



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y
Fabricación**

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Modelización y análisis funcional del martillo de vapor
patentado por James Nasmyth en 1843**

Máster en ingeniería Industrial

Autor: Felix Tovar Vera

Tutor: Dr. Francisco Javier Trujillo Vilches

Cotutor: Dr. Lorenzo Sevilla Hurtado

MÁLAGA, junio de 2025

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Mater se ha realizado la modelización 3D del primer martillo de vapor automático, patentado y construido por el ingeniero británico James Nasmyth en 1843, aplicando técnicas de ingeniería inversa y el uso de software de diseño asistido por ordenador SolidWorks. Este modelo permite la recuperación, puesta en valor y preservación de esta importante pieza del patrimonio industrial de fabricación, que constituye un testimonio de la evolución en la ingeniería. Además, puede ser utilizado como herramienta docente, mostrando la arquitectura y funcionamiento de una máquina fundamental en la industria de la forja, cuyo principio de funcionamiento aún permanece.

En primer lugar, se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la evolución histórica del martillo, destacando el trascendental impacto del martillo de vapor de Nasmyth en el desarrollo industrial de la forja. A partir de documentos históricos, patentes y literatura de la época, se ha reconstruido digitalmente la máquina, obteniéndose un modelo parametrizado que facilita simulaciones y ajustes futuros. Posteriormente, se han efectuado análisis cinemáticos, simulaciones estáticas y análisis analíticos que han permitido identificar los principales movimientos, esfuerzos y deformaciones, entre otros resultados.

Cabe destacar que este trabajo se enmarca en el Proyecto de Innovación Educativa “Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga”, con referencia PIE22-094. El modelo desarrollado será incorporado a este museo, pudiendo acceder al modelo digital y a la información sobre su funcionamiento haciendo uso de técnicas de realidad virtual y realidad aumentada, entre otras.

Palabras Clave: Patrimonio Industrial, Conformado por deformación, Forja, Martillo de Vapor, Nasmyth, Wilson, modelado 3D, Museo virtual.

Abstract

This Master's Thesis presents the 3D modeling of the first automatic steam hammer, patented and built by the British engineer James Nasmyth in 1843, applying reverse engineering techniques and the use of computer-aided design software, SolidWorks. This model enables the recovery, appreciation, and preservation of this significant piece of industrial manufacturing heritage, serving as a testament to engineering evolution. Additionally, it can be used as an educational tool, illustrating the architecture and operation of a fundamental machine in the forging industry, whose working principle remains relevant today.

First, an extensive bibliographic review was conducted on the historical evolution of the hammer, highlighting the crucial impact of Nasmyth's steam hammer on the industrial development of forging. Based on historical documents, patents, and period literature, the machine was digitally reconstructed, resulting in a parameterized model that facilitates future simulations and modifications. Subsequently, kinematic analyses, static simulations, and analytical evaluations were performed, allowing the identification of key movements, stresses, and deformations, among other results.

Notably, this project is part of the Educational Innovation Project "Development and Use of Teaching Tools through the Creation of the Virtual Museum of the School of Industrial Engineering at the University of Málaga", reference PIE22-094. The developed model will be integrated into this museum, allowing access to the digital model and information about its operation using virtual and augmented reality technologies, among others.

Keywords: Industrial Heritage, Deformation-Based Manufacturing, Forging, Steam Hammer, Nasmyth, Wilson, 3D Modeling, Virtual Museum

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	19
Capítulo 1. Introducción.....	29
1.1. Antecedentes	31
1.2. Objetivos	32
1.3. Organización de la memoria	33
Capítulo 2. Evolución Histórica del Martillo y Martillo Pilon	35
2.1. Introducción	36
2.1.1. Conformado plástico de metales	36
2.1.2. Clasificación de los martillos	39
2.2. Antecedentes (Prehistoria)	41
2.3. Martillos en el mundo antiguo	45
2.2.1. El primer martillo pilón.....	46
2.2.2. Martillos romanos para hincar pilotes.....	48
2.2.3. Limitaciones	49
2.4. Martillos en el periodo Eotécnico	49
2.4.1. Martillo pilón con árbol de levas	50
2.5. Martillos en el periodo Paleotécnico y Neotécnico	53
2.5.1. Martillos de tablero	53
2.5.1.1. Martillo de tablero de Merrill's	55
2.5.1.2. Martillo de tablero de la fábrica de Bliss	56
2.5.2. Martillos de leva.....	58
2.5.3. Martillos de golpe seco	59
2.5.3.1. Palmer Power-Spring Hammer	59
2.5.3.2. El martillo amortiguado de Bradley.....	61
2.5.3.3. El martillo neumático M. Chenot	63
2.5.4. Martillo de vapor (Acción directa).....	64
2.5.4.1. Primeras concepciones de James Watt y William Deverell	64

2.5.4.2.	James Nasmyth y su primera concepción del martillo de vapor.....	65
2.5.4.3.	Martillo de vapor de François Bourdon	69
2.5.4.4.	Martillo de vapor de Nastmyth	70
2.5.4.5.	Martillo consolidado de Nasmyth con automatización de Robert Wilson	72
2.5.4.6.	Innovación de Wilson (Válvula deslizante balanceada)	78
2.5.4.7.	Innovaciones de Wilson en el Martillo de Vapor: Rediseño Eficiente y Doble Acción	79
2.5.4.8.	Nasmyth & Wilson Martillo de vapor de 1917.....	81
2.5.4.9.	Ferris de Miles Martillo de vapor	82
2.5.4.10.	The Sellers Martillo de vapor	83
2.5.4.11.	Martillo de 30 toneladas	85
2.5.4.12.	Martillo pilón de Bourdon 1876	86
2.5.4.13.	Martillos neumáticos, hidráulicos o neumático-hidráulicos.	87
2.5.	Reflexión final	90
Capítulo 3. Modelización 3D del Martillo de vapor de Nasmyth		91
3.1.	Introducción	92
3.2.	Información de partida	92
3.3.	Hipótesis de partida	101
3.4.	Partes del martillo. Modelización	102
3.4.1.	Bastidor	104
3.4.2.	Estructura para operario	106
3.4.3.	Yunque	107
3.4.4.	Sistema de gestión del vapor.....	108
3.4.5.	Martillo y Pistón.....	109
3.4.6.	Cilindros.....	112
3.4.7.	Sistema de accionamiento, regulación y control.....	113
3.4.8.	Modelo ensamblado	117

3.5.	Principio de funcionamiento	119
3.5.1.	Sistema de admisión del vapor y elevación del martillo.....	119
3.5.2.	Sistema de tope de la subida del martillo.....	127
3.5.3.	Mecanismo de regulación de la altura de caída	132
3.5.4.	Mecanismo de amortiguamiento de la caída.....	135
3.5.5.	Mecanismo que permite la caída completa	138
3.5.6.	Mecanismo que permite la automatización en caída completa.....	140
3.3.1.	Cambio entre modos de funcionamiento.....	142
3.3.2.	Sistema de evacuación y absorción del aire	143
3.3.3.	Sistema de resorte de retroceso y de seguridad.....	144
3.3.1.	Sistemas de amortiguamiento mecánicos.....	146
3.4.	Incongruencias en el diseño	149
3.4.1.	Incongruencia respecto a sistema de aprovechamiento del rebote.....	149
3.3.2.	Incongruencias respecto al mango (z).....	153
3.5.	Mejoras y adaptaciones implementadas	155
3.6.	Horno de hierro forjado	160
3.7.	Museo Virtual	163
Capítulo 4.	Análisis Estático y Mecánico del Sistema.....	167
4.1.	Introducción	168
4.2.	Aproximaciones generales	168
4.3.	Análisis estático de subconjuntos mediante SolidWorks	173
4.4.	Análisis analítico de tensiones y deformaciones en elementos forjados	183
Capítulo 5.	Conclusiones y líneas de trabajo futuras	196
5.1.	Conclusiones.....	197
5.2.	Líneas de trabajo futuras.....	198
Capítulo 6.	Bibliografía	200
Anexos	208

Anexo A. Patentes y documentación principal.....	209
Anexo B. Fotografías.....	224
Anexo C. Planos	229

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de Figuras

<i>Figura 1: (a) Esquema de forja libre (b) Esquema de forja con estampas [1]</i>	36
<i>Figura 2. a) prensa hidráulica de la marca EMG (b) Prensa hidráulica de la marca Dunkes [2].</i>	37
<i>Figura 3: Fases de funcionamiento del martillo pilón [3].</i>	38
<i>Figura 4: Figuras de las distintas tipologías de bastidores [4].</i>	40
<i>Figura 5: Martillos de piedra sin mango. Paleolítico y Neolítico [5].</i>	42
<i>Figura 6: Martillos con orificio para mango. Neolítico y Edad de Bronce [5].</i>	43
<i>Figura 7: Mango para Martillo de piedra. Neolítico y Edad de Bronce [5].</i>	43
<i>Figura 8: Martillos-Hacha de piedra. Neolítico y Edad de Bronce [5].</i>	44
<i>Figura 9: (a) Martillo de Bronce (b) Martillo-Hacha de cobre. Edad de Cobre y de Bronce [6].</i>	44
<i>Figura 10: Martillo de Hierro. Edad de Hierro [7].</i>	45
<i>Figura 11: Ejemplar de martillo romano [8].</i>	46
<i>Figura 12: Principio de funcionamiento del primer martillo pilón. (a) Fase de elevación (b) Fase de caída. [3]</i>	46
<i>Figura 13: Principio de funcionamiento del primer martillo pilón con guía. (a) Fase de elevación (b) Fase de caída. [3]</i>	47
<i>Figura 14: (a) Martillo romano para hincado de pilotes (b) Martillo romano utilizado por Julio Cesar [3].</i>	48
<i>Figura 15: Martillo pilón accionado por un molino de agua en dinastía Yuan.[9]</i>	50
<i>Figura 16: (a) Molino de pólvora (b) Fuelles para forja [10] [11].</i>	51
<i>Figura 17: (a) Martinete de corceles imagen real (b) Martinete de corceles ilustración [12].</i>	52
<i>Figura 18: Configuración general del martillo de tablero.[4]</i>	54
<i>Figura 19: (a) Visión general Martillo de tablero de Merrill's . (b) Corte en sección de Martillo de tablero de Merrill's [13][14]</i>	56
<i>Figura 20: (a) Patente del martillo de E. W. Bliss Co (b) Visión general del martillo de E. W. Bliss Co [15] [16].</i>	57
<i>Figura 21: (a) Martillo de leva tipo 1, alzado (b) Martillo de leva tipo 1, perfil [13]. .</i>	58
<i>Figura 22: (a) Martillo de leva tipo 2, alzado (b) Martillo de leva tipo 2, perfil [13]. .</i>	59
<i>Figura 23: (a) Ilustración de “Palmer Power-Spring Hammer” en Scientific American (b) Imagen real del martillo [17] [18].</i>	60

<i>Figura 24: Catalogo de martillos Bradley.[19]</i>	61
<i>Figura 25: (a) Ilustración de “Bradley Cushioned Hammer” (b) Fotografía de “Bradley Cushioned Hammer” [20] [21].</i>	62
<i>Figura 26: Vista en sección del martillo neumático de M. Chenot [13]</i>	63
<i>Figura 27: (a) Ilustración de expansómetro de Nasmyth (b) Ilustración del carruaje de vapor de Nasmyth [24].</i>	65
<i>Figura 28: Ilustración de Bridgewater Foundry, en Patricroft [24].</i>	66
<i>Figura 29: Primer boceto del martillo pilón por James Nasmyth en 1839 [24].</i>	68
<i>Figura 30: Ilustración del primer martillo de vapor de François Bourdon [25].</i>	70
<i>Figura 31: Primer martillo de vapor diseñado y construido por James Nasmyth [26].</i>	71
<i>Figura 32: Ilustración del modelo diseñado sin éxito por James Nasmyth para automatizar y controlar el martillo [26].</i>	72
<i>Figura 33: (a) Planos detallados del martillo automatizado y controlado mediante el mecanismo del Wilson [27].</i>	74
<i>Figura 34: a) Modelo a escala del de martillo de vapor de Nasmyth del Science Museum b) Fotografía del martillo de la época [38][39].</i>	76
<i>Figura 35: a) Fotografía real del martillo de vapor de Nasmyth en 1855 b) Fotografía real del martillo de vapor de Nasmyth en 1851 [24] [28].</i>	77
<i>Figura 36: Martillo de vapor de Nasmyth conservado actualmente en Science Museum en Londres [29].</i>	78
<i>Figura 37: Martillo de Nasmyth con implementación de la válvula deslizante balanceada de Wilson [26].</i>	79
<i>Figura 38: (a) Martillo de doble acción de Nasmyth y Wilson (b) Martillo de 25 toneladas de Nasmyth y Wilson [26].</i>	80
<i>Figura 39: Nasmyth & Wilson Steam Hammer de 1917 [30].</i>	81
<i>Figura 40: (a) Ilustración del martillo de vapor de Ferris de Miles (b) Plano de sección transversal del mismo [13][31].</i>	83
<i>Figura 41: Ilustración del martillo de vapor Sellers [13].</i>	84
<i>Figura 42: Martillo de 30 toneladas de Thwaites y Carbutt [32].</i>	85
<i>Figura 43: Martillo pilón de Bourdon en 1876 [33].</i>	86
<i>Figura 44: (a) Martillo neumático de tablero, modelo de NKH (b) Martillo neumático, modelo PH50. [34] [35]</i>	89
<i>Figura 45: (a) Martillo neumático, modelo de FHM series. (b) Martillo neumático, modelo SAY-MAK SPH 50 [36] [37]</i>	89

<i>Figura 46: Martillo de vapor de Nasmyth conservado actualmente en Science Museum en Londres [29].</i>	93
<i>Figura 47: Planos de la Patente original de James Nasmyth [40].</i>	94
<i>Figura 48: Planos de la Patente de James Nasmyth en 1847 [41].</i>	96
<i>Figura 49: Ilustración de la Gran Exposición en 1851 [42].</i>	97
<i>Figura 50: a) Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “Tomlinson's Cyclopaedia Of Useful Arts” b) Fotografía real del martillo de Nasmyth en “La gran exposición” [43] [28]</i>	98
<i>Figura 51: Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “Cyclopedia of Applied Mechanics: A Dictionary of Mechanical Arts” [13]</i>	99
<i>Figura 52: Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “The Engineer and The Machinist’s Assistant” [27]</i>	100
<i>Figura 53:: Principales medidas del martillo de Nasmyth [Modificado de 27]</i>	101
<i>Figura 54: Principales grupos de piezas en planos de martillo de Nasmyth [Modificado de 27]</i>	103
<i>Figura 55: Estructura soportante o bastidor del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]</i>	104
<i>Figura 56: Estructura soportante para el operario explosionada [Modelado SolidWorks]</i>	106
<i>Figura 57: Yunque explosionado [Modelado SolidWorks]</i>	107
<i>Figura 58: Sistema de gestión del vapor explosionado [Modelado SolidWorks]</i>	109
Por otro lado, en la cara delantera del martillo, se ensamblan un conjunto de piezas como (N), (3), (k), (X), (X1) y (X2), cuya función es interactuar con el sistema de accionamiento y regulación para limitar la carrera del martillo en la subida y actuar como tope, así como permitir la automatización del funcionamiento del martillo. Esto se analizará pormenorizadamente a continuación en el apartado siguiente, donde se aborda el principio de funcionamiento. (Figura 59)	110
<i>Figura 60: Martillo explosionado [Modelado SolidWorks]</i>	110
<i>Figura 61: Sección transversal del martillo [Modelado SolidWorks]</i>	111
<i>Figura 62: Cilindros explosionados [Modelado SolidWorks]</i>	112
<i>Figura 63: Sistema de accionamiento y regulación del martillo [Modelado SolidWorks]</i>	113
<i>Figura 64: Parte inferior del sistema de accionamiento y regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]</i>	114

<i>Figura 65: Parte intermedia del sistema de accionamiento, regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]</i>	115
<i>Figura 66: Parte superior del sistema de accionamiento, regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]</i>	116
<i>Figura 67: Alzado del modelo ensamblado renderizado [Modelado SolidWorks]</i>	117
<i>Figura 68: Vista general del modelo ensamblado renderizado [Modelado SolidWorks]</i>	118
<i>Figura 69: Elementos del sistema de admisión del vapor y elevación del martillo [Modelado SolidWorks]</i>	119
<i>Figura 70: Movimientos de la palanca (d1) y varilla (d) [Modelado SolidWorks]</i>	120
<i>Figura 71: Movimientos de varilla (d) y válvula (e) [Modelado SolidWorks]</i>	121
<i>Figura 72: Entrada de vapor a la caja (I) [Modelado SolidWorks]</i>	121
<i>Figura 73: Entrada de vapor en la caja (J) y su canalización en el orificio (J-3) [Modelado SolidWorks]</i>	122
<i>Figura 74: Flujo del vapor por orificio (J-3) y por tubo (n) [Modelado SolidWorks]</i>	123
<i>Figura 75: Flujo de vapor hacia cilindro (M) y empuje del pistón (m) y varilla (L) [Modelado SolidWorks]</i>	123
<i>Figura 76: Descenso de varilla (L), (L-1) y de la válvula. Flujo de vapor hacia (f) [Modelado SolidWorks]</i>	124
<i>Figura 77: Flujo de vapor en (f), entrada de vapor al cilindro (D) y empuje del pistón (E) [Modelado SolidWorks]</i>	125
<i>Figura 78: Ascenso del bloque del martillo [Modelado SolidWorks]</i>	126
<i>Figura 79: Mecanismo de accionamiento del brazo-palanca (O) [Modelado SolidWorks]</i>	127
<i>Figura 80: Posición final alcanzada del brazo-palanca (O) [Modelado SolidWorks]</i>	128
<i>Figura 81: Transmisión de movimiento por la varilla P y elementos p, Q, R, L-1 y e [Modelado SolidWorks]</i>	129
<i>Figura 82: Transmisión de movimiento por la varilla (P) y elementos (p), (Q), (R), (L-1) y (e) (visión superior) [Modelado SolidWorks]</i>	130
<i>Figura 83: Vaciado del cilindro y caída del pistón (E) [Modelado SolidWorks]</i>	131
<i>Figura 84: Mecanismo de regulación de altura [Modelado SolidWorks]</i>	132
<i>Figura 85: Movimiento de tuerca (O-2) a través de guías (W) y (V) [Modelado SolidWorks]</i>	134

Figura 86: Mecanismo que mantiene la válvula e en la posición inferior [Modelado SolidWorks].....	135
<i>Figura 87: Mecanismo que actúa como tope superior de la elevación del martillo [Modelado SolidWorks].....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 88: Retroceso de la palanca (O) en la bajada del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>137</i>
<i>Figura 89: Amortiguación de vapor en la caída del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>137</i>
<i>Figura 90: Mecanismo de fijación que permite la caída completa del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>138</i>
<i>Figura 91: Mecanismo que permite la automatización del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>140</i>
<i>Figura 92: Mecanismo de desenganche del gatillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>142</i>
<i>Figura 93: Flujo de vapor y aire en la elevación del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>143</i>
<i>Figura 94: Sistema de resorte de retroceso que aumenta la potencia del golpe [Modelado SolidWorks].</i>	<i>144</i>
<i>Figura 95: Corte en sección del bloque del martillo [Modelado SolidWorks].</i>	<i>147</i>
<i>Figura 96: Conexión amortiguada entre P y Q [Modelado SolidWorks].</i>	<i>148</i>
<i>Figura 97: Amortiguación en cilindro (S) [Modelado SolidWorks].</i>	<i>149</i>
<i>Figura 98: Hombre del paleolítico utilizando un molinillo para hacer fuego [Modelado SolidWorks].</i>	<i>150</i>
<i>Figura 99: Modificaciones de diseño posteriores en la palanca (O) [29].</i>	<i>152</i>
<i>Figura 100: Palanca o mango (z) [Modelado SolidWorks].</i>	<i>153</i>
<i>Figura 101: Rediseño de la palanca o mango (z) [29].</i>	<i>154</i>
<i>Figura 102: a) Ejemplar 1850 b) Ejemplar modelado de 1847 c) Ejemplar fotografiado en 1851 [29] [Modelado SolidWorks] [28].</i>	<i>155</i>
<i>Figura 103: a) Versión modelada con plataforma del operario b) Versión de 1850 sin plataforma para el operario [Modelado SolidWorks] [29].</i>	<i>156</i>
<i>Figura 104: a) Versión modelada con manivela b) Versión fotografiada en 1851 con rueda c) Versión de 1850 con rueda [Modelado SolidWorks] [28] [29].</i>	<i>157</i>
<i>Figura 105: a) Versión modelada con guía (V) b) Versión fotografiada en 1851 con guía (V) modificada c) Versión de 1850 sin guía (V) [Modelado SolidWorks] [28] [29].</i>	<i>158</i>

<i>Figura 106: a) Versión modelada original con mangos de maniobra cortos b) Versión posterior con mangos alargados [Modelado SolidWorks] [39].</i>	158
<i>Figura 107: a) Versión modelada original con diseño de yunque inicial b) Versión fotografiada en 1851 diseño de yunque simplificado c) Versión de 1850 con matriz inferior [28] [Modelado SolidWorks] [29].</i>	159
<i>Figura 108: a) Esquema de forja en yunque plano b) Esquema de forja en yunque en “V” [24].</i>	160
<i>Figura 109: Horno para el hierro forjado [27].</i>	161
<i>Figura 110: Póster museo Virtual Escuela Ingenierías Industriales.</i>	164
<i>Figura 111: Poster Martillo de vapor de Nasmyth [Autoría propia].</i>	165
<i>Figura 112: a) Modelo adaptado a realidad aumentada b) Modelo en realidad aumentada en un entorno físico [Autoría propia].</i>	166
<i>Figura 113: Centro de masa del martillo de vapor de Nasmyth modelado [Modelado SolidWorks].</i>	169
<i>Figura 114: Subconjunto de piezas encargados de la sustentación principal [Modelado SolidWorks].</i>	173
<i>Figura 115: Resultado del estudio estático sobre el subconjunto soporte [Simulación SolidWorks].</i>	175
<i>Figura 116: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el subconjunto soporte [Modelado SolidWorks].</i>	175
<i>Figura 117: Subconjunto de elementos del yunque [Modelado SolidWorks].</i>	177
<i>Figura 118: Resultado del estudio estático sobre el subconjunto yunque [Simulación SolidWorks].</i>	178
<i>Figura 119: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el subconjunto yunque [Simulación SolidWorks].</i>	179
<i>Figura 120: Resultado del estudio estático sobre el pistón tracción [Simulación SolidWorks].</i>	181
<i>Figura 121: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el pistón [Simulación SolidWorks].</i>	182
<i>Figura 122: Probeta hipotética cubica de 200x200x200 mm [Modelado SolidWorks].</i>	183
<i>Figura 123: Grafico de las temperaturas máximas y mínimas a empleas en función del porcentaje de carbono de la pieza [50].</i>	185

Figura 124: Grafica de la fuerza necesaria a aplicar para deformar la probeta en función de la temperatura[Autoría propia]. 188

Figura 125: Grafica de la deformación que sufre la probeta en función de la temperatura, con la fuerza ejercida requerida para su deformación [Autoría propia].
..... 190

*Figura 126: Resultados del análisis estático de la probeta [Simulación SolidWorks].*191

Figura 127: Facilidad de deformación en función de relación a/h [50]...... 192

Figura 128: Fuerzas requeridas para deformar las probetas en función de la altura de estas [Autoría propia] 194

Figura 129: Deformación de la probeta en función a su altura ejerciendo la fuerza requerida para la deformación [Autoría propia] 195

ÍNDICE DE TABLAS

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Características mecánicas del hierro fundido GS- EN GJS 350 LT [49]</i>	174
<i>Tabla 2: Características mecánicas del hierro fundido GS- EN GJS 450 10 [49].</i>	177
<i>Tabla 3: Tensiones límites del material en función de la temperatura. [Autoría propia]</i>	187
<i>Tabla 4: Fuerza real necesaria para deformar la probeta. [Autoría propia]</i>	187
<i>Tabla 5: Distancia que se deforma la probeta en función de la temperatura con la fuerza ejercida requerida para la deformación. [Autoría propia].....</i>	190
<i>Tabla 6: Dimensiones de probetas de prueba [Autoría propia]</i>	193
<i>Tabla 7: Tensión límite para una temperatura de 110 °C [Autoría propia]</i>	193
<i>Tabla 8: Fuerzas requeridas para deformar las probetas con diferentes alturas [Autoría propia]</i>	193
<i>Tabla 9: Deformación de la probeta en función a su altura ejerciendo la fuerza requerida para la deformación [Autoría propia]</i>	194

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La Primera Revolución Industrial ha supuesto el mayor conjunto de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales de la historia de la humanidad desde el Neolítico. Los cambios tecnológicos incorporados al campo de la industria han generado una serie de elementos que poco a poco han ido incorporándose a nuestra cultura y estilos de vida, de manera que han pasado a ser un componente más de nuestra herencia cultural. Dentro de esta herencia encontramos desde los propios productos que de estas fábricas obteníamos hasta los sistemas productivos y sociales o las nuevas corrientes de pensamiento que definirían el mundo y la sociedad.

Son estos conceptos lo que hoy en día conocemos como patrimonio industrial, un término que abarca a todos aquellos elementos materiales (tanto bienes muebles, entendiendo como tales los utensilios, máquinas, mobiliario y documentación que en estos complejos se empleaban; como inmuebles, donde encontramos las edificaciones destinadas a albergar estas actividades y su entorno) e inmateriales surgidos de las actividades industriales y que constituyen un testimonio de la industrialización y evolución de nuestra sociedad, y que son fundamentales para comprender el desarrollo de la misma. Es de esta importancia que surge la necesidad de conservar y recuperar estos elementos, rehabilitando los edificios, restaurando las herramientas y máquinas y documentando los archivos gráficos y escritos que reflejan estos pedazos de nuestra historia.

En este marco se encuentra ubicada una de las principales líneas de investigación del grupo de investigación TEP933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga, que colabora estrechamente con investigadores de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) y con el grupo de trabajo Patrimonio Industrial de Fabricación (PATRIF) de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (SIF). En estas investigaciones se está realizando un trabajo de análisis, recuperación y puesta en valor del patrimonio industrial, así como de difusión de estas actividades a todos los niveles.

Entre estas actividades cabe destacar la realización de diversos cursos sobre la historia de las máquinas-herramienta. En este contexto, uno de los principales problemas es la falta de documentación gráfica que ilustre la arquitectura y el funcionamiento de las primeras máquinas-herramienta, que en muchos casos carecen incluso de patente, o no se han conservado. De este modo, se está recurriendo al uso de técnicas de ingeniería

inversa, usualmente a través de fotografías, patentes, dibujos o manuales de la época, para realizar una modelización de estas máquinas y poder estudiar su funcionamiento.

Es importante resaltar que este trabajo forma parte del Proyecto de Innovación Educativa titulado "Desarrollo y empleo de herramientas docentes mediante la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga", identificado con el código PIE22-094. El modelo creado se integrará en dicho museo, permitiendo el acceso al modelo digital y detalles sobre su funcionamiento mediante el uso de técnicas como la realidad virtual y la realidad aumentada, entre otras posibilidades.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es modelizar en 3D el martillo de vapor automatizado, diseñado y patentado por James Nasmyth a mediados del siglo XIX, mediante la aplicación de técnicas de ingeniería inversa. Cabe destacar, que conservan algunas variantes del diseño original, en museos y algunas fotografías de la época. No obstante, no se conserva ni físicamente ni en imágenes, el diseño original del martillo de vapor automatizado, modelado en el presente proyecto, por lo que la información disponible es la perteneciente a dibujos, anotaciones y libros de la época.

A partir de esta información, se ha obtenido un modelo CAD 3D mediante el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks. Una vez realizado el mismo, se ha realizado un análisis cinemático del sistema de accionamiento de esta máquina-herramienta, así como un análisis estático.

Además del objetivo principal de este trabajo, existen otros objetivos secundarios enmarcados en el contexto de este Trabajo Fin de Máster. Con ellos, se pretenden realizar una aproximación de la evolución que han sufrido en el tiempo las máquinas-herramientas de martillo a lo largo de la historia, con especial enfoque en los martillos de vapor,

Este trabajo permite modelizar una de las máquinas-herramientas más importantes en el ámbito de la ingeniería de fabricación, pudiendo ser utilizada como una herramienta a nivel docente para mostrar a alumnos de diversos grados de ingeniería industrial una máquina-herramienta perteneciente a un contexto histórico diferente, pero cuya filosofía

se ha mantenido hasta nuestros días, debido a la similar arquitectura que comparte con las taladradoras de columna actuales.

1.3. Organización de la memoria

La memoria del presente Trabajo Fin de Máster se ha dividido en 6 capítulos y 3 anexos.

En el primer capítulo de introducción, se abordan los antecedentes del proyecto, así como sus objetivos y la estructuración de la memoria.

En el segundo capítulo, se realiza una introducción a los procesos por conformado y a las diferentes de máquinas-herramientas que se emplean. Posteriormente se hace un detallado análisis de la evolución histórica del martillo manual y martillo pilón desde los primeros inicios de su existencia hasta hoy, y de cómo esta evolución a repercutido en los procesos de conformado. Se ha incidido especialmente en el contexto histórico de James Nasmyth, la creación de su martillo de vapor y su evolución.

En el tercer capítulo, se procede a explicar toda la metodología utilizada desde las hipótesis de partida para poder modelizar la taladradora de James Nasmyth en 1843, hasta el modelado final del mismo, con especial detalle en todas las piezas y como éstas se relacionan entre sí, realizando los posibles movimientos de la máquina. Se han obtenido conclusiones sobre su funcionamiento, así como se ha realizado un análisis de deficiencias y mejoras posteriores.

Seguidamente, en el cuarto capítulo, se procederá a calcular ciertas variables físicas como masas, pesos, fuerzas, presiones o consumos energéticos y de vapor. Posteriormente, se ha realizado un análisis estático de los principales subconjuntos de la máquina. Finalmente, se ha realizado un análisis analítico de las tensiones y deformaciones en una probeta hipotética, lo que permita estimar la capacidad de la deformación del martillo de Nasmyth.

A continuación, en el quinto capítulo se recogen las conclusiones derivadas del trabajo realizado, además de exponerse las posibles líneas futuras de actuación.

Por último, en el sexto capítulo, se enumeran todas las fuentes bibliográficas consultadas y referenciadas en cada uno de los capítulos.

En los anexos, se muestran las principales fuentes bibliográficas (manuales, enciclopedias, patentes, etc.) de donde se ha obtenido la información, y posteriormente se muestran unos planos detallados del martillo modelado, abarcando vistas generales, despieces, y planos individuales de las piezas principales.

**Capítulo 2.Evolución
Histórica del Martillo y
Martillo Pilon**

2.1. Introducción

En este apartado, previo al estudio de la evolución histórica del martillo de vapor, se realiza un repaso de los principios fundamentales del forjado por impacto, analizando tanto el proceso de deformación por martillado como la clasificación de máquinas-herramientas que se han desarrollado para realizarlo.

2.1.1. Conformado plástico de metales

La forja se define como la deformación controlada de un metal hasta una forma final mediante la aplicación de presión o de impactos sucesivos. Los productos forjados tienen una alta repetibilidad y adquieren buenas propiedades mecánicas (tenacidad, ductilidad y resistencia a la fatiga y corrosión)

Dentro de la forja existen dos metodologías, la forja libre y la forja por estampas. En la forja libre (Figura 1.a), no se confina el flujo de metal y se utiliza para forja utillajes simples o piezas sencillas o preformas que posteriormente serán más complejas.

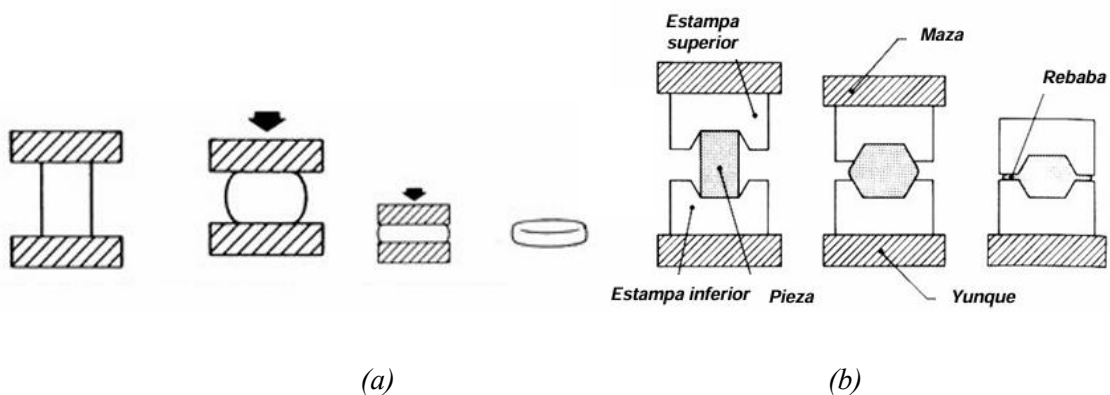


Figura 1: (a) Esquema de forja libre (b) Esquema de forja con estampas [1]

En cambio, en la forja por estampas (Fig 1.b), el flujo del metal está limitado por la forma de los utillajes, los utillajes o estampas son caros y se obtienen por mecanizado. Soportan cargas y temperaturas elevadas. El exceso de material fluye hacia fuera formando la rebaba.

Por otro lado, los equipos que se utilizan para el proceso de forja se pueden dividir en dos grupos principales, las prensas y los martillos.

Prensas

Su funcionamiento básico es el de aplicar presión sobre el material, proporcionando una deformación homogénea del material de forma progresiva, obteniendo mejores tolerancias que los martillos. Su capacidad viene definida por la fuerza disponible en la carrera de bajada de la estampa. Las prensas pueden ser:

- Prensas mecánicas: Mecanismo de biela-manivela (energía almacenada en un volante de inercia). La fuerza y velocidad dependen de la cinemática de la prensa.
- Prensas hidráulicas: Estas utilizan el principio de Pascal como base de su funcionamiento. Son accionadas por un cilindro hidráulico servocontrolado, y la fuerza y velocidad de la prensa dependen del caudal y presión de este cilindro. Aunque son menos productivas que las mecánicas, son idóneas para forja libre de grandes piezas, debido a su gran capacidad y control. Requieren de mayores mantenimientos y costes.



(a)



(b)

Figura 2. a) prensa hidráulica de la marca EMG (b) Prensa hidráulica de la marca Dunkes [2].

Martillos

Estas máquinas son denominadas martillo-pilón, aunque simplificado y en contexto se denominan simplemente martillo o incluso martinete. Su funcionamiento básico es el de elevar un bloque pesado de acero por medios mecánicos a una determinada altura, y dejarlo caer sobre una pieza colocada en un yunque.

El conformado plástico de un metal mediante el uso de un martillo se efectúa de forma inmediata través de un impacto del martillo, a diferencia que en las prensas.

El forjado por impacto se basa en la aplicación de golpes repetitivos que inducen la deformación plástica del material. La energía se transfiere en intervalos breves, permitiendo modificar la geometría de la pieza de forma controlada y eficaz. Este proceso se orienta a la transformación estructural mediante la aplicación directa de una fuerza concentrada.

Entre sus principales ventajas destacan la capacidad para trabajar materiales de alta resistencia y la obtención de propiedades mecánicas mejoradas en las piezas forjadas.

Las principales fases de funcionamiento de un ciclo, en un martillo pilón se muestran en la figura 3.

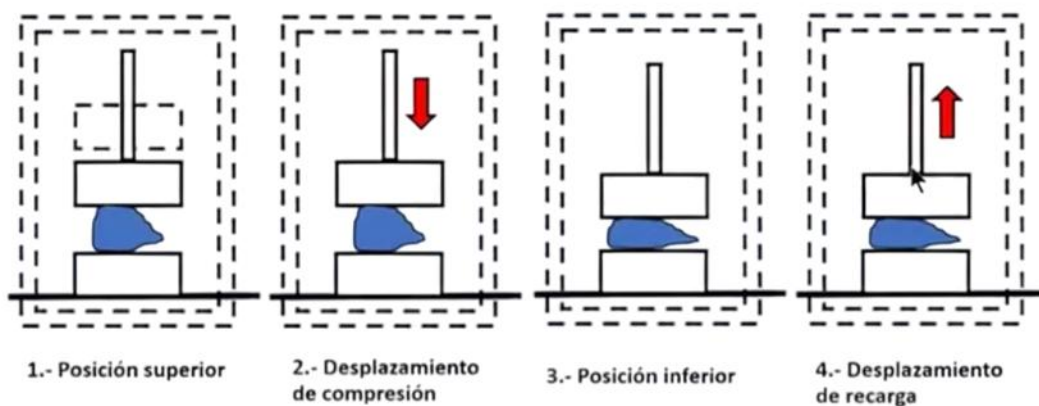


Figura 3: Fases de funcionamiento del martillo pilón [3].

Los procesos de forja pueden ocurrir en frío o en caliente, según que el material metálico a conformar se encuentre por debajo o por encima, respectivamente, de su temperatura de recristalización (que en muchos casos se encuentra aproximadamente en la mitad, en °C, de la temperatura de fusión).

2.1.2. Clasificación de los martillos

Los martillos pilones, se pueden clasificar según varios criterios:

Clasificación según su accionamiento

- **Martillos de caída libre:** Estos martillos utilizan la fuerza de la gravedad para que el cabezal descienda y golpee la pieza de trabajo. Su accionamiento o levantamiento de la masa puede realizarse mediante distintos sistemas: mediante tablero, mediante levas o mediante un cilindro de vapor o neumático de efecto simple. Estas tipologías se estudiarán más detenidamente en este capítulo.

En estos sistemas, la energía máxima ejercida sobre el elemento a forjar viene determinada por altura y la masa del martillo y la gravedad.

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} * m * V^2 = m * g * h \quad (1)$$

- **Martillos de caída activada:** El descenso del cabezal no se deja únicamente a la gravedad, sino que se controla y aumenta activamente mediante la aplicación de una fuerza adicional. Los sistemas en este caso serían neumáticos, hidráulicos o de vapor, y requerirían un doble efecto donde se emplee aire comprimido, vapor o un fluido hidráulico en ambas fases, tanto para la subida del pistón como para el descenso.

Estos sistemas ya no están limitados a las variables descritas en los de caída libre, ya que ahora la aceleración gravitatoria de la caída suma el término de la aceleración del aire comprimido, vapor o presión hidráulica, consiguiéndose energías mucho mayores. P sería la presión y S el área del cilindro.

$$E_{\text{impacto}} = \frac{1}{2} * m * V^2 = m * g * h + p * S * h \quad (2)$$

Clasificación según estructura del bastidor

- Martillo de montaje de cuello de cisne: Ofrecen menor rigidez, pero una mejor accesibilidad para el operario.
- Matillo y prensas de doble montante o puente: Ofrecen una rigidez y accesibilidad medias.

- Martillo y prensas de cuatro montantes: Muy buena rigidez a costa e muy poca accesibilidad.

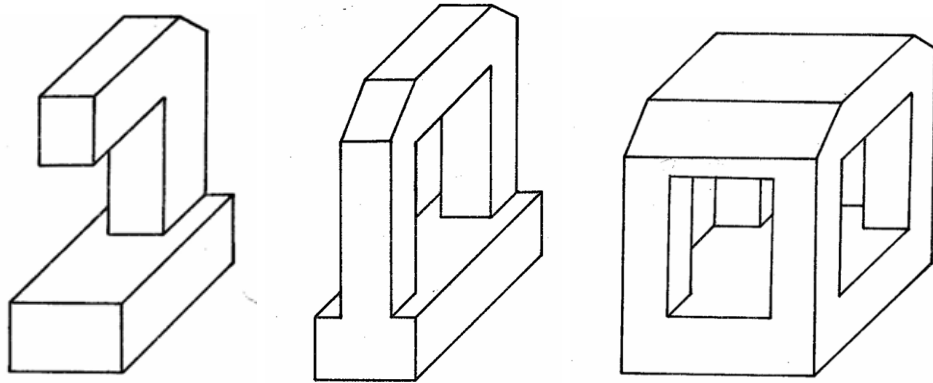


Figura 4: Figuras de las distintas tipologías de bastidores [4].

Clasificación según número de efectos

- Martillos de simple efecto: únicamente son capaces de materializar un nivel de acercamiento entre partes móviles del utillaje.
- Martillos de doble efecto: Poseen dos niveles de acercamiento.
- Martillos de efecto múltiple: Disponen de más de dos efectos.

Clasificación según cadencia de funcionamiento

- Martillo de funcionamiento discontinuo: Realiza golpes separados individuales, con intervalos ajustables entre cada impacto.
- Martillos a régimen: Operan de manera continua a diferentes velocidades (lentas, medias o rápidas) lo que posibilita un trabajo más uniforme y regular.

2.2. Antecedentes (Prehistoria)

La línea temporal del desarrollo tecnológico se divide en varias fases que reflejan la evolución de las herramientas y la tecnología humana. Estas fases suelen agruparse en las siguientes fases:

- **Preneolítico y Neolítico.** Abarca el Paleolítico y el Mesolítico, aproximadamente desde 2,5 millones de años a. C. hasta 3.500 y 3.000 a. C. Etapa premetalúrgica y primeros procesos tecnológicos sin máquinas.
- **Mundo Antiguo** Inicia alrededor 3.500 y 3.000 a. C. y llega hasta la caída del Imperio romano de Occidente en 476 d.C.: Desarrollo de herramientas más avanzadas y metalurgia temprana.
- **Eotécnico** (aprox. 1000-1750 d. C.): Uso de energía hidráulica y madera (molinos, primeras máquinas).
- **Paleotécnico** (aprox. 1750-1900 d. C.): Revolución Industrial, uso del carbón, hierro y máquinas de vapor.
- **Neotécnico** (aprox. 1900-actualidad): Uso de electricidad, petróleo, electrónica e informática.

Como antecedentes en la evolución histórica de las máquinas de martillo, se consideran todas las actividades de conformado de metales realizadas con anterioridad al desarrollo de las máquinas de martillo, las cuales se consta que se empezaron a desarrollar ya entrada la etapa del mundo antiguo.

En esta etapa inicial, predominaron los procesos de forja mediante percusión o martillado manual. Estos procesos conformadores en primera instancia se realizaron en metales y aleaciones, ya que no requerían altas temperaturas, a diferencia de las fundiciones.

Estos procesos generalmente se realizaban en frío, pero con el tiempo se descubrió la implicación que tenía la aplicación de calor en el comportamiento de los metales, ablandándolos y favoreciendo su deformación plástica, por lo que se fue implementando paulatinamente su uso.

Esto se analiza detalladamente en “*Orígenes de la formabilidad de los metales en frío*” (1984) de Tomás Lopez Navarro [45], donde se establece las siguientes etapas en los procesos de conformado por deformación plástica:

- **Etapa Neometálica** (9500 a. C. – 4100 a. C.): La conformación de materiales se realizaba en frío, ya que se desconoce el uso del fuego.
- **Etapa Proto-Metalúrgica** (4100 a. C. -3000 a. C.): Se conoce la acción del fuego sobre los metales. Primeras fundiciones de cobre, pero aún no se alean los materiales.
- **Etapa Metalúrgica** (3000-1500 a. C.): Utilización generalizada del fuego y primeros procesos metalúrgicos.

En esta bibliografía se puede consultar una posible secuencia cronológica de las primeras herramientas utilizadas, la cual sería la siguiente: **percutor de piedra pulimentada**, sufridera o yunque de piedra pulimentada, punzón para hacer agujeros, punzón romo para hacer resaltes repetidos, cuchillo de sílex, sufrideras blancas, sufrideras blandas, sufrideras plásticas, abrasivos en forma de polvo mezclado con sebo, cinceles y buriles, **martillos y mazos**, tenazas y cortadores de forma.

Se puede observar que el percutor de piedra pulimentada la primera herramienta utilizada, la cual podríamos considerar similar en principio de funcionamiento al martillo debido al elemento percutor.

No obstante, también se observa que los martillos y mazos con mango no se desarrollaron hasta después de muchas otras herramientas. Este retraso podría justificarse debido al adecuado control que supone para el operario utilizar el percutor o piedra con la que se golpea directamente con las manos, no siendo requerido el mango hasta mucho después para operaciones específicas donde se requería más potencia.



Figura 5: Martillos de piedra sin mango. Paleolítico y Neolítico [5].

En la figura 5, recogida del prestigioso museo en materia historia “British Museum”, se observan dos modelos de piedras martillo accionadas con las propias manos, utilizadas en el Paleolítico y Neolítico.

Probablemente, paulatinamente con el paso del tiempo, se fuera implementado a estas piedras un mango, unificándose con cuero, y mejorando sus funcionalidades.

No obstante, en el Neolítico y la Edad de Bronce, comenzaron a utilizarse modelos más avanzados de martillo, implementándose un mango que atravesaba la piedra percutora, mejorando en gran medida la unión entre ambos elementos.



Figura 6: Martillos con orificio para mango. Neolítico y Edad de Bronce [5].

Estos modelos contaban con un orificio transversal que permitía introducirle un mango, aumentando su manejabilidad y potencia en los golpes. Los mangos, posiblemente de madera, no se conservan hasta la actualidad en estos modelos. No obstante, en la figura 7 se puede observar un ejemplo de mango para martillo conservado que se estima que data aproximadamente del Neolítico y Edad de Bronce.



Figura 7: Mango para Martillo de piedra. Neolítico y Edad de Bronce [5].

Cabe destacar, que muchos de estos ejemplares más avanzados en el Neolítico y Edad de bronce, contaban con una doble funcionalidad, utilizándose al mismo tiempo como hacha o martillo, en función de la parte con la que se golpee. Se observan tales ejemplares en la figura 8.



Figura 8: Martillos-Hacha de piedra. Neolítico y Edad de Bronce [5].

Con el desarrollo de la Edad de Cobre y Bronce, los avances se vieron implementados en estas herramientas, otorgándoles mayor durabilidad y resistencia y menor desgaste, repercutiendo en importantes avances en la metalurgia utilizando cobre o bronce respecto la piedra convencional. Ejemplares de bronce y cobre se observan en la figura 9.



(a)

(b)

Figura 9: (a) Martillo de Bronce (b) Martillo-Hacha de cobre. Edad de Cobre y de Bronce [6].

La siguiente evolución en esta herramienta fue en la Edad de Hierro a través de la implementación de este material, aunque los ejemplares que se mantienen en la actualidad tienen un elevado grado de oxidación (Figura 10).



Figura 10: Martillo de Hierro. Edad de Hierro [7].

Estos martillos tenían mayor resistencia y dureza y también mayor capacidad de impacto. Por otro lado, el hierro era más abundante y accesible que otros materiales en muchas regiones, lo que permitió una producción a mayor escala y por tanto un gran avance en el desarrollo de la civilización. Las actividades de metalurgia y herrería comenzaron a desarrollar técnicas más avanzadas de forjado.

2.3. Martillos en el mundo antiguo

El Mundo Antiguo es el periodo de la Historia de la Tecnología, posterior al Periodo Neolítico, que corresponde a las civilizaciones fluviales dotadas de escritura y a los primeros grandes imperios. Esta etapa termina aproximadamente en el 110 d. C.

Durante esta etapa, como se ha visto previamente, se siguió desarrollado en diseño y materiales el martillo manual, hasta alcanzar, en la época romana (753 a. C. al 476 d. C.), el actual martillo tal y como lo conocemos. En la figura 11 se puede observar un ejemplar de martillo romano.



Figura 11: Ejemplar de martillo romano [8].

No obstante, en el periodo del mundo antiguo, hubo importantes avances tecnológicos. La figura de Arquímedes de Siracusa (287-212 a. C.) estudió la ley de la palanca, enunció el principio de la hidrostática, desarrolló el tornillo de Arquímedes, desarrolló la cloaca de bombeo de agua y tipificó y estudió “cinco máquinas fundamentales”: palanca, rueda, polea, plano inclinado y tornillo.

En este contexto tecnológico, se empezaron a desarrollar máquinas-herramientas paralelas al martillo tradicional, con la intención de superar la limitación principal del martillo manual, que no es otro que la fuerza humana.

2.2.1. El primer martillo pilón

Aunque no se tienen registros del primer martillo pilón diseñado para obtener potencias de golpeo mayores a las obtenidas por un martillo manual, si se estima que surgió en este período y también su principio de funcionamiento.

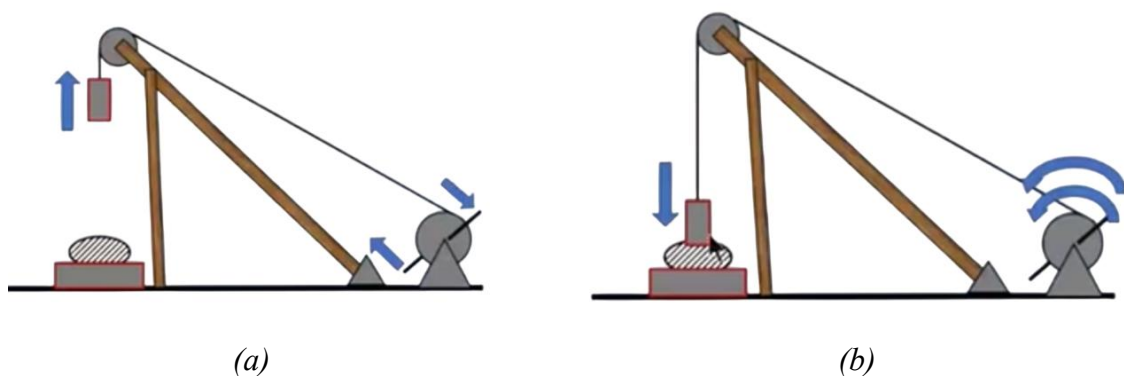


Figura 12: Principio de funcionamiento del primer martillo pilón. (a) Fase de elevación (b) Fase de caída. [3]

En la figura 12 se puede observar un gráfico del principio de funcionamiento básico. En primer lugar, en ella se observa una estructura primitiva de la época, también denominadas “cabrias”. Básicamente se trataba de una o varias vigas arriostradas en un punto de la superficie, y unidas por el otro extremo a otras vigas aproximadamente verticales.

Por otro lado, se hacía uso de dos ruedas, una en forma de polea y otra en forma de torno con dos palancas unidas en forma de manubrio. A través de estas palancas el operario podía ejercer una fuerza moderada que enrollara un cable al torno, de forma que la masa del martillo, anclada al otro extremo del cable, se elevara.

Posteriormente, se dejaría caer por efecto de la gravedad efectuando un impacto sobre la pieza deseada. Este impacto sería de gran potencia y dependía de la altura de elevación de la masa. En cualquier caso, se podía superar el límite de la fuerza humana, aprovechando el efecto de la gravedad.

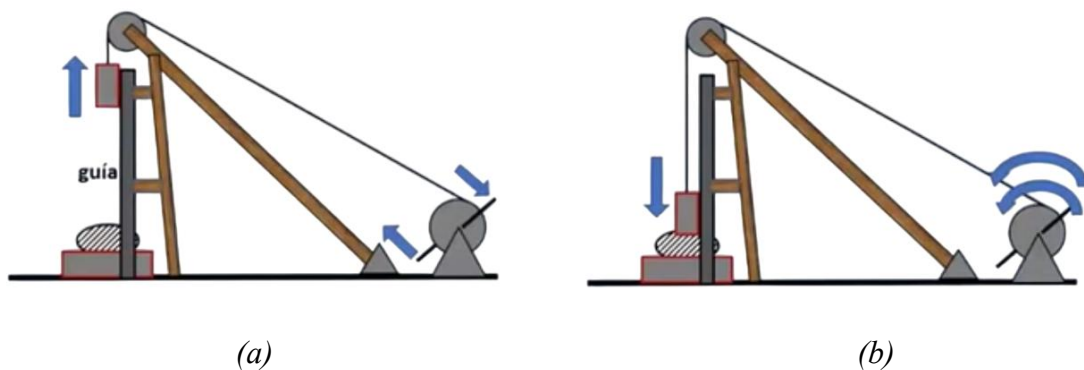


Figura 13: Principio de funcionamiento del primer martillo pilón con guía. (a) Fase de elevación (b) Fase de caída. [3]

Un avance a este primer diseño sería la implementación de un elemento que actué como guía del martillo (Figura 13). Esto conllevaría pérdidas por rozamiento y disminución de potencia deformadora, pero se granaría mucho control y precisión.

2.2.2. Martillos romanos para hincar pilotes

El imperio romano realizó importantes avances en la construcción gracias al uso de grandes martillos que se utilizaban para hincar pilotes de cimentación en edificios o puentes.

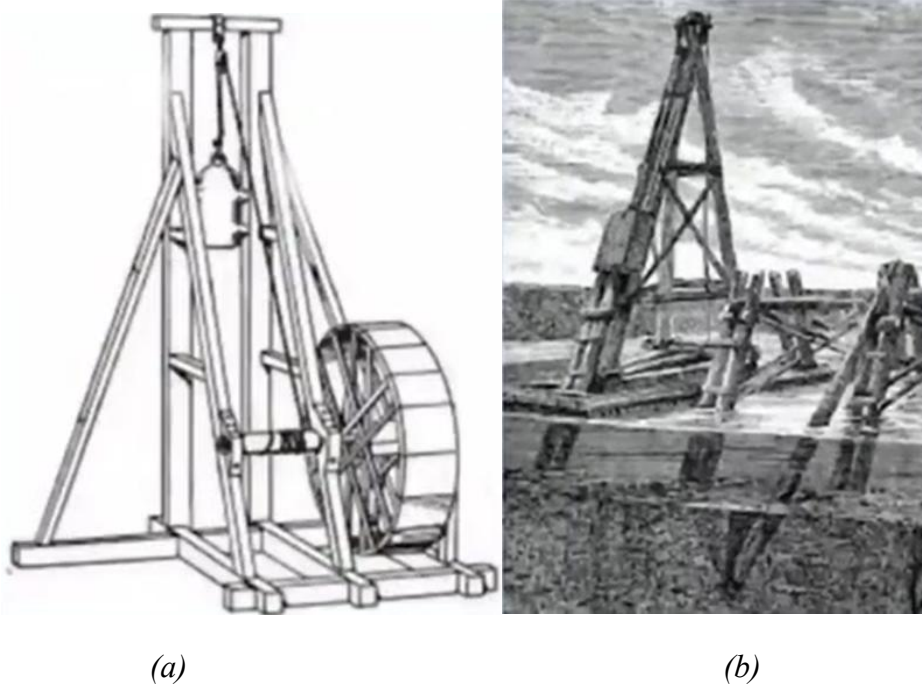


Figura 14: (a) Martillo romano para hincado de pilotes (b) Martillo romano utilizado por Julio Cesar [3].

En la figura 14.a se muestra un diseño que corresponde a un martillo romano ideado para esta función, cuyo funcionamiento se basaba en una gran rueda de andadura que levantaba y dejaba caer el mazo.

En la figura 14.b, se muestra un ejemplo de adaptación de un martillo, utilizado de Julio César en la edificación de un puente de madera sobre el río Rin, cerca de la actual Coblenza, en el año 55 a. C., lo que permitió al ejército de Julio Cesar cruzar el río y atacar Germania. Según las crónicas, la estructura se completó en solo diez días, en una zona del río que alcanzaba unos 400 metros de ancho y hasta 9 metros de profundidad.

2.2.3. Limitaciones

Como se ha visto, en esta etapa se solucionó el problema de la limitación de potencia de impacto para el conformado de piezas por deformación plástica, con el uso de martillos pilón en lugar de martillos manuales.

No obstante, estos martillos pilones primitivos tenían importantes limitaciones:

- Su material estructural principal era la madera, lo que limitaba sus prestaciones y conllevaba unos tamaños de máquina enormes.
- El tiempo necesario en cada ciclo de trabajo era muy elevado.
- En general, su accionamiento era por “motor de sangre”, es decir, por el esfuerzo humano (esclavos, pseudo-esclavos o penados) o por animales de tiro.

No obstante, la limitación más importante eran los tiempos de rearme, haciendo los ciclos de operación muy largos, del orden de minutos. En cambio, la producción industrial requiere de secuencias de funcionamiento mucho más elevadas, con frecuencias de funcionamiento de varios ciclos por minuto.

2.4. Martillos en el periodo Eotécnico

El periodo Eotécnico comprende en Europa occidental desde el año 1100 hasta el 1750, aproximadamente. Viene a corresponder con las edades históricas de la Plena y Baja Edad Media y gran parte de la Edad Moderna.

Es la etapa de gran desarrollo, mejora y consolidación de las máquinas. Si bien es cierto que aún estaban principalmente fabricadas de madera y aun no estaba consolidado el uso de hierro y acero, cada vez estaban más fortalecidas con grapas, tirantes, zunchos o refuerzos de hierro. No obstante, la construcción en madera imposibilita que se conserven apenas ejemplares a la actualidad.

Uno de los principales avances que sufrieron las máquinas en este periodo, fue la paulatina disminución del uso de energía humana, en sustitución de fuentes de energía animal y fuentes de energía hidráulica y eólica.

Por otro lado, se comenzaron a utilizar mecanismos de transmisión rotativos y transmisión de estos a movimientos lineales, avanzando con ellos la mecánica y la ingeniería en gran medida.

2.4.1. Martillo pilón con árbol de levas

La utilización de la energía hidráulica de los ríos, y la utilización de levas como mecanismos que transformaban movimientos giratorios en lineales, permitió un gran desarrollo en el campo de la forja, con la invención del martillo pilón accionado por levas.

La primera información que se tiene de esta máquina consta de un documento de 1313 en la dinastía mongol Yuan (1281-1368) [9], el cual se pudo observar en la figura 15. Este martillo-pilón accionado por un molino de agua, era utilizado para aplastar cereales.

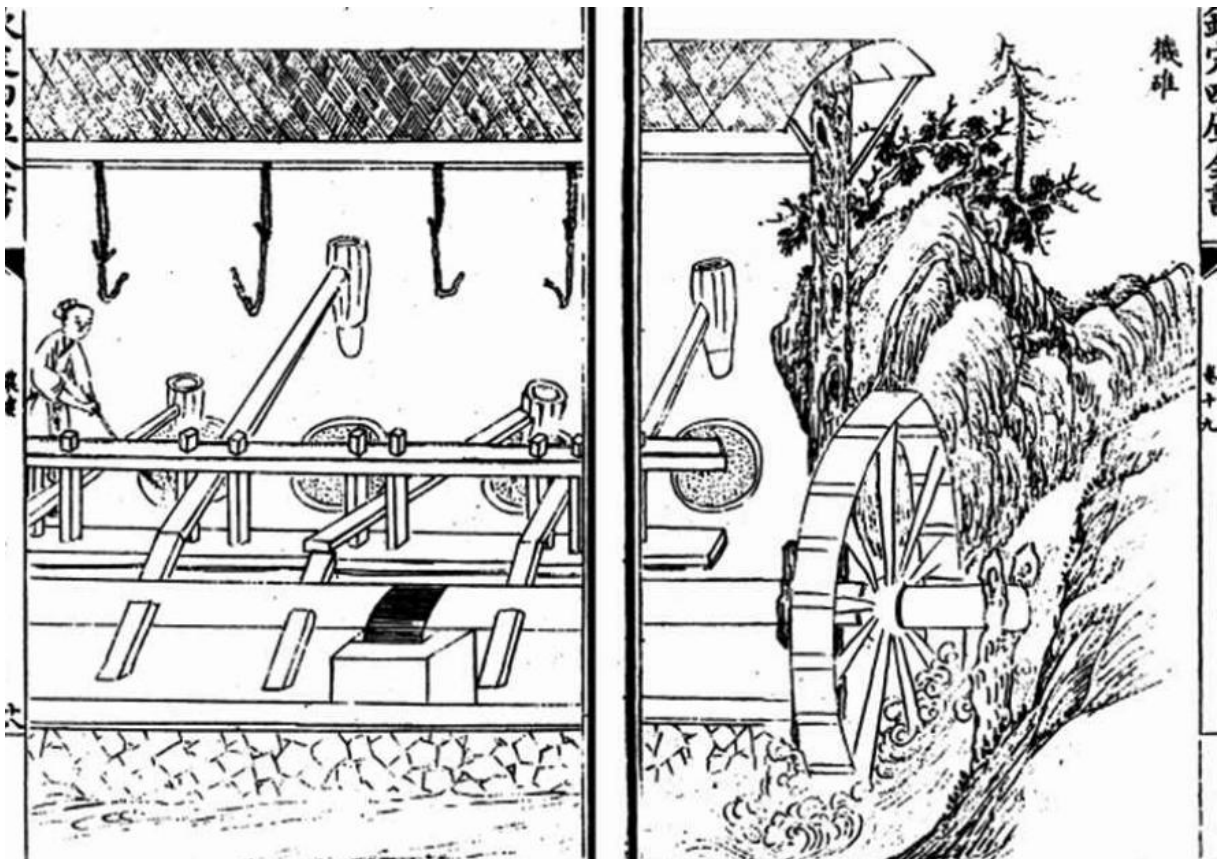


Figura 15: Martillo pilón accionado por un molino de agua en dinastía Yuan.[9]

Por otro lado, en Europa, este principio de funcionamiento se utilizó en múltiples maquinas en el periodo Eotécnico. En la figura 16 se pueden ver 2 ejemplos de ellas. En la figura 16.a, se observa un molino de pólvora accionado por levas en 1596 en Valladolid. Por otro lado, en la figura 16.b, se observa unos fuelles para forja, operados por un árbol de levas y una rueda hidráulica, en 1540.

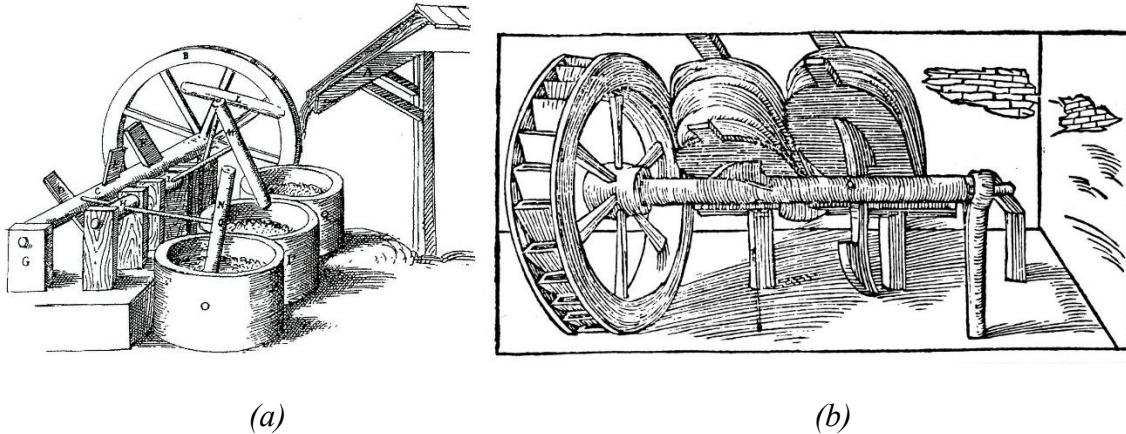


Figura 16: (a) Molino de pólvora (b) Fuelles para forja [10] [11].

Estas tecnologías hidráulicas y mecánicas, características del Renacimiento europeo, fueron ampliamente descritas y sistematizadas en la obra *De Re Metallica* (1556), escrita por Georgius Agricola. Este tratado, considerado una de las principales referencias técnicas de la época, recoge con gran precisión tanto textual como gráfica el funcionamiento de sistemas como martinetes de forja, fuelles operados por levas y ruedas hidráulicas, así como numerosos procesos relacionados con la minería y la transformación de metales. La importancia de *De Re Metallica* radica no solo en su valor documental, sino también en su contribución a la difusión del conocimiento técnico en una etapa crucial de transición entre la Edad Media y la Revolución Industrial.

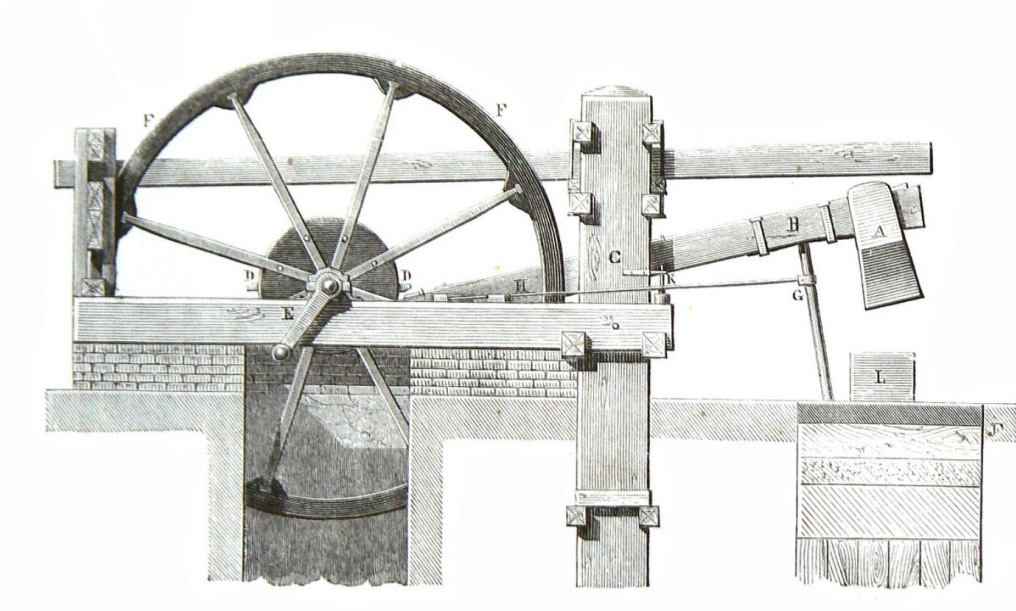
De igual forma, en el ámbito de la forja, durante todo este periodo se utilizó el mismo principio de funcionamiento en los denominados martinetes de forja. Martinete de forja se denomina al tipo de martillo mecánico utilizado en la metalurgia y la herrería para conformar piezas de metal mediante golpes repetitivos, accionado en esta época por un molino de agua.

El uso de un martinete por parte de los monjes cistercienses está atestiguado en escritos de 1135 en la abadía de Clairvaux, y se utilizó durante esta etapa como máquina

de forja hasta 1840, cuando empezó a ser sustituida la energía hidráulica por energía de vapor.



(a)



(b)

Figura 17: (a) Martinete de corceles imagen real (b) Martinete de corceles ilustración [12].

En la figura 17, se puede observar una ilustración de un martinete de forja hidráulico de la época, denominado “Le Martinet de Corcelles”, de 1791. En su funcionamiento básico, la energía hidráulica de la corriente de un río provoca el movimiento giratorio de la gran rueda F, debido a la presión del agua sobre sus álabes. Esta rueda transmite el movimiento a una leva D situada en su eje.

Por otro lado, el brazo B, cuyo eje de rotación está sustentado y fijado por una estructura denominada C, recibe la acción de la leva en su extremo, lo que provoca su

oscilación. Como resultado, el martillo A golpea repetidamente la pieza L, facilitando así el trabajo de forja.

Estos martinetes, a pesar de suponer un gran avance, presentaban importantes desventajas. En primer lugar, cuando se coloca una pieza grande en el yunque, habrá una caída muy pequeña del martillo, produciendo un golpe débil, y viceversa cuando se trabaja con piezas pequeñas. Este diseño no permite ajustar fácilmente la fuerza del golpe según se requiera. Por otro lado, la cara del martillo solo se mantiene paralela a la del yunque en una posición específica, lo que limita el uso para trabajos de distinto grosor sin ajustes continuos, resultando esto en una operación inconveniente y poco eficiente.

Por otro lado, para forjar piezas grandes, se requeriría hacer una máquina de dimensiones completamente inviables. Además, se requiere de un caudal constante de agua y una ubicación específica.

2.5. Martillos en el periodo Paleotécnico y Neotécnico

En gran parte del periodo Paleotécnico (1750-1900), se utilizaron prácticamente la misma configuración de martillos que el periodo Eotécnico, no sienta hasta mediados del siglo XIX, cuando realmente comenzó a desarrollarse el sector de la forja. Es por ello, por lo que se engloban ambos periodos en este apartado, donde se analizará el gran desarrollo en este campo hasta la actualidad.

Los principales avances que se realizaron fue la invención del martillo de tablero y el martillo de vapor. El martillo de tablero con el tiempo quedo obsoleto gracias a la evolución del de vapor. Por otro lado, el uso del vapor con el tiempo desapareció, sustituyéndose por mecanismos neumático e hidráulicos.

2.5.1. Martillos de tablero

Los martillos de tablero en general están constituidos de bastidor (B), chabota (C), utillaje y sistema de accionamiento. El utillaje comprende la maza móvil (M), el yunque (Y) y las matrices superior e inferior, entre las que tiene lugar el proceso de conformado por deformación de la pieza (P), (Figura 18).

El sistema de accionamiento consta de un tablero (T) y de dos rodillos (R y R'). Uno de dichos rodillos (R) está dotado de movimiento giratorio en “toma constante”, mientras que el otro (R') no dispone de accionamiento propio, siendo su objeto el de efectuar el embragado del sistema.

Generalmente estas máquinas son de funcionamiento discontinuo. Se opera sobre un sistema de enclavamiento que asegura la sujeción del conjunto móvil en la posición de elevada. Son, por tanto, máquinas de energía limitada, ya que una vez soltada la maza, no se dispone de la posibilidad de aplicar más energía al proceso de conformado por deformación.

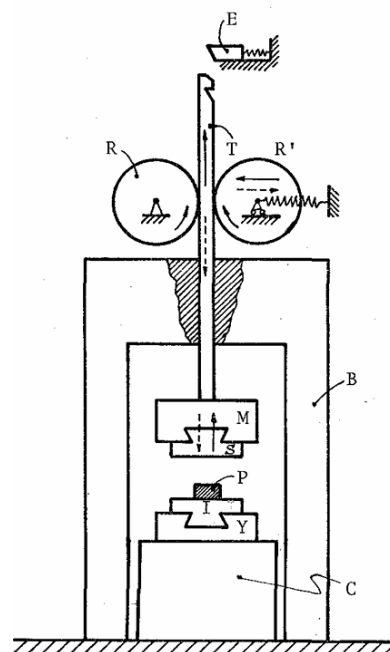


Figura 18: Configuración general del martillo de tablero.[4]

Con esta configuración se solucionaban importantes problemas de los martinets anteriores y supusieron un papel importante para la fabricación de pequeños artículos de hierro y acero, como piezas de máquinas de coser y armas de fuego. No obstante, también este diseño presentaba importantes inconvenientes para su uso industrial:

- Capacidad conforma limitada por la altura de caída
- Precisan de cimentaciones complicadas
- Nivel de ruido muy elevado

- Dificultad de controlar el proceso de conformación
- Peligrosidad en su manejo
- Cadencia de operación lenta

A continuación, se analizarán algunos de los modelos de martillos de tablero más importantes.

2.5.1.1. Martillo de tablero de Merrill's

Según “Directory of American Tool And Machinery Patent” [44], Merrill's Brothers publicaron hasta 8 patentes asociadas con martillos de este tipo, desde 1859 hasta 1926.

Además, Según “Vintage Machinery” [14], en un artículo en 1908 establece el diseño con sus mejoras en el martillo tras 30 años de experiencia con él. En la figura 19.a se observa una ilustración de este martillo mejorado.

El martillo de tablero de Merrill funciona mediante un sistema de rodillos de fricción que sujetan y liberan un tablero de roble al que está unida la cabeza del martillo. El operador controla el mecanismo con un pedal que ajusta la posición de los rodillos mediante una varilla (D) y mangas excéntricas (C). Además, el operario controla un pestillo que puede fijar el martillo a distintas alturas. Cuando los rodillos presionan el tablero, el martillo se eleva; al separarse, cae por gravedad (Figura 19.b).

Además de este modo manual, el martillo podía actuar de modo automático. En el modo de golpes repetitivos, el martillo sube al ser agarrado por los rodillos de fricción. Al alcanzar cierta altura, golpea una proyección en la varilla de caída, lo que separa los rodillos y lo deja caer por gravedad. Este ciclo se repite automáticamente sin necesidad de accionar el pedal, permitiendo una serie continua de golpes.

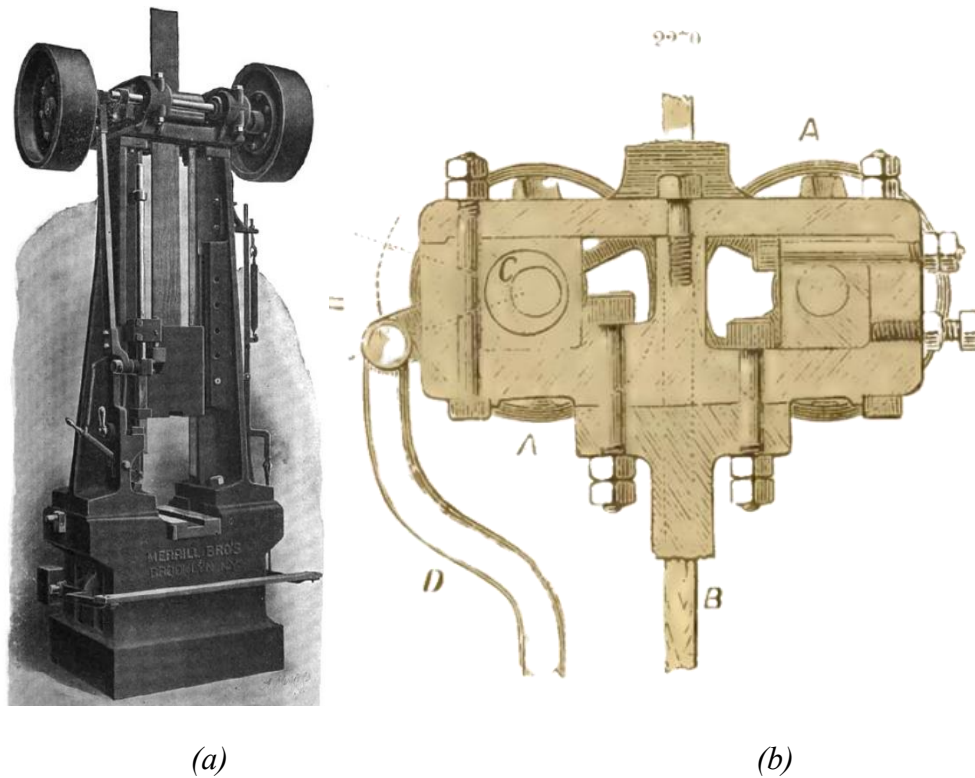


Figura 19: (a) Visión general Martillo de tablero de Merrill's . (b) Corte en sección de Martillo de tablero de Merrill's [13][14]

2.5.1.2. Martillo de tablero de la fábrica de Bliss

Este modelo final de martillo de tablero se patenta en 1889 por “E. W. Bliss Co” tras 7 patentes distintas de modelos similares. [44]

Este martillo también utiliza una tabla que pasa entre rodillos de fricción, pero a diferencia del sistema de Merrill (donde solo una rueda de fricción gira activamente, mientras el otro rodillo cumple la función de ejercer presión), la transmisión del movimiento entre los rodillos se realiza mediante ruedas dentadas, que mantienen una revolución constante en ambas ruedas de fricción y consecuentemente una tracción más uniforme. Para aumentar la presión sobre la tabla y así lograr el agarre, se desplaza uno de los rodillos mediante un sistema excéntrico acoplado a una palanca.

En la figura 20.a, se puede observar una ilustración de la patente donde se observa la implementación de estos rodillos.

