% F.S./°C	
MECHANICAL		
Exposed Materials	Inconel® and/or AISI 316L Stainless Steel	
Over-Pressure Limit	17 psia or 125% of Full Scale, whichever is greater	
Approximate Shipping Weight	1.40 lbs. (726 grams)	
OUTPUTS SUPPORTED		
Analog Models	Analog (010 Vdc 5k Ω load) - Yes RS485 - Yes DeviceNet - No	
DeviceNet Models	Analog (010 Vdc 5k Ω load) - Yes RS485 - Yes DeviceNet - Yes	
CONNECTORS		
Analog	9-Pin Male Sub D or 15-Pin Sub D	
RS485	2.5mm Mini Jack	
DeviceNet	5-Pin Eurofast (DeviceNet) & 9-Pin Female Sub D (Analog)	
RELAY CONTACT RATING		
Available on 15-Pin Male Sub D interface	1A @ 30 Vdc/0.3A @ 125 Vac	
ENVIRONMENTAL		
Ambient Operating Temperature	CMX0: 0-50°C CMX45: 15-35°C CMX100: 15-45°C	
CERTIFICATIONS		
Electromagnetic Compatibility	Fully CE Certified to EMC Directive 89/336/EEC	
RoHS Compliance	With "R" in the Part Number Code	
POWER REQUIRED		
CMX0 power required is 200 mA @ ±15 Vdc		
Power Input at Initial Warm-up Analog Models, Typical Values <sup>2</sup>	CMX45 - 270 mA @ ±15 Vdc (±5%)	CMX100 - 620 mA @ ±15 Vdc (±5%)
Power Input at Steady State Analog Models, Typical Values <sup>2</sup>	CMX45 - 175 mA @ ±15 Vdc (±5%)	CMX100 - 350 mA @ ±15 Vdc (±5%)
Power Input at Initial Warm-up DeviceNet Models, Typical Values	CMX45 - 400 mA @ 24 Vdc	CMX100 - 900 mA @ 24 Vdc
Power Input at Steady State DeviceNet Models, Typical Values	CMX45 - 300 mA @ 24 Vdc	CMX100 - 600 mA @ 24 Vdc

Fonte: [https://cdn.brooksinstrument.com/-/media/brooks/documentation/products/pressure-and-vacuum/capacitance-manometers/xactorr/vacuum-capacitance-manometer-data-sheet-cmx45-cmx100.pdf?rev=8cf7e81fa96f4383a5e318c5fa58651e&sc\\_lang=en&hash=27d947b934375f14b9f42685a644dc80](https://cdn.brooksinstrument.com/-/media/brooks/documentation/products/pressure-and-vacuum/capacitance-manometers/xactorr/vacuum-capacitance-manometer-data-sheet-cmx45-cmx100.pdf?rev=8cf7e81fa96f4383a5e318c5fa58651e&sc_lang=en&hash=27d947b934375f14b9f42685a644dc80).

Figura 146: Dimensões do medidor CMX0.



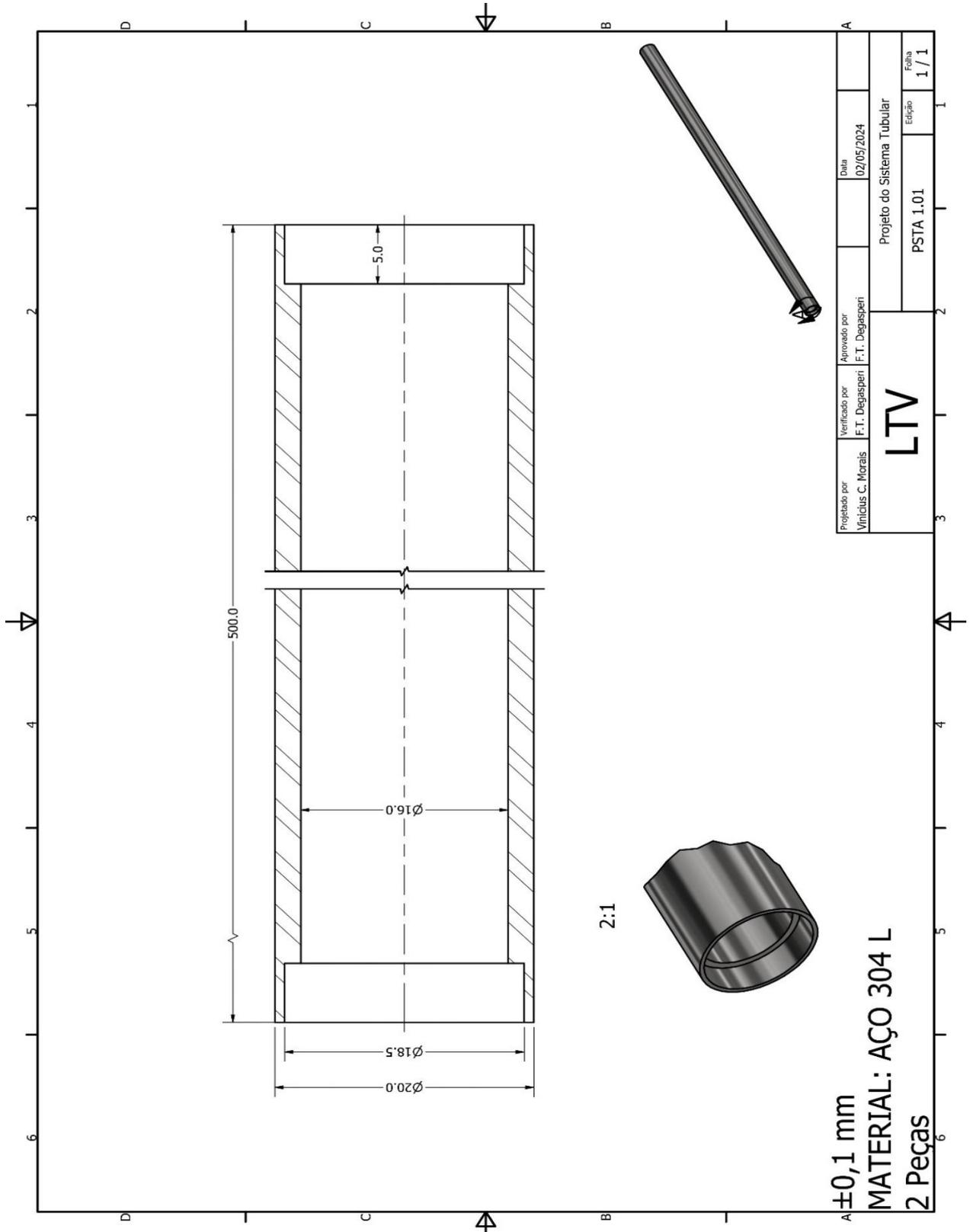
Fonte: [https://cdn.brooksinstrument.com/-/media/brooks/documentation/products/pressure-and-vacuum/capacitance-manometers/xactor/vacuum-capacitance-manometer-data-sheet-cmx45-cmx100.pdf?rev=8cf7e81fa96f4383a5e318c5fa58651e&sc\\_lang=en&hash=27d947b934375f14b9f42685a644dc80](https://cdn.brooksinstrument.com/-/media/brooks/documentation/products/pressure-and-vacuum/capacitance-manometers/xactor/vacuum-capacitance-manometer-data-sheet-cmx45-cmx100.pdf?rev=8cf7e81fa96f4383a5e318c5fa58651e&sc_lang=en&hash=27d947b934375f14b9f42685a644dc80).

## **APÊNDICE 1: Desenhos técnicos do Projeto do Sistema Tubular**

No APÊNDICE 1 estão apresentados os desenhos técnicos, com as respectivas medidas, utilizadas para a fabricação dos componentes necessários para a montagem do sistema de vácuo do Projeto de um Sistema Tubular de Alto-vácuo (PSTA). Onde estão sendo demonstrados os:

- Desenhos unitários de cada peça;
- Desenhos de montagem;
- Desenho de conjunto do sistema de vácuo.

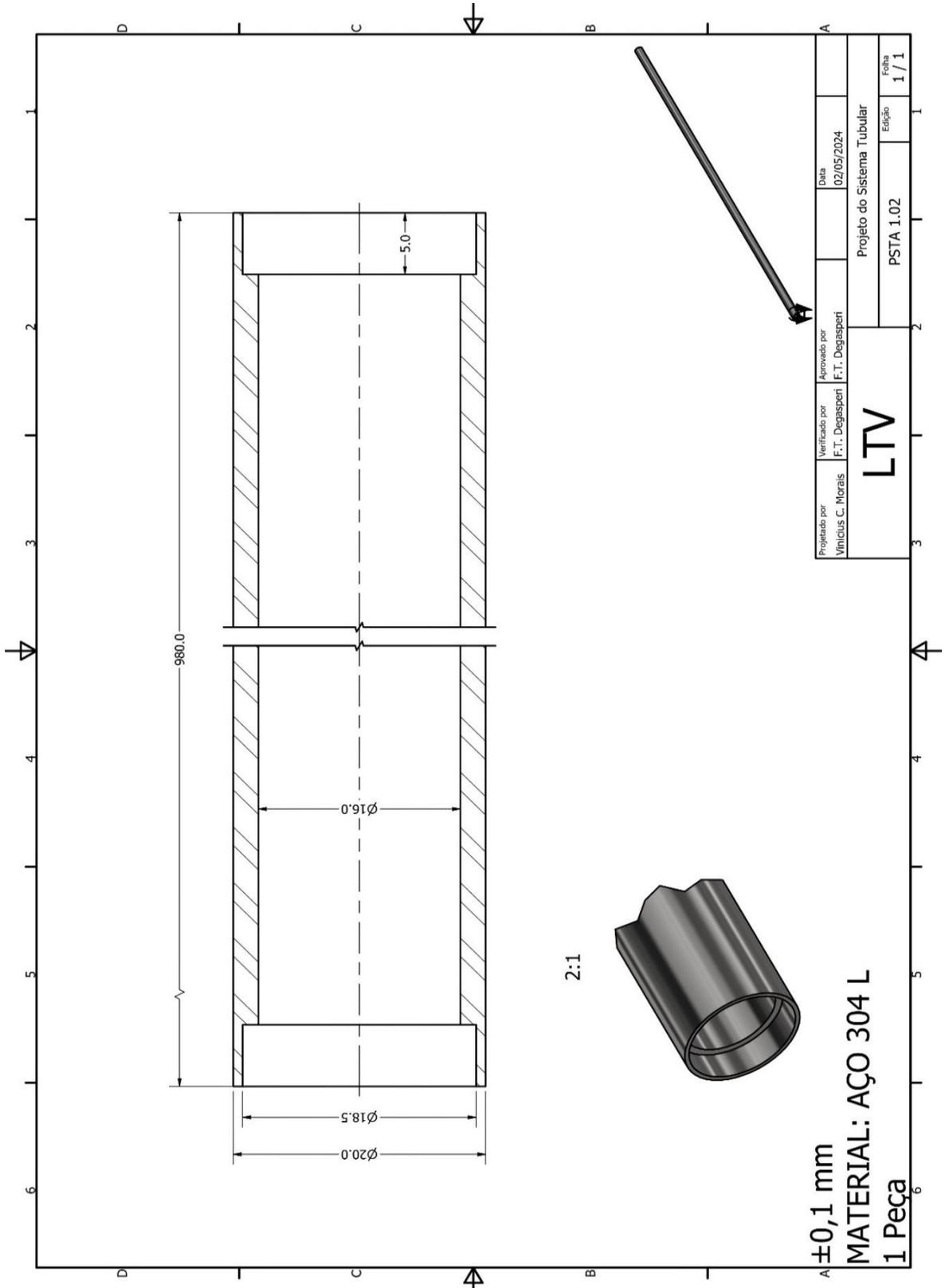
Figura 147: Peça PSTA 1.01 - Tubo 500 mm.



$\pm 0,1$  mm  
**MATERIAL: AÇO 304 L**  
**2 Peças**

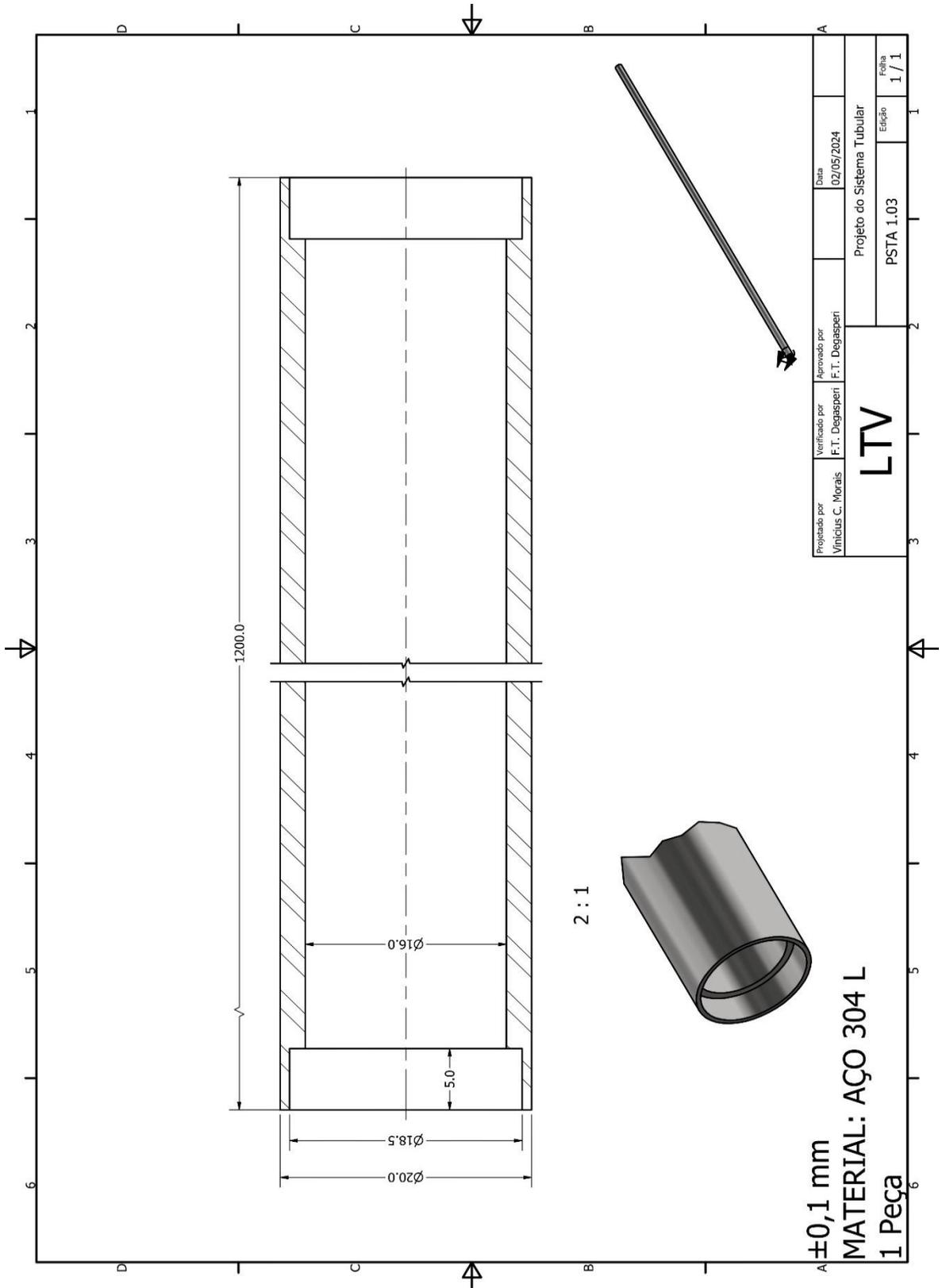
Fonte: O autor.

Figura 148: Peça PSTA 1.02 – Tubo 980 mm.



Fonte: O autor.

Figura 149: Peça PSTA 1.03 – Tubo 1200 mm.

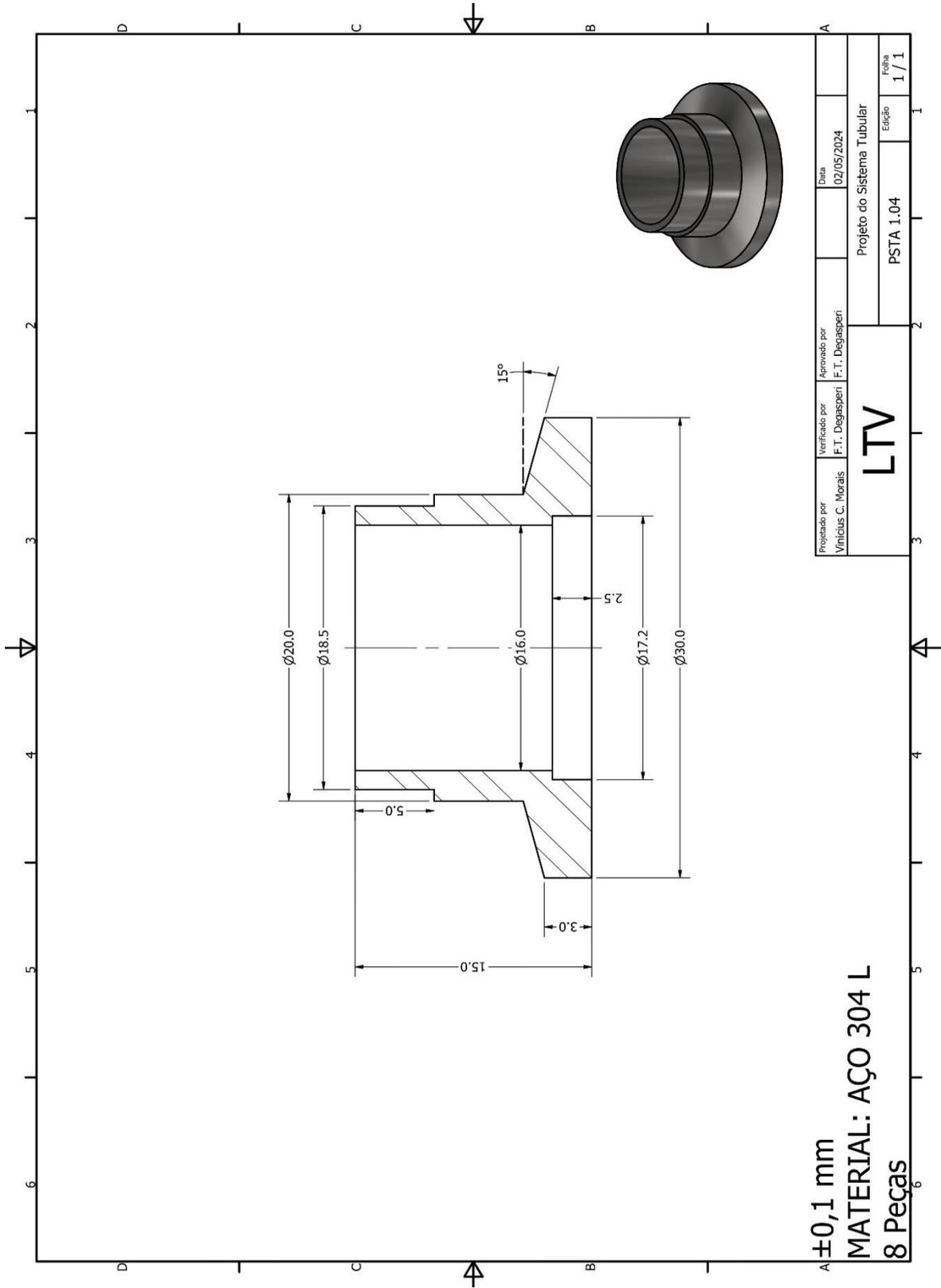


Projetoado por Vinicius C. Morais	Verificado por F. T. Degasperri	Aprovado por F. T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
PSTA 1.03			Edição 1 / 1

±0,1 mm  
**MATERIAL: AÇO 304 L**  
**1 Peça**

Fonte: O autor.