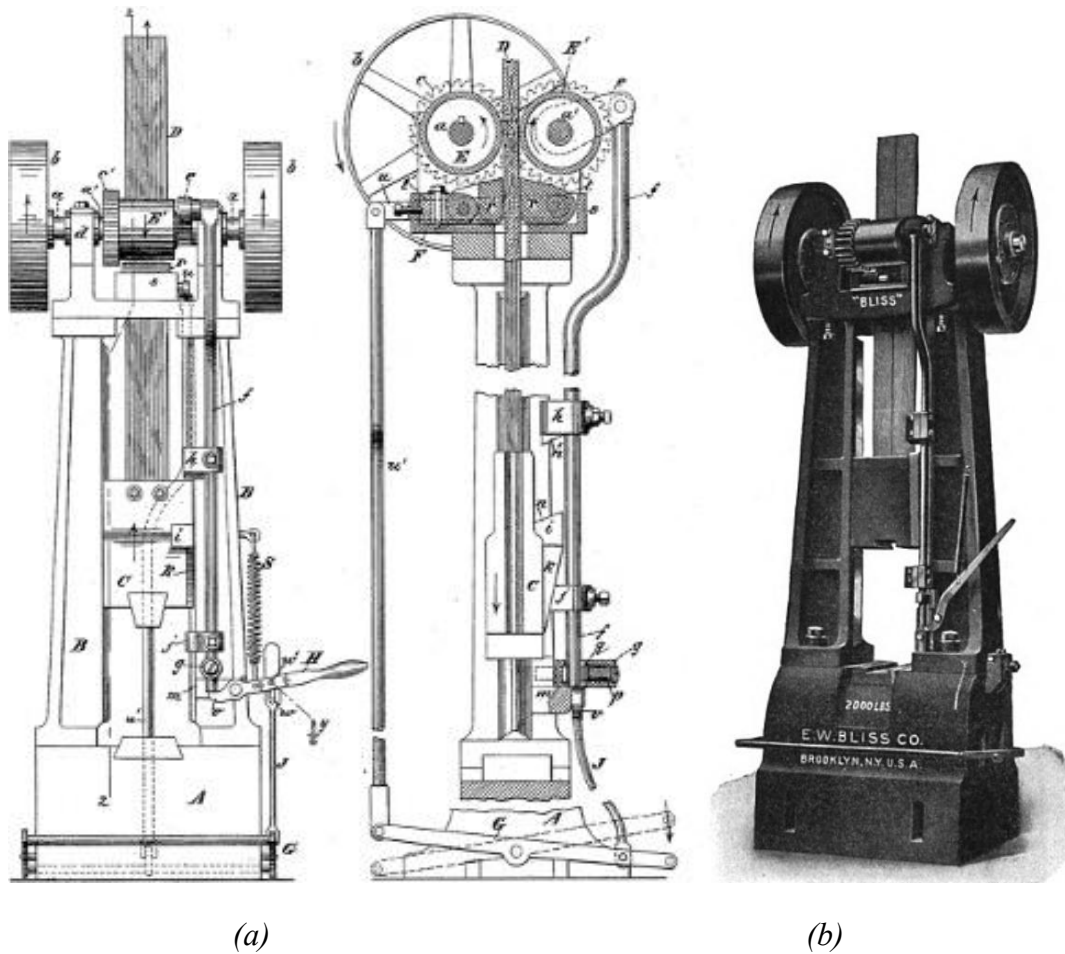


Figura 20: (a) Patente del martillo de E. W. Bliss Co (b) Visión general del martillo de E. W. Bliss Co [15] [16].

Cabe destacar que los primeros diseños de E. W. Bliss Co no incorporan un mecanismo de funcionamiento automático, haciéndolos menos versátiles respecto los de Merrill's Brothers. No obstante, en este modelo mejorado el operario puede controlarlo de forma automática, dar uno o varios golpes a voluntad, controlar cada golpe si así lo desea y puede detener la caída del martillo antes de que llegue a la matriz. Por supuesto se puede también cambiar la altura de caída del martillo.

2.5.2. Martillos de leva

Son una evolución tecnológica mejorada de los martillos hidráulicos de árbol de levas ya comentados en periodo Eotécnico.

Utilizan una leva que empuja o levanta el martillo contra un resorte o colchón elástico. Cuando la leva libera el martillo, la fuerza del resorte se suma a la gravedad, incrementando la velocidad y el impacto del golpe. Esto permite golpes más potentes que los que se obtendrían únicamente con la caída libre.

Las Figuras 21.a y 21.b representan un pequeño martillo de leva, comúnmente utilizado en la forja de ejes, pernos y otras piezas pequeñas.

La transmisión de movimiento se efectúa desde el árbol de levas a la polea motriz (A) y, a través de la rueda de balance (E), se mantiene un movimiento oscilante. El Control del martillo se realiza a través de una palanca de pie (c), conectada a un pestillo (b) mediante una varilla y resorte, y permite arrancar o detener el martillo sin afectar la correa. Todo el mecanismo se asienta sobre un soporte estructural compuesto de maderas (F) reforzadas con un poste (G) que se fija en el suelo, mientras que una placa de hierro fundido (S) une y asegura todos los componentes.

Las Figuras 22.a y 22.b muestran otro tipo de martillo de impacto en el que b es la leva de elevación.

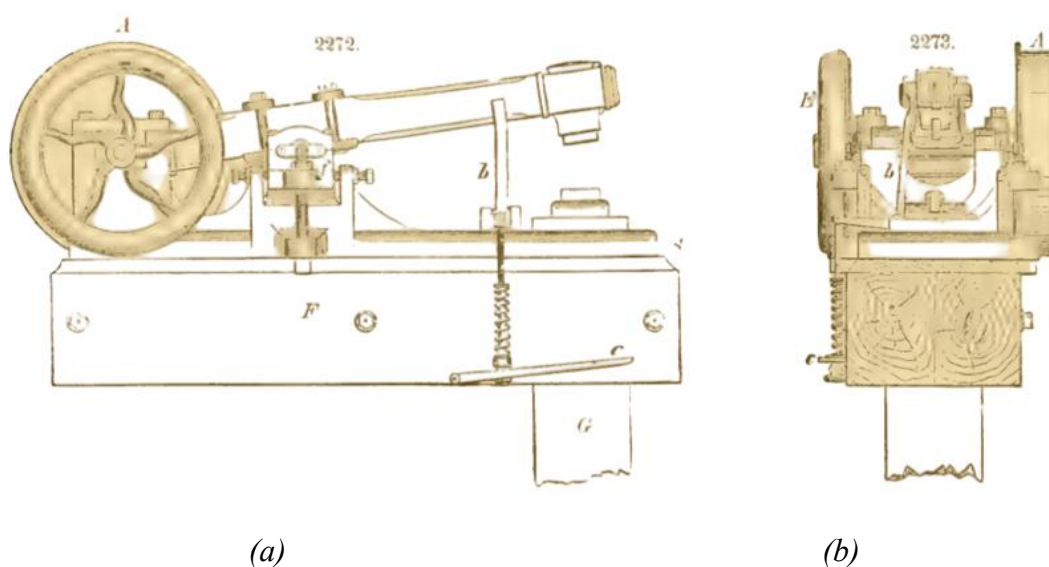


Figura 21: (a) Martillo de leva tipo 1, alzado (b) Martillo de leva tipo 1, perfil [13].

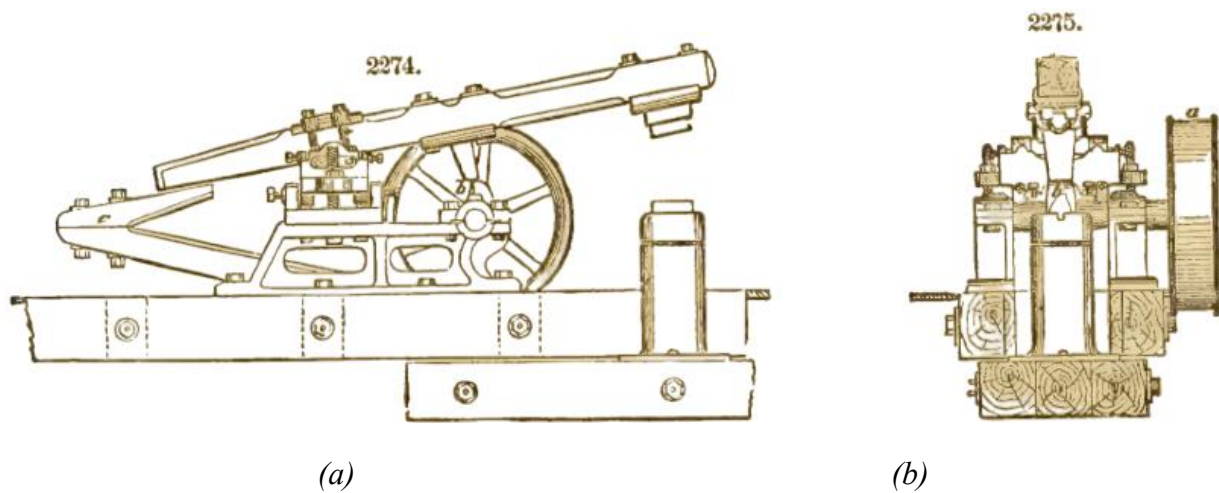


Figura 22: (a) Martillo de leva tipo 2, alzado (b) Martillo de leva tipo 2, perfil [13].

2.5.3. Martillos de golpe seco

En estos martillos, también conexión entre el martillo y el mecanismo que lo impulsa es elástica, de modo que el martillo puede incrementar su velocidad al descender independientemente de la velocidad del mecanismo. Pero, además, estos martillos están diseñados para evitar que el impacto total del golpe se transmita al bastidor y otras partes de la máquina, gracias a una frenada en seco cuando se golpea la pieza a forjar.

2.5.3.1. Palmer Power-Spring Hammer

Este martillo fue inventado por S. L. Palmer (de Waterbury, Connecticut) en 1873.

Se muestra en la Figura 23 una imagen extraída de “Scientific American” en octubre de 1873. [17]

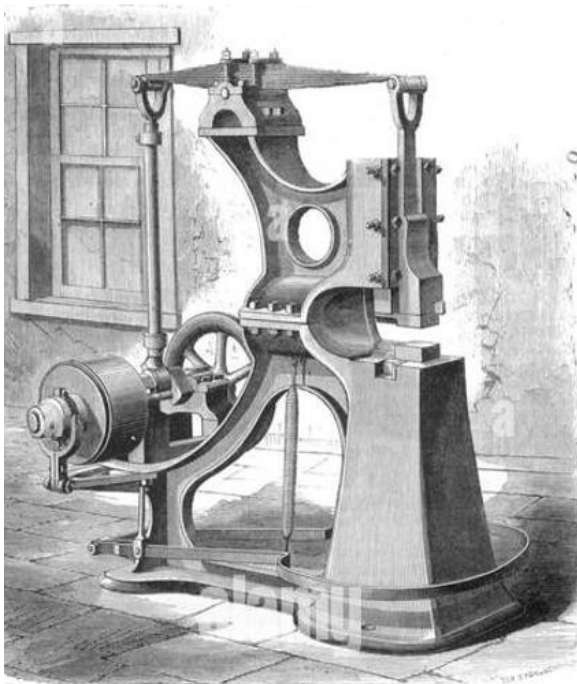
Según establece este artículo, este martillo utiliza la tensión de un fuerte resorte en espiral para generar la fuerza de impacto. A diferencia de otros martillos de su época (que dependían principalmente de la caída libre de un peso), aquí la energía se acumula en el resorte y se libera de manera controlada.

Además, gracias al diseño del martillo se efectúa “golpe seco”, sin rebote. Esta característica reduce vibraciones y mejora la precisión al golpear, ya que el martillo no rebota contra la pieza de trabajo.

El principio de funcionamiento a través del que se consigue este efecto se fundamenta en un sistema de palancas y ejes conectados al martillo. Una vez que el martillo toca la superficie de trabajo, la geometría de las bielas o palancas cambia la relación de fuerzas: en lugar de seguir tirando hacia abajo y luego “devolver” el martillo, el sistema “bloquea” o reduce drásticamente la tendencia a rebotar.

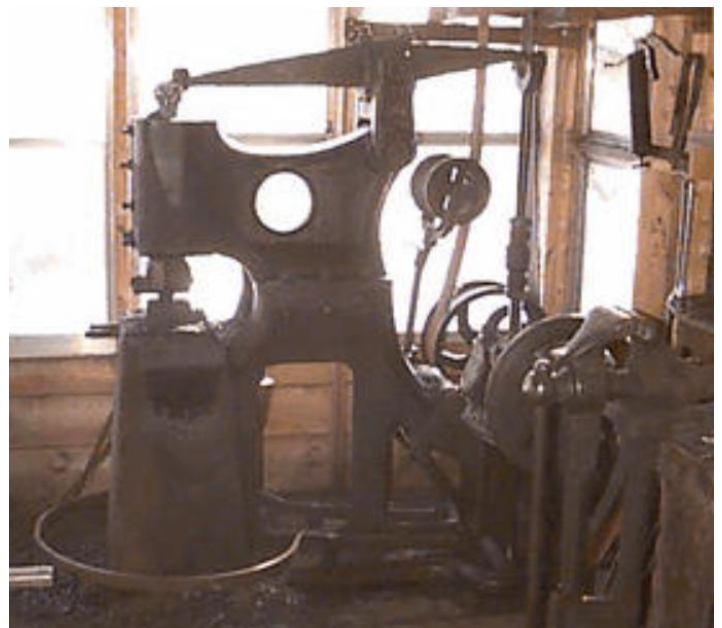
El operario puede aumentar o disminuir la fuerza máxima que se transfiere a la pieza de trabajo, lo que aporta precisión en trabajos de forja, remachado u operaciones similares donde se requiere un golpe más fino o contundente. Por tanto, es un martillo particularmente útil en talleres de forja y otros entornos industriales donde se requiera un golpe controlado y repetitivo.

El efecto golpe seco, mejora la eficiencia y la precisión y también reduce el desgaste de los componentes, al haber menos sacudidas y vibraciones sobre la estructura.



PALMER'S POWER SPRING HAMMER.

(a)



(b)

Figura 23: (a) Ilustración de “Palmer Power-Spring Hammer” en *Scientific American* (b) Imagen real del martillo [17] [18].

2.5.3.2. El martillo amortiguado de Bradley

Desarrollado en 1875 por C. C. Bradley & Son, Inc. NY, fue el primero de 4 modelos diferentes creador por la empresa. Como se observa en la figura X, Se proporcionaron 4 tipos de martillos según los requerimientos necesarios.

**There's a
BRADLEY
HAMMER
for every
need**



The Bradley Cushioned Helve Hammer

More Bradley Hammers are sold each year than all other Power Hammers combined.



The Bradley Upright Helve Hammer

If your work is continuous, like plating, drawing, swaging, collaring, welding or spindle work, with infrequent changes in size of material, or if it is die work where perfect accuracy and the finest finish are imperative, let the Bradley Helve Hammer be your choice. No other Hammer is like it. No other Hammer can equal it.

If your work is of a general, all-around jobbing character, with frequent variations in the size of stock, or is of such a nature that the Hammer is not worked continuously, but with frequent stops, a Bradley Upright Hammer may best answer the purpose. Where floor space is limited but with good height, the Bradley Compact Hammer will give excellent service.

The Bradley Upright Helve Hammer is similar to the Bradley Upright Strap Hammer, but is built for work that is severe and continuous. It has a helve of wood and the ram is carried by a strip of leather belting. Between the ram and helve a rubber cushion takes up the shock and adds life and spring to the blows.

*Write today for specific information.
Separate circulars on each hammer.*

C. C. Bradley & Son, Inc.
SYRACUSE, N. Y.



The Bradley Compact Hammer

Bradley Hammers are made in Helve, Upright Strap, Upright Helve and Compact styles, with heads ranging from 15 lbs. to 500 lbs., and capable of forging iron, steel and other metals from five inches square down. Rubber cushions give force, life and spring to the blows and absorb all the shock and jar. Pressure upon the foot treadle which extends around front and both sides of the Hammer base, brings the idle pulley against the down-traveling side of a continuous running loose belt and sets the Hammer in motion. As the treadle is released a brake stops the Hammer. The speed and force are thus completely under the control of the hammerman.

We make also
Forges for hard coal
and coke.



The Bradley Upright Strap Hammer

Figura 24: Catalogo de martillos Bradley.[19]

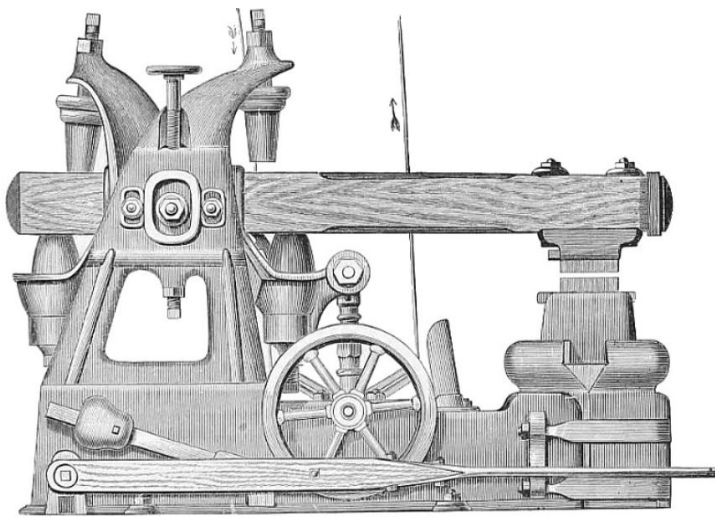
El primero de ellos y más importante, diseñado para trabajos que requieren golpes amortiguados con precisión, tenía un principio de funcionamiento similar a “*The Palmer Power-Spring Hammer*”, donde se efectúa un “golpe seco” amortiguado una vez que el martillo toca la superficie de trabajo, mediante un sistema de palancas y poleas, evitando rebotes y vibraciones en el sistema.

En este caso, el operador también tiene control total del martillo mediante pedal, permitiendo variar la fuerza y detenerlo instantáneamente.

Por otro lado, la empresa garantiza que es más eficiente energéticamente que los martillos de vapor directos, requiriendo menos de la mitad de la potencia para realizar el mismo trabajo y sin riesgo de corrosión o problemas de congelamiento.

Este martillo es adecuado para trabajos intermitentes ya que responde inmediatamente, independientemente del tiempo de inactividad, y está diseñado para elementos a forjar relativamente pequeños.

Además, permite ajustar fácilmente para diferentes pesos de martillo, permitiendo cambiar de 12 a 8 kilogramos en pocos minutos.



(a)



(b)

Figura 25: (a) Ilustración de "Bradley Cushioned Hammer" (b) Fotografía de "Bradley Cushioned Hammer" [20] [21].

2.5.3.3. El martillo neumático M. Chenot

El martillo neumático fue inventado por M. Chenot y exhibido en la Exposición Internacional de Francia de 1878. No obstante, en la figura 26, se muestra una vista en sección de una versión mejorada del martillo atmosférico.

Cuando la manivela A asciende, arrastra consigo los pistones B y C. El pistón B provoca una expansión en la cámara 1. El pistón C comprime el aire en la cámara 2, generando una expansión o vacío parcial en la cámara 3. Estos efectos combinados hacen que todo el cilindro D se eleve, elevando así el martillo E.

El cilindro D continúa su rápido movimiento ascendente hasta que la manivela supera el punto F. Luego, la acción combinada del cilindro en ascenso y los pistones en descenso produce una fuerte compresión del aire en las cámaras 1 y 3. Al expandirse, este aire impulsa el cilindro y el martillo hacia abajo con gran fuerza sobre el yunque.

Sin el cojín de aire intermedio que siempre está presente entre las piezas en movimiento, esta máquina estaría expuesta a impactos severos y dañinos. Sin embargo, dichos impactos parecen ser evitados gracias al mecanismo descrito. El movimiento del martillo es controlado mediante un mecanismo conectado a un freno.

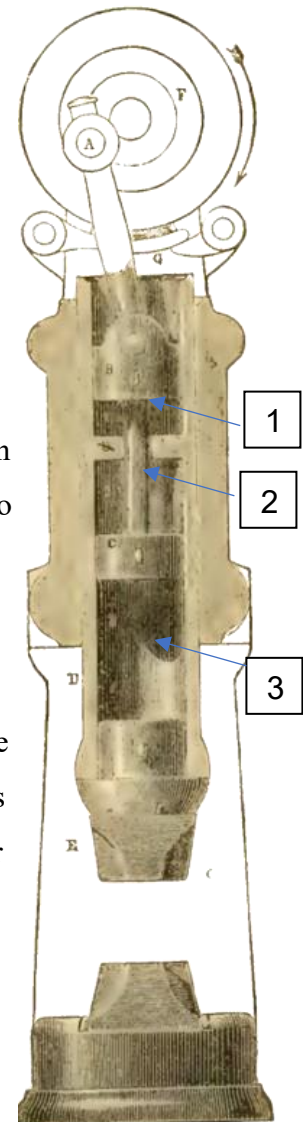


Figura 26: Vista en sección del martillo neumático de M. Chenot [13]

2.5.4. Martillo de vapor (Acción directa)

La introducción de un cilindro de vapor para impulsar el martillo supuso un gran salto tecnológico en los procesos de forja, ya que estos dispositivos aprovechan la presión del vapor para elevar el martillo y para “asistir” el golpe, pudiéndose regular la fuerza de manera mucho más precisa que con mecanismos puramente mecánicos.

Gracias a ello, se reducen las vibraciones sobre la estructura, se eliminan complejos sistemas de transmisión y se obtiene un martillo más versátil, donde cada golpe puede controlarse de forma independiente ajustando la intensidad.

Además, la capacidad del martillo depende de la presión de vapor en el cilindro, lo que permite aumentar el tamaño de los elementos a forjar y aumentar la elevación vertical respecto a sus predecesores.

Al ser el martillo de vapor objeto de estudio en este proyecto de vapor y por tanto el más importante, se realizará en este apartado una estructuración cronológica y detallada del contexto y de los acontecimientos que llevaron a su desarrollo y evolución.

2.5.4.1. Primeras concepciones de James Watt y William Deverell

James Watt, un prestigioso ingeniero conocido por su participación en el desarrollo de la máquina de vapor, con fecha del 28 de abril de 1784, publicó una patente donde se describe "Martillos pesados o estampadoras, para forjar o estampar hierro, cobre u otros metales, u otras materias sin la intervención de movimientos rotativos o ruedas, fijando el martillo o estampadora para que funcione de tal manera, ya sea directamente sobre el pistón o la varilla del pistón del motor".

Por otro lado, un ingeniero llamado el Sr. William Deverell, el 6 de junio de 1806, publicó una patente de un martillo de vapor donde se describe que el sistema funciona generando vapor en una caldera, que se introduce debajo de un pistón en un cilindro, elevando un martillo unido a la varilla del pistón. Luego, se libera el vapor, creando un vacío o permitiendo que el aire comprimido en la parte superior del pistón empuje el martillo hacia abajo con fuerza proporcional a la presión ejercida.

Ambos documentos describen indudablemente el principio de funcionamiento del martillo de vapor de acción directa. No obstante, no se tienen documentos ni registros que determinen que estas ideas fueron llevadas a la práctica ni se materializaron en un proyecto real.

2.5.4.2. James Nasmyth y su primera concepción del martillo de vapor

James Nasmyth fue un ingeniero mecánico británico del siglo XIX, el cual provenía de una familia con talentos artísticos y mecánico, donde su padre era pintor y diseñador de puentes.

Estudió en la Escuela de Artes de Edimburgo (1821-1826) y desde joven mostró grandes habilidades en ingeniería, diseñando un expansómetro en 1826 y un carruaje de vapor en 1827.

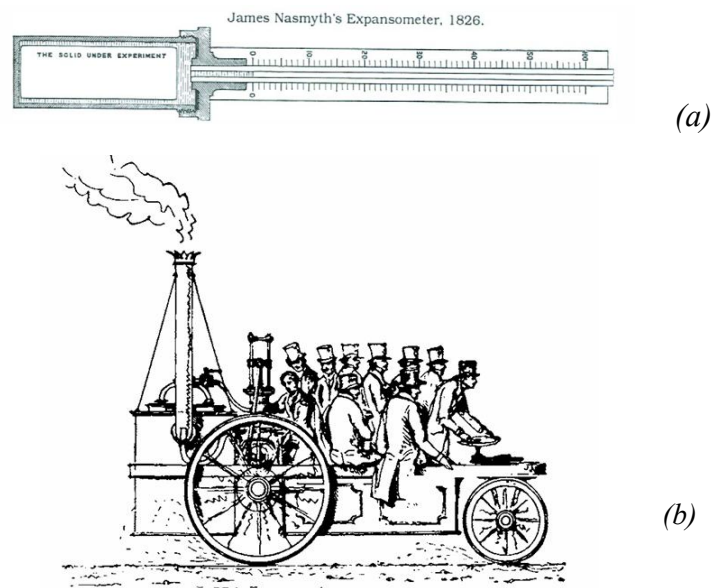


Figura 27: (a) Ilustración de expansómetro de Nasmyth (b) Ilustración del carruaje de vapor de Nasmyth [24].

A los 20 años, impresionó con sus modelos e instrumentos al importante ingeniero británico Henry Maudslay, conocido por ser un gran innovador en las máquinas herramienta, y se convirtió en su asistente.

Tras la muerte de su maestro en 1831, Nasmyth trabajó con otro ingeniero llamado Joshua Field. Luego con el paso del tiempo decidió establecer insatisfactoriamente su propio negocio en Manchester. No obstante, se desplazó posteriormente a Patricroft, donde fundó la Bridgewater Foundry en 1836, una compañía que se especializaría en la producción de maquinaria pesada y locomotoras. Aquí destacó por su innovación con el diseño de una cuchara de fundición segura.

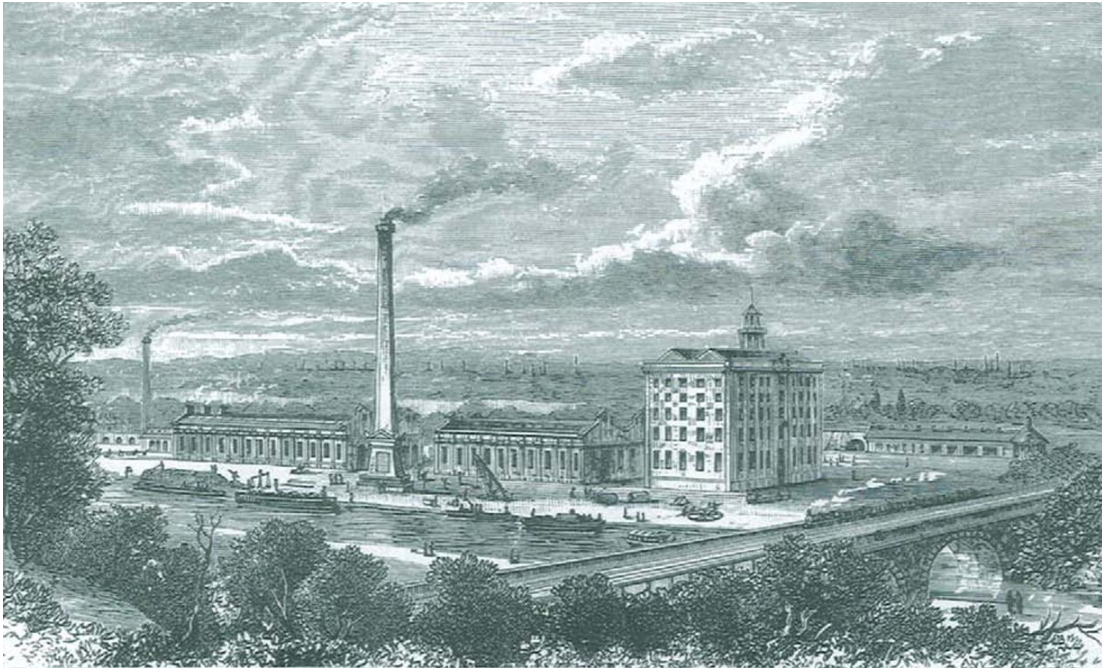


Figura 28: Ilustración de Bridgewater Foundry, en Patricroft [24].

En 1837, la compañía encargada de operar el primer servicio regular de vapor transatlántico, denominada “*Great Western Steam Ship Company*” envió al ingeniero Francis Humphries (diseñador de grandes motores de barco) a consultar al Sr. Nasmyth sobre herramientas de ingeniería de tamaño y potencia inusuales, para construir los motores del transatlántico “*Great Britain*”, donde la compañía de Nasmyth suministró las herramientas más importantes. No obstante, durante la fabricación, surgió un problema con el enorme eje de paletas necesario para los motores, ya que ninguna empresa aceptó forjarlo debido a su tamaño sin precedentes.

El ingeniero Francis Humphries escribió a Nasmyth en 1839, preocupado por la falta de un martillo de forja lo suficientemente potente. Esto llevó a Nasmyth a reflexionar y concluir que el problema radicaba en la limitada amplitud y potencia de los martillos tradicionales, lo que impedía forjar piezas de gran tamaño.

En este contexto, cabe incidir en la configuración de los martillos de forja utilizados en 1939, generalmente tenían la configuración expuesta en el apartado 2.5.2 sobre martillos de leva. La fuerza necesaria para ponerlos en funcionamiento tenía que transmitirse de una manera muy indirecta. Ya fuera una rueda hidráulica o una máquina de vapor la fuente de energía, la acción de levantar y dejar caer el martillo debía producirse mediante el uso de un movimiento rotatorio, lo que hacía necesario emplear ruedas, ejes, levas y otros elementos voluminosos.

Además, como se ha comentado previamente, el rango de caída de la cabeza del martillo era muy limitado en proporción a las grandes dimensiones del martillo, y si se colocaba una pieza grande en el yunque, la caída del martillo disminuía, produciendo un golpe muy débil y haciéndose inservible para un tamaño determinado de piezas a forjar.

Por otro lado, no se podía ajustar la fuerza del golpe según se requiera y la cara del martillo y del yunque no eran paralelas, lo que limita el uso para trabajos de distinto grosor sin ajustes continuos de la posición de la pieza, resultando esto en una operación muy poco eficiente.

Nasmyth analizó este contexto, y poco después de recibir la carta de Francis Humphries, ideó y esbozó un diseño de un martillo de vapor en el que un bloque de hierro pudiera elevarse a suficiente altura y caer guiado con precisión sobre el material a forjar. Este diseño estaba básicamente formado por un yunque, un bloque de hierro como martillo y un cilindro de vapor invertido para levantar y soltar el bloque con precisión. Este boceto se puede observar en la figura 29.

Se desconoce si Nasmyth tenía conocimiento previo o se inspiró en las propuestas de James Watt y William Deverell.

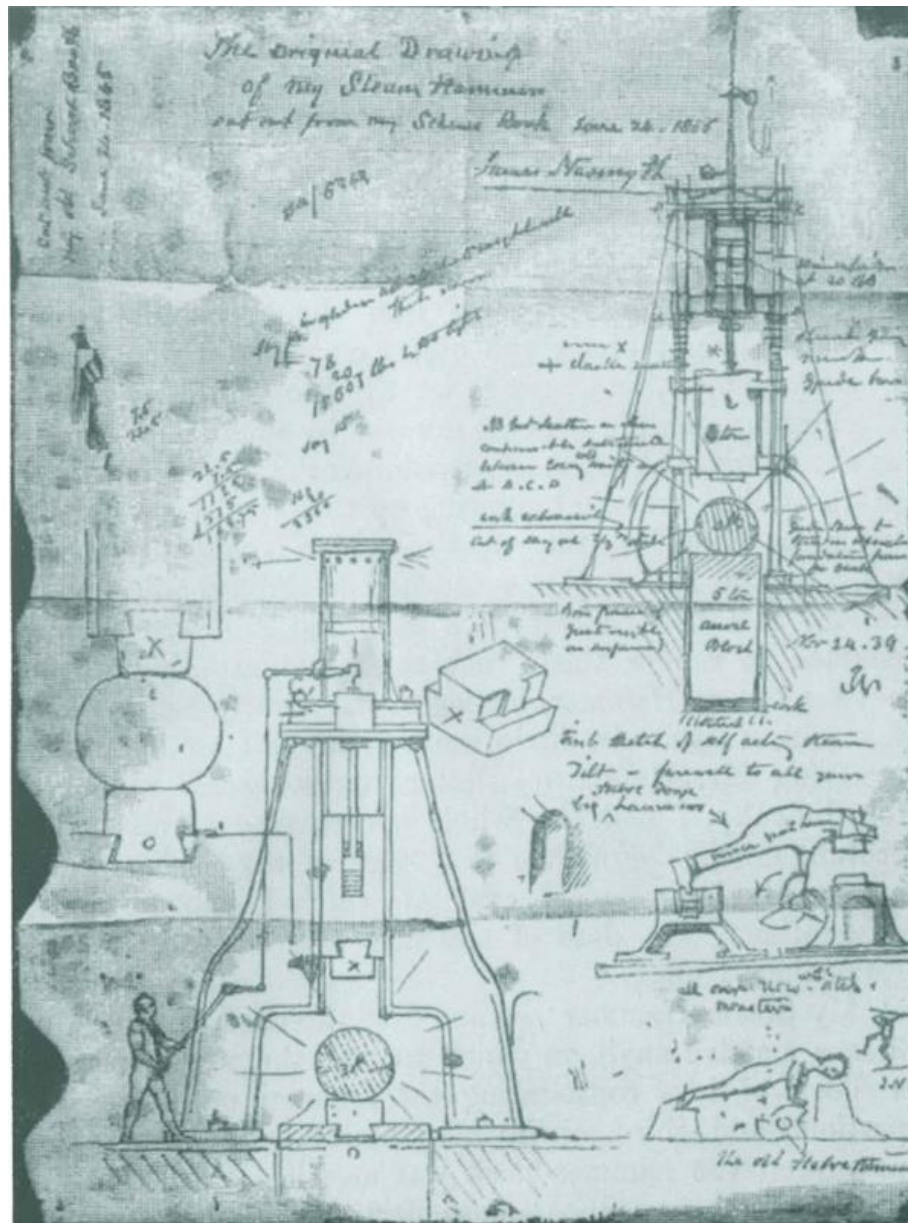


Figura 29: Primer boceto del martillo pilón por James Nasmyth en 1839 [24].

Nasmyth envió su boceto a Humphries, quien lo mostró a los ingenieros y directivos de la compañía y aprobaron la idea de construcción de este martillo para forjar el eje del barco. Sin embargo, el eje nunca se forjó, ya que en ese momento la hélice de tornillo comenzó a tener gran éxito y a reemplazar las ruedas de paletas en los barcos de vapor, descartarse los grandes motores de Humphries.

No obstante, la idea de Nasmyth ya había sido concebida, por tanto, Nasmyth escribió a todas las grandes firmas, instando sobre su superioridad en comparación con cualquier otra herramienta para trabajar el hierro. A pesar del reconocimiento del

invento, la industria atravesaba una mala época y no tenía suficientes pedidos para añadir nuevos martillos, por lo que nadie quiso financiarle.

Además, Mr. Nasmyth no contaba con suficiente capital para financiar la patente el mismo, por lo que tuvo que esperar.

2.5.4.3. Martillo de vapor de François Bourdon

En el contexto descrito anteriormente, M. Schneider, de las fundiciones de hierro de Creusot, en Francia, visitó las instalaciones de Patricroft junto con su mecánico M. Bourdon, con la intención de encargarse algunas herramientas a la empresa. Mr. Nasmyth se encontraba ausente, y su socio, en acto de cortesía, les mostró los planos del martillo de vapor de Nasmyth y les explicó que ninguna empresa quería adoptar su construcción. Estos quedaron impresionados, y Bourdon tomó detalladas notas del boceto, sin que Nasmyth tuviera conocimiento de ello.

En abril de 1843, Mr. Nasmyth visitó las instalaciones de Creusot en Francia. Su sorpresa fue mayúscula cuando pudo ver un martillo de vapor, diseñado y construido por François Bourdon en pleno funcionamiento. Este diseño de Bourbon se puede observar en la figura 30, y fue inequívocamente el primer martillo de vapor de la historia construido.

No obstante, su diseño era aún muy primitivo e imperfecto. Nasmyth propuso a Bourdon mejoras en su diseño que este aplicó de inmediato.

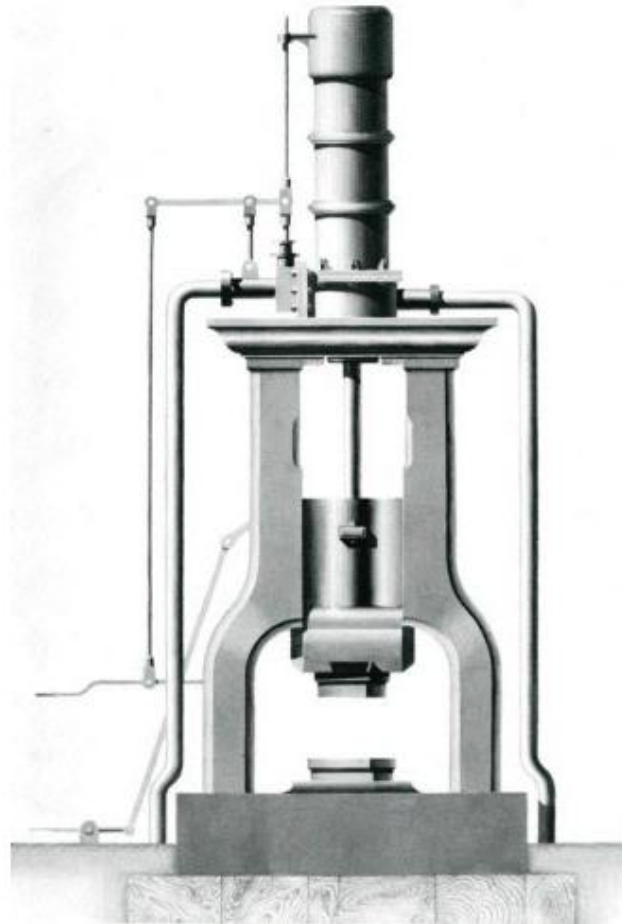


Figura 30: Ilustración del primer martillo de vapor de François Bourdon [25].

2.5.4.4. Martillo de vapor de Nasmyth

Al volver a Inglaterra, Mr. Nasmyth, que vio peligrar su propiedad intelectual debido al proyecto de Bourdon, consiguió los fondos necesarios para asegurar la patente de su diseño en 1843.

El primer martillo de vapor de Nasmyth, fue construido en Patricroft, y revolucionó la mecánica por su precisión, facilidad de uso y versatilidad. Permitió aumentar la producción, reducir costos y mejorar la calidad del forjado, facilitando la fabricación de grandes piezas que antes requerían un enorme esfuerzo. Se muestra en la figura 31 una ilustración de su diseño.

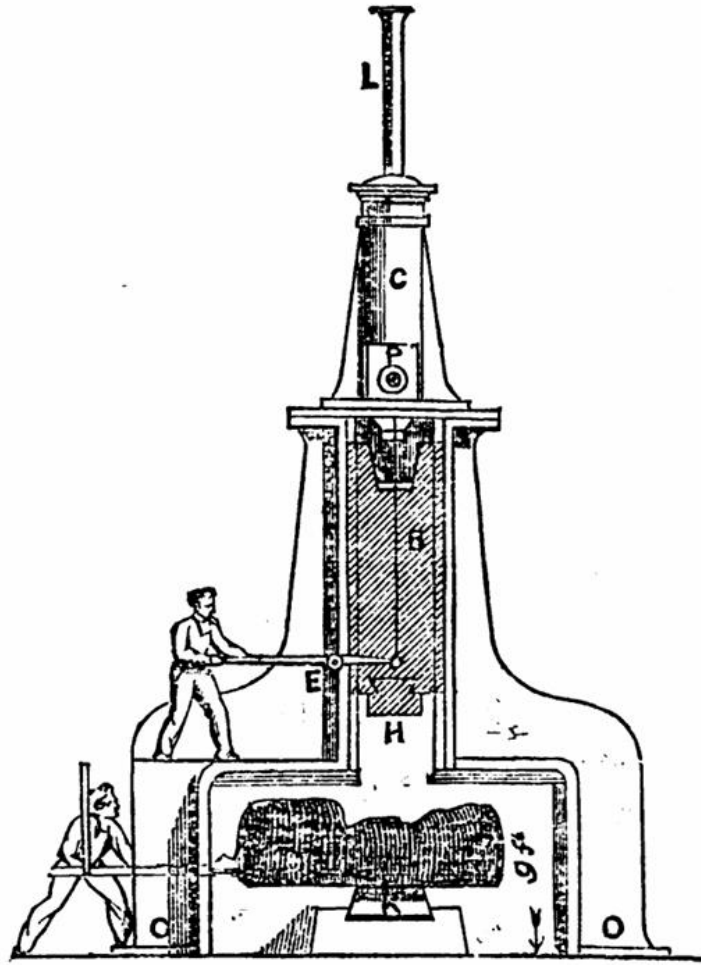


Figura 31: Primer martillo de vapor diseñado y construido por James Nasmyth [26].

Aunque claramente supuso una gran mejora respecto a sus antecesores, tenía importantes deficiencias. Funcionaba con una válvula ordinaria conectada a una palanca, y requería un gran esfuerzo del operario para accionar la palanca debido a la presión del vapor. Este sistema podía servir para martillos pequeños, pero no para los de mayor tamaño requeridos en fundiciones, donde se necesitaría una fuerza de 4500 kg para desplazar las válvulas, algo completamente inviable.

Por otro lado, no tenía un funcionamiento automático, requería el control constante del operario abriendo y cerrando la válvula con la palanca, convirtiéndolo en un trabajo muy tedioso e ineficiente.

Esta situación supuso una cancelación de un pedido de un martillo de grandes dimensiones encargado por la empresa Hird Dawson, a no ser que se implementa un mecanismo que regulara la altura y permitiera un trabajo automático del martillo.

Ante esta situación, James Nasmyth intentó reiteradamente implementar un sistema que cumpliera con estas premisas, pero sin éxito. Uno de los diseños ideados, se muestra en la figura 32, donde Nasmyth implementaba un sistema con dos levas. Sin embargo, la idea no tuvo éxito y nunca llevo a implementarse en un martillo real.

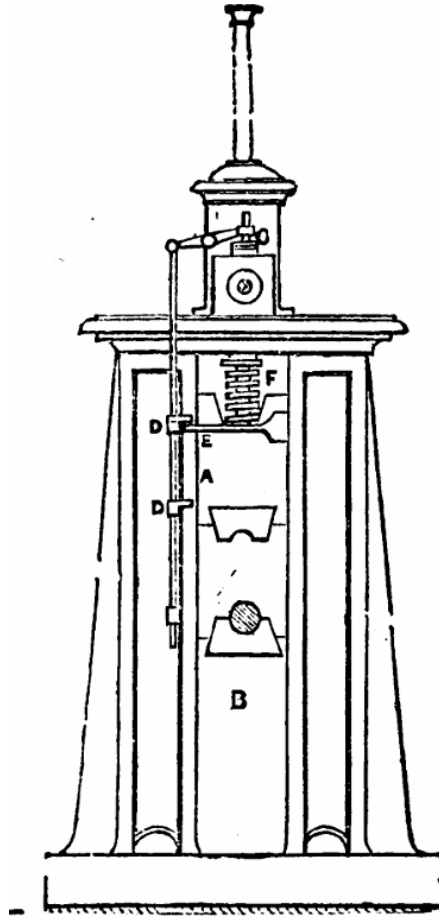


Figura 32: Ilustración del modelo diseñado sin éxito por James Nasmyth para automatizar y controlar el martillo [26].

2.5.4.5. Martillo consolidado de Nasmyth con automatización de Robert Wilson

En este contexto, el socio de Nasmyth recurrió a Robert Wilson, gerente de la fábrica, para que encontrara una solución al problema. En una sola semana, Wilson diseñó y ensambló un mecanismo funcional con éxito en un martillo pequeño donde anteriores pruebas de Nasmyth habían fracasado.

Este avance fue el que realmente consolidó el martillo de vapor de Nasmyth, ya que permitió un control preciso del martillo, eliminando la necesidad de esfuerzo manual. Por otro lado, se solucionó el problema de la regulación de la altura, pudiéndose aplicar golpes de cualquier intensidad con tan solo girar una manivela. Además, el martillo podía trabajar de forma automática.

El control del martillo era tal, que, a modo de entretenimiento, se solía colocar una copa de vino con un huevo, parase golpear el huevo suavemente sin romper su cascara, para posteriormente da un golpe tan intenso que desintegrarse la copa y el huevo.

Por si esto fuera poco, el mecanismo de Wilson tenía una peculiaridad, y esta era que permitía trabajar en dos modos distintos de funcionamiento, pudiendo cambiar de modo suave de funcionamiento a potente con tan solo elevar una palanca.

En agosto del mismo año 1843, ya se estaba empezando a comercializar este modelo, distribuyéndose en poco tiempo modelos por todo el país. Esto supuso realmente un avance en la industria, mejorando inmensamente los trabajos de herrería y forja y suponiendo mejoras en productividad, eficiencia y motor de economía. Este modelo se implementó en poco tiempo en todas las grandes empresas de ingeniería, el gobierno lo introdujo en astilleros y se comenzó a exportar al extranjero.

En 1846, Nasmyth publicó una actualización de su patente donde introducía el mecanismo de automatización, y en 1847 otra patente donde presenta en tora patente un plano del diseño comercializado, el cual era controlado y automatizado por el mecanismo de R. Wilson.

Este modelo, debido a su gran importancia frente al inicial, es el que se modeliza en el presente proyecto, y se analizará su funcionamiento pormenorizada y detalladamente en el siguiente capítulo.

Este modelo de gran importancia histórica se mantuvo en esta condición, a excepción pequeñas modificaciones, durante más de 10 años, hasta 1964.

No obstante, según toda la documentación disponible, se llega a la conclusión de que existen distintas variaciones de construcción del modelo de martillo, fabricándolos a distintos tamaños y con pequeñas modificaciones según los requerimientos del cliente.

Versión 1

En las figuras 33.1 y 33.b, se observa el primer martillo que se tiene constancia que se fabricó, la cual fue publicada en “*The Machinist Assintant*” en 1847 [27], siendo la fecha más temprana de la que se tienen restos de modelos.

El libro menciona que los planos están ejecutados tal y como se construye en la fecha de publicación del libro (1847) en fábrica de Patricroft, en las inmediaciones de Manchester. El modelo escogido es de 30 quintales británicos (1524,07 kilogramos), aunque se fabricaron otras versiones de otros tamaños, adaptándose a las necesidades del cliente. Este modelo de 1524,07 kilogramos se utilizaba para consolidación de bolas de hierro en bruto los talleres de Gartness de la compañía Monkland Iron Company.

Para esta tarea, el martillo de vapor fue especialmente adecuado, ya que en los primeros martillazos puede dar golpes intensos y lentos, dando a la bola de hierro en bruto una forma cúbica precisa y, posteriormente, aplicar golpes enérgicos y suaves que aseguren la completa expulsión de toda la escoria y otras impurezas no metálicas. La ausencia de estas impurezas, en mayor o menor medida, es un factor determinante en la calidad del hierro forjado.

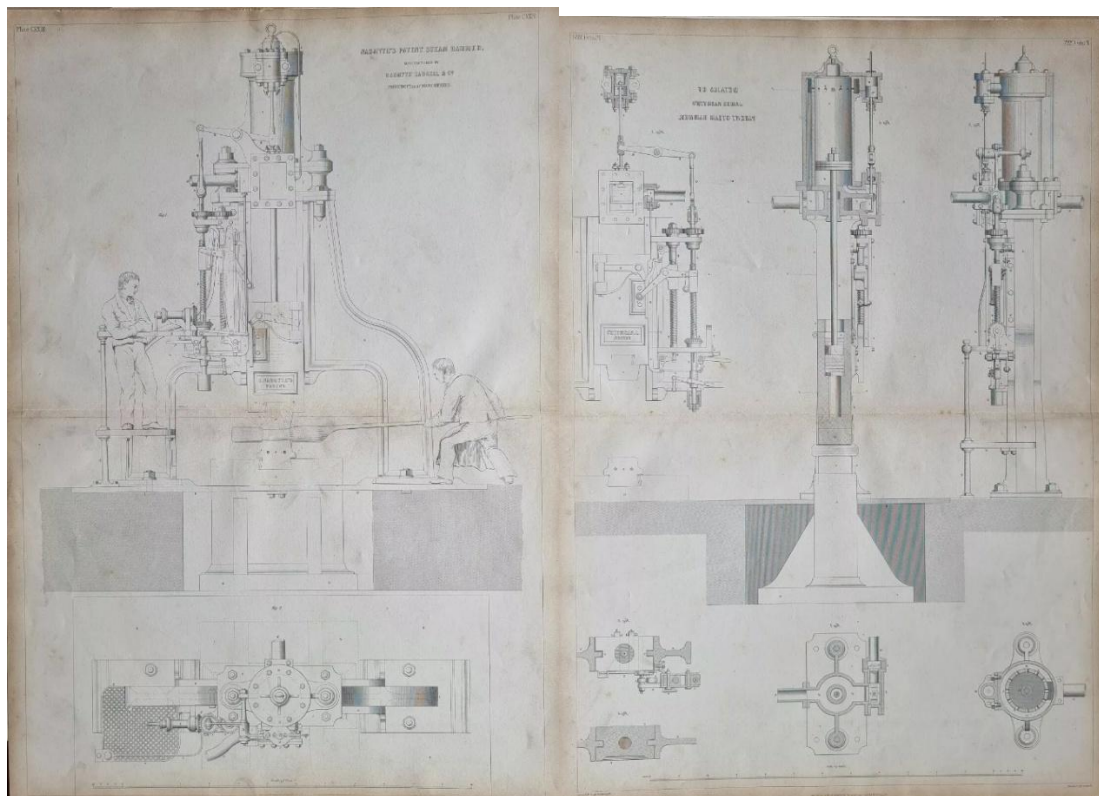


Figura 33: (a) Planos detallados del martillo automatizado y controlado mediante el mecanismo del Wilson [27].

Por motivos de conservación del patrimonio cultural original, esta será la versión que se modelará en el capítulo 3 mediante SolidWorks. En la figura 33.a se pueden observar los planos detallados del modelo.

Versión 2

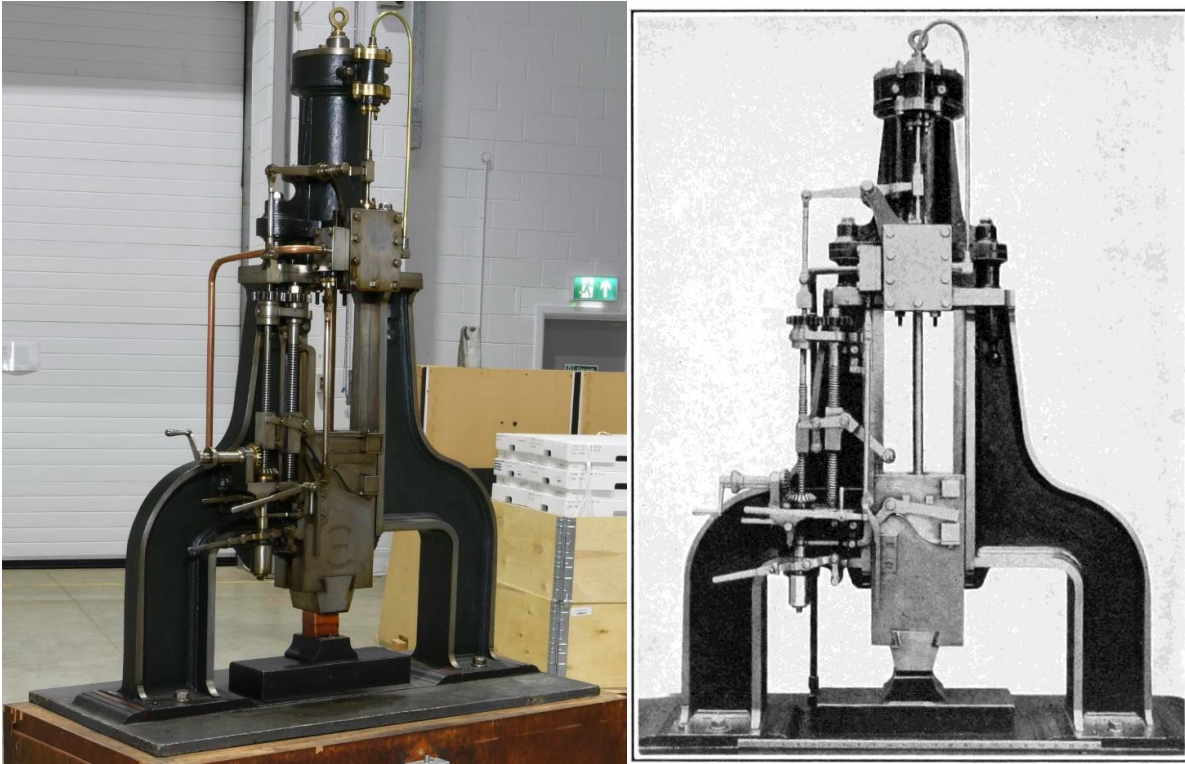
En las figuras 34 se muestra el mismo martillo con leves variaciones. La figura 33.a muestra una maqueta representada a escala del martillo en el Science Museum de Londres, donde se indica que este martillo se construyó desde 1843. Por otro lado, en la 33.b, se muestra una fotografía real de la época.

La fotografía tiene una regla que marca la distancia entre las dos alas interiores del martillo, la cual marca 24 pulgadas, lo que equivale a 610 mm. Esta distancia en la versión 1 era de 2130 mm, lo que se resume a que esta versión es 3,5 veces más pequeña.

Por tanto, se puede estimar que se trata de un modelo contemporáneo al de la versión 1 mencionado anteriormente, pero adaptado en una versión más reducida, y sufre ciertas modificaciones acorde a ello:

Las principales modificaciones que se observan en las imágenes son las siguientes:

- Ausencia de plataforma para el operario: Sería innecesaria para un tamaño reducido de martillo, que sería perfectamente operable desde el suelo.
- Modificaciones en las dimensiones de las palancas: Ya que esta versión es más reducida, las palancas se ajustan para que sean más manejables por el operario.
- Ausencia de guía o carril delantero: Debido a que al ser más pequeño sufriría menos esfuerzos, se prescindía del carril o guías de las tuercas delantero.
- Otras pequeñas modificaciones de diseño para adaptar el martillo a las reducidas dimensiones.



(a)

(b)

Figura 34: a) Modelo a escala del de martillo de vapor de Nasmyth del Science Museum b) Fotografía del martillo de la época [38][39].

Versión 3

La tercera variación del modelo que se ha encontrado se observa en las imágenes 35.a y 35.b. En 35.a vemos al propio Nasmyth trabajando con uno de sus martillos en su fundición de Bridgewater en 1855, mientras que en fotografía 35.b es una fotografía tomada en “The Great Exhibition” en 1851.

Si se observa detenidamente, se pueden observar pequeñas diferencias en el diseño respecto la primera variante. Debido a que están datados de fechas significativamente posteriores y la naturaleza de estas modificaciones, se entiende que no solamente fueron adaptaciones de tamaño o requisitos, sino rediseños y mejoras que buscaban mejorar el funcionamiento del martillo. Estas diferencias se desarrollarán con más profundidad en el capítulo 2, pero fundamentalmente sufre modificaciones en la manivela, guía o carril delantero, cambios significativos en la amortiguación de la varilla y modificaciones en las palancas y la forma del bastidor.

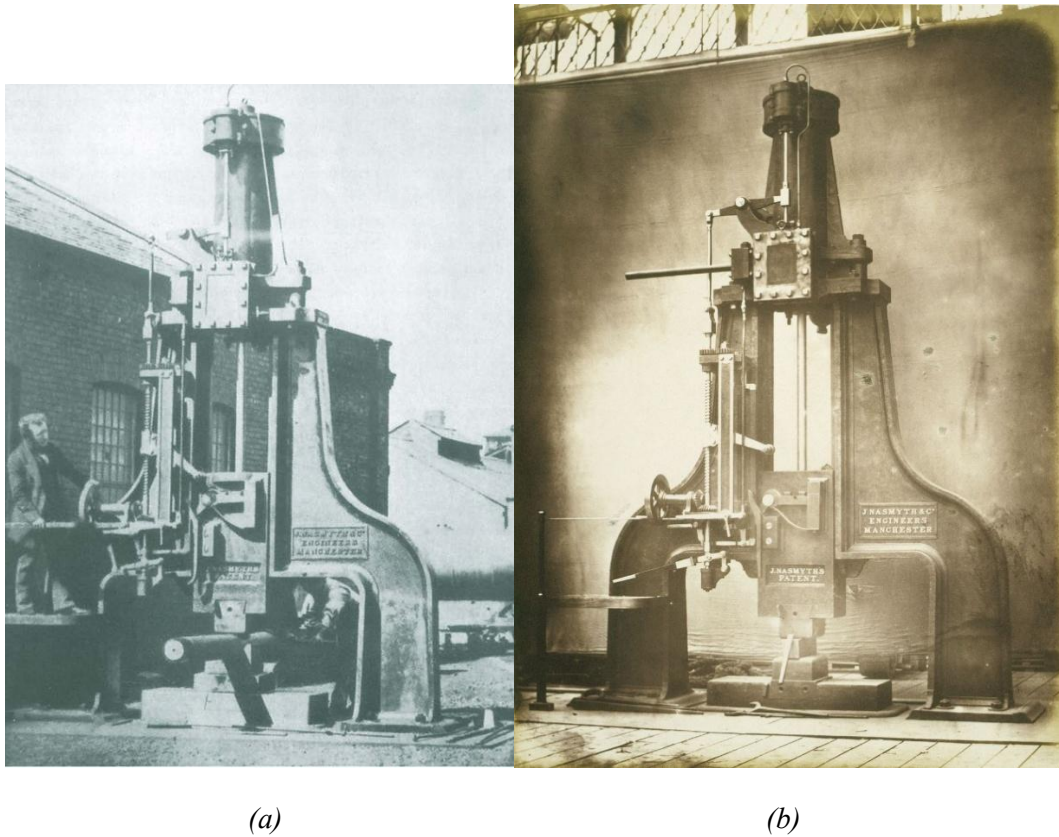


Figura 35: a) Fotografía real del martillo de vapor de Nasmyth en 1855 b) Fotografía real del martillo de vapor de Nasmyth en 1851 [24] [28].

Versión 4

Por último, el ejemplar que se expone en Science Museum, Londres, que data de 1850, se puede observar en la figura 36. Esta se trata de una versión de un martillo pequeño, de una altura aproximada de 2,4 m, mucho menor que los casi 4,8 metros de altura de la primera versión. Debido a su fecha de construcción, fue contemporáneo al de la versión 3, y lleva las principales mejoras de estos.

No obstante, debido a su reducción en tamaño, implementa ciertas modificaciones respecto a la versión 3, que se analizarán más detenidamente en el capítulo 2, y que fundamentalmente son la eliminación de una guía, inversión de la posición de la palanca tope y modificación de la forma del yunque. En este caso también se eliminaba el soporte del operario ya que el martillo era muy reducido y no era necesaria.



Figura 36: Martillo de vapor de Nasmyth conservado actualmente en Science Museum en Londres [29].

2.5.4.6. Innovación de Wilson (Válvula deslizante balanceada)

La mejora introducida por Wilson al martillo de vapor de Nasmyth en 1856 consistió en la creación de la denominada "Válvula Deslizante Balanceada". Esta innovación eliminó la presión ejercida sobre la válvula al permitir que flotara en una atmósfera de vapor equilibrada, facilitando su movimiento con un mínimo esfuerzo.

Gracias a esta mejora, el operario podía ajustar instantáneamente la intensidad de cada golpe con un simple movimiento manual. Esto hizo que el martillo fuera más eficiente, sencillo y económico en mantenimiento.

En principio se aplicó a la primera versión de Nasmyth pudiendo reutilizar estos martillos ya obsoletos. Pero, respecto al primer mecanismo de regulación y automatización de Wilson, era mucho más sencillo este mecanismo, y la regulación de la

altura era mucho más rápida, por lo que se acabó adoptando de forma generalizada en toda la industria.

En la figura 37, se puede observar el diseño de un martillo de dos toneladas y media, equipado con la válvula equilibrada circular del Sr. Wilson y accionado mediante un mecanismo manual que hacia su uso muy sencillo.

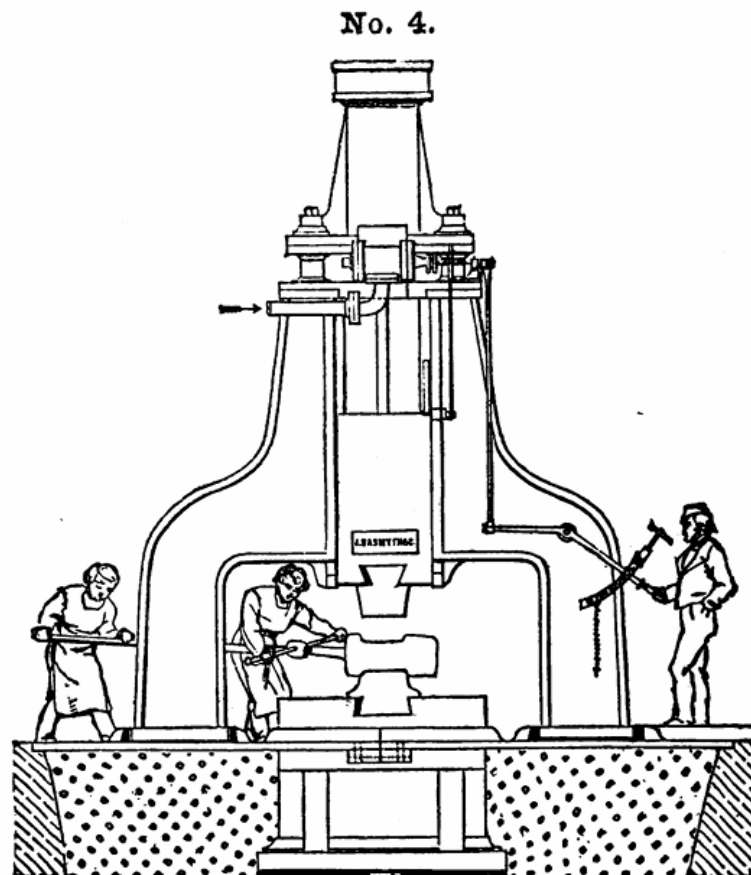


Figura 37: Martillo de Nasmyth con implementación de la válvula deslizante balanceada de Wilson [26].

2.5.4.7. Innovaciones de Wilson en el Martillo de Vapor: Rediseño Eficiente y Doble Acción

En 1861, Wilson implemento nuevas importantes mejoras.

En primer lugar, optó por rediseñar la unión del martillo al bastidor del martillo. Hasta ahora el bastidor contaba con dos aletas fundidas a él, que servían de guía para el martillo, que tenía una ranura que encajaba con las aletas. Esto provocaba daños frecuentes por vibraciones y golpes, lo que requería reemplazar los estándares completos,

con altos costos y pérdida de tiempo. Wilson simplemente invirtió este diseño, colocando la ranura en el bastidor y la aleta en el martillo, eliminando los daños, mejorando la durabilidad y facilitando la reparación.

Pero la mejora más importante que Wilson aplicó fue la implementación de un principio de doble acción, donde introdujo un sistema en el que el vapor también se inyectaba sobre el pistón en la fase descendente, acelerando y aumentando la intensidad del golpe. Esto triplicó la potencia del martillo, haciendo que uno de 5 toneladas rindiera como uno de hasta 15 toneladas, reduciendo costos en un 66% y aumentando la eficiencia.

Por otro lado, en 1862, Wilson diseñó un martillo de vapor más pequeño y rápido, capaz de golpear 500 veces por minuto con gran precisión y optimizándose para su uso para el acero.

En la figura 38.a, se puede observar el martillo con las mejoras mencionadas implementadas, por otro lado, en la figura 38.b, se puede observar un martillo de 25 toneladas, equipado con la válvula deslizante equilibrada de Mr. Wilson y operado de forma doble y de simple efecto según se desee, mediante sus engranajes manuales patentados, fechado en 1864.

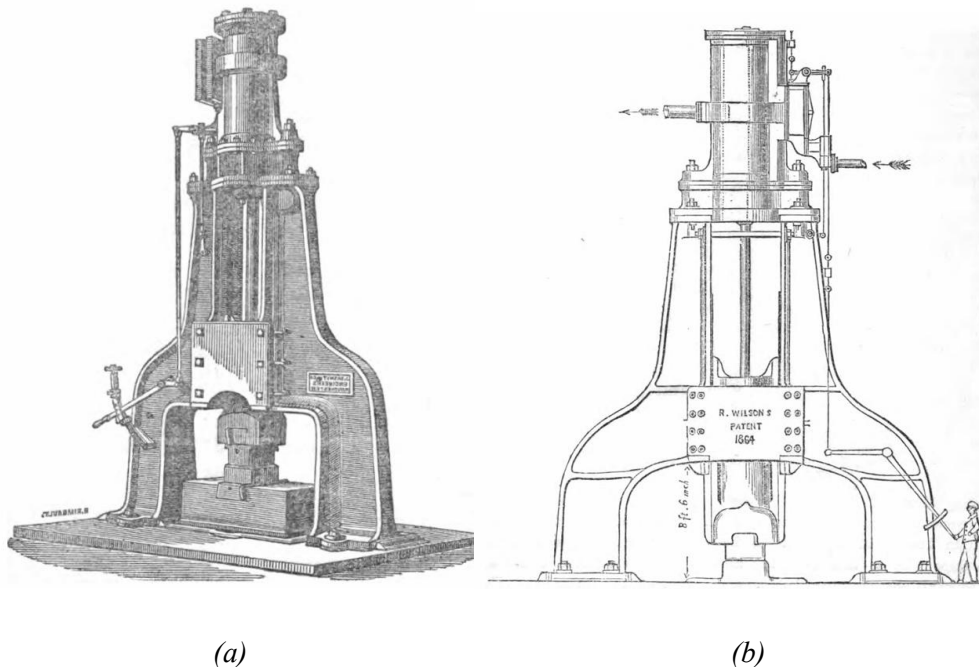


Figura 38: (a) Martillo de doble acción de Nasmyth y Wilson (b) Martillo de 25 toneladas de Nasmyth y Wilson [26].

En general sus innovaciones tuvieron un impacto inmenso en toda la industria, mejorando la potencia, la precisión y la accesibilidad de los equipos.

2.5.4.8. Nasmyth & Wilson Martillo de vapor de 1917



Figura 39: Nasmyth & Wilson Steam Hammer de 1917 [30].

Los diseños prosiguieron mejorando y adaptándose a las necesidades específicas.

En 1917, se diseñó y construyó uno de los últimos y emblemáticos martillos por la compañía Nasmyth y Robert Wilson, denominada Wilson & Co, que operó en Patricroft, Manchester. Se utilizó hasta 1975 para procesar hierro forjado utilizando el proceso indirecto. Se puede observar en la figura 39, la cual es una fotografía actual de la universidad de Bolton.

Para ese momento, los martillos de vapor ya estaban siendo reemplazados por prensas hidráulicas, que ofrecían mayor precisión y eficiencia, por lo que los martillos de vapor ya estaban en declive y se podría decir que los diseños habían alcanzado su máximo desarrollo.

2.5.4.9. Ferris de Miles Martillo de vapor

En el transcurso de tiempo que los martillos de Nasmyth, Wilson & Co se iban fabricando y desarrollando, la industria se iba nutriendo de otros diseños y producciones de martillos innovadores.

Uno de ellos fue el martillo de vapor Ferris & Miles de 1876, que presenta un diseño moderno en el que la cabeza del martillo se coloca dentro del marco en ángulo para facilitar el giro y la terminación del trabajo sin interferencias.

Se utiliza una válvula de hierro fundido que, al admitir vapor, circula entre asientos cilíndricos y drena el vapor condensado por una cámara de escape, equilibrándose con la presión atmosférica.

Contaba también con un movimiento automático donde un plano inclinado sobre el pistón acciona un balancín conectado al vástago de la válvula; esto impulsa el pistón en la carrera ascendente, reduciendo fricción y desgaste. Además, resortes y una palanca permiten ajustar la fuerza y velocidad de los golpes.

Por último, el yunque descansa sobre una base separada para minimizar las vibraciones y el impacto en el marco del martillo.

Se pueden observar ilustraciones de este martillo en la figura 40.a y 40.b.

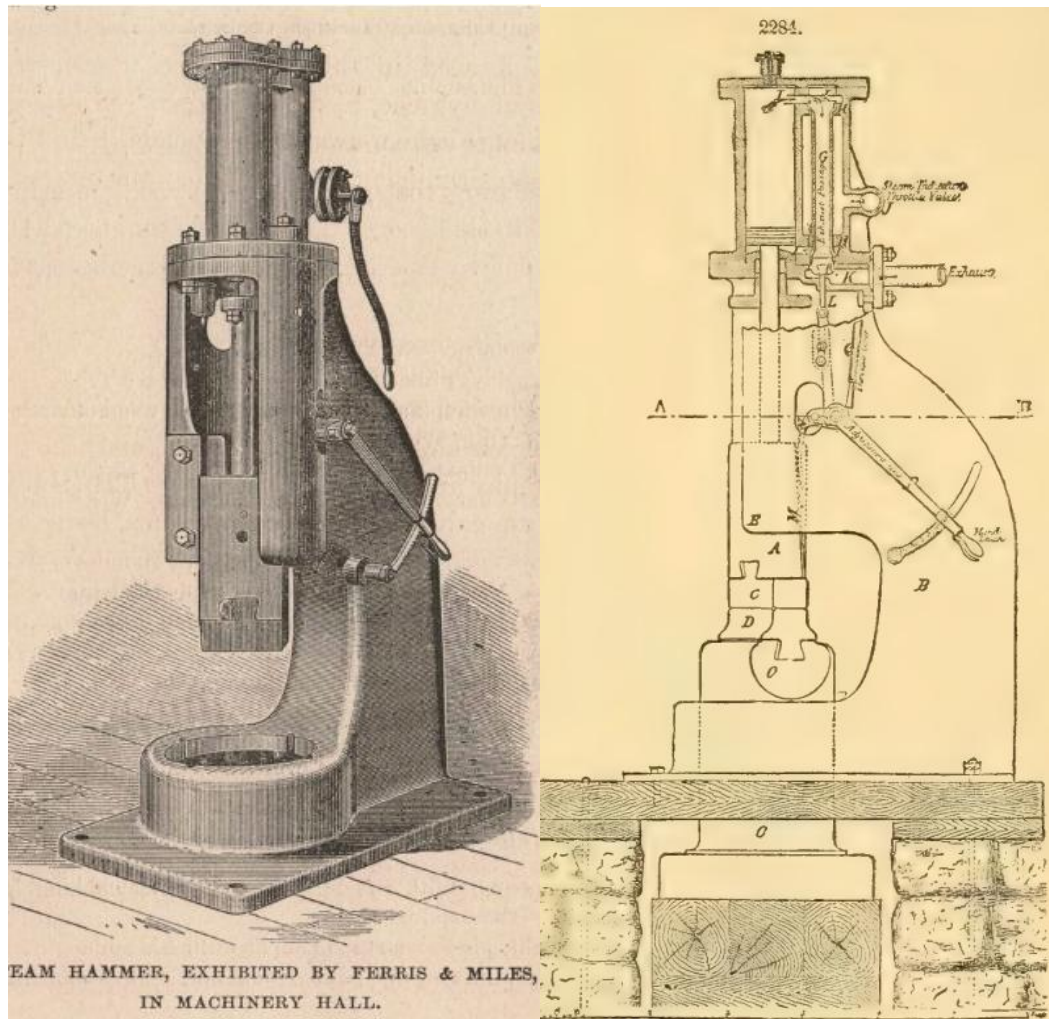


Figura 40: (a) Ilustración del martillo de vapor de Ferris de Miles (b) Plano de sección transversal del mismo [13][31].

2.5.4.10. The Sellers Martillo de vapor

Básicamente, se trataba de otro martillo que implementaba el mecanismo de doble efecto del vapor.

Además, implementaba otras innovaciones como que el pistón era únicamente guiado solo por las cabezas del cilindro, eliminando las guías laterales y liberando espacio para el operario. También se implementaban mejoras en la fijación de la matriz y un sistema de ranuras que evita la rotación de la barra.

Por último, una modificación en los puertos de vapor permite estrangular el escape por debajo sin afectar el escape libre sobre el pistón, logrando así golpes rápidos y ligeros y una economía en el vapor.

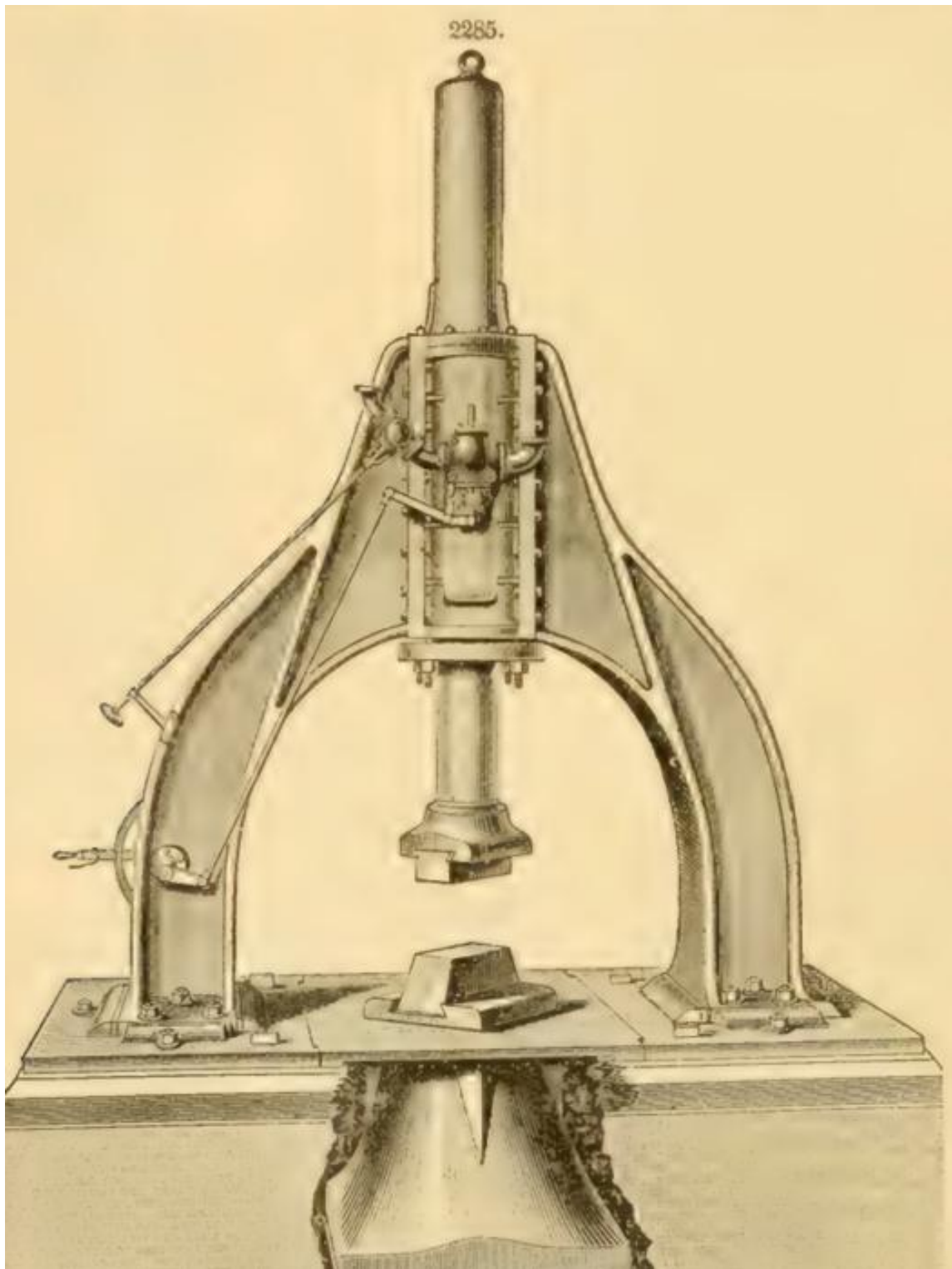


Figura 41: Ilustración del martillo de vapor Sellers [13].

2.5.4.11. Martillo de 30 toneladas

Se trata de un martillo de vapor de 30 toneladas construido en 1874 por Thwaites and Carbutt, que supuso el máximo desarrollo de esta compañía relativo a martillos de vapor.

Además de las grandes dimensiones de este martillo, implementó unos soportes modulares (que facilitan un amplio espacio para la manipulación de las piezas), un entablamento que refuerza la estructura sin necesidad de grandes fundiciones y un cilindro de vapor de gran tamaño que optimiza la potencia. Además, cuenta con un sistema de transmisión robusto con válvulas operadas manualmente y se complementa con grúas hidráulicas y hornos de gas Siemens para mejorar su eficiencia operativa.

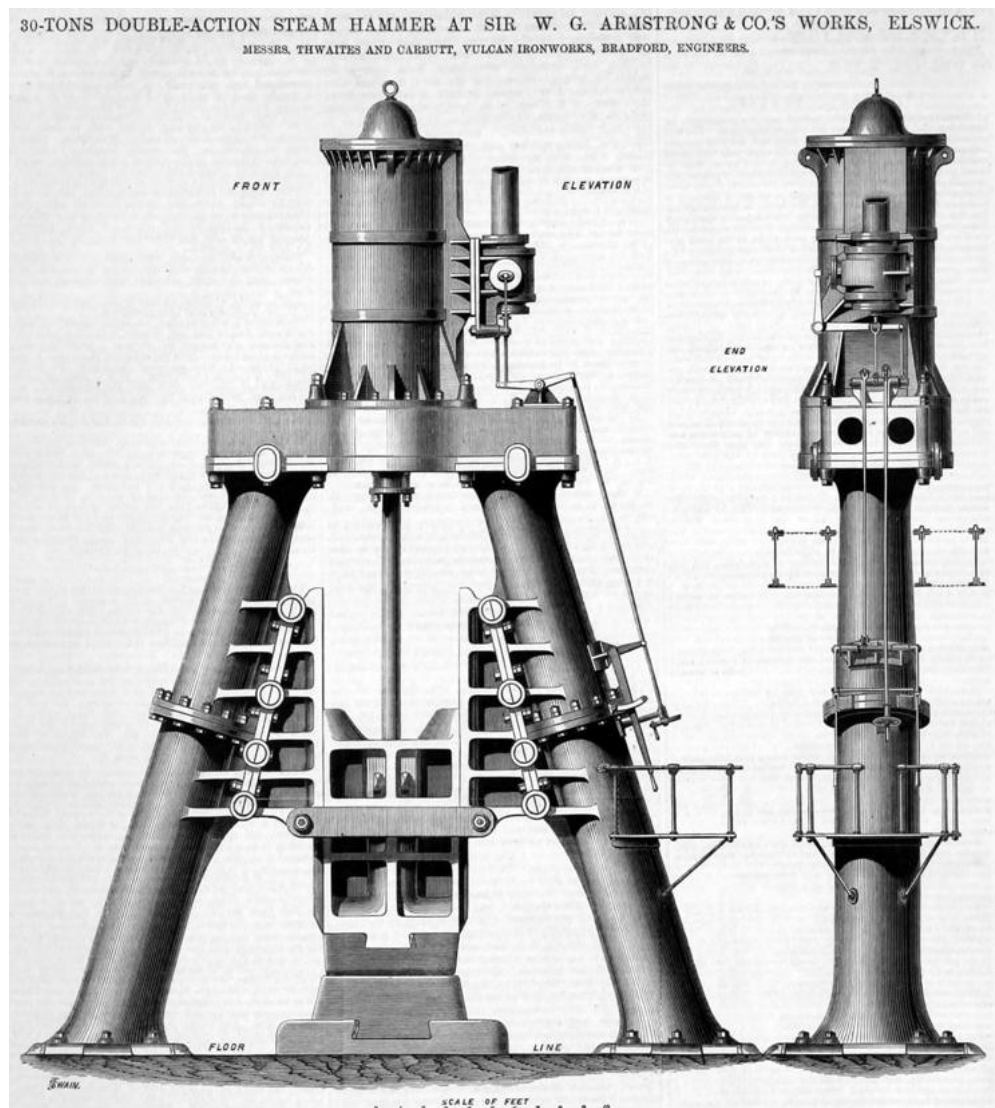


Figura 42: Martillo de 30 toneladas de Thwaites y Carbutt [32].

2.5.4.12. Martillo pilón de Bourdon 1876

En paralelo con el desarrollo del martillo de Nasmyth, los autores del primer martillo de vapor construido continuaron trabajando en su desarrollo.

Entre 1843 y 1867, Schneider & Co. construyó 110 martillos a vapor, de los cuales 26 se reservaron para su uso en sus propios talleres. Algunos eran martillos pequeños de golpes rápidos, adecuados para la herrería ligera, mientras que otros proporcionaban golpes de hasta 13 toneladas. Para seguir el ritmo del aumento en el tamaño de cañones, placas de blindaje y árboles de levas, y debido al cambio general del uso del hierro forjado al acero, los ingenieros de Schneider se propusieron diseñar un martillo de proporciones colosales.

De esta manera, en 1876, se alcanzó un hito tecnológico con la construcción del gigante Martillo de Bourdon, el cual fue el más grande de su tipo. El martillo pesaba 100 toneladas y tenía 21 metros de altura. Estuvo en funcionamiento hasta 1930, y actualmente se conserva en la entrada del sur de Creusot, Francia.

Aunque no fue el último martillo de vapor construido y los diseños de martillos de vapor continuaron mejorándose en otras partes del mundo después de 1876, este modelo representó el punto culminante en la escala y potencia de los martillos de vapor.



Figura 43: Martillo pilón de Bourdon en 1876 [33].

2.5.4.13. Martillos neumáticos, hidráulicos o neumático-hidráulicos.

Los martillos de vapor, aunque fueron revolucionarios en su tiempo, su funcionamiento tenía importantes limitaciones.

Su funcionamiento dependía de grandes cantidades de vapor y sistemas mecánicos muy pesados, lo que implicaba mayor desgaste y poca adaptabilidad. Su consumo energético era alto y requerían de un gran mantenimiento, aumentando los costes operativos. Además, tenían importantes limitaciones en cuanto al control y precisión de la fuerza aplicada, en relación con las nuevas tecnologías posteriores.

Por otro lado, el vapor de agua presentaba inconvenientes, como una elevada corrosión y desgaste de los elementos metálicos y una pérdida de la eficiencia energética debido a la condensación, (ya que parte del vapor se transformaba en agua). Además, podría suponer un riesgo para la seguridad del operario, ya que la condensación de gotas de agua combinada con golpes de gran potencia suponía un riesgo en la seguridad laboral.

Por último, la electrificación permitió suprimir la dependencia directa con las calderas y sistemas de vapor. Esto ofreció varias ventajas como que las máquinas eléctricas y sus derivados, como los martillos hidráulicos y neumáticos modernos, se pueden controlar con mayor precisión gracias a la integración de sistemas electrónicos y de automatización. Por otro lado, la conversión directa de energía eléctrica a energía mecánica es más eficiente y económica que generar vapor a través de calderas, lo que reduce en menores costes operativos. Además, la utilización de energía eléctrica reduce el riesgo asociado a la manipulación y mantenimiento de equipos a presión, como las calderas, permitiendo una integración más sencilla en sistemas de producción automatizados.

Por tanto, existen en la actualidad varias soluciones que sustituyen al tradicional martillo de vapor de Nasmyth para la forja, manteniendo en esencia el principio de golpeo por acumulación y liberación de energía, pero utilizando aire comprimido o sistemas hidráulicos en lugar de vapor de agua. Aunque hoy en día muchas industrias optan por prensas hidráulicas por su precisión y control, aún se encuentran y utilizan martillos neumáticos e hidráulicos que cumplen funciones similares.

Estos martillos, respecto a los de vapor, son mucho más precisos, ajustando la energía necesaria del proceso específico. Pueden integrar nuevos avances en electrónica para realizar su control.

Además, optimizan en gran medida la eficiencia global del proceso, mientras que los fluidos hidráulicos y neumáticos garantizan una respuesta rápida del sistema. La reducción del ruido y la vibración sufre una mejora significativa, lo que favorece la calidad del ambiente laboral.

La integración de tecnologías neumáticas e hidráulicas, o la combinación de ambas, permite que las máquinas sean adaptables a una gama más amplia de aplicaciones, desde procesos de forja de precisión hasta aplicaciones de gran envergadura.

A pesar de todas las ventajas mencionadas de estos martillos respecto a sus antecesores de vapor, la importante paralela evolución de las prensas en la forja ha llevado a que la actualidad, se utilicen más las prensas que los martillos, especialmente en la industria de la forja y el conformado de metales.

Esto básicamente se debe a que las prensas ofrecen mayor precisión y control en el conformado de piezas, aplicando fuerza de manera continua y uniforme, lo que mejora la calidad del producto final. Son más eficientes energéticamente que los martillos, generan menos ruido y vibraciones, y reducen el desgaste de herramientas y matrices. Además, permiten una fácil automatización e integración en líneas de producción modernas, lo que optimiza los procesos industriales y aumenta la productividad.

Es por esto a que los martillos mencionados se limitan en su uso en la industria actual a procesos donde el impacto es fundamental para obtener ciertas propiedades al material, forja de piezas grandes y complejas donde se requiere mucha energía en poco tiempo o talleres que requieren de mucha versatilidad.

A pesar de que la Asociación Española de Fabricantes de Máquina-herramienta no oferta ningún martillo en su catálogo, solo prensas, En las figuras 44 e 45, se pueden observar algunos modelos neumáticos que se pueden adquirir en la actualidad en el mercado internacional.



(a)



(b)

Figura 44: (a) Martillo neumático de tablero, modelo de NKH (b) Martillo neumático, modelo PH50. [34] [35]



(a)



(b)

Figura 45: (a) Martillo neumático, modelo de FHM series. (b) Martillo neumático, modelo SAY-MAK SPH 50 [36] [37]

2.5. Reflexión final

Como conclusión, en este capítulo se ha hecho un repaso a la evolución histórica del martillo y de sus máquinas-herramientas, poniendo en valor la radical importancia que tuvo en el desarrollo del sector de la forja y como este tuvo un impacto fundamental en el desarrollo de la industria general y de la sociedad, ya que era un elemento completamente necesario para las operaciones de conformado con metales.

Por tanto, en el siguiente capítulo se va a realizar una reconstrucción digital mediante técnicas de ingeniería inversa del primer martillo de vapor consolidado de James Nasmyth de 1843, el cual implementaba el mecanismo de automatización y regulación de Wilson, ya que esta máquina fue la que realmente revolucionó el sector, teniendo un impacto en la industria de la forja sin precedentes y una importancia patrimonial mayúscula.

La invención de esta máquina supuso un punto de inflexión en la evolución de la tecnología de los martillos de forja que no solo hizo evolucionar al propio sector de la forja, sino a todos los sectores industriales que dependían de ella, como son la construcción naval, ferrocarriles, industrial bélica e ingeniería civil de grandes infraestructuras. El principio de funcionamiento de esta máquina aún se mantiene en la actualidad, lo que ejemplifica el gran impacto que tuvo.

Capítulo 3. Modelización 3D del Martillo de vapor de Nasmyth

3.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrolla el proceso que se ha llevado a cabo para la búsqueda de información referente a las medidas y el funcionamiento de la máquina objeto de estudio, así como las hipótesis utilizadas, debido a la falta de información sobre las medidas y el funcionamiento de diferentes elementos de esta.

Posteriormente, se realiza un análisis funcional de cada uno de los componentes que conforman la máquina para su posterior ensamblaje, teniendo en cuenta que se realiza de la forma más aproximada posible con la información de la que se dispone, así como de los mecanismos móviles que permitan la simulación de la máquina objeto de estudio, el martillo de vapor de James Nasmyth patentado en 1843.

3.2. Información de partida

A pesar de que en la actualidad los martillos de vapor han sido en gran parte reemplazados por martillos hidráulicos y neumáticos, se trata de una máquina de la cual se posee gran cantidad de información.

Sin embargo, del martillo de vapor original objeto de estudio, patentado por James Nasmyth y automatizado y controlado mediando el mecanismo de Robert Wilson, solo se tiene información accesible relativa a la patente y diferentes enciclopedias, libros y alguna documentación gráfica de la época.

Se conoce que se expone actualmente este martillo en Science Museum (Londres, Inglaterra). No obstante, como ya se ha explicado en el capítulo anterior, esta se trata de una versión posterior que contaba con ciertas mejoras y modificaciones, además de unas dimensiones mucho más reducidas (Figura 46). Además, se encuentra inaccesible para tomar medidas. Por tanto, toda la información de partida que se va a mostrar a continuación procede principalmente de textos que se han extraídos de libros con referencias a la patente oficial de 1843 modificada en 1846 y en 1847, escrita en lengua inglesa, así como ciertos libros donde se analiza el funcionamiento y se ofrecen planos detallados de la máquina original.



Figura 46: Martillo de vapor de Nasmyth conservado actualmente en Science Museum en Londres [29].

Los 3 principales libros que se han utilizado además de las patentes son los siguientes:

- The Engineer and The Machinist's Assistant De Blakie and Son De 1847
- Tomlinson's Cyclopaedia of Useful Arts
- Cyclopedia Of Applied Mechanics: A Dictionary of Mechanical Arts.

En primer lugar, es necesario abordar la patente de 1843 de James Nasmyth.

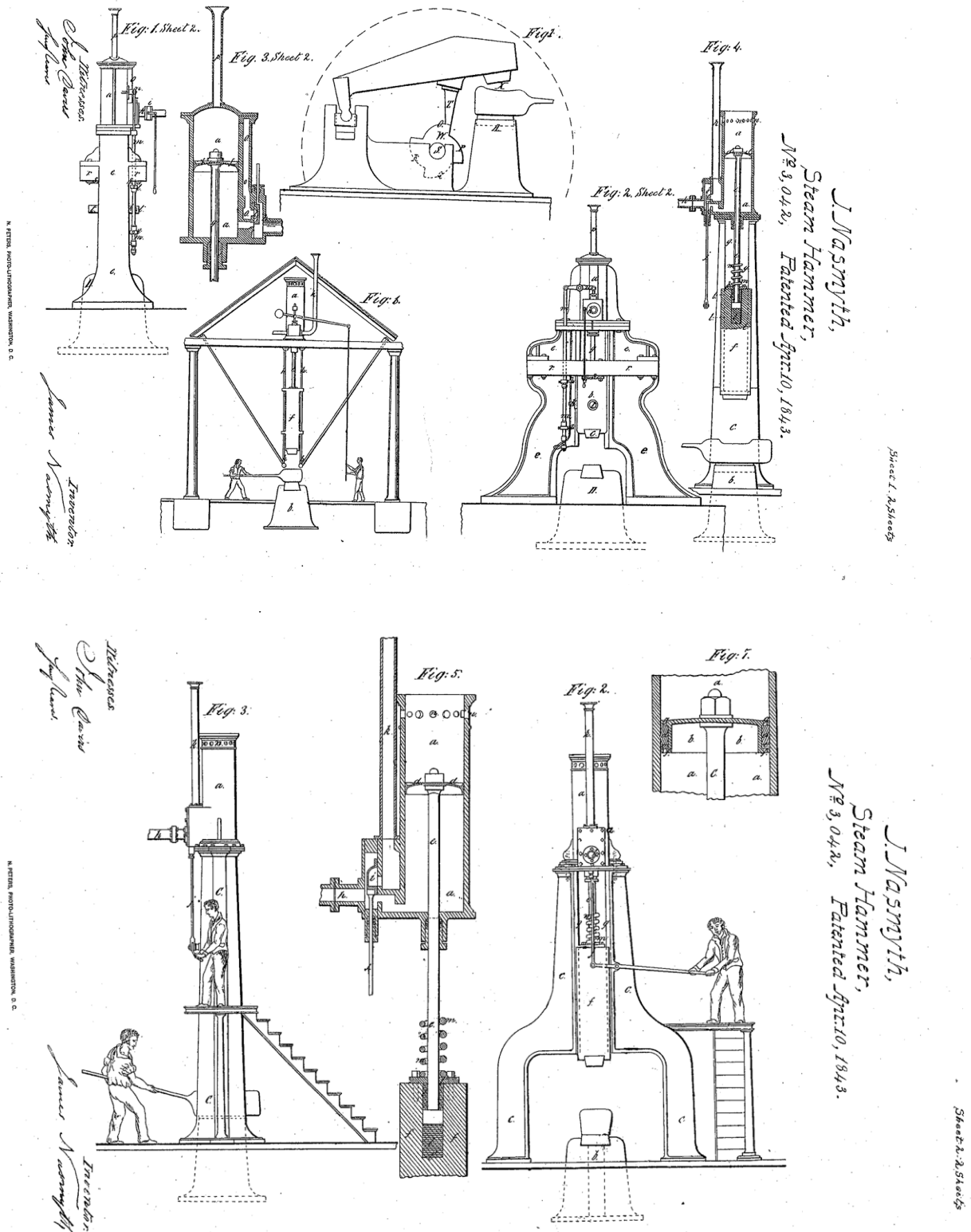


Figura 47: Planos de la Patente original de James Nasmyth [40].

Cabe destacar que la primera patente de 1843 de James Nasmyth, como se ha explicado previamente en el capítulo 2, presentaba un modelo muy básico y primitivo de martillo de vapor, el cual describía con detalle los sistemas de regulación de altura ni automatización del martilleado, y solamente describía una idea general de funcionamiento, sin proporcionar planos detallados o escalados. En 1846 esta patente sufrió una modificación con los avances implementados respecto a automatización y regulación del martillo de Robert Wilson de forma más detallada, así como mejoras en el amortiguamiento del martillo, sustituyendo un resorte por materiales como lana cuero, caucho o madera.

No obstante, esta patente de James Nasmyth no describe un modelo específico y concreto de una máquina individual, sino que presenta una aproximación general sobre el funcionamiento de su invención: el "martillo de vapor de acción directa". En los planos se muestran principalmente dos modelos distintos de funcionamiento:

- **Modelo manual** (Ilustraciones 2-6 de la hoja 1- Figura 47): En este diseño, un operador controla manualmente la entrada y salida del vapor mediante una válvula (manejada con una palanca). Esto permite regular la altura de caída y la fuerza del golpe según sea necesario.
- **Modelo automatizado** (Ilustraciones de la hoja 2- Figura 47): Aquí se introduce un mecanismo que hace que el martillo funcione de manera autónoma, permitiendo una rápida sucesión de golpes sin intervención manual. Se logra mediante un sistema de palancas y topes que regulan automáticamente la entrada y escape del vapor.

No obstante, la máquina que realmente James Nasmyth diseñó y construyó (como se puede observar a continuación en los libros mencionados) era muy diferente a la mostrada en los planos de esta patente y contaba con importantes variaciones, como por ejemplo la ausencia del resorte helicoidal que se puede observar en estos modelos, importantes cambios de forma y dimensiones, y rediseño con elementos añadidos.

En consecuencia, en 1847 James Nasmyth patentó un plano más detallado del principio de funcionamiento de la máquina real que se construye en sus talleres en ese entonces (Figura 48) Este diseño se mantuvo sin grandes cambios durante más de una década.

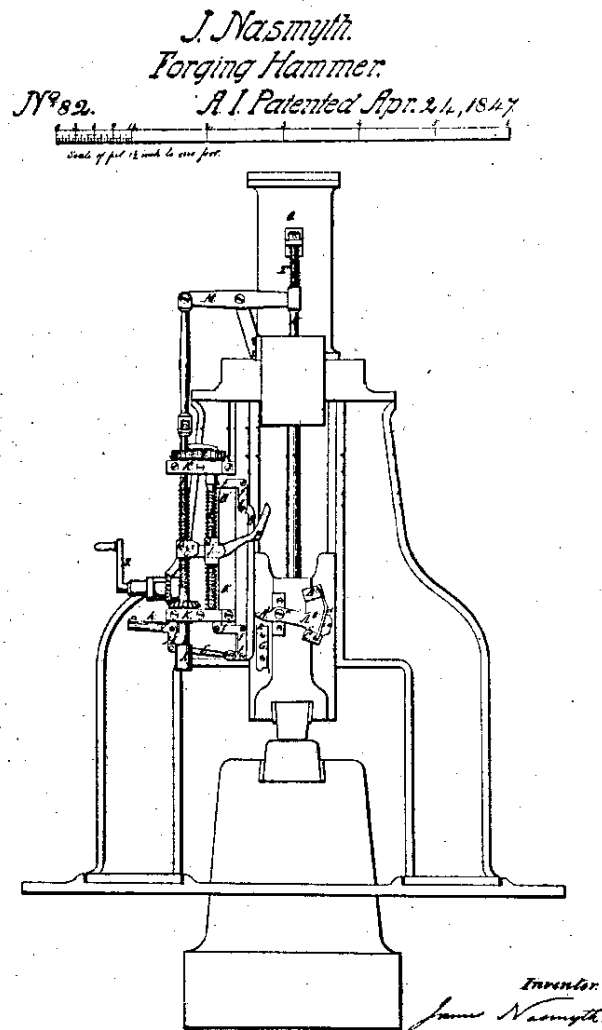


Figura 48: Planos de la Patente de James Nasmyth en 1847 [41].

En Tomlinson's Cyclopaedia Of Useful Arts [43], publicado en 1852, si se describe con exactitud y se muestra un plano exacto de la máquina. Según se establece en el libro, el plano fue copiado con permiso de James Nasmyth en "The Great Exposition",

La Gran Exposición fue un evento que se celebró en 1851 en el Cristal Palace de Hyde Park, Londres, con el propósito de mostrar los últimos avances en ingeniería, ciencia y arte, así como objetos de significado cultural de Gran Bretaña y del extranjero. (Figura 49)

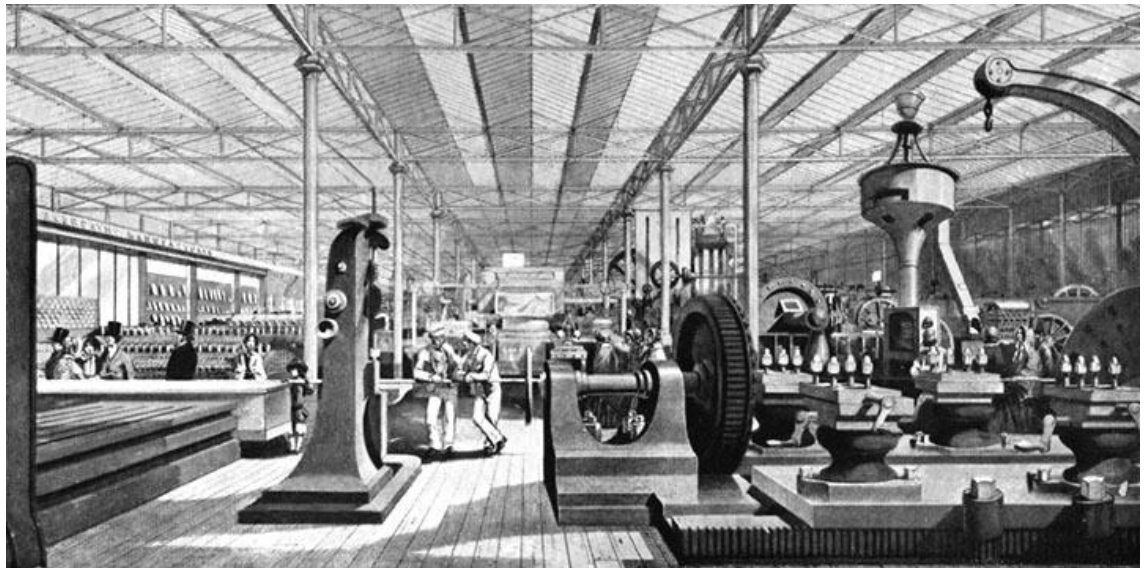
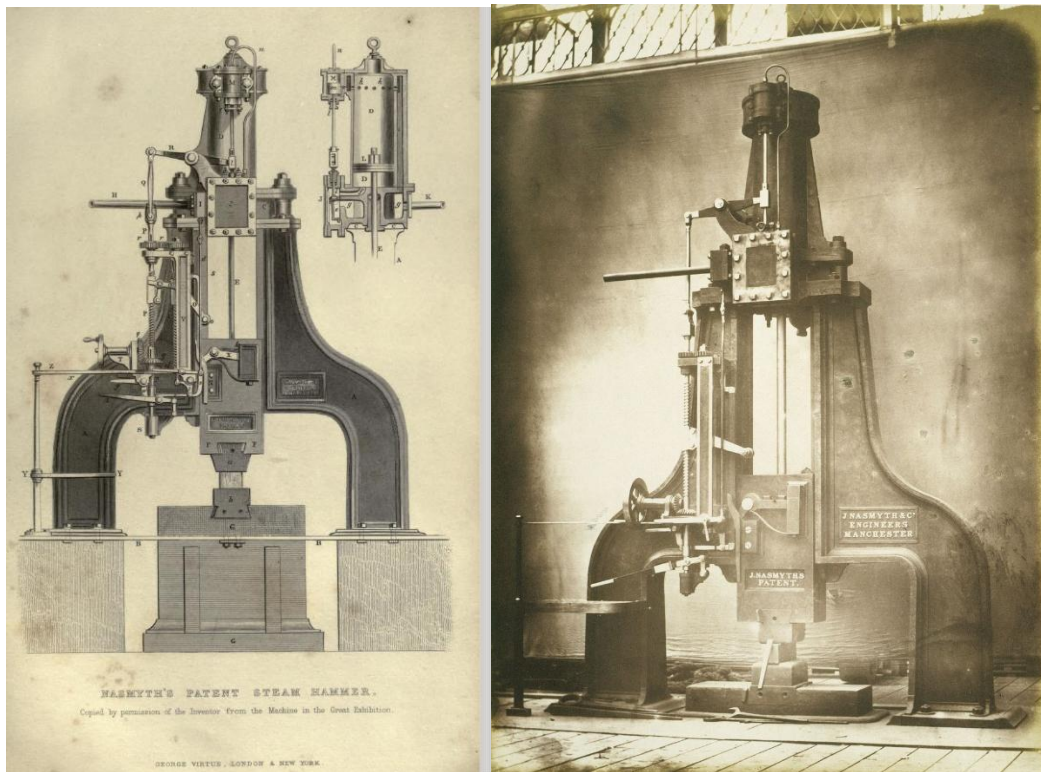


Figura 49: Ilustración de la Gran Exposición en 1851 [42].

Por tanto, se puede considerar que allí se expuso el martillo de Nasmyth. A pesar de que en este libro se explica con exactitud el funcionamiento de la máquina, los planos no cuentan con una referencia que permita dimensionar la máquina. Además, no cuenta con vistas de planta y perfil, ni cortes suficientes de secciones que permitan modelizar la máquina.

Además, esta versión del modelo no es de las primeras versiones que se construyeron, y ya llevaba implementadas ciertas modificaciones y mejoras.

En las figuras 50.a y 50.b, se muestran los planos de este documento y una imagen del mismo martillo de vapor expuesto en “*La gran exposición*”.



(a)

(b)

Figura 50: a) Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “Tomlinson's Cyclopaedia Of Useful Arts” b) Fotografía real del martillo de Nasmyth en “La gran exposición” [43] [28]

La siguiente fuente consultada es “*Cyclopedia Of Applied Mechanics: A Dictionary Of Mechanical Arts*” [13], publicada en 1880. Aquí se realiza una explicación más detallada de funcionamiento, y se muestran unos planos mucho más detallados, con vistas de planta, cortes y detalles, como se observa en la figura 51.

Los planos expuestos encajan con las primeras versiones del martillo de vapor, por lo que se estima que, a pesar de ser una fuente de 1880, estos planos se dibujaron conforme a versiones iniciales del martillo.

Desafortunadamente, esta fuente tampoco cuenta con alguna información que permita escalar los planos de la máquina para su posterior modelado en Solid Works. Además, a pesar de tener planos más exactos, mucha información queda oculta y se desconoce.

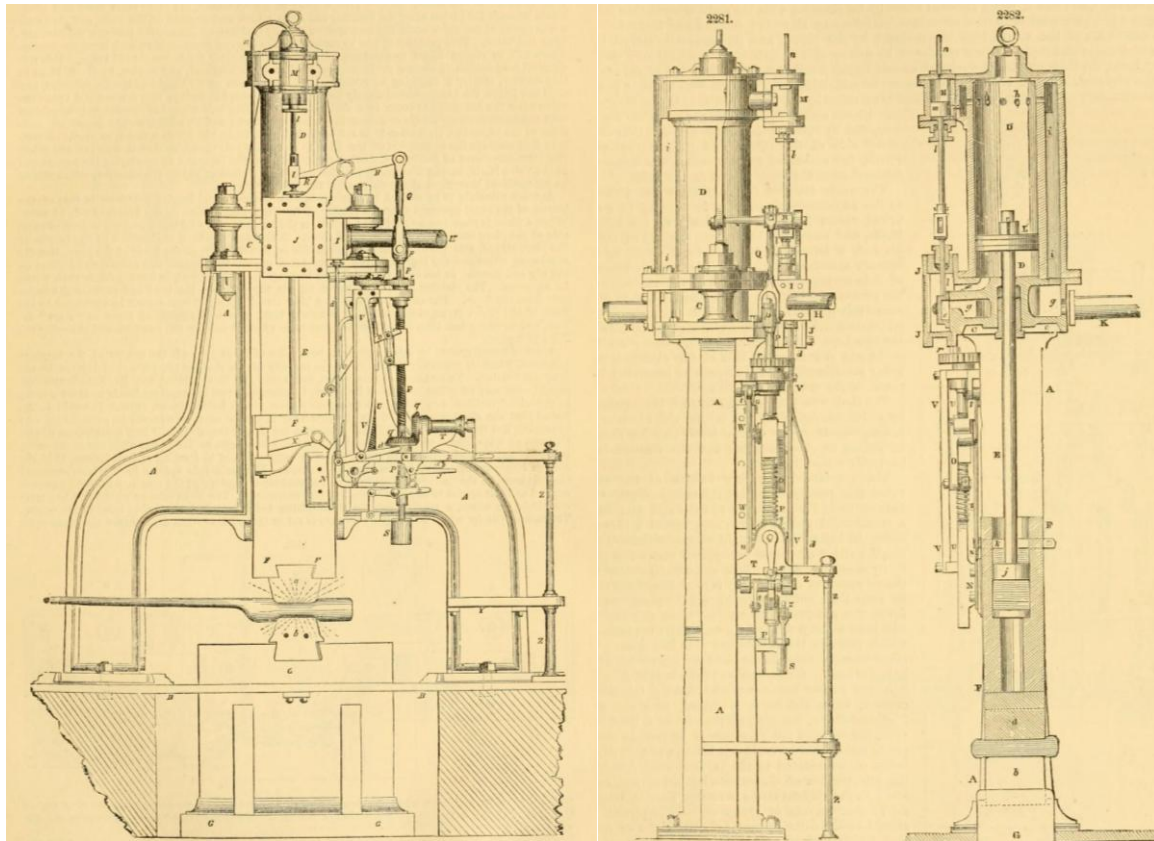


Figura 51: Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “*Cyclopedia of Applied Mechanics: A Dictionary of Mechanical Arts*” [13]

Por último y más importante, existe la fuente “*The Engineer and The Machinist’s Assistant de Blakie and Son*” [27] de 1847, la fuente más completa y de más calidad que se ha encontrado respecto al martillo de vapor. Además, es la más fiel al diseño original de James Nasmyth, ya que es la fuente obtenida más reciente desde la publicación de la patente, tan solo 3 años después. Esto nos permite modelar el modelo original de Nasmyth sin las posteriores modificaciones y pequeñas mejoras que se fueron implementando con los años.

Además de contar con una explicación detallada y extensa del funcionamiento de la máquina, cuenta con planos de gran calidad con su escala correspondiente que permite dimensionarlos, algo completamente fundamental para este proyecto. Además, cuenta con vistas de cortes a diferentes alturas, que permiten comprender y modelar muchas partes de la máquina, que de lo contrario se desconocerían mediante las otras fuentes.

Estos planos son accesibles de forma gratuita a través de “*Hathitrust*”, como se puede ver en la figura X.

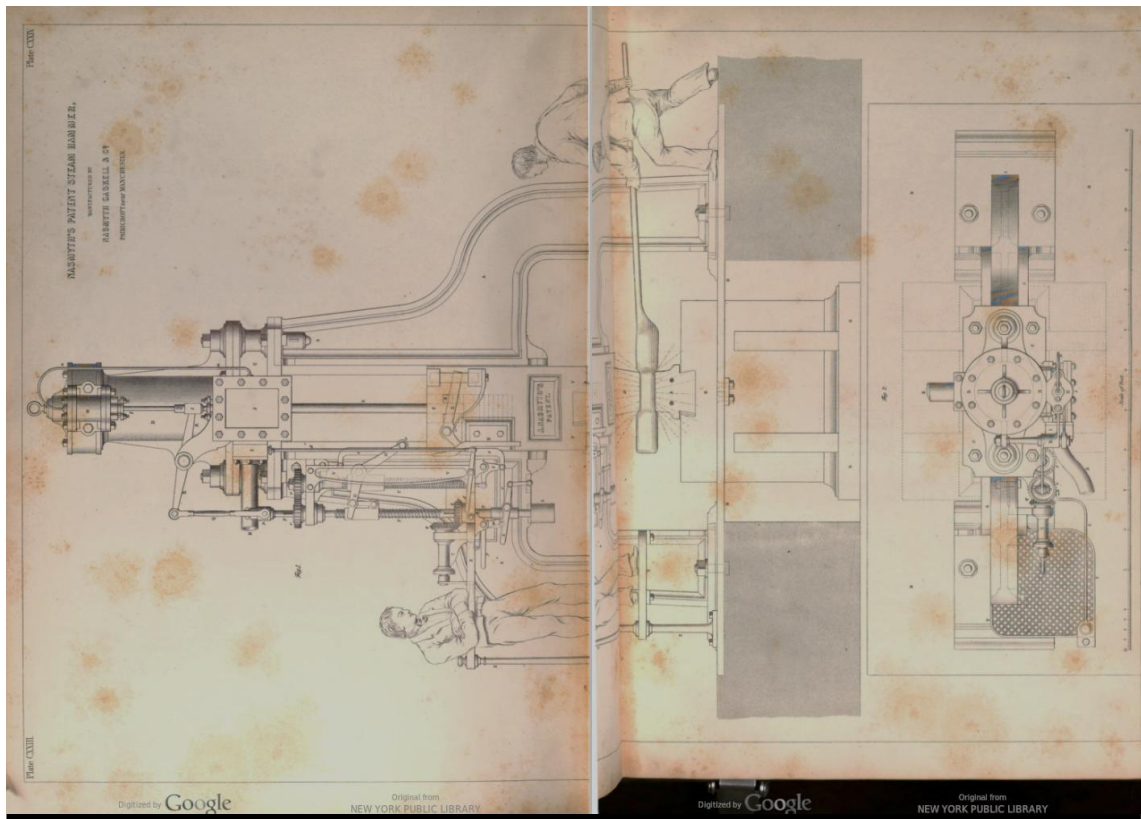


Figura 52: Planos de martillo de Nasmyth extraídos de “The Engineer and The Machinist’s Assistant” [27]

Sin embargo, el escaneo del libro original es pobre y está hecho con fotografías a mano alzada, por lo que escalar el plano presentaría muchas inexactitudes, debido al relieve de la hoja en la unión de las páginas. Además, la resolución es muy baja, dificultando la comprensión del plano, ya que las piezas cuentan con una nomenclatura apenas visible,

Es por ello por lo que se ha decidido obtener el libro original de la primera edición a través de la empresa de distribución de libros antiguos y de coleccionismo “*AbeBooks*”. Ya que se trata de un libro de coleccionismo, ejemplares en buenas condiciones pueden costar hasta 400 euros. No obstante, se ha conseguido un ejemplar en muy pobres condiciones a precio muy reducido.

3.3. Hipótesis de partida

Gracias a este ejemplar físico, se ha podido escanear centrado y con alta resolución, obteniendo un buen escalado y medidas exactas. Para el escalado y la toma de medidas se ha utilizado el software AutoCAD, utilizando la escala de 12 pies en el parte inferior de los planos, que se ha extrapolado a 3657,60 milímetros en el sistema métrico. De esta forma, se puede consultar cualquier medida que se requiera a través del software AutoCAD.

En la figura 54, se puede observar el plano escaneado con las principales medidas de la maquina en milímetros.

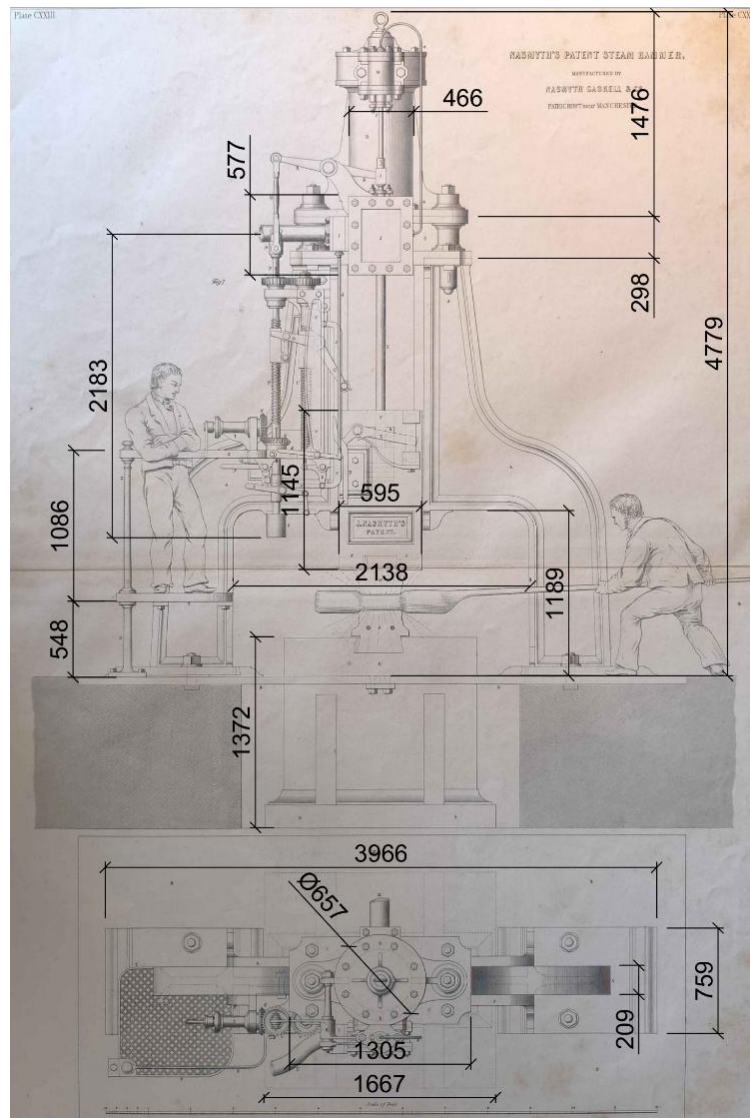


Figura 53:: Principales medidas del martillo de Nasmyth [Modificado de 27]

3.4. Partes del martillo. Modelización

Antes de nada, es importante aclarar, que la pieza completamente ensamblada cuenta con 138 elementos diferentes, sumando un total de 282 elementos si se consideran elementos repetidos. No obstante, en el libro “The Engineer and Machinist’s Assistant” [27], vienen definidos 51 elementos principales para el funcionamiento. La nomenclatura de estas se realiza a través de letras.

Para este proyecto, se ha decidido mantener la nomenclatura que aparece en la fuente de referencia para unificar criterios y facilitar la comprensión de ambos textos y planos, fortaleciendo la interconexión entre este proyecto y el libro original y favoreciendo la consulta del texto y los planos de referencia.

No obstante, el resto de las piezas auxiliares sin nomenclatura en el plano original, que son fundamentalmente piezas de unión, en este proyecto se enumerarán, distinguiéndose así fácilmente piezas principales y auxiliares. No obstante, si se trata de una pieza complementaria de considerable relevancia, se le establecerá como nomenclatura una letra seguido de un número. Para evitar la saturación de las ilustraciones, los elementos repetidos se enumerarán solo una vez, aclarándose cuantos de ellos hay en el texto o en el anexo de planos.

Por otro lado, para facilitar la comprensión, todas las piezas se dividirán en 7 principales grupos de funcionamiento, los están enumerados en la figura 54 y son los siguientes:

- 1: Bastidor
- 2: Yunque
- 3: Martillo y pistón
- 4: Estructura soportante para el operario
- 5: Sistema de gestión del vapor
- 6: Sistema de accionamiento, regulación y control
- 7: Cilindros de vapor

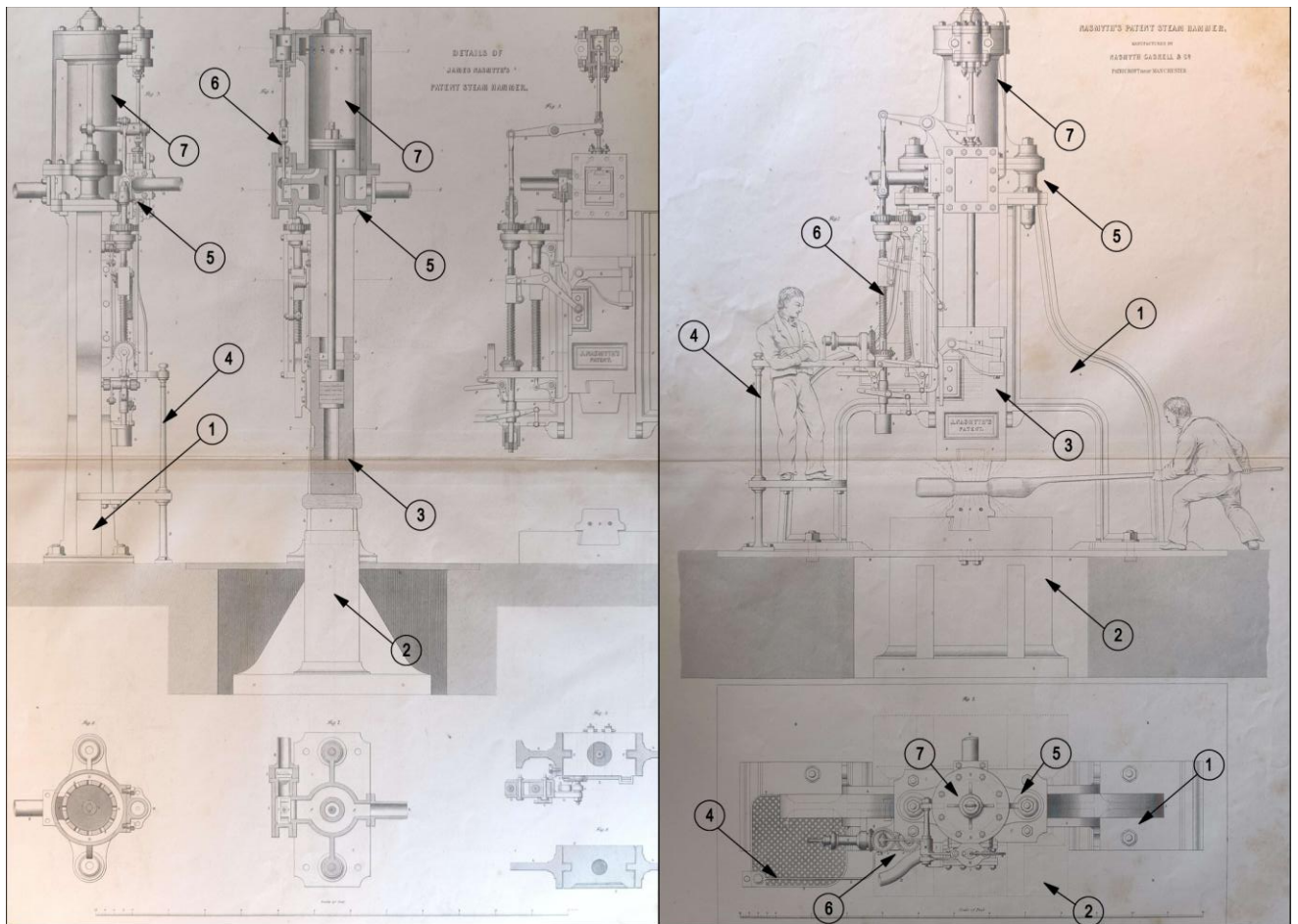


Figura 54: Principales grupos de piezas en planos de martillo de Nasmyth [Modificado de 27]

Por último, cabe destacar que el funcionamiento de la máquina de vapor de Nasmyth cuenta con cierta complejidad, lo que hace imposible explicar el funcionamiento de cada grupo principal sin una visión global, ya que todos los grupos tienen fuerte interdependencia entre sí y trabajan en conjunto. Por tanto, en este apartado se va a mostrar cada grupo principal despiezado y enumerado, y realizando una breve aproximación de sus funciones y características, de forma que el lector se familiarice con los componentes de la máquina y con como estos se ensamblan entre sí, para posteriormente en el siguiente apartado analizar en el funcionamiento de la máquina detalladamente.

3.4.1. Bastidor

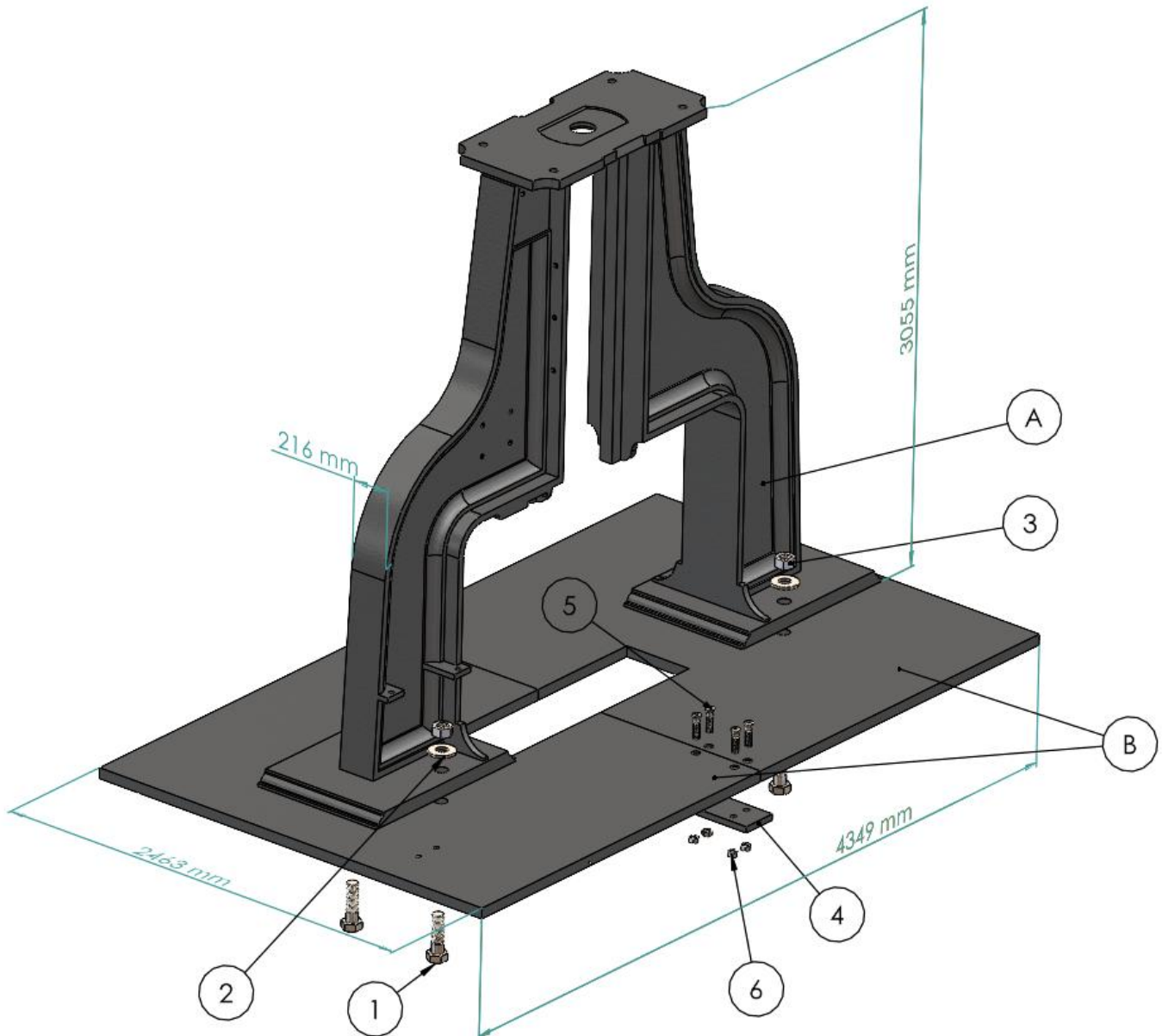


Figura 55: Estructura soportante o bastidor del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]

Se compone de los elementos que proporcionan la principal base y sustentación de la máquina. Constituye el armazón principal del martillo de vapor y está diseñada para soportar el peso del martillo, cilindro principal y demás elementos, así como absorber los esfuerzos y vibraciones generados durante el golpe.

En primer lugar, se compone del bastidor A de hierro fundido, el cual consta de dos soportes verticales o alas simétricas, separadas entre sí para dejar espacio al cabezal del martillo. El diseño del bastidor se caracteriza por tener un vaciado estratégico de material, el cual optimiza geométricamente, aligerando la estructura a la vez que se conservan buenas propiedades de inercia. Estas alas simétricas están unidas en su zona superior mediante una superficie que servirá de base para el sistema de gestión de vapor y el cilindro.

En la cara interior de las alas, se implementa un saliente metálico que servirá como guía del martillo.

Por otro lado, el bastidor descansa sobre dos placas de hierro fundido B, las cuales están conectadas entre sí gracias a dos pequeñas tablas metálicas (4), que se unen a B a través de los tonillos (5) y las tuercas (6).

A su vez, estas placas B están unidas al bastidor mediante los pernos (1), las arandelas (2), y las tuercas (3), asegurando una unión sólida al bastidor. Estas placas descansan sobre un terreno firme.

Por otro lado, la forma de estas placas deja una abertura en el centro donde se colocará el yunque.

3.4.2. Estructura para operario

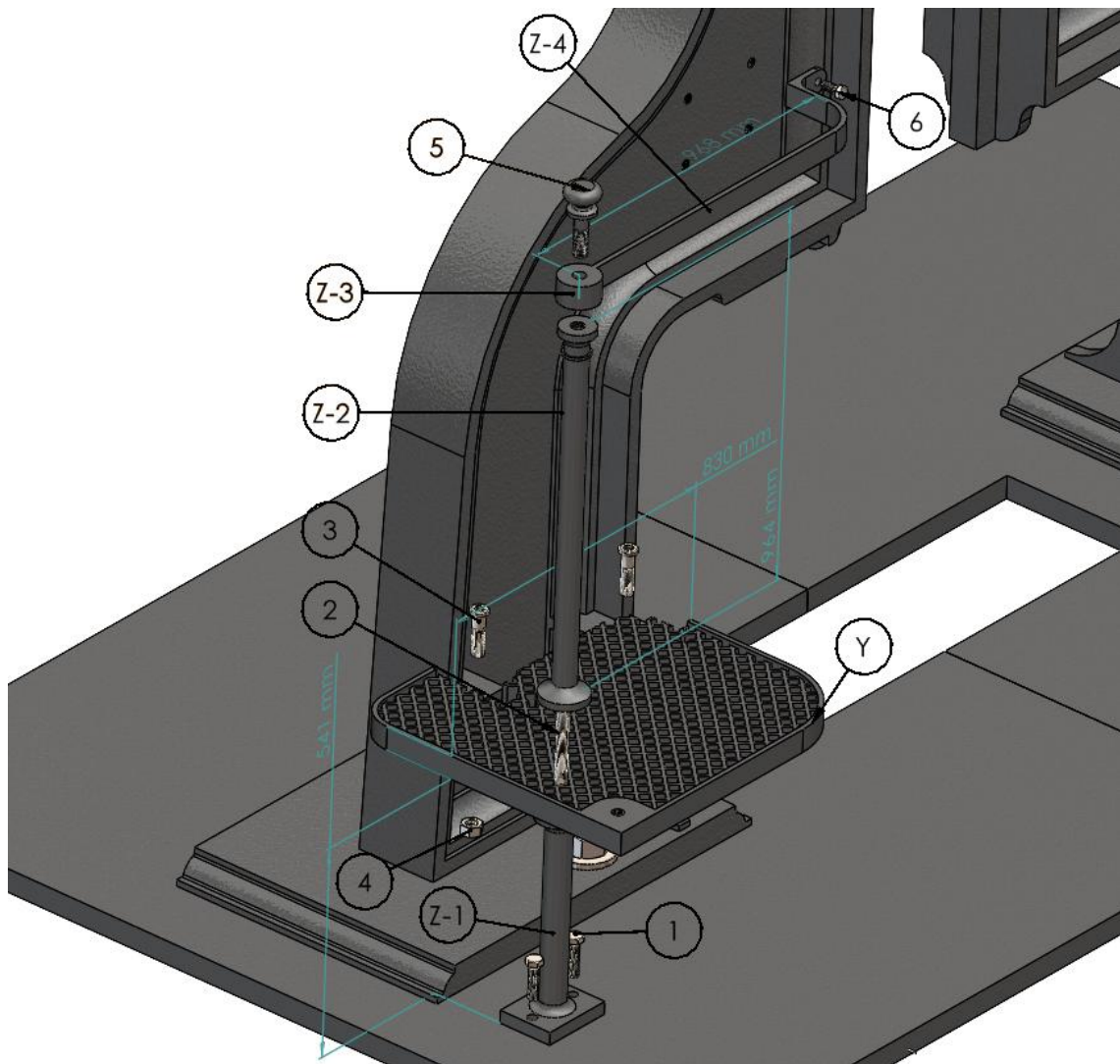


Figura 56: Estructura soportante para el operario explosionada [Modelado SolidWorks]

Esta estructura constituye la zona de trabajo del operario, y sirve para que el usuario pueda subirse y manipular el martillo de vapor con seguridad y comodidad, de forma que todas las palancas de control queden accesibles.

Su principal elemento es la plataforma Y, que consta de una malla metálica reforzada en su perímetro, de forma que soporte el peso del operario sin ser excesivamente masiva. Por un lado, esta atornillado mediante los tornillos (3) y las tuercas (4) al bastidor, y por otro lado, cuenta con la barra Z-1 que actúa como soporte vertical de la plataforma.

Esta barra Z-1 se atornilla rígidamente a las placas base B, las cuales cuentan con dos agujeros con rosca, mediante los tornillos (1).

Además, este soporte vertical, está unido a otro similar (Z-2) mediante una varilla roscada o esparrago. Z-2 que sirve como pilar para la barandilla del operario Z-4. La unión entre la barandilla Z-4 y Z-2 se realiza mediante un tornillo (5), que a su vez tiene la función de pomo de apoyo para el operario.

La barandilla se asegura en su otro extremo mediante el tornillo (6).

3.4.3. Yunque

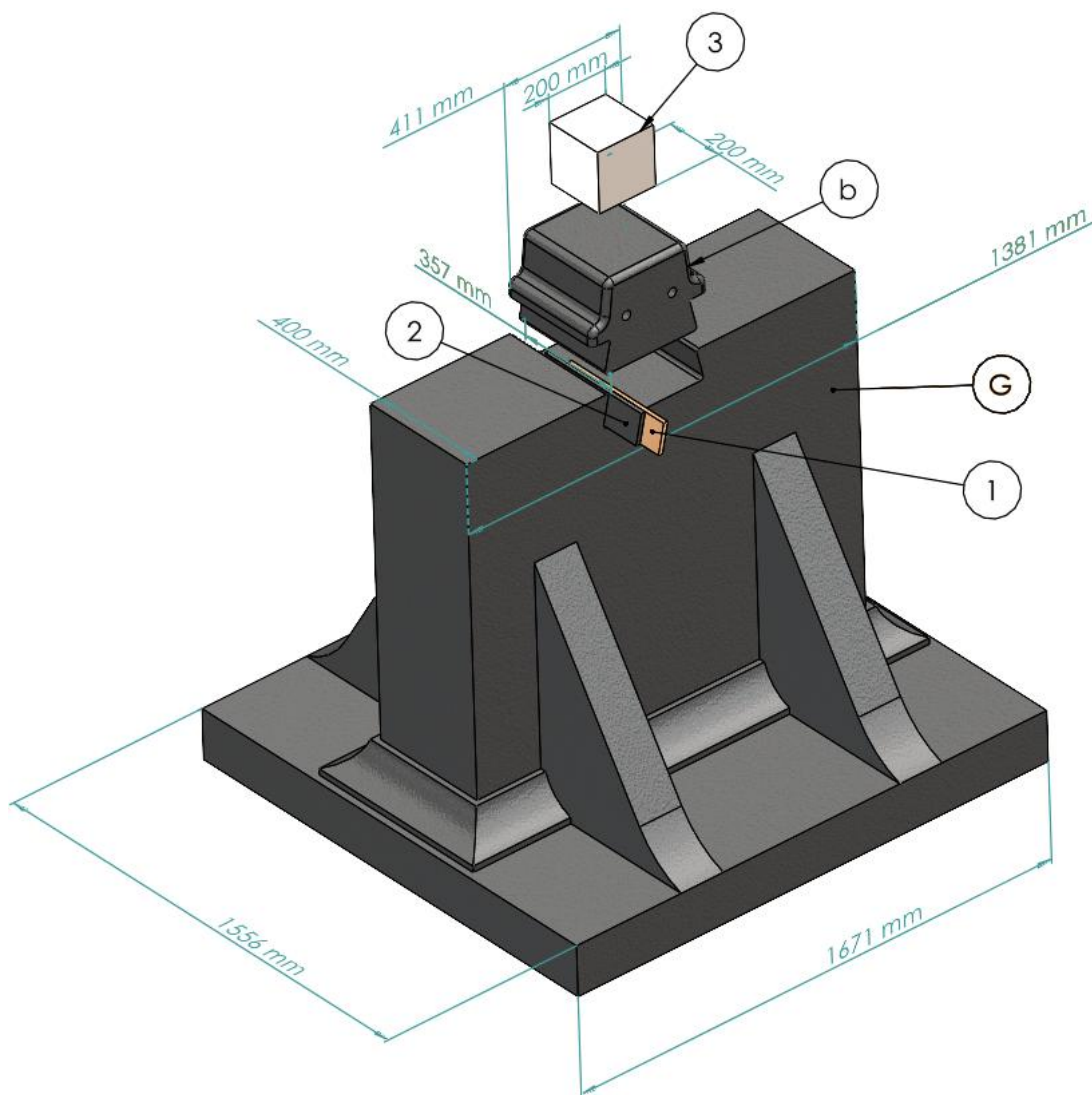


Figura 57: Yunque explosionado [Modelado SolidWorks]

El yunque constituye la base de apoyo y el elemento resistente principal sobre el que impacta el martillo. Es una gran masa de hierro fundido de un peso tal que, debido a su inercia, se opone eficazmente al impulso del martillo, evitando así la disipación de la fuerza de los golpes.

Su pieza principal es el bloque del yunque G, el cual se descansa en un socavón en el suelo realizado a 1150 milímetros de profundidad respecto la superficie. La base es mayor en su inferior, y esta reforzado con 4 nervios, garantizándose así la transmisión de cargas al terreno y la estabilidad.

Este bloque este ensamblado a la denominada cara del yunque (b), que sería la pieza que recibe el golpe del martillo directamente y cuya cara superior es plana y pulida hacer contacto directo con la pieza a forjar (3). Esta cara del martillo se trata de un paralelepípedo con aristas redondeadas para evitar concentraciones de tensión. La unión de esta pieza con el yunque G, se realiza mediante la unión denominada “cola de milano” y esta reforzada con empaques tanto metálicos (2), como de madera. (1)

3.4.4. Sistema de gestión del vapor

Como se observa en la figura 58, a través de la tubería H, se realiza la entrada de vapor proveniente de una caldera. Está directamente atornillada mediante los tornillos (8) con la caja de válvula I, que se encarga de controlar la admisión del vapor al sistema mediante una válvula en su interior.

Seguidamente, se encuentra la caja de válvula J, la cual se encarga de redireccionar el flujo del vapor de forma que se controle la admisión y escape del vapor, en función de la posición de una válvula que contiene en su interior. Esta caja está completamente sellada mediante la tapadera J-1, unida mediante los tornillos y tuercas (1), (2) y (3).

A su vez, la caja J esta atornillada a la pieza principal de este grupo, el fondo del cilindro C, la cual descansa y se atornilla sobre el bastidor del martillo mediante (7) y (6). En su interior, como se detallará más a fondo en el siguiente capítulo, cuenta con una serie de conductos que permiten el ala admisión de vapor al cilindro o bien su expulsión.

La expulsión del vapor se realiza mediante la tubería de escape K.

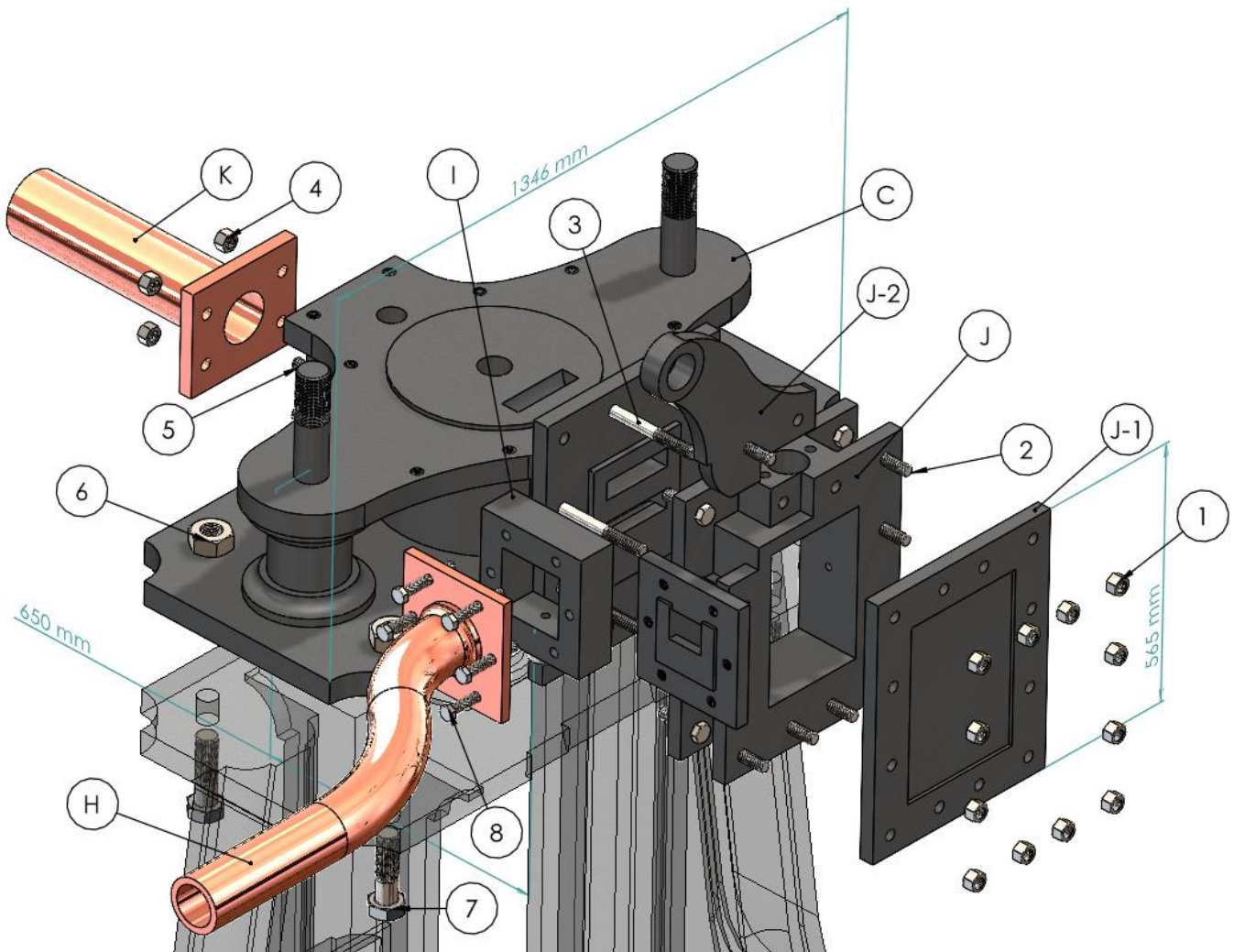


Figura 58: Sistema de gestión del vapor explosionado [Modelado SolidWorks]

3.4.5. Martillo y Pistón

El martillo percutor es la gran masa pesada fijada al extremo del vástago del pistón. Se desliza guiada entre los salientes del bastidor durante su movimiento vertical, manteniéndose alineada con el yunque.

Similar a la cara del yunque, cuenta con una pieza denominada cara del martillo (b), también unida al martillo mediante unión cola de milano y ajustada con empaques de madera (2) y hierro (1). Este elemento cuenta con una cara plana y pulida que efectuará el golpe directo de forja.

Por otro lado, en la cara delantera del martillo, se ensamblan un conjunto de piezas como (N), (3), (k), (X), (X1) y (X2), cuya función es interactuar con el sistema de accionamiento y regulación para limitar la carrera del martillo en la subida y actuar como tope, así como permitir la automatización del funcionamiento del martillo. Esto se analizará pormenorizadamente a continuación en el apartado siguiente, donde se aborda el principio de funcionamiento. (Figura 59)

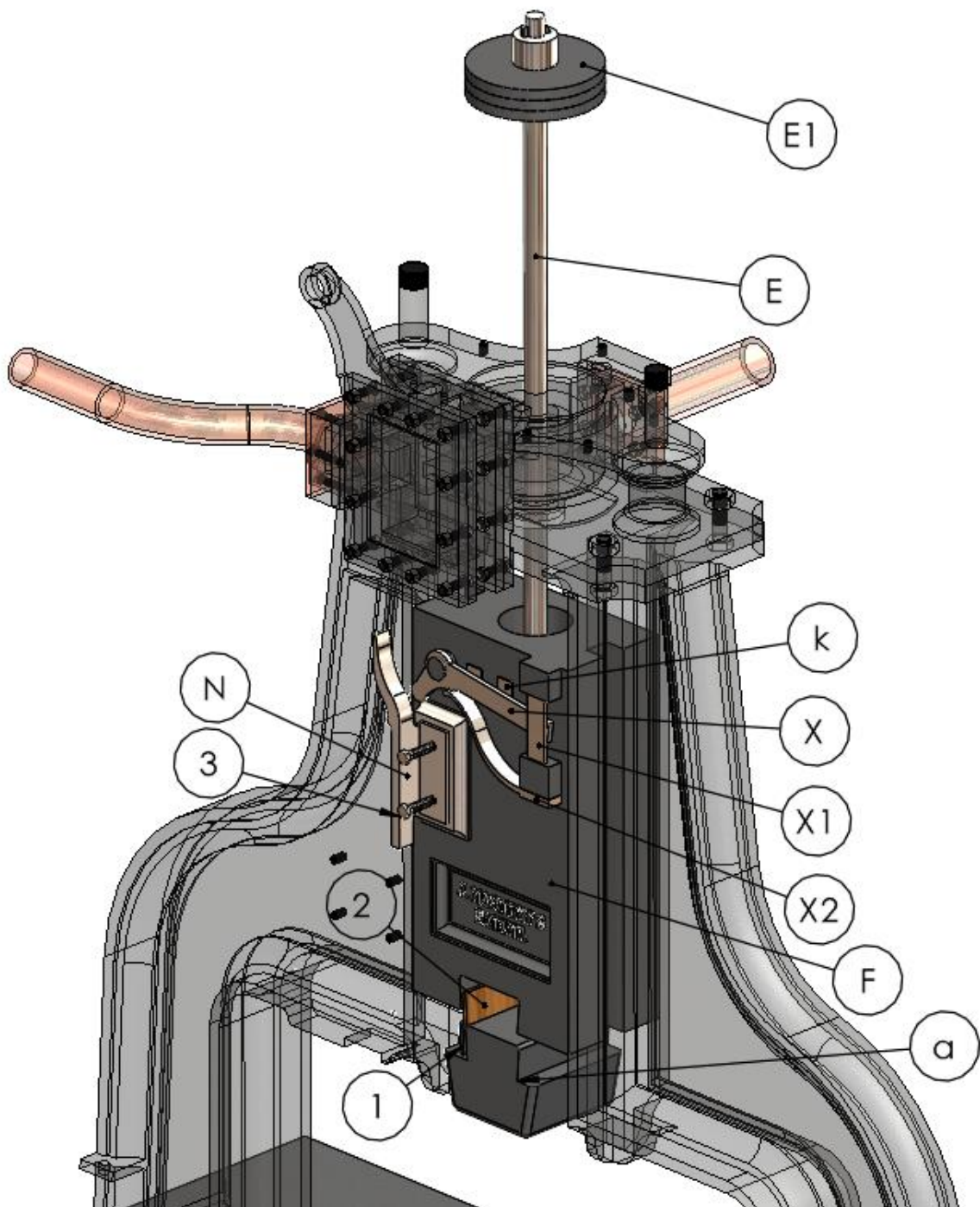


Figura 60: Martillo explosionado [Modelado SolidWorks]

En otro lugar, el bloque del martillo se une al pistón a través de un pozo vacío que este tiene en su interior, donde se colocan una serie de discos (E-1) y (E-2), que permiten que la conexión no sea rígida y cuente con cierta amortiguación. El aspecto de la amortiguación también se tratará más detalladamente en otro apartado específico a continuación. (Figura 60)

La unión entre pistón y el martillo se asegura con dos chavetas (k) que atraviesan el martillo.

En su otro extremo, el pistón está soldado a tres discos (E-1), los cuales serán los que presionará el vapor inferiormente para efectuar la subida de todo el conjunto.

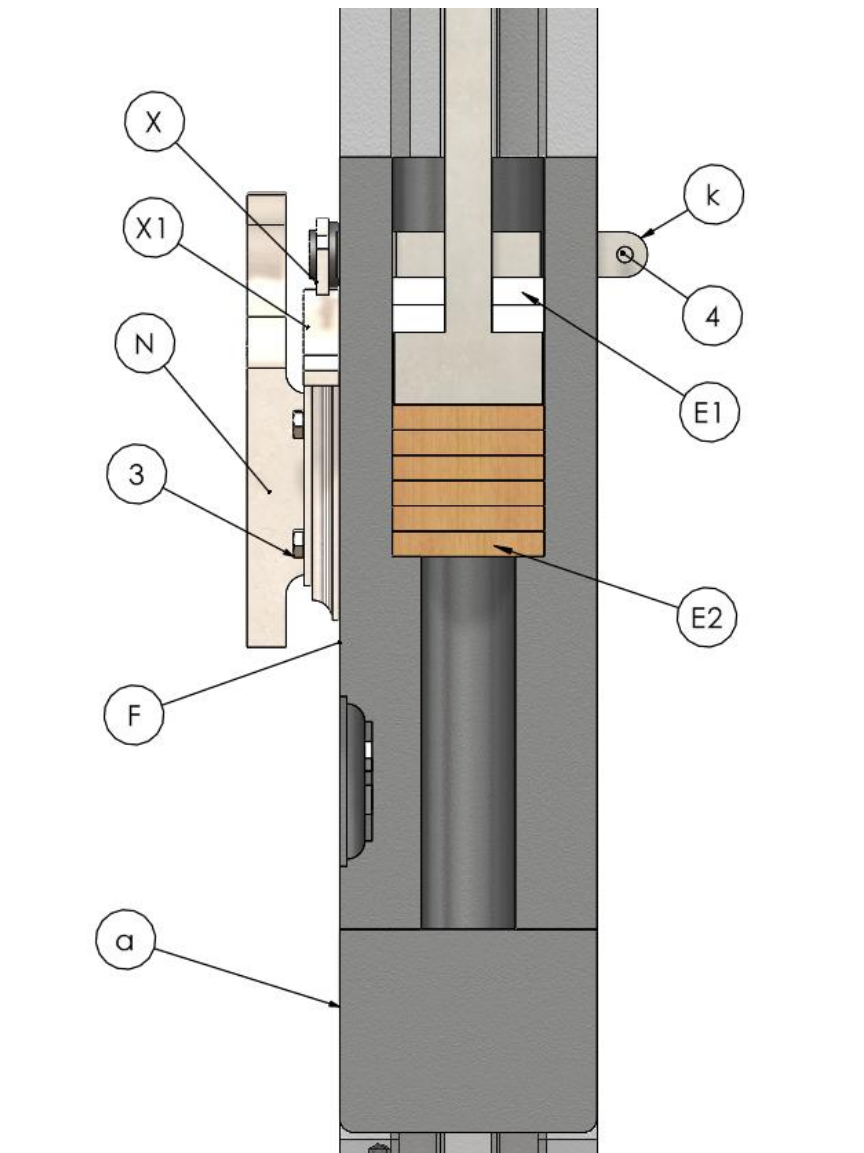


Figura 61: Sección transversal del martillo [Modelado SolidWorks]

3.4.6. Cilindros

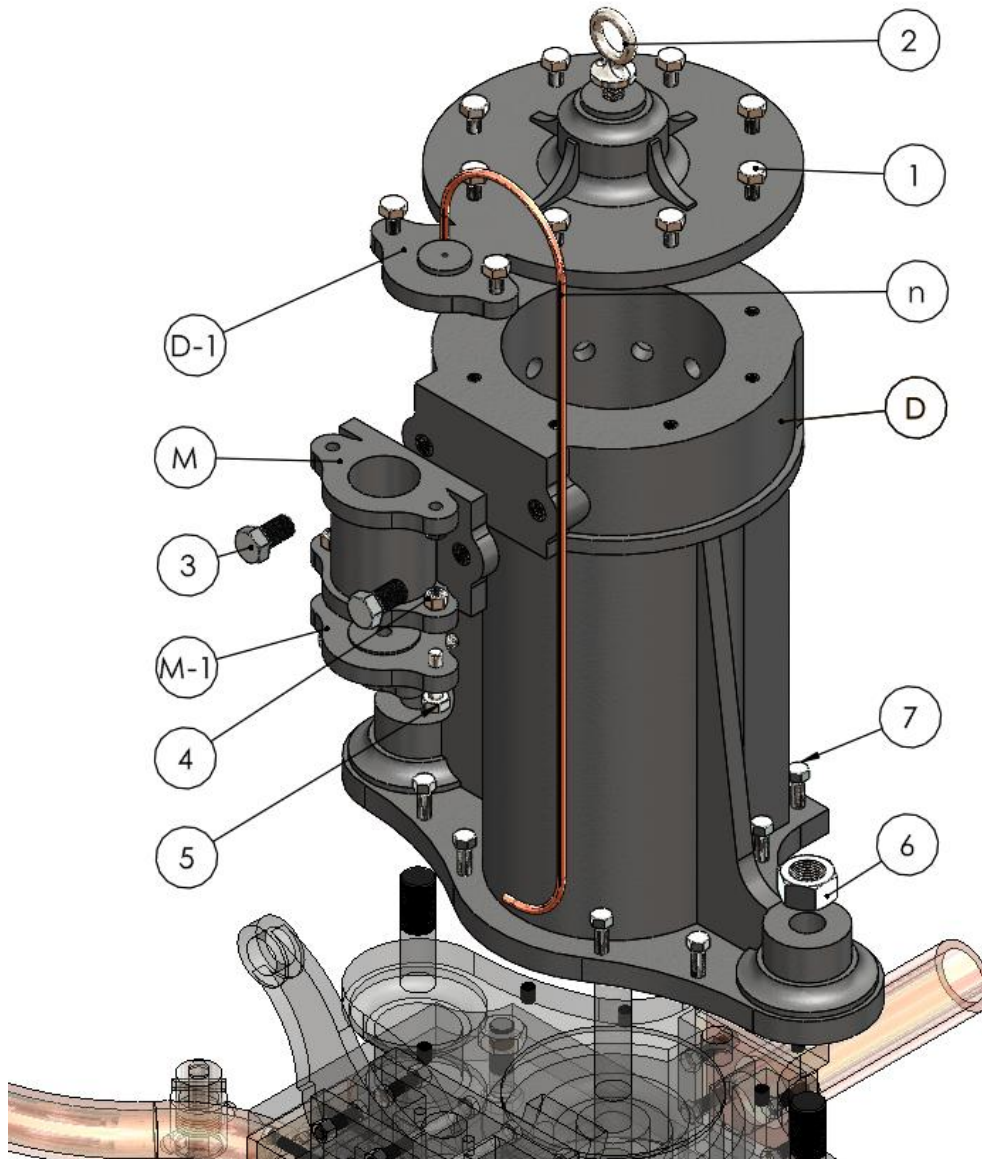


Figura 62: Cilindros explosionados [Modelado SolidWorks]

El cilindro de trabajo (D) es un gran cilindro vertical de hierro fundido, colocado en la parte superior del fondo de cilindro C anteriormente mencionado. Está asegurado y sellado a este mediante los pernos (7) y las tuercas (6). En su interior se desplaza el pistón anteriormente descrito y sellado mediante E-1. (Figura 61)

En su parte superior este sellado y protegido por la tapadera D-1, atornillada mediante 10 pernos (1), y presurizada mediante (2).