Figura 150: Peça PSTA 1.04 - Conexão KF 16 para os tubos.

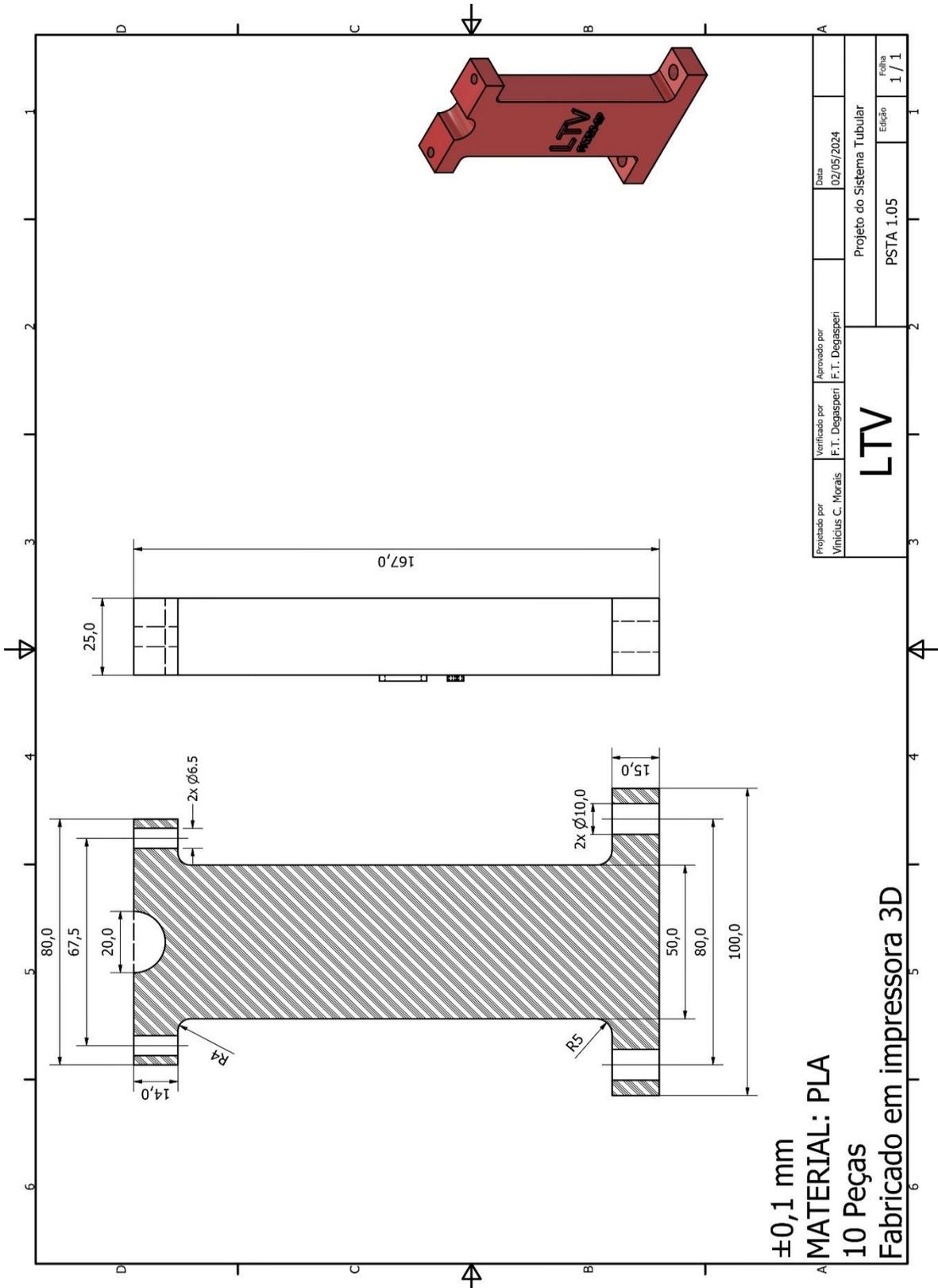


Projetoado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
			PSTA 1.04
			Edição 1 / 1

**±0,1 mm**  
**MATERIAL: AÇO 304 L**  
**8 Peças**

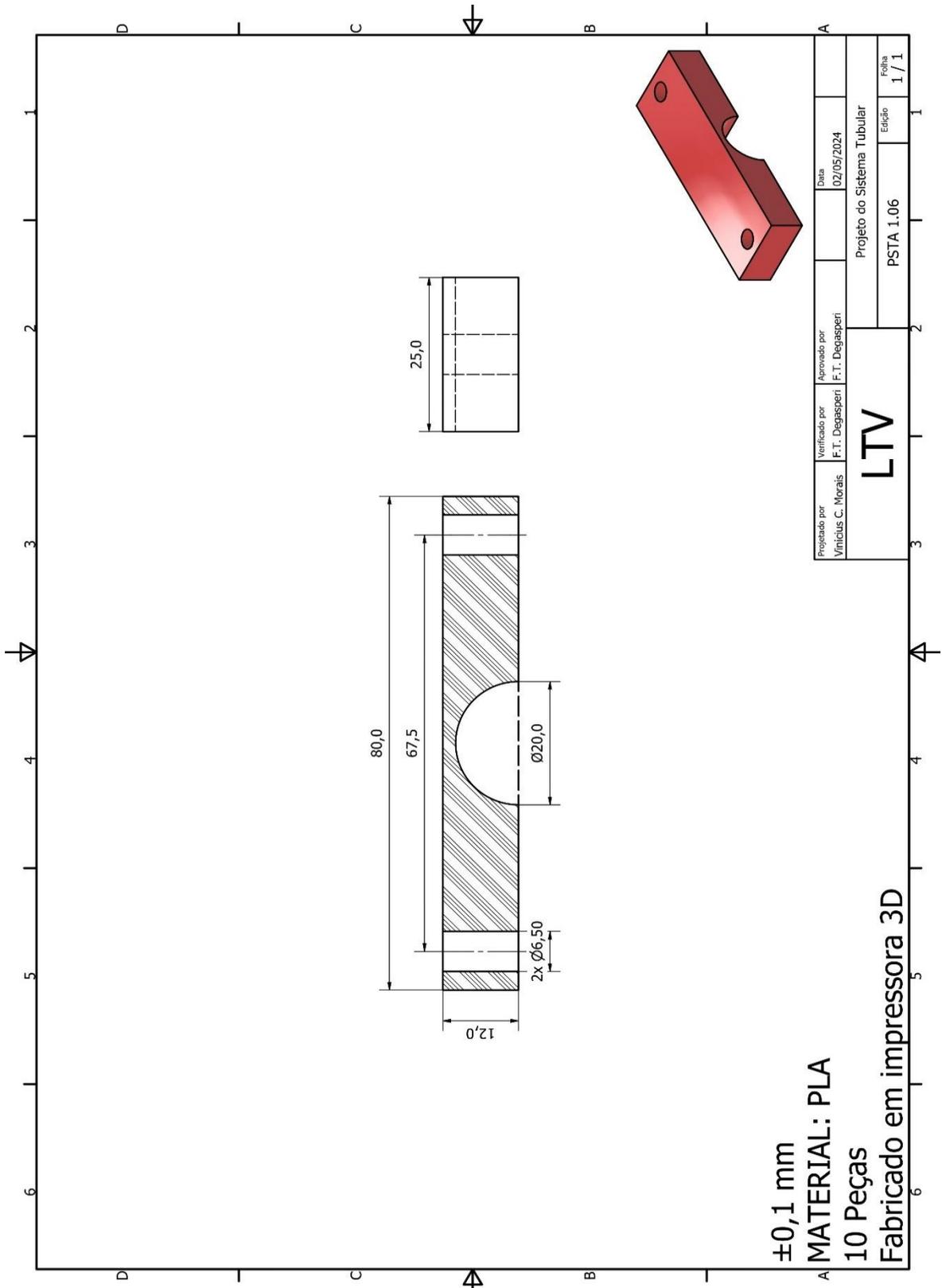
Fonte: O autor.

Figura 151: Peça PSTA 1.05 - Base do suporte para os tubos.



Fonte: O autor.

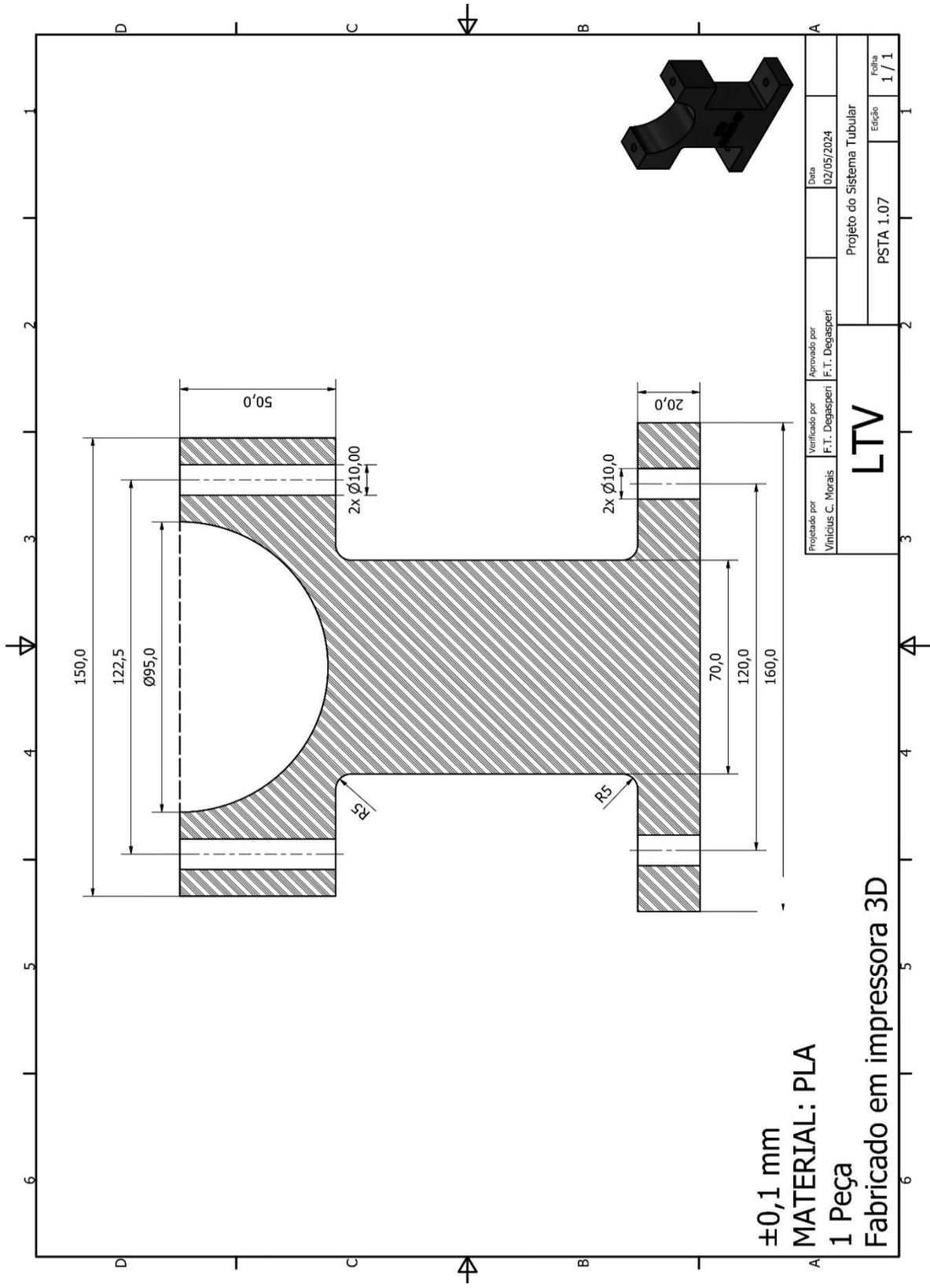
Figura 152: PSTA 1.06 - Encaixe do suporte dos tubos.



±0,1 mm  
**MATERIAL: PLA**  
**10 Peças**  
**Fabricado em impressora 3D**

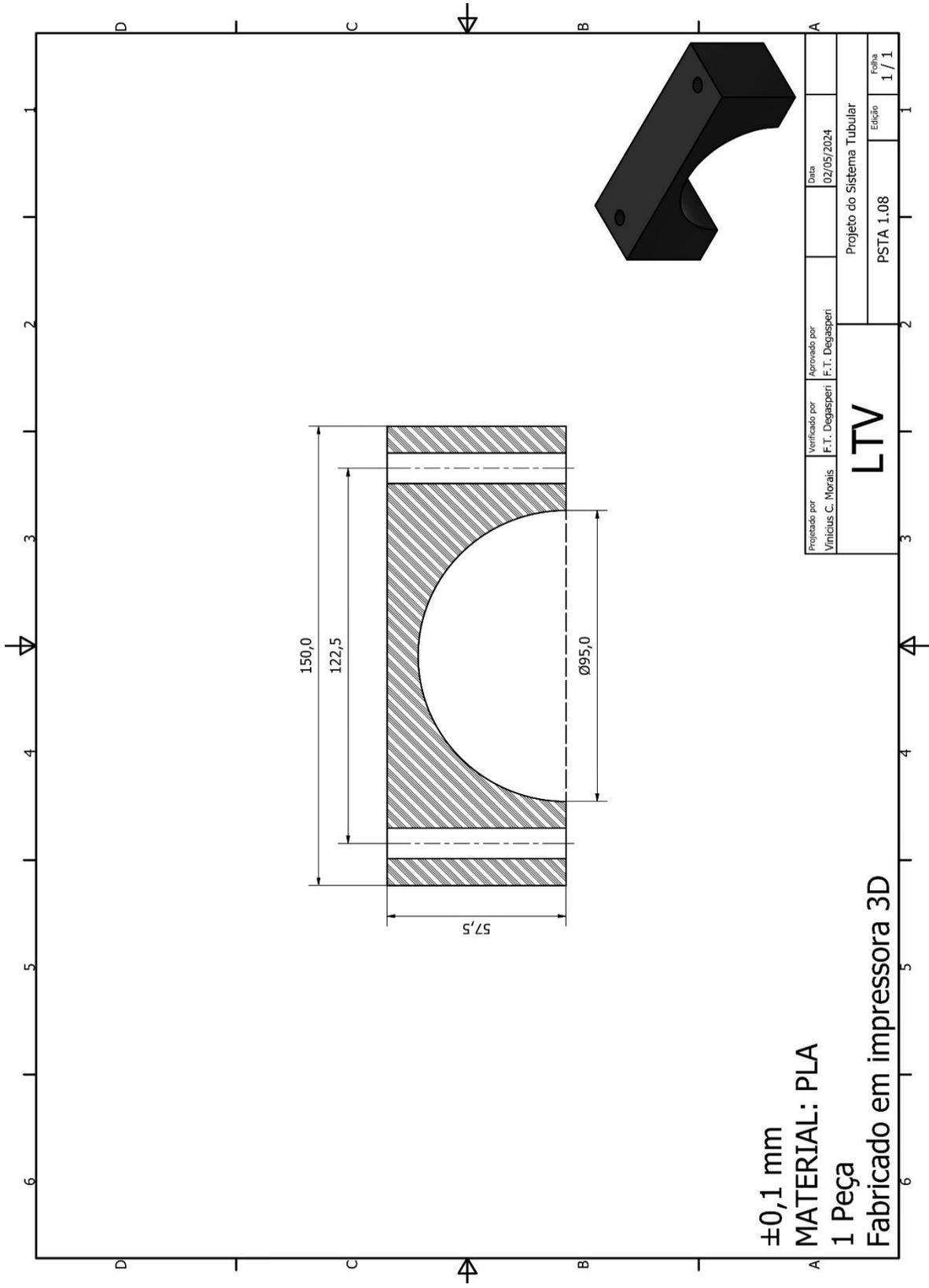
Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F. I. Degasperin	Aprovado por F. I. Degasperin	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
PSTA 1.06			Edição 1 / 1

Figura 153: Peça PSTA 1.07 - Base do suporte da bomba turbo-drag MDP 5011.



Fonte: O autor.

Figura 154: Peça PSTA 1.08 - Encaixe do suporte da bomba turbo-drag MDP 5011.

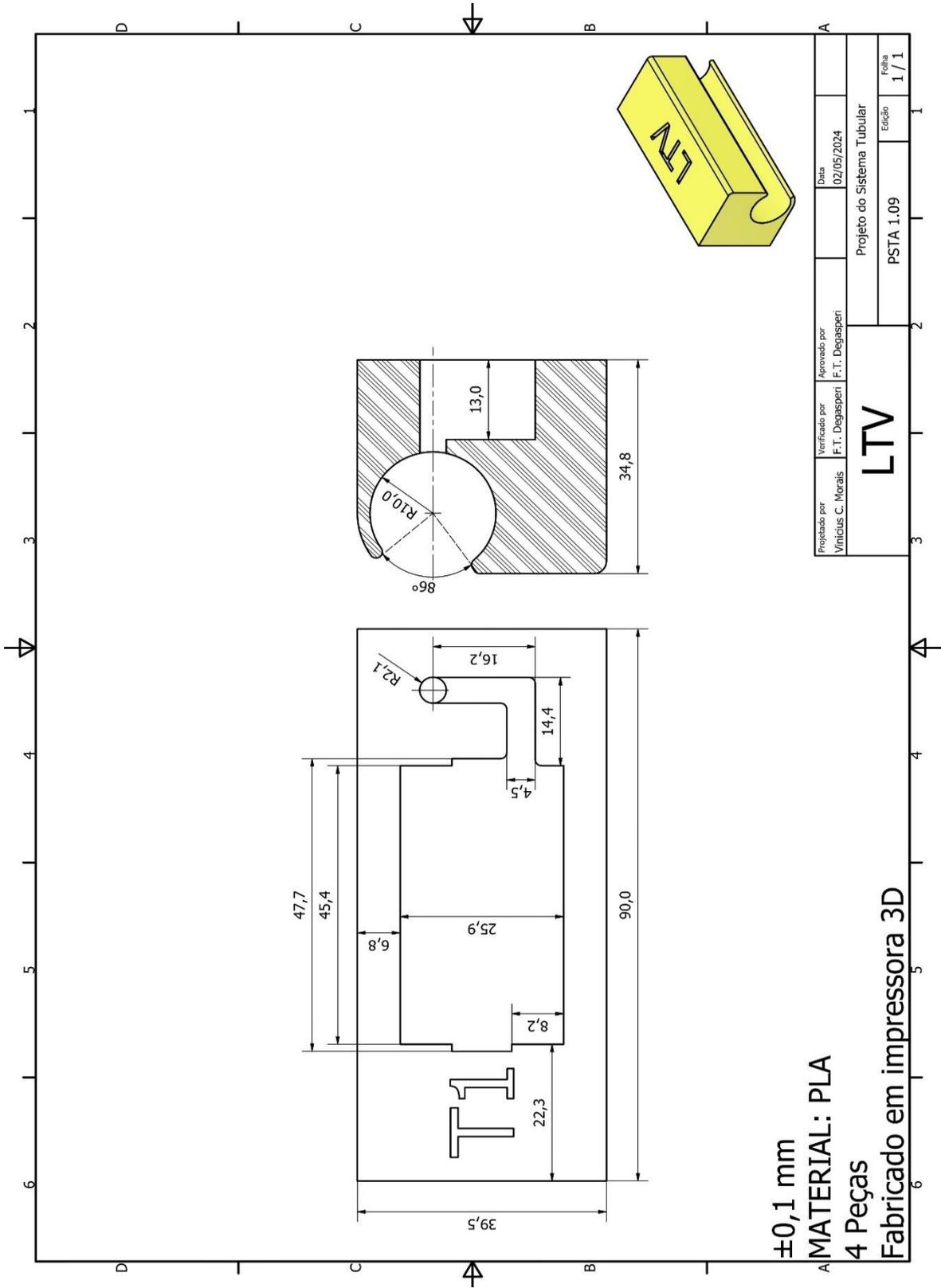


±0,1 mm  
**MATERIAL: PLA**  
**1 Peça**  
**Fabricado em impressora 3D**

Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
			PSTA 1.08
Edição			Folha
1 / 1			1 / 1