Por otro lado, cuenta con un cilindro auxiliar denominado (M) y fijado mediante los pernos (3). En su interior cuenta con otro pistón cuya funcionalidad es clave en la regulación y control de las válvulas, y que se analizará detalladamente cuando se explique el funcionamiento.

A este cilindro entra vapor a presión por la parte superior a través de la pequeña tubería de cobre (n). Además, está sellado herméticamente en su parte inferior mediante el elemento (M-1).

3.4.7. Sistema de accionamiento, regulación y control

Este sistema es el más complejo e ingenioso del martillo, y como se ha comentado en el capítulo anterior, fue diseñado por el ingeniero Robert Wilson. Consta de una serie de elementos de control que gobiernan las válvulas, tales como plantas articuladas, varillas, bielas y otros mecanismos. En la figura 62 se muestra en azul todo este sistema.

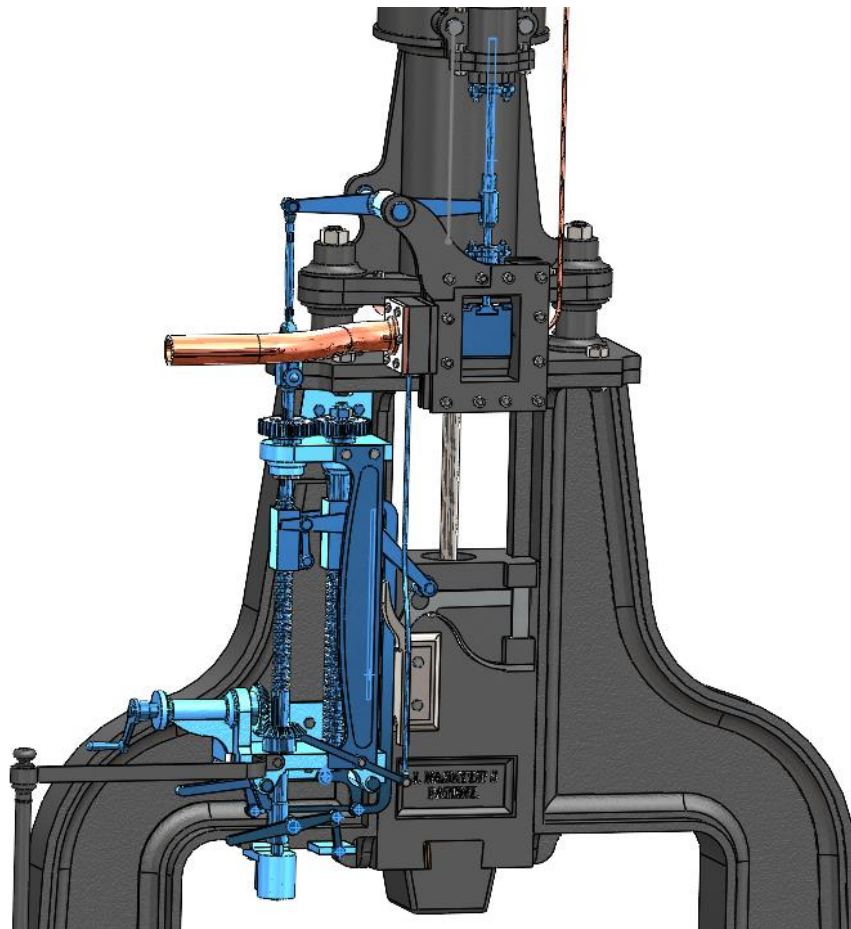


Figura 63: Sistema de accionamiento y regulación del martillo [Modelado SolidWorks]

En la figura 63, se muestra la parte inferior de este sistema, el cual es accesible para el operario y a través de la cual interactúa con el martillo. El operario interactúa concretamente a través de cuatro “inputs”:

- La palanca (d-1) para controlar la admisión de vapor.
- La palanca (y) para alternar entre los distintos modos de funcionamiento del martillo, según se deseen golpes potentes o suaves.
- La palanca (Z), para permitir que el operario tenga un control directo y manual sobre la válvula de vapor.
- Manivela (T-3), mediante la cual el operario puede ajustar la altura máxima de elevación del martillo.

El resto de los elementos son elementos sustentadores, de unión, o bien elementos de transmisión de los movimientos. Todo está fijado y atornillado al bastidor mediante el elemento (T) y (S). Este último es un cilindro de amortiguación, que se explicará con más detalle en apartados posteriores.

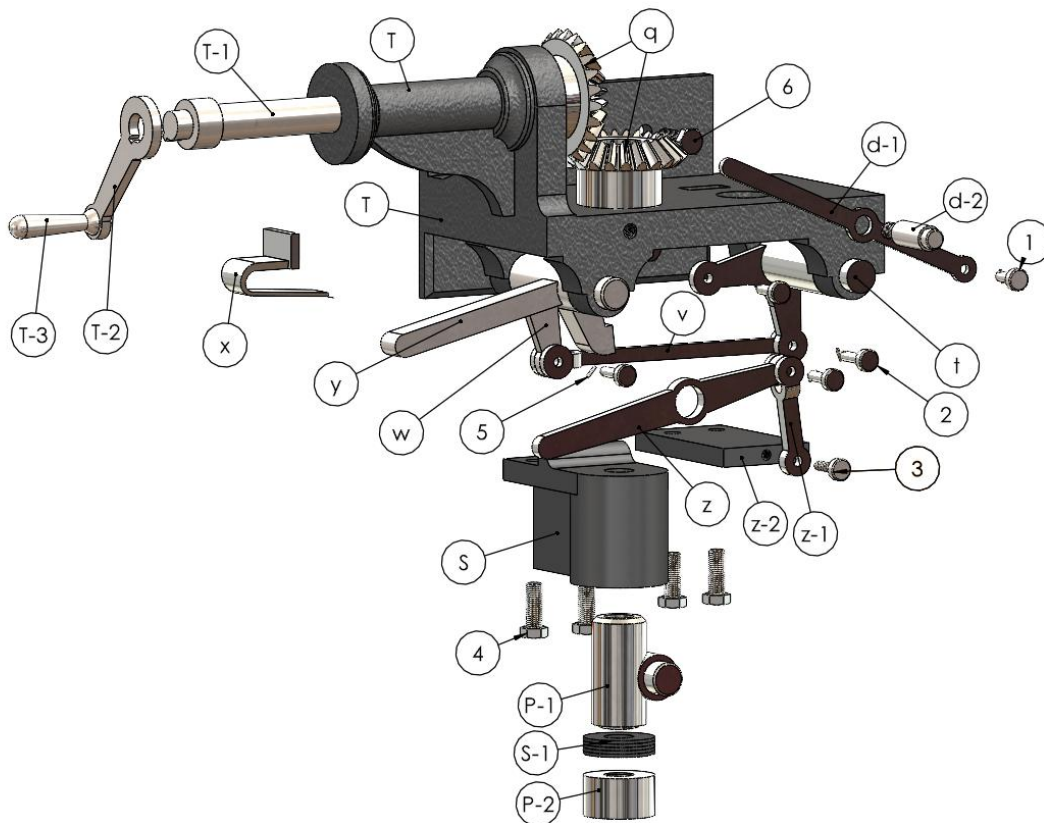


Figura 64: Parte inferior del sistema de accionamiento y regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]

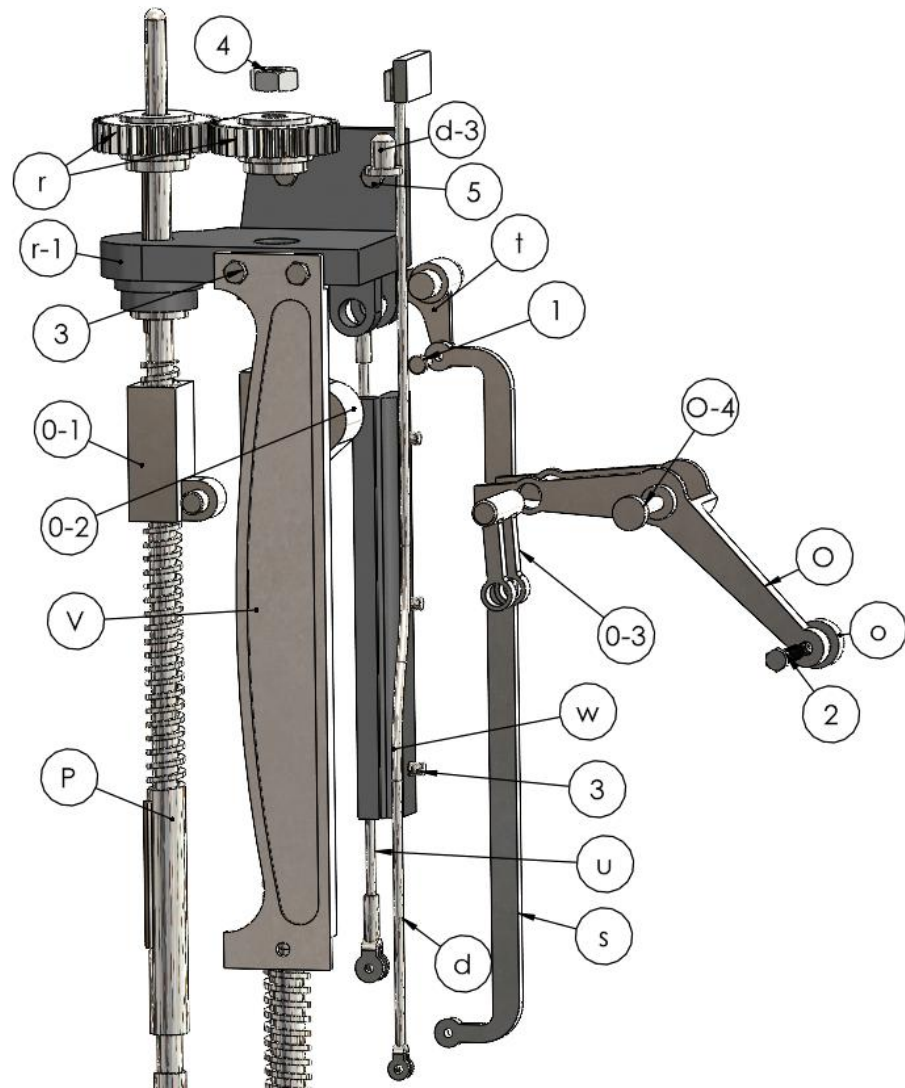


Figura 65: Parte intermedia del sistema de accionamiento, regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]

En la figura 64, se observa la parte intermedia de este mecanismo explosionada. La función fundamental de estos elementos es la de transmisión de los movimientos de la parte inferior efectuadas por el operario o de forma automática, y además interactuar con el bloque del martillo mediante la palanca (O) y la biela (s), lo que como se explicará detalladamente a continuación, permite la automatización del funcionamiento del martillo.

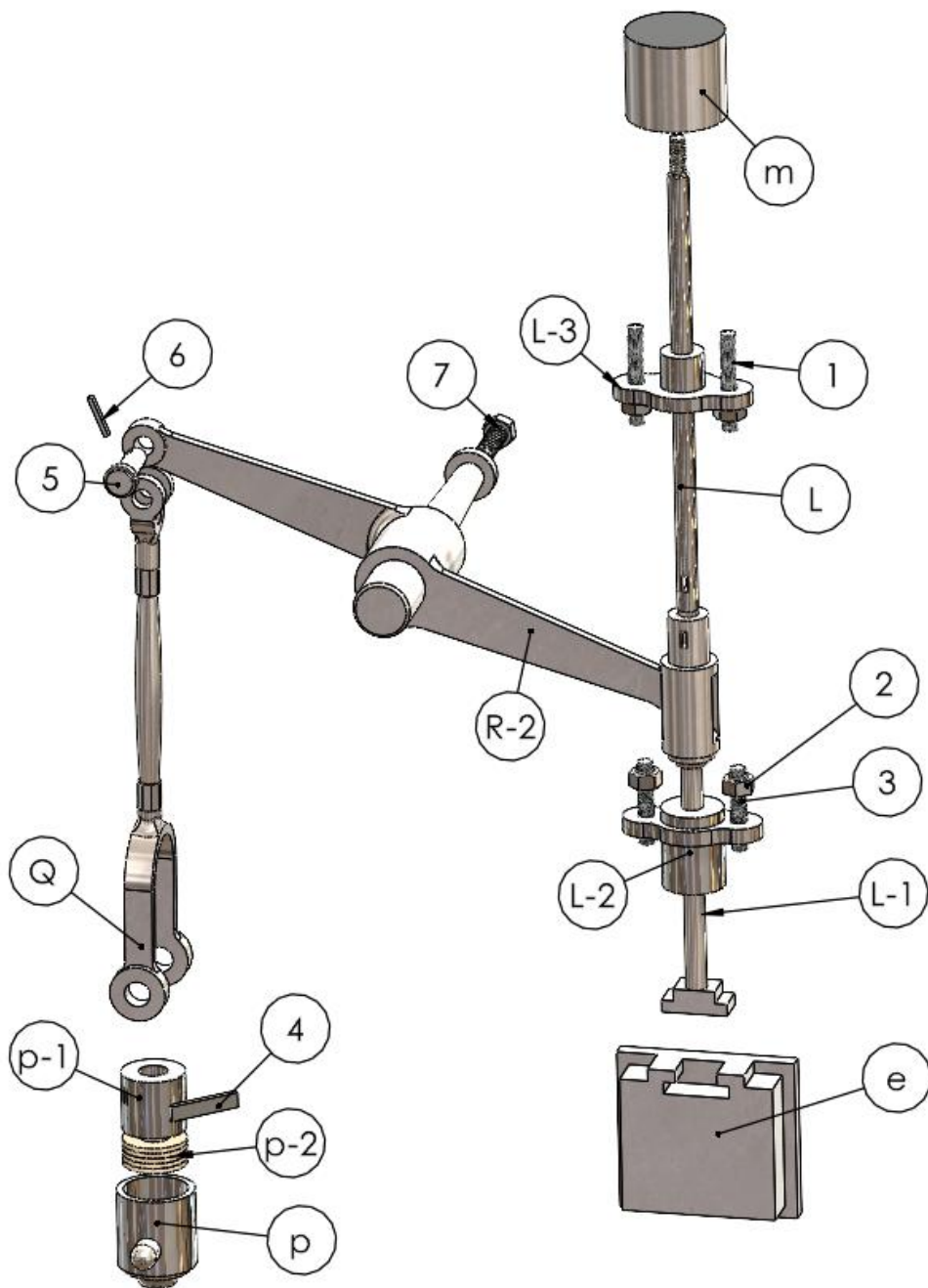


Figura 66: Parte superior del sistema de accionamiento, regulación y control del martillo explosionada [Modelado SolidWorks]

Por último, en la parte superior se encuentran una serie de elementos que se observan en la figura 65. Estos completan el mecanismo conectando y transmitiendo los movimientos a los elementos fundamentales de control, la válvula (e) y el pistón (m), los cuales se sitúan en el interior de la caja de válvulas y el cilindro auxiliar, respectivamente.

Los elementos de este sistema están fabricados con acero endurecido para resistir el desgaste.

3.4.8. Modelo ensamblado

En la figura 66 se puede observar el alzado del modelo ensamblado y renderizado.

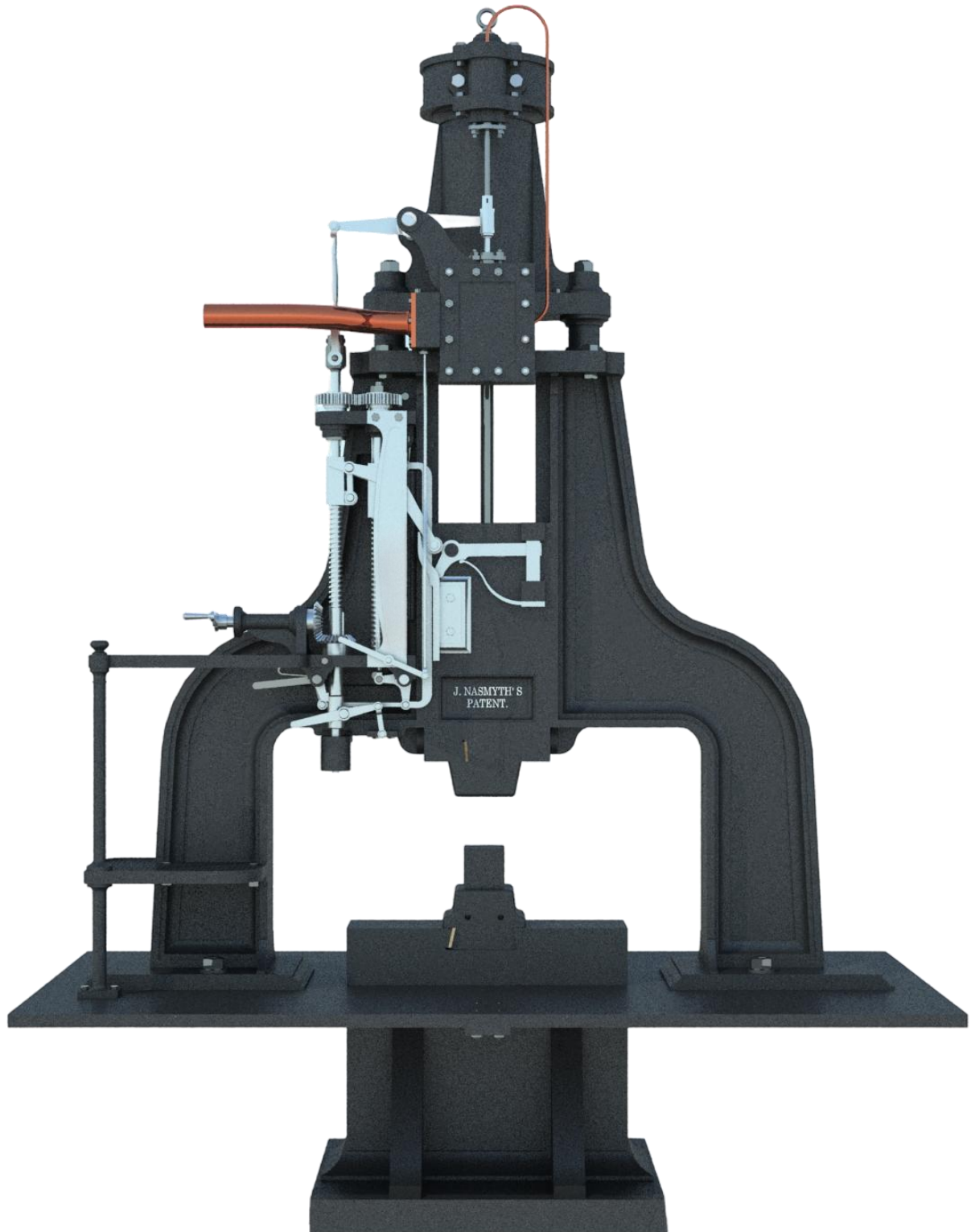


Figura 67: Alzado del modelo ensamblado renderizado [Modelado SolidWorks]

Por otro lado, en la figura 67 se puede observar un vista general del modelo ensamblado y renderizado.

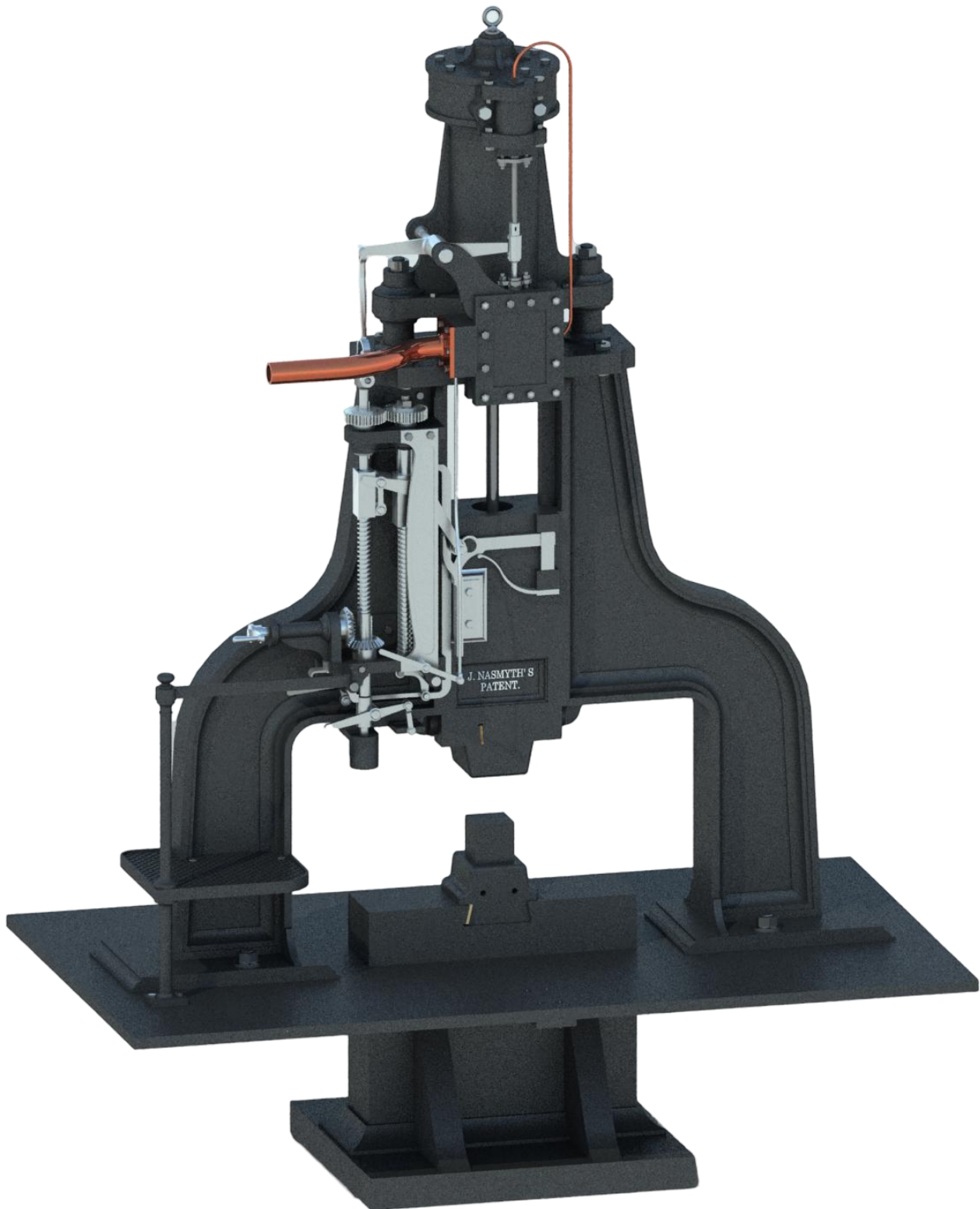


Figura 68: Vista general del modelo ensamblado renderizado [Modelado SolidWorks]

3.5. Principio de funcionamiento

Ya conocida la estructura y principales partes del martillo, y como estas se ensamblan entre sí. Se va a explicar detalladamente el funcionamiento del martillo.

Para facilitar la comprensión, se utilizarán una serie de ilustraciones con flechas de dirección. Las flechas rojas indicarán movimiento de elementos, mientras que las flechas azules servirán para indicar el flujo de vapor.

3.5.1. Sistema de admisión del vapor y elevación del martillo.

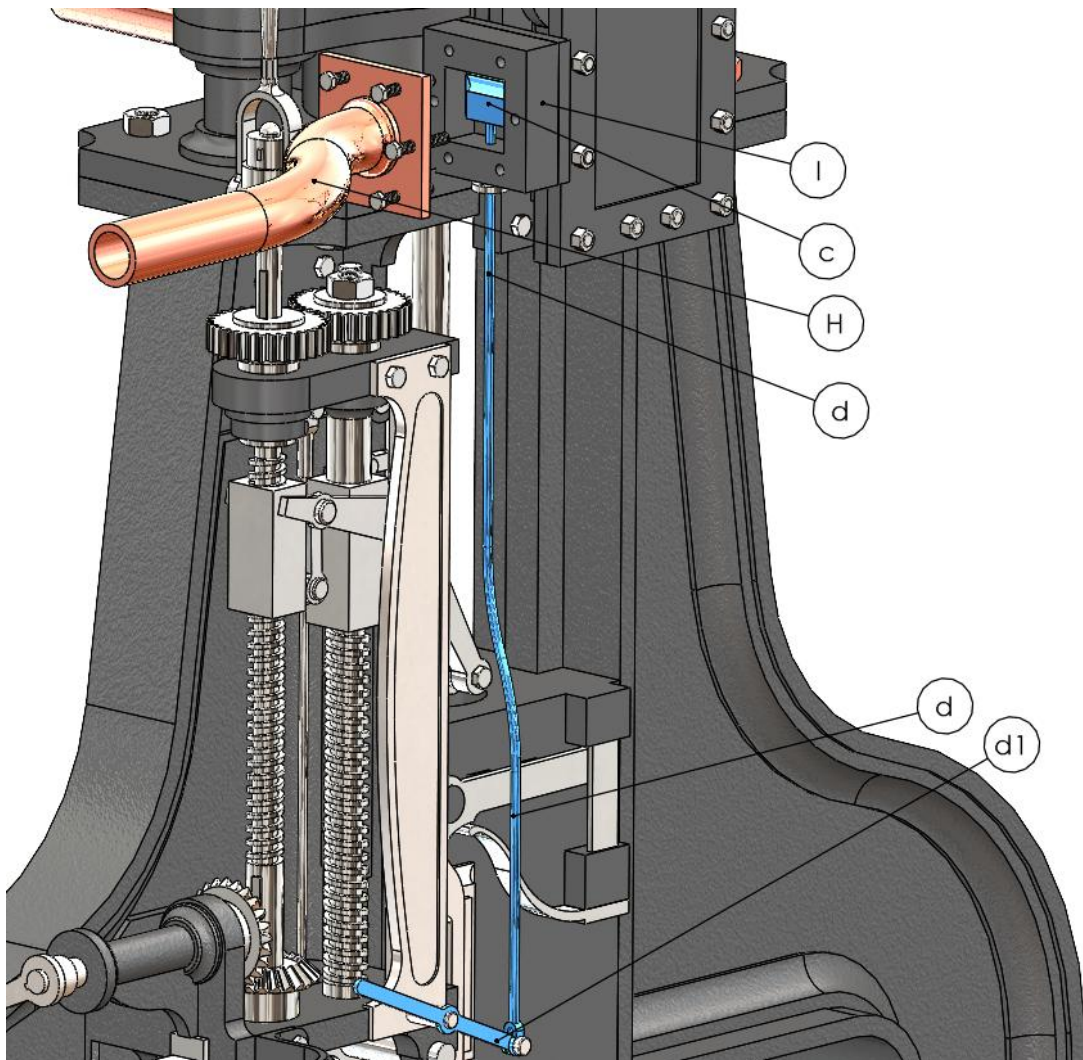


Figura 69: Elementos del sistema de admisión del vapor y elevación del martillo [Modelado SolidWorks]

En primer lugar, se va a describir el mecanismo de control de la admisión regulación del vapor, que está compuesto de varios elementos resaltados en azul en la figura 68. Estos son el mango “d1”, la varilla de la válvula de regulación o cierre “d”, y la propia válvula de regulación o de cierre “c”. (Figura 69)

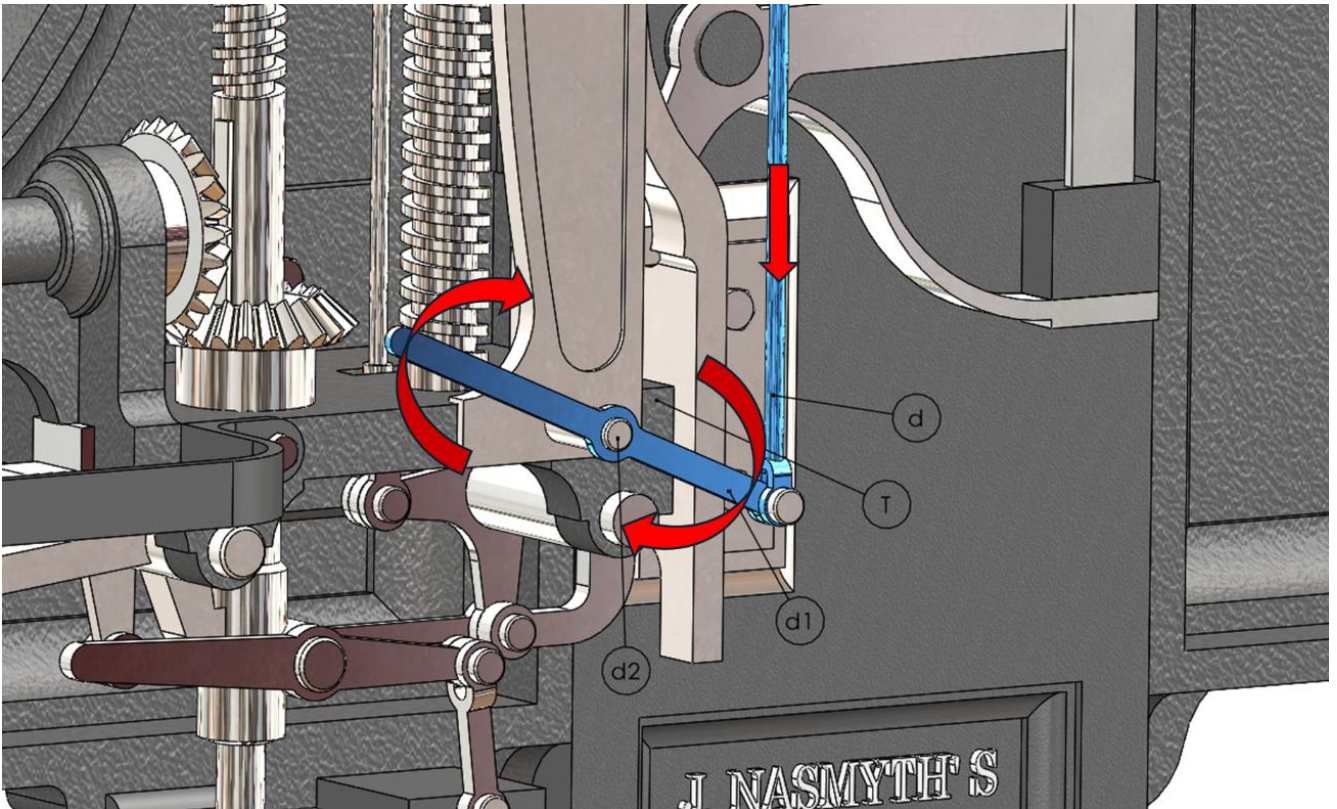


Figura 70: Movimientos de la palanca (d1) y varilla (d) [Modelado SolidWorks]

El mango (d1) está unido a la estructura rígida (T), que se trata de un soporte fijado al bastidor, mediante una unión en tornillo (d2) que actúa como eje de giro. Este tornillo está fijado a la estructura rígida, mientras que la palanca pivota libremente alrededor de él, permitiendo su movimiento de rotación.

Este mango es accesible por el operario desde su zona de operación y este controla la admisión girando el mango. Como se puede observar en la figura 69, si el operario ejerce una fuerza descendente ascendente sobre un extremo del mango, el otro extremo sufrirá un movimiento descendente, transmitiéndose este movimiento consecuentemente a la varilla (d).

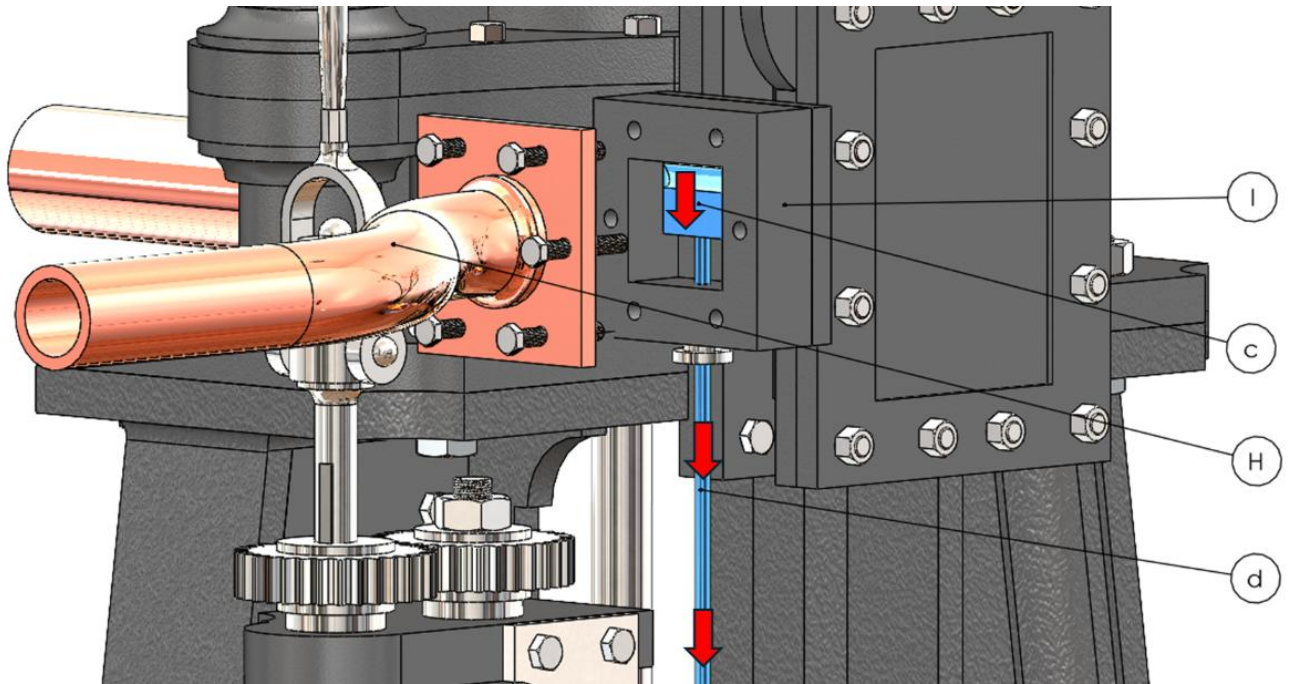


Figura 71: Movimientos de varilla (d) y válvula (e) [Modelado SolidWorks]

Al estar la varilla (d) unida rígidamente a la válvula de regulación o de cierre (c), esta también descendería, dentro de la caja de la válvula de regulación “I”, la cual está completamente unida mediante tornillería a la tubería de admisión de vapor “H”. Esto se observa en la figura 70.

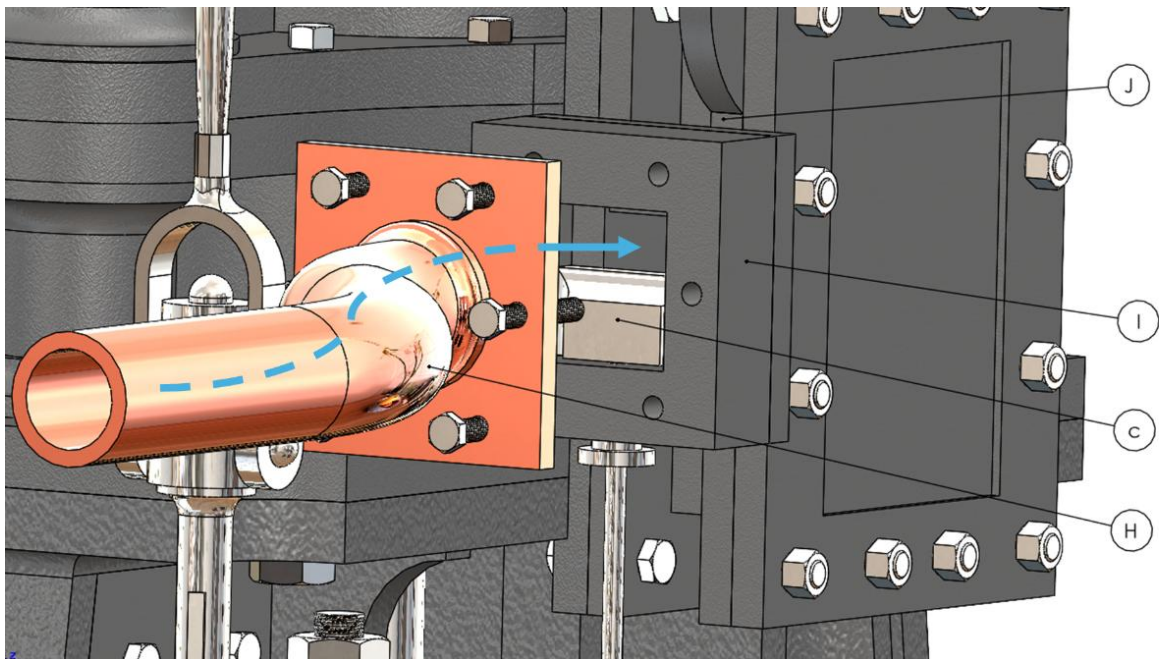


Figura 72: Entrada de vapor a la caja (I) [Modelado SolidWorks]

Por tanto, al descender la válvula de regulación o de cierre (c), iría regulando progresivamente la entrada de vapor a la caja de la válvula de vapor “J”, mediante una abertura que se va quedando expuesta. La entrada de vapor descrita se observa de forma gráfica en la figura 71.

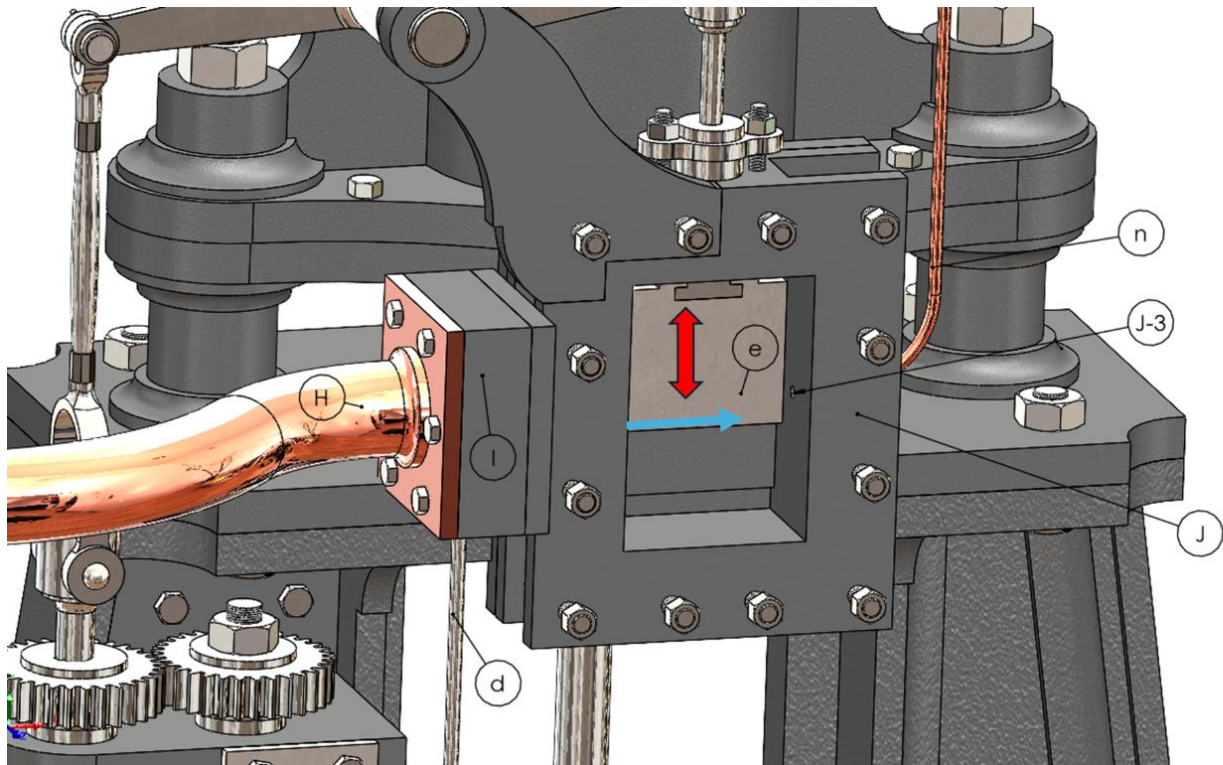


Figura 73: Entrada de vapor en la caja (J) y su canalización en el orificio (J-3) [Modelado SolidWorks]

La caja de la válvula de vapor (J) alberga en su interior una válvula de vapor (e), que se puede desplazar verticalmente dentro de ella.

Una vez entrado el vapor a la caja de la válvula de vapor (J), y mientras la válvula de vapor (e) se sitúe en la parte superior, la caja se encontrará completamente sellada, a excepción del pequeño orificio (J-3) en la pared derecha de la caja. Es por ello por lo que el vapor se dirigirá a esa abertura, canalizándose por una pequeña tubería de cobre denominada (n). Esta descripción se observa gráficamente en la figura 72.

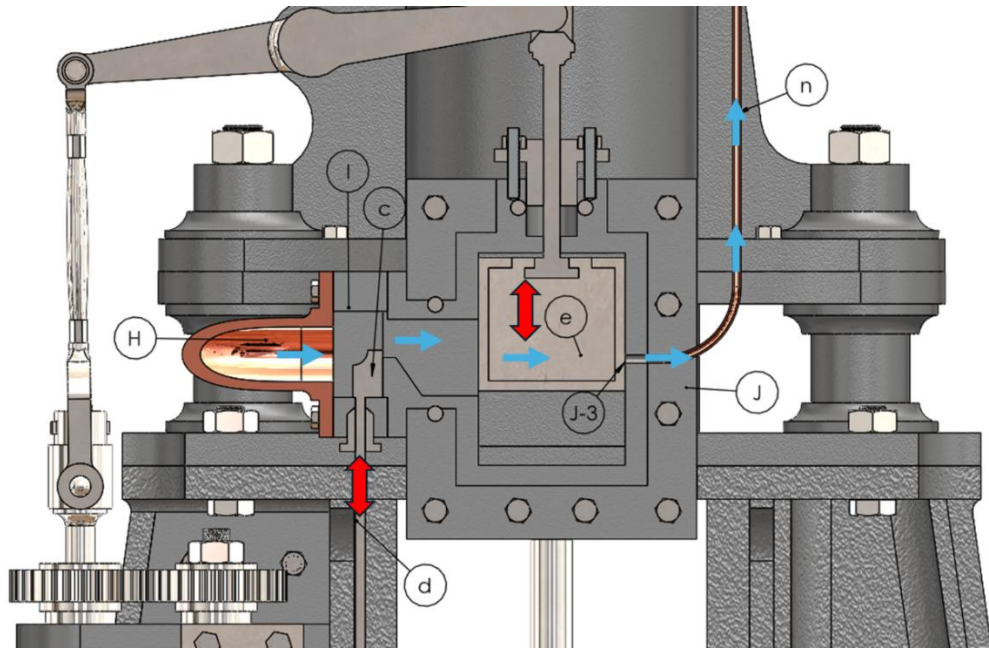


Figura 74: Flujo del vapor por orificio (J-3) y por tubo (n) [Modelado SolidWorks]

En la figura 73, se observa una sección en corte que facilita la comprensión el mecanismo explicado.

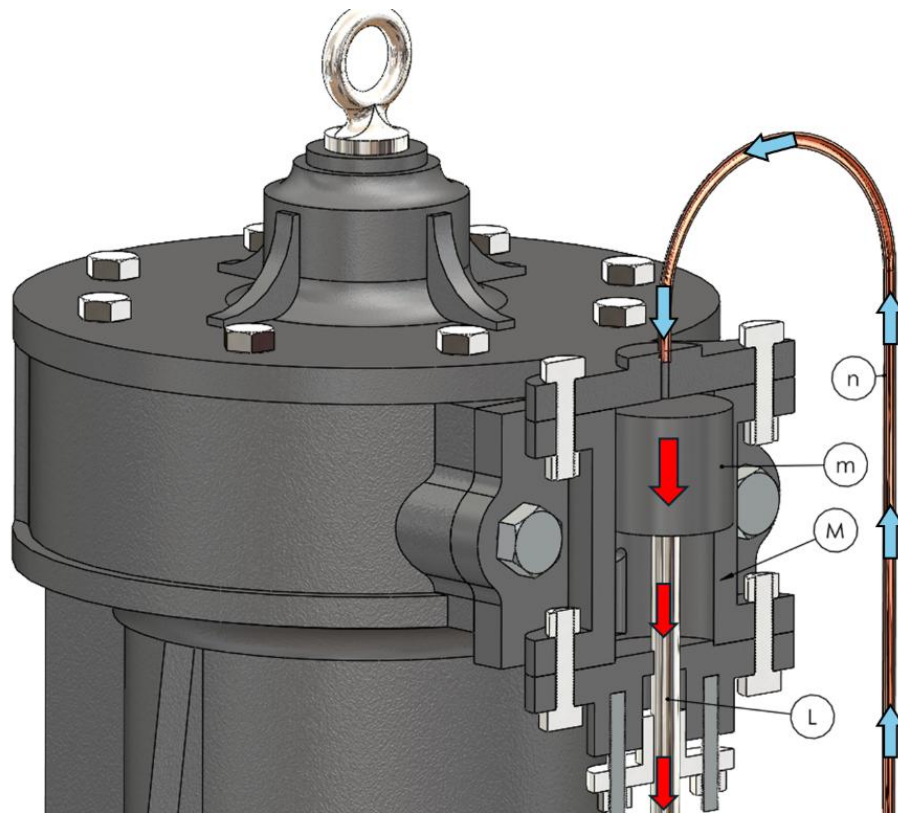


Figura 75: Flujo de vapor hacia cilindro (M) y empuje del pistón (m) y varilla (L) [Modelado SolidWorks]

El vapor canalizado por la tubería (n), asciende hasta llegar a un cilindro denominado (M). El vapor se introduce dentro de (M), provocando el desplazamiento de un pistón en su interior denominado (m). Este pistón está unido rígidamente a una varilla de válvula de vapor (L), (Figura 74).

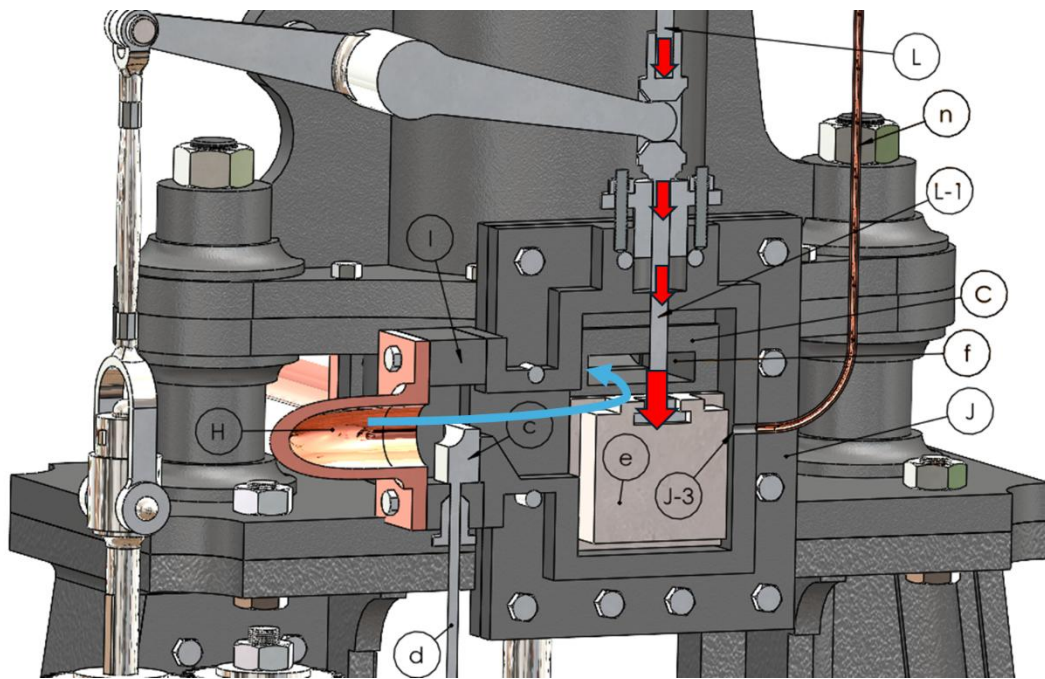


Figura 76: Descenso de varilla (L), (L-1) y de la válvula. Flujo de vapor hacia (f) [Modelado SolidWorks]

En su otro extremo, (L) está conectada con la válvula (e), a través de la varilla (L1). Por tanto, como se observa en la figura 75, al descender el pistón (m), también descendería en igual medida la válvula (e). Este descenso deja libre una abertura denominada (f) en el elemento que integra conductos de vapor (C), por el que se dirige el flujo de vapor.

Gracias a este mecanismo, se puede afirmar que siempre que no haya una fuerza mayor que contrarreste la que genera el vapor que se canaliza por el cable de cobre (n) sobre el pistón (m), la válvula (e) siempre estará en la posición inferior. Esto es de gran importancia ya que tiene consecuencias fundamentales en el funcionamiento general del martillo, que se desarrollarán a continuación.

En la figura 76 a continuación, se puede observar un corte transversal de la máquina que ejemplifica claramente que sucede cuando el vapor fluye por (f).

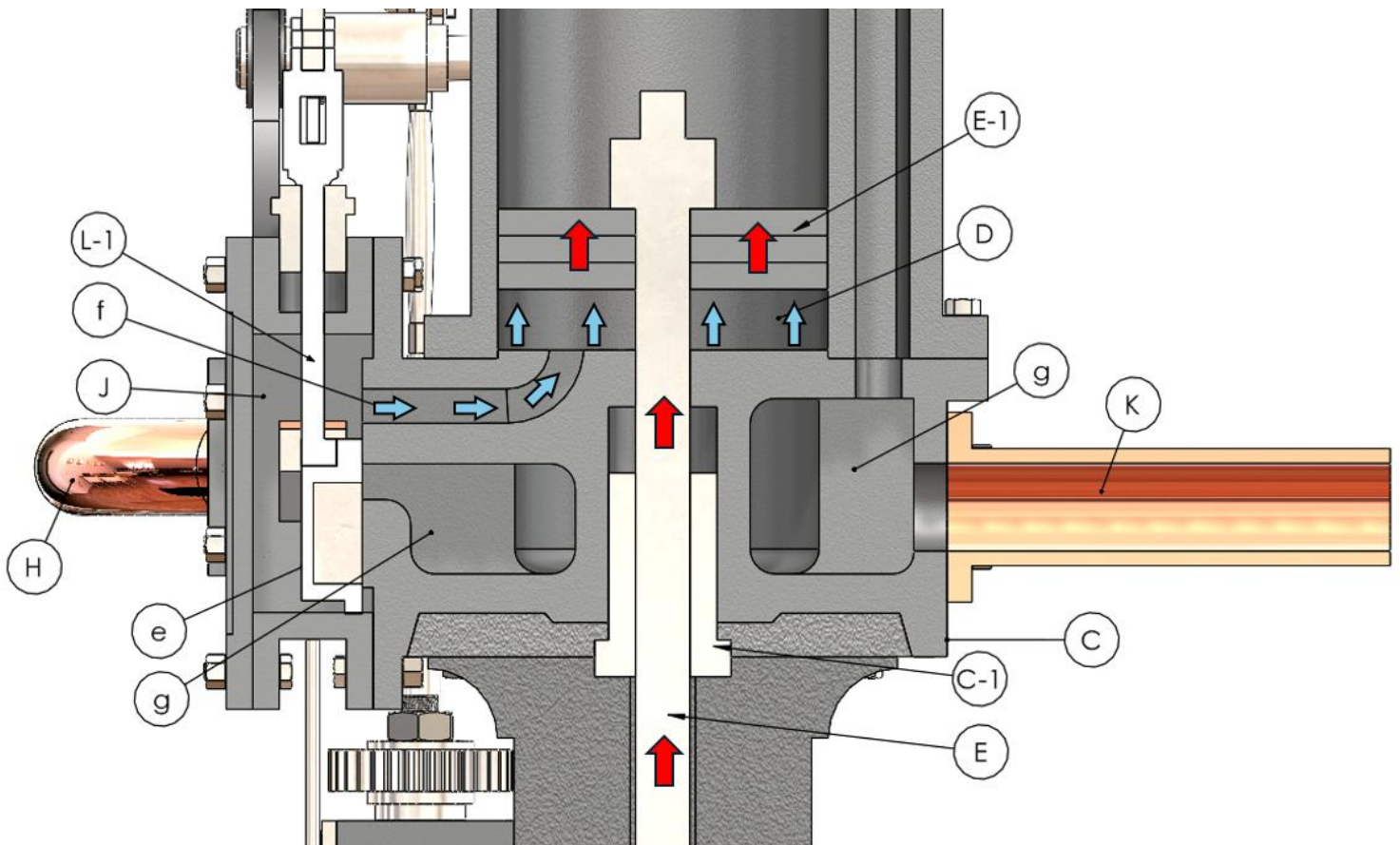


Figura 77: Flujo de vapor en (f), entrada de vapor al cilindro (D) y empuje del pistón (E)

[Modelado SolidWorks]

Cuando la válvula (e) está en la posición inferior, el vapor se dirige a la abertura (f), e introduciendo en el cilindro principal “D”. Este vapor presiona la superficie de los discos (E-1), los cuales están rígidamente soldados al pistón principal €. El pistón (E) es a su vez ensamblado con el martillo, por lo que la presión del vapor hace que el ensamble completo del martillo se eleve, como se muestra en la figura 77 a continuación.

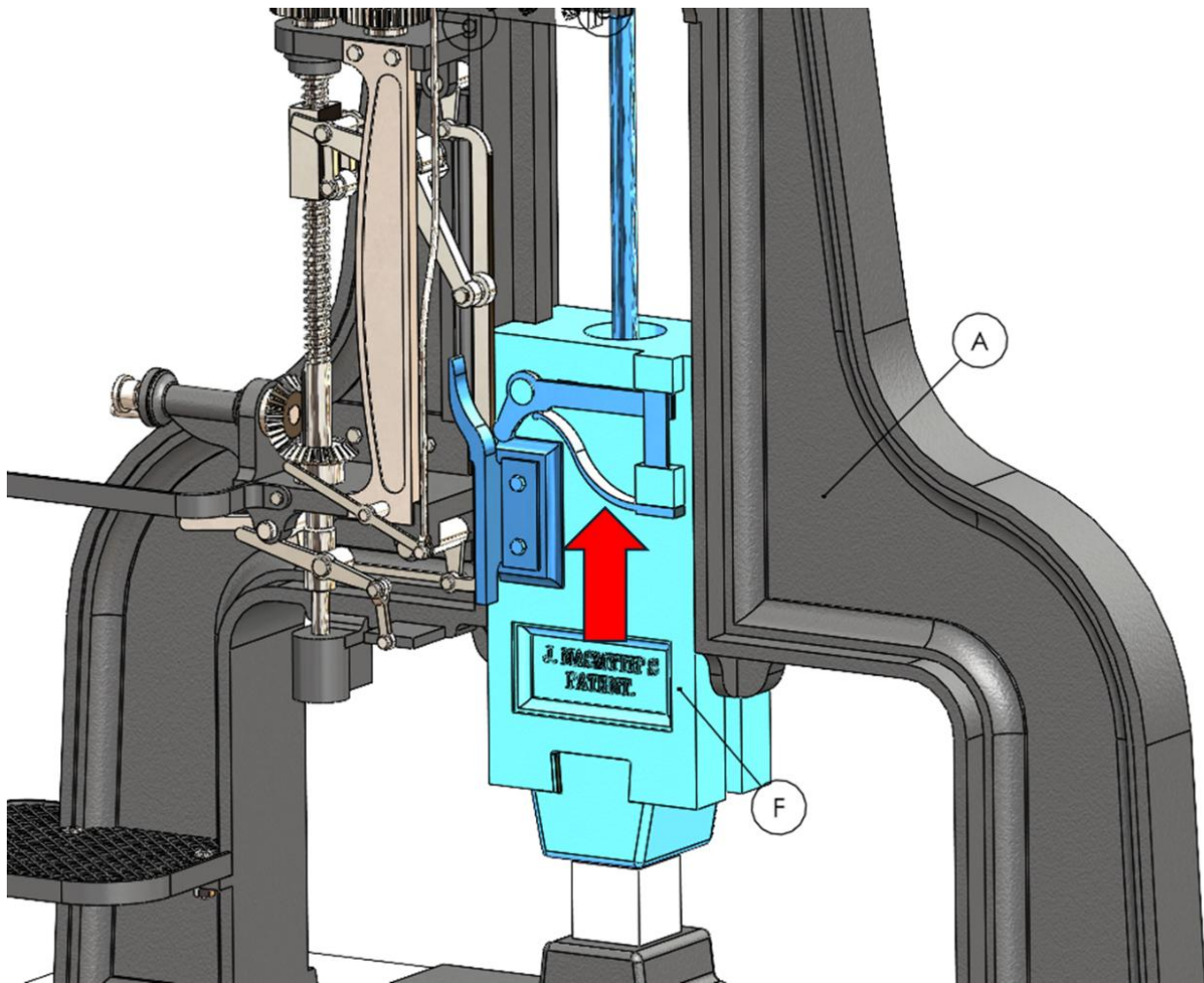


Figura 78: Ascenso del bloque del martillo [Modelado SolidWorks]

La pieza principal de sustentación del martillo (A), cuenta con unos salientes en sus caras interiores que hacen la función de guía para el martillo, el cual cuenta por unas hendiduras en sus laterales que encajan con los salientes mencionados. Por tanto, el movimiento del martillo está restringido al plano vertical.

En este punto cabría preguntarse hasta donde sube el martillo, por lo que se analizará esto detalladamente en el siguiente apartado.

3.5.2. Sistema de tope de la subida del martillo.

A continuación, se va a describir el sistema que diseñó Robert Wilson para limitar el tope de la carrera del martillo en su subida. Se observa el mecanismo en la siguiente figura 78, y se describe a continuación.

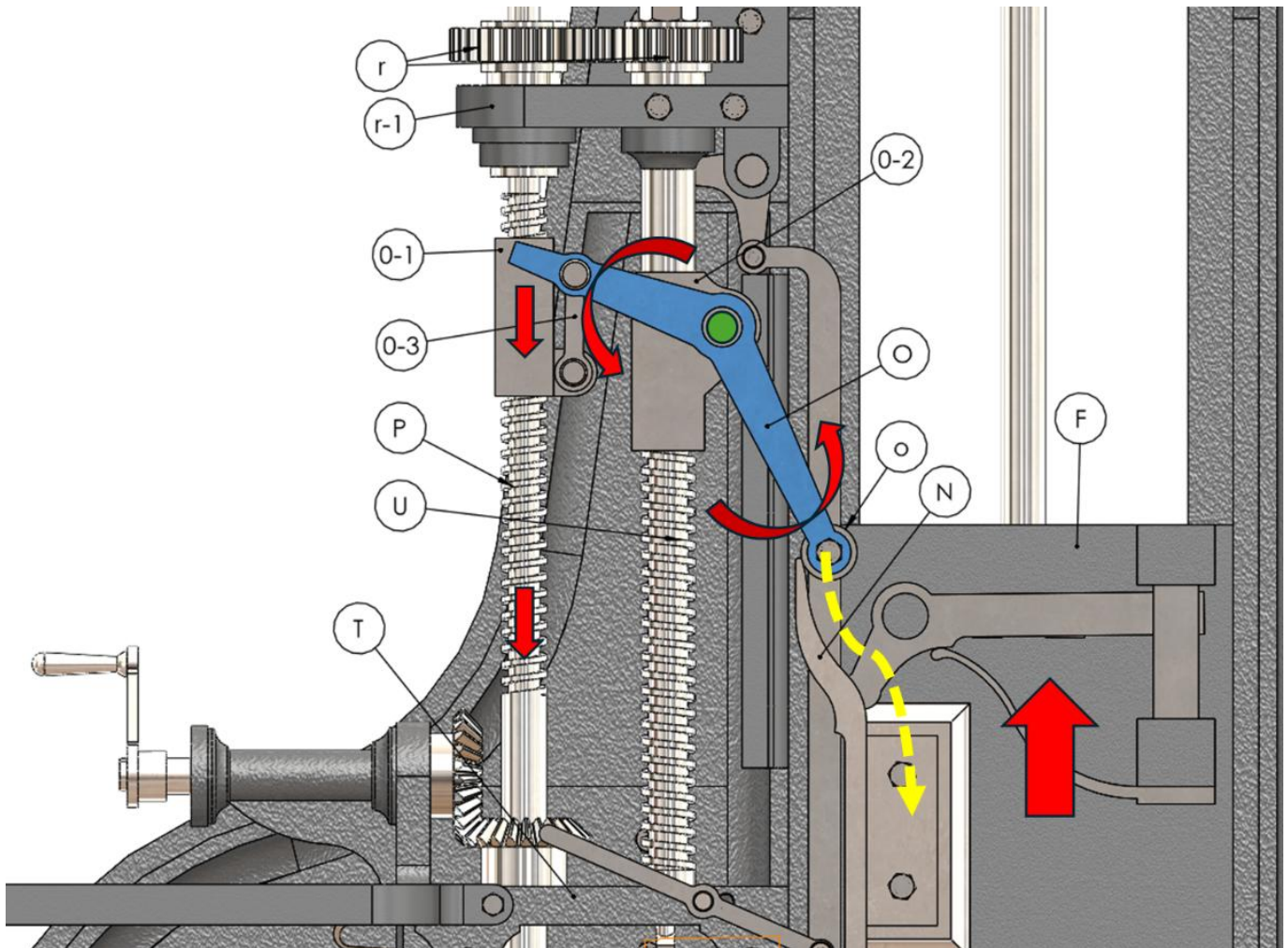


Figura 79: Mecanismo de accionamiento del brazo-palanca (O) [Modelado SolidWorks]

La pieza principal del martillo (F), tiene atornillada una pieza denominada (N). Cuando el martillo en su elevación alcanza cierta altura, esta pieza (N) entra en contacto con el extremo de una palanca denominada (O), en concreto, una pequeña polea de fricción en el extremo de esta palanca (o).

En este punto es importante destacar que la palanca (O), también está unida a las tuercas (O-1) Y (O-2), las cuales están roscadas en las varillas roscadas verticales (P) y (U), respectivamente.

La varilla (P), está roscada en la mayor parte de su longitud y está diseñada de manera que pueda moverse tanto en sentido rotatorio como en dirección vertical. En cambio, la varilla U, esta ensamblada en sus extremos en los elementos fijos (r-1) y en (T), teniendo limitado el movimiento vertical y solamente puede rotar sobre sí misma.

La rueda de fricción (o), ante la subida del martillo (F), es guiada a lo largo de la trayectoria mostrada en amarillo, determinada por la geometría de la pieza (N).

Debido a que la rosca U, como se ha explicado, está limitada en el eje vertical, la tuerca (O-2) permanece fija, actuando como punto de apoyo o fulcro sobre el cual pivota la palanca (O) (punto verde).

Por tanto, la palanca (O) sufre una rotación antihoraria debido a la fuerza ejercida por la pieza (N), con un centro de rotación en el punto mencionado. Por otro lado, como se ha comentado, la varilla roscada (P) tiene libertad de movimiento en el eje vertical, por lo que, en definitiva, la fuerza ejercida por (N) sobre (P) provoca un movimiento descendente de la tuerca (O-1) y varilla roscada (P) conjuntamente, resultando aproximadamente en la posición que se muestra en la siguiente figura 79:

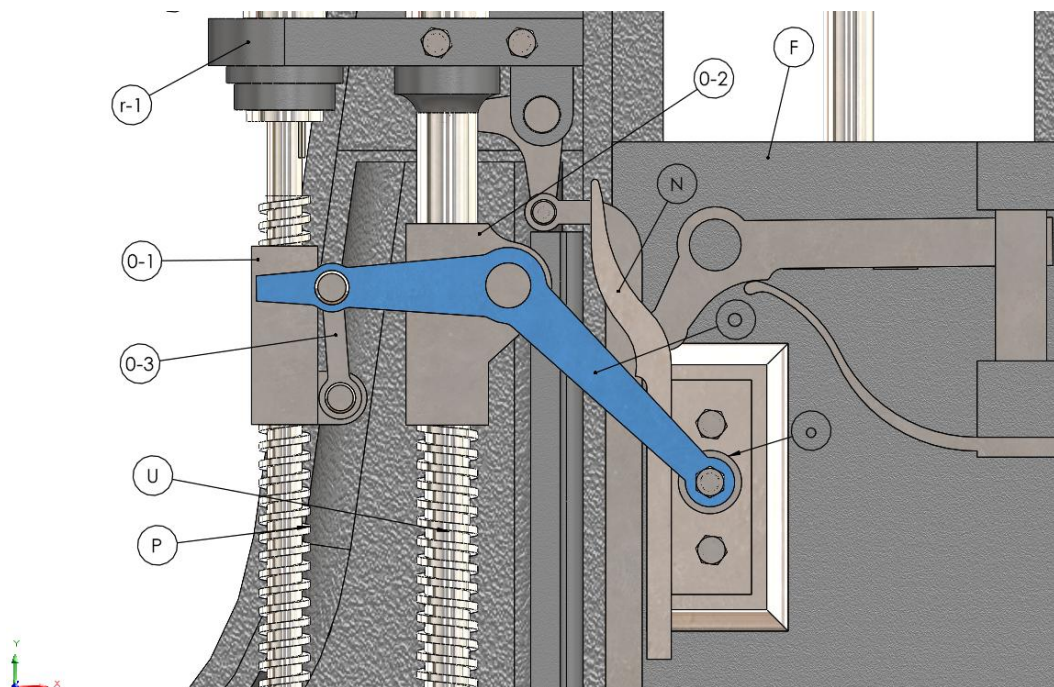


Figura 80: Posición final alcanzada del brazo-palanca (O) [Modelado SolidWorks]

El movimiento de descenso descrito de la varilla (P), desencadena otra serie de movimientos descritos a continuación, y que se pueden analizar gráficamente en la siguiente figura 80 y 81.

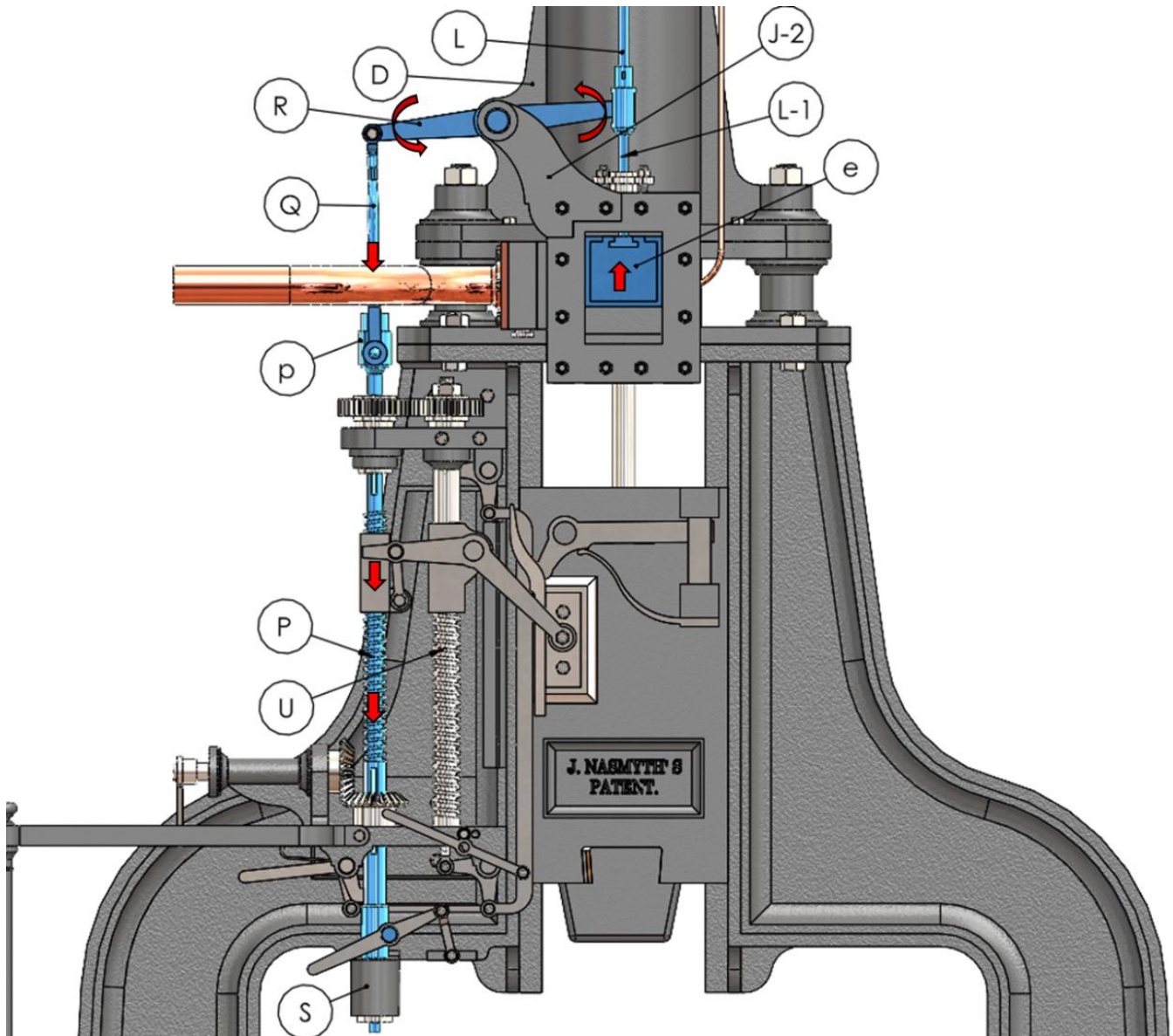


Figura 81: Transmisión de movimiento por la varilla P y elementos p, Q, R, L-1 y e [Modelado SolidWorks]

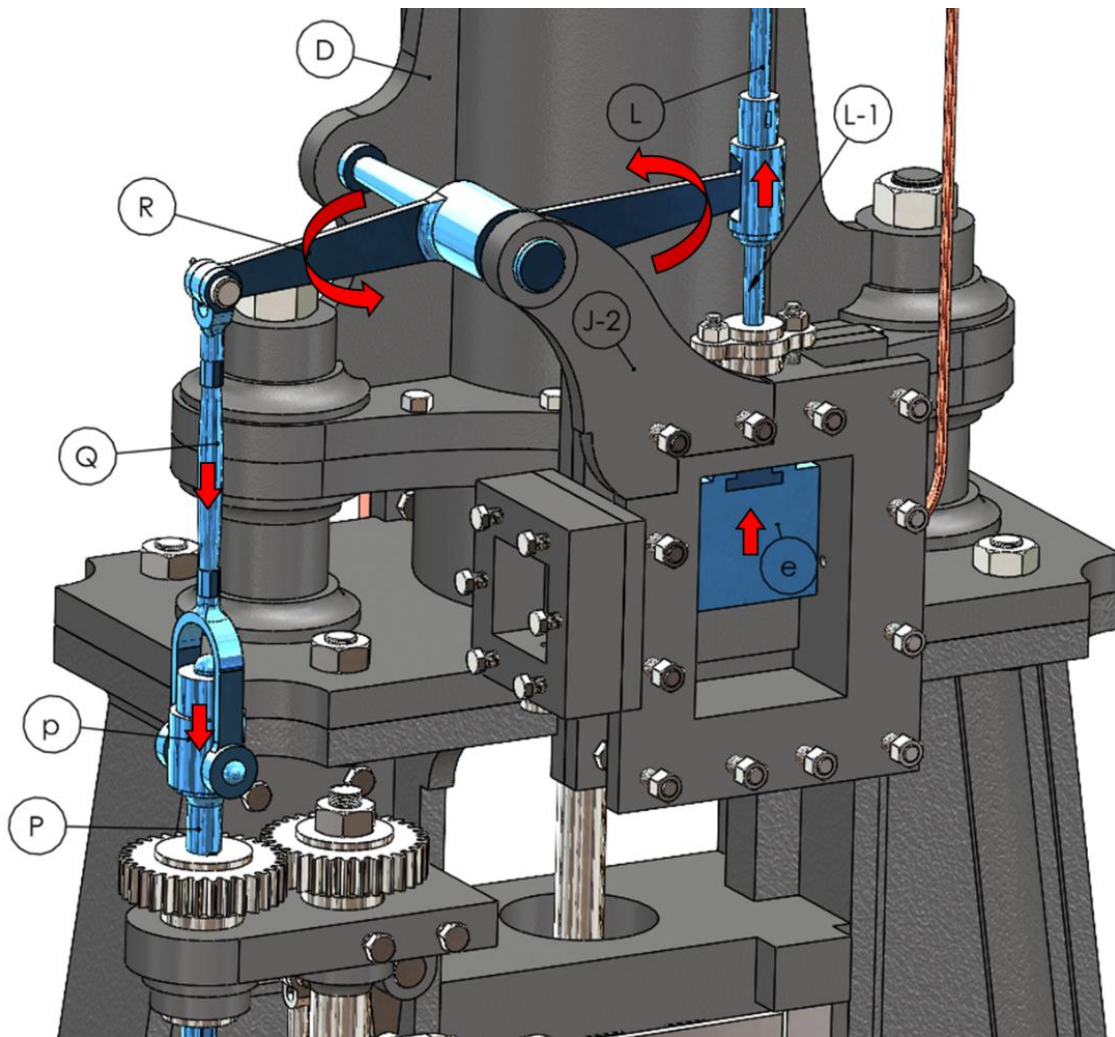


Figura 82: Transmisión de movimiento por la varilla (P) y elementos (p), (Q), (R), (L-1) y (e) (visión superior) [Modelado SolidWorks]

Como se puede observar gráficamente, cuando el elemento desciende, el movimiento se transmite a la cadena de piezas (p) y (Q), la cual ejerce fuerza en el extremo izquierdo de la palanca de la válvula ®. Esta palanca ® se encuentra fijada en su punto central a los elementos (D) y (J-2), aunque con libertad de giro. En consecuencia, la palanca rota en sentido antihorario, transfiriendo el movimiento en su extremo derecho a las varillas verticales (L) y (L1), lo que eleva la válvula (e) hasta su posición superior.