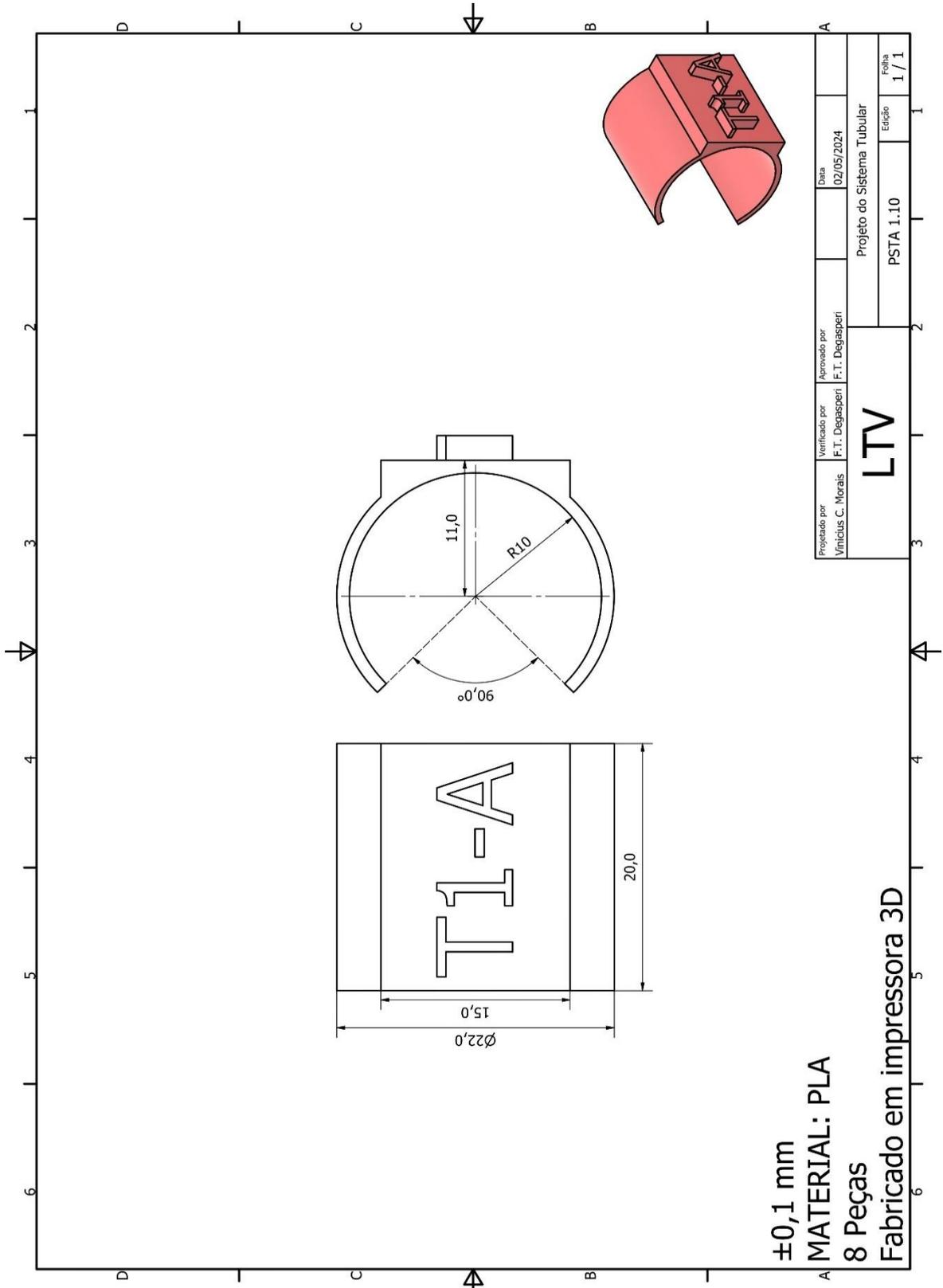
Fonte: O autor.

Figura 155: Peça 1.09 - Suporte do termopar.



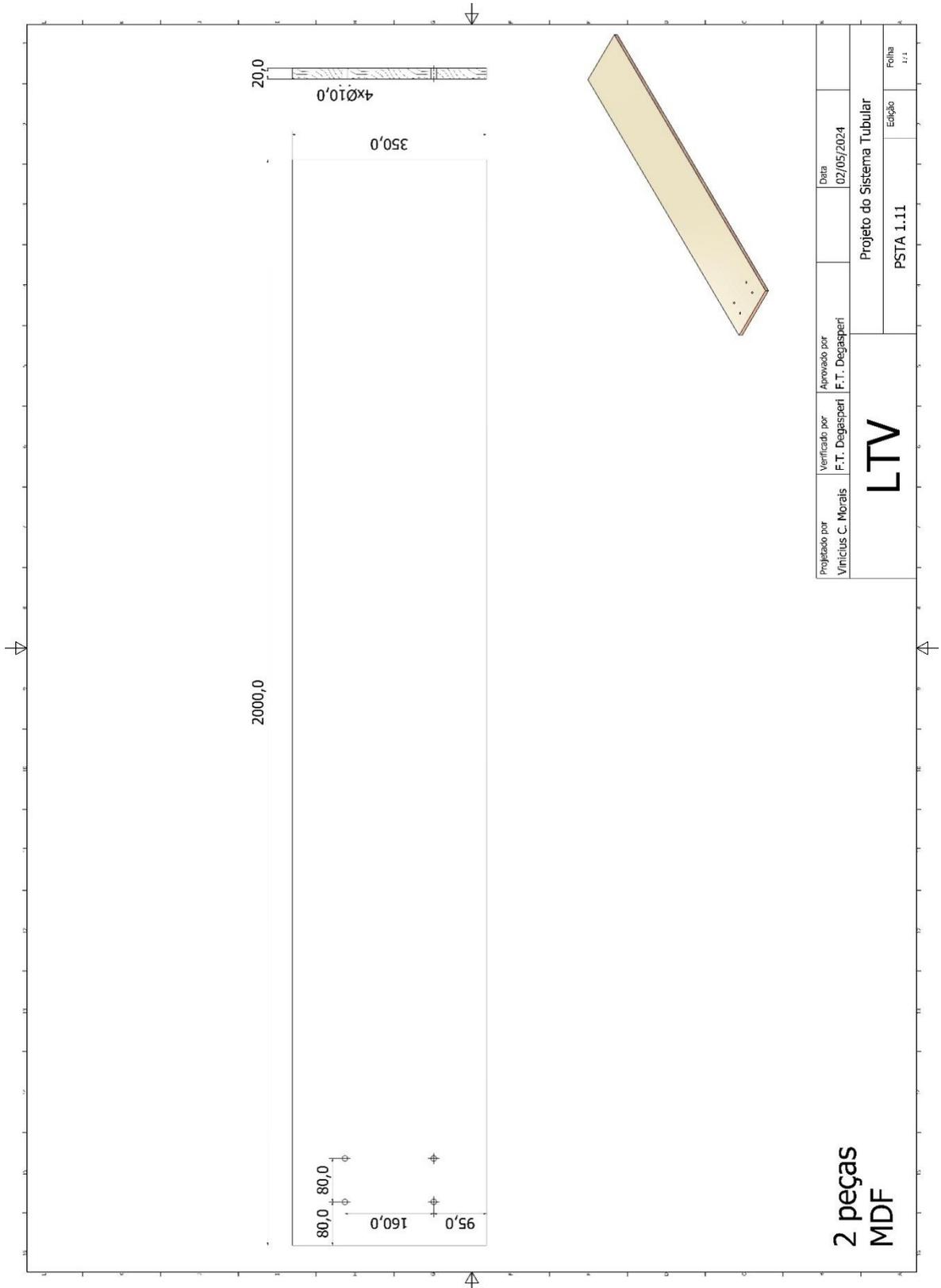
Fonte: O autor.

Figura 156: Peça 1.10 - Sinalizador.



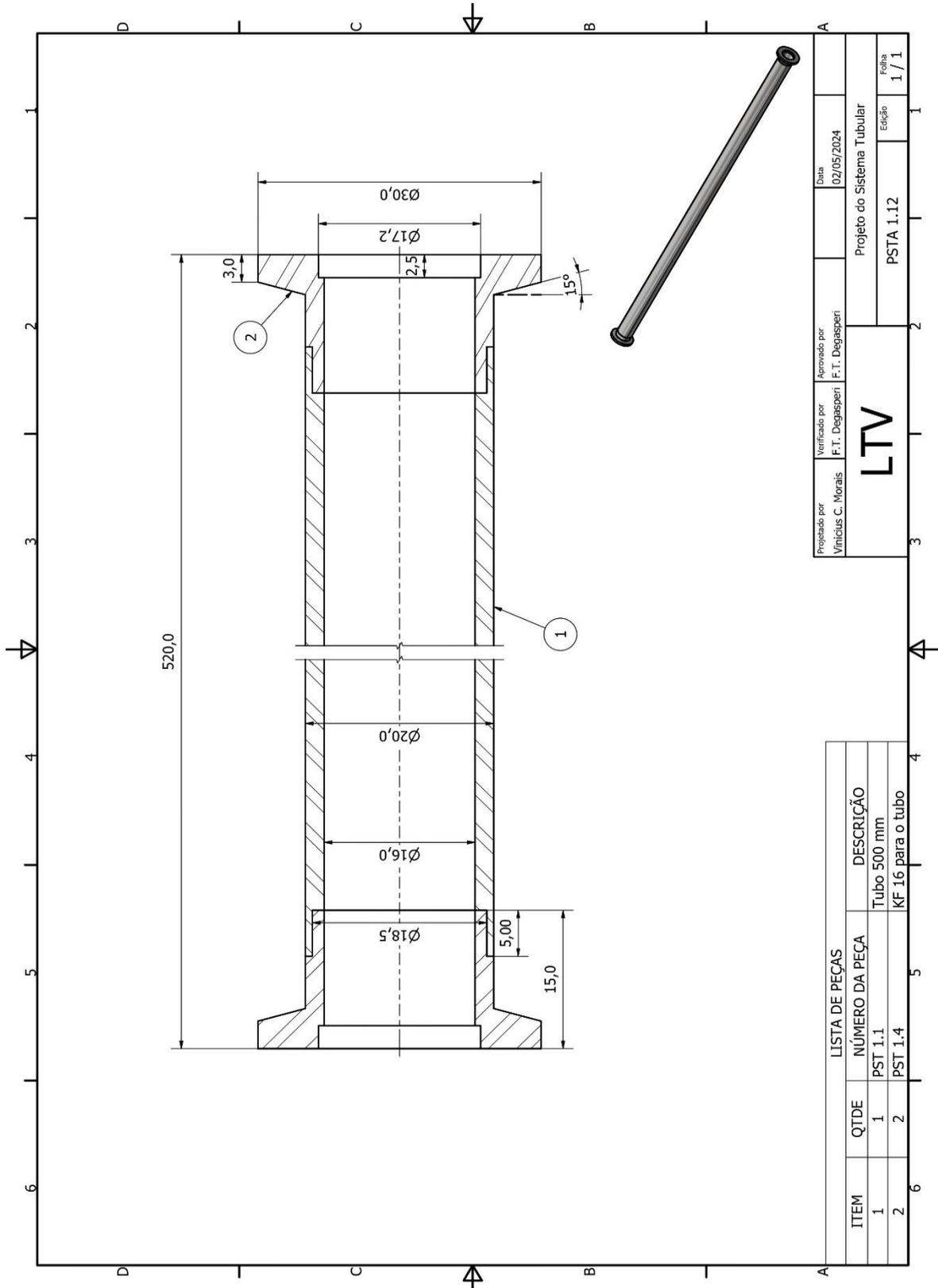
Fonte: O autor.

Figura 157: Peça PSTA 1.11 - Tábua de madeira.



Fonte: O autor.

Figura 158: Montagem PSTA 1.12 - Tubo 520 mm montado.

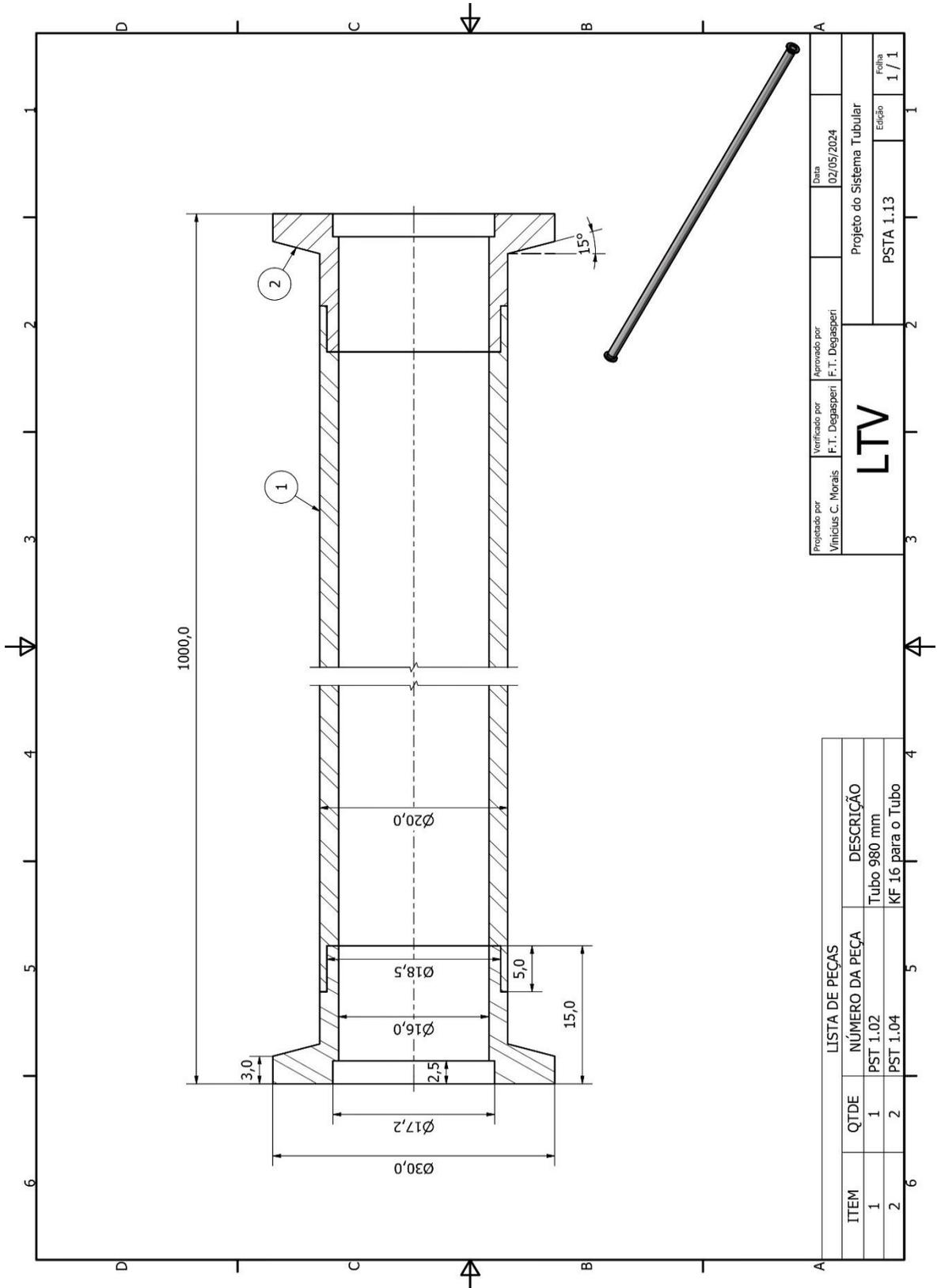


Projeto por Vinicius C. Moraes	Verificado por F. T. Degasperri	Aprovado por F. T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular PSTA 1.12
			Edição 1 / 1

LISTA DE PEÇAS		
ITEM	Q.TDE	DESCRIÇÃO
1	1	PST 1.1 Tubo 500 mm
2	2	PST 1.4 KF 16 para o tubo

Fonte: O autor.

Figura 159: Montagem PSTA 1.13 - Tubo 1000 mm montado.

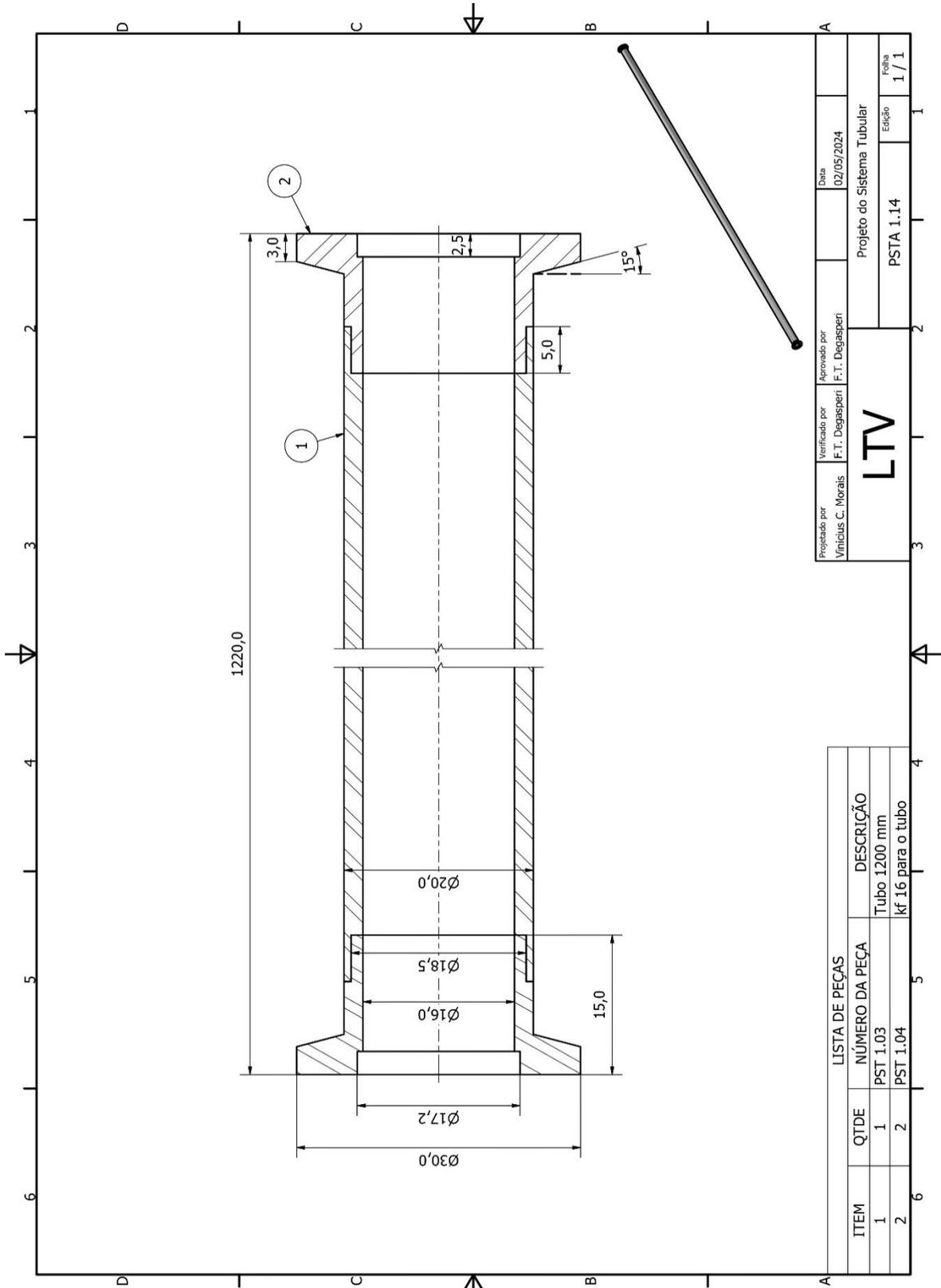


Projetado por Vinícius C. Moraes	Verificado por F. I. Degasperin	Aprovado por F. I. Degasperin	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
			PSTA 1.13
			Edição 1 / 1

LISTA DE PEÇAS		
ITEM	Q'TDE	DESCRIÇÃO
1	1	PST 1.02 Tubo 980 mm
2	2	PST 1.04 KF 16 para o Tubo

Fonte: O autor.

Figura 160: Montagem PSTA 1.14 - Tubo 1220 mm montado.

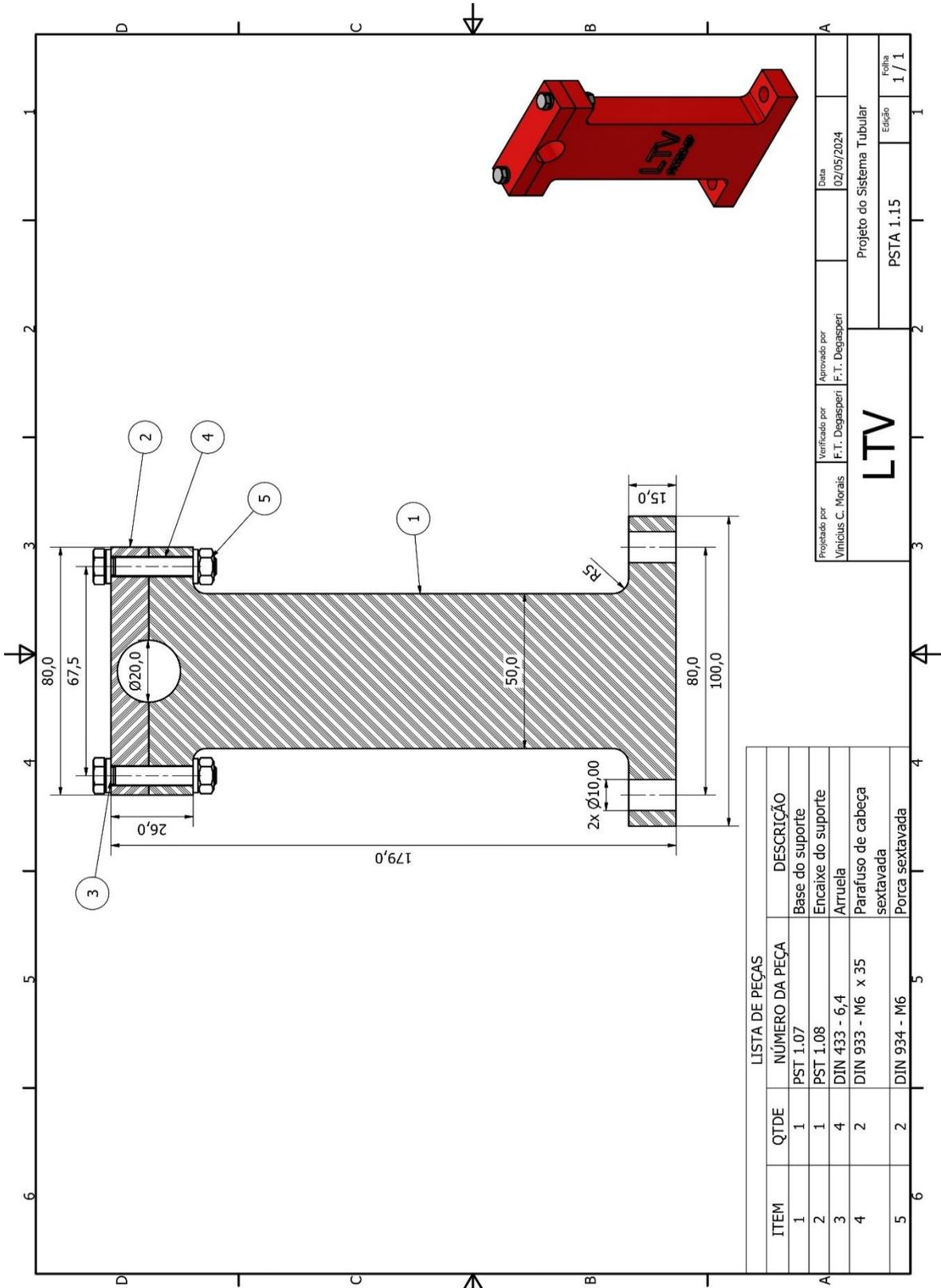


Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular
PSTA 1.14			Edição 1 / 1

LISTA DE PEÇAS		
ITEM	QTDE	DESCRIÇÃO
1	1	PST 1.03 Tubo 1200 mm
2	2	PST 1.04 kf 16 para o tubo

Fonte: O autor.

Figura 161: Montagem PSTA 1.15 - Suporte dos tubos montado.



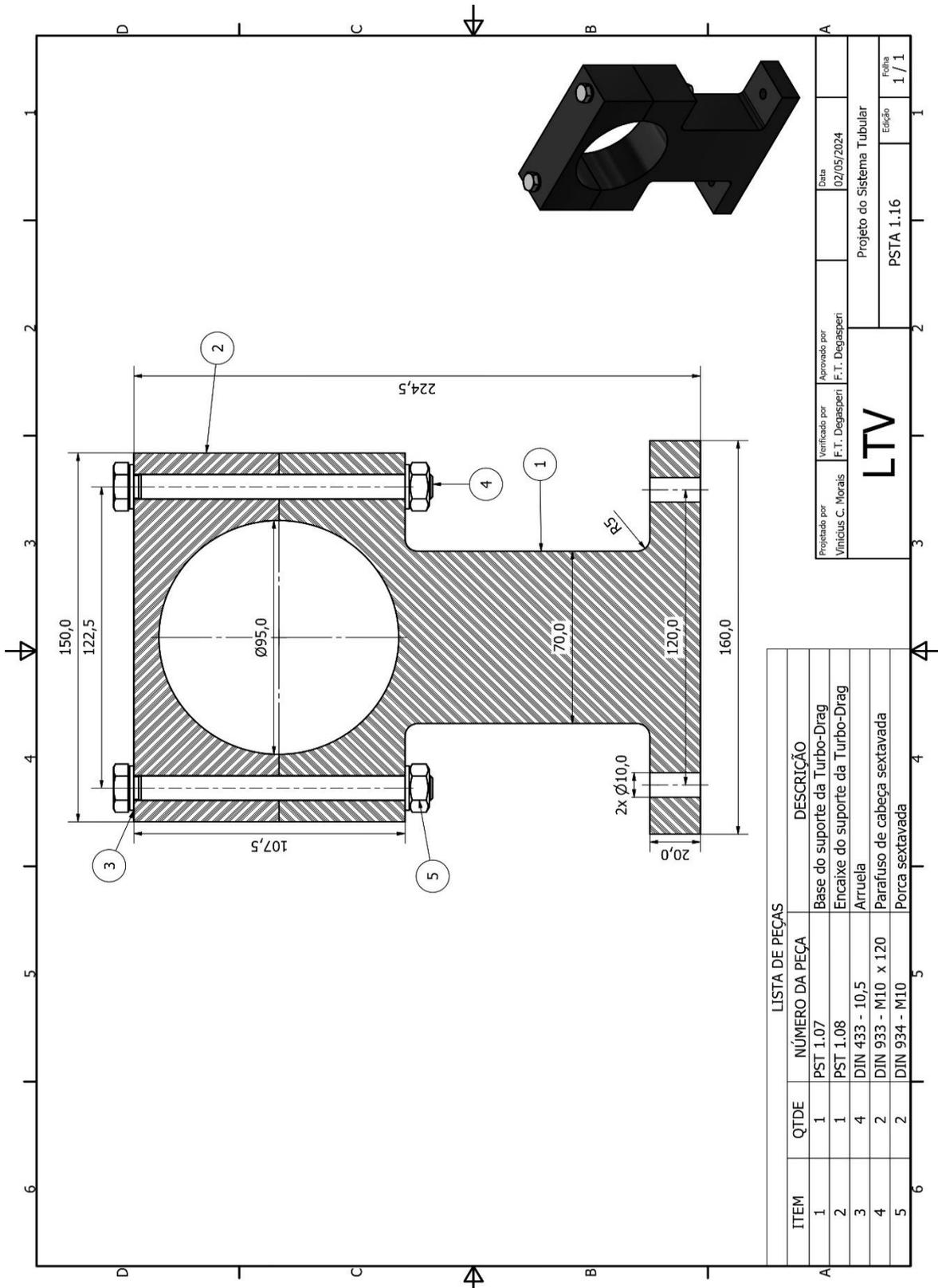
LISTA DE PEÇAS

ITEM	QTDE	NÚMERO DA PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	PST 1.07	Base do suporte
2	1	PST 1.08	Encaixe do suporte
3	4	DIN 433 - 6,4	Arruela
4	2	DIN 933 - M6 x 35	Parafuso de cabeça sextavada
5	2	DIN 934 - M6	Porca sextavada

Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024
<b>LTV</b>			Projeto do Sistema Tubular PSTA 1.15
			Edição 1 / 1

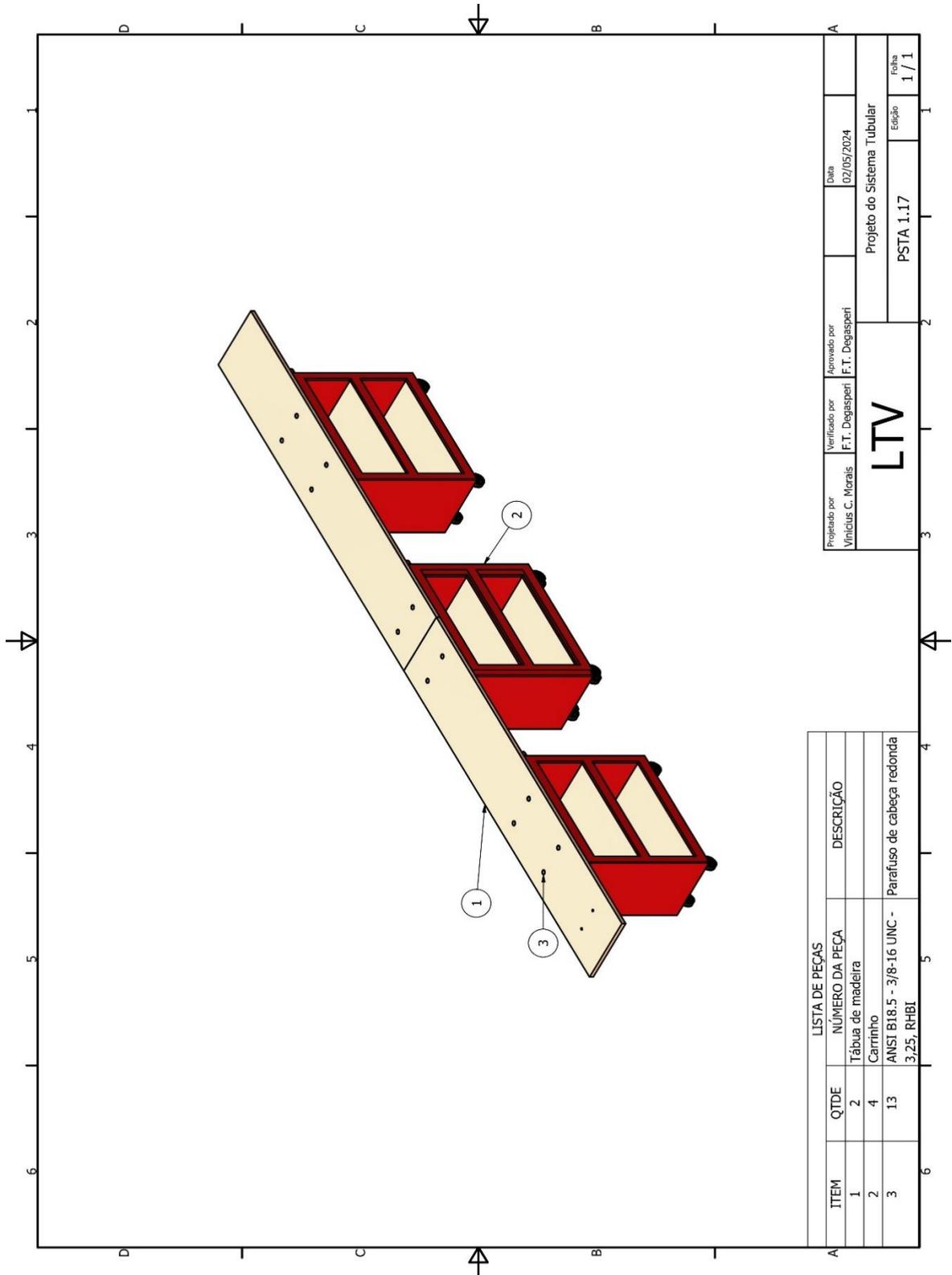
Fonte: O autor.

Figura 162: Montagem PSTA 1.16 - Suporte da bomba turbo-drag MDP 5011 montado.



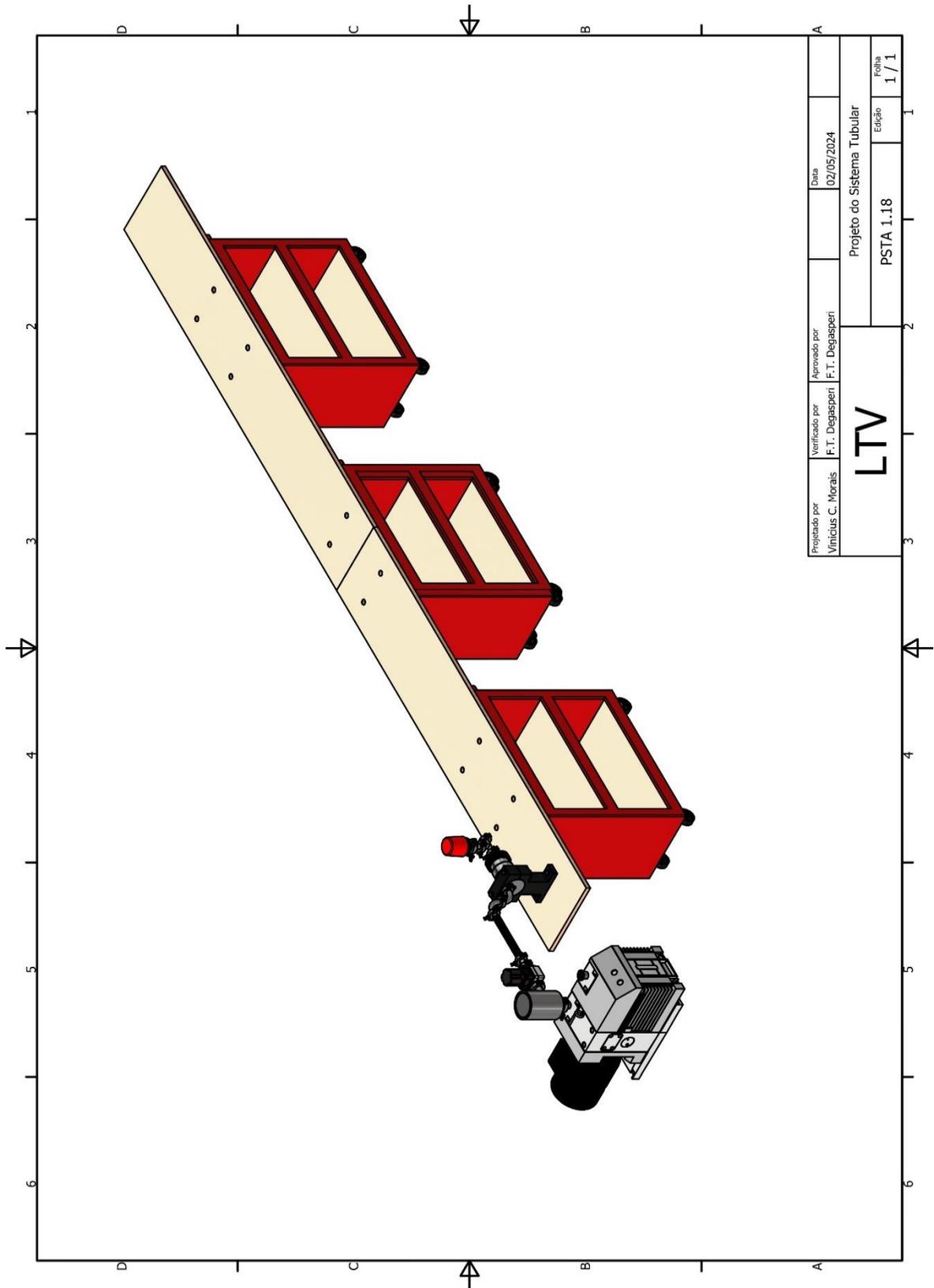
Fonte: O autor.

Figura 163: Montagem 1.17 - Bancada montada.



Fonte: O autor.

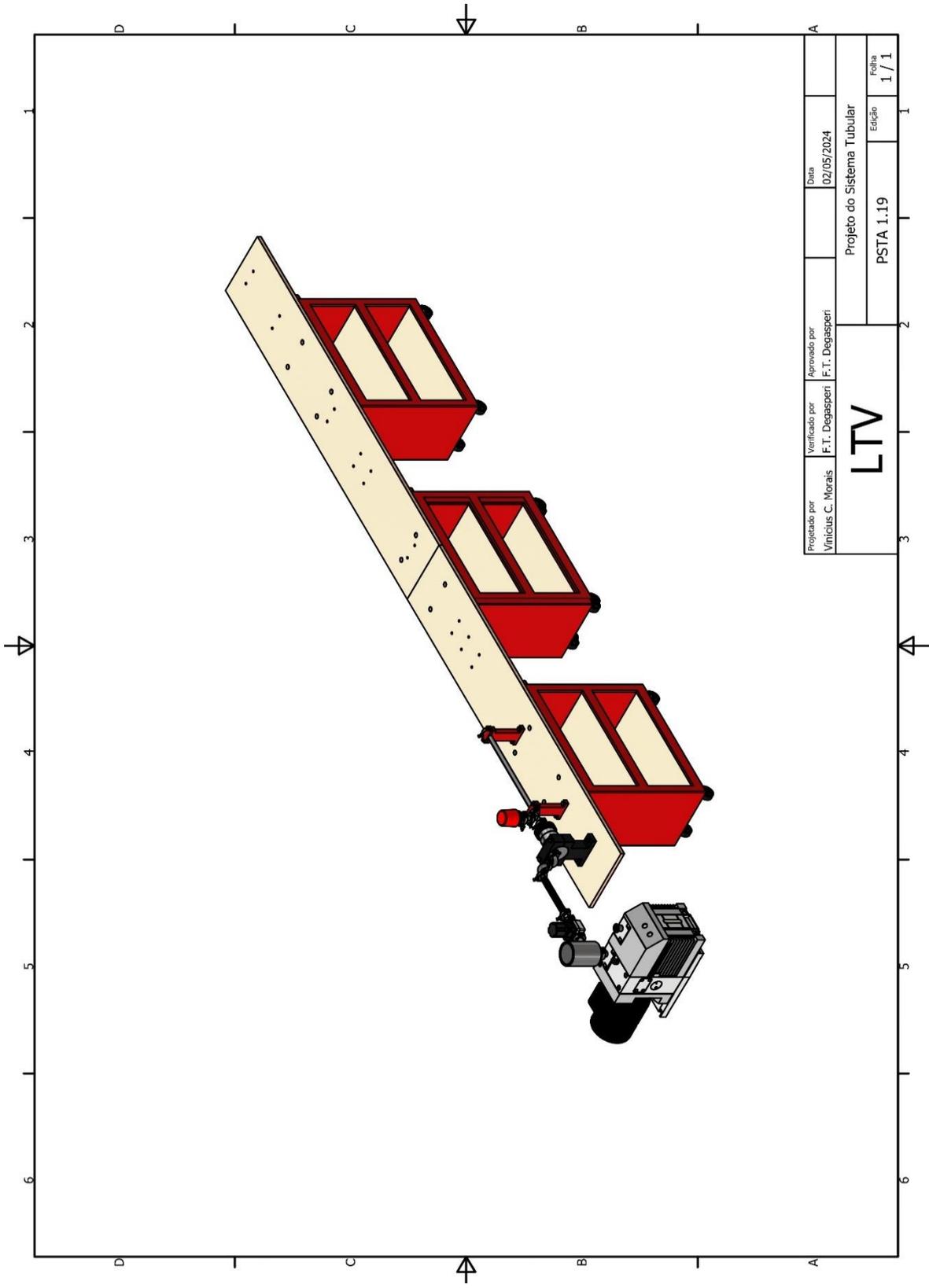
Figura 164: Montagem 1.18 – Arranjo 1.



Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024	Projeto do Sistema Tubular PSTA 1.18		Edição 1 / 1
<b>LTV</b>						

Fonte: O autor.

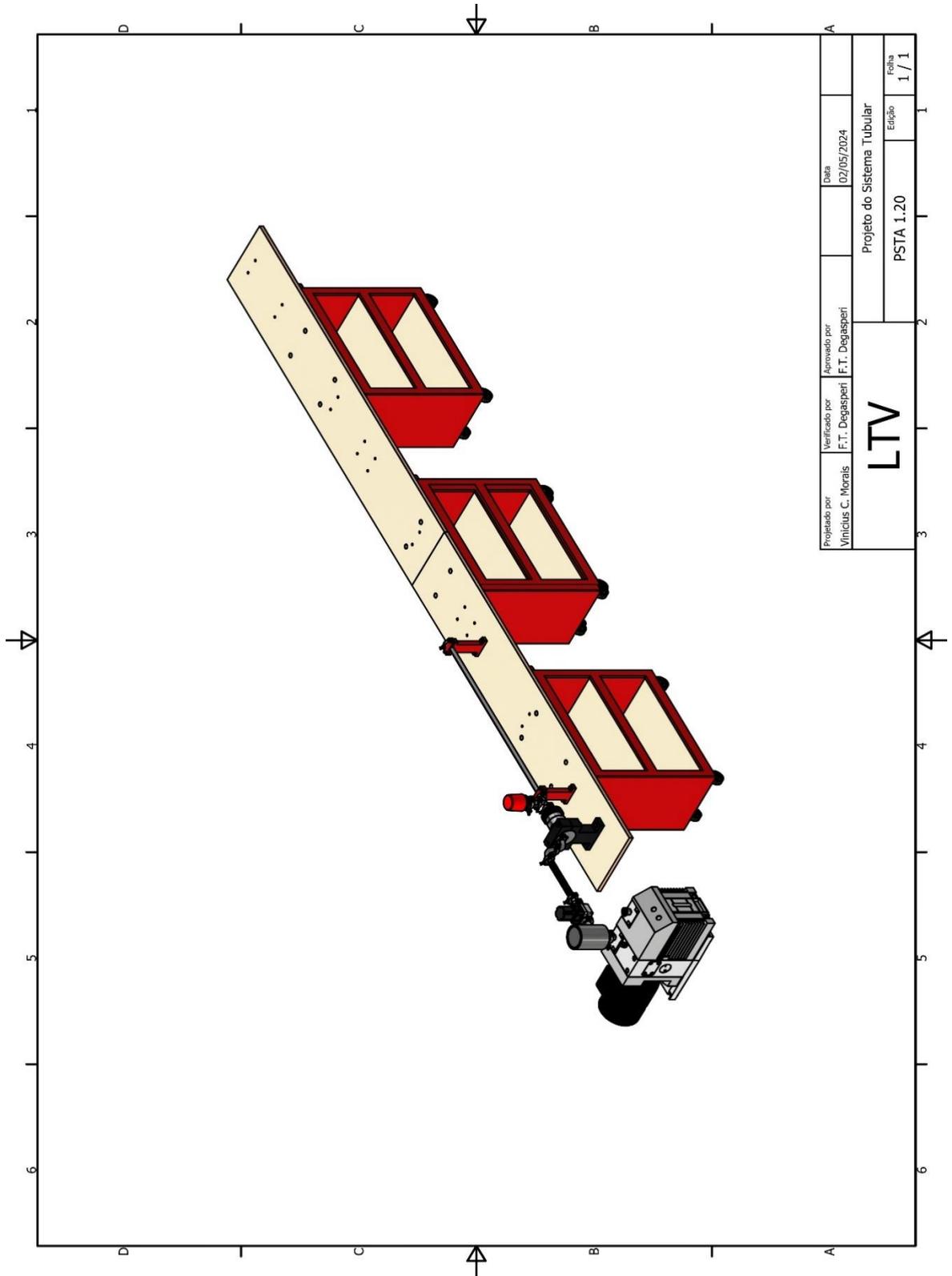
Figura 165: Montagem 1.19 – Arranjo 2.



Projetado por Vinicius C. Morais	Verificado por F.T. Degasperri	Aprovado por F.T. Degasperri	Data 02/05/2024	Projeto do Sistema Tubular	
<b>LTV</b>			PSTA 1.19	Edição	Folha
				1 / 1	

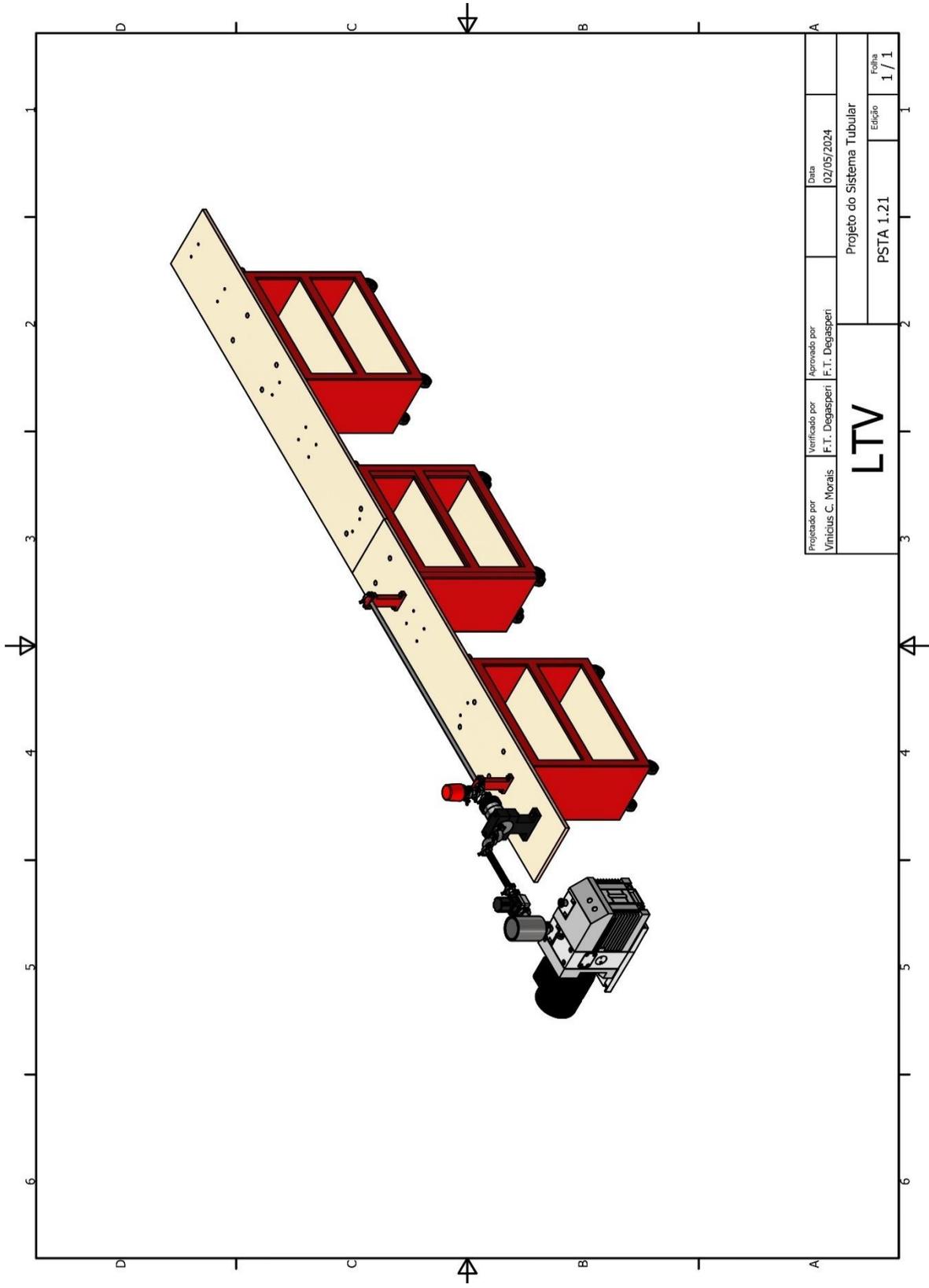
Fonte: O autor.

Figura 166: Montagem 1.20 – Arranjo 3.



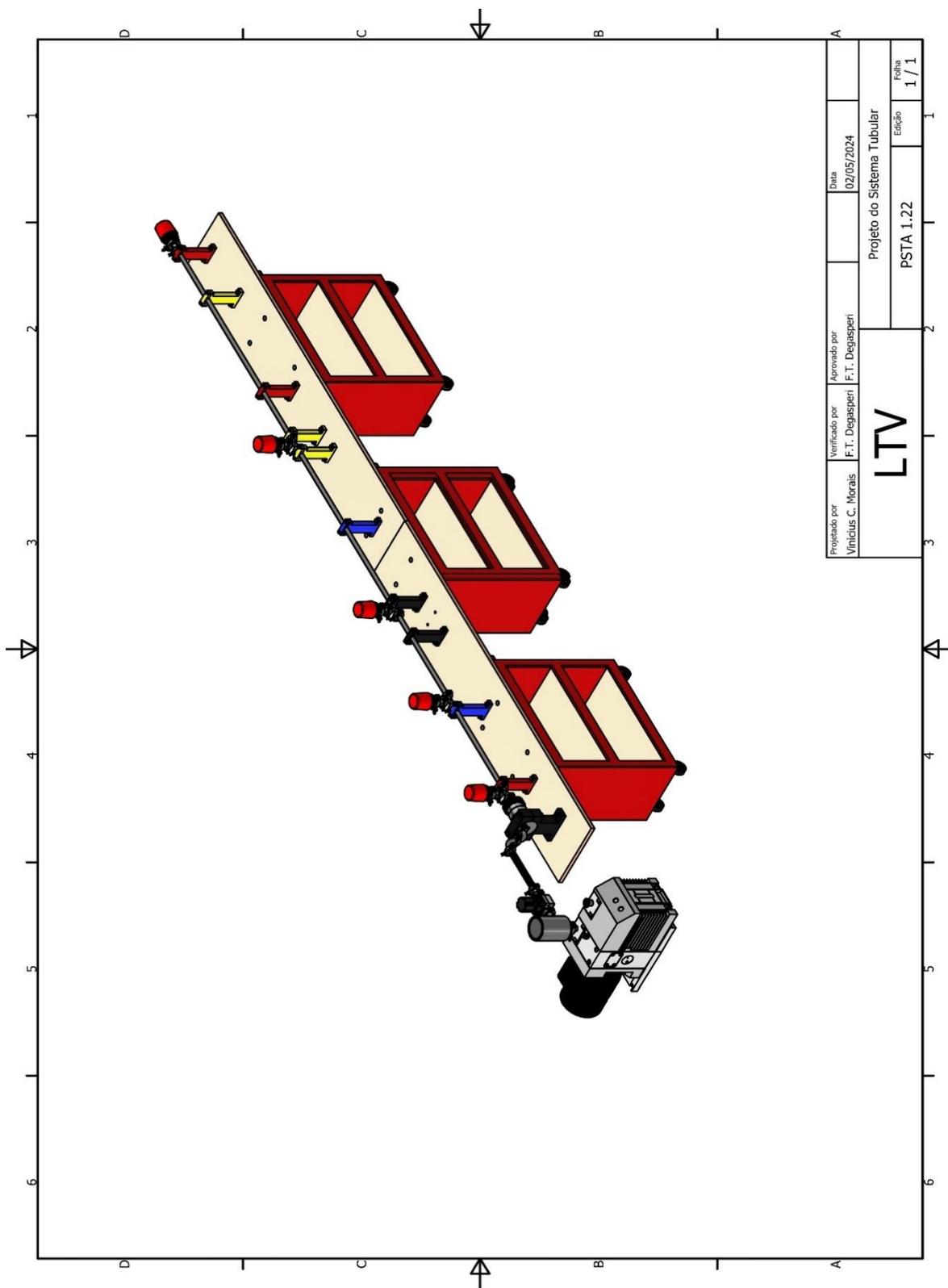
Fonte: O autor.

Figura 167: Montagem 1.21 – Arranjo 4.



Fonte: O autor.

Figura 168: Montagem PSTA 1.22 - Sistema tubular montado.



Fonte: O autor.

## **APÊNDICE 2: Trabalhos apresentados durante a graduação**

Abaixo estão apresentados os trabalhos relacionados a este trabalho de graduação apresentados durante os simpósios de tecnologia, organizados pela FATEC-SP.

- 1- Resumo apresentado no 24º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT 2022), onde o tema do trabalho foi “MODELAGEM DE PASSADORES MAGNÉTICOS EM AMBIENTE DE ALTO-VÁCUO”.
- 2- Resumo apresentado no 25º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT 2023), onde o tema do trabalho foi “MODELAGEM ANALÍTICA-NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO TUBULAR”.
- 3- Resumo apresentado no 44º Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e Ciência (CBrAVIC 2024), onde o tema do trabalho foi “ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A TUBULAR HIGH VACUUM SYSTEM”.
- 4- Resumo apresentado no 44º Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e Ciência (CBrAVIC 2024), onde o tema do trabalho foi “NUMERICAL MODELING OF A RESONANT CAVITY LINEAR ACCELERATOR USING MONTE CARLO METHOD”.
- 5- Resumo apresentado no 5º Simpósio de Iniciação Científica Tecnológica CPS/CPS 2023, onde o tema do trabalho foi “ MODELAGEM ANALÍTICO-NUMÉRICA EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO TUBULAR”.
- 6- Resumo apresentado no Encontro de Outono 2024 da Sociedade Brasileira de Física (SBF), AUTUMN MEETING 2024, onde o tema do trabalho foi: “PRESSURE FIELD OF VACUUM SYSTEMS WITH RESONANT CAVITIES”.

# MODELAGEM DE PASSADORES MAGNÉTICOS EM AMBIENTE DE ALTO-VÁCUO

Vinicius Carvalho Moraes<sup>1</sup>, André Gustavo Lima Caetano<sup>2</sup>, Francisco Tadeu Degasperi<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV, da Faculdade de Tecnologia de São Paulo–São Paulo, SP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
vinicius.morais9@fatec.sp.gov.br e ftd@fatecsp.br

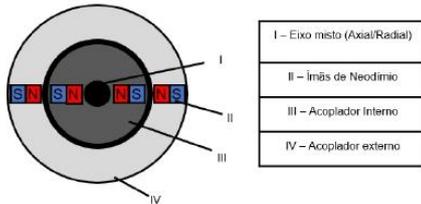
## 1. Introdução

A utilização de acopladores de ímãs permanentes de Neodímio ( $Nd_2Fe_{12}B$ ) para a construção de passadores de movimento em ambiente de alto vácuo, possibilitam a transmissão de movimento linear e rotativo em função da propriedade magnética dos ímãs, sendo necessário utilizar uma parede não magnética. Por não ser necessário o contato direto para transmitir movimento para o interior do sistema de vácuo esse modelo de construção apresenta muitas vantagens, principalmente em relação a limpeza e estanqueidade [1].

O objetivo deste trabalho é modelar um passador de movimento magnético para executar movimento misto (linear e rotativo) para um eixo, na extremidade desse eixo uma pequena quantidade de mercúrio e sais será transportada de uma fase do sistema de vácuo até a outra.

## 2. Metodologia e Materiais

Para a passagem do movimento para o interior do ambiente de alto-vácuo, serão utilizados passadores magnéticos que são um conjunto de acopladores magnéticos (interior e exterior ao ambiente de vácuo) construídos com aço AISI 304-L (austenítico). Durante a fabricação desses acopladores serão feitos furos para serem encaixados ímãs de Neodímio, que serão os responsáveis por transmitir movimento para o interior do sistema sem que haja contato direto entre as peças. No interior do tubo não magnético será utilizado um acoplador magnético responsável por transmitir movimento linear e rotativo a um eixo de aço inoxidável austenítico, para transportar mercúrio. A figura 1 representa as peças que fazem parte do passador de movimento.

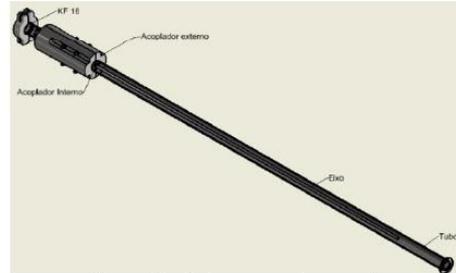


O *Autodesk Inventor* é um software tipo CAD (Computer Aided-Design) que permite utilizar ferramentas de engenharia e projeto[2]. Para a modelagem das peças e a montagem do sistema de passagem de movimento

## 3. Resultados

Neste trabalho foram desenvolvidas as modelagens das peças no *Autodesk Inventor*, para realizar a

montagem do arranjo dos passadores, conforme a montagem apresentada na figura 2.



O resultado esperado após a construção do arranjo é de que a relação magnética entre ímãs externos e internos ao ambiente de vácuo possibilitem a transmissão integral do movimento do acoplador externo para o acoplador interno, de forma que possa transmitir um torque de baixa intensidade para o eixo preso no acoplador interno.

## 4. Conclusão

Este trabalho possibilitará uma enorme aplicabilidade dentro da tecnologia do vácuo, possibilitando a transmissão de movimentos lineares e rotativos para o transporte de cargas no interior de um sistema de vácuo. A expectativa, após a fabricação do sistema com os passadores magnéticos, é de transmitir baixo torque no sistema de acopladores, garantindo uma boa estabilidade do sistema de transferência de carga de uma fase até a outra.

## 5. Referências

- [1] GAMA, S. Introdução à Ciência e Tecnologia do Vácuo. Curso Tecnologia do Vácuo. Instituto de Física “Gleb Wataghin” – UNICAMP, 2002
- [2] CARDOSO, Amanda Pires; DIAS, Gabriel Pereira Gerino. Projeto e construção de protótipos de passadores de movimento eletromagnético em ambiente de alto vácuo, 2021 – Trabalho de conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Microeletrônica) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2021.

## Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo fomento da bolsa PIBIC.

<sup>1</sup>Aluno de IC da FATEC-SP (CNPQ-PIBIC).

# MODELAGEM ANALÍTICO-NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO TUBULAR

Vinicius Carvalho Morais<sup>1</sup>, Francisco Tadeu Degasperi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV, Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP  
vinicius.morais9@fatec.sp.gov.br e ftd@fatecsp.br

## 1. Introdução

Os sistemas tubulares estão presentes em grande parte dos sistemas de vácuo, principalmente em linhas de bombeamento. Utilizando a formulação contínua é possível obter os valores de pressão que se distribuem em cada ponto do espaço de um sistema, na câmara de vácuo, linha de bombeamento e bomba de vácuo, sendo necessário identificar e definir as fontes de gases e vapores e as condutâncias em cada ponto do sistema [1].