Al elevarse la válvula (e), se establece una conexión entre el interior del cilindro y el exterior, lo que permite que el vapor acumulado se libere rápidamente a través del conducto de escape la presión interna en el interior del cilindro cae de forma abrupta y se

igual a la presión atmosférica, eliminando la fuerza ascendente que mantenía elevado al pistón. Esto se observa gráfica mente en la siguiente figura 82:

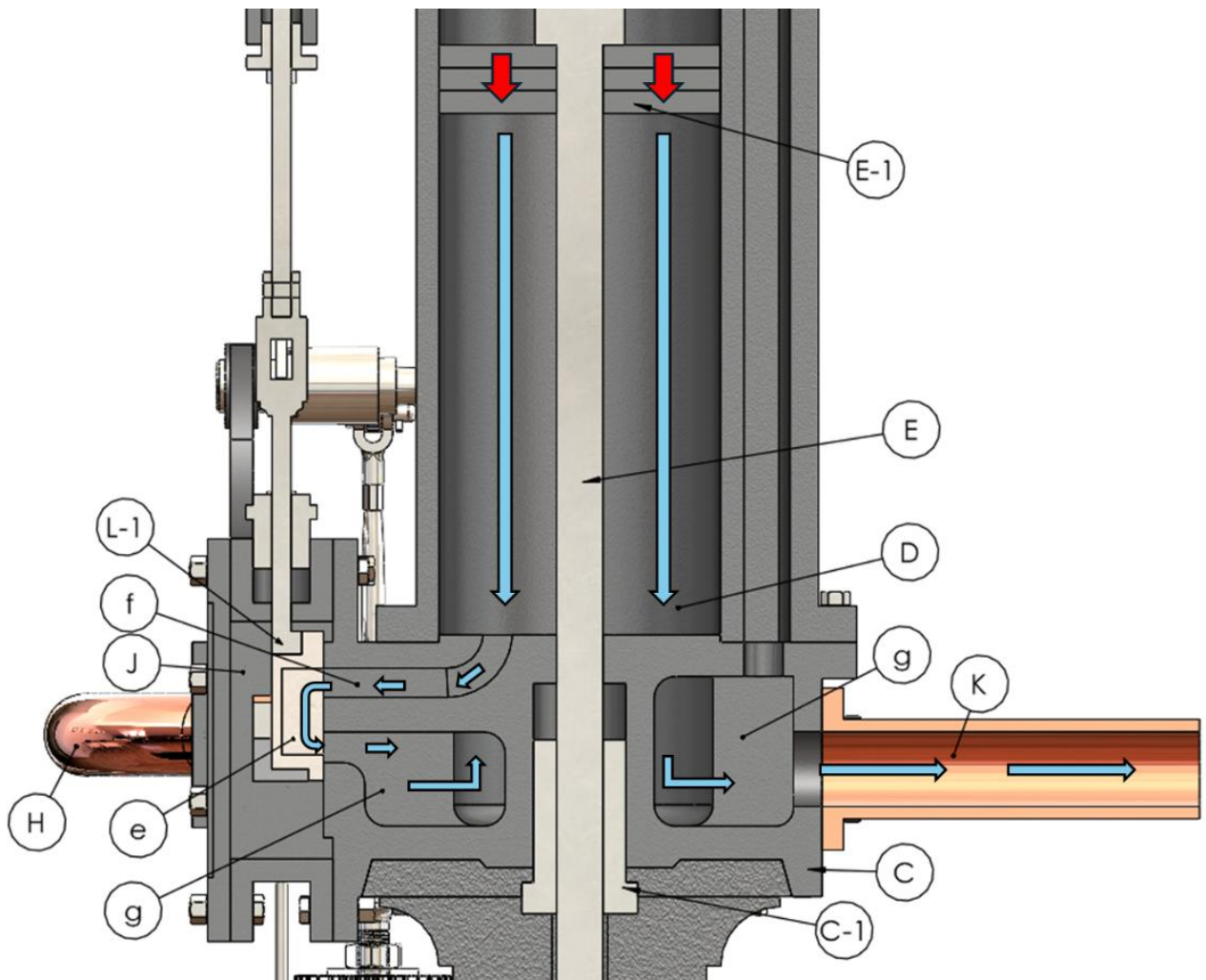


Figura 83: Vaciado del cilindro y caída del pistón (E) [Modelado SolidWorks]

El movimiento de (e) provoca que ya no entre vapor de la admisión por el conducto (f), sino que, al contrario, (f) se conecte con otro conducto denominado (g) mediante la cavidad interior de la válvula (e). El conducto (g), que está en el interior (C), conecta directamente con el exterior mediante la tubería de escape denominada (K).

Por tanto, la fuerza que ejerce el martillo por la gravedad hace que este caiga, y los discos (E-1) empujan el vapor del interior del cilindro (D), evacuándolo de la forma que se ha descrito.

Con el mecanismo descrito en este apartado, se consigue por tanto establecer un tope a la elevación vertical del martillo, ya que la altura máxima del martillo estará

limitada por posición de la palanca (O). No obstante, en el siguiente apartado se verá como el diseño de Nasmyth y Wilson permitía regular la altura de esta palanca, para que, de esa forma, el operario pueda ajustar la elevación máxima del martillo.

3.5.3. Mecanismo de regulación de la altura de caída

Como se ha descrito pormenorizadamente, la palanca (O) actúa como tope de la subida de conjunto del martillo. Por tanto, si se puede ajustar la altura de (O), se podrá ajustar por tanto la altura máxima que alcanza el martillo en su subida, adaptándose así a los requerimientos del trabajo a realizar. En la siguiente figura 83, se muestra de forma gráfica, el principio de funcionamiento de este sistema de regulación:

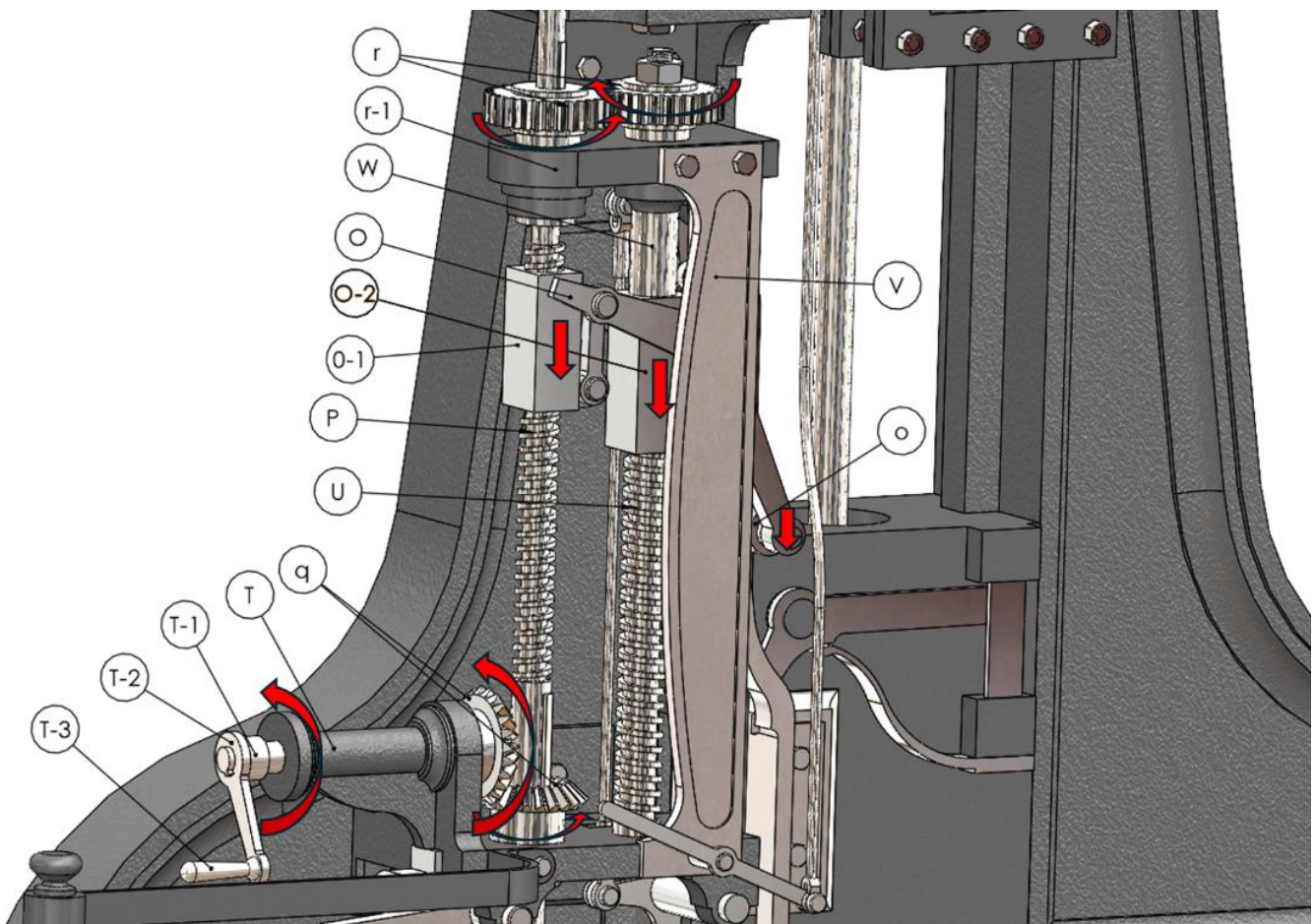


Figura 84: Mecanismo de regulación de altura [Modelado SolidWorks]

La regulación de la altura se realizará a través de una manivela, denominada (T-2) y operada a través del mango (T-1), accesible por el operario. La manivela (T-2), está unida a un eje corto (T-1) mediante una chaveta. Este eje gira sobre sí mismo en el interior de T, un soporte fijado al bastidor.

En el otro extremo de este eje corto, está unido a una rueda cónica, transmitiéndole el giro de la manivela mediante el eje.

Esta rueda cónica está unida a 90 grados con otra rueda cónica idéntica, que permite transmitir el movimiento de rotación de un eje horizontal a un eje vertical.

Esta rueda cónica de eje vertical es concéntrica con la varilla roscada P y le transmite el movimiento de giro mediante una chaveta. Como se mencionó anteriormente, la varilla (P) tiene libertad de movimiento en el plano vertical, por lo que la rueda dentada está provista de una ranura longitudinal interna que permite el desplazamiento axial de (P), transmitiéndose únicamente entre ambos elementos el movimiento de rotación.

En la parte superior, (P) se conecta a una rueda dentada (r) (la cual permite el paso de la varilla P mediante una ranura longitudinal al igual que la rueda cónica (q). Esta rueda cónica transmite movimiento rotativo a otra rueda idéntica a su derecha.

Estas ruedas sirven para transmitir el movimiento angular de la varilla (P) a otra varilla roscada similar (U), situada paralela y a una corta distancia de la primera. Dado que el paso de las roscas de ambos tornillos es igual y están formadas en direcciones opuestas, se puede concluir que, al girar el mango, la palanca (O) y todos sus elementos asociados (O-1, O-2, etc.) se elevarán o descenderán simultáneamente.

Como resultado, la elevación final del martillo se ajustará mediante la manivela (T-2), y su altura podrá modificarse con total facilidad y precisión.

Por último, cabe destacar que el movimiento de la palanca (O) está protegido y asegurado contra esfuerzos laterales mediante las guías de hierro fundido (V) y (W). que se observan más claramente de forma aislada en la figura 84.

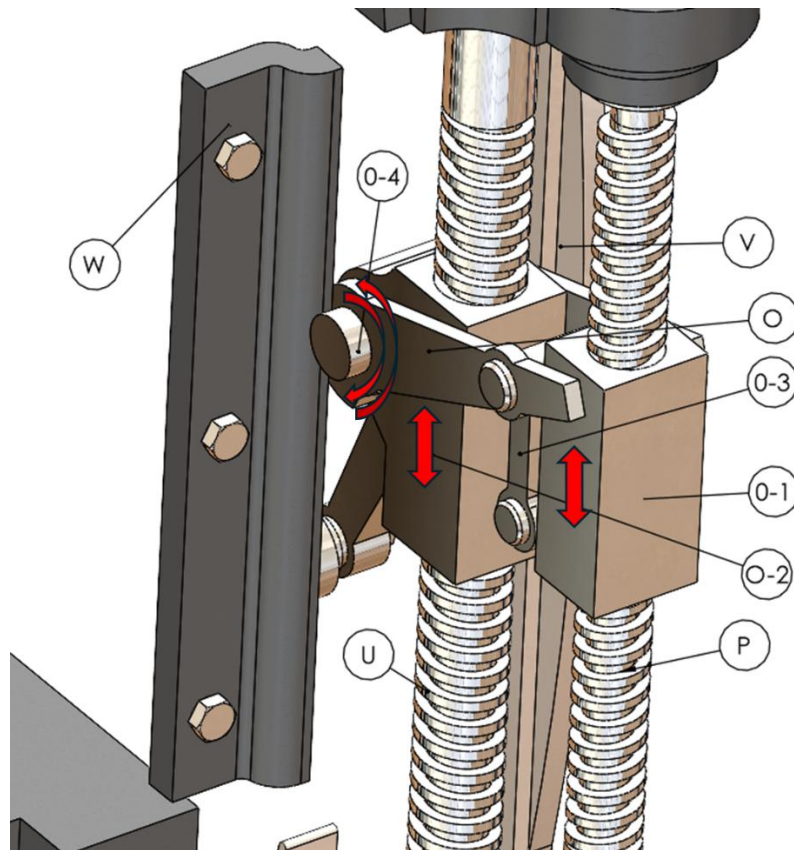


Figura 85: Movimiento de tuerca (O-2) a través de guías (W) y (V) [Modelado SolidWorks]

El elemento (O-4) sería un elemento formado por dos ruedas unidas por un eje. Este eje gira sobre sí mismo junto con las ruedas y atraviesa (O-2). Las ruedas y ejes giran respecto las guías de (V) y (W), permitiendo la elevación y descenso del conjunto a la vez que se contrarrestan esfuerzos en otras direcciones.

Así queda totalmente descrito el mecanismo de regulación de la altura de caída del martillo.

3.5.4. Mecanismo de amortiguamiento de la caída

Tal y como se ha descrito el funcionamiento del martillo de vapor hasta ahora, no sería capaz de aprovechar de manera efectiva la energía potencial del martillo. Esto se debe al fenómeno se detalla a continuación.

Como se ha explicado pormenorizadamente, mientras no exista una fuerza mayor, la válvula e se sitúa siempre en la parte inferior debido al vapor que se dirige por la pequeña tubería de cobre (n), la cual empuja al pistón (m), que a su vez transmite el movimiento a (e), manteniéndolo en la parte inferior, favoreciendo la admisión de vapor al cilindro. Se recuerda este mecanismo en la figura 85.

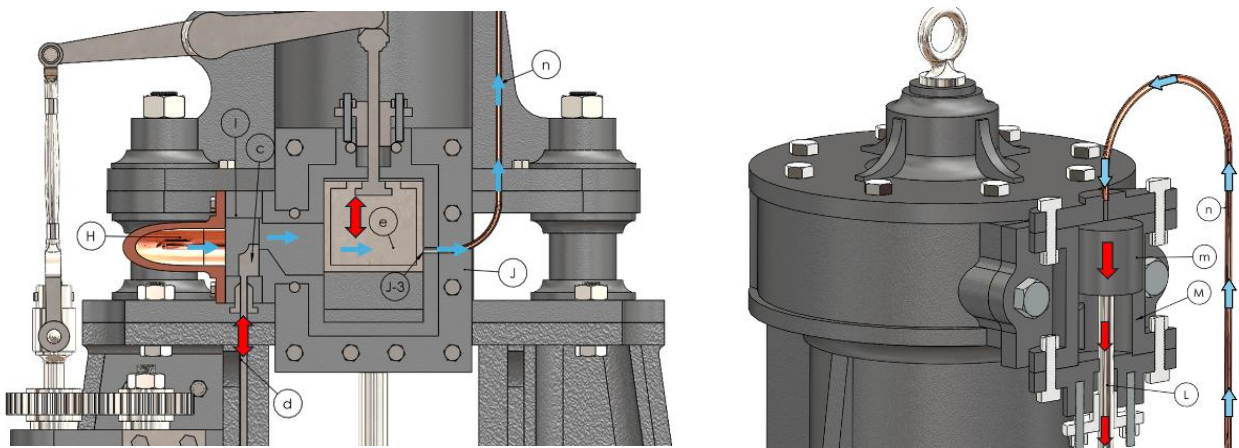


Figura 86: Mecanismo que mantiene la válvula e en la posición inferior [Modelado SolidWorks]

No obstante, cuando el elemento N del martillo entra en contacto con la palanca (O) en la subida, se transmite un movimiento que desciende la varilla roscada (P), transmitiendo el movimiento a través de (p), (Q), (R), ($L-1$), y finalmente, a la válvula (e), haciéndola elevarse y por tanto generando el vaciado del vapor del cilindro y la caída del martillo. Esto es posible ya que la fuerza que genera la palanca O es bastante mayor que la que genera el pistón M debido a la presión del vapor canalizado por la tubería de cobre n . Se recuerda el mecanismo en siguiente ilustración 86.

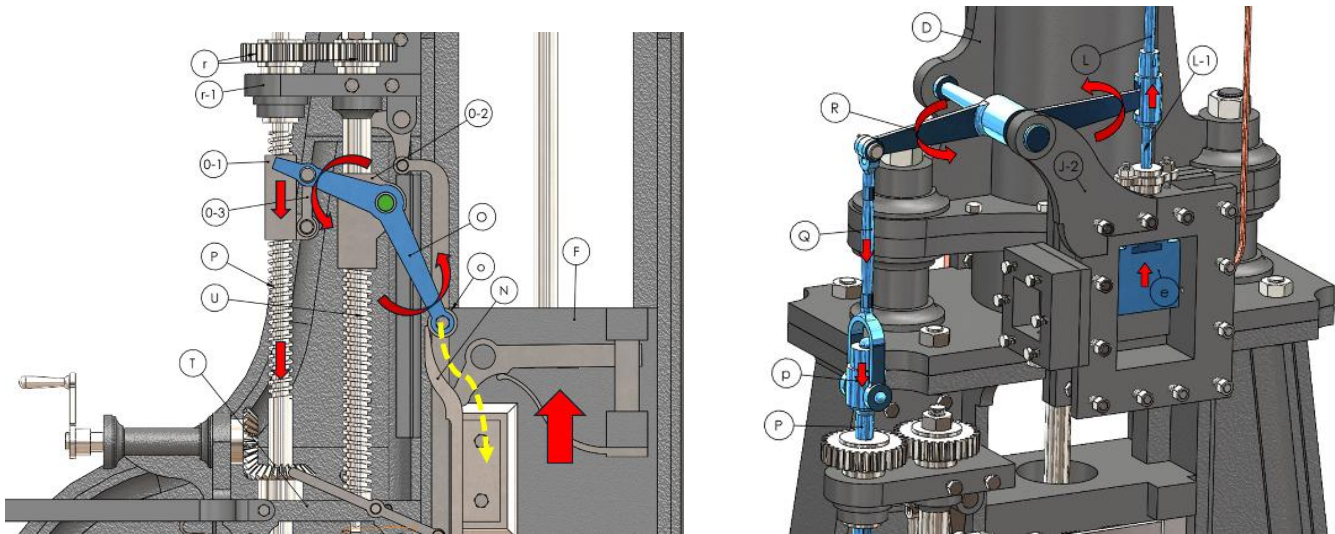


Figura 87: Mecanismo que actúa como tope superior de la elevación del martillo [Modelado SolidWorks]

No obstante, existe un inconveniente con este funcionamiento que aún no se ha mencionado. Cuando el martillo comienza a bajar, la presión que ejercía el elemento N sobre la palanca O, desaparece.

Al no existe fuerza que lo contraponga, a la válvula (e) siempre estará en la parte inferior a causa del efecto de la presión de la pequeña tubería de cobre ejercida sobre (M). Esto provocará que la palanca (O) y el resto de mecanismo vuelvan a la posición inicial que tenían antes de que la pieza (N) del martillo presionara (O). Esto se ilustra en la figura 87.

Esta situación, genera que antes de que el martillo haya caído, esté nuevamente entrando vapor en el cilindro. Esto claramente amortigua la caída, haciéndola muy suave. Esta situación se puede ver esquematizada en la siguiente figura 88.

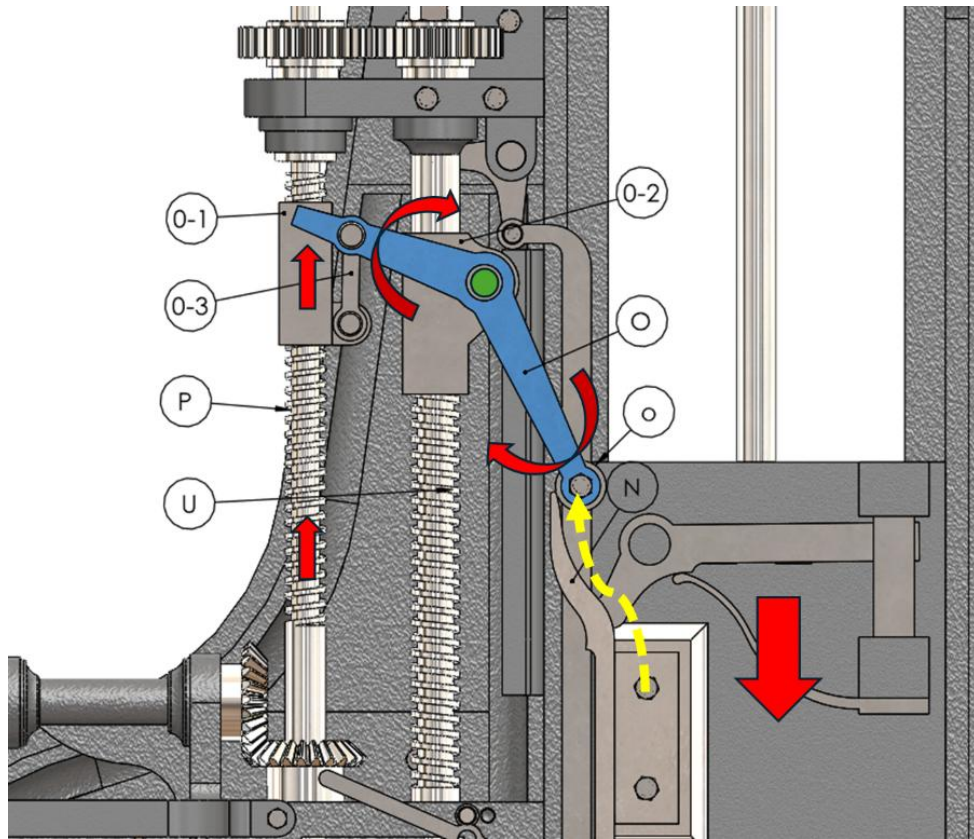


Figura 88: Retroceso de la palanca (O) en la bajada del martillo [Modelado SolidWorks].

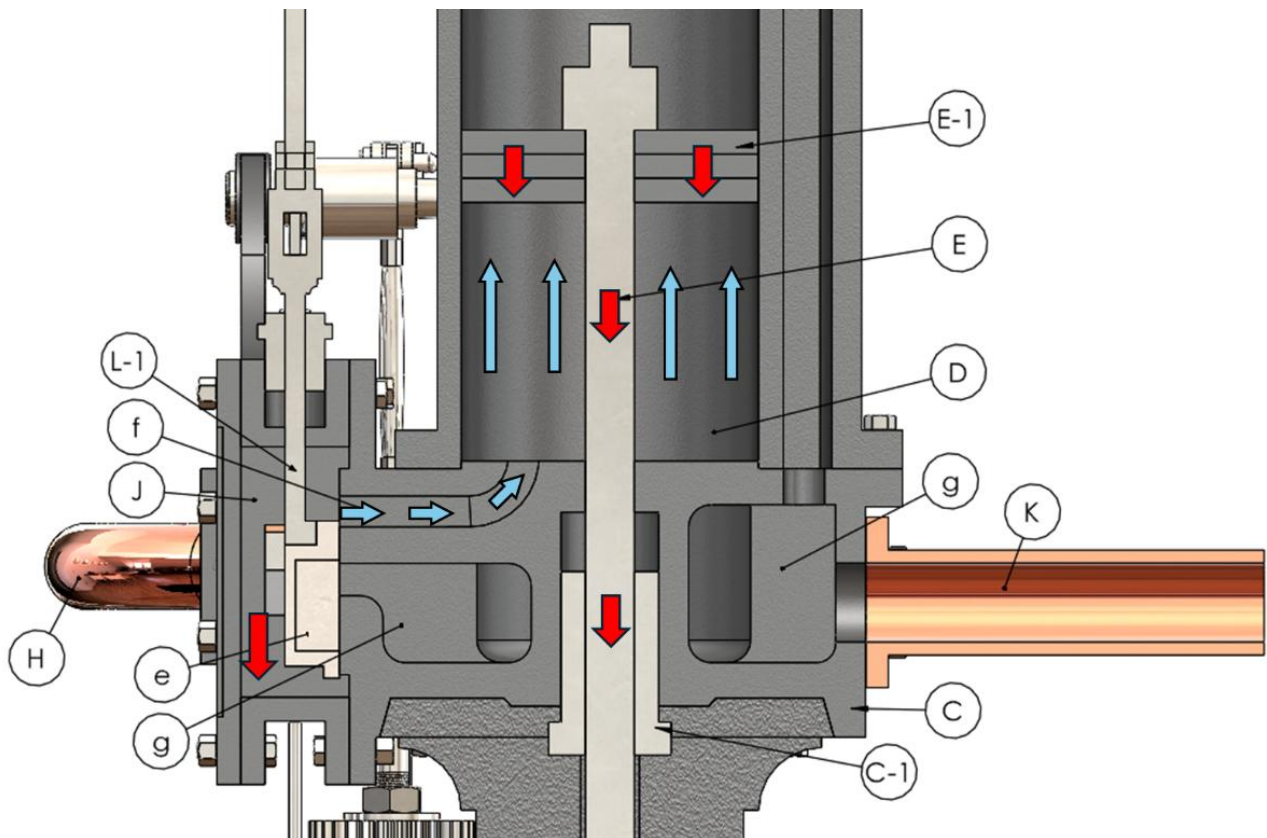


Figura 89: Amortiguación de vapor en la caída del martillo [Modelado SolidWorks].

Como se observa, la válvula (e) en la parte inferior, provoca que el vapor entre por (f) a la cámara interior del cilindro (C), amortiguando la caída y moderando la nueva elevación del martillo.

Por tanto, Robert Wilson requirió integrar algún mecanismo que evitara esto y permitiera la caída completa del martillo. Este mecanismo se explica en el siguiente apartado.

3.5.5. Mecanismo que permite la caída completa

El ingenioso y sencillo mecanismo que Robert Wilson inventó para permitir que la caída del martillo se detalla a continuación, en la figura 89.

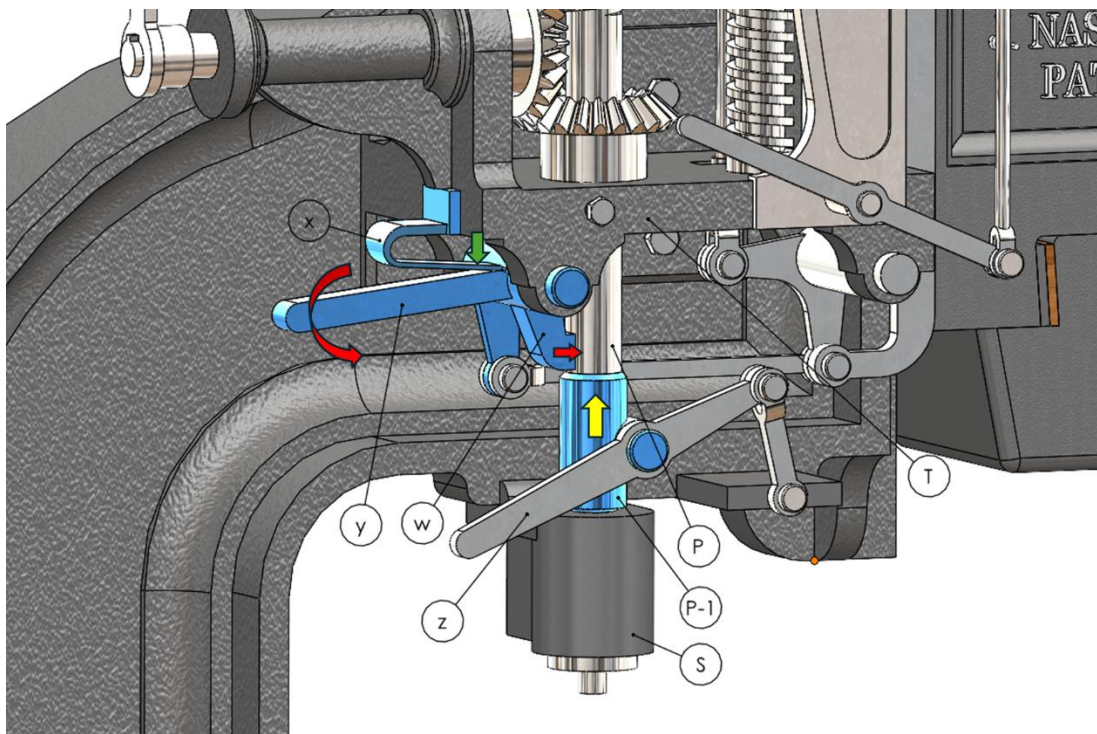


Figura 90: Mecanismo de fijación que permite la caída completa del martillo [Modelado SolidWorks].

La principal idea era, que una vez la varilla (P) descendiera, no volviera a subir provocando el fenómeno de amortiguamiento de vapor.

Para ello, el autor diseñó una palanca de enclavamiento denominada (w), la cual, gracias a un resorte denominado (x) siempre ejerce una leve presión sobre la varilla (P).

En este punto, Wilson añadió a la varilla (P) un elemento cilíndrico de diámetro superior al de (P), denominado (P-1).

De esta forma, cuando la varilla (P) desciende, el resorte (x) presiona la superficie de (P), y se enclava con el cilindro mencionado (P-1), restringiendo el movimiento de la varilla (P) de ascenso de vuelta.

Cabe destacar que (P-1) gira libremente respecto (P), pero gracias a una hendidura interior se mueven al unísono en dirección vertical. Gracias a esto se consigue que la palanca (z) no gire en el plano horizontal.

Es así como se consigue el efecto deseado de que el martillo caiga por completo con toda su potencia.

No obstante, para que el martillo vuelva a elevarse para efectuar un nuevo golpe, el operario forzosamente tendría que levantar manualmente la palanca (Y), venciendo la presión del muelle y permitiendo que la varilla (P) se elevara nuevamente.

Por tanto, el funcionamiento ya no sería automático, y requeriría una interacción constante, del operario. Es por esto por lo que Wilson dotó al martillo con un mecanismo auxiliar que se analizará en el apartado a continuación.

3.5.6. Mecanismo que permite la automatización en caída completa

Para conseguir el funcionamiento automático del martillo en golpes de caída completa, Wilson implementó un mecanismo que es muy peculiar y está perfectamente adaptado a su propósito, el cual se muestra gráficamente en la figura 90.

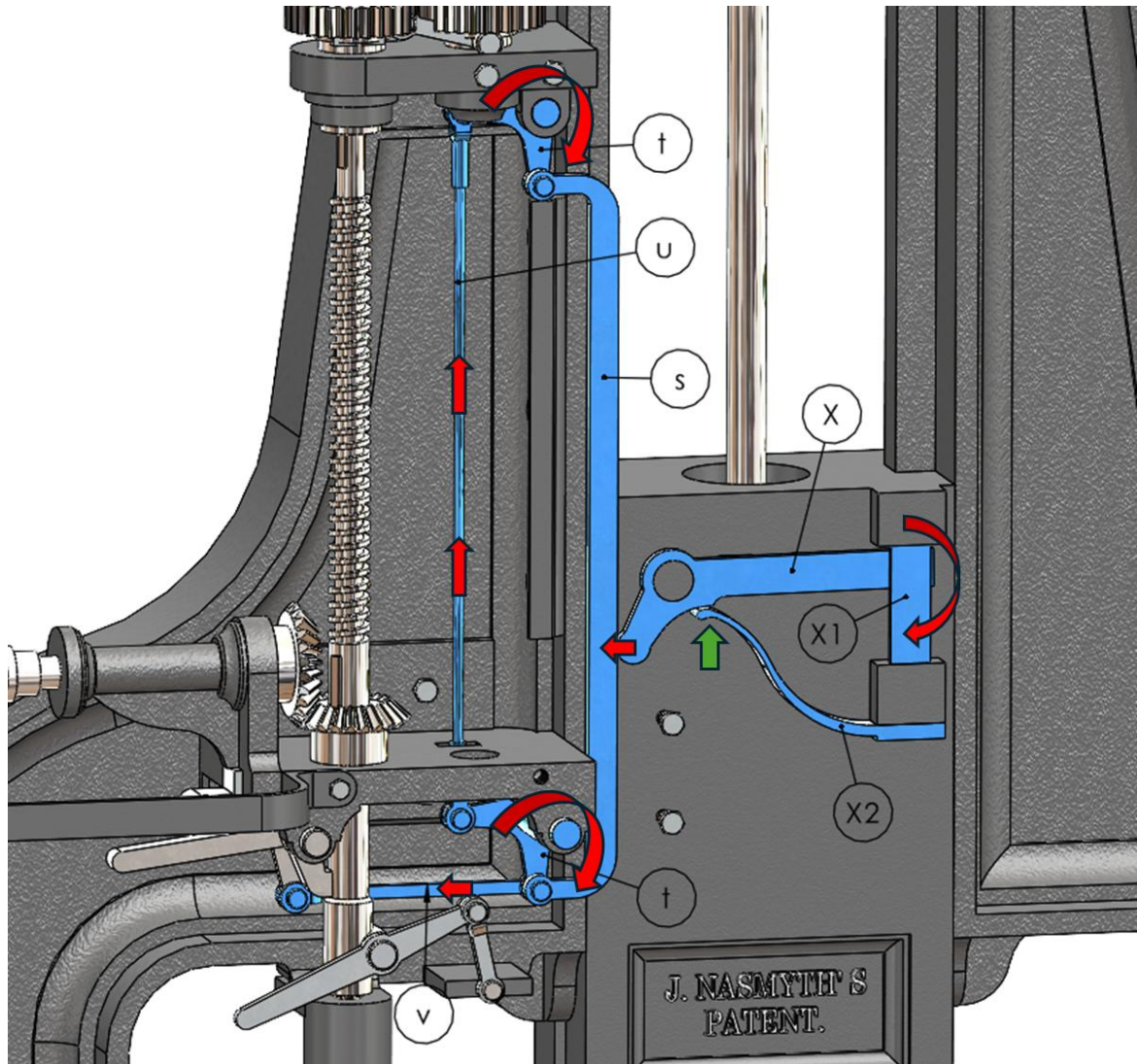


Figura 91: Mecanismo que permite la automatización del martillo [Modelado SolidWorks].

En la parte frontal del bloque del martillo se instala una palanca, denominada palanca de enclavamiento (X), que puede girar libremente respecto un saliente del cuerpo del martillo. La parte de la palanca de enclavamiento de la parte derecha es considerablemente más pesada que el extremo opuesto. Esta parte está sujeta al martillo

a través de la guía (X1), que se incrusta en salientes del cuerpo del martillo. Además, la palanca de enclavamiento (X) es constantemente presionado por un resorte denominado (X2) que lo mantiene en la posición superior que se muestra en la figura 90.

El extremo izquierdo y el más ligero entra en contacto con una barra larga (s), denominada barra paralela, cuyos extremos están suspendidos en dos pequeñas palancas de codo denominadas (t), cuyos otros brazos están conectados por medio de una delgada varilla (u). Esta disposición permite un movimiento paralelo de (u) y de (s), asegurando que el mecanismo entre en funcionamiento de manera eficaz en cualquier punto en el que el martillo detenga su golpe.

Una pequeña varilla de conexión (v), situada entre la palanca de codo inferior y una palanca corta en el eje del gatillo (w), completa esta parte del mecanismo.

El mecanismo se pone en funcionamiento en el instante en que el martillo golpea la pieza sobre el yunque, la conmoción producida por el impacto hace que el extremo más pesado de la palanca (X) venza la presión ascendente del resorte (X1), provocando que su extremo opuesto se desplace contra el borde de la barra paralela (s).

Aunque este movimiento es leve, es suficiente, para desplazar hacia la izquierda la barra paralela s, girar de forma antihoraria las dos bielas (t), y transmitir este giro al gatillo (w) a través de la barra (v).

De esta manera se consigue desenganchar el gatillo (w) y liberar del tornillo (P), permitiendo así que esta última vuelva a su posición original por acción del pistón (m), como se explicó anteriormente., como se muestra en la siguiente figura 91.

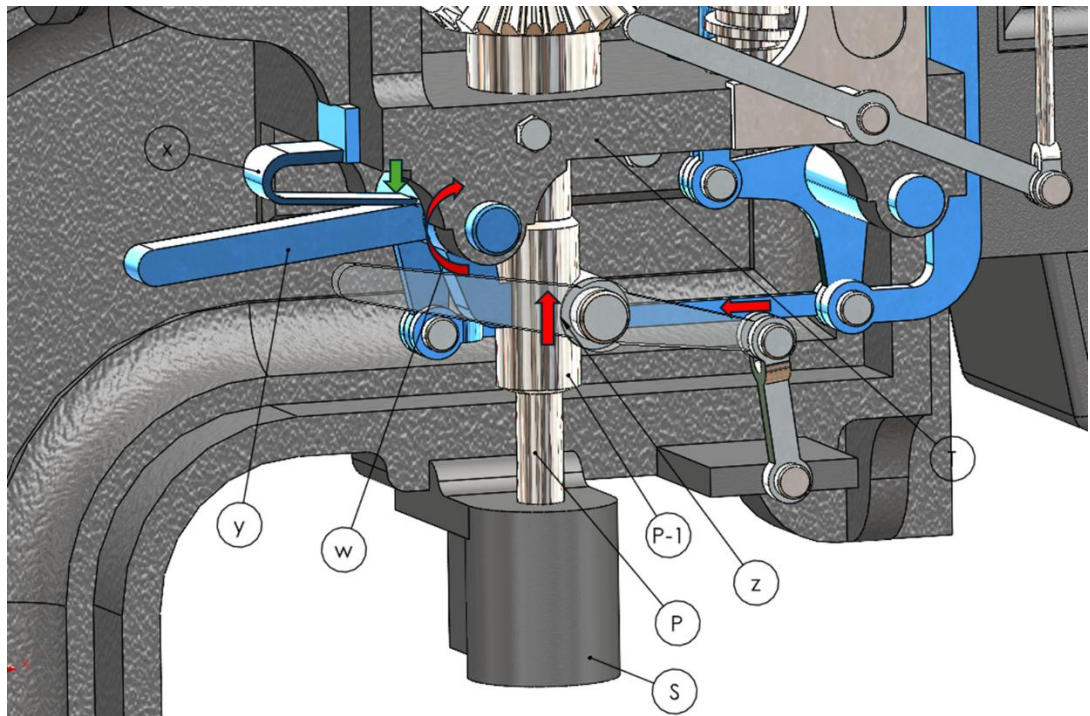


Figura 92: Mecanismo de desenganche del gatillo [Modelado SolidWorks].

3.3.1. Cambio entre modos de funcionamiento

La construcción del mecanismo de accionamiento automático está diseñada de manera que, en determinadas circunstancias, pueda aprovecharse el mismo efecto que el gatillo (w) busca evitar. Cuando se requiere dar un golpe suave, como sucede en algunas etapas del trabajo, no es necesario modificar la posición del brazo (O) a través de la manivela. Simplemente basta con mantener retirada la punta del gatillo (w) mediante su mango (y), lo que permite que la válvula se reabra y deje pasar el vapor por debajo del gran pistón en el momento en que la leva (N) deja de estar en contacto con la palanca (O).

Como se ha detallado anteriormente, el efecto de esto es que una cantidad de vapor entra en el cilindro debajo del pistón, sirviendo como amortiguador que reduce la caída brusca del martillo y modera su impulso a cualquier nivel deseado según el criterio del operario a cargo de los controles.

En definitiva, con este diseño se consigue un cambio entre modo de funcionamiento suave y potente, de forma muy rápida y sencilla, simplemente elevando la palanca (w).

3.3.2. Sistema de evacuación y absorción del aire

Se ha detallado como se realiza la evacuación de vapor, pero es importante también destacar como se produce la expulsión del aire que se sitúa en la parte superior del cilindro.

En a la figura 92, se muestra un esquema de funcionamiento donde a través de flechas verdes se representa el flujo el aire, y a través de flechas azules el flujo de vapor.

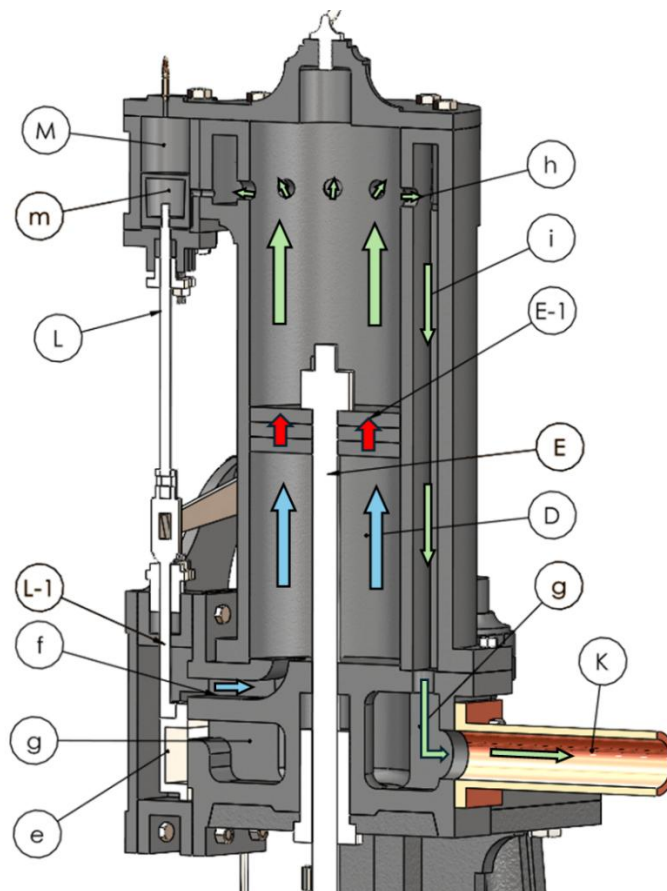


Figura 93: Flujo de vapor y aire en la elevación del martillo [Modelado SolidWorks].

Cuando el martillo está elevando gracias a la presión del vapor admitido en el cilindro, los discos (E-1) suben desplazando también el aire que se encuentra encima de ellos. Para expulsar este aire al exterior, se diseñaron los orificios h, los cuales se sitúan en la parte superior de la cámara del cilindro (D), y conectan con un conducto denominado (i) que conecta estos orificios (h), con la cámara (g), y a su vez, con la tubería de vapor residual (K), saliendo al ambiente por la misma tubería donde sale el vapor.

Cabe destacar que sucede el fenómeno contrario cuando el pistón baja, admitiéndose aire por la tubería (K) y dirigiéndose por el conducto (i) para llenar la cavidad del cilindro (D). No obstante, como todavía queda vapor en la tubería (K) y en la cavidad (g) del ciclo anterior, es probable que se rellene la parte superior del pistón con una mezcla de aire ambiente y vapor.

3.3.3. Sistema de resorte de retroceso y de seguridad

Con el fin de evitar cualquier riesgo de que el pistón golpee la tapa del cilindro cuando el martillo funciona con la máxima o más alta carrera posible, se ha previsto un sistema de resorte de retroceso de aire o vapor, muy simple pero efectivo. Este sistema se muestra en la figura 93, y es analizado a continuación.

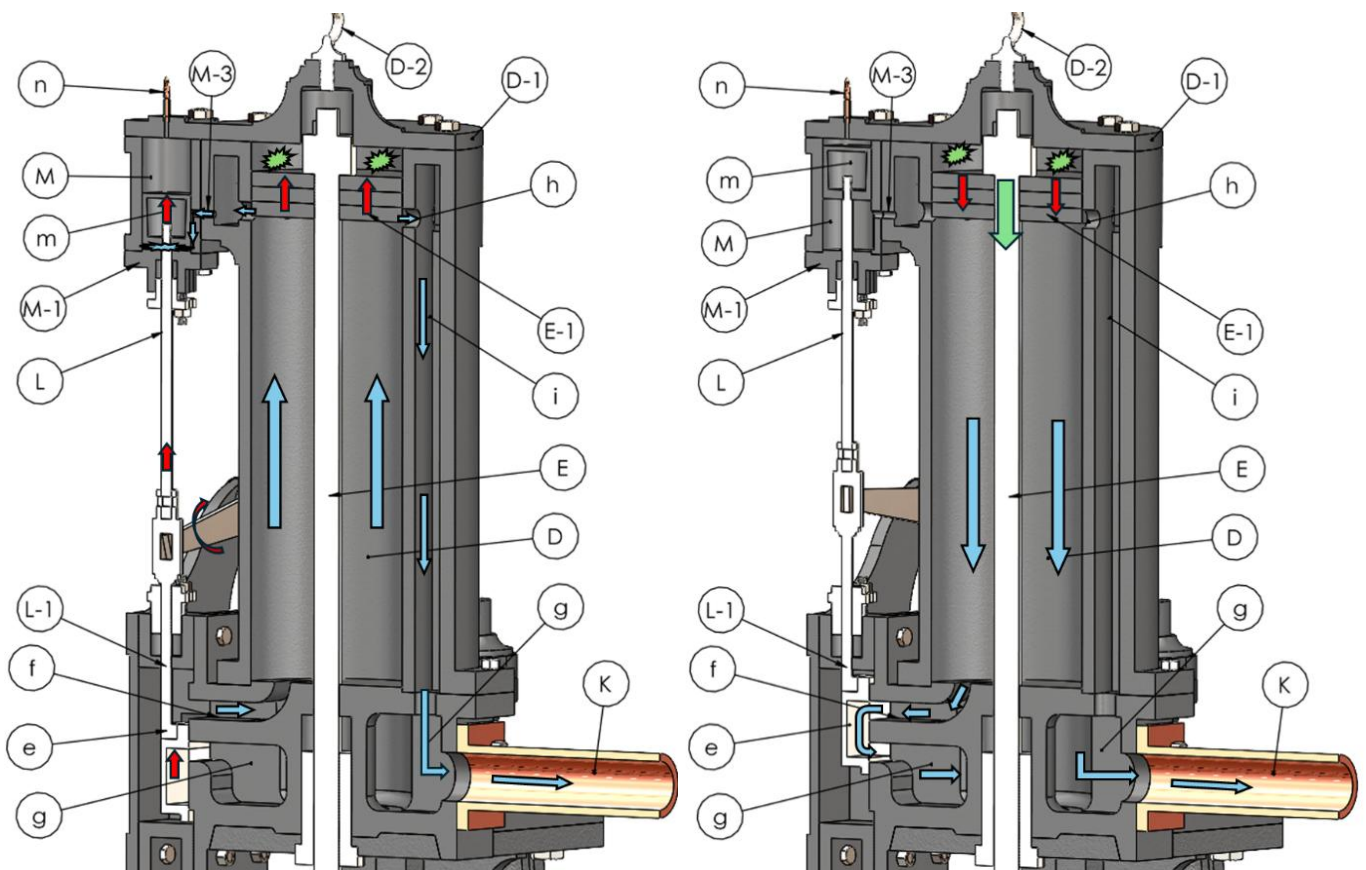


Figura 94: Sistema de resorte de retroceso que aumenta la potencia del golpe [Modelado SolidWorks].

Como se puede observar, la cámara del cilindro (D) esta herméticamente sellada gracias a la tapa del cilindro (D-1), de modo que, cuando el pistón sobrepasa en su movimiento ascendente los orificios (h), el aire o vapor que queda por encima queda atrapado en la cámara superior. Como no tiene salida, actúa como un resorte perfecto que detiene cualquier ascenso adicional del pistón.

Este sistema ofrece, además, la importante ventaja de transformar cualquier exceso de movimiento ascendente en un aumento de la velocidad de caída del martillo, lo que de otro modo sería un desperdicio de energía y potencialmente dañino. El incremento de energía en los golpes que se puede obtener con este método es un aspecto de gran relevancia.

Por otro lado, el flujo de vapor se canalizaría por los orificios (h) en cuanto el pistón los supere en altura, siendo estos orificios válvulas de seguridad para permitir la salida del cuerpo principal del vapor, que se escapa a través del conducto (i), desembocando finalmente en la tubería de escape o de vapor residual K.

No obstante, el vapor también se redirige por una abertura o conducto denominado (M-3), el cual conduce el vapor al inferior del cilindro (m), haciendo que este se eleve, y por tanto, arrastre al mecanismo (L, L-1), elevando la válvula (e) y cortando la admisión de vapor. Además, activaría el mecanismo anteriormente mencionado (R), (Q), (p), (P) y (w) quedándose anclado P en la posición inferior y facilitando la caída completa del martillo.

Si bien es cierto que todo el conducto (i) está abierto a la atmosfera, se produciría un efecto transitorio de la presión, de la presión de vapor a la presión ambiente, con un tiempo suficiente para que se ejerza la adecuada presión bajo en el pistón (m) para elevarlo, que es superior a la presión que el conducto (n) ejerce sobre la parte superior.

3.3.1. Sistemas de amortiguamiento mecánicos

Los sistemas de amortiguación son principalmente tres:

- **Amortiguación entre el martillo y el pistón**

Un importante detalle constructivo que merece especial atención es el método peculiar que empleo para conectar el vástago del pistón con el bloque del martillo. Este es uno de los aspectos más cruciales de toda la invención, sin el cual no habría sido posible lograr ningún éxito práctico.

Si el vástago del pistón hubiera sido unido al martillo de la manera convencional, como suele hacerse en los motores de vapor u otras maquinarias similares (es decir, mediante una chaveta, enroscando el vástago en el martillo o utilizando cualquier otro método sólido e inflexible) el resultado habría sido que, en cada golpe, el vástago del pistón y el pistón mismo (compuestos de una masa considerable de material) habrían actuado como un martillo adicional. En consecuencia, habrían transmitido su propio impulso a los medios de sujeción con tal fuerza destructiva que, tras unos pocos golpes, habrían acabado rompiendo cualquier mecanismo rígido de fijación.

Por tanto, Nasmyth diseñó un ingenioso mecanismo, que consiste en colocar, dentro de una especie de pozo en el interior del bloque del martillo, y debajo del pistón (e), situado en el extremo del vástago del pistón, una serie de piezas de madera dura u otro material ligeramente elástico. Se observa en (E-2) y (E-1) en la figura 94.

El efecto de esto es permitir que el impulso del pistón y su vástago se disipe de una manera relativamente gradual, evitando que la sacudida producida por los golpes más fuertes y enérgicos del martillo tenga el menor efecto negativo sobre el pistón y su vástago.

La conexión entre el vástago del pistón y el bloque del martillo se asegura mediante dos cuñas (k), firmemente introducidas por encima del extremo inferior del pistón E, interponiendo entre ellas una o dos capas de material elástico con el propósito de neutralizar cualquier impacto en la dirección opuesta (E-2).

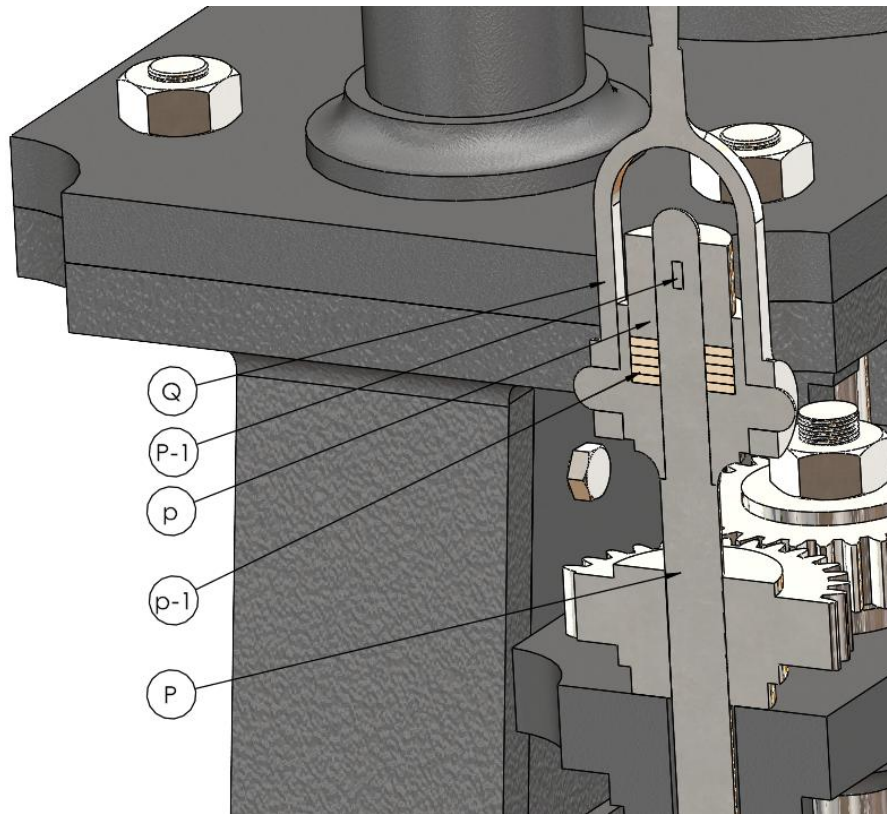


Figura 96: Conexión amortiguada entre P y Q [Modelado SolidWorks].

- **Amortiguación entre S y P**

Para restringir el recorrido descendente de la válvula al punto adecuado, se ha instalado un amortiguador o caja de tope (S), que consiste en un pequeño cilindro firmemente atornillado al bastidor de la máquina. Dentro de este cilindro, una tuerca circular enroscada en el extremo inferior de la varilla (P) actúa como un pistón (P-1), con varias arandelas de cuero interpuestas entre la tuerca (s-1) y el extremo cerrado o superior del cilindro, proporcionando un mecanismo de amortiguación eficaz.

En definitiva, esta amortiguación establece el límite de movimiento o tope de la válvula, y protege el mecanismo y sus elementos ante las bruscas transmisiones de movimientos que se generan en el sistema con el fin de cambiar la posición de la válvula principal.

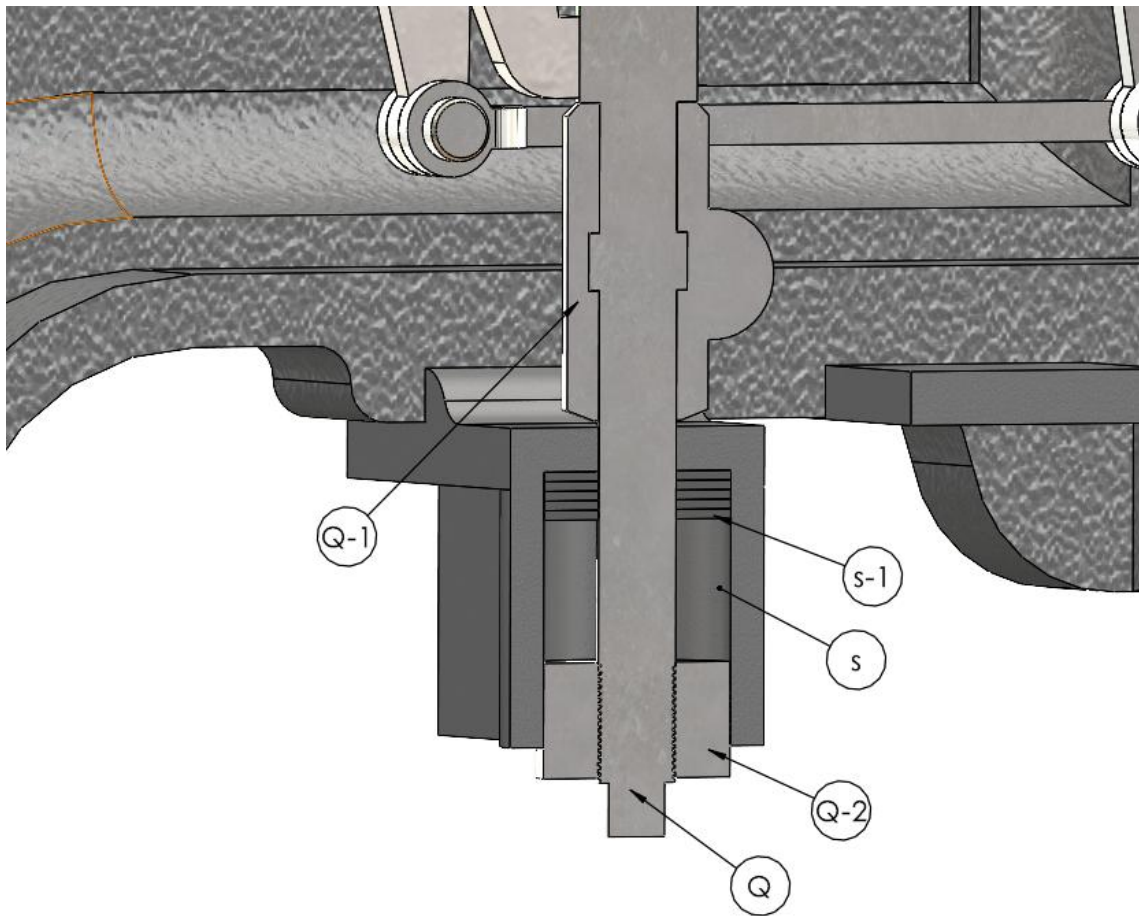


Figura 97: Amortiguación en cilindro (S) [Modelado SolidWorks].

3.4. Incongruencias en el diseño

3.4.1. Incongruencia respecto a sistema de aprovechamiento del rebote.

A pesar del ingenio del sistema de resorte de retroceso y seguridad para el cilindro anteriormente detallado, en el presente proyecto se ha encontrado una importante incongruencia, la cual se explicará en este apartado.

Como se ha analizado previamente, la palanca O, es la que establece la altura máxima a la que el martillo puede elevarse. Pero debido al roscado que presentan, solo se podrían elevar a una altura determinada. En la figura 97.a se puede observar cual sería esta altura máxima limitada por el roscado, y en la figura 97.b se observa en que se traduciría en altura máxima del pistón.

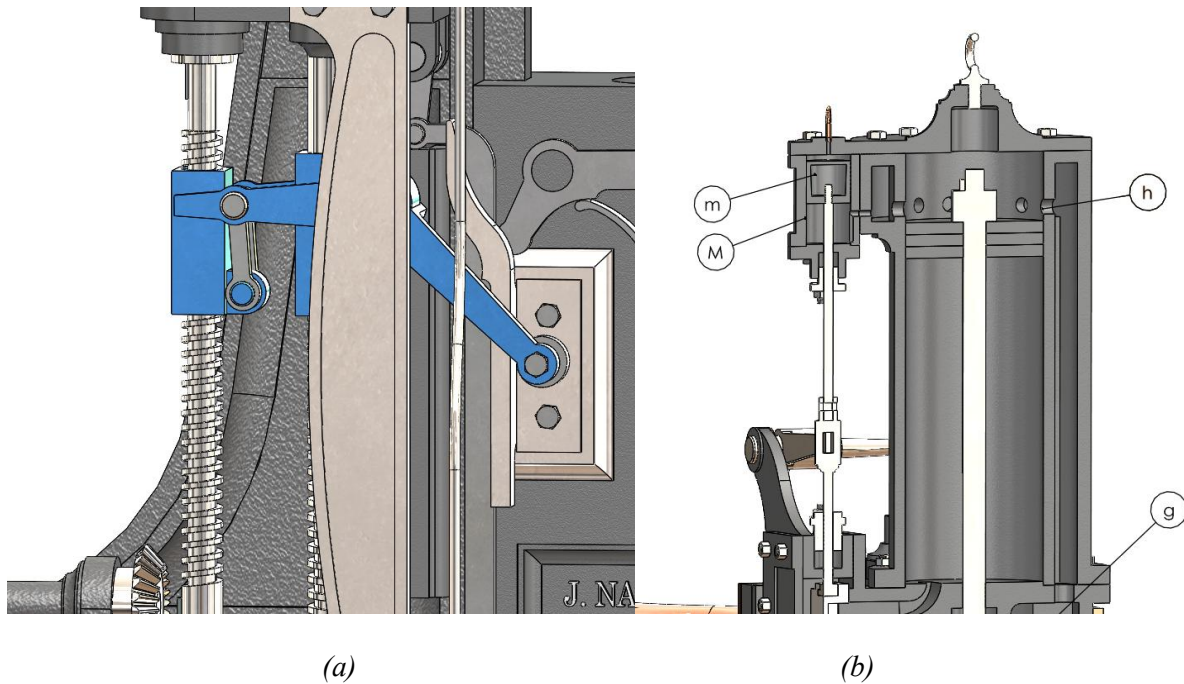


Figura 98: Hombrecillo del paleolítico utilizando un molinillo para hacer fuego [Modelado SolidWorks].

Como se puede observar, según esta configuración, el pistón nunca se superaría los orificios (h), y, por tanto, nunca se podría en juego el sistema de aprovechamiento de rebote previamente explicado.

Si bien es cierto, en “The Machinist Assintant” se describe que no es en absoluto necesario mantener la admisión de vapor bajo el pistón hasta el final del recorrido ascendente del martillo, ya que la velocidad adquirida por el bloque del martillo en su movimiento ascendente hace que este continúe elevándose incluso después de que se haya detenido la entrada de vapor. Este el fenómeno de sobre carrera aumentará proporcionalmente a la velocidad de ascenso del bloque del martillo, lo que en gran medida compensará el mayor consumo de vapor que resultaría de dicha velocidad aumentada.

Por tanto, es posible que esta sobre-carrera fuera suficiente para que el pistón sobrepasara los orificios (h) y se pusiera en juego el mecanismo de resorte de vapor.

En la situación de la figura 97, que representa el máximo que se puede ajustar la altura del martillo, ya se ha considerado cierta sobrecarrera debida a la inercia. No

obstante, aunque se considerara que esta inercia es lo suficientemente elevada como para subir el pistón por encima de los orificios (h), el mecanismo desarrollado anteriormente donde el vapor se redirige al cilindro (M) para elevar (m) y (e), y por tanto cortar la entrada de vapor (Figura 93), sí carecería de sentido, ya que previamente el sistema de la palanca (O) se habría encargado de ello

Por tanto, se podría concluir, que lo ideal sería que la palanca (O), pudiera ajustarse a una altura mayor, de forma que no fuera una limitación en la subida del martillo, y se pudiera aprovechar esta potencia máxima del martillo con el resorte de vapor si el operario lo desea, incluso cuando la presión del vapor no fuera excesivamente grande y no se es posible obtener una gran sobrecarrera por la inercia.

La razón de esta limitada elevación máxima de O se desconoce, pero se estima que las razones pueden ser las siguientes:

- **Errores en los planos:** Como se ha comentado previamente, a pesar de que en el modelado de SolidWorks ha sido fiel a las medidas de los planos, estas no cuentan con una precisión milimétrica, contando con pequeñas incongruencias en medidas entre las distintas vistas. Por tanto, se podría achacar esta limitación a un error del delineante, que podría haber delineado erróneamente la rosca, haciéndola menor de lo necesaria en la varilla roscada (U). Esto también implicaría pequeñas modificaciones en el plano original elevando el carril (W) y otros elementos como (r1), (s) o (t), ya que si no se podrían producir colisiones entre elementos.
- **Fallo inicial en el diseño de Nasmyth:** Por otro lado, los planos podrían ser fieles a la realidad y la limitación podría deberse a un fallo de diseño inicial en la maquina construida por Nasmyth, ya que esta fue implementando mejoras y modificaciones con el tiempo y sus diseños originales eran aun imperfectos.

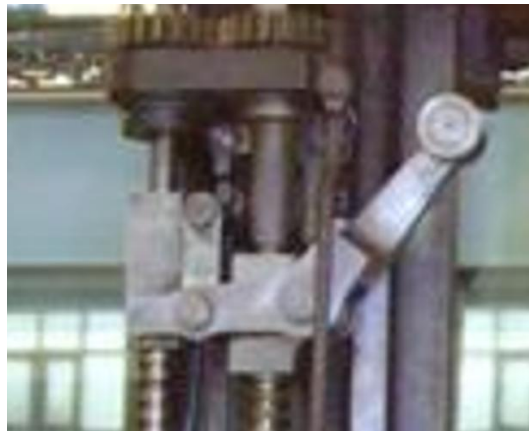


Figura 99: Modificaciones de diseño posteriores en la palanca (O) [29].

Según el modelo de martillo pilón expuesto en “Science museum” en Londres y datado de 1850, se observan diversas modificaciones el diseño analizado en este proyecto.

Si bien es cierto que se trataba de un modelo de dimensiones mucho menores, entre algunos de los cambios respecto al estudiado en este proyecto, está la posición de la palanca (O), que se observar en la figura 98 que está invertida.

Esto solucionaría la discrepancia presentada, pudiendo así permitir la subida completa del pistón, y poner en juego el mecanismo de resorte de vapor mencionado, aprovechando toda la potencia del martillo, aunque la presión del vapor no fuera muy elevada.

Esta información refuerza la hipótesis de que la incongruencia presentada fue un error en el diseño inicial, no obstante, en otras versiones de la maquina se podría haber mejorado el diseño simplemente elevando un poco la carrera de las tuercas en las varillas roscadas (P) y (Q).

3.3.2. Incongruencias respecto al mango (z)

La palanca o mango (z) sería una palanca auxiliar que permita controlar manualmente la admisión y escape de vapor en el cilindro, facilitando un control directo de operario si es requerido, y facilitando la operación del martillo.

No obstante, el diseño de la palanca en el presente proyecto podría considerarse deficiente.

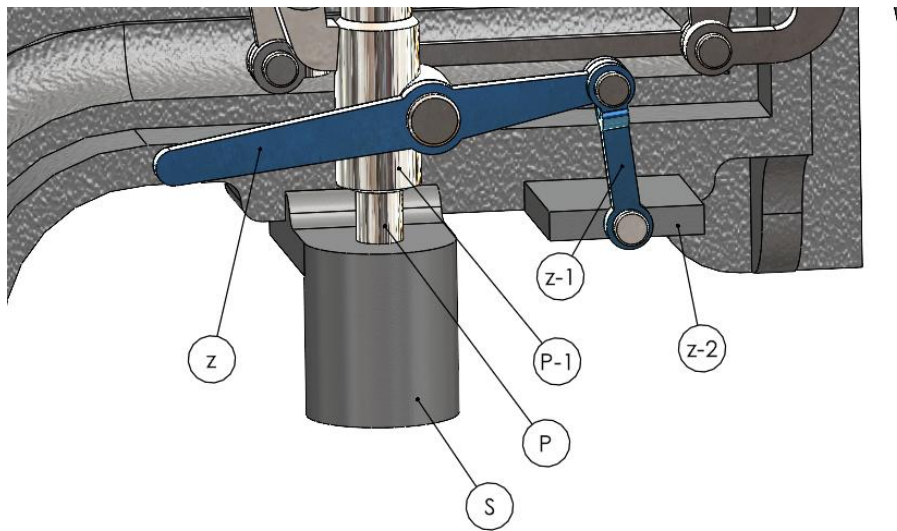


Figura 100: Palanca o mango (z) [Modelado SolidWorks].

Como se observa en la figura 99, la palanca Z se mueve conjunto un eje del elemento (P-1), que va anclado (P). Como se ha explicado extensamente en este proyecto, (P) es una varilla roscada que esta constantemente subiendo y bajando en cada ciclo del martillo, por lo que, consecuentemente, (z) estará moviéndose continuamente mientras el martillo este en marcha.

Carece de sentido que un mango, cuya utilidad sea la de facilitar la maniobrabilidad del operario, este constantemente en movimiento. Además, esta palanca se sitúa muy cerca de la zona donde trabaja el operario, pudiendo golpearse y produciendo problemas de seguridad laboral.



Figura 101: Rediseño de la palanca o mango (z) [29].

Este razonamiento nuevamente cobra más sentido cuando se observan martillo pilón expuesto en “Science museum” en Londres y datado de 1850, donde la versión más reducida, pero también más avanzada en fecha que martillo original, cuenta con otra configuración de esta palanca (Figura 100).

En este nuevo rediseño se puede ver como ahora la palanca (z) está unida al elemento rígido de la amortiguación (S), por tanto, su centro de rotación ahora es fijo y ya no acompaña al movimiento de (P).

Por otro lado, el extremo de la palanca simplemente le aplica presión a la varilla para descenderla si fuera necesario, por lo que ya no se mueve constantemente la palanca y esta quieta durante el funcionamiento del martillo si se mantiene en la posición superior.

3.5. Mejoras y adaptaciones implementadas

Como se observado, en modelos posteriores en fecha se corrigieron incongruencias como la del no aprovechamiento del resorte de vapor o el movimiento continuo del mango (z). No obstante, también se fueron implementando diversas modificaciones o adaptaciones que permitieron mejorar el funcionamiento del martillo original y adaptarlo a los diferentes tipos de trabajo.

- **Cambios en la geometría:**

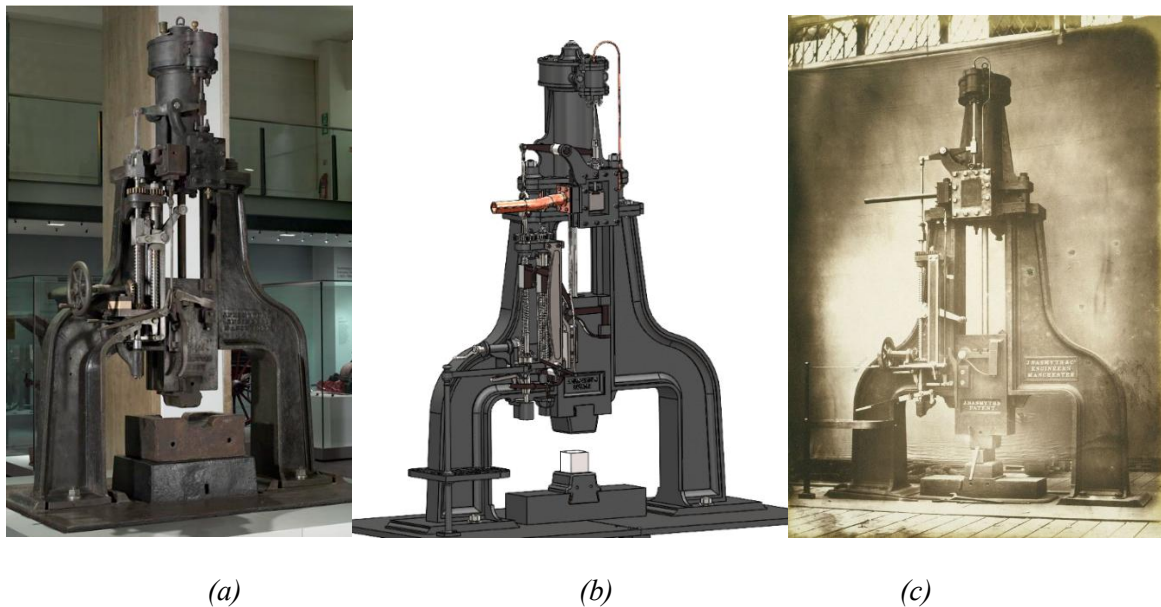


Figura 102: a) Ejemplar 1850 b) Ejemplar modelado de 1847 c) Ejemplar fotografiado en 1851 [29] [Modelado SolidWorks] [28].

Según los requerimientos y funciones que debiera realizar el martillo, se fueron adaptando con el tiempo sus dimensiones y tamaños. Estas adaptaciones no se trataban de un escalado perfecto donde se fabricará la maquina idéntica pero más grande o pequeña, si no que sufría cierto rediseño en sus dimensiones.

Como se puede observar en la figura 101, distintas variaciones del martillo con distintas dimensiones sufrían también modificaciones en su esbeltez, su compacidad y su economía del material.

- **Plataforma del operario**

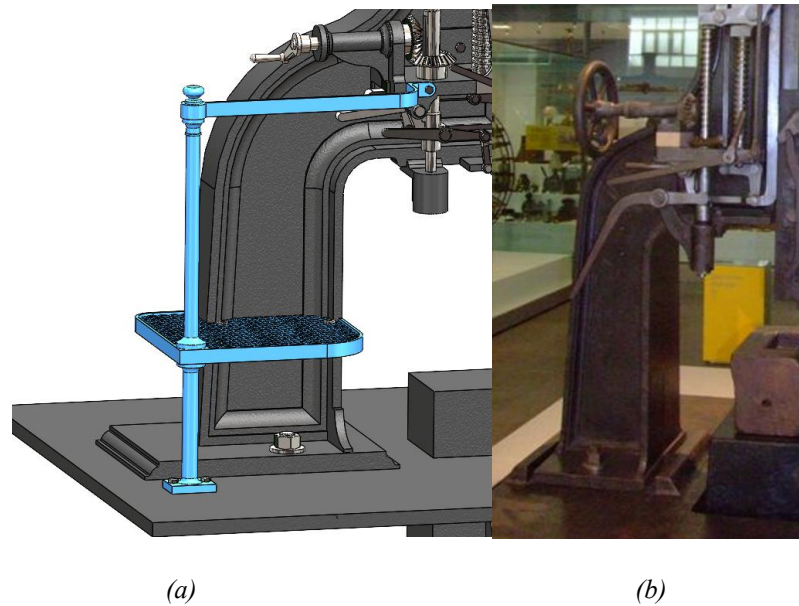


Figura 103: a) Versión modelada con plataforma del operario b) Versión de 1850 sin plataforma para el operario [Modelado SolidWorks] [29].

Obviamente en modelos de martillo con dimensiones mucho menores que el expuesto en este proyecto, la plataforma del operario carecería de sentido, ya que este llegaría perfectamente desde el suelo. Por tanto, en modelos como el expuesto en “Science Museum” de 1850, no se le implementa alguna plataforma. Ya que sus dimensiones rondaban en torno a la mitad del martillo pilón expuesto en este proyecto.

- **Intercambio de la manivela por una rueda**

Otra clara modificación que se realiza en modelos posteriores es la supresión de la manivela, y sustitución de esta por una rueda. Probablemente esto se debió a que una rueda soporta mejor los esfuerzos y es mucho más fácil de maniobrar por el operario, utilizando ambas manos y ejerciendo de forma más uniforme la fuerza. En la figura 103 se observa la manivela y las posteriores ruedas en otras versiones.