A proposta deste trabalho é de determinar a taxa de desgaseificação ( $Q_{Deg}$ ) de um sistema tubular de aço austenítico 304L utilizando métodos analítico-numéricos (Equação Diferencial Parcial), computacionais (Monte Carlo) e experimentais.

## 2. Metodologia e Materiais

Em pressões abaixo de  $10^{-3}$  mbar a fonte gasosa predominante em um sistema de vácuo é a desgaseificação, que tem origem da dessorção de gases e vapores. A taxa de desgaseificação está relacionada com o estado de limpeza e a classe do material que está sendo desgaseificado, como mostra as expressões 1 (10 horas de exposição ao vácuo) e 2 (a partir da 11ª hora).

$$q_{Deg}^{\alpha}(t) = q_0^{Inicial} \frac{1}{t^{\alpha}} \quad (1)$$

$$q_{Deg}^{\alpha}(t_c) = q_0^b$$

$$q_{Deg}^b(t) = q_0^b \exp[-\beta(t - t_c)] \quad (2)$$

A Figura 1 apresenta o sistema de vácuo utilizado neste estudo, composto por quatro tubos de aço inoxidável austenítico 304 L, totalizando um comprimento de 3,5 metros. Todos os tubos e componentes expostos ao vácuo foram submetidos as mesmas etapas de limpeza, de modo a uniformizar o processo, em que foi utilizado detergentes alcalino e neutro, água (para enxágue) e álcool isopropílico.

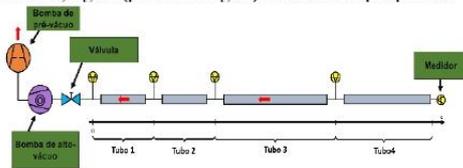


Figura 1 - Sistema Tubular.

No alto-vácuo as partículas têm um livre caminho médio muito grande, resultando em colisões mais frequentes com as superfícies das paredes do que entre si, sendo este o regime molecular. Em geral, os problemas relacionados a este regime podem ser resolvidos utilizando equações diferenciais parciais, sendo solucionadas de forma algébrica ou numérica [1].

Uma das grandes vantagens de utilizar métodos numéricos como solução de um sistema de vácuo, no regime molecular, é a utilização de métodos computacionais. Como é o caso do método de Monte Carlo (MMC), que soluciona fórmulas da teoria cinética dos gases sem simplificações [2], como nos simuladores molflow (CERN) e o COMSOL Multiphysics, com a ferramenta fmf (free molecular flow).

## 3. Resultados

O gráfico da Figura 2 apresenta a distribuição dos valores de pressão para cada posição do eixo x do sistema tubular, modelado nos softwares Molflow e COMSOL Multiphysics. A curva mostra os valores de pressão final após o sistema alcançar o estado estacionário (pressão não varia com o tempo).

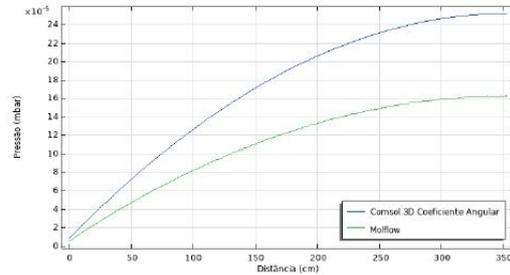


Figura 2 - Campo de pressão em função da posição (x) do Sistema tubular.

As respectivas soluções obtidos nos softwares molflow e COMSOL são dadas pelas funções parabólicas, nas expressões 3 e 4.

$$P_{s1}(x) = -1.10^{-9}x^2 + 9.10^{-7}x + 5.10^{-6} \quad (3)$$

$$P_{s2}(x) = -2.10^{-9}x^2 + 1.10^{-6}x + 8.10^{-6} \quad (4)$$

## 4. Conclusões

As diferenças nos valores de pressão final, obtidos na curvas dos métodos do coeficiente angular (AC) e de monte carlo (MMC), podem ser devido a malha (AC) ser insuficiente precisa. Com isso, estes dados devem ser comparados com os valores obtidos experimentalmente e por método analítico.

## 5. Referências

- [1] F. T. Degasperi. Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistemas de vácuo. 2006. 364 p. Tese (doutorado) - UNICAMP, Campinas, SP.
- [2] R. Kersevan. Analytical and numerical tools for vacuum systems. 2007.

## Agradecimentos

Ao CNPq pelo fomento da bolsa PIBIC.

<sup>1</sup> Aluno de IC da FATEC-SP (CNPq-PIBIC)



**ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A TUBULAR HIGH VACUUM SYSTEM**

Francisco Tadeu Degasperri, Regina Maria Ricotta\* and Vinicius Carvalho de Moraes

*Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC SP – CEETEPS*

**1. Introduction**

In high vacuum systems whose vacuum chambers are formed by predominantly tubular geometry, the determination of the pressure field along the entire structure of the vacuum chamber is essential for the proper realization of the project. Particle accelerators, elementary particle storage rings and electronic microscopes are examples where this type of arrangement occurs. This work presents the construction of a tubular system for which direct experimental measurement of the pressure field can be made along the structure. The main objective of the work is to verify the results obtained by modeling this tubular system, [1] and the results obtained through the Monte Carlo Method, using the Molflow simulation program, [2].

**2. Modeling, Simulation and Experimental Analysis**

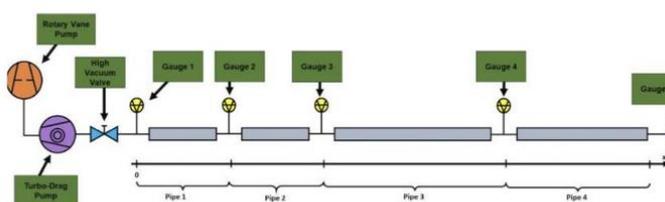
Figure 1 and Figure 2 show the scheme of the high vacuum system that consists of four cylindrical tubes of length  $l$  and diameter  $D$  in series, connected to pumps of vacuum on the left side and gauges along the tubes. The modeling performed assumes that the transport of gases occurs in the molecular gas transport regime (free particles) and that it can be considered a diffusive phenomenon, [1], with  $l > 5D$ . The general differential equation of the diffusive process for obtaining the pressure field in the steady state is given by

$$c(x) \frac{d^2 p(x)}{dx^2} + \frac{dc(x)}{dx} \frac{dp(x)}{dx} = -q(x) \tag{1}$$

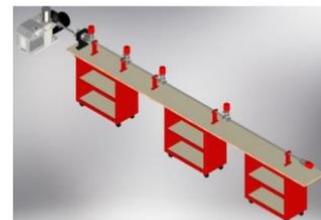
where  $c(x)$  is the specific conductance and  $q(x)$  is the function that represents the gas sources present in the system. The general solution of equation (1) is

$$p(x) = -\frac{q}{2c} \cdot x^2 + A \cdot x + B$$

valid to the whole tube unit. The constants A and B are solved by applying the appropriate boundary conditions at the ends of the tube. The pressure field along the tube increases parabolically and is maximum at the right end. The simulation was performed using the Monte Carlo Method with the Molflow program, [2].



**Fig. 1.** Scheme of the high vacuum system.



**Fig. 2.** Experimental design.

**3. Results and Discussions**

The analytic result for the pressure field of the composition has been evaluated and the boundary conditions have been applied. The simulation results agree with the analytical result, showing that the behavior is typical of pumped vacuum systems and must be considered in all high vacuum tube system designs to achieve the expected performance results. Work with the measurements is in progress.

**4. References**

- [1] F. T. Degasperri, R. M. Ricotta, Vacuum, 188C, p. 1-30, (2021).
- [2] R. Kersevan, J.-L. Pons, J. Vac. Sci. Technol. A 27, 1017 (2009).
- [3] F. T. Degasperri, R. M. Ricotta, Braz. J. Phys. 53 (2023) 44.



**CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO  
NA INDÚSTRIA E CIÊNCIA**

Campos do Jordão – SP | 25 – 29 de Novembro de 2023

**NUMERICAL MODELING OF A RESONANT CAVITY LINEAR ACCELERATOR USING MONTE CARLO METHOD**

Vinicius Carvalho Morais<sup>1</sup>, Henrique Chaves Gulino<sup>2</sup>, Francisco Tadeu Degasperi<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> *Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV – Faculdade de Tecnologia de São Paulo - CEETEPS*

### 1. Introduction

Understanding and comprehending the interaction and limitations imposed by residual gases present in the atmosphere of an accelerator structure on charged beams allows for the avoidance of undesirable events such as deceleration and particle loss [1]. The use of vacuum system modeling makes events more predictable and ensures that these types of systems are operated correctly. In this work, computational modeling was employed using the Molflow+ tool (Monte Carlo), developed by CERN, to study the pressure field along a linear accelerator structure with resonant cavities, enabling the determination of pressure values for each position in the vacuum system.

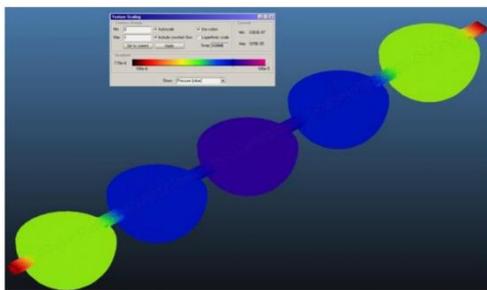
### 2. Experimental

The vacuum system structure was based on five resonant cavities, each formed by a spherical geometry with a radius of 100 mm and cylindrical tubes with a radius of 15 mm and a length of 40 mm. The total length (between each end) is 1240 mm, with a sticking factor equal to 1 at both ends. This sticking factor is a parameter used to simulate the vacuum pump by considering the probability of particles colliding with the surface (in this case, the ends of the system) being absorbed. Stainless steel was used as the material for constructing the resonant cavity linear accelerator, with a degassing rate per unit area of  $q = 5 \cdot 10^{-8}$  mbar.l.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>.

### 3. Results and Discussions

Molflow+ is a Windows program that allows you to calculate the steady-state pressure in an arbitrarily complex geometry when ultra-high vacuum condition is met. The name comes from molecular flow, the condition when the mean free path of molecules is so long compared to the geometry size that collisions can be neglected. In this case, particles fly independently, which makes this physics particularly suitable for Monte Carlo simulations [2].

From the simulation performed in Molflow+, using the parameters described in the previous section, the final pressure values were obtained for each position in the vacuum system. Figure 1 demonstrates the pressure values for each point on the system's surface, characterized by a gradient that shows a color for each pressure value. In Figure 2, a pressure field graph along an axis starting from one end and ending at the other end was obtained.



**Fig. 1.** Pressure Field System with Resonant Cavities During Monte Carlo Simulation.



**Fig. 2.** Pressure Field as a Function of Position along the Axis between One End and the Other of the Resonant Cavity Vacuum System.

### 4. References (boldface Times New Roman 11 pt)

- [1] MALYSHEV, Oleg. Vacuum in particle Accelerators. WILEY-VCH, 2020.
- [2] ADY, Márton; KERSEVAN, Roberto. MolFlow+ user guide. CERN, 2014.

### Acknowledgments

To CNPq for the PIBIC scholarship.

Fonte: O autor.

## MODELAGEM ANALITICO-NUMERICA- EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ALTO-VÁCUO TUBULAR

Vinícius Carvalho Moraes<sup>1</sup>, Francisco Tadeu Degasperi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV, Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP  
vinicius.morais9@fatec.sp.gov.br e ftd@fatecsp.br

### 1. Introdução

Os sistemas tubulares estão presentes em grande parte dos sistemas de vácuo, principalmente em linhas de bombeamento. Utilizando a formulação contínua é possível obter os valores de pressão que se distribuem em cada ponto do espaço de um sistema, na câmara de vácuo, linha de bombeamento e bomba de vácuo, sendo necessário identificar e definir as fontes de gases e vapores e as condutâncias em cada ponto do sistema [1].

A proposta deste trabalho é de determinar a taxa de desgaseificação ( $Q_{Deg}$ ) de um sistema tubular de aço austenítico 304L utilizando métodos analítico-numéricos (Equação Diferencial Parcial), computacionais (Monte Carlo) e experimentais.

### 2. Metodologia e Materiais

Em pressões abaixo de  $10^{-3}$  mbar a fonte gasosa predominante em um sistema de vácuo é a desgaseificação, que tem origem da dessorção de gases e vapores. A taxa de desgaseificação está relacionada com o estado de limpeza e a classe do material que está sendo desgaseificado, como mostra as expressões 1 (10 horas de exposição ao vácuo) e 2 (a partir da 11ª hora).

$$q_{Deg}^{\alpha}(t) = q_0^{Inicial} \frac{1}{t^{\alpha}} \quad (1)$$

$$q_{Deg}^{\alpha}(t_c) = q_0^b \quad (2)$$

$$q_{Deg}^b(t) = q_0^b \exp[-\beta(t - t_c)]$$

A Figura 1 apresenta o sistema de vácuo utilizado neste estudo, composto por quatro tubos de aço inoxidável austenítico 304 L, totalizando um comprimento de 3,5 metros e diâmetro de aproximadamente 1,6 centímetros (modelo ISO KF 16). Todos os tubos e componentes expostos ao vácuo foram submetidos as mesmas etapas de limpeza, de modo a uniformizar o processo, em que foi utilizado detergentes alcalino e neutro, água (para enxágue) e álcool isopropílico.

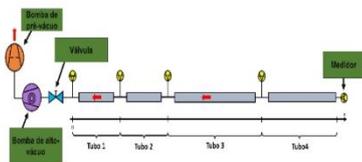


Figura 1 - Sistema Tubular.

Como forma de minimizar e evitar que possíveis fontes de gases de contaminar o sistema, limitar a pressão final do sistema abaixo do esperado e prejudicar os dados experimentais foi adotado o método de limpeza com solventes, descrito anteriormente, que é mostrado passo-a-passo na Figura 2. Além de polir conexões com superfícies riscadas, para evitar que haja vazamentos reais, ou seja, a entrada de gases da atmosfera que resulta em um valor pressão diferente, do que esperado teoricamente e por simulação, conforme a condutância do risco. Com o término da limpeza e polimento, as conexões devem embaladas com papel alumínio, pois ele permite que vapores formados após o processo de limpeza sejam liberados e evita que gases da atmosfera contaminem a parede do componente.



Figura 2 – Etapas de limpeza dos componentes sistema tubular. 1- Detergente alcalino; 2- Enxágue; 3- Detergente neutro; 4- Enxágue; 5- Álcool isopropílico; 6- Embalagem.

No alto-vácuo as partículas têm um livre caminho médio muito grande, resultando em colisões mais frequentes com as superfícies das paredes do que entre si, sendo este o regime molecular. Em geral, os problemas relacionados a este regime podem ser resolvidos utilizando equações diferenciais parciais, sendo solucionadas de forma algébrica ou numérica [1].

Uma das grandes vantagens de utilizar métodos numéricos como solução de um sistema de vácuo, no regime molecular, é a utilização de métodos computacionais. Como é o caso do método de Monte Carlo (MMC), que soluciona fórmulas da teoria cinética dos gases sem simplificações [2], como nos simuladores molflow (CERN) e o COMSOL Multiphysics, com a ferramenta fmf (free molecular flow).

Quando simulado, o sistema tubular, nos softwares COMSOL Multiphysics e molflow cada ponto do espaço tem um determinado valor de pressão e é dado a partir de um gradiente de cores, como na Figura 3 que mostra o gradiente obtido em cada um dos softwares, discutido anteriormente, que indica o valor de pressão para cada

<sup>1</sup> Aluno de IC da FATEC-SP (CNPq-PIBIC)

Figura 174: Resumo apresentado no V Simpósio de Iniciação Científica Tecnológica CPS/CPS.

ponto de espaço e pode ser interpretado a partir de uma tabela de cores fornecida pelos simuladores.

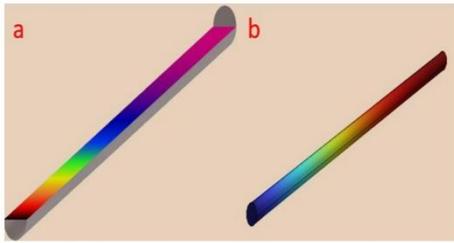


Figura 3: Simulações computacionais. a - Molflow; b - Comsol Multiphysics.

Para a coleta dos dados experimentais foi adotado que entre os tubos fossem encaixadas conexões T para o posicionamento dos medidores de alto-vácuo, sendo utilizado dois medidores penning, um modelo AIM-S-NW 25 e um modelo CP-25-S, da Edwards. Além disso foram instaladas uma bomba mecânica de palhetas (pré-vácuo), modelo TRIVAC D8-A da Leybold, e uma bomba Turbo-Drag, modelo MDP 5011 da Adixen, um filtro, para evitar que haja contaminação do sistema pelo óleo da bomba de pré-vácuo, e um válvula de membrana para isolamento do sistema, permitindo realizar testes de vazamento. Foram fabricados, pelo método de usinagem, quatro tubos de aço inoxidável 304 L, sendo dois com 52,2 cm, um com 100,2 cm e outro 122 cm de comprimento, tendo todos diâmetro interno de aproximadamente 1,6 cm. No sistema abaixo, Figura 4, foi acoplado uma conexão T com um medidor Penning para ser utilizado como valor de pressão de referência para testar o vazamento real nos tubos.

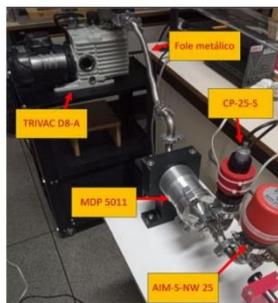


Figura 4 - Sistema Experimental para coleta da pressão de referência

### 3. Resultados

O gráfico da Figura 5 apresenta a distribuição dos valores de pressão para cada posição do eixo x do sistema tubular, modelado nos softwares Molflow e COMSOL Multiphysics. A curva mostra os valores de pressão final após o sistema alcançar o estado estacionário (pressão não varia com o tempo).

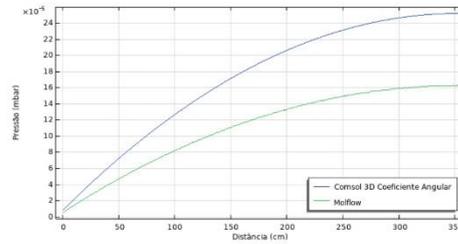


Figura 5 - Campo de pressão em função da posição (x) do Sistema tubular.

As respectivas soluções obtidos nos softwares molflow e COMSOL são dadas pelas funções parabólicas, nas expressões 3 e 4.

$$P_{s1}(x) = -1 \cdot 10^{-9}x^2 + 9 \cdot 10^{-7}x + 5 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

$$P_{s2}(x) = -2 \cdot 10^{-9}x^2 + 1 \cdot 10^{-6}x + 8 \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

Durante a medição dos valores pressão final, para teste de vazamento, foram identifica dos vazamentos reais acentuados nas regiões das soldas o que impediu que a pressão final, na extremidade de do tubo, alcançasse o valor superior ao fundo de escala do medidor Penning AIM-S-NW 25, sendo valores superiores à  $10^{-3}$  mbar.

### 4. Conclusões

As diferenças nos valores de pressão final, obtidos na curvas dos métodos do coeficiente angular (AC) e de Monte Carlo (MMC), podem ser devido a malha (AC) ser insuficiente precisa.

Há a hipótese de que o vazamento real tenha sido provocado durante o processo de fabricação, principalmente devido à solda de má qualidade. Estes tubos não estão adequados para determinar o campo de pressão experimentalmente. Tomando-se necessário fabricar novos tubos, que deverão passar por processos de fabricação uniformes e com soldagem de boa qualidade, é recomendado que seja utilizado o processo de soldagem TIG ou a laser. Com isso, o campo de pressão poderá ser comparado com os valores obtidos por método de Monte Carlo e de coeficiente angular.

### 5. Referências

- [1] F. T. Degasperri. Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistemas de vácuo. 2005. 364 p. Tese (doutorado) – UNICAMP, Campinas, SP.
- [2] R. Kersevan. Analytical and numerical tools for vacuum systems. 2007.

### Agradecimentos

Ao CNPq pelo fomento da bolsa PIBIC.

<sup>1</sup> Aluno de IC da FATEC-SP (CNPq-PIBIC)

Figura 175: Resumo apresentado no Encontro de Outono 2024 da SBF.

## **PRESSURE FIELD OF VACUUM SYSTEMS WITH RESONANT CAVITIES**

Henrique Chaves Gulino<sup>1</sup>, Vinicius Carvalho Morais<sup>2</sup> and \*Francisco Tadeu Degasperi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Laboratório de Sistemas Integráveis, Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil*

<sup>1,2,3</sup>*Laboratório de Tecnologia do Vácuo, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, CEETEPS, São Paulo, Brazil*

<sup>3</sup>*Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – CEETEPS, São Paulo, Brazil*

Accelerator structures play a crucial role in industry, science and technology, particularly in operations that require a significant amount of electromagnetic energy. A notable example is the use of ion implanters in the semiconductor industry, as well as accelerators employed in radiotherapy equipment for cancer treatment. The efficiency of these accelerators is directly impacted by pressure distribution, as particles can collide with each other, resulting in energy loss (deceleration) and even altering the trajectory of accelerated particles. It is essential to emphasize that vacuum systems for such applications must be meticulously designed to minimize collisions between particles and ensure that these events are rare in the vacuum environment. These systems operate in the high vacuum or ultra-high vacuum ranges, depending on the nature of the application. In this pressure range, particles follow completely random trajectories, increasing the probability of collisions with the walls rather than with each other. This phenomenon characterizes the molecular transport gas regime (Knudsen number -  $K_N \geq 1$ ). The present work aims to analytically and numerically model, conduct a detailed analysis, and propose an efficient approach for constructing a vacuum system incorporating resonant cavities. The design of the gas pumping system must be carried out considering the pressure field along the accelerator structure, which can be obtained through the analysis carried out in this work. In this way, the quantity of vacuum pumps and pumping speeds can be determined.

Fonte: O autor.

### **APÊNDICE 3: Patentes submetidas durante o período de graduação.**

Nesta seção são apresentadas as solicitações de patentes realizadas durante o período de graduação, no total foram 2 patentes solicitadas no Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Abaixo, são apresentadas as solicitações com seus respectivos títulos e números do processo.

1 - GULINO, H. C.; MORAIS, V. C.; DEGASPERI, F. T. MOVIMENTADOR MAGNÉTICO COM CONSTRUÇÃO EM IMPRESSORA 3D – POLÍMERO OU META. 2024, Brasil. Patente: Modelo de Utilidade. Número do processo: BR 20 2024 000557 6, título “MOVIMENTADOR MAGNÉTICO COM CONSTRUÇÃO EM IMPRESSORA 3D – POLÍMERO OU META”, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 10/01/2024.

2 - DEGASPERI, F. T.; Morais, V. C.; BARON, L. Z. DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE LÂMPADAS ESPECIAIS E QUALQUER OUTRO PROCESSO QUE NECESSITE DE TRANSPORTE DE CARGA. 2024, Brasil. Patente: Modelo de Utilidade. Número do processo: BR 10 2024 001733 1, título “DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE LÂMPADAS ESPECIAIS E QUALQUER OUTRO PROCESSO QUE NECESSITE DE TRANSPORTE DE CARGA”, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 26/01/2024.

Figura 176: Solicitação da patente MOVIMENTADOR MAGNÉTICO COM CONSTRUÇÃO EM IMPRESSORA 3D.

**Dados do Pedido**

---

**Natureza Patente:** 20 - Modelo de Utilidade (MU)

**Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):** MOVIMENTADOR MAGNÉTICO COM CONSTRUÇÃO EM IMPRESSORA 3D – POLÍMERO OU METAL

**Resumo:** A presente invenção trata-se de um movimentador magnético, obtido pelas técnicas de manufatura aditiva (impressão 3D). Capaz de movimentar amostras em ambiente de vácuo ( $p < P_{atm}$ ), pressão atmosférica, pressões acima da atmosférica ( $p > P_{atm}$ ) e ambientes que contenham a presença de fluídos líquidos. Por meio da relação entre os campos magnéticos gerados por ímãs, o movimentador (peça interna, tubo e peça externa), permitirá o transporte preciso de movimento axial, radial ou ambos de um ponto a outro no sistema. O conjunto do movimentador, como um todo, consiste em três partes principais. Sendo elas: (A) Peça impulsionada (peça interna), (B) tubo (que separa e isola a peça externa, a peça impulsionadora e a peça interna, a peça a ser impulsionada) e (C) peça impulsionadora (peça externa). O conjunto de peças (A) e (C), podem ser fabricadas em qualquer material de manufatura aditiva, seguido por qualquer geometria. Ressaltando, o item (C) poderá apenas, ser construído com material não ferromagnético.

**Figura a publicar:** 3

---

**PETICIONAMENTO  
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em 10/01/2024 às 21:28, Petição 870240002750

Figura 177: Solicitação da patente DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE LÂMPADAS ESPECIAIS.

**Dados do Pedido**

---

**Natureza Patente:** 10 - Patente de Invenção (PI)

**Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):** DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE LÂMPADAS ESPECIAIS E QUALQUER OUTRO PROCESSO QUE NECESSITE DE TRANSPORTE DE CARGA

**Resumo:** A presente invenção refere-se a um movimentador magnético projetado para transportar cargas de substâncias voltadas para a fabricação de lâmpadas especiais ultravioleta, podendo ser usada esta invenção para outros tipos de situações que dependam do carregamento de materiais. Este dispositivo é adaptado para operar em ambientes de vácuo ( $p < P_{atm}$ ), pressão atmosférica, pressões acima da atmosférica ( $p > P_{atm}$ ) e em presença de fluidos líquidos. O movimentador utiliza a interação entre campos magnéticos gerados por ímãs das peça impulsora (peça externa ao tubo) e peça impulsora (peça interna ao tubo), permitindo um transporte preciso com movimento axial, radial ou ambos, de um ponto a outro e torque no sistema. O conjunto do movimentador é composto por três partes principais: (A) Peça impulsora (peça interna), (B) Tubo (que separa e isola a peça externa, a peça impulsora e a peça interna, a ser impulsora) e (C) Peça impulsora (peça externa), que é por onde o dispositivo é manipulado. As peças A (Peça impulsora) e C (Peça impulsora) podem ser fabricadas em qualquer material de manufatura aditiva, fusão, torneamento e fresamento (desde que se adequem à taxa de desgaseificação para a produção das lâmpadas), com a flexibilidade de adotar diferentes geometrias. Vale destacar que a peça B (tubo) deve ser construída exclusivamente com material não ferromagnético. Esta inovação oferece uma solução versátil e eficiente para o transporte controlado de cargas em ambientes diversos, ampliando as possibilidades na produção de lâmpadas ultravioletas e quaisquer outros processos que exijam o transporte controlado de cargas. Sendo enfatizado, que para o carregamento de cargas, não há necessidade de quebrar o vácuo ou qualquer que seja o ambiente isolado ao meio externo.

**Figura a publicar:** 5

---

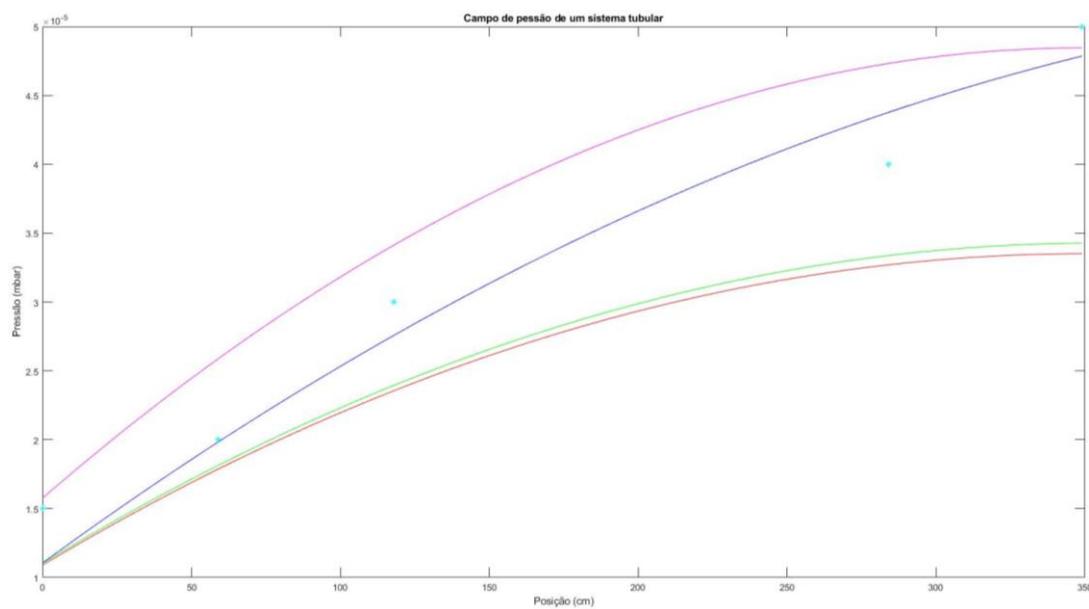
**PETICIONAMENTO  
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em 26/01/2024 às 22:01, Petição 870240007495

## APÊNDICE 4: CÓDIGO MATLAB UTILIZADO PARA PLOTAR OS GRÁFICOS ANALÍTICO, NUMÉRICO, EXPERIMENTAL.

```
%Definição da malha
x = linspace(0, 349, 3490);
%Definição dos pontos experimentais
y= [0, 59, 118, 284,349];
z= [1.5e-5, 2e-5, 3e-5, 4e-5, 5e-5];
% Definição das funções do campo de pressão do sistema tubular
Ps1 = -1.94e-10 * x.^2 + 1.40e-7 * x + 1.17e-5;           % Molflow
Ps2 = -2.90e-10 * x.^2 + 2.02e-7 * x + 1.49e-5;           % Comsol
Ps3 = -2.00e-10 * x.^2 + 1.40e-7 * x + 1.19e-5;           % Analítico
Ps4 = -2.09e-10 * x.^2 + 1.62e-7 * x + 1.46e-5;           % Experimental
% Plotagem do campo de pressão do sistema tubular;
plot(x, Ps1, 'r-', x, Ps2, 'm-', x, Ps3, 'g-', x, Ps4, 'b-', y, z, 'c*')
% Título do gráfico;
title ('Campo de pressão de um sistema tubular')
%Definição de nome de cada eixo
xlabel ('Posição (cm)')
ylabel ('Pressão (mbar)')
%Pressões mínimas e máximas obtidas no sistema tubular com base na curva teórica
%Molflow
Ps1min = min(Ps1);
Ps1max = max(Ps1);
%Comsol
Ps2min = min(Ps2);
Ps2max = max(Ps2);
%Analítico
Ps3min = min(Ps3);
Ps3max = max(Ps3);
%Experimental
Ps4min = min(Ps4);
Ps4max = max(Ps4);
%Conversão do arquivo matlab em uma tabela lida no excel
xlswrite ('Campo de pressão.xlsx', x, 1, 'A2:A3491')
xlswrite ('Campo de pressão.xlsx', Ps1, 1, 'B2:B3491')
xlswrite ('Campo de pressão.xlsx', Ps2, 1, 'C2:C3491')
xlswrite ('Campo de pressão.xlsx', Ps3, 1, 'D2:D3491')
xlswrite ('Campo de pressão.xlsx', Ps4, 1, 'E2:E3491')
```

Figura 178: Gráfico analítico, numérico e experimental do sistema tubular.



Fonte: O autor.

## **APÊNDICE 5: DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULOS UTILIZADOS NO PROJETO DE UM SISTEMA TUBULAR DE ALTO-VÁCUO**

### **DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS**

Comprimento dos tubos

$$L_{T1}=55,1 \text{ cm}$$

$$L_{T2}=55,2 \text{ cm}$$

$$L_{T3}=103,1 \text{ cm}$$

$$L_{T4}=125 \text{ cm}$$

Diâmetro dos tubos

$$D_1 = 1,57 \text{ cm}$$

$$D_2 = 1,6 \text{ cm}$$

$$D_3 = 1,56 \text{ cm}$$

$$D_4 = 1,6 \text{ cm}$$

Pressão no ponto de referência

$$P_o = 2.10^{-6} \text{ mbar}$$

Comprimento do sistema tubular

$$L = 349 \text{ cm}$$

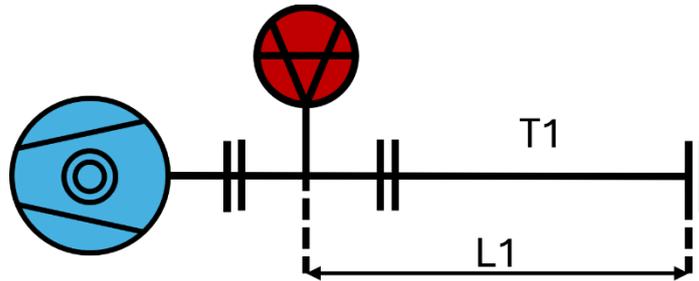
Velocidade de bombeamento da MDP 5011

$$S_{BV} = 7,5 \text{ L.s}^{-1}$$

### **OBTENÇÃO DA TAXA DE DESGASEIFICAÇÃO DOS TUBOS**

**TUBO 1**

Figura 179: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 1.



Fonte: O autor.

Condutância do orifício:

$$C_{or1} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot 1,57^2}{4} = 22,46L \cdot s^{-1}$$

Condutância do tubo:

$$C_{T1} = 12 \cdot \frac{D_1^3}{L_1} = 12 \cdot \frac{1,57^3}{55,1} = 0,84L \cdot s^{-1}$$

Condutância Total:

$$\frac{1}{C_{T1}} = \frac{1}{22,46} + \frac{1}{0,84} \Leftrightarrow C_{T1} = 0,81L \cdot s^{-1}$$

Velocidade efetiva:

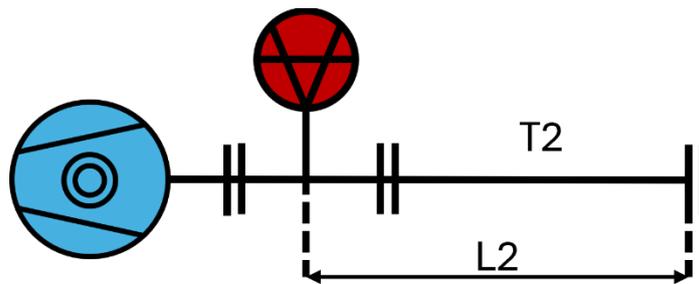
$$S_{ef1} = \frac{S_{BV} \cdot C_{T1}}{S_{BV} + C_{T1}} = \frac{7,5 \cdot 0,81}{7,5 + 0,81} = 0,73 \cdot s^{-1}$$

Taxa de desgaseificação do tubo T<sub>1</sub>:

$$q_{s1} = \frac{S_{ef1} \cdot P_o}{L_1} = \frac{0,73 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{55,1} = 2,66 \cdot 10^{-8} \text{ mbar} \cdot L \cdot s^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

## TUBO 2

Figura 180: Arranjo para obtenção da taxa de degaseificação do tubo 2.



Fonte: O autor.

Condutância do orifício

$$C_{or2} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot 1,6^2}{4} = 23,32 L \cdot s^{-1}$$

Condutância do tubo T<sub>2</sub>:

$$C_{T2} = 12 \cdot \frac{D_2^3}{L_2} = 12 \cdot \frac{1,6^3}{55,2} = 0,89 L \cdot s^{-1}$$

Condutância Total:

$$\frac{1}{C_{T2}} = \frac{1}{0,89} + \frac{1}{23,32} \Leftrightarrow C_{T2} = 0,86 L \cdot s^{-1}$$

Velocidade efetiva:

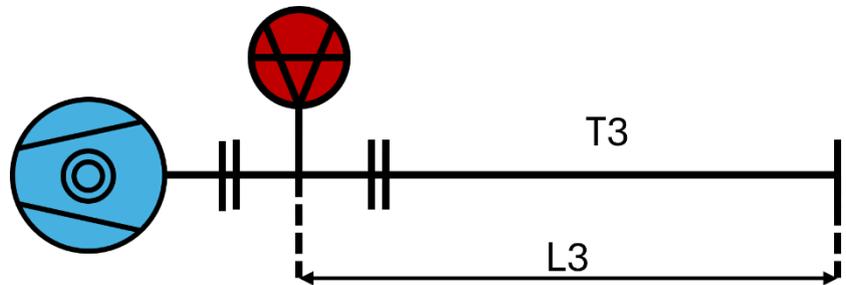
$$S_{ef2} = \frac{S_{BV} \cdot C_{T2}}{S_{BV} + C_{T2}} = \frac{7,5 \cdot 0,86}{7,5 + 0,86} = 0,77L \cdot s^{-1}$$

Taxa de desgaseificação do tubo T<sub>2</sub>:

$$q_{s2} = \frac{S_{ef2} \cdot P_o}{L_2} = \frac{0,77 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{55,2} = 2,79 \cdot 10^{-8} mbar \cdot L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1}$$

### TUBO 3

Figura 181: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 3.



Fonte: O autor.

Condutância do orifício

$$C_{orT3} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot D_3^2}{4} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot 1,56^2}{4} = 22,17L \cdot s^{-1}$$

Condutância do tubo T<sub>3</sub>:

$$C_{T1} = 12 \cdot \frac{D_3^3}{L_3} = 12 \cdot \frac{1,56^3}{103,1} = 0,44L \cdot s^{-1}$$

Condutância Total:

$$\frac{1}{C_{T3}} = \frac{1}{22,17} + \frac{1}{0,44} \Leftrightarrow C_{T3} = 0,43L \cdot s^{-1}$$

Velocidade efetiva:

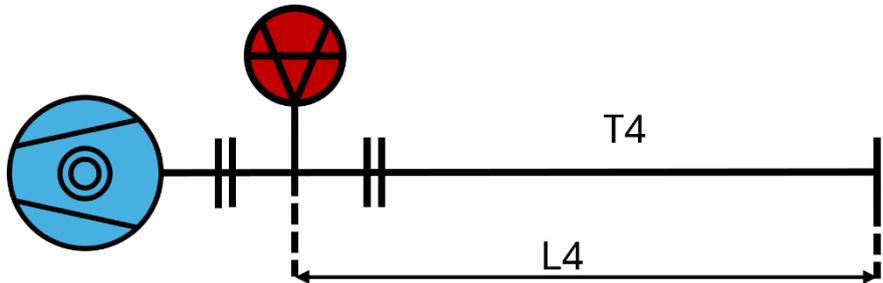
$$S_{ef3} = \frac{S_{BV} \cdot C_{T3}}{S_{BV} + C_{T3}} = \frac{7,5 \cdot 0,43}{7,5 + 0,43} = 0,41L \cdot s^{-1}$$

Taxa de desgaseificação do tubo T3:

$$q_{s3} = \frac{S_{ef3} \cdot P_0}{L_3} = \frac{0,41 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{103,1} = 7,94 \cdot 10^{-9} mbar \cdot L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1}$$

## TUBO 4

Figura 182: Arranjo para obtenção da taxa de desgaseificação do tubo 4.



Fonte: O autor.