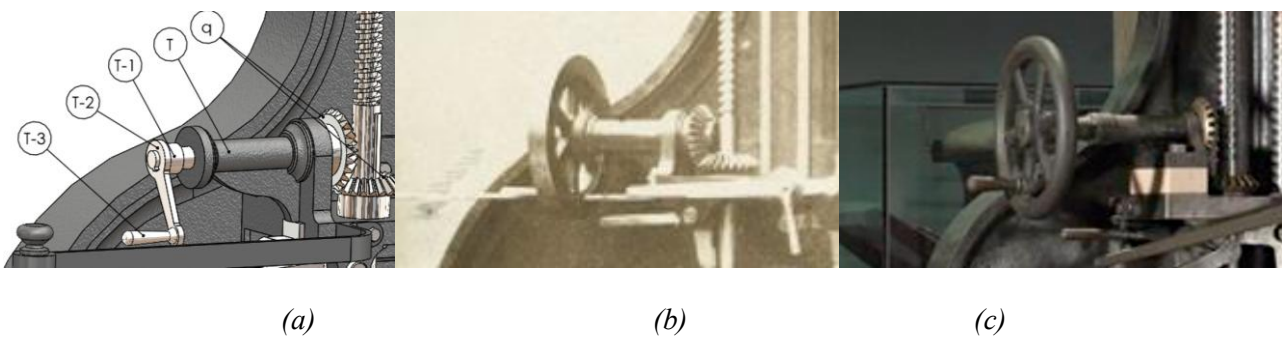


Figura 104: a) Versión modelada con manivela b) Versión fotografiada en 1851 con rueda c) Versión de 1850 con rueda [Modelado SolidWorks] [28] [29].

- **Modificaciones de carril V**

En otras versiones consultadas del martillo de Nasmyth, se pueden observar modificaciones en el carril (V), donde se simplifica mucho su diseño, haciéndolo completamente rectangular, y por tanto más sencillo y eficiente.

Por otro lado, en versiones posteriores del martillo más pequeñas directamente se eliminó este carril, ya que en estos martillos reducidos se consideraría que los esfuerzos transversales generados eran muy reducidos como para requerir un carril que los contrarrestara.

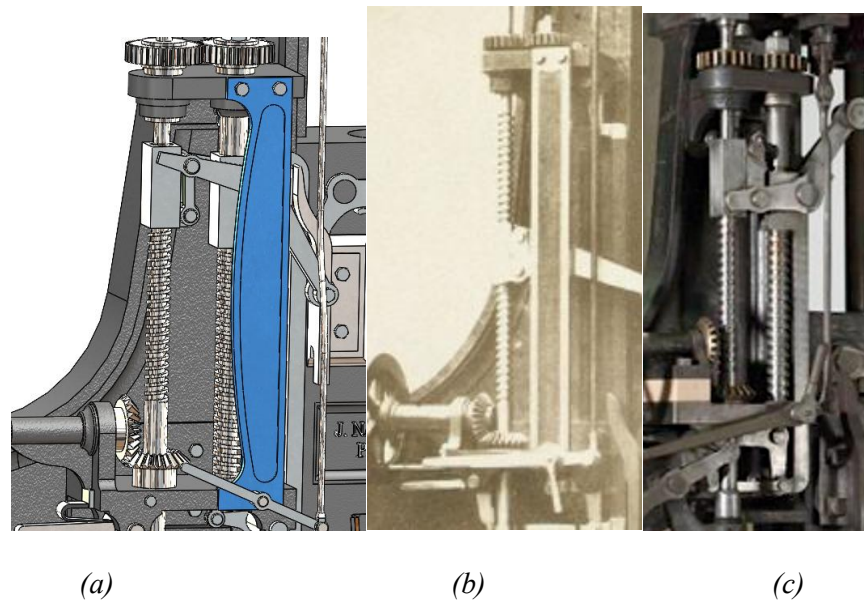


Figura 105: a) Versión modelada con guía (V) b) Versión fotografiada en 1851 con guía (V) modificada c) Versión de 1850 sin guía (V) [Modelado SolidWorks] [28] [29].

- **Alargamiento de los mangos de maniobra**

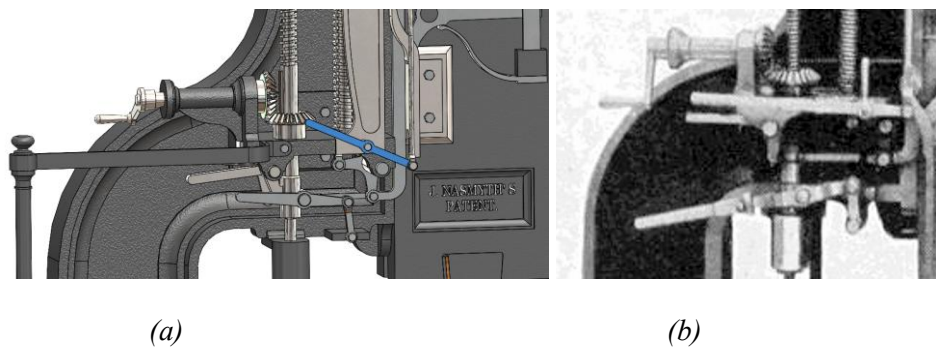


Figura 106: a) Versión modelada original con mangos de maniobra cortos b) Versión posterior con mangos alargados [Modelado SolidWorks] [39].

En versiones posteriores a la analizada en este proyecto, se puede observar que se alargaron considerablemente los mangos que controlan el funcionamiento del martillo, probablemente para facilitar la maniobrabilidad del operario, sobre todo en versiones reducidas del martillo que se operaban desde el suelo sin plataforma.

- **Modificaciones en el yunque**

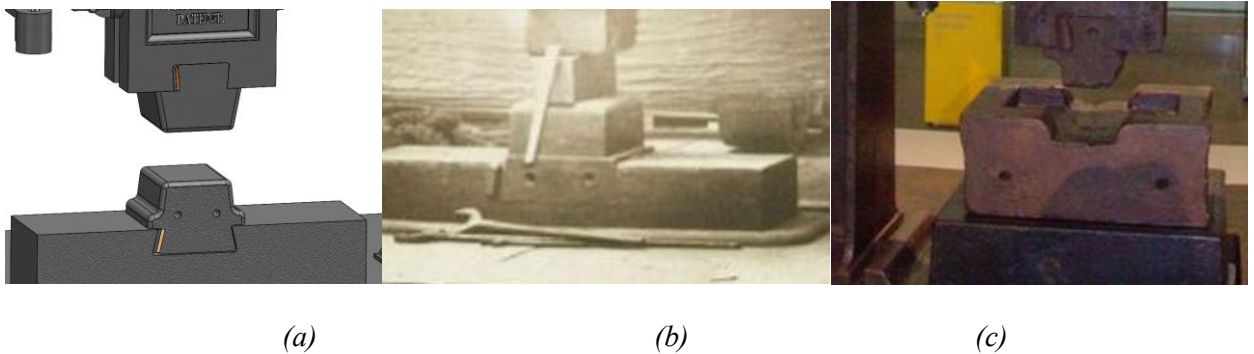


Figura 107: a) Versión modelada original con diseño de yunque inicial b) Versión fotografiada en 1851 diseño de yunque simplificado c) Versión de 1850 con matriz inferior [28] [Modelado SolidWorks] [29].

El yunque también ha sufrido ciertas modificaciones. En la figura 106.b se puede observar una importante simplificación, donde se eliminan las alas laterales respecto la versión 106.a modelada en este proyecto, haciendo un diseño más limpio y sencillo

Por otro lado, en la figura 106.c, se observa una metodología posterior de yunque denominada “matrices inferiores”. En muchos martillos de vapor, la superficie de impacto del yunque no era totalmente plana, sino que se habilitaba un hueco para alojar una “matriz inferior” intercambiable, lo que permitía adaptar el martillo a distintos tipos de piezas o forjados (formas cóncavas, redondeadas, etc.) sin necesidad de fabricar yunques completamente nuevos. La parte superior del yunque actuaba como un bloque base en el que encajaba el dado inferior.

Por otro lado, Nasmyth presentó en 1845 un tipo especial de yunque con forma de “V” para forjar ejes cilíndricos de gran tamaño, evitando la aparición de defectos internos en la pieza. Su argumento era que, al usar yunques planos, el golpe del martillo deformaba el eje en forma oval y dañaba el centro, mientras que la base en “V” generaba una acción convergente que aseguraba la solidez de la forja. Figura 107.

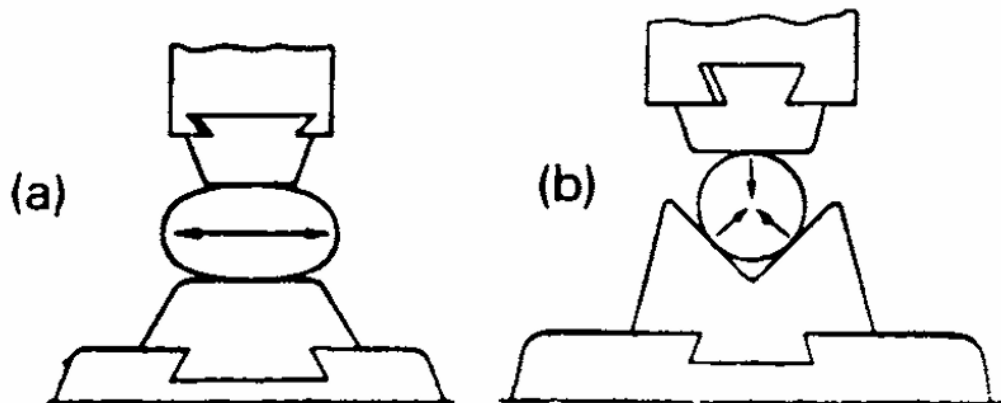


Figura 108: a) Esquema de forja en yunque plano b) Esquema de forja en yunque en “V” [24].

3.6. Horno de hierro forjado

En *“The Engineer and The Machinist’s Assistant”* [27], también se muestran minuciosa y exactamente la forma y dimensiones de un complemento esencial del martillo de vapor, el horno para hierro forjado, también patentado por James Nasmyth.

Se determina en este libro que, para la forja de hierro, la experiencia es la única guía para determinar la forma adecuada que garantice tanto la economía de combustible como la rapidez de calentamiento. Dado que los planos de hornos de construcción aprobada son extremadamente escasos, esta experiencia suele adquirirse a un alto costo. Por ello, se ha considerado que los dibujos de un horno de reverberación, cuya eficiencia en estos aspectos ha sido probada por el propio Sr. Nasmyth, serían de gran utilidad para quienes se interesan en esta rama de las operaciones mecánicas.

El ejemplo elegido es uno de los que horno que se estaba construyendo en 1847 para los astilleros reales y otros establecimientos donde se estaba instalando el martillo de vapor de Nasmyth.

Su principal particularidad radica en que están unidos mediante placas de chapa de hierro en lugar de hierro fundido, lo que evita el riesgo de agrietamiento y deformación debido a la intensidad del calor. Además de estar dibujados con precisión según las

escalas adjuntas, las dimensiones principales de las partes están marcadas para hacer que los planos sean de la mayor utilidad práctica.

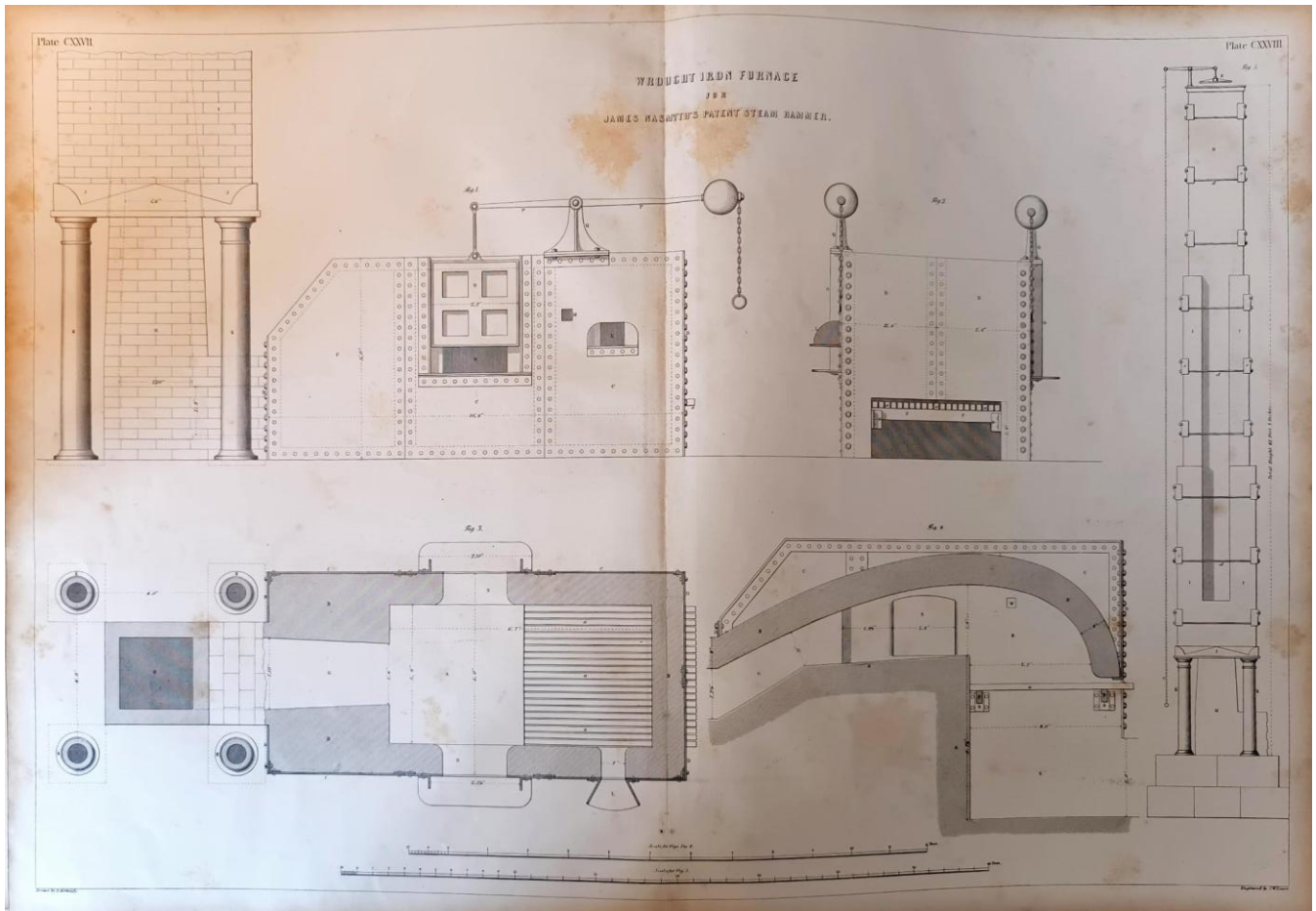


Figura 109: Horno para el hierro forjado [27].

En la base del diseño se sitúa (A), el hogar y la base del horno, completamente revestidos con ladrillos refractarios y con un ligero desnivel que favorece la circulación del calor desde el techo arqueado. Sobre ellos se levanta (B), los laterales y el techo del horno que también están hechos de ladrillos refractarios, con una bóveda curva que concentra el calor en la pieza a calentar. Para mantener la mampostería en la posición correcta, se emplea planchas laterales de chapa de hierro (C).

Por otro lado, se observa (D), las placas de extremo fijadas con pernos, lo que facilita el desmontaje del horno cuando se requiera su reconstrucción. Debajo se encuentra (E), el cenicero, y sobre él se asientan los travesaños de hierro que sostienen las parrillas del

horno (a). Los travesaños descansan en soportes de hierro fundido (b), anclados a los laterales del propio cenicero.

La conducción de los gases hacia la chimenea se logra mediante (G), el cual es un conducto que prolonga el arco del techo, desembocando en la chimenea (H, la cual está revestida internamente con ladrillos refractarios y reforzada por (I), piezas de ladrillo normal que brindan estabilidad. Además, para una mayor solidez, se emplean pernos (d) y pequeñas piezas de hierro fundido (c).

La mampostería de la chimenea descansa sobre (J), una placa base de hierro fundido que, a su vez, se soporta en (K), cuatro sólidas columnas de hierro fundido. Este sistema eleva y refuerza la parte superior del horno, garantizando la robustez y evitando deformaciones.

En cuanto a la alimentación de combustible, (L) corresponde a la boca de carga, concebida para poder sellarse con un trozo de carbón durante la operación. Por otro lado, (M) es un orificio cuadrado en el lateral, útil para revisiones rápidas sin interrumpir el funcionamiento. El acceso principal para el material que se va a calentar se realiza por (N), que son las aberturas mayores del horno.

Para cerrar las aberturas, se emplea una puerta deslizante con armazón de hierro fundido y revestimiento refractario que es denominada (O), y la cual se desplaza verticalmente mediante guías metálicas. Dicho mecanismo se maneja con palancas (P) unidas a los soportes (Q), ubicados sobre el horno. Estas palancas están contrapesadas de manera que el fogonero las puede accionar con facilidad para subir o bajar las puertas.

Finalmente (R) se encarga de regular la corriente de aire del horno al actuar como compuerta o regulador en la chimenea. Se opera a distancia mediante una cadena o alambre (e) que está conectada a la palanca correspondiente, permitiendo al operario ajustar la intensidad de la combustión según las necesidades de la forja.

3.7. Museo Virtual

Como este trabajo forma parte del Proyecto de Innovación Educativa titulado "Desarrollo y empleo de herramientas docentes mediante la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga", identificado con el código PIE22-094, se procede a explicar brevemente el contenido de este proyecto.

Una vez realizados los modelos, estos se van a integrar en un museo virtual, que permitirá el acceso a los modelos digitales y a detalles sobre su funcionamiento mediante el uso de técnicas como la realidad virtual y la realidad aumentada, entre otras posibilidades. En primer lugar, se va a mostrar el póster general del museo, donde se explica el funcionamiento de este, así como una breve introducción al patrimonio industrial.

En primer lugar, se va a mostrar el póster general del museo (figura 110), donde se explica el funcionamiento de este, así como una breve introducción al patrimonio industrial.

Por otro lado, se muestra el póster realizado para el martillo de vapor de Nasmyth (figura 111), que cuenta con un breve contexto histórico, una enumeración de sus componentes principales y una explicación del funcionamiento básico del martillo y con los modelos. Por último, se muestran los modelos del martillo, tanto el renderizado por SolidWorks, como el adaptado a realidad aumentada. A este último se puede acceder con el código QR facilitado en el poster, a través del cual se puede visualizar el modelo en 3D en el entorno de "p3d.in", y también en realidad aumentada.



MUSEO VIRTUAL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



¡BIENVENIDOS AL PRIMER MUSEO VIRTUAL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES!

En este museo podréis "visitar" máquinas, grúas y otros elementos con valor histórico dentro del patrimonio industrial.

¡Anímate e inicia un recorrido por la historia de la fabricación de la mano de la realidad aumentada!

¿CÓMO SE USA?



Escanea el código QR con la cámara de tu dispositivo móvil.



Haz click en el botón "Activar realidad aumentada"



Apunta con la cámara del dispositivo hacia el suelo y muévelo lentamente para que reconozca las superficies.



¡Disfruta! Ahora puedes ver el modelo con la cámara como si estuviese delante tuya en la realidad. Puedes interactuar con él tocando la pantalla.

¿QUÉ ES EL PATRIMONIO INDUSTRIAL?

El análisis del patrimonio industrial, como tipología patrimonial, está referido al estudio de bienes industriales, que bien pueden ser muebles, inmuebles o inmateriales.

¿QUÉ ES LA REALIDAD AUMENTADA?

La realidad aumentada es una técnica que permite visualizar un modelo digital en un entorno real, a través de la cámara de un dispositivo móvil.



ENCUESTA



Este museo se ha realizado como Trabajo Fin de Grado de María Dolores Altamirano Sanjuán.

Por favor, no olvides rellenar la **ENCUESTA DE SATISFACCIÓN** para poder tratar los datos recogidos en mi trabajo.

WEB DEL MUSEO






Trabajo desarrollado en el marco del Proyecto de Innovación Educativa (PIE22-094) Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la EII de la UMA




Figura 110: Póster museo Virtual Escuela Ingenierías Industriales.



MUSEO VIRTUAL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



MARTILLO DE VAPOR DE NASMYTH (1843)

VALOR HISTÓRICO

Fabricado en Patricroft (Manchester), en 1843, por el ingeniero **James Nasmyth**, fue el primer martillo de vapor automático de la historia, siendo capaz de elevar un bloque de varias toneladas con vapor para golpear con precisión piezas imposibles para los martillos tradicionales.

Concebido inicialmente en 1839 para forjar los grandes ejes de los primeros buques transatlánticos, multiplicó la productividad, redujo costes y abrió la puerta a la fabricación de componentes de gran tamaño en la construcción naval, ferroviaria y siderúrgica.

En 1846 **Robert Wilson** añadió su revolucionario **mecanismo de automatización y regulación**, que permitía variar la intensidad desde un suave toque —capaz de no romper un huevo— hasta un impacto demoledor, con solo accionar una palanca, transformándolo en la herramienta de referencia en fundiciones de todo el mundo.

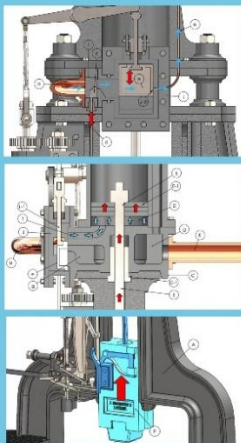
Su **potencia, versatilidad y facilidad de control** lo convirtieron en equipo imprescindible en astilleros y talleres pesados del siglo XIX; numerosos ejemplares se exportaron y permanecieron operativos bien entrado el siglo XX, algunos hasta 1975. En la actualidad es un icono del patrimonio industrial, testimonio tangible de la Revolución Industrial y de la evolución de las máquinas-herramienta que impulsaron la era del acero y el progreso tecnológico.



Fotografía de Nasmyth con el martillo de vapor en 1855

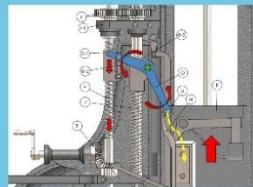


Modelo del martillo de vapor de Nasmyth conservado en "Science Museum", Londres



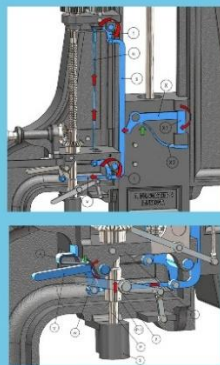
Sistema de admisión del vapor y elevación del martillo

- El operario controla la admisión de vapor (tubería H) al cilindro (D) mediante una válvula (c), controlada por una palanca y una vanilla (d).
- Un sistema auxiliar deriva vapor por el tubo (n), permitiendo descender la válvula (e) y admitiendo vapor en el cilindro.
- El vapor empuja el pistón (E) y se eleva el martillo (F).



Sistema de tope de la subida del martillo

- Al llegar a cierta altura (regulable por el operario), la pieza N del martillo empuja la rueda de fricción (o) de la palanca O.
- La palanca pivota sobre la tuerca fija O-2; descendiendo la vanilla roscada P.
- Ese descenso se transmite por la cadena p-Q-R y eleva la válvula (e), la cual conecta el cilindro con el escape (g → K), soltando el vapor, y conllevando la caída del martillo (F)

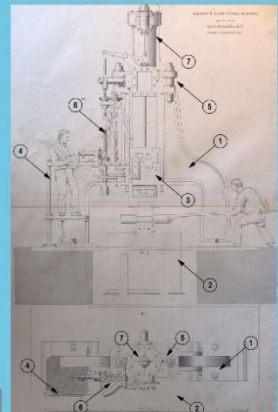


Mecanismo que permite la automatización y caída completa

- La inercia del golpe del martillo provoca un giro de la palanca de enclavamiento (X), empujando la barra paralela (s).
- Esto provoca el giro de las bielas (t), que tiran de la varilla (v) y sueltan el gatillo (w), el cual ancla la vanilla P en cada caída del martillo.
- Al liberarse el gatillo (w), se eleva la varilla (P), que mueve la válvula (e), y se permite automáticamente la admisión de vapor en un nuevo ciclo.

Grupos de componentes fundamentales:

- 1: Bastidor
- 2: Yunque
- 3: Martillo y pistón
- 4: Estructura soportante para el operario
- 5: Sistema de gestión del vapor
- 6: Sistema de accionamiento, regulación y control
- 7: Cilindros de vapor



Martillo de vapor de Nasmyth (The Engineer and The Machinist Assistant, 1847)



MODELO VIRTUAL



Modelo realizado por Felix Tovar Vera (Máster en Ingeniería Industrial)



Iniciativa desarrollada en el marco del Proyecto de Innovación Educativa (PIE22-094) Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la EII de la UMA



Figura 111: Poster Martillo de vapor de Nasmyth [Autoría propia].

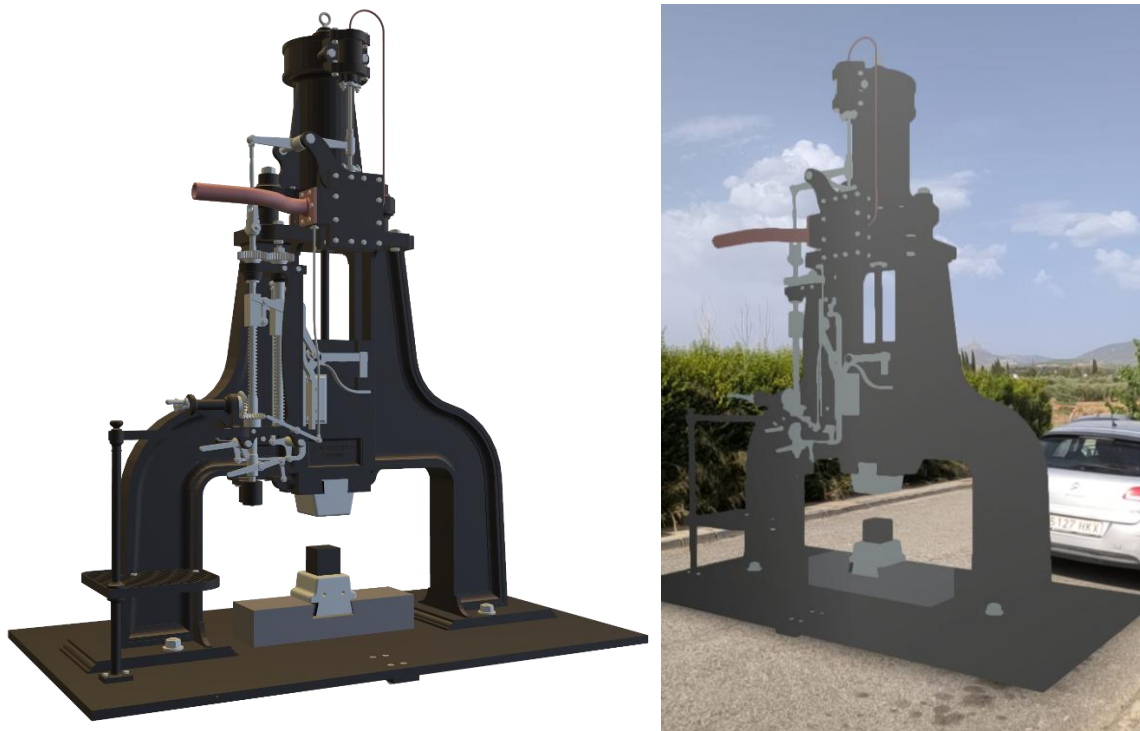


Figura 112: a) Modelo adaptado a realidad aumentada b) Modelo en realidad aumentada en un entorno físico [Autoría propia].

Por último, en la figura 112a, se muestra más detalladamente el modelo adaptado a realidad aumentada a través de “*p3d.in*”. Por otro lado, en la figura 112b, se muestra el modelo en realidad aumentada en un entorno físico real, donde se puede apreciar de manera clara la escala de la máquina del martillo de Nasmyth, al compararse directamente con el tamaño de un automóvil contemporáneo, y, por tanto, permitiendo visualizar las dimensiones reales del dispositivo en relación con los elementos del entorno.

**Capítulo 4. Análisis
Estático y Mecánico del
Sistema**

4.1. Introducción

4.2. Aproximaciones generales

4.2.1. Propiedades físicas

Tras asignar materiales a todos los elementos de conjunto, a través del software SolidWorks, se puede estimar la masa total de la pieza, centro de masa, volumen y otras propiedades físicas.

La masa del conjunto total ensamblado asciende a 23173 kg, o aproximadamente 23 toneladas. Esta cifra sirve para aproximar la magnitud de esta máquina, que en este modelo pesaría en torno a dos autobuses grandes actuales, por lo que era una máquina realmente pesada.

Esto sirve para aproximar en gran esfuerzo, trabajo y dificultad que suponía transportar esta máquina en caso de que fuera necesario. Además, el transporte e instalación inicial requeriría un alto y cuidadoso trabajo de logística con equipos especiales como grúas, rodillos, cabestrantes, etc. Lo que hace la implementación de esta máquina en su época aún más notable.

4.2.2. Centro de masa

A pesar de que en el lado izquierdo de la máquina se sitúan prácticamente todos los elementos y mecánicos accesorios a la estructura principal, el efecto que estas masas tienen sobre el centro de masa es muy leve, desviándolo tan solo unos milímetros del plano medio de la máquina.

Como se puede observar, el centro de masa cuando el martillo está elevado se sitúa justo en la posición donde se coloca el elemento a forjar, es decir, por encima del yunque o bloque de forja. Esto no es casualidad, y muestra lo ingenioso y precisamente diseñado que fue este martillo, ya que se buscaba que el martillo y toda la estructura fueran lo más estables posible y que la fuerza de impacto se dirigiera de manera eficiente, y esta disposición permite una transferencia de energía más directa y efectiva durante el proceso de forja, lo que mejora la precisión y la calidad del trabajo realizado.

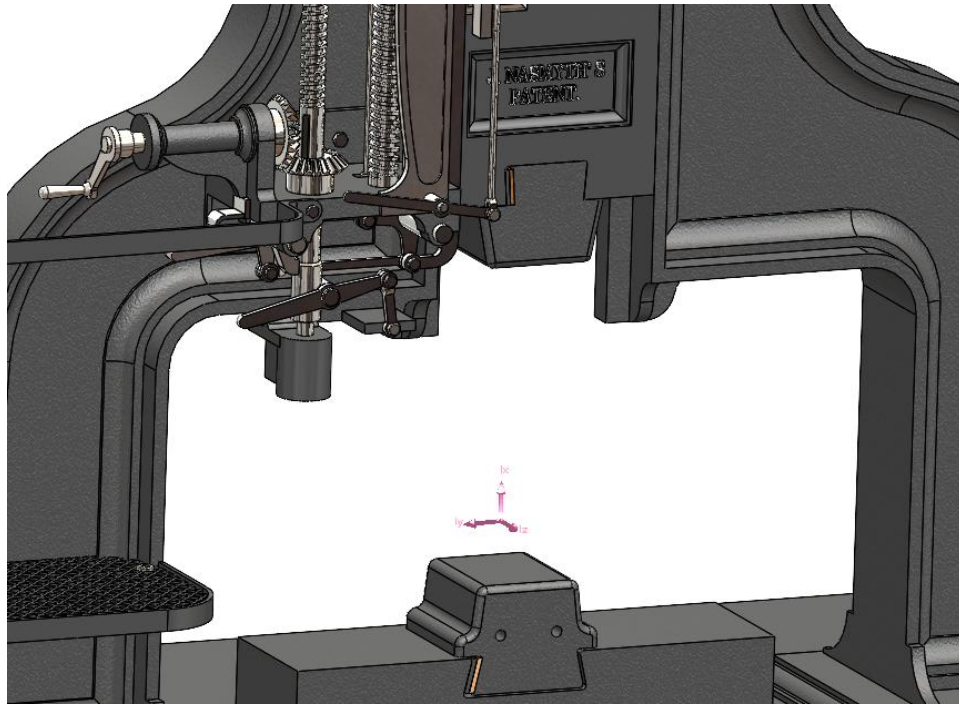


Figura 113: Centro de masa del martillo de vapor de Nasmyth modelado [Modelado SolidWorks].

4.2.3. Volumen

El volumen total de todos los elementos de la maquina sería de 3211138418 mm^2 , o lo que es equivalente a 3211,14 litros de hierro y acero.

4.2.4. Peso del martillo

La suma de los elementos móviles del martillo, considerando cabeza “a”, pieza “Y”, y los distintos accesorios adjuntos, sería de 1870,2 kg. Por tanto, se podría estimar que la fuerza mínima necesaria a ejercer por el vapor para que el martillo no caiga por el efecto de la gravedad sería de:

$$F = m * g = 1870,2 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18346,66 \text{ N} \quad (3)$$

4.2.5. Presión mínima del vapor

Considerando que el diámetro de disco en el interior del cilindro es de 394 milímetros, y el pistón tiene un diámetro de 65 milímetros, se puede considerar que el vapor ejerce presión en área del disco menos la del pistón. Resultando la siguiente formula de área donde el vapor ejerce presión.

$$A_{vapor} = A_{disco} - A_{piston} = \pi * \left(\frac{0,394}{2}\right)^2 - \pi * \left(\frac{0,065}{2}\right)^2 = 0,12 \text{ m}^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{F}{A_{vapor}} = \frac{18346,662 \text{ N}}{0,118 \text{ m}^2} = 155480,19 \text{ Pa} = 1,55 \text{ bar.} \quad (5)$$

En base a esa información, se puede estimar que las calderas de la época que suministraban el vapor tendrían que trabajar a presiones mayores a la calculada, aproximándose que estarían en un rango de 2 y 7 bares.

4.2.6. Consumo energético y potencia

La altura máxima a la que se puede elevar el pistón con la configuración actual sería de 860 mm, siendo esta altura regulable como se ha explicado previamente en el presente proyecto.

Por tanto, se puede considerar, ya que realmente la maquina solo consume energía en elevar el martillo, la energía consumida por ciclo, que equivale a la energía potencial del martillo elevado.

$$E_{potencial} = F * h = 18346,662 \text{ N} * 0,860 \text{ m} = 15778,13 \text{ J} \quad (6)$$

Si el martillo realiza N martillazos por minuto, la potencia promedio se puede calcular como:

$$P = E * N \quad (7)$$

Según “The Engineer and Machinist’s Assistant” [27], todo el proceso de actuación de un ciclo de martillo incluyendo la subida y la bajada, duraba menos de medio segundo, por lo que como mínimo, se tendría una velocidad de 2 golpes por segundo, lo que equivale a 120 golpes por minuto.

Consultando otras fuentes como [47] o [48], se estima un rango de actuación de entre 80 y 220 golpes, ya que dependía mucho de la versión del martillo y su aplicación. Por tanto, 120 golpes es una aproximación adecuada.

$$P_{\text{útil}} = 15778,13 \text{ J} * \frac{120 \text{ martillazos}}{60 \text{ segundos}} (\text{Hz}) = 31556,26 \text{ W} = 31,56 \text{ kW} \quad (8)$$

Esta potencia se asemeja con una caldera de una vivienda de hoy día, por lo que, considerando el contexto industrial y la época, se trataba de una maquina con un consumo energético útil bajo.

Si bien es cierto, se trata de potencia útil, y realmente las máquinas de vapor antiguas tenían eficiencias muy bajas (en torno al 5-10%). Por tanto, realmente se requeriría una potencia total de en torno 300 y 600 kW para poder, tras las pérdidas térmicas mecánicas y por fricción, aprovechar los 31,56 kW calculados.

4.2.7. Velocidad de impacto del martillo con la pieza

Otro dato interesante para calcular sería la velocidad máxima con la que se golpearía la pieza que se esté forjando. Considerando la altura máxima de 860 mm.

$$V_{\text{impacto}_{\text{max}}} = \sqrt{(2 * g * h)} = \sqrt{(2 * 9,81 * 0,86)} = 4,10 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 14,76 \text{ km/h} \quad (9)$$

4.2.8. Consumo de vapor

Para estimar el consumo de vapor por un ciclo a la presión de trabajo, bastaría con calcular el volumen del espacio interior del cilindro. Considerando que la elevación máxima del pistón sería de 860 mm:

$$V_{\text{vapor}} - \text{ciclo} = A_{\text{vapor}} * H = 0,12 \text{ m}^2 * 0,860 \text{ m} = 0,10 \text{ m}^3 = 101.48 \text{ litros} \quad (10)$$

Considerando que funciona a un ritmo de 120 golpes por minuto, podemos estimar que, solamente trabajando 1 hora:

$$V_{\text{vapor}} - h = 101.48 \text{ litros} * 120 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * 60 \text{ min} * 1 \text{ horas} = 730656 \text{ l} \quad (11)$$

Ese volumen de vapor al expulsarse pasaría de la presión de trabajo a la presión atmosférica, por lo que aumentaría su volumen. Considerando la atmósfera a 1 bar y la caldera entre 3 y 7 bares, para 7 bar de caldera por ejemplo se tendría la siguiente relación de volumen en su expansión:

$$V_2 = V_1 * \frac{P_1}{P_2} = V_1 * \frac{7 \text{ bar} + 1 \text{ bar}}{1} = 8 V_1 \quad (12)$$

Por tanto, un volumen mucho mayor sería expulsado cada hora al ambiente (entre 3 y 8 veces mayor que el volumen a presión de trabajo, considerando una caldera entre 3 y 7 bares), expulsándose cada hora más de 5 millones de litros de vapor, con los problemas de condensación de tal magnitud de vapor expulsada al ambiente podría generar.

Por tanto, lo más probable es que la tubería de evacuación de vapor fuera directamente a exteriores de la fábrica, ya que, si no, se crearía tal nube de condensación, que impediría trabajar en la fábrica.

Cabe destacar también, que el enorme consumo de vapor, y el problema de la condensación del vapor (se generaba agua en los cilindros y provocaba golpes de ariete), fueron los principales problemas que tuvo este modelo inicial de martillo de vapor, y fue perfeccionándose con el tiempo en martillos posteriores.

4.3. Análisis estático de subconjuntos mediante SolidWorks

4.3.1. Análisis del subconjunto soporte

El conjunto de piezas encargados de la sustentación principal de la maquina y la estructura básica son las piezas (A), (C) y (D), mostrados en la figura 114.

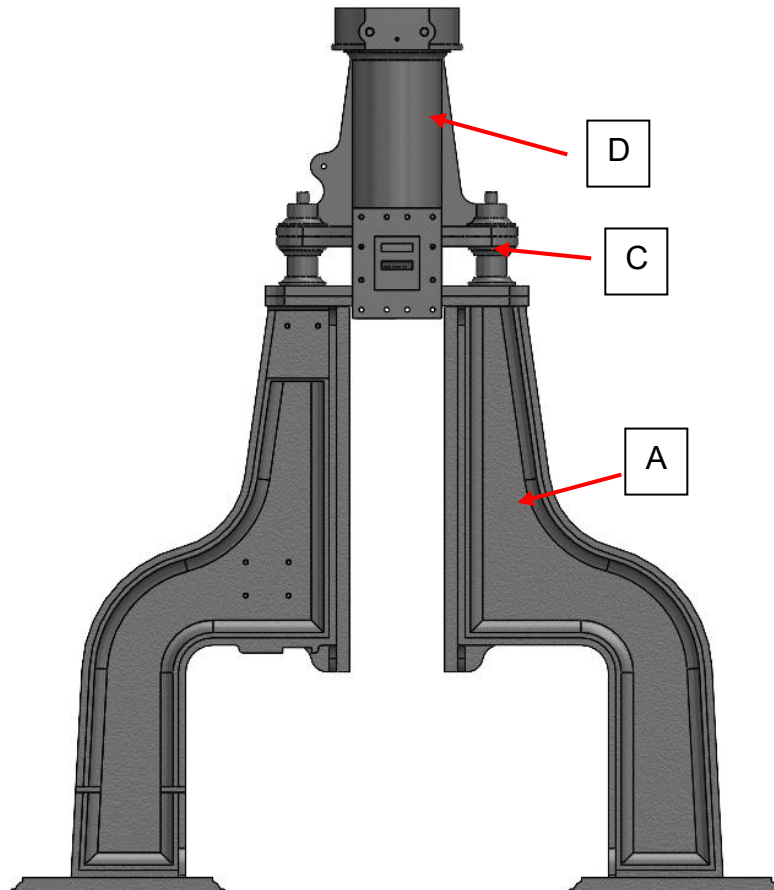


Figura 114: Subconjunto de piezas encargados de la sustentación principal [Modelado SolidWorks].

La bibliografía consultada sobre el martillo de vapor determina que esta estructura principal está fabricada con hierro fundido. Si bien es cierto que se desconocen las características de este hierro, se estimará que tenía las características de un hierro fundido actual de más baja calidad, como el EN GJS 350 LT.

HIERRO FUNDIDO GS
MCARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

	EN GJS 350 22 LT	EN GJS 400 18 LT	EN GJS 400 15	EN GJS 450 10	EN GJS 500 7	EN GJS 600 3
Resistencia a romper Rm MPa	350	400	400	450	500	600
Límite elástico de 0.2% RPO, 2 et MPa	220	240	250	310	320	370

Tabla 1. Características mecánicas del hierro fundido GS- EN GJS 350 LT [49]

Por tanto, podemos estimar que su límite elástico se situaba en torno 220 MPa.

Esta estructura soportaría la suma del peso del martillo (Y), la cabeza (a), el pistón (E), y los distintos accesorios adjuntos, cuando todo este conjunto sea elevado gracias a la presión del vapor.

La suma de las diferentes masas de los elementos es de 1870,20 kg. La aplicación de 1870,20 kilogramos multiplicado por la aceleración gravitatoria resulta en una aplicación de una fuerza de 18328 Newton.

En la figura 115 se puede observar el resultado de aplicar esta carga en la parte superior de la pieza centra A.

Se puede observar como la máxima tensión de Von Mises, sería de 2,421 MPa, en los puntos más críticos que se pueden observar en la figura 116, los cuales se encuentran en la curva interior más pronunciada de la base A.

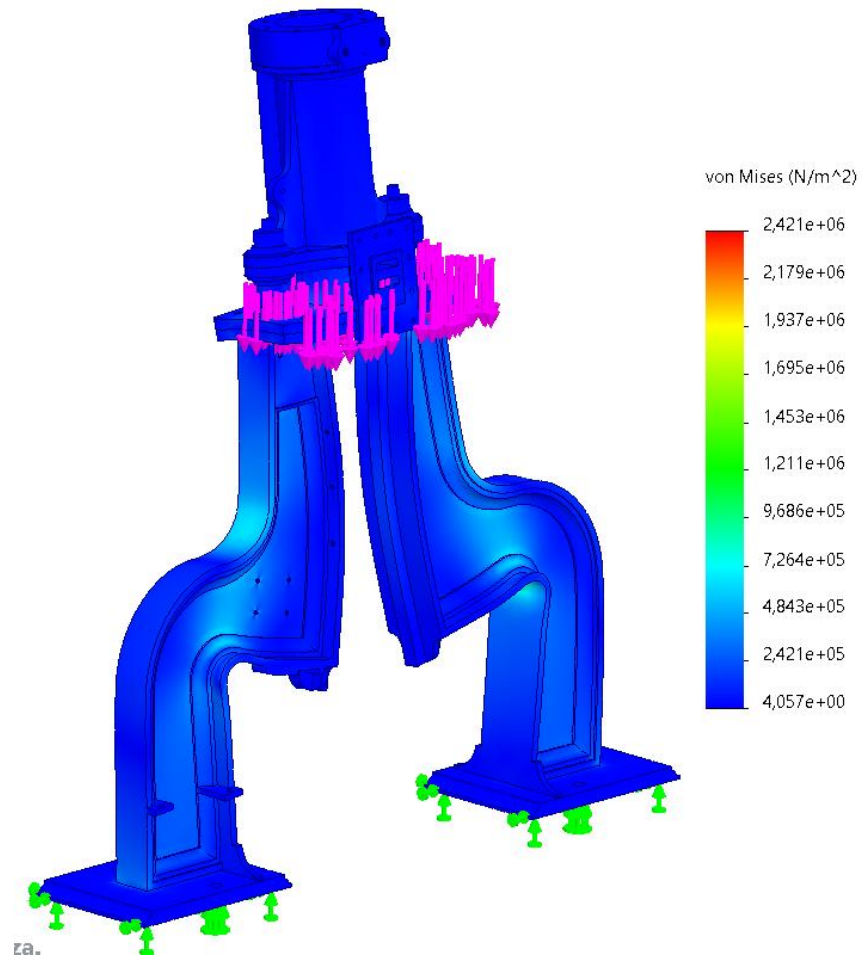


Figura 115: Resultado del estudio estático sobre el subconjunto soporte [Simulación SolidWorks].

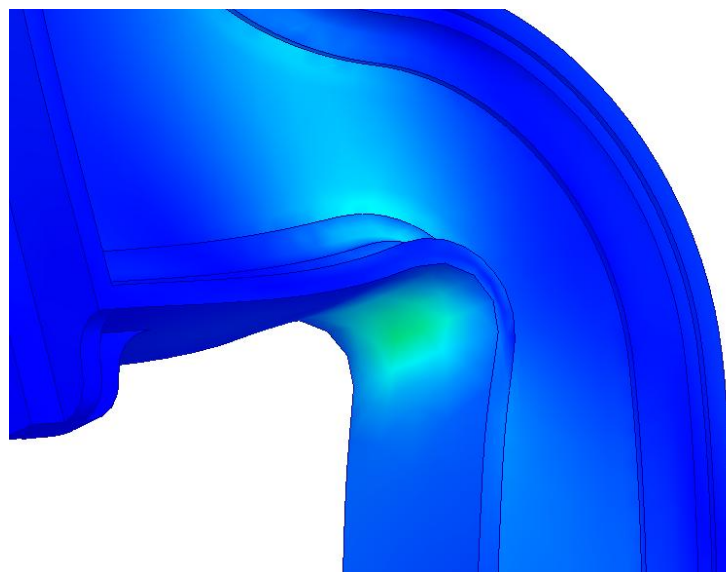


Figura 116: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el subconjunto soporte [Modelado SolidWorks].

Considerando el límite elástico de 220 MPa, una tensión máxima de 2,421 MPa supone en torno al 1,1% de su capacidad. Es por ello por lo que podemos afirmar que la estructura principal se encuentra sobredimensionada en exceso.

No obstante, también es cierto que hay que considerar los siguientes aspectos:

- **Efectos dinámicos:** El martillo opera con cargas de impacto y vibraciones significativamente elevadas. Estas cargas dinámicas pueden provocar tensiones locales y picos mucho mayores que el valor obtenido en un análisis estático. Por otro lado, también existiría el efecto de fatiga o posibles irregularidades dentro del material que disminuyen el límite elástico en ciertas zonas del material.
- **Conservadurismo en diseño:** En la época se solían incorporar márgenes de seguridad importantes para compensar incertidumbres en las propiedades del material, variaciones en la calidad de la fundición y condiciones operativas imprevistas. Un diseño sobredimensionado puede ser una forma de asegurar la robustez y la durabilidad ante cargas accidentales y fatiga.
- **Propiedades del material:** La fundición de hierro, especialmente la de la época, tiene un comportamiento algo frágil y sensible a defectos. Aunque la tensión estática aparente esté muy por debajo del límite elástico, cualquier impacto o fluctuación brusca puede inducir concentraciones de tensión que acerquen el material a su límite.

Por todo ello, un sobredimensionamiento tan elevado no necesariamente fue un error de diseño, sino que podría estar justificado debido al contexto de la época. No obstante, con la evolución de los softwares de cálculo y la ciencia de los materiales, un rediseño de esta máquina en la actualidad exigiría un sobredimensionamiento mucho más ajustado a los estándares de hoy en día, lo que permitiría ahorrar muchos costes en material y fabricación.

4.3.2. Análisis estático inferior

El conjunto de piezas (G) y (b), tiene función es sustentar el elemento a forjar.

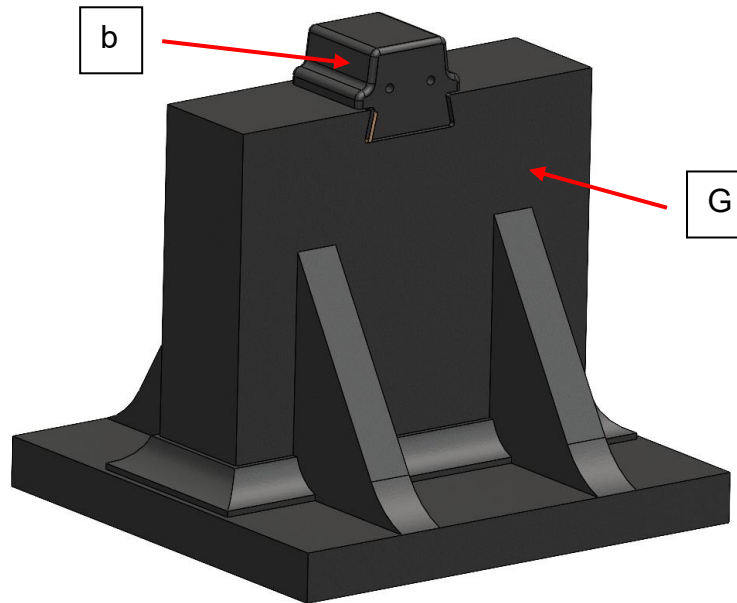


Figura 117: Subconjunto de elementos del yunque [Modelado SolidWorks].

En la bibliografía consultada no se esclarece de que material específico están diseñadas estas piezas, pero lo más coherente sería suponer que están diseñados con un tipo de hierro que tenga un límite de elasticidad bastante superior al hierro fundido con el que están hechas las principales piezas de la máquina, ya que estas piezas tienen que estar preparadas para poder soportar grandes impactos si se da el caso que no exista ningún elemento a forjar y golpee el martillo directamente con esta base sustentadora.

Para este proyecto se estimará un límite elástico para estas piezas de 300 MPa para los hierros de estas piezas, simulando un hierro actual EN GJS 450 10.

HIERRO FUNDIDO GS						
M CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS						
	EN GJS 350 22 LT	EN GJS 400 18 LT	EN GJS 400 15	EN GJS 450 10	EN GJS 500 7	EN GJS 600 3
Resistencia a romper Rm MPa	350	400	400	450	500	600
Límite elástico de 0.2% RPO, 2 et MPA	220	240	250	310	320	370

Tabla 2: Características mecánicas del hierro fundido GS- EN GJS 450 10 [49].

No obstante, también es importante que exista cierta pequeña deformación, ya que si no la fuerza ejercida por el martillo al frenar de golpe tras la caída tendería a infinito. Por tanto, en este ingenioso diseño se divide en la pieza cabeza (b) y la pieza soporte (G), absorbiendo la pieza (b) todas las posibles deformaciones y siendo sustituida fácilmente cuando fuera requerido, sí que sufra deformaciones significativas el bloque (G), el cual está empotrado en el suelo y sería poco eficiente y costoso de intercambiar por uno nuevo.

En la siguiente figura 118, se muestra una simulación realizada en SolidWorks, donde se aplica una fuerza de 6000 kN sobre la cara superior de la pieza (b). Se han escogido 6000 kN, debido a que se buscaba una situación límite desfavorable para el yunque, y como se verá a continuación, las fuerzas requeridas para deformar una probeta de 200x200x200 milímetros, varían en trono 800 y 4000 kN según la temperatura de esta. Por tanto, 6000 kN se podría estimar como una situación bastante desfavorable para estimar los esfuerzos en el yunque.

Como se ha comentado, la ingeniosa separación entre piezas (G) y (b), permite que la pieza (b) absorba las mayores tensiones, viéndose el bloque afectado muy levemente.

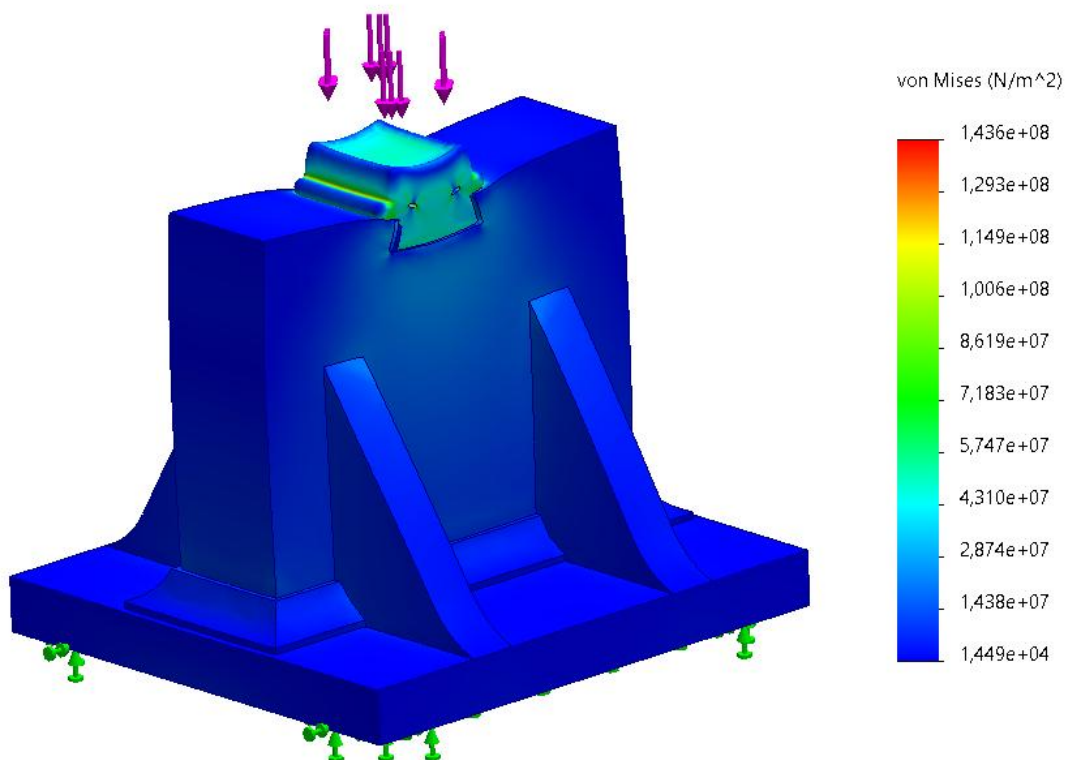


Figura 118: Resultado del estudio estático sobre el subconjunto yunque [Simulación SolidWorks].

En la figura 119, se puede observar con más claridad la deformación de la pieza (b). El diseño de la pieza y las hendiduras realizadas en el centro, favorecen que se concentren aquí las mayores tensiones, produciéndose si fuera el caso deformaciones, y evitando que el bloque sufriera alguna.

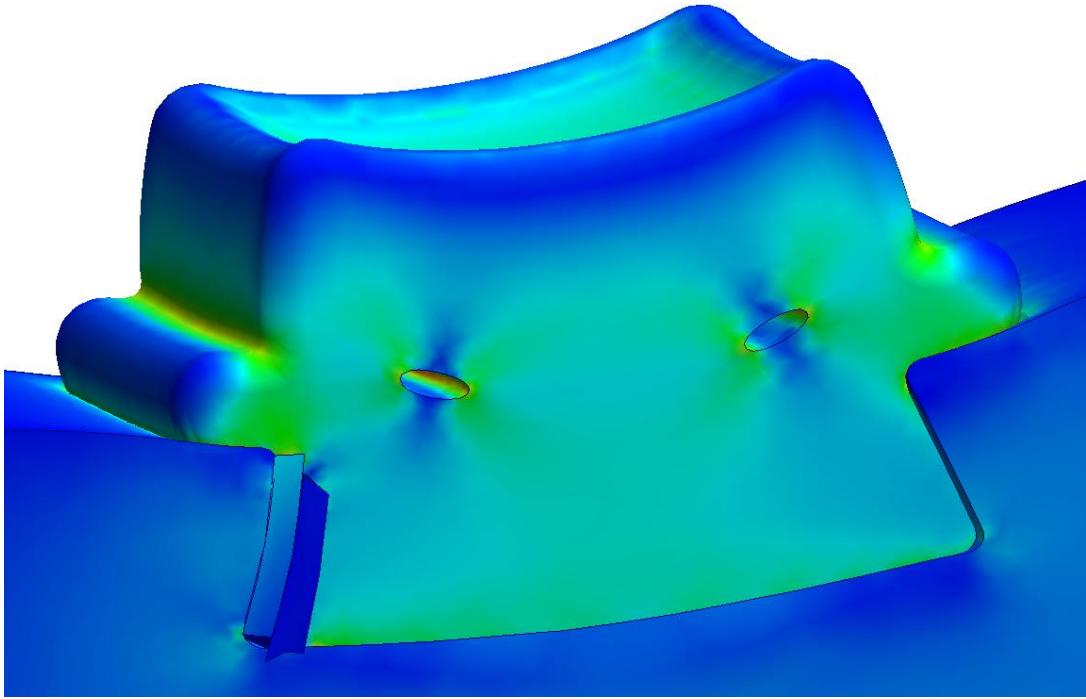


Figura 119: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el subconjunto yunque [Simulación SolidWorks].

Como se ha comentado previamente, si esta base fuera perfectamente rígida (teóricamente incomprensible e indeformable), la fuerza ejercida por el martillo, al sufrir una desaceleración instantánea tendería a infinito. Por tanto, en la práctica, es probable que se deforme en ordenes de magnitud muy pequeños.

Por otro lado, también pueden actuar otros fenómenos que evitan que esta desaceleración sea instantánea y se provoque un impacto con una fuerza que tienda a infinito. Estos son:

- Deformaciones en la cabeza del martillo
- Pequeños rebotes del martillo
- Vías de disipación de energía como vibraciones del sistema o amortiguación del terreno.

Para esta simulación con una fuerza aplicada de 6000 kN, se obtendrían una tensión máxima de Von Mises de 146 MPa en los puntos más críticos (orificios de la pieza (b)), y no se superaría el límite elástico estimado de 300 MPa y por tanto no existiría deformación. Si bien es cierto que, al no haber deformación, la fuerza ejercida por el martillo podría ser mucho mayor, también actuarían los otros fenómenos de desaceleración comentados.

4.3.3. Análisis estático del pistón

El pistón es una pieza fundamental en el mecanismo. Según la bibliografía consultada, estaba fabricado de hierro maleable, el cual consideramos que tiene un límite elástico de 275 MPa y un límite a la tracción de 413 MPa.

El pistón básicamente trabajará con esfuerzos axiales de tracción y compresión, pero en este caso solo se analizará el esfuerzo a tracción, que se produce cuando el vapor empuja al martillo en su subida.

El esfuerzo de compresión se daría en el momento del impacto, pero debido al ingenioso mecanismo diseñado por Nasmyth para evitar vibraciones y amortiguar el golpe, éste sería reducido. Además, el pistón cuenta con libertad en el eje en el eje Y (pudiéndose producir pequeños rebotes). Por tanto, no se realizará una estimación concreta de cuál sería el esfuerzo de compresión, ya que dependería de muchos factores como por ejemplo el material y dimensiones de la pieza que se está forjando, su deformación, su temperatura, la altura de caída, de la cantidad o calidad de los discos amortiguadores, etc.

Por último, en general, en el hierro maleable la resistencia a la tracción es inferior a la resistencia a compresión. Bajo esfuerzos de tracción, cualquier micro fisura o defecto interno tiende a abrirse y propagarse, lo que puede conducir a un fallo prematuro. En compresión, las mismas discontinuidades tienden a cerrarse o a no influir tan negativamente, ya que la carga actúa comprimiendo el material. Por tanto, es más restrictivo el esfuerzo a tracción, que es el que se analiza a continuación.

El esfuerzo que soportara a tracción cuando el pistón se eleve, será el peso del martillo en su conjunto, sin contar los discos superiores que es donde el vapor ejercería la fuerza.

La suma del peso total sería de 1787 kg, lo que supondría un esfuerzo axial de 17513,5 N. Este esfuerzo se producirá axialmente en ambos extremos, en uno debido a la fuerza del peso, y en el otro, a la fuerza que el vapor ejerce para superar al peso y elevar el martillo. Aunque la fuerza que ejerce el vapor sería mayor que la que ejerce el peso, el material solo sufriría la parte del peso, ya que el resto se transformaría en movimiento de elevación.

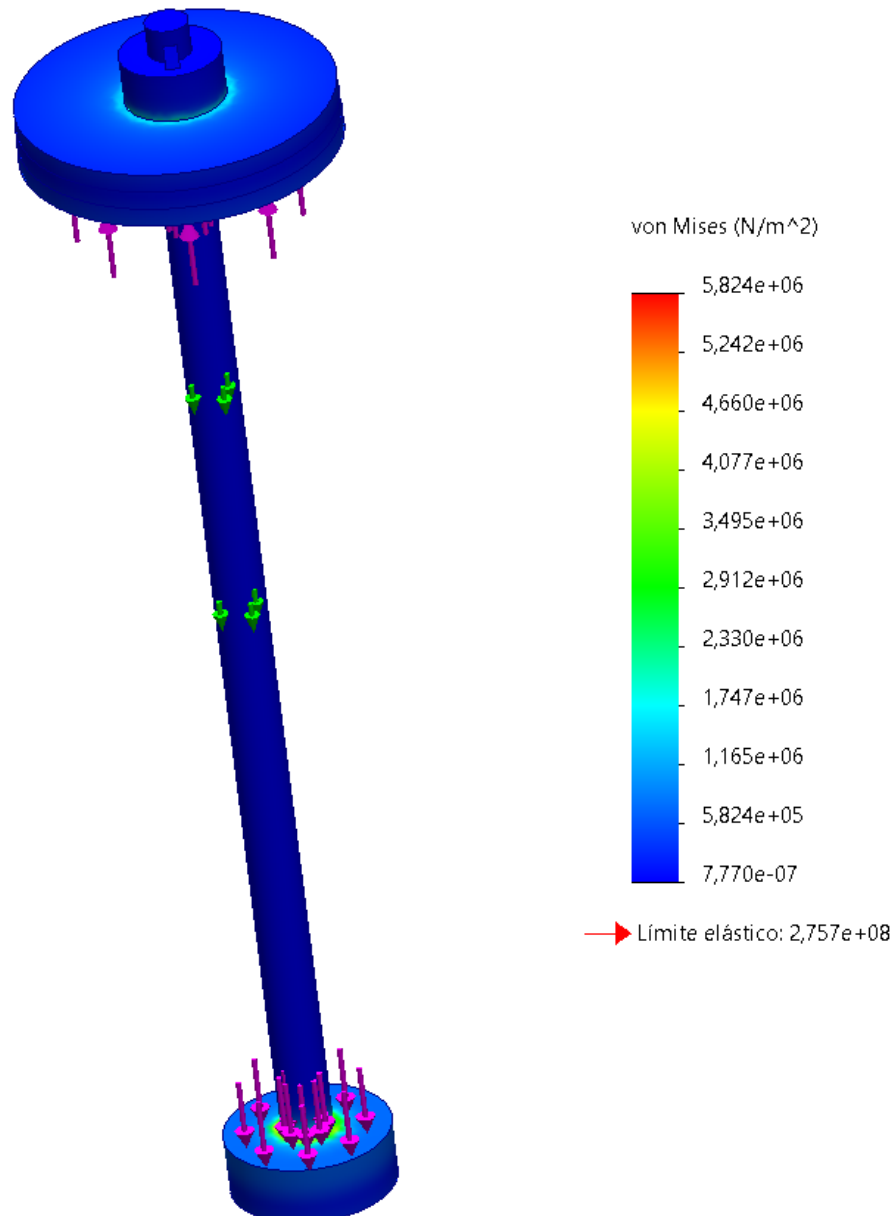


Figura 120: Resultado del estudio estático sobre el pistón tracción [Simulación SolidWorks].

El esfuerzo máximo de Von Mises que soporta la barra del pistón es de 5,824 MPa, justamente en las uniones con los discos donde se ejerce la presión del vapor y donde se sujeta el peso del martillo.

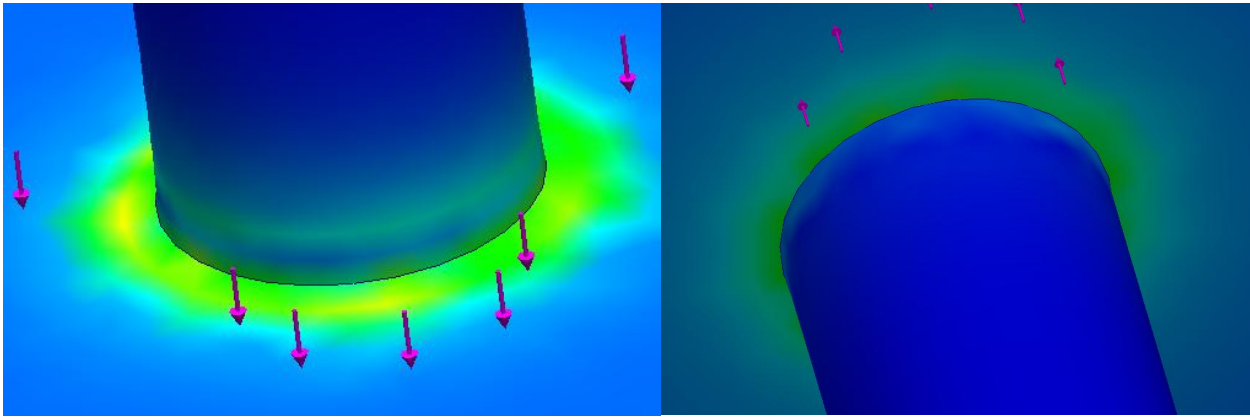


Figura 121: Zona más crítica en los resultados del estudio estático sobre el pistón [Simulación SolidWorks].

Es un valor que se encuentra muy lejos de los 275 Mpa de límite elástico. Al igual que en el apartado del análisis estático de la estructura principal, se encuentra muy sobredimensionado, alcanzando el torno al 2,10% de sus limitaciones máximas.

No obstante, se concluye que al igual que el apartado anterior, las razones de tal sobredimensionamiento desmesurado estas asociadas a razones de efectos dinámicos, conservadurismo en el diseño o propiedades de los materiales de la época. En cualquier caso, se podría concluir que se puede realizar un rediseño de una máquina que realizara las mismas funciones con elementos mucho más livianos y compactos, ahorrando costes de materiales.

4.4. Análisis analítico de tensiones y deformaciones en elementos forjados

4.4.1. Fuerza requerida para deformar la probeta

En primer lugar, se va a desarrollar el cálculo de la fuerza necesaria por un martillo o por una prensa, para deformar una probeta hipotética cubica de 200x200x200 mm. Se han decidido establecer estas dimensiones ya que se considera que es una dimensión adecuada para el espacio disponible en la cara superior de la pieza (a), como se observa en la figura 122.

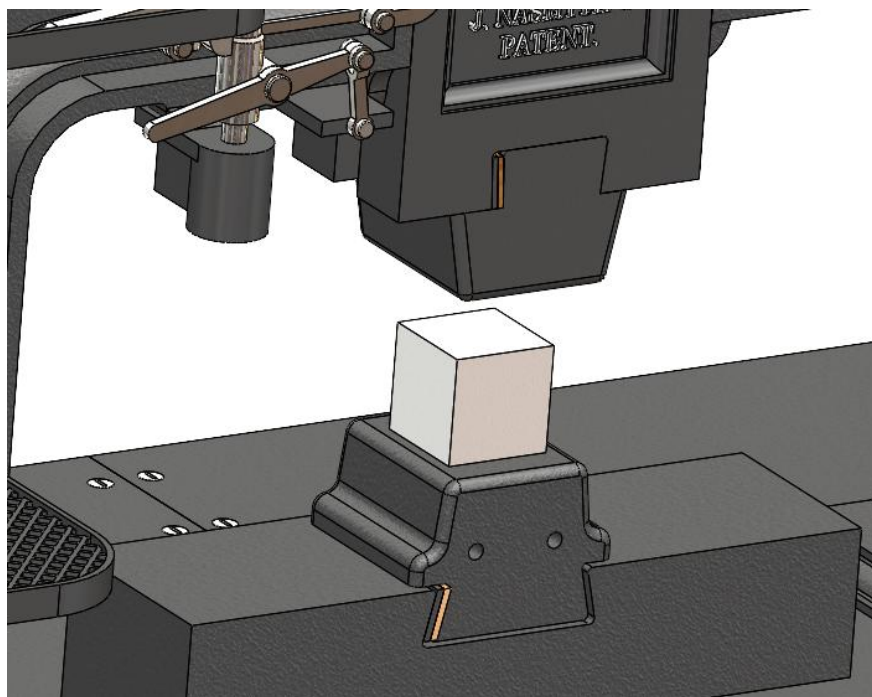


Figura 122: Probeta hipotética cubica de 200x200x200 mm [Modelado SolidWorks].

Como se establece en “*The Engineer and Machinist’s Assistant*” [27], esta versión de la máquina en concreto, con las dimensiones presentes (30 quintales de martillo), fue de gran utilización en la forja de bolas de hierro en bruto, donde inicialmente los primeros martillazos puede dar golpes intensos y lentos, dando a la bola de hierro en bruto una forma cúbica precisa y, posteriormente, aplicar golpes enérgicos y suaves que aseguren la completa expulsión de toda la escoria y otras impurezas no metálicas. Por tanto, se ha buscado simular en esta probeta uno de estos cubos.

Según “Tema 18. Métodos de análisis de procesos de conformado por deformación plástica. II,” [50], la formulación de la fuerza necesaria para deformar un material en forja viene determinado por la siguiente formula:

$$F_{forja} = 2 * P_{media} * a * w \quad (13)$$

Por otro lado, se establece de igual forma, que realmente hay que aplicar un exceso del 20-25% de la fuerza para compensar aquellas fuerzas que no se tienen en cuenta al aplicar el método de la deformación homogénea.

$$F_{forja_{real}} = 1,25 * F_{forja} \quad (14)$$

“P_{media}” se define de la siguiente forma:

$$P_{media} = \frac{\int p dx}{a} = s * \frac{e^{\frac{2 * \mu * a}{h}} - 1}{\frac{2 * \mu * a}{h}} \quad (15)$$

Donde:

- μ = coeficiente de rozamiento cinético (0,57)
- a = la mitad del ancho de la pieza (0,1 m)
- h =altura de la pieza (0,2 m)

Se ha definido 0,57 de coeficiente de rozamiento cinético ente hierro-hierro, basándose en “las fuentes [52] y [53].

“S” viene definida por:

$$s = \frac{2 * \sigma_e}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Donde:

- σ_e = límite elástico

Por tanto, podemos concluir que la fuerza necesaria varia en primera instancia del límite elástico y de la geometría de la pieza. No obstante, en la forja es fundamental la temperatura a la que se encuentre la pieza, ya que el límite elástico depende directamente de la temperatura.

Según “*Tema 18. Métodos de análisis de procesos de conformado por deformación plástica. II*,” [50], las temperaturas de forja se trabajaban en torno un rango, que dependía de la cantidad de carbono de las piezas a forjar. En la figura 123 se puede observar una gráfica donde se establecen la temperaturas máximas y mínimas a emplear en función del porcentaje de carbono de la pieza, y también el color que indica a la temperatura aproximada a la que está.

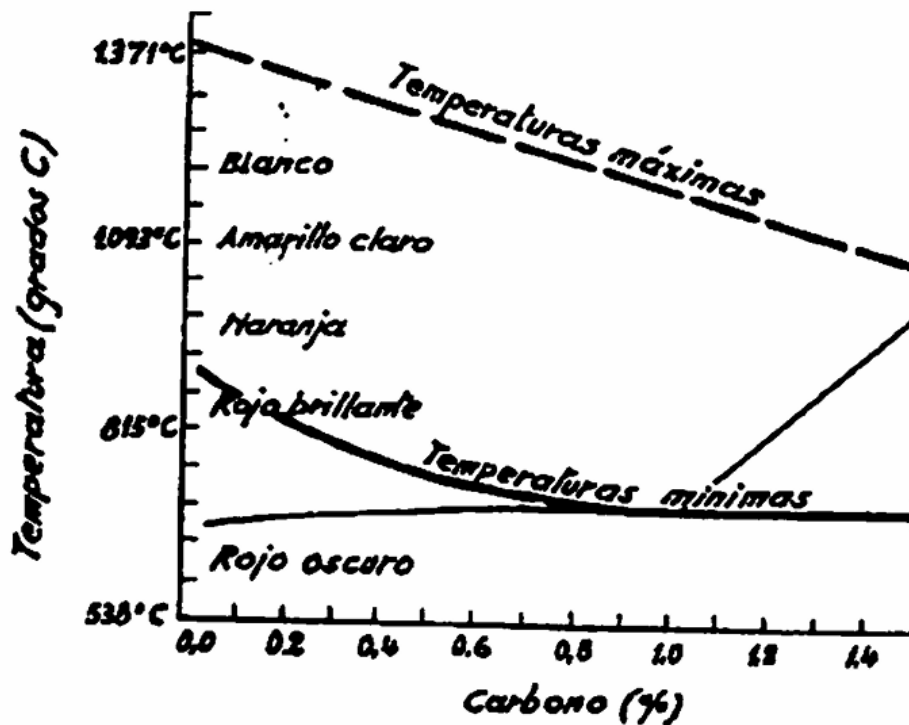


Figura 123: Gráfico de las temperaturas máximas y mínimas a emplear en función del porcentaje de carbono de la pieza [50].

El hierro forjado de mediados del siglo XIX se caracteriza por tener un contenido muy bajo en carbono, mucho menor que el de los aceros. Generalmente, el porcentaje de carbono se encontraba en el orden de 0,02% a 0,08%, siendo común utilizar valores cercanos a 0,03–0,05% en muchos casos.

Se considerará por tanto que se utilizaba un rango de entre 900 y 1300 °C.

Por tanto, el siguiente paso lógico, será calcular las diferentes tensiones límites del material en función de la temperatura a la que se encuentre, para así poder calcular

posteriormente la fuerza necesaria para deformar la probeta en función de la temperatura de esta. Para ellos se recurre a la siguiente formulación:

$$\sigma_e = \sigma_o * \left(1 - \left(\frac{T - T_o}{T_m - T_o}\right)^m\right) \quad (17)$$

Donde:

- σ_o = tensión límite del material a temperatura ambiente. (100 MPa)
- T_o = temperatura ambiente (25 C°)
- T = temperatura en la que se está evaluando
- T_m = es la temperatura de fusión del material (1538 °C)
- m = exponente que controla qué tan rápido decae la resistencia con la temperatura. Para muchos aceros y hierros, puede variar entre ~0,8 y ~1,1 (se aproxima a 0,9).

En esta expresión sería una aproximación del límite elástico (o resistencia inicial) del hierro en función de la temperatura, partiendo de un valor σ_o a temperatura ambiente y decreciendo hasta casi cero al acercarse a la temperatura de fusión.

Esta fórmula sería una simplificación de la fórmula de Johnson-Cook (J-C), donde se suprimen los términos relativos a la velocidad de deformación y endurecimiento por deformación, que, a razón de simplificar, se obviarían en este estudio. Según [51], la fórmula de Johnson-Cook se define de la siguiente forma:

$$\sigma_{eq} = (A + B * \varepsilon^n) * \left(1 + C * \ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)\right) * \sigma_o * \left(1 - \left(\frac{T - T_o}{T_m - T_o}\right)^m\right) \quad (18)$$

Una vez desarrolladas las fórmulas, se aplicarán para distintas temperaturas, obteniendo en primer lugar, las distintas tensiones límites en pascales. Se ha establecido una temperatura ambiente T_o , de 25 °C.

TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA (K)	TENSION LIMITE (Pa)
800	1073	45233309,59
850	1123	42063331,52
900	1173	38912519,63
950	1223	35779671,28
1000	1273	32663720,18
1050	1323	29563714,74
1100	1373	26478800,73
1150	1423	23408207,25
1200	1473	20351235,27
1250	1523	17307248,15
1300	1573	14275663,76
1350	1623	11255947,84

Tabla 3: Tensiones límites del material en función de la temperatura. [Autoría propia]

Una vez obtenidos los valores de tensión límite en función de la temperatura, se puede calcular aplicando la formulación definida anteriormente, la fuerza necesaria a aplicar para deformar la probeta.

TEMPERATURA (°C)	s (Pa)	P_{media}	F (N)	Freal (kN)
800	52230926,9	70398772,33	2815950,89	3519,94
850	48570551,5	65465183,2	2618607,33	3273,26
900	44932307,4	60561423,32	2422456,93	3028,07
950	41314805,7	55685620,96	2227424,84	2784,28
1000	37716815,3	50836116,6	2033444,66	2541,81
1050	34137237,3	46011429,24	1840457,17	2300,57
1100	30575085,5	41210229,39	1648409,18	2060,51
1150	27029469,5	36431317,27	1457252,69	1821,57
1200	23499582,3	31673604,95	1266944,20	1583,68
1250	19984688,8	26936101,59	1077444,06	1346,81
1300	16484116,6	22217901,19	888716,05	1110,90
1350	12997249	17518172,27	700726,89	875,91
25	115470054	155634803,1	6225392,13	7781,74

Tabla 4: Fuerza real necesaria para deformar la probeta. [Autoría propia]

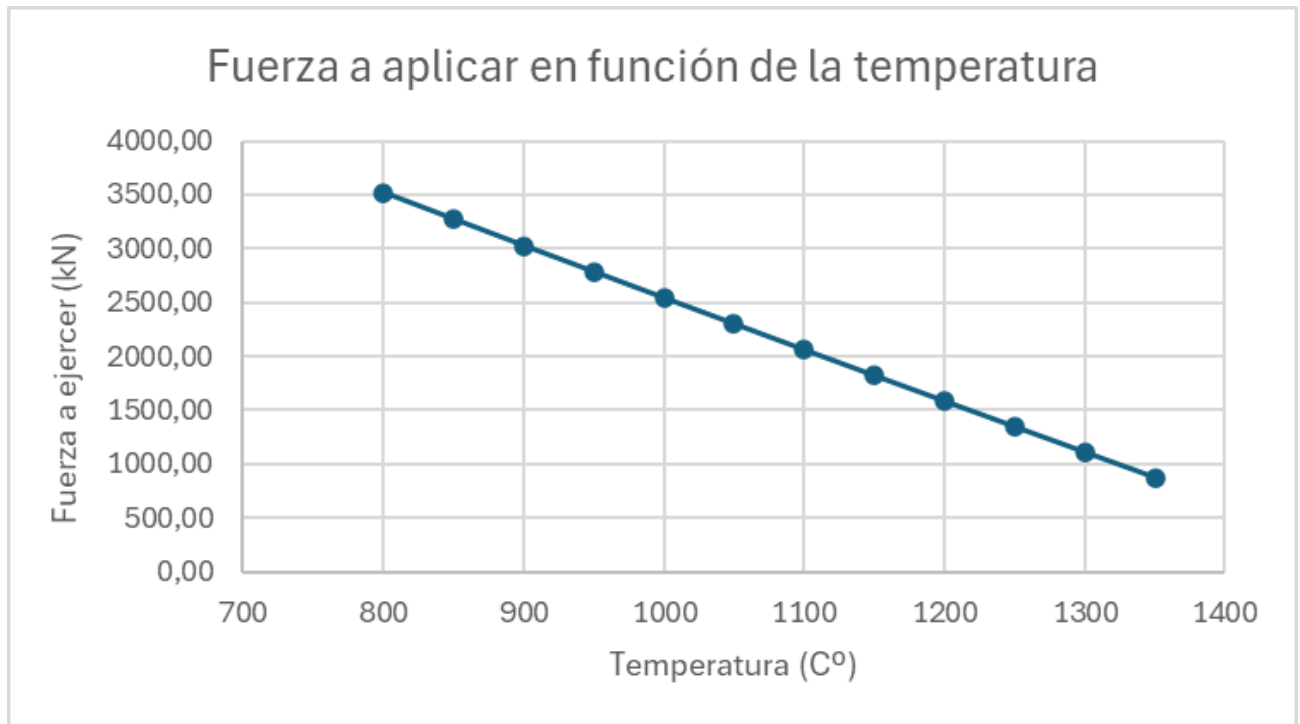


Figura 124: Gráfica de la fuerza necesaria a aplicar para deformar la probeta en función de la temperatura[Autoría propia].

Como se puede observar en la gráfica de la figura 124, la fuerza necesaria a aplicar para que se produzca cierta deformación, disminuye en cuanto aumenta la temperatura. Esto reafirma la importancia de elevar la temperatura del elemento forjado, para producir deformaciones más grandes a igualdad de aplicación de fuerza.

Por último, cabe analizar, que en función al ingenioso mecanismo de este martillo de vapor que se ha analizado pormenorizadamente en este proyecto, la regulación de la fuerza era sumamente sencilla y rápida. Por tanto, ajustar la fuerza requerida para el elemento a forjar para que este se deforme y aumentar o reducir esta deformación en función de los intereses del operario, se realizaba de forma rápida y eficaz a través de la gran maniobrabilidad que ofrecía el martillo. En definitiva, esta máquina permitía controlar al operario la deformación de la pieza con suma precisión.

4.4.2. Deformaciones en la probeta

Se puede estimar la energía máxima que tiene el martillo si parte de la situación más alta posible.

La altura máxima del martillo sería una elevación de 860 mm, pero se le quitara los 200 mm relativos a la probeta a forjar, resultando la siguiente ecuación:

$$E_{potencial} = F * h = 18346,662 \text{ N} * 0,660 \text{ m} = 12108,79 \text{ J}$$

A continuación, es necesario estimar en cuanto fuerza de impacto se transforma esta energía potencial. La energía acumulada (en este caso, 12109 J) se disipa al detener el movimiento del martillo, y esa disipación se produce en cierta distancia de deformación (o “cushioning”) durante el impacto.

$$F_{prom} = \frac{E}{d} \quad (19)$$

En la fórmula 19, “d” sería la distancia en la cual desacelera el martillo. Si frenara completamente en seco, la fuerza producida por el martillo sería infinita. Esto no es así en la realidad ya que se produce una deformación en el material, además de otros fenómenos como rebote, vibraciones disipaciones, etc. Para este análisis, como simplificación, se asumirá que la distancia de frenada del martillo es igual a la deformación del material de la probeta que se está forjando.

La fuerza que se requiere para deformar la probeta, ya se ha calculado previamente, en función de temperaturas. Por tanto, se va a considerar que el martillo ejerce, la misma fuerza que la probeta requiere para deformarse, pudiendo así calcular cuánto se deformaría la probeta cuando se alcance esa fuerza, gracias a despejar “d” de la fórmula anterior.

Temperatura (°C)	Distancia a deformar (mm)
800	0,34
850	0,37
900	0,40
950	0,43
1000	0,48
1050	0,53
1100	0,59
1150	0,66
1200	0,76
1250	0,90
1300	1,09
1350	1,38
25	0,16

Tabla 5: Distancia que se deforma la probeta en función de la temperatura con la fuerza ejercida requerida para la deformación. [Autoría propia]

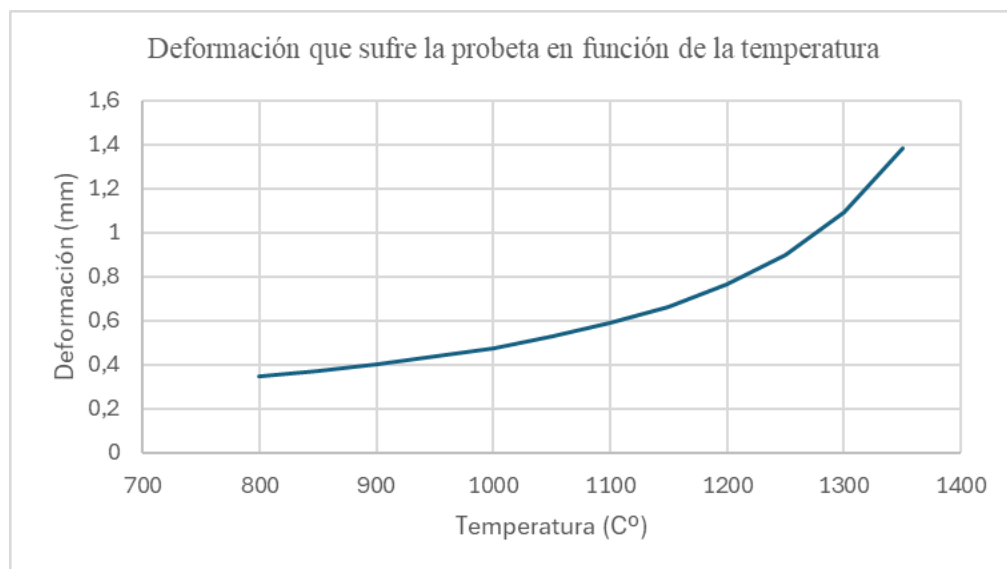


Figura 125: Grafica de la deformación que sufre la probeta en función de la temperatura, con la fuerza ejercida requerida para su deformación [Autoría propia].

Como era de esperar, cuando a la temperatura de la pieza sube, a igualdad de condiciones de elevación del martillo, las deformaciones que sufre la pieza son considerablemente mayores en cuanto se eleva la temperatura. El comportamiento que tendría la gráfica sería exponencial con una asíntota en la temperatura de fusión del metal.

La regulación de la temperatura junto con la elevación del martillo, eran pues, las dos principales variables con las que el operario de la máquina de vapor trabajaba, en función de que cantidad de deformación buscara en la pieza, lo que requería experiencia en la profesión.

4.4.3. Análisis estático de la probeta mediante SolidWorks

Paralelo a lo anterior, se ha realizado un análisis estático mediante Solid Works, donde se ha aplicado la fuerza necesaria para la deformación a temperatura ambiente y tensión límite del material sin modificaciones, ya que Solid Works calcula a temperatura ambiente. Estos datos serían, en primer lugar, una fuerza requerida de 7781,74 kN, y un módulo de elasticidad de 100 MPa.

Se obtienen pues los siguientes resultados en cuanto a deformaciones, obteniendo 0,21 mm de deformación máxima en la zona del impacto. Este dato es coherente en cuanto a los resultados anteriores, ya que obteníamos unos rangos de deformación de 0,34 mm a 1,38 mm, desde 800 °C a 1350 °C. Por tanto, es lógico que a temperatura ambiente se sufra una deformación menor en torno a ese orden de magnitud.

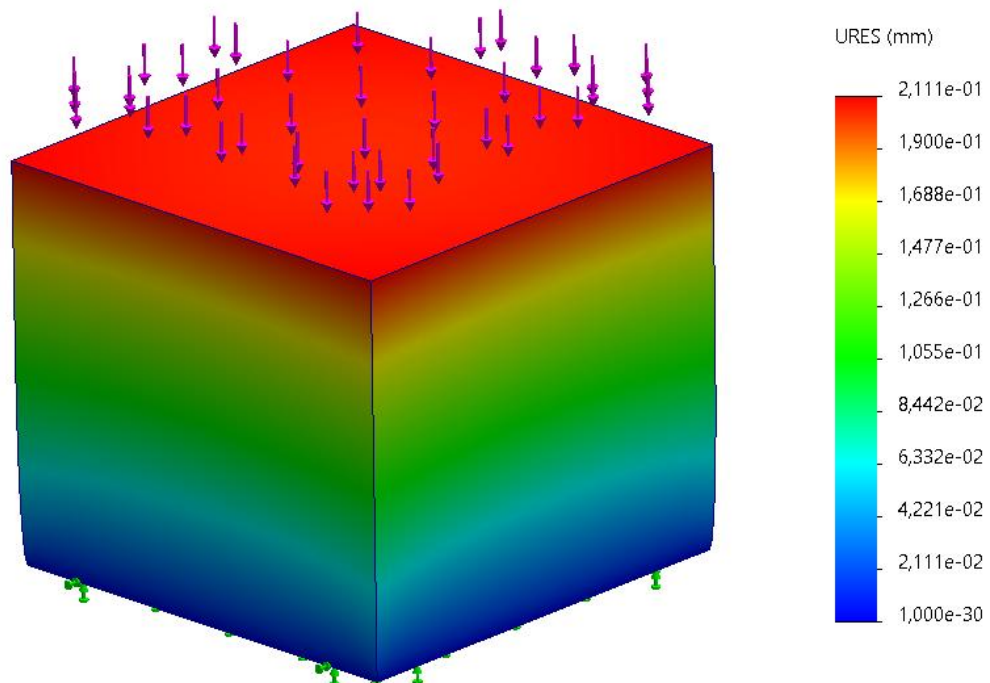


Figura 126: Resultados del análisis estático de la probeta [Simulación SolidWorks].

4.3.1. Relación a/h y efectos

Recuérdese que “ a ” es la mitad del ancho de la probeta y “ h ” su altura. Según “*Tema 18. Métodos de análisis de procesos de conformado por deformación plástica. II,*” [50], se establece que, si la relación “ a/h ” crece, aumenta la resistencia a la deformación, pues la zona de más difícil deformación por efecto de proximidad de las zonas con rozamiento externa aumenta en términos relativos, como se muestra en la figura 127.

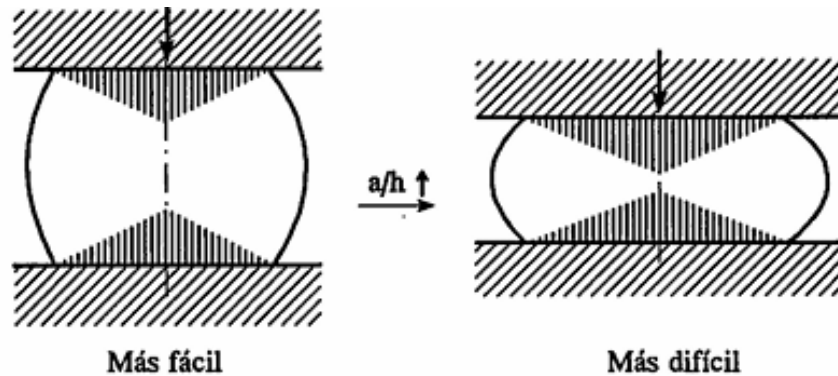


Figura 127: Facilidad de deformación en función de relación a/h [50].

En otras palabras, a igualdad de anchura, cuanto más alta sea la probeta más fácil será que se deforme. Este concepto podría ser un poco anti intuitivo en principio, debido a que, si h crece, habría más material. No obstante, la forma de la pieza es fundamental en el efecto de la deformación.

A continuación, se va a comprobar en el caso anteriormente estudiando, como al aumentar la “ h ” de la probeta se reduciría la fuerza necesaria a ejercer para la deformación o aumentaría de deformación.

Se modificará la altura de la probeta de 0,05 m a 0,275 m, como se muestra en la siguiente tabla:

DIMENSIONES DE LA PROBETA		
a (m)	w (m)	h (m)
0,1	0,2	0,05
0,1	0,2	0,075
0,1	0,2	0,1
0,1	0,2	0,125
0,1	0,2	0,15
0,1	0,2	0,175
0,1	0,2	0,2
0,1	0,2	0,225
0,1	0,2	0,25
0,1	0,2	0,275

Tabla 6: Dimensiones de probetas de prueba [Autoría propia]

Se considerará una temperatura apropiada para la forja de 1100 °C.

TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA (°C)	TENSIÓN LIMITE (Pa)
1100	1373	26478800,73

Tabla 7: Tensión límite para una temperatura de 110 °C [Autoría propia]

Obteniéndose los siguientes resultados:

h (m)	s (Pa)	P_{media}	F (N)	F_{real} (kN)
0,050	30575085,5	117696383,14	4707855,33	5884,82
0,075		71855980,67	2874239,23	3592,80
0,100		57040460,10	2281618,40	2852,02
0,125		49929119,60	1997164,78	2496,46
0,150		45793279,89	1831731,20	2289,66
0,175		43099840,00	1723993,60	2154,99
0,200		41210229,39	1648409,18	2060,51
0,225		39812953,21	1592518,13	1990,65
0,250		38738522,29	1549540,89	1936,93
0,275		37887009,96	1515480,40	1894,35

Tabla 8: Fuerzas requeridas para deformar las probetas con diferentes alturas [Autoría propia]

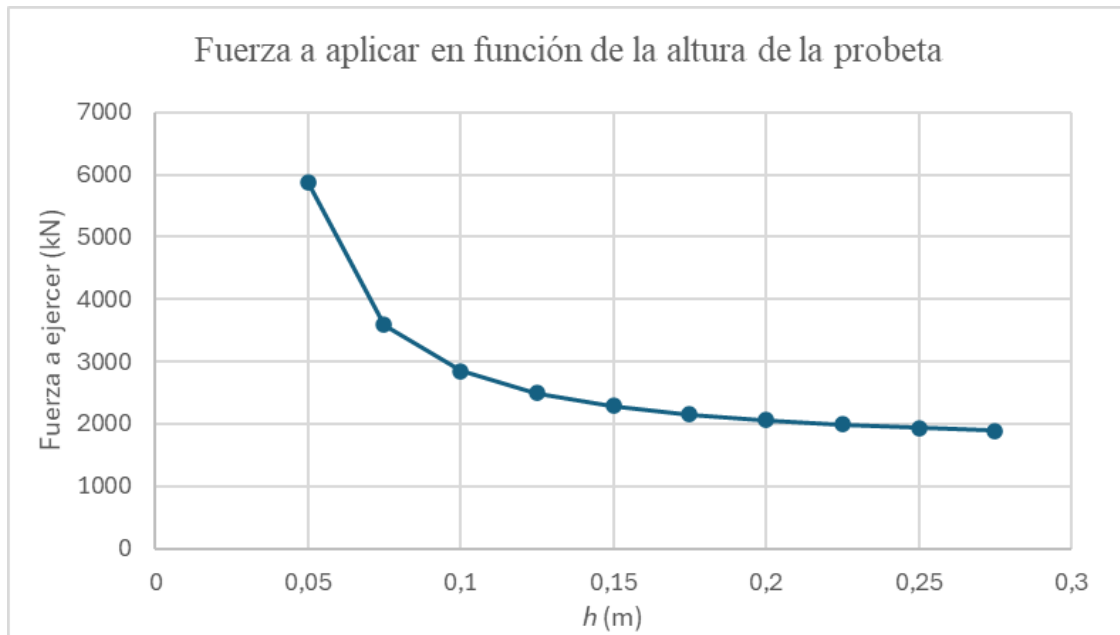


Figura 128: Fuerzas requeridas para deformar las probetas en función de la altura de estas [Autoría propia]

Como se puede observar tiene un comportamiento exponencial, donde a más pequeña la altura de la probeta, llegaría un punto que se requeriría una fuerza inmensamente grande para deformarse. En cambio, a más altura, la fuerza requerida disminuye, pero cada vez más levemente ya que el efecto de la relación “ a/h ” es cada vez menor.

Del mismo modo, la deformación de la probeta sería, cuanto mayor es la altura, mayor.

h (m)	Distancia a deformar (mm)
0,05	0,205763162
0,075	0,337029427
0,1	0,424568455
0,125	0,485039195
0,15	0,528845718
0,175	0,561894893
0,2	0,587659432
0,225	0,608283939
0,25	0,625154977
0,275	0,639205364

Tabla 9: Deformación de la probeta en función a su altura ejerciendo la fuerza requerida para la deformación [Autoría propia]

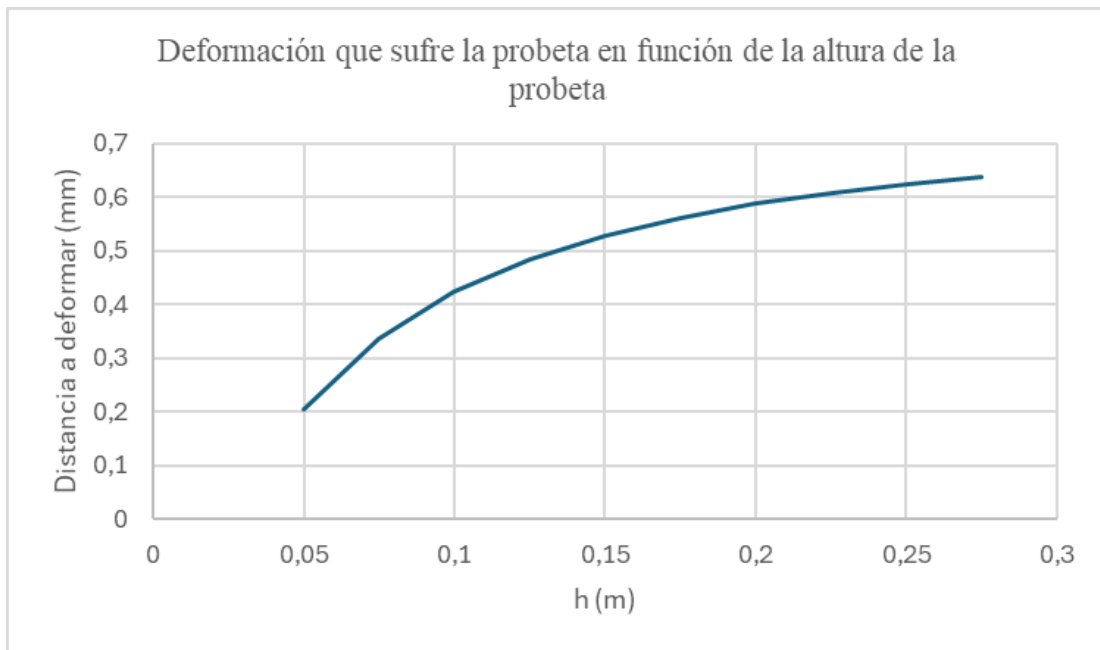


Figura 129: Deformación de la probeta en función a su altura ejerciendo la fuerza requerida para la deformación [Autoría propia]

**Capítulo 5. Conclusiones
y líneas de trabajo
futuras**

5.1. Conclusiones

La conclusión principal de este Trabajo Fin de Máster es que se ha logrado desarrollar, tal como se planteó en el objetivo, la modelización 3D y el análisis funcional del martillo de vapor patentado por James Nasmyth en 1843 mediante la aplicación de técnicas de ingeniería inversa y el uso del software SolidWorks, con lo que se ha cumplido el conjunto de objetivos propuestos.

Además de esto, se exponen las diferentes conclusiones particulares derivadas de la realización de este Trabajo Fin de Máster extraídos de los capítulos anteriores:

1. Se ha efectuado un exhaustivo repaso bibliográfico sobre la evolución histórica de la forja y el desarrollo de las máquinas de impacto, recalcando el papel pionero del martillo de vapor de Nasmyth automatizado por Wilson, en la transformación de los procesos de fabricación durante la Revolución Industrial, ya que fue crucial para el desarrollo de la ingeniería. Además, se han analizado las principales máquinas de vapor que surgieron a raíz de esta invención y sus aportaciones.
2. Se ha realizado una aplicación de técnicas de ingeniería inversa gracias al documentos históricos, patentes y libros de la época. Esto ha permitido reconstruir digitalmente el martillo de vapor a pesar de la carencia de modelos físicos originales accesibles. Esto recalca la viabilidad de estas metodologías para la recuperación del patrimonio industrial.
3. Mediante el empleo de herramientas de diseño asistido por ordenador, específicamente SolidWorks, se ha obtenido un modelo parametrizado del martillo, lo que posibilita realizar simulaciones y ajustes si se encuentra nueva información relativa a este modelo y martillo de vapor.
4. El contraste entre planos, despieces y fotografías del modelo físico estableció varias discrepancias de cotas, formas y disposiciones (carrera del pistón, ubicaciones y formas de ciertos elementos, etc.) que, lejos de ser simples errores, se interpreta que evidencian los ajustes sucesivos a las capacidades reales de fundición, la función específica para la que estuviera diseñada cada modelo, a la calidad del hierro disponible, a las mejoras constantes que se iban implementado ,a la necesidad de mitigar vibraciones,etc. Por tanto, las aparentes “incongruencias” se revaloran como huellas de una evolución de diseño deliberadamente flexible, más que como fallos documentales.

5. Se ha realizado un análisis cinemático del sistema de accionamiento, regulación y funcionamiento del martillo, identificando los principales movimientos del martillo y como estos se transmiten. Este estudio permite comprender la funcionalidad de cada pieza del martillo y comprender la dinámica general de la máquina.
6. Se han realizado importantes estimaciones físicas sobre la maquina como masa, peso, volumen, centro de masa, presión de la caldera, consumos energéticos y de vapor o velocidad e impacto máxima del martillo
7. Se ha llevado a cabo un análisis estático de las principales piezas de la máquina, evidenciando su sobredimensionamiento y facilitando la comprensión los principales esfuerzos que se transmiten en la estructura.
8. Por otro lado, se ha realizado un estudio estático y analítico de las deformaciones de una probeta, de forma que se consiga estimar la capacidad de deformación de la maquina en función de la geometría y la temperatura del elemento a forjar.
9. Este trabajo supone una herramienta de valor docente para alumnos de ingeniería, al ofrecer un modelado detallado de una de las máquinas más relevantes de la historia. Por otro lado, contribuye a la preservación y divulgación sobre el patrimonio industrial, mostrando cómo las innovaciones tecnológicas históricas siguen siendo relevantes en la actualidad.
10. Por último, el modelo digital desarrollado se integrará en el Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, lo que permitirá a estudiantes, investigadores y al público en general acceder a esta valiosa pieza de la historia de la ingeniería a través de herramientas interactivas como la realidad virtual y aumentada.

5.2. Líneas de trabajo futuras

El trabajo realizado a lo largo de este Trabajo de Fin de Máster ha permitido modelizar la primera máquina de vapor automatizada de Nasmyth.

Por ello, en primer lugar, se propone aplicar esta misma metodología a otras versiones evolucionadas de Nasmyth, Wilson & Co, con la importantes y evolucionarias mejoras implantadas como el cilindro de doble acción o de válvula flotante que

implemento Wilson. Esto permitiría conocer con más detalle, el fundamental papel que tuvo este ingeniero en el martillo de vapor.

Además, aplicando esta metodología a estos diseños mejorados, se podrían realizar análisis mecánicos, dinámicos y estructurales. que permitan cuantificar las mejoras en velocidad potencia y manejo de estos martillos, pudiendo preservar todas las versiones del martillo de Nasmyth y analizar en detalle el impacto de estas mejoras.

Por otro lado, se podría extender este procedimiento a martillos de gran importancia de otras compañías como Schneider & Co, cuyo desarrollo en el campo de los martillos de vapor fue también de gran valor histórico y donde se desarrollaron cientos de martillos, alcanzando impresionantes hitos como el martillo de Bourdon de 1876, el cual sería interesante de modelar, permitiéndose así una interesante comparación entre los distintos martillos en el museo virtual.

Por otra parte, se propone aplicar esta metodología a otras máquinas-herramientas que han podido tener históricamente una influencia trascendental tanto en la Revolución Industrial como en la evolución del propio mecanizado y de industrias punteras como son la automovilística, la aeronáutica o la del ferrocarril, como por ejemplo prensas, dobladoras o equipos de forja que hayan contribuido de manera significativa en la industria.

Además, se recomienda profundizar en la investigación documental y técnica para recuperar patentes y fuentes históricas originales que aporten datos más precisos sobre las distintas versiones del vapor de Nasmyth y sus posteriores evoluciones.

Paralelamente, se propone llevar a mediciones directas en museo, como es el caso del modelo expuesto actualmente en Science Museum (Londres, Inglaterra). Esto permitiría obtener una representación 3D totalmente fiel a la realidad, de una de las variaciones del modelo original, así como desarrollar un análisis dinámico exhaustivo de las fuerzas de impacto y otros parámetros operativos, lo que contribuiría a evaluar de forma más precisa el rendimiento y la evolución de esta tecnología histórica.

Capítulo 6. Bibliografía

- [1] Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnología Mecánica - Tema 5: El proceso de forja, Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/713_ca.pdf
- [2] DirectIndustry, ¿Qué prensa industrial elegir?, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://guide.directindustry.com/es/que-prensa-industrial-elegir/>.
- [3] M. A. Sebastián Pérez, "Segundo Curso de Historia de las Máquinas-Herramienta y Equipos de Fabricación: Fundición, Conformado Plástico y Soldadura – Evolución de las prensas y martillos", UNED, Grupo de Trabajo PATRIF, Curso 2021-2022. Accedido: 27 de marzo de 2025. [No disponible en línea.]
- [4] Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros Industriales, Departamento de Tecnología Mecánica, Guiones de Prácticas de Tecnología Mecánica – Guion N° 14: Martillos y prensas para conformado por deformación, 1ª ed., septiembre 1982. [No disponible en línea.]
- [5] The British Museum, "Search results for hammer – Prehistoric material culture," The British Museum Collection. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.britishmuseum.org/collection/search?keyword=hammer&material_culture=Prehistoric&image=true&view=grid&sort=object_name__asc&page=1
- [6] The British Museum, "Search results for hammer – Bronze Age & Late Cypriot III material culture," The British Museum Collection. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.britishmuseum.org/collection/search?keyword=hammer&material_culture=Bronze+Age&material_culture=Late+Cypriot+III&image=true&view=grid&sort=object_name__asc&page=1
- [7] The British Museum, "Search results for hammer – Iron Age material culture," *The British Museum Collection*. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.britishmuseum.org/collection/search?keyword=hammer&material_culture=Iron+Age&image=true&view=grid&sort=object_name__asc&page=1

- [8] The British Museum, "Search results for hammer – Roman material culture," *The British Museum Collection*". Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea].
Disponible en:
https://www.britishmuseum.org/collection/search?keyword=hammer&material_culture=Roman&image=true&view=grid&sort=object_name__asc&page=2
- [9] L. Qingzhou (李轻舟), *天行见物理之十一: 武库渊深* (traducido al español como: "El movimiento del Cielo revela la Física, nº 11: La profundidad del arsenal"), *Wuli*, 2019. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://www.wuli.ac.cn/cn/article/pdf/preview/10.7693/wl20191109.pdf>
- [10] Album Online, "Bellows operated by a camshaft powered water wheel (application medieval)," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea].
Disponible en: <https://www.album-online.com/detail/es/NTEwYTYzMA/bellows-operated-by-a-camshaft-powered-water-wheel-application-medieval-alb1644299>
- [11] Defensa.com, "N-700 años de Granada: la pólvora y un gran cambio," *Defensa.com*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://www.defensa.com/espana/n-700-anos-granada-polvora-gran-cambio>
- [12] Raimeux.org, "Martinet Corcelles Musée," Raimeux, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://raimeux.org/loisirs-jura-bernois/martinet-corcelles-musee/>
- [13] P. Benjamin, *Appleton's cyclopaedia of Applied mechanics*, New York: D. Appleton & Company, 1880. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea].
Disponible en:
<https://archive.org/details/appletonscyclopa02dapp/page/93/mode/1up?view=theater>
- [14] Vintage Machinery, "Image detail," Vintage Machinery, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://vintagemachinery.org/mfgindex/imagdetail.aspx?id=18601>
- [15] DATAMP, "Patent 421327," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea].
Disponible en:
<https://www.datamp.org/patents/advance.php?pn=421327&id=62504&set=13>

- [16] Vintage Machinery, "Image detail," *Vintage Machinery*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://vintagemachinery.org/mfgindex/imagetail.aspx?id=19550>
- [17] M. Spencer, "Old Hammer," *Tall Ships*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://home.tallships.ca/mspencer/old-hammer.html>
- [18] Alamy, "Palmer's Power Spring Hammer," *Alamy Stock Photo*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.alamy.com/stock-photo/palmers-power-spring-hammer.html?cutout=1&sortBy=relevant>
- [19] Vintage Machinery, "Image detail," *Vintage Machinery*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://vintagemachinery.org/mfgindex/imagetail.aspx?id=3793>
- [20] Vintage Machinery, "Image detail," *Vintage Machinery*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://vintagemachinery.org/mfgIndex/imagetail.aspx?id=19444>
- [21] North American Power Hammer Association (NAPHA), "Bradley Hammer," *NAPHA*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://www.naphausa.org/bradley-hammer/>
- [21] Blacksmiths Association of Missouri (BAM), *Bradley Catalog*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://www.bamsite.org/books/bradleycat.pdf>
- [22] Vintage Machinery, "Bradley Manufacturing Co. – Image Index," *Vintage Machinery*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<http://vintagemachinery.org/mfgindex/detail.aspx?id=2761&tab=6>
- [23] Espacenet, "Patent GB178401432A," *European Patent Office*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/044501728/publication/GB178401432A?q=pn%3DGB178401432>
- [24] W. Johnson, "James Nasmyth (1808-1890): The Steam Hammer and the Mechanics of Vee-Anvil Forging," en *Materials Processing Defects*, S. K. Ghosh y M. Predeleanu (Eds.), 1.^a ed. Ámsterdam: Elsevier Science B.V., 1995,

- [33] Creusot Mont Ceautourisme, "Le marteau-pilon, la tour Eiffel du Creusot," *Creusot Mont Ceautourisme*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.creusotmontceautourisme.fr/decouvrir/le-creusot/envie-de-visiter-le-creusot/le-marteau-pilon-la-tour-eiffel-du-creusot/>
- [34] NKH Hammers, "Forging Machinery Manufacturing Company," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nkhhammers.com/forging-machinery-manufacturing-company/>
- [35] Nargesa, "Martillo Pilon PH50," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://nargesa.com/es/maquinaria-industrial/martillo-pilon-ph50>
- [36] DirectIndustry, "EBR Metal Machine Foreign Trade Co. Ltd – Product 235033-2440499," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/ebr-metal-machine-foreign-trade-co-ltd/product-235033-2440499.html>
- [37] Metallmaschinen, "SAY Mak SPH 50-3956," en *Schmiedehaemmer 68*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://metallmaschinen.at/produkte/schmiedehaemmer-68/say-mak-sph-50-3956>
- [38] Bettmann, "Steam Hammer - Inventor James Nasmyth," *Photos.com*, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://photos.com/featured/steam-hammer--inventor-james-nasmyth-bettmann.html>
- [39] Science Museum Group, "Model of James Nasmyth's Direct-Action Steam Hammer," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co46218/model-of-james-nasmyths-direct-action-steam-hammer>
- [40] J. NASMYTH, *Steam hammer patent*, 1843. Accedido: 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/002063337/publication/US3042A?q=james%20nasmyth%20steam%20hammer>
- [41] The Data Access & Management Program (DATAMP), "Patent AI82," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.datamp.org/patents/advance.php?pn=AI82&id=79974&set=8>

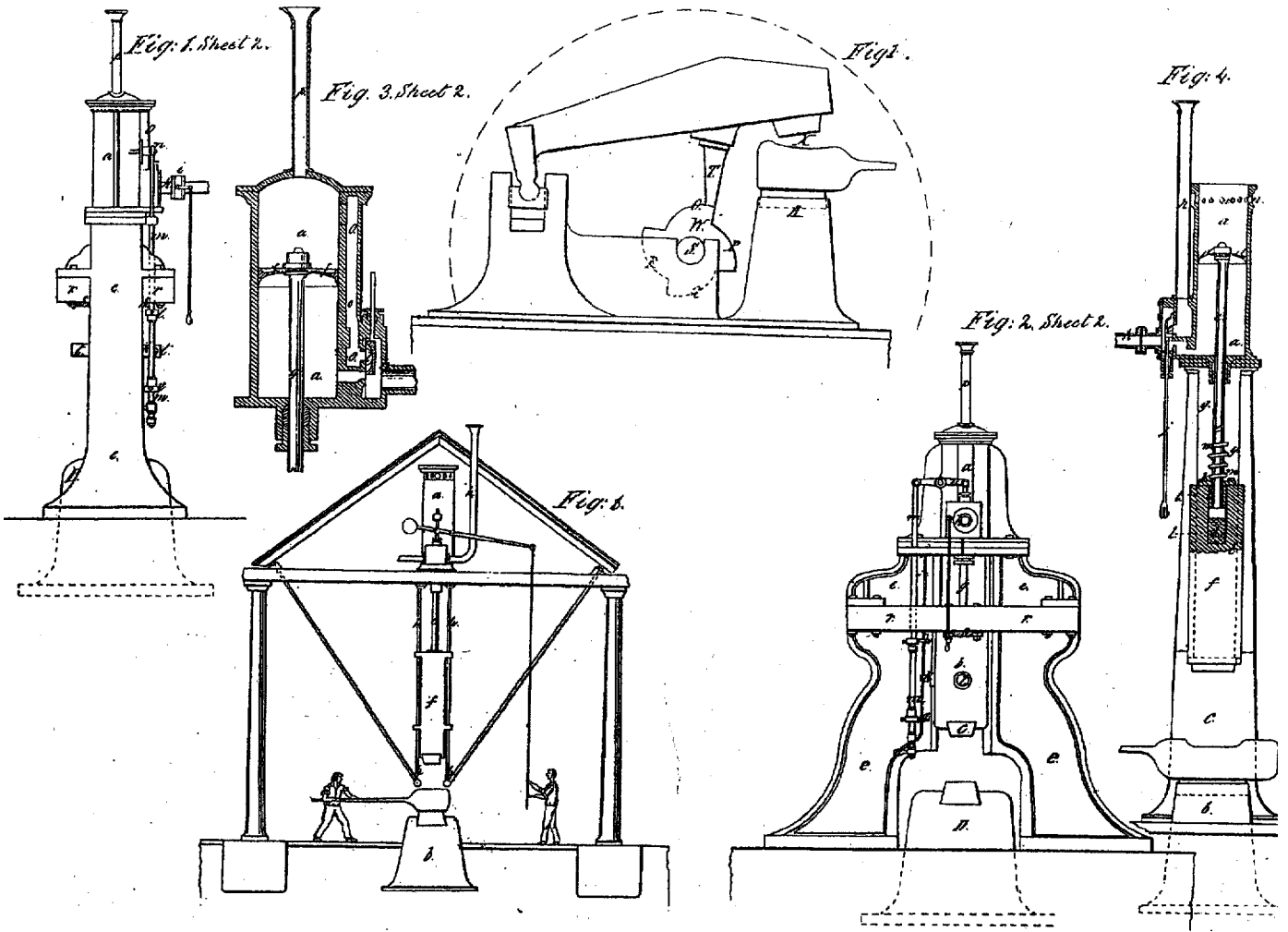
- [42] The Victorian Web, "Nasmyth's Steam Hammer and the Great Exhibition," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://victorianweb.org/history/1851/15.html>
- [43] C. Tomlinson, Cyclopaedia of useful arts, mechanical and chemical, manufactures, mining, and engineering, London Virtue, 1854. Accedido: 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/cyclopaediaofuse01tomluoft/page/n5/mode/2up>
- [44] DATAMP, "DATAMP - Directory of American Tool and Machinery Patents," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.datamp.org/>
- [45] L. López, "Orígenes de la formabilidad de los metales en frío," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberlibro.com/9788486052041/ORIGENES-FORMABILIDAD-METALES-FRIO-LOPEZ-8486052041/plp>
- [46] Project Gutenberg, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/72046/pg72046-images.html>
- [47] Wikipedia, "James Nasmyth," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/James_Nasmyth
- [48] World History Encyclopedia, "Los 10 mejores inventos de la Revolución Industrial," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-2204/los-10-mejores-inventos-de-la-revolucion-industria/>
- [49] Fundación Pajarito, "Características de las fundiciones," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundicion-pajarito.es/industria/caracteristicas-de-las-fundiciones>
- [50] Universidad de Málaga, Escuela de Ingenieros Industriales, "Tema 18. Métodos de análisis de procesos de conformado por deformación plástica. II," Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [No disponible en línea].
- [51] ScienceDirect, "Cook model," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cook-model>

- [52] Serway, "Physics for Scientists and Engineers," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [No disponible en línea].
- [53] Sears, Z & Y, "Física Universitaria," s.f. Accedido: 27 de marzo de 2025. [No disponible en línea].

Anexos

**Anexo A. Patentes y
documentación
principal**

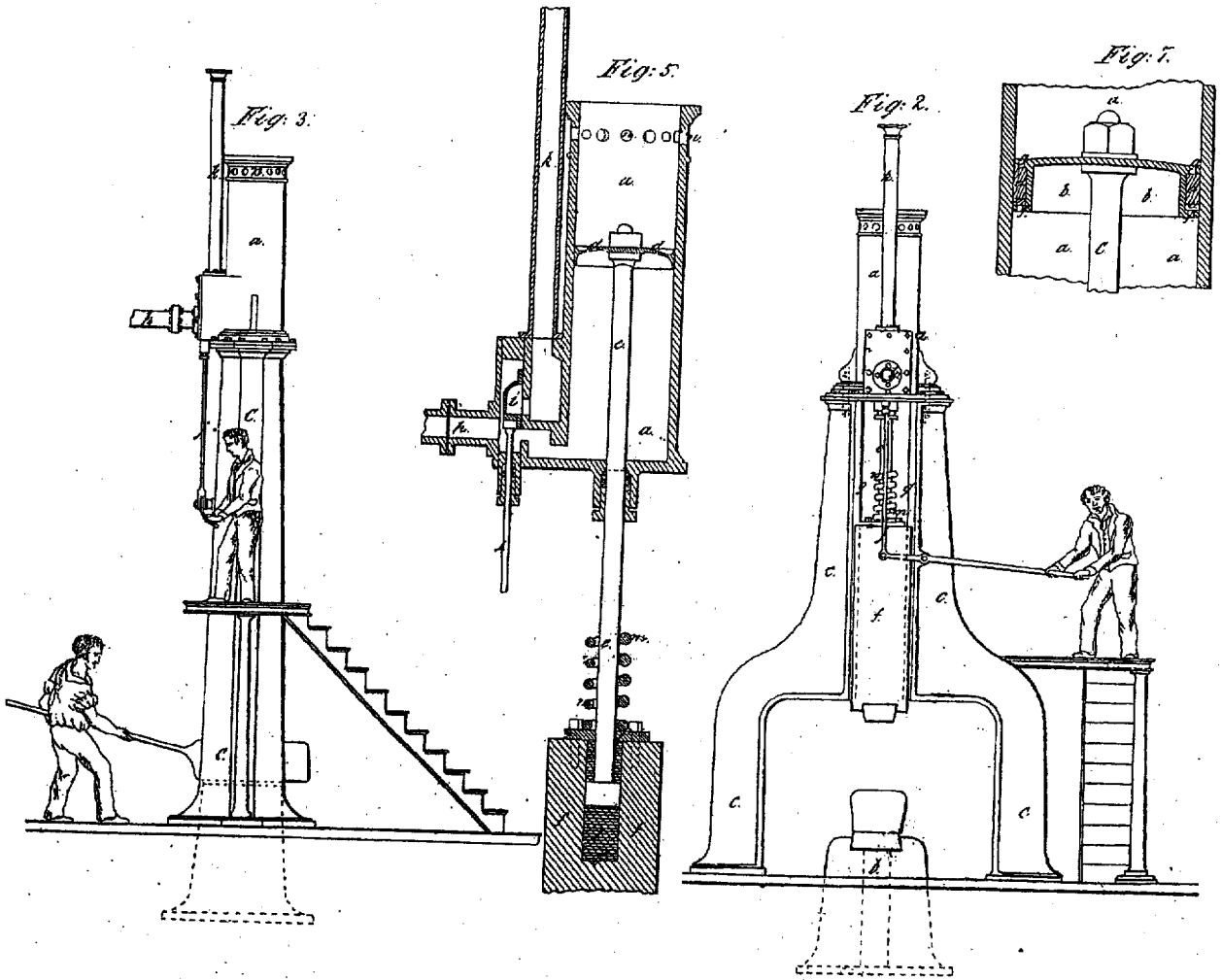
J. Nasmyth,
Steam Hammer,
N^o 96 Reissued Sept. 10, 1846



Messrs.
John Davie
London

Inventor
James Nasmyth

*J. Nasmyth,
Steam Hammer,
No. 86 Reissued Sept. 10, 1846*



*Witnesses
John Caird
Juglar.*

*Inventor
James Nasmyth*

UNITED STATES PATENT OFFICE.

JAMES NASMYTH, OF PATRICROFT, NEAR MANCHESTER, ENGLAND, ASSIGNOR TO SAMUEL V. MERRICK AND JOHN H. TOWNE, OF PHILADELPHIA, PENNSYLVANIA

IMPROVEMENT IN MACHINERY OR APPARATUS FOR FORGING, STAMPING, AND CUTTING IRON AND OTHER SUBSTANCES.

Specification forming part of Letters Patent No. 3,032, dated April 10, 1843; Reissue No. 86, dated September 10, 1846.

To all whom it may concern:

Be it known that I, JAMES NASMYTH, of Patricroft, near Manchester, in the county of Lancaster and Kingdom of England, engineer, have invented or discovered a new and useful invention of certain Improvements in Machinery or Apparatus for Forging, Stamping, and Cutting Iron and other Substances; and I do hereby declare that the following is a full and exact description thereof—that is to say:

In my machinery for forging or stamping metals and for other purposes I apply the elastic force of steam directly to the raising of the hammer or striking-block. This, I am aware, has been before proposed to be done, but not in a manner which admitted of its being advantageously applied to use, and, consequently, it has not been carried into operation until rendered effective by the improvements which I have made thereon.

Before setting forth the nature of my improvements in the manner of employing what may be denominated the "direct-action steam-hammer," I will describe the principle and mode hitherto employed in the application of steam and other power to machinery and apparatus for forging, stamping, and cutting iron and other substances.

In such machinery and apparatus the power has hitherto been applied to the hammer or striking-block by means of rotary motion under certain modifications hitherto employed for forging iron by means of machinery—that is, by means of certain apparatus consisting of revolving shafts and wheels, in all of which apparatus certain contrivances or mechanical arrangements have been required for converting the motion of the piston and the consequent revolving or rotary motion of the crank-shaft of the steam-engine or the axle of the water-wheel into the requisite rising and falling motion of the hammer or striking-block.

By referring to Figure 1 on the accompanying drawings a general idea will be obtained of the mode in which this is most commonly accomplished—namely, by having a cam-wheel, W, on the revolving shaft S, which, as it revolves under the tail T, enables the inclined

backs of the cams O P Q R to elevate and let fall the hammer as each cam passes in succession under the tail T. It is therefore evident that the force with which the hammer strikes the work on the anvil A must be determined by the clear space X between the upper surface of the work then on the anvil and the face of the hammer at its greatest height, and it will also be evident that when a large piece of work is placed on the anvil there will be a very small fall, and consequently a slight blow, because of the small clear space between the face of the hammer and the upper surface of the work; and, on the other hand, when a small piece of work is on the anvil there will be a heavy blow, which is in fact the very reverse of that which is required; and, again, as the face of the hammer is only parallel with the face of the anvil in one position or height from the anvil the work cannot be hammered parallel, except when of one particular thickness, unless the tail of the hammer be raised to suit each particular piece of work, which is found to be most inconvenient.

The impossibility of modifying the force of the blow at pleasure, which is so desirable in most cases, and the difficulty of obtaining access to both sides of the anvil by reason of the cam-wheel W and tail T being in the way, occasion considerable inconvenience, and the expenditure of more time in executing any piece of forge-work than is desirable. To this may be added the great cost of all the complex machinery requisite for converting the rotary motion into the rising and falling motion of the hammer or striking-block, and the liability of these parts to be broken and otherwise damaged by reason of the nature of the work, and in other cases of forging, stamping, and cutting iron or other substances by means of machinery or apparatus hitherto in use for such purposes, the same kind of inconvenience, objections and disadvantages occur.

With the view of obviating the above-mentioned defects in the existing apparatus and machinery, I have so improved and constructed the direct-action steam-hammer as to

be enabled to give a succession of blows with any desired and varying degree of force, and also to attain other advantages dependent on my improvements.

In Sheet 1, Fig. 2 is a front elevation of my improved direct-action steam-hammer, suitable for heavy work, and drawn upon a scale of three-eighths of an inch to the foot. Fig. 3 is a side elevation, and Fig. 4 is a vertical section, taken through about the middle of the apparatus. Fig. 5 is an enlarged view of the principal parts of the apparatus, (shown also in section,) and Fig. 6 is a general elevation of a steam-hammer, supposed to be in operation upon heavy work.

a a is a cylinder placed as nearly vertical as possible over the anvil *b*, said cylinder being supported by the two side standards, *c c*, or being placed on a beam above the anvil, as in Fig. 6. A piston, *d*, works in the cylinder, and is attached and connected by its rod *e* direct with the striking-block *f*, which, in this case, serves as the hammer or blow-giving part of the apparatus, the striking-block being guided in its ascent and descent by vertical guides *g g*, attached to the side frames or standards, *c c*, Figs. 2, 3, and 4, or by the guide-rods *h h*, Fig. 6. Steam of such an elastic force as by its action on the under side of the piston will freely lift or elevate the hammer or striking-block *f*, is admitted by the valve *i* into the cylinder *a* and presses upon the under side of the piston *d*, and so raises or lifts up the hammer or striking-block to such a height within the limits of the height or length of the cylinder as may be required, the striking-block *f* being now lifted by means of the steam to the required height, the valve is moved by the valve-rod and handle *j*, so as not only to shut off or prevent any further entrance of steam, but is so moved down as to permit the steam, which supports the weight of the hammer or striking-block *f*, to escape by the pipe *k*. The instant this is done the hammer or striking-block *f* descends with the full force due to the height of its fall, and so gives a proportionably powerful and intense blow to the work then on the anvil. The handle *j* is again raised, either by means of the downward action of the block *f* or by the hand of the attendant, as may be found most convenient, and the steam is again permitted to enter the cylinder and press on the under side of the piston. The hammer or striking-block is thus raised as before, and by thus admitting and letting out the so-admitted steam a rising and falling motion is given to the hammer or striking-block *f* by the direct action of the steam, and without the necessity for any rotary motion apparatus—such as shafts, wheels, &c.—and, what is of great importance, the height of fall, and therefore the intensity of blow, may be regulated at pleasure, and the work may be struck by a surface-hammer or cutting-instrument or die (of any required form) the face of which hammer, cutting-instrument, or

die will at all times maintain its parallelism or same relative position with reference to the surface of the anvil or sustaining-block, whatever be the distance between them; also, the force of the blow from that due to the full height of fall as permitted by the limit of the cylinder may be changed at any instant to a gentle tap or minute blow, which are capabilities or properties of great practical value, and are important features of this instrument, add to which the great simplicity and therefore much smaller first cost of the entire apparatus, and the great and peculiar facilities which it gives for the execution of every variety of forge-work from the free access which it affords to the face of the anvil from both sides, as seen in Figs. 2 and 3, and from all sides, as in the case of Fig. 6, when the cylinder and block *f* are supported on a beam over the anvil, and this last-mentioned arrangement I conceive will be peculiarly valuable in hammering large sheets or surfaces of metal, as in the manufacture of coppers and large pans, and the stamping of plates with any particular device or embossing, and in the cutting out of any large pattern or figure, and the stamping or breaking up of large masses of ores and other obdurate substances.

In applying the principle of the direct action of the steam to raising the hammer or striking-block as above described, it is important to attend to the manner in which I form the connection between the piston-rod and the hammer or striking-block *f*, and which constitutes a very important improvement therein—namely, by interposing an elastic or compressible substance, *l*, between the upper and under sides of the collar on the lower end of the piston-rod—so that the piston-rod may convey its motion and lifting power to the block *f* through the medium of such elastic or compressible substance *l*—such as wool, cork, wood, leather, caoutchouc, or other similar compressible and elastic substance or substances—the object of this compressible and elastic medium being to remove any bad effect from the shock or jerk which might otherwise be transmitted to the piston, piston-rod, or cylinder, either at the instant of the blow being given or of the steam being suddenly let on in the case where very high-pressure steam is used; and in order, further, to obviate this latter objection, arising from the sudden admission of the steam, the under edge of the valve *i* is cut a little oblique to the opening into the cylinder, so that the entrance of the steam commences at one corner of the said opening and the piston begins to move without any jerk.

By reference to Fig. 4 the situation of the compressible substance above and under the knob or end of the piston-rod is indicated at *l l*, the substance in question being retained by the bottom of the cylindrical recess at *l'* and the top cover or collar at *l''*, which also serves to enable the hammer or striking-block *f* to be disconnected from the piston-rod at any time, if required. A strong helical spring, *m*,

is also placed around the piston-rod and between the cylinder and the hammer or striking-block *f*, in order to prevent any sudden concussion between the hammer or block (in case of the block being raised too high) and the bottom of the cylinder, which helical spring serves also to assist the quick return of the block.

With regard to the means which I give in this my invention of suspending or stopping the action of the hammer at any required instant, all that has to be done in that case is simply to open the valve by the handle *j*, so that the steam is permitted to enter below the piston, and so continue to sustain it in any required position. The hammer or striking-block *f* is thereby suspended; but in order to keep it suspended for any great length of time, a catch or pin may be placed through one of the side guides, *c c*, so that the block may rest upon it. The steam may then be entirely shut off. I would also remark that additional impulse may be given to the hammer or striking-block by causing the upper surface of the piston to be acted on by the full pressure of the steam from the boiler at the instant the piston arrives at the top of the cylinder, according to usual and well-known arrangements in steam-engines; also, the progress of the piston may be arrested at the top and bottom of the cylinder by the interposition of a cushion of steam above and below, according to the method well known to practical engineers; but such arrangements are not, according to my experience, so convenient or advantageous as those above described.

In order to prevent the piston from being driven too high in the cylinder, the upper part of the cylinder is perforated with a series of openings, *n n*, to allow the steam to escape should the piston reach that level.

I would now direct particular attention to the peculiar construction of the piston employed in the steam-cylinder in this apparatus. The first is exhibited clearly at *d* in the sectional figures just described, and will be seen to be composed of brass or other metal, and formed of a dished or umbrella shape. This is in order that as the steam exerts its pressure upward the piston may be caused to expand as it ascends, and thus secure the tightness or packing without any other elastic substance being interposed between it and the cylinder, while, on the contrary, the descent of the piston is facilitated by the partial collapse of the piston from the diminution of the pressure of the steam on the other side; and I would further observe that by the construction just described the piston is rendered as light as possible, being reduced nearly to a simple plate, whereby the mischief which would result both to the piston and the piston-rod in case the former were a heavy mass is obviated. The second description of piston that I employ for this purpose is represented in the detached section, Fig. 7, where *a a* is the steam-cylinder; *b b*, the metallic piston;

c, the piston-rod, and *d d* a packing of hemp or other suitable material. *e e* is a metallic ring, placed loosely under the packing. *f f* are a series of holes all around the bottom plate of the piston, and *g g* are a series of openings in the top plate of the piston. Now, it will be seen that upon steam in the cylinder *a a* exerting its pressure upward to lift the hammer, it will rise through the apertures *f f* in the bottom of the piston, and press the ring *e e* against the packing *d d*, and thus pack the piston and cylinder tightly as the piston ascends, the holes in the upper part of the piston permitting the steam-pressure on the under side of the ring to come into action, and it will be gradually released as the hammer falls.

I may here observe that not only may the required steam be generated by means of the waste heat of the furnace, but also one boiler, with suitable steam-pipes, may be made to work any number of such hammers which it may be capable of supplying, either all at once or in succession, in which case the power is simply conveyed to each by means of steam-pipes in place of by shafting.

In Sheet 2, Fig. 1 represents a side elevation, and Fig. 2 a front elevation, of another modification of my said invention, drawn upon a scale of about half an inch to a foot, and is intended for lighter work, where a quick succession of blows, heavy or light, is required, and in this arrangement of the machinery apparatus for admitting and shutting off the steam to raise and lower the hammer is rendered self-acting. Fig. 3 is a sectional view of the steam-cylinder, valve-box, &c., drawn upon a larger scale.

The principal arrangement of the machinery is similar to that just described, *a a* being the steam-cylinder; *b b*, the hammer or block, containing a swage-die or cutting-tool, and as required; *D*, the anvil; *e e*, the side frames or standards, supporting the striking machinery; *f*, the piston, and *g* the piston-rod, connected to the hammer or striking-block *b* by means of the compressible or elastic medium, as previously described.

An important feature in this last-mentioned arrangement consists in the means which I have invented of rendering the machinery self-acting and capable of giving a rapid succession of blows. Supposing steam to be admitted into the valve-chamber *h* by opening the steam-cock at *i*, Fig. 1, the piston, with the hammer, will ascend. This hammer or block is provided with a stud or projecting piece, *k*, which, as it ascends, strikes a stop, *l*, upon the vertical rod *m m*, and as this rod is connected to the slide-valve rod by means of the lever *m*, it instantly shuts off the steam from the cylinder *a*, turns it into the exit-passage *o*, and allows it to enter the cylinder again above the piston and blow off at the pipe *p*. The hammer now descends, as before, and the stud or piece *k* strikes a similar stop, *g*, on the vertical stop-rod *m*, which has the contrary effect of shifting the slide-valve and turning

the steam again into the cylinder below the piston. The repetition of such motions will of course give a corresponding succession of blows of the hammer or striking-block, the intensity or rapidity of which will depend upon the setting of the stops and the pressure of the steam. In the construction of this apparatus I introduce a beam of timber, *r r*, or other material capable of some slight compressibility, provided with a few thicknesses of leather as packing, and furnishing the hammer or striking-block with two projecting nogs or studs, *t t*, so that at every upward stroke of the hammer or striking-block a slight concussion and recoil shall be produced by the contact of such nogs or projections with the beam above, and thus add to the smartness of the blow upon the descent of the hammer or striking-block.

Having thus fully described the manner in which I combine and arrange the respective parts of my direct-action steam-hammer, I do hereby declare that I do not claim the attaching of the hammer or striking-block directly

to the piston of a steam-engine; nor do I claim the exclusive use of the several parts herein described when taken individually; but

What I do claim as new, and desire to secure by Letters Patent, is---

1. Forming the connection between the hammer or striking-block and the piston-rod by an elastic or compressible substance or substances for the purpose of preventing the injurious effects of the shock or jerk which would otherwise be transmitted to the piston and to other parts of the machinery.

2. In combination with the direct-action steam-hammer, the method of operating the adjustable valves by connecting the hammer with the valve apparatus in the manner substantially as herein described, whereby the hammer is rendered self acting and susceptible of adjustment, as herein described.

JAMES NASMYTH.

Witnesses:

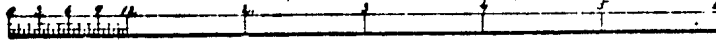
N. TIPPINS,

THOS. S. ROWLANDSON.

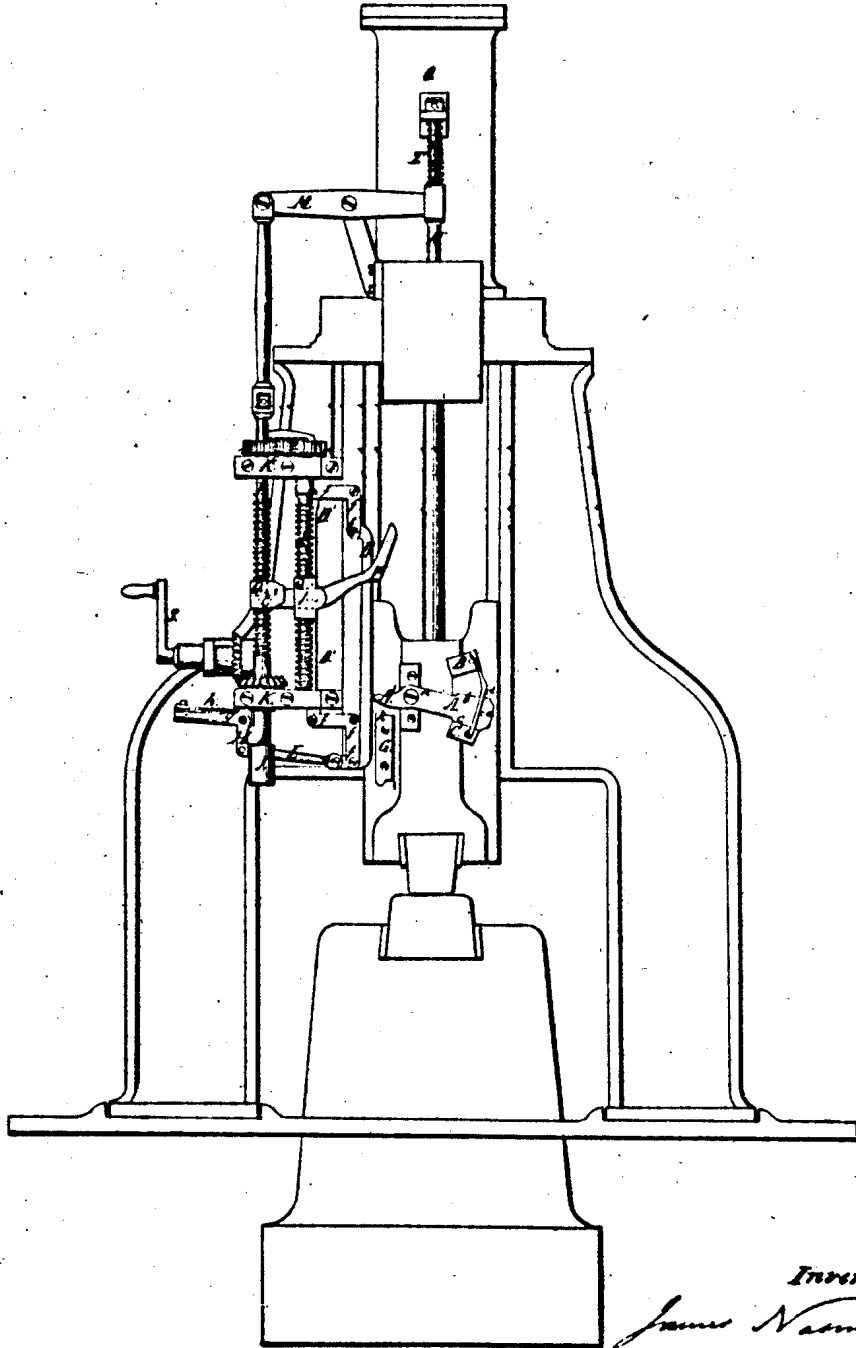
*J. Nasmyth.
Forging Hammer.*

N^o 82.

A. I. Patented Apr. 24, 1847.

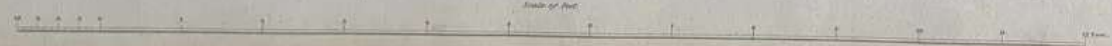
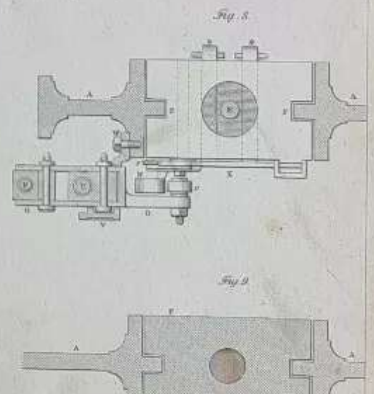
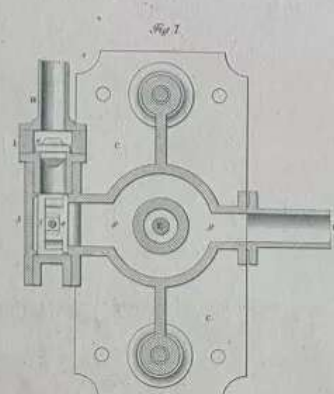
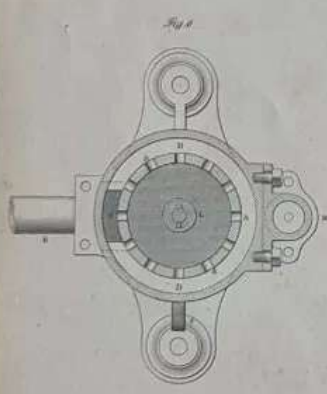
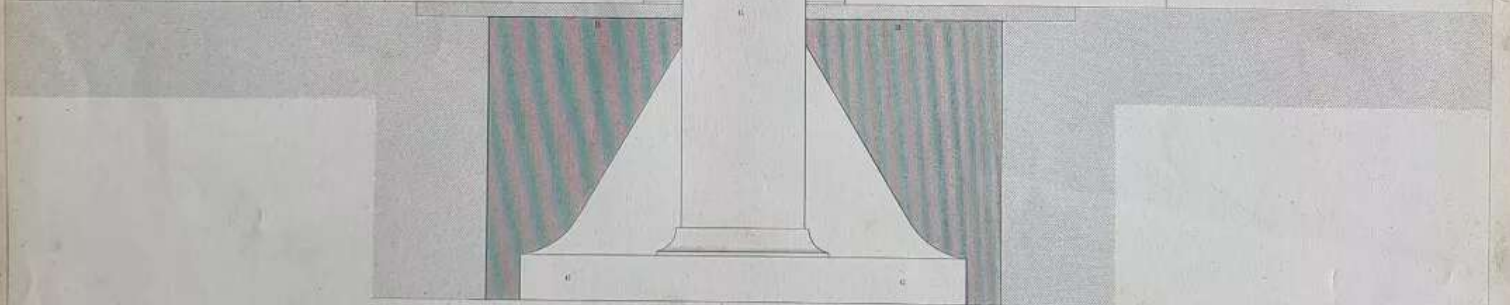
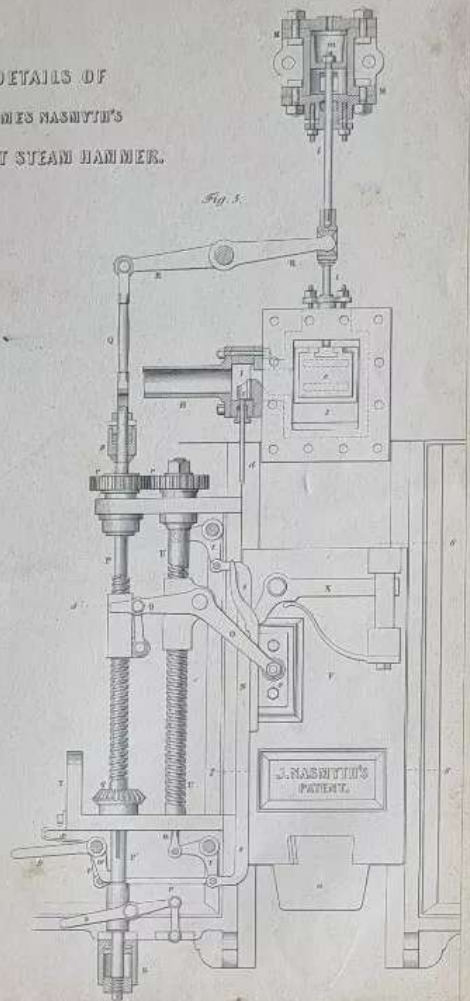
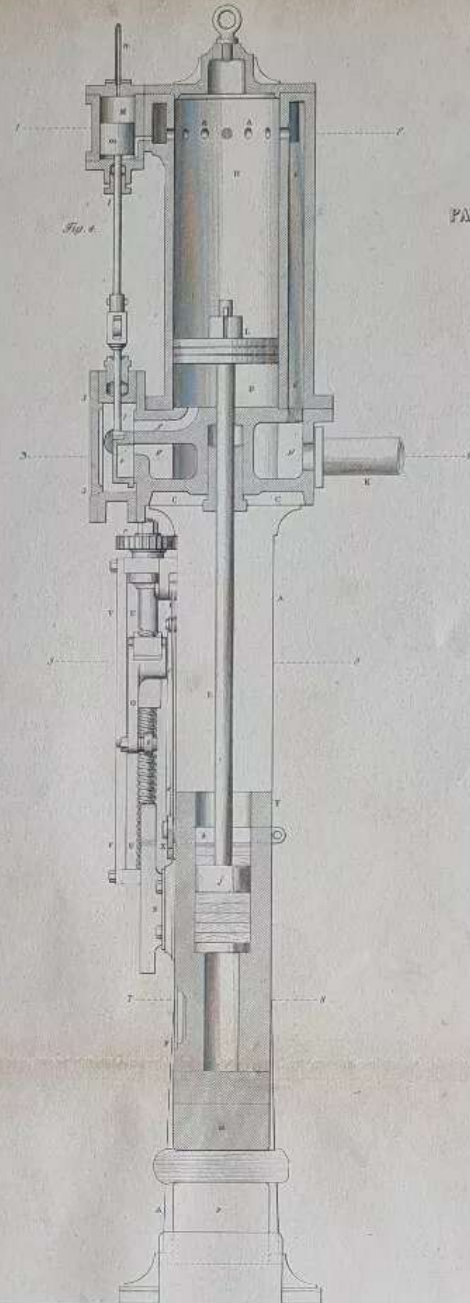
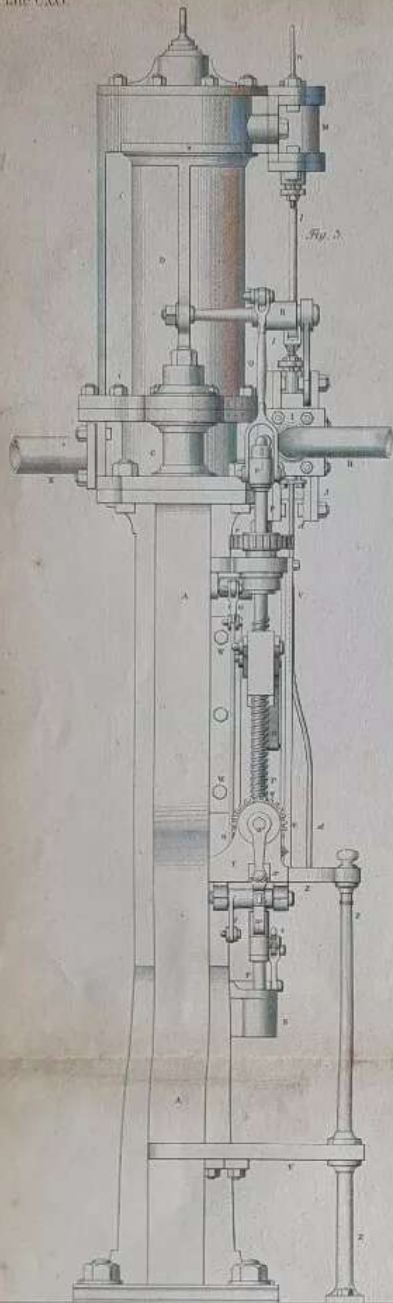


Scale of feet 12 inch to one foot.



*Inventor.
James Nasmyth.*

DETAILS OF
JAMES NASMYTH'S
PATENT STEAM HAMMER.



NASMYTH'S PATENT STEAM HAMMER.

MANUFACTURED BY
NASMYTH, BASKELL & CO
FABRICCROFT near MANCHESTER.

Fig. 1.

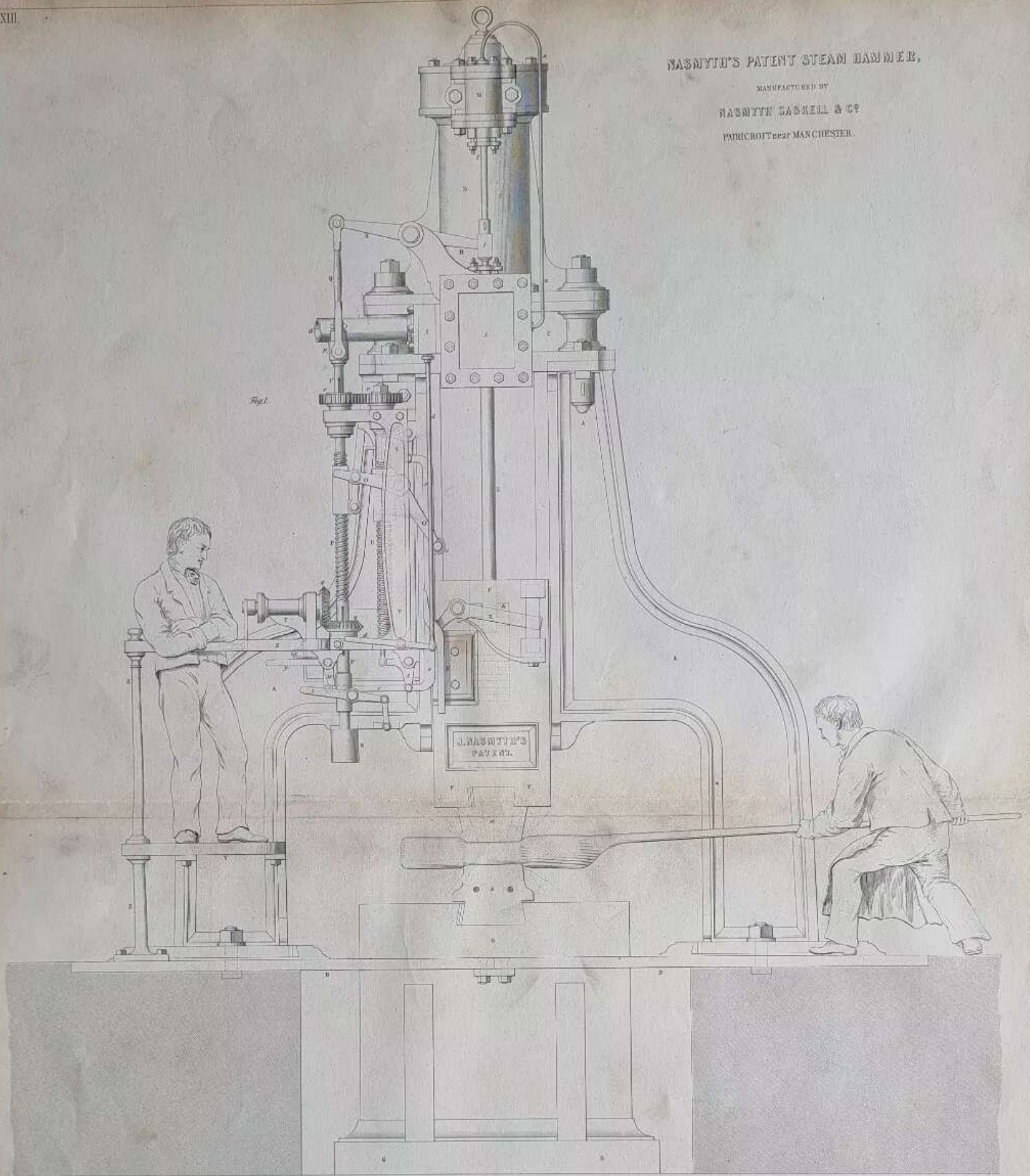
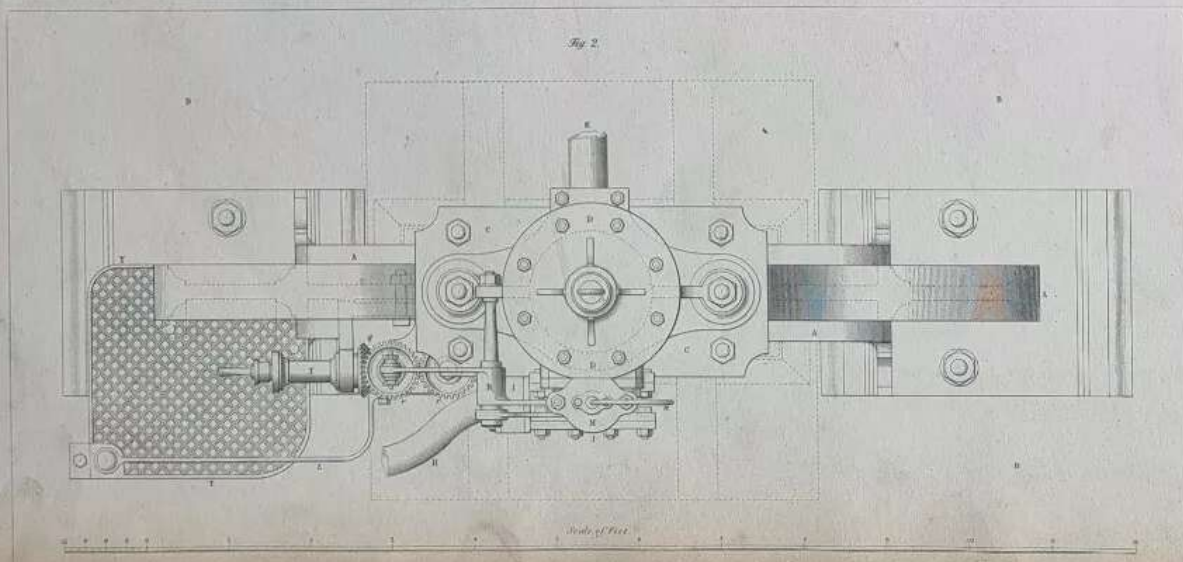


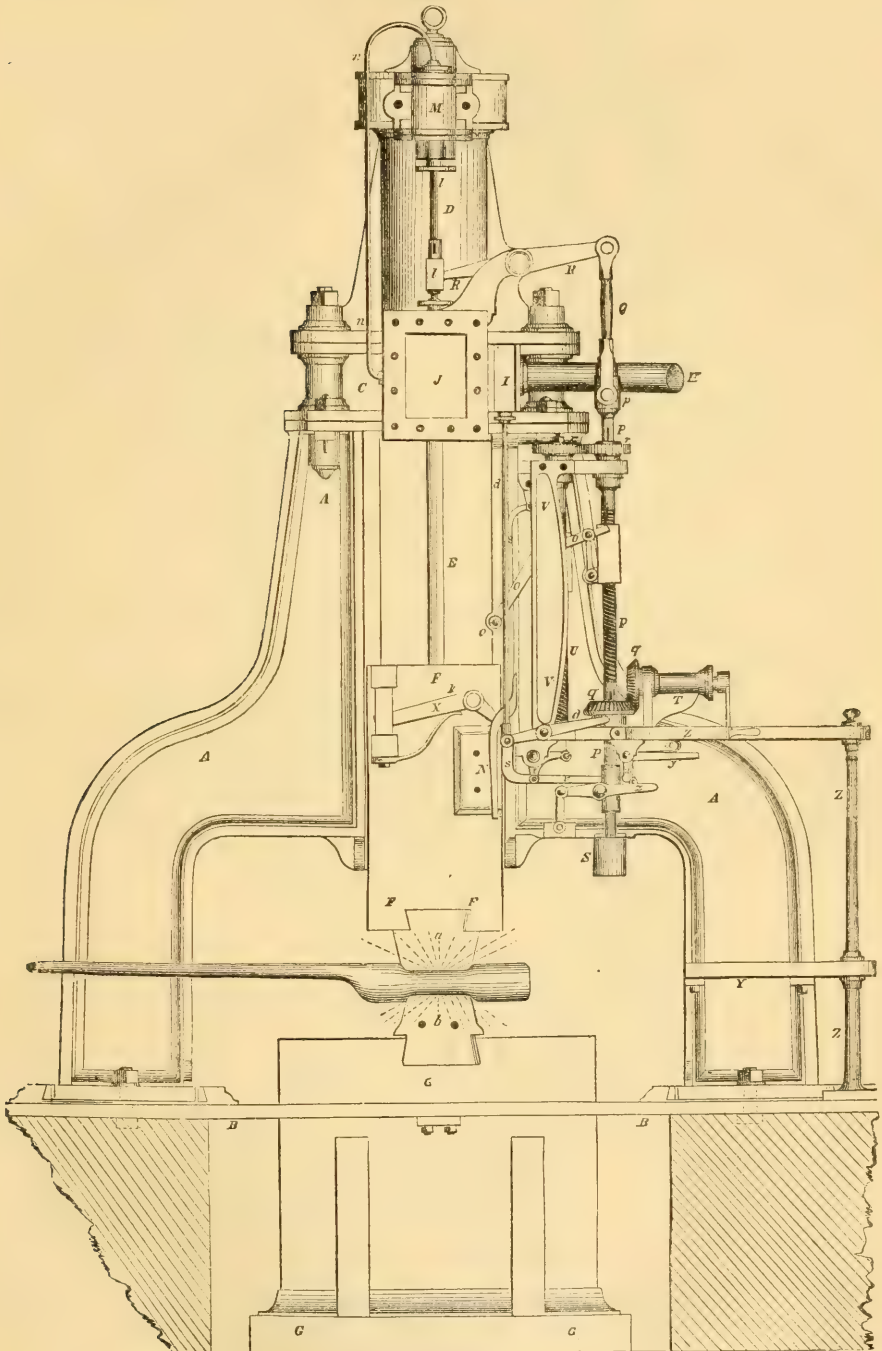
Fig. 2.



Scale of Feet

the effect produced by these two plans of operating, that on most kinds of work a hammer of 50 lbs. working with dead blows will perform the same duty that one of 100 lbs. will when acting by elastic or cushioned blows. This difference between dead and elastic strokes is so important, that it has

2279.



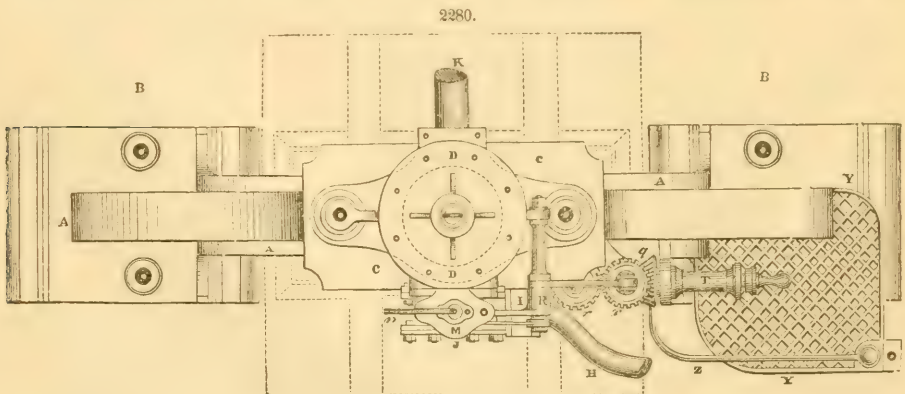
served to keep hand-moved valves in use in many cases where much could be gained by employing automatic-acting hammers.

Some makers of steam-hammers have so perfected the automatic class, that they may be instantly

changed so as to work with either dead blows or elastic blows at pleasure, thereby combining all the advantages of both principles. This brings the steam-hammer where it is hard to imagine a want of further improvement. The valve-gearing of automatic steam-hammers, to fill the two conditions of allowing a dead or an elastic blow, furnishes one of the most interesting examples of mechanical combination. It was stated that to give a dead or stamp stroke, the valve must move and admit steam beneath the piston after the hammer has made a blow and stopped on the work, and that such a movement of the valve could not be imparted by any maintained connection between the hammer-head and valve. This problem is met by connecting the drop or hammer-head with some mechanism which will, by reason of its momentum, continue to move after the hammer-head stops. This mechanism may consist of various devices. Messrs. Massey in England, and Messrs. Ferris & Miles in this country, employ a swinging wiper-bar, which is by reason of its weight or inertia retarded, and does not follow the hammer-head closely on the down stroke, but swings into contact and opens the valve after the hammer has come to a full stop. By holding this wiper-bar continuously in contact with the hammer-drop, elastic or rebounding blows are given; and by adding weight in certain positions to the wiper-bar, its motion is so retarded that a hammer will act as a stamp or drop. A German firm employs the concussion of the blow to disengage valve-gear, so that it may fall and effect this after-movement of the valves. Other engineers effect the same end by employing the momentum of the valve itself, having it connected to the drop by a slotted or yielding connection, which allows an independent movement of the valve after the hammer stops.

Another principle to be noticed in connection with hammers and forging processes is that of the inertia of the piece operated upon—a matter of no little importance in the heavier kinds of work. When a piece is placed on an anvil, and struck on the top side with a certain force, the bottom or anvil side of the piece does not receive an equal force. A share of the blow is absorbed by the inertia of the piece struck, and the effect on the bottom side is, theoretically, as the force of the blow, less the cushioning effect and the inertia of the pieces acted upon. In practice this difference of effect on the top and bottom, or between the anvil and hammer sides of a piece, is much greater than would be supposed. The yielding of the soft metal on the top cushions the blow and protects the under side from the force. The effect produced by a blow struck upon hot iron cannot be estimated by the force of the blow; it requires, to use a technical term, a certain amount of force to "start" the iron, and anything less than this force has but little effect in moving the particles and changing the form of a piece.

Another object gained by equal action on both sides of large pieces is the quality of the forgings produced, which is generally improved by the rapidity of the shaping processes, and injured by too frequent heating. To attain a double effect, and avoid the loss pointed out, Mr. Ramsbottom designed what may be called compound hammers, consisting of two independent heads or rams moving in opposite directions, and acting simultaneously upon pieces held between them. It would be inferred that the arrangement of these double-acting hammers must necessarily be complicated and expensive, but the contrary is the fact. The rams are simply two masses of iron mounted on wheels that run on ways, like a truck, and the impact of the hammers, so far as not absorbed in the work, is neutralized by each other. No shock or jar is communicated to framing or foundations, as in the case of single-acting hammers that have fixed anvils. The same rule applies in the back stroke of the hammers, as the links which move them are connected together at the centre, where the stroke is applied at right angles to the line of the hammer movement. The links connecting the two hammers constitute, in effect, a toggle-joint, the steam-piston being attached where they meet in the centre. The steam-cylinder which moves the hammers is set in the earth at some depth below the plane upon

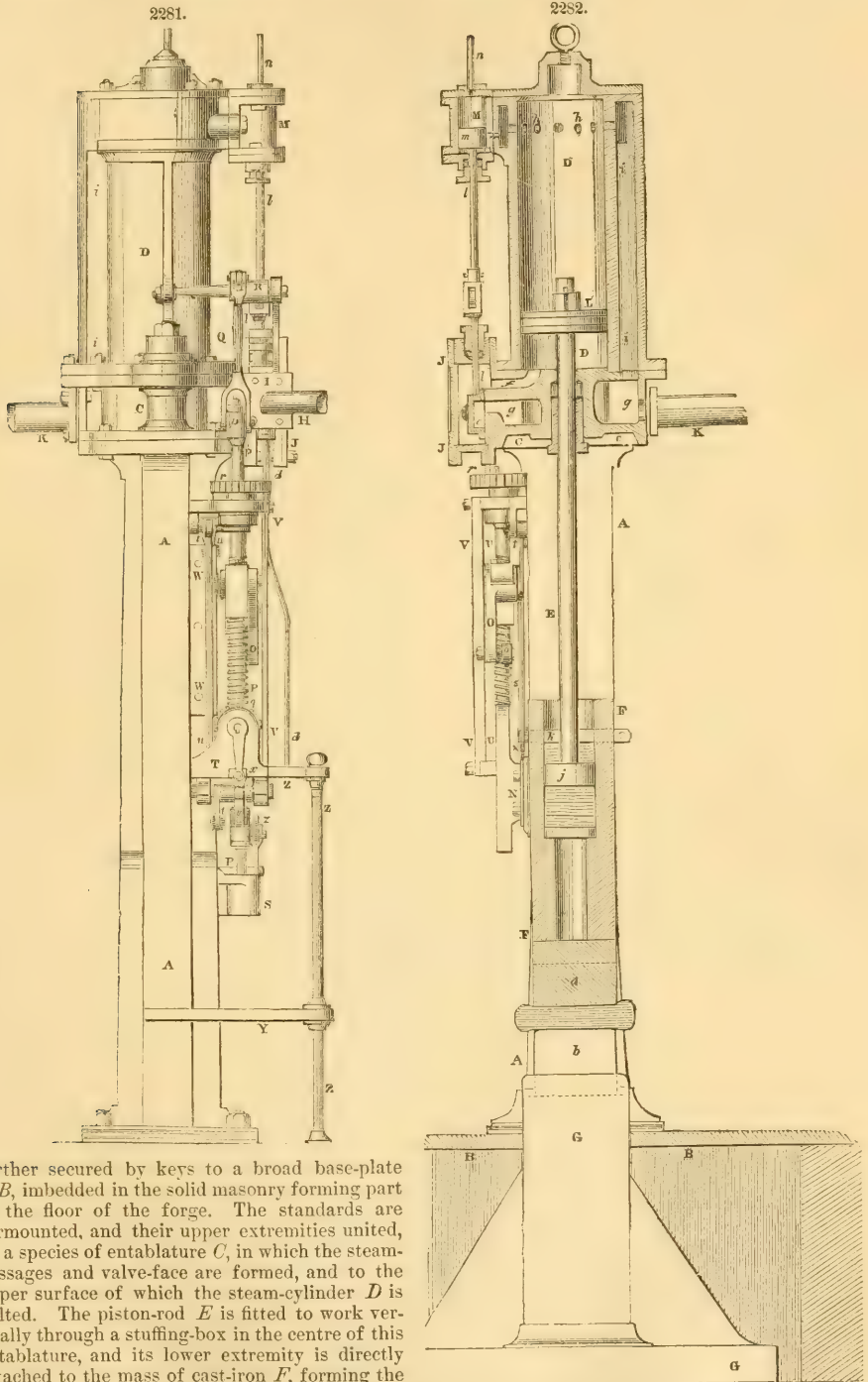


which they move, and even when the heaviest work is done there is no perceptible jar when one is standing near the hammers, as there always is with those which have a vertical movement and are single-acting.

The *Nasmyth Steam-Hammer* is one of the best-known forms of this machine. In Fig. 2279 the hammer-block, valve-gear, and other working parts are disposed in the positions which they occupy at the termination of a stroke. Fig. 2280 is a general plan corresponding to the above.

Fig. 2281 is an end elevation, and Fig. 2282 a vertical transverse section of the machine.

Fig. 2283 is a sectional elevation of a portion of the machine, showing the positions of the hammer-block, valve-gear, and other working parts when the hammer is raised for a fresh stroke. The framing of the steam-hammer consists of two strong cast-iron standards *A A*, bolted and



further secured by keys to a broad base-plate *B B*, imbedded in the solid masonry forming part of the floor of the forge. The standards are surmounted, and their upper extremities united, by a species of entablature *C*, in which the steam-passages and valve-face are formed, and to the upper surface of which the steam-cylinder *D* is bolted. The piston-rod *E* is fitted to work vertically through a stuffing-box in the centre of this entablature, and its lower extremity is directly attached to the mass of cast-iron *F*, forming the hammer-block, which is guided to a strictly vertical and rectilinear course by being made to work freely in planed guides formed on the interior surfaces of the standards *A A*. The hammer *a* itself is inserted into a dovetail recess in the bottom

of the block *F*, where it is retained by a wooden packing and iron wedges; while the anvil *b* is in a similar manner secured to the anvil-block *G*.

Steam is led to the machine by the steam-pipe *H*; a throttle or shut-off valve *c*, Fig. 2283, inclosed within the valve-box *I*, being situated close to its junction with the main steam-valve chest *J*, and brought within the control of the attendant workman by means of the rod and lever *d d*. The alternate admission of the steam into the cylinder by the port *f*, and its escape therefrom by the passage *g* and waste steam-pipe *K*, are regulated by means of the slide-valve *e*, which may either be worked by hand, or, through the intervention of self-acting mechanism, by the action of the machine itself. The piston *L*, which is strongly constructed of malleable iron, is fitted with a single packing-ring, works steam-tight within the cylinder *D*, and is attached by the piston-rod *E* to the hammer-block

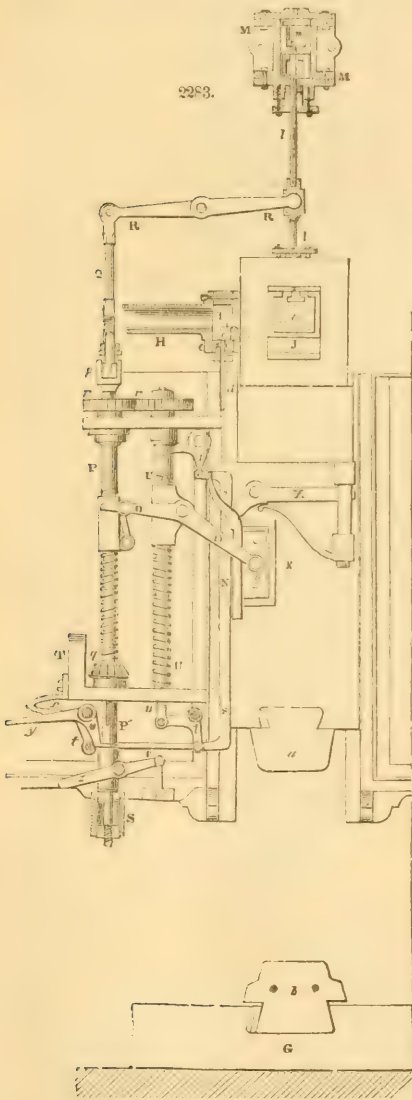
F. Steam acting beneath the piston raises the hammer, and by opening the communication between the under side of the piston and the external atmosphere, the action of gravity causes the hammer to descend upon the work placed on the anvil.

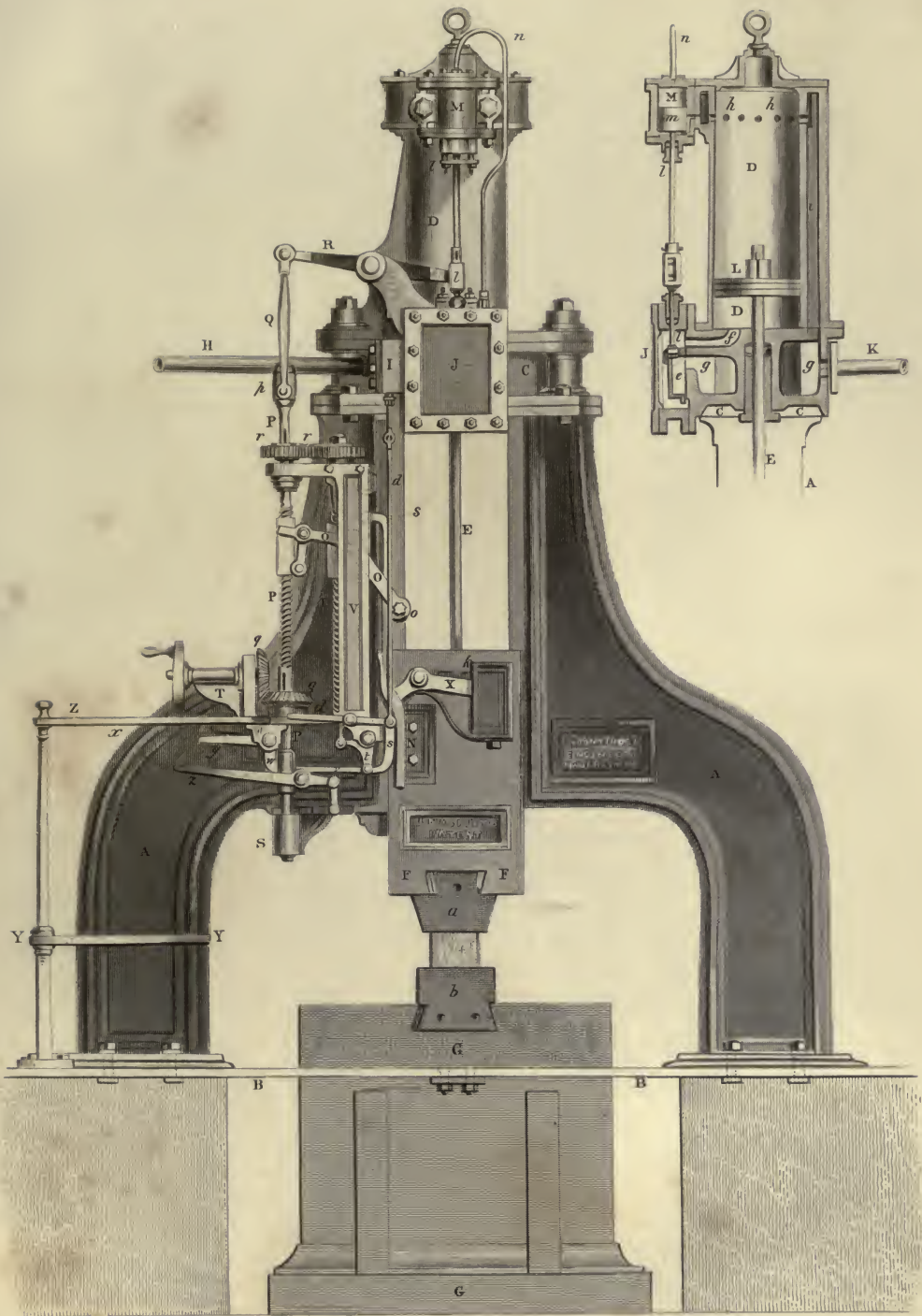
The mode adopted for connecting the piston-rod to the hammer-block consists in placing in a cylindrical recess formed in the body of the hammer-block, and under the knob *i*, on the end of the piston-rod, a series of pieces of hard wood, or other slightly elastic material, as in Fig. 2281. The effect of this arrangement is to allow the momentum of the piston and piston-rod to expend itself in a comparatively gradual manner. The connection of the piston-rod and hammer-block is secured by means of the two keys *k k*, driven very firmly above the knob or button *j*, a layer or two of the elastic material being interposed for the purpose of neutralizing any shock in the contrary direction.

We shall now proceed to describe the mechanism by which the height of the fall of the hammer, and consequent intensity of the blow, may be modified according to circumstances, and the machine made perfectly self-acting.

The requisite alternating motion of the steam-valve *e* is produced in the following manner: The valve-spindle *l* is prolonged upward and attached to a small solid piston *m*, working within a short cylinder *M*, bolted to the main steam-cylinder *D*. A small portion of steam is supplied above the piston *m* by a slender copper tube *n*, communicating with the steam-valve chest *J*; by this arrangement it will be seen that, unless counteracted by some superior force, the pressure of the steam upon the piston *m* will tend to keep the valve *e* constantly depressed, in which position the steam-port *f* is full open. This counteracting force is supplied by the action of the hammer itself; for, by means of the tappet *N* (which is bolted to the hammer-block), coming into sliding contact, when the latter is raised, with the small friction-roller *o*, mounted on the end of a bent lever *O O*, the screwed rod *P*, which is jointed to the opposite end of that lever, is depressed, and that motion being communicated to the valve-spindle *l*, through the intervention of the connecting-rod *Q* and valve-lever *R*, the steam-valve *e* is raised, thus cutting off all further ingress of steam under the piston, and almost at the same instant permitting the escape of that which had served to raise the hammer. By this simple contrivance the upward motion of the hammer is made the agent for its own control in that respect. By comparing the relative positions of the parts referred to, as exhibited in Figs. 2279 and 2283, the nature of the motion above described

will be at once most fully understood. To obviate the injurious effects of the shock of the tappet *N* against the lever *O*, a connection is provided at *p*, on a similar principle to that formerly described in reference to the connection of the piston-rod and the hammer-block; and in order to restrict the downward travel of the valve to the proper point, a check or buffer-box *S* is provided, consisting of a small cylinder bolted firmly to the framing of the machine, within which a circular nut, screwed on the lower end of the rod *P*, works as a piston, a few leather washers being interposed between the latter and the closed or upper end of the cylinder. From the above description it will be obvious that the lift of the hammer, and consequent intensity of the blows, depends simply upon the position of the lever *O*, in relation to that of the hammer-block when at its lowest point. The rod *P*, which





NASMYTH'S PATENT STEAM HAMMER.

Copied by permission of the Inventor from the Machine in the Great Exhibition.

Anexo B. Fotografías

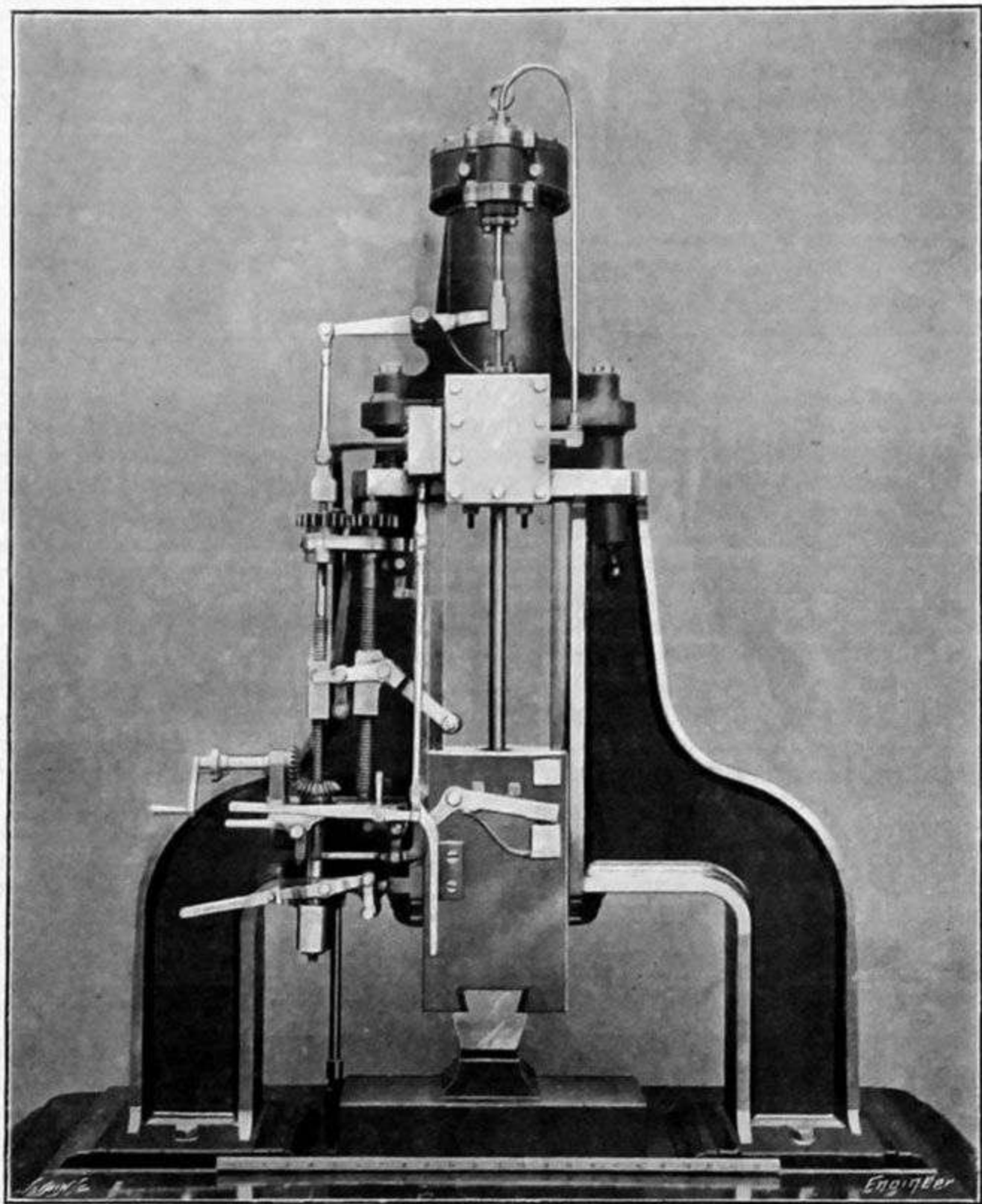
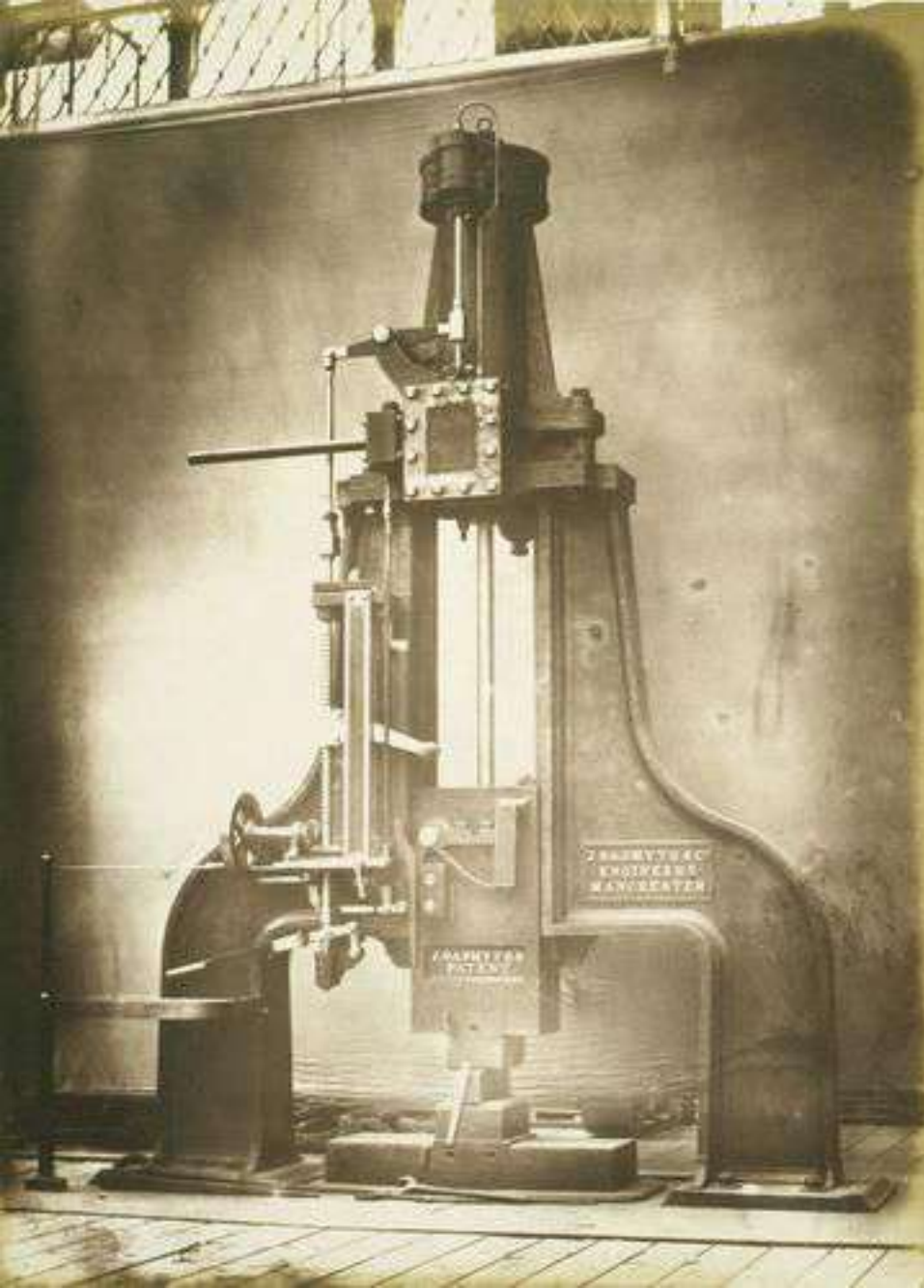
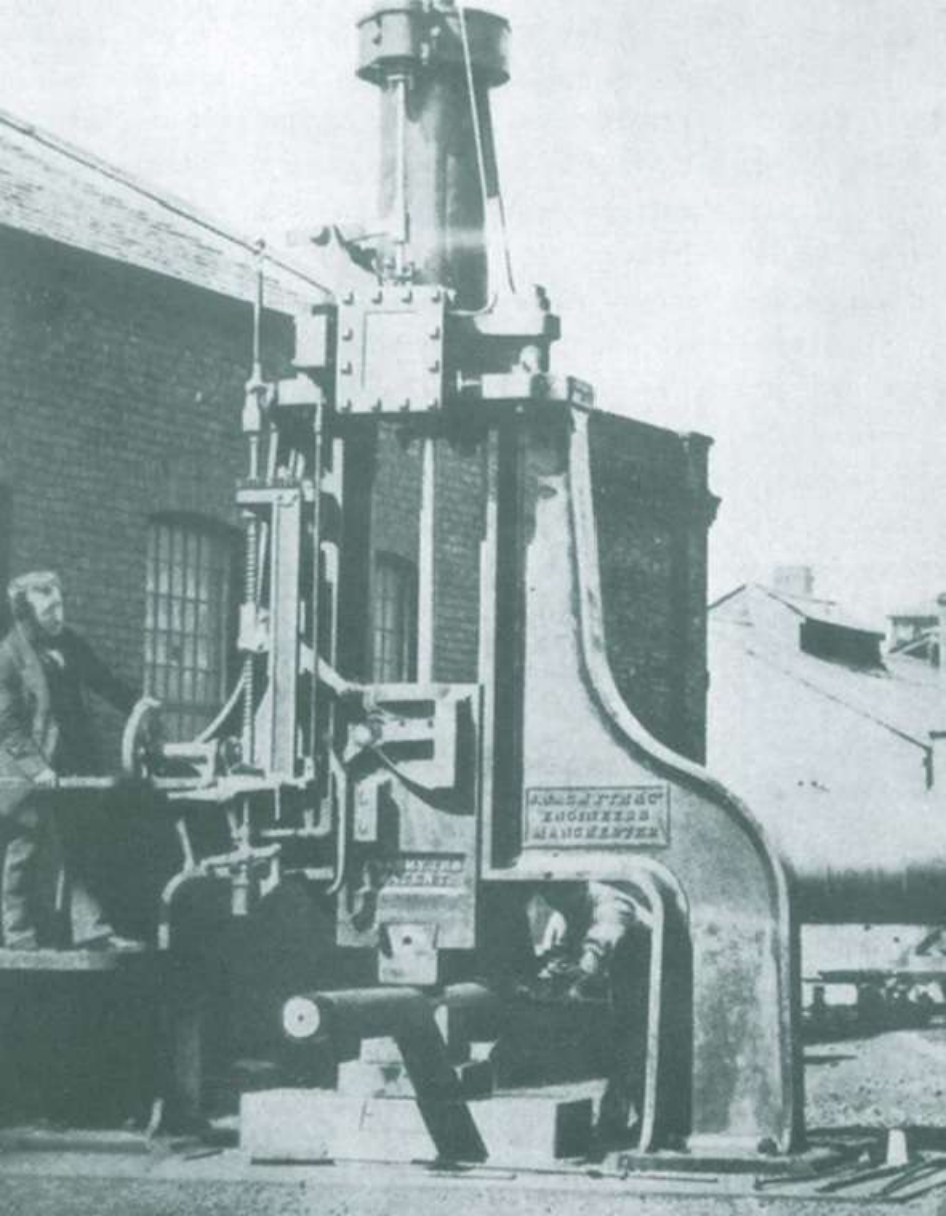


Fig. 22—NASMYTH'S FIRST HAMMER



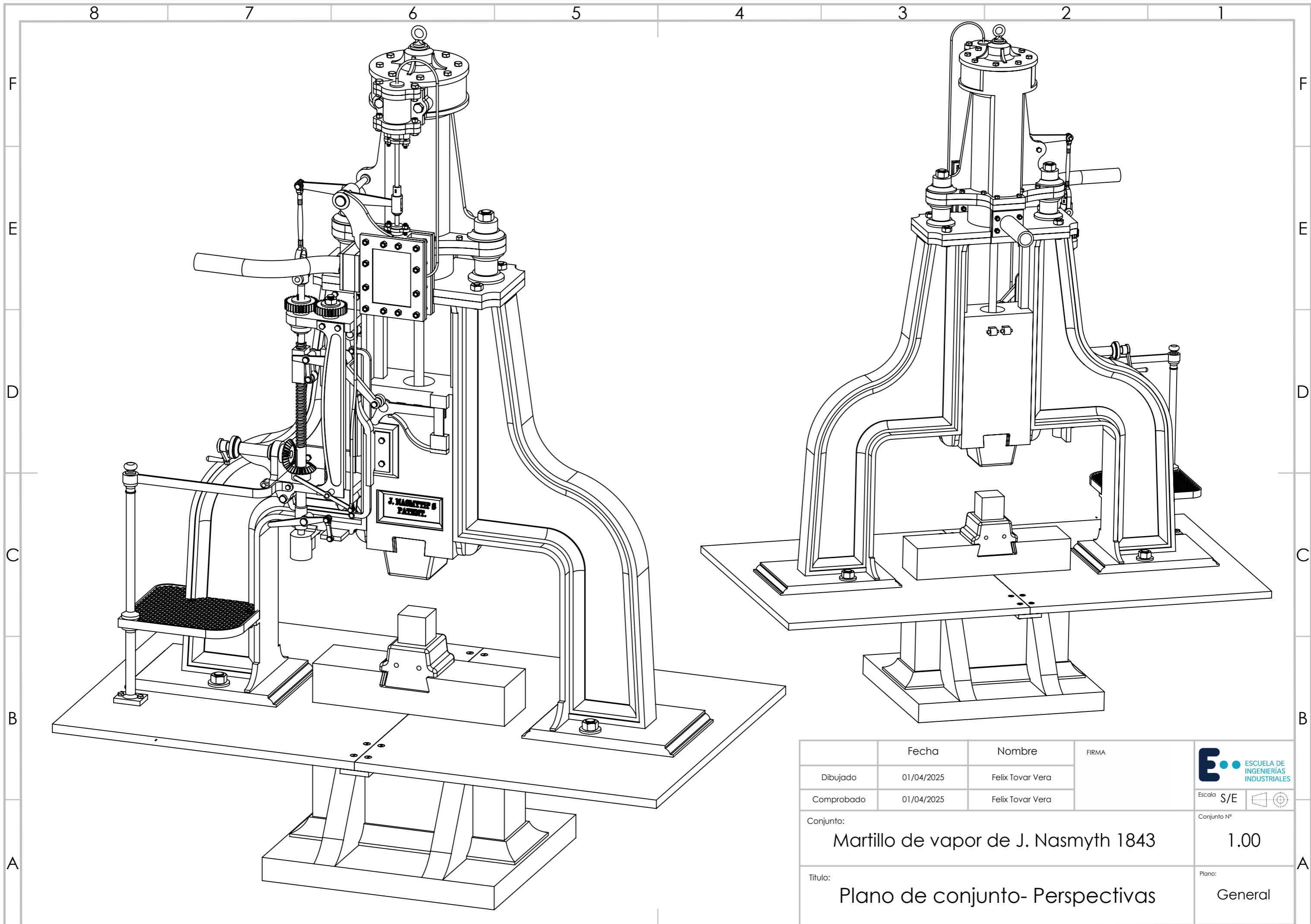




MILNER ENGINEERS
MANCHESTER

MILNER
PATENT

Anexo C. Planos

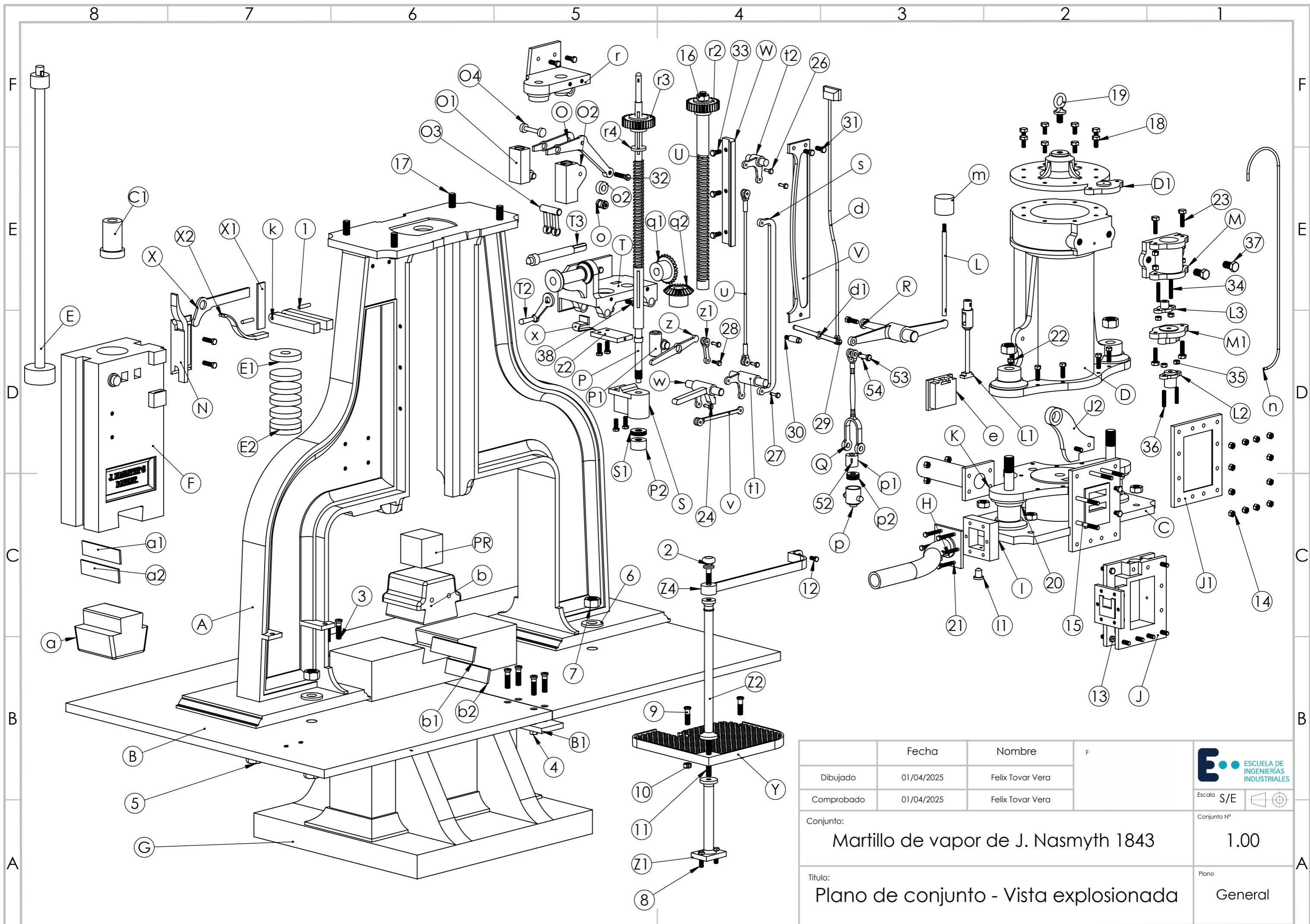




J. NASMYTH & PATENT.

	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto Nº 1.00
Titulo: Plano de conjunto- Perspectivas			Plano: General



Escala S/E



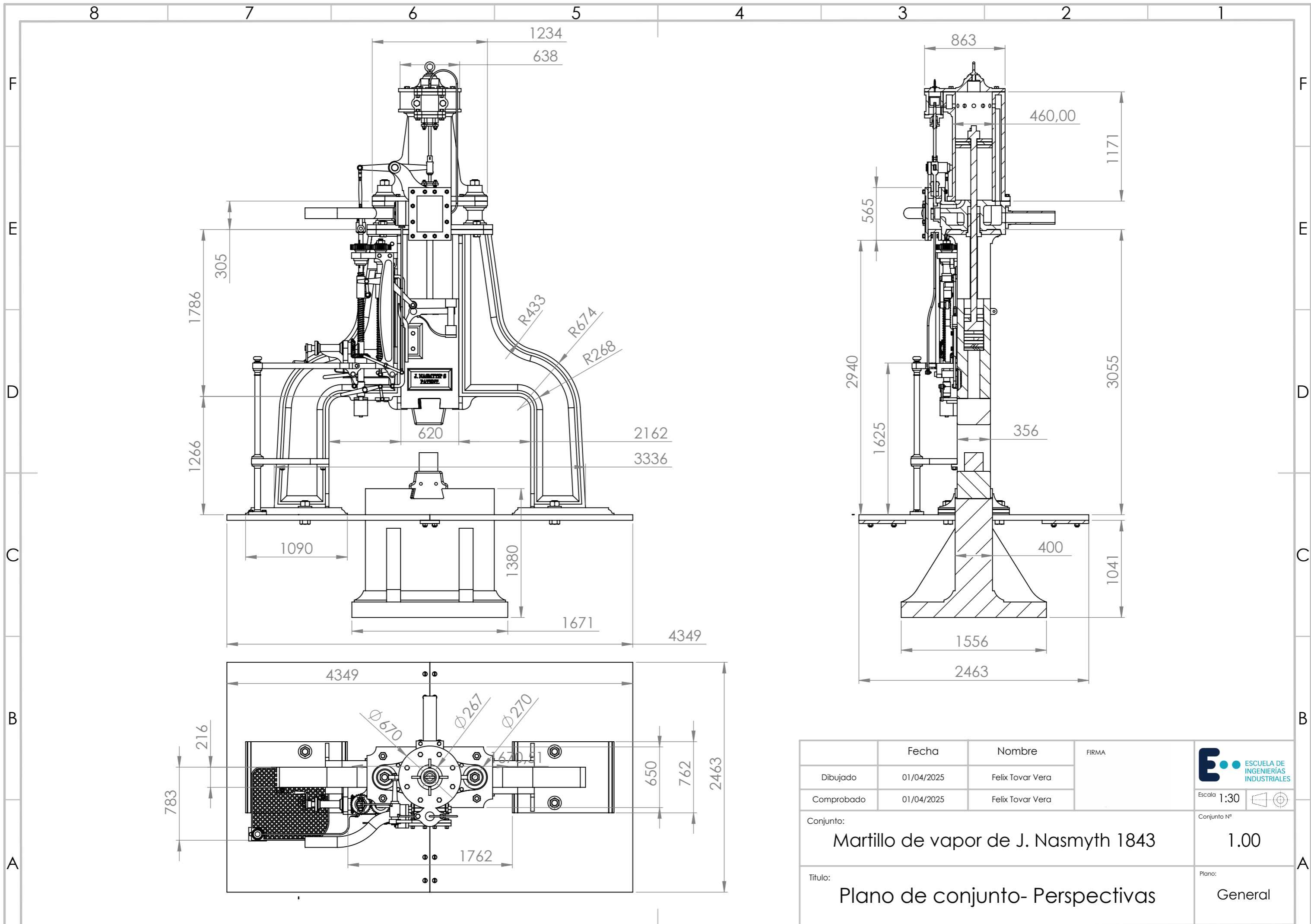
	Fecha	Nombre	F	
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		Escala S/E 
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843				Conjunto N° 1.00
Título: Plano de conjunto - Vista explosionada				Plano General

4		3		2		1		
MARCA	DENOMINACIÓN			Nº PIEZAS	NORMA			
F	B	Placa base			2	-		
	G	Bloque del yunque			1	-		
	A	Bastidor central			1	-		
	Y	Plataforma para operario			1	-		
	b	Cara del yunque			1	-		
	Z1	Soporte de la plataforma			1	-		
E	Z2	Soporte de la barandilla			1	-		
	Z4	Barandilla de operario			1	-		
	T2	Manibela			1	-		
	T3	Eje de manibela			1	-		
	T	Soporte de accionamientos			1	-		
	P	Varilla roscada izquierda			1	-		
	q1	Engranaje conico de eje horizontal			1	-		
	q2	Engranaje conico de eje horizontal			1	-		
	O1	Tuerca de P			1	-		
	r	Soporte engranajes r			1	-		
D	U	Varilla roscada derecha			1	-		
	O2	Tuerca de U			1	-		
	r4	Anillo de varilla roscada P			1	-		
	F	Bloque del martillo			1	-		
	a	Cara del martillo			1	-		
	E2	Discos de amortiguamiento en F			6	-		
C	E1	Disco inferior del piston E			3	-		
	E	Pistón principal			1	-		
	H	Tuberia de admisión de vapor			1	-		
	I	Caja de la valvula de regulación			1	-		
	II	Tapon aislante en I			1	-		
	d	Varilla de la vavula de regulación			1	-		
	E1	Discos de amortiguación superiores en F			2	-		
	k	Chaveta de unión entre F y E			2	-		
	l	Placa de conexión en k			2	-		
	K	Tuberia de escape de vapor			1	-		
B	C	Sistema de conductos			1	-		
	J	Caja de la vavula de vapor			1	-		
	J1	Tapadera de J			1	-		
	C1	Tapón pra aislar C			1	-		
			Fecha	Nombre				
	Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera					
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera						
Conjunto:					Conjunto Nº			
Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843					1.00			
Titulo:					Plano:			
Plano de conjunto- Lista de elementos					General			

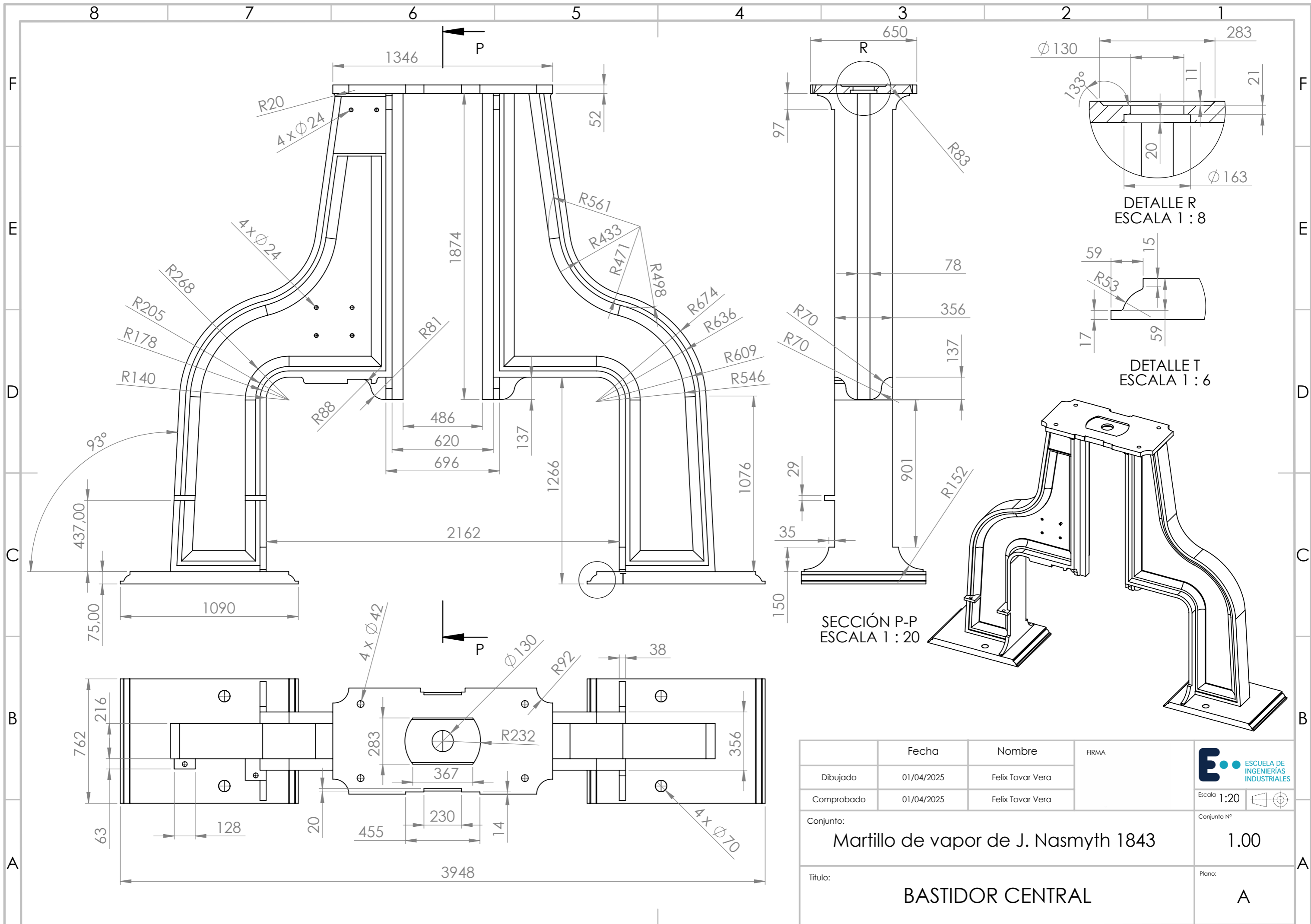
4		3		2		1		
MARCA	DENOMINACIÓN			Nº PIEZAS	NORMA			
F	D	Cilindro principal			1	-		F
	M	Cilindro secundario			1	-		
	D1	Tapadera de cilindros			1	-		
	M1	Tapa inferior cilindro M			1	-		
	L3	Tapón aislante de cilindro M			1	-		
E	m	Pistón del cilindro M			1	-		E
	L	Varilla superior de la válvula de vapor			1	-		
	L1	Varilla inferior de la válvula de vapor			1	-		
	e	Válvula de vapor			1	-		
	J2	Elemento de sujección de R			1	-		
	R	Brazo palanca de la válvula			1	-		
	Q	Varilla de transmision entre R-p			1	-		
	p	Amortiguación entre P y Q			1	-		
	p2	Discos de amortiguación entre P y Q			5	-		
	p1	Cilindro de presión sobre discos p-2			1	-		
D	52	Placa de conexión entre p1 y P			1	-		D
	53	Pasador de unión entre R y Q			1	-		
	54	Placa de conexión entre R y Q			1	-		
	O	Brazo regulador de caída máxima			1	-		
	O3	Brazo de conexión entre O y O-1			1	-		
	V	Guía externa de barra O			1	-		
	t1	Palanca de codo superior			1	-		
	t2	Palanca de codo inferior			1	-		
	s	Barra paralela de desenganche			1	-		
	u	Varilla de conexión entre t1 y t2			1	-		
C	N	Tope fijado al martillo			1	-		C
	X	Palanca de enclavamiento			1	-		
	d1	Mango de válvula de regulación			1	-		
	O4	Ruedas para O			1	-		
	X1	Guía de X			1	-		
B	S	Caja de amortiguación para P			1	-		B
	w	Gatillo de enclavamiento de P			1	-		
	v	Varilla de conexión entre w y t2			1	-		
	P1	Cilindro tope para gatillo w			1	-		
	z2	Unión al bastidor de z1			1	-		
	z	Mango y palanca z			1	-		
			Fecha		Nombre		FIR	
Dibujado		01/04/2025		Felix Tovar Vera				
Comprobado		01/04/2025		Felix Tovar Vera				
Conjunto:		Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843				Conjunto Nº		
						1.00		
Titulo:		Plano de conjunto- Lista de elementos				Plano		
						General		

4		3		2		1		
MARCA	DENOMINACIÓN			Nº PIEZAS	NORMA			
F	z1	Biela de unión entre z2 y z			1	-		F
	x	Resorte que presiona w			1	-		
	X2	Resorte de presión de X			1	-		
	W	Guía interna para O			1	-		
	r2	Rueda dentada derecha			1	-		
E	r3	Rueda dentada izquierda			1	-		E
	n	Pequeña tubería de cobre			1	-		
	L2	Tapón de aislamiento para J			1	-		
	o	Rueda en el extremo de O			1	-		
	o2	Unión entre o y O			1	-		
	S1	Discos de cuero para amortiguación en S			5	-		
	b1	Empaque de hierro para unión en b			1	-		
	b2	Empaque de madera para unión en b			1	-		
	a1	Empaque de madera para unión en a			1	-		
	a2	Empaque de hierro para unión en a			1	-		
D	B1	Union entre placas B			2	-		D
	2	Pomo y tornillo en barandilla Z			1	-		
	P2	Cilindro tope en S			1	-		
	3	Tornillo avellando M24 x 60 mm			8	DIN 7969		
	4	Tuerca hexagonal M30			8	ISO 4032		
	5	Perno hexagonal M64 x 210 mm			4	-		
	6	Arandela M30			4	DIN 9021		
	7	Tuerca hexagonal M64			6	ISO 4034		
	8	Perno M24 90 mm			2	DIN EN 24014		
	9	Perno M30 110 mm			2	DIN 6912		
C	10	Tuerca hexagonal M30			2	ISO 4032		C
	11	Esparrago M30 x 200 mm			1	DIN 976-1		
	12	Perno hexagonal M20 80 mm			1	DIN EN 24014		
	13	Perno hexagonal M24 x 230 mm			18	DIN EN 24014		
	14	Tuerca hexagonal M24			28	DIN EN 24014		
	15	Perno M24 x 210 mm			4	DIN EN 24014		
	16	Tuerca hexagonal M42			5	ISO 4034		
	17	Perno hexagonal M42 x 120 mm			4	DIN EN 28765		
B	18	Perno hexagonal M24 x 55 mm			8	DIN EN 24017		B
	19	Tornillo del cilindro superior			1	-		
	20	Perno hexagonal M24 x 90 mm			4	DIN EN 24014		
		Fecha	Nombre	FIRMA				
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera						
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera						
Conjunto:					Conjunto Nº			
Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843					1.00			
Titulo:					Plano			
Plano de conjunto- Lista de elementos					General			

4		3		2		1		
MARCA	DENOMINACIÓN			Nº PIEZAS	NORMA			
F	21	Perno hexagonal M20 x 130 mm			6	DIN EN 24017		
	22	Perno hexagonal M24 x 55 mm			11	DIN EN 24017		
	23	Perno hexagonal M24 x 80 mm			4	DIN EN 24017		
	24	Pasador de union entre w y v			3	-		
	25	Placa de conexión entre w y v			8	-		
E	26	Pasador de unión en t2			2	-		
	27	Placa de conexión en t2			1	-		
	28	Tornillo M20 x 100 mm			1	DIN EN 24014		
	29	Pasador de unión entre d y d1			1	-		
	30	Tornillo de fijación de V			1	-		
	31	Perno hexagonal M24 x 90 mm			2	DIN EN 24014		
	32	Perno hexagonal M24 x 110 mm			1	DIN EN 24014		
	33	Perno hexagonal M24 x 70 mm			3	DIN EN 24014		
	34	Esparrago M20 x130 mm			2	-		
	35	Tuerca hexagonal M24			4	ISO 4033		
D	36	Esparrago M20 x 110 mm			2	-		
	37	Perno hexagonal M24 x 50 mm			2	DIN EN 24014		
	38	Perno hexagonal M24 x 80 mm			10	DIN EN 24014		
	PR	Probeta de pruebas			1			
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 40%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> <div style="width: 20%;"></div> </div>								
B	Fecha		Nombre					
	Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera					
	Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera					
A	Conjunto:				Conjunto Nº			
	Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843				1.00			
A	Titulo:				Plano			
	Plano de conjunto- Lista de elementos				General			



	Fecha	Nombre	FIRMA	
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		Conjunto N°
Conjunto:	Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			1.00
Título:	Plano de conjunto- Perspectivas			Plano: General



SECCIÓN P-P
ESCALA 1 : 20

DETALLE R
ESCALA 1 : 8

DETALLE T
ESCALA 1 : 6

	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto Nº 1.00
Título: BASTIDOR CENTRAL			Plano: A



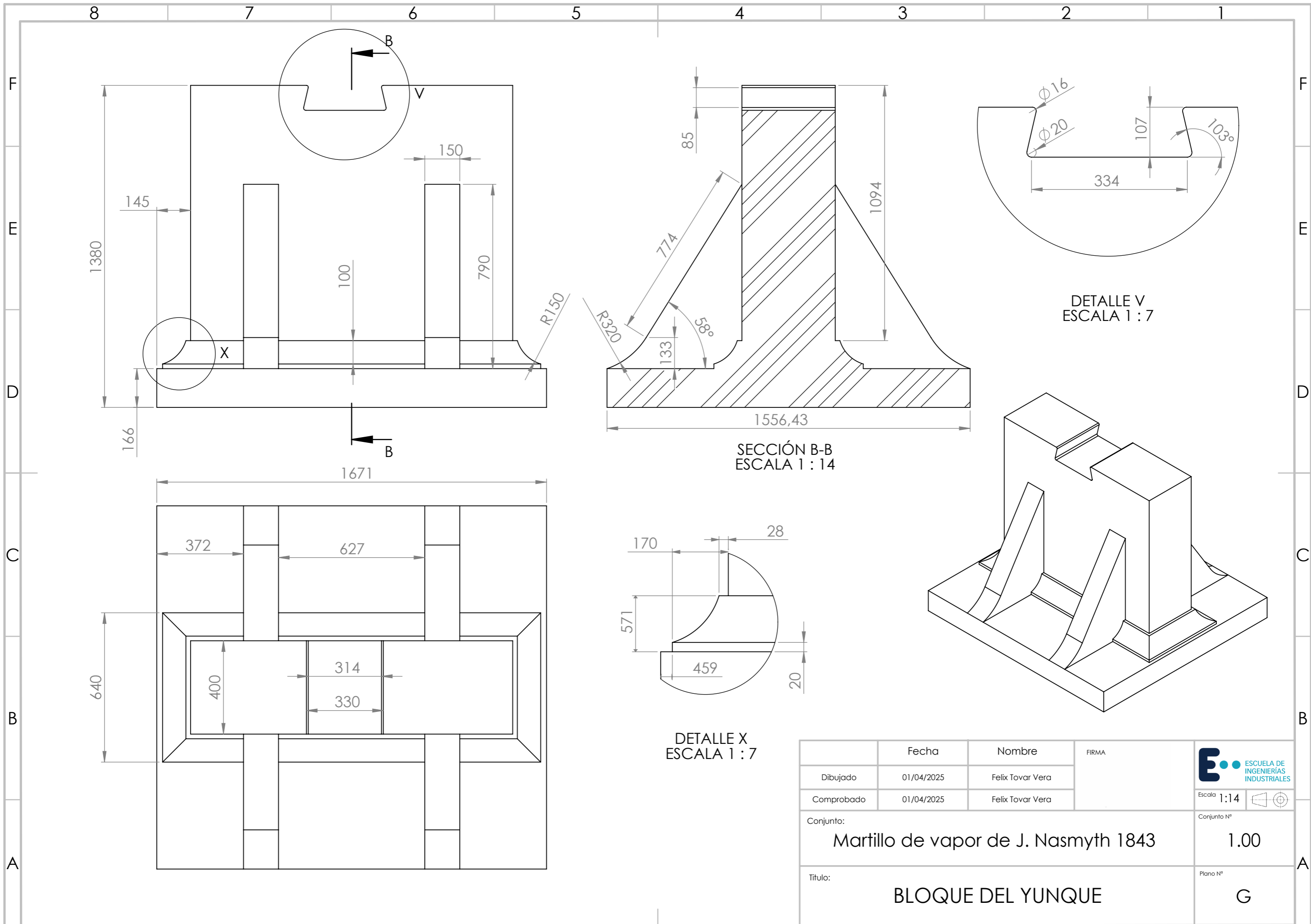
Escala 1:20

Conjunto Nº

1.00

Plano:

A



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 14

DETALLE V
ESCALA 1 : 7

DETALLE X
ESCALA 1 : 7

	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto:	Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843		Conjunto N° 1.00
Título:	BLOQUE DEL YUNQUE		Plano N° G



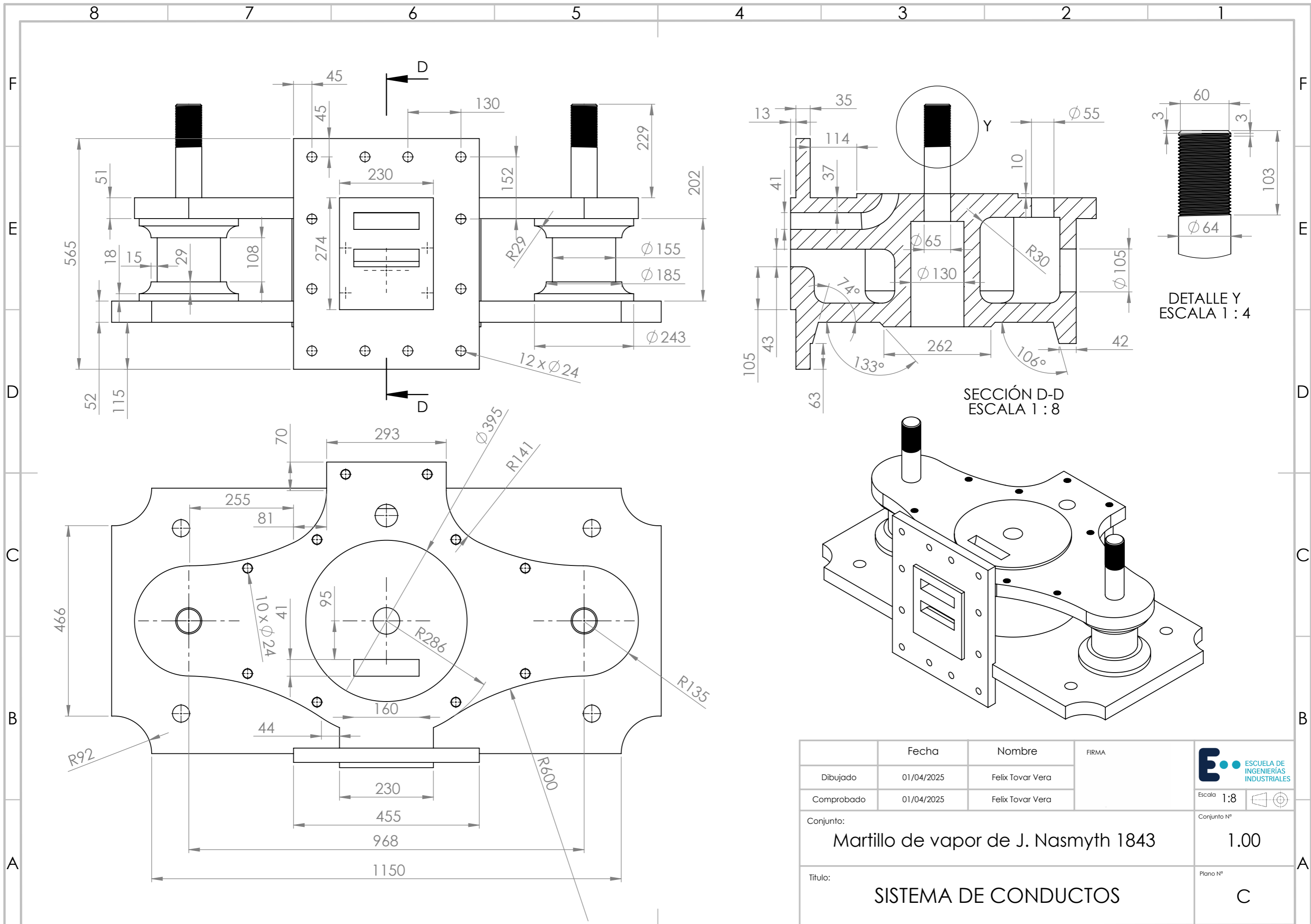
Escala 1:14

Conjunto N°

1.00

Plano N°

G



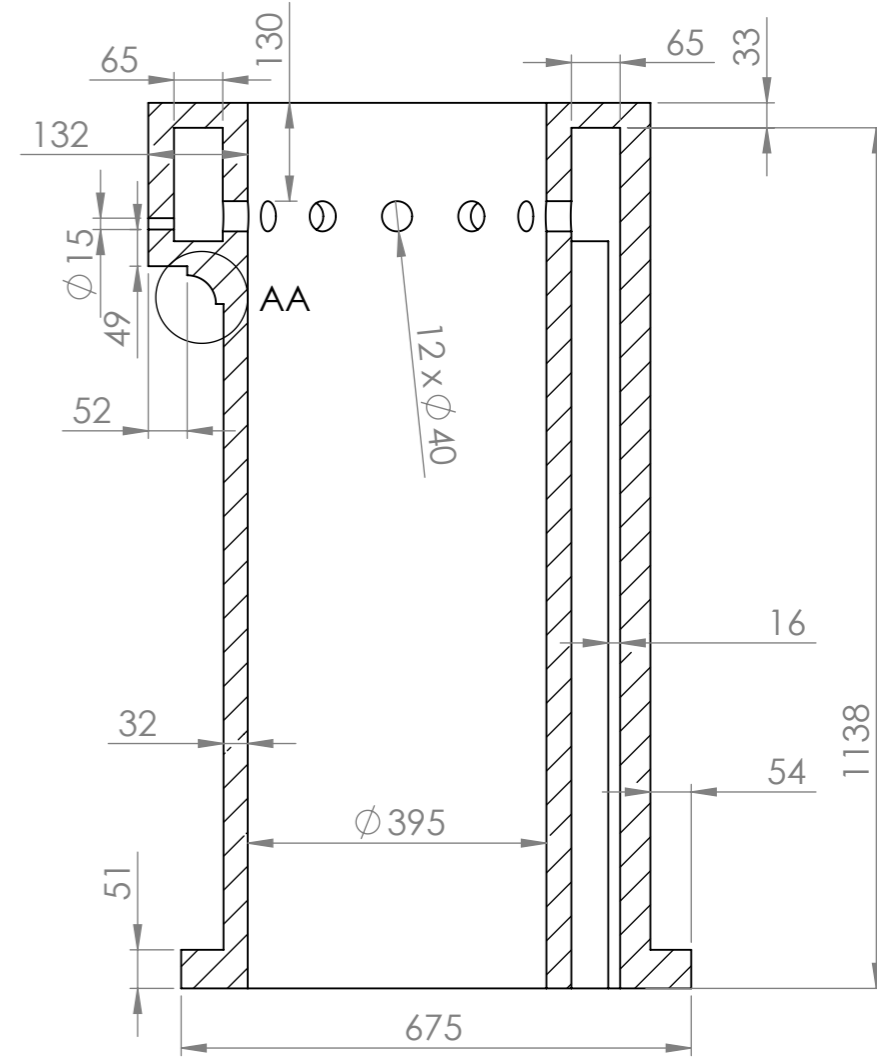
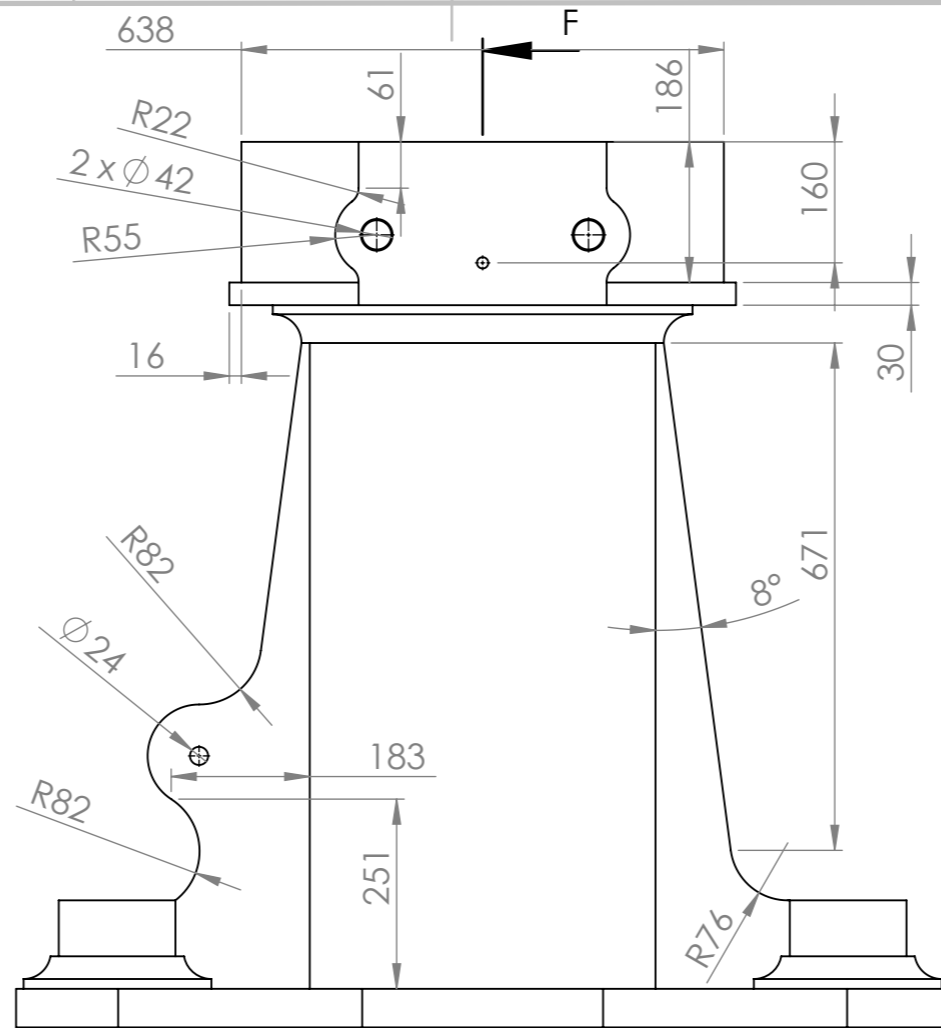
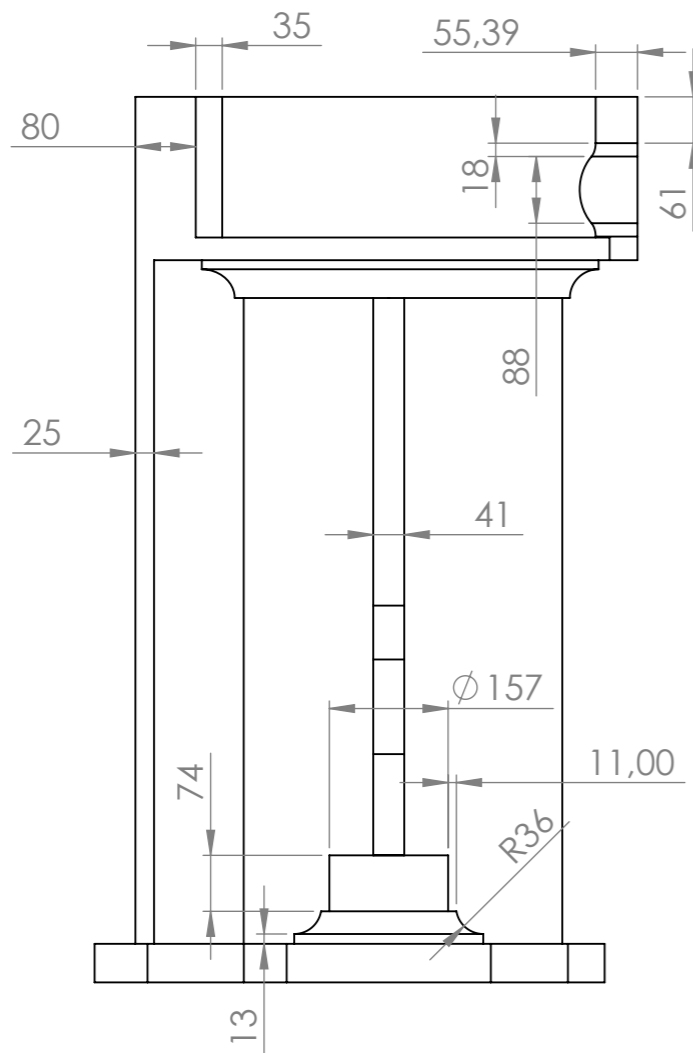
SECCIÓN D-D
ESCALA 1 : 8

DETALLE Y
ESCALA 1 : 4

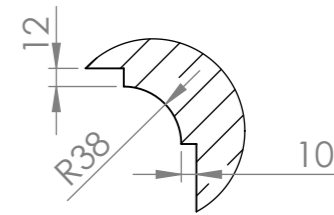