Condutância do orifício

$$C_{orT4} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot D_4^2}{4} = \frac{11,6 \cdot \pi \cdot 1,6^2}{4} = 23,32L \cdot s^{-1}$$

Condutância do tubo T4:

$$C_{T4} = 12 \cdot \frac{D_4^3}{L_4} = 12 \cdot \frac{1,6^3}{125} = 0,39L \cdot s^{-1}$$

Condutância Total:

$$\frac{1}{C_{T4}} = \frac{1}{23,32} + \frac{1}{0,39} \Leftrightarrow C_{T4} = 0,39L \cdot s^{-1}$$

Velocidade efetiva:

$$S_{ef4} = \frac{S_{BV} \cdot C_{T4}}{S_{BV} + C_{T4}} = \frac{7,5 \cdot 0,39}{7,5 + 0,39} = 0,37L \cdot s^{-1}$$

Taxa de desgaseificação do tubo T<sub>4</sub>:

$$q_{s4} = \frac{S_{ef4} \cdot P_o}{L_4} = \frac{0,37 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{125} = 5,88 \cdot 10^{-9} mbar \cdot L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1}$$

## SISTEMA TUBULAR

Taxa de desgaseificação do sistema tubular:

$$\begin{aligned} q_{sTotal} &= \frac{2,66 \cdot 10^{-8} + 2,79 \cdot 10^{-8} + 7,94 \cdot 10^{-9} + 5,88 \cdot 10^{-9}}{4} \\ &= 1,71 \cdot 10^{-8} mbar \cdot L \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \end{aligned}$$

Taxa de desgaseificação específica do sistema tubular

$$q_A = \frac{1,71 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 1,53} = 3,56 \cdot 10^{-9} \text{mbar} \cdot L \cdot s^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$$

### **CAMPO DE PRESSÃO DO SISTEMA TUBULAR**

Velocidade efetiva do sistema tubular:

$$S_{ef} = \frac{0,7 + 0,7 + 0,4 + 0,3}{4} = 0,5 L \cdot s^{-1}$$

Condutância específica

$$c = 12 \cdot \bar{D}^3 = 12 \cdot 1,53^3 = 42,66 L \cdot \text{cm} \cdot s^{-1}$$

Função do campo de pressão

$$p(x) = -\frac{1,71 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 42,66} x^2 + \frac{1,71 \cdot 10^{-8} \cdot 349}{42,66} x + \frac{1,71 \cdot 10^{-8} \cdot 349}{0,5}$$

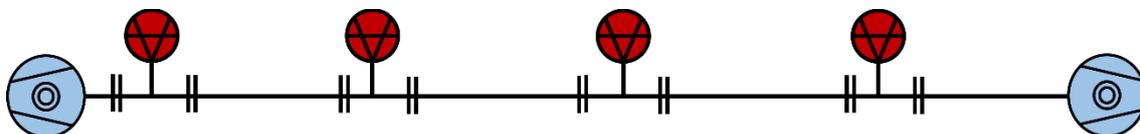
$$p(x) = -2,00 \cdot 10^{-10} x^2 + 1,40 \cdot 10^{-7} x + 1,19 \cdot 10^{-5}$$

## APÊNDICE 6: PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentados algumas de trabalho que visam a continuidade do atual projeto de um sistema tubular de alto-vácuo, mas também atribuindo alguns trabalhos de continuidade aos trabalhos apresentados em forma de resumo ao decorrer do período de graduação. Nestes exemplos o stick factor é dado como um, porém pode futuramente ser adaptado aos problemas em que forem atribuídos.

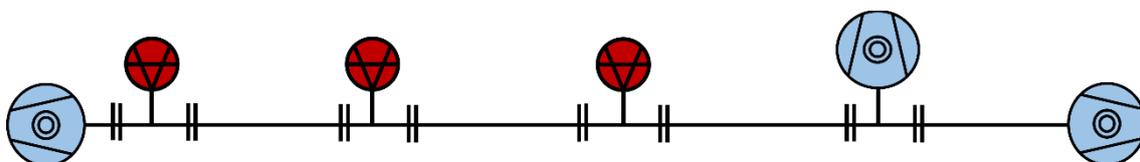
### Sistema tubular cilíndrico

Figura 183: Arranjo 1 do sistema tubular.



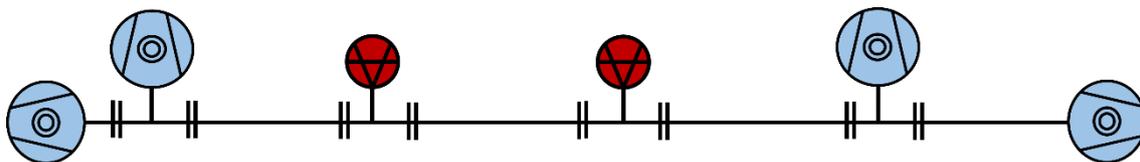
Fonte: O autor.

Figura 184: Arranjo 2 do sistema tubular.



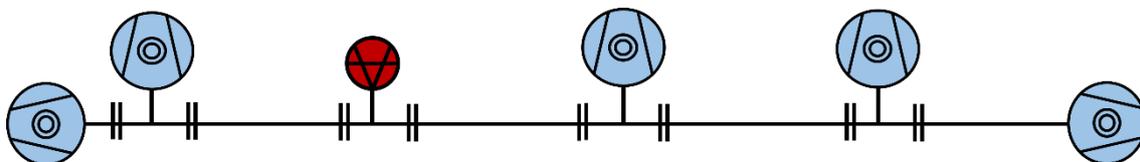
Fonte: O autor.

Figura 185: Arranjo 3 do sistema tubular.



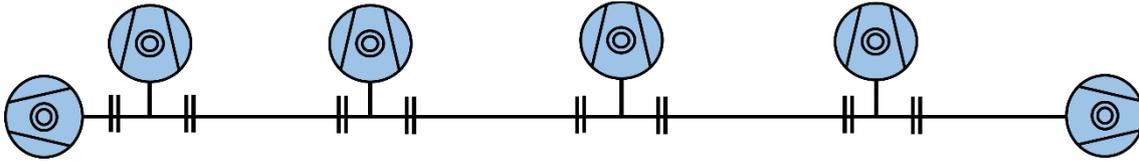
Fonte: O autor.

Figura 186: Arranjo 4 do sistema tubular.



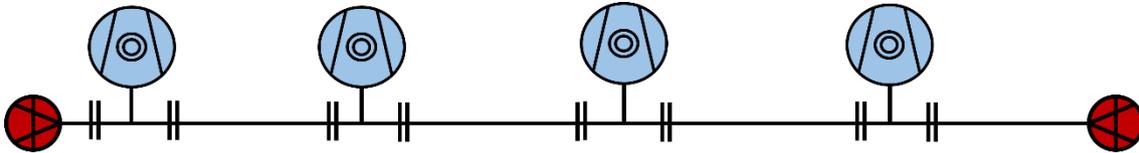
Fonte: O autor.

Figura 187: Arranjo 5 do sistema tubular.



Fonte: O autor.

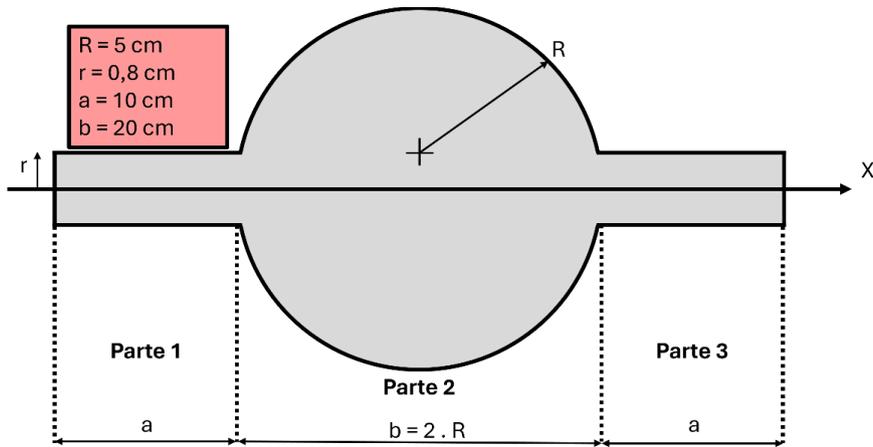
Figura 188: Arranjo 6 do sistema tubular.



Fonte: O autor.

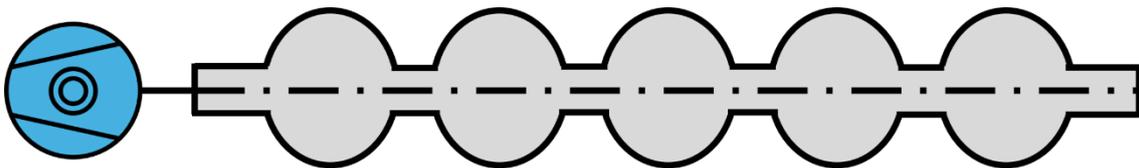
### Sistema tubular com cavidades ressonantes

Figura 189: Medidas das cavidades ressonantes do sistema tubular.



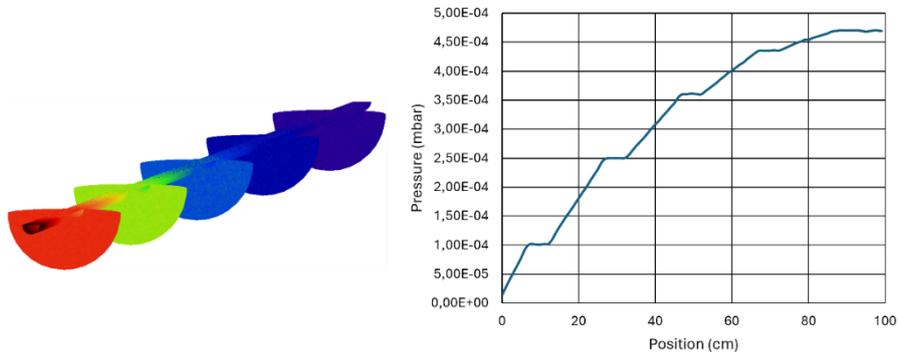
Fonte: O autor.

Figura 190: Arranjo 1 do sistema com cavidades ressonantes.



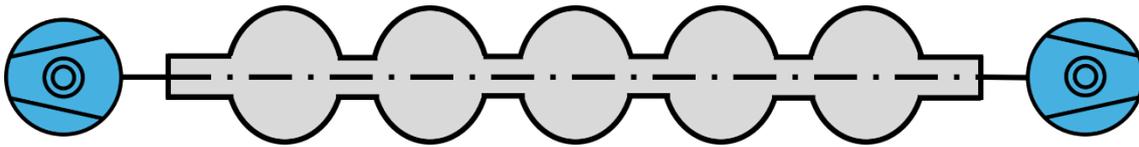
Fonte: O autor.

Figura 191: Campo de pressão obtido do arranjo 1.



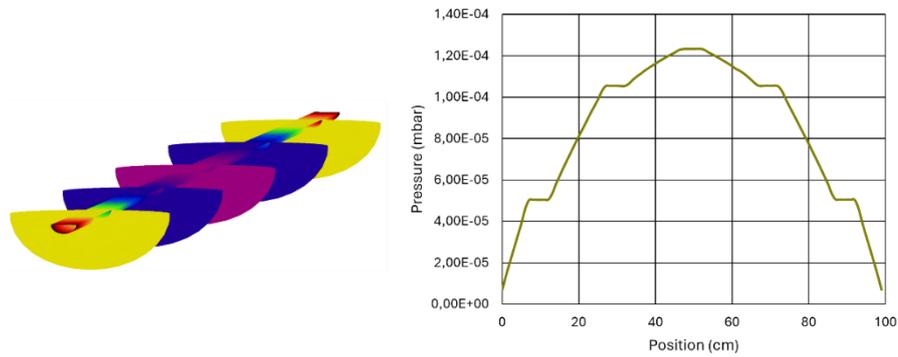
Fonte: O autor.

Figura 192: Arranjo 2 do sistema com cavidades ressonantes.



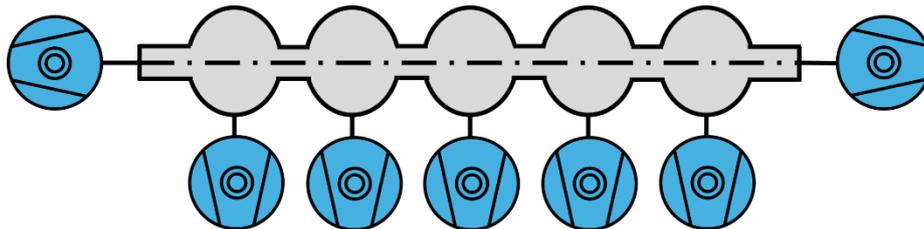
Fonte: O autor.

Figura 193: Campo de pressão obtido do arranjo 2.



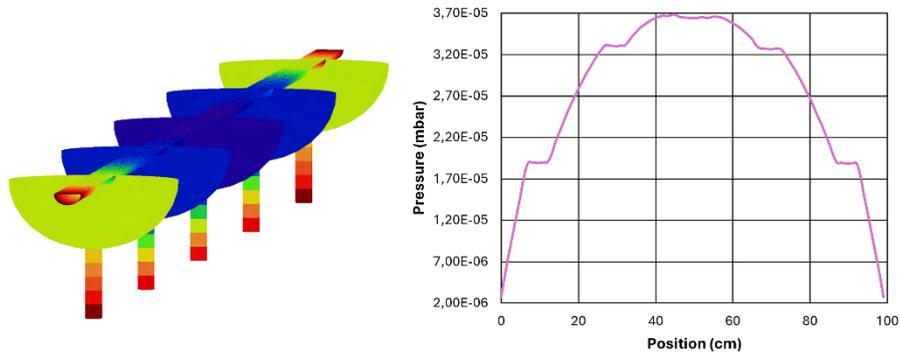
Fonte: O autor.

Figura 194: Arranjo 3 do sistema com cavidades ressonantes.



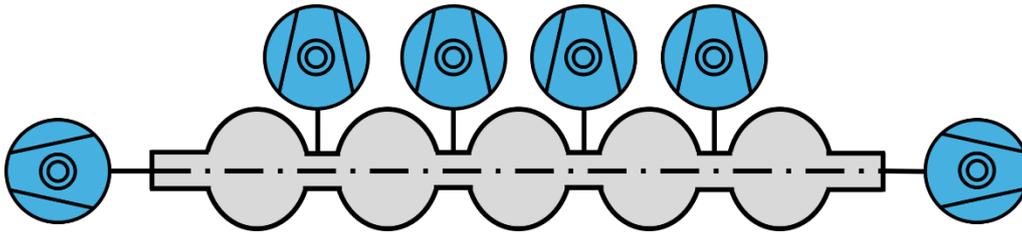
Fonte: O autor.

Figura 195: Campo de pressão obtido do arranjo 3.



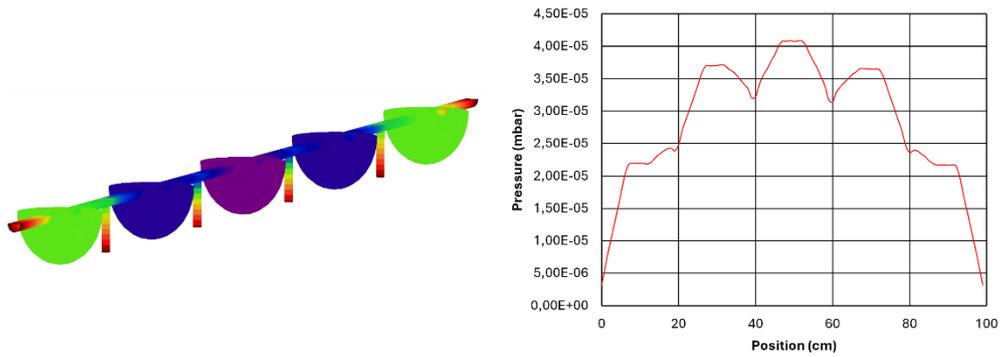
Fonte: O autor.

Figura 196: Arranjo 4 do sistema com cavidades ressonantes.



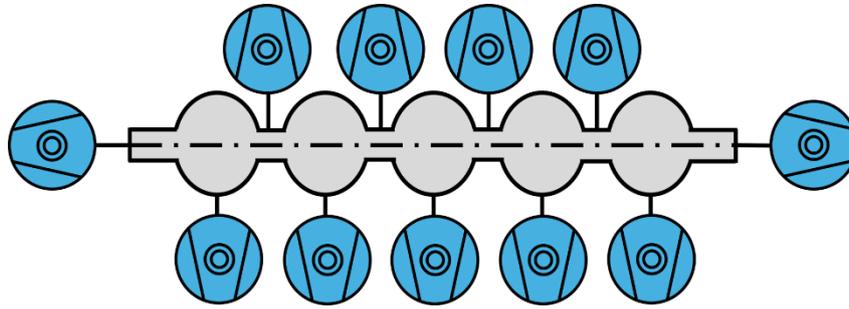
Fonte: O autor.

Figura 197: Campo de pressão obtido do arranjo 4.



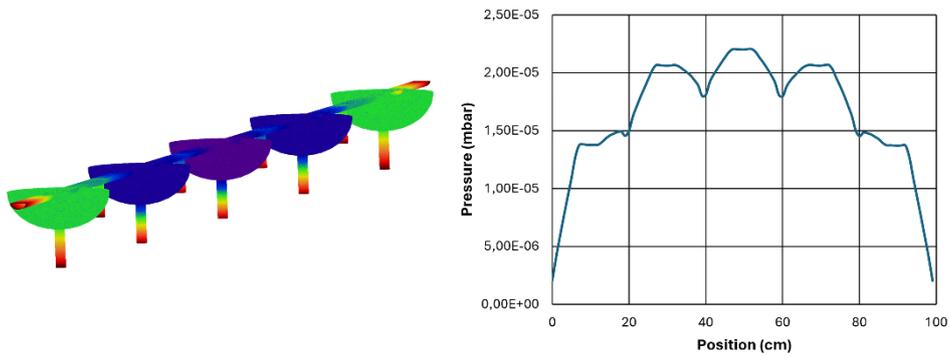
Fonte: O autor.

Figura 198: Arranjo 5 do sistema com cavidades ressonantes.



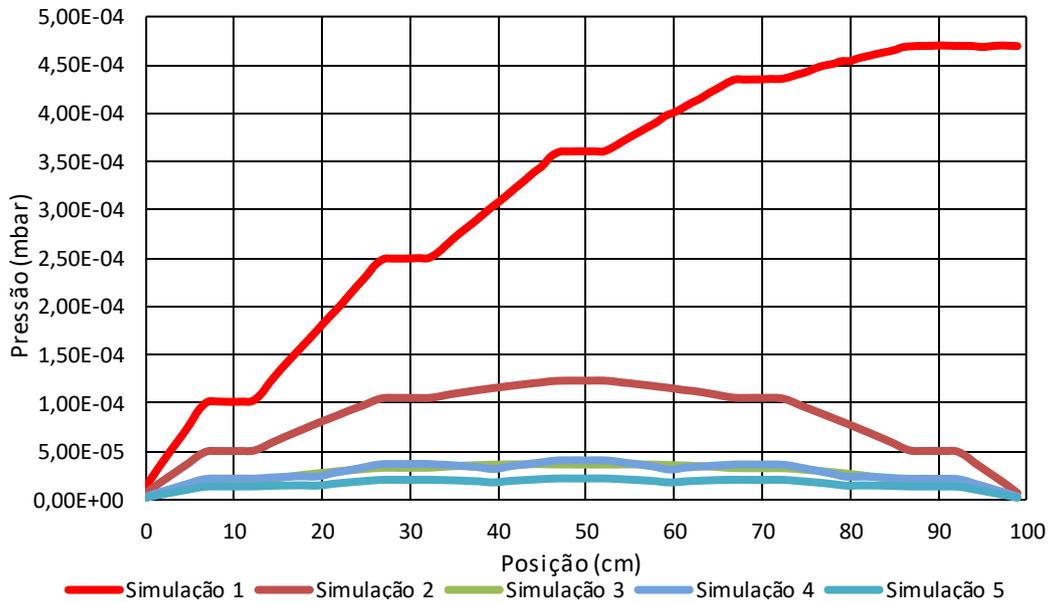
Fonte: O autor.

Figura 199: Campo de pressão obtido do arranjo 5.



Fonte: O autor.

Figura 200: Gráfico comparativo.



Fonte: O autor.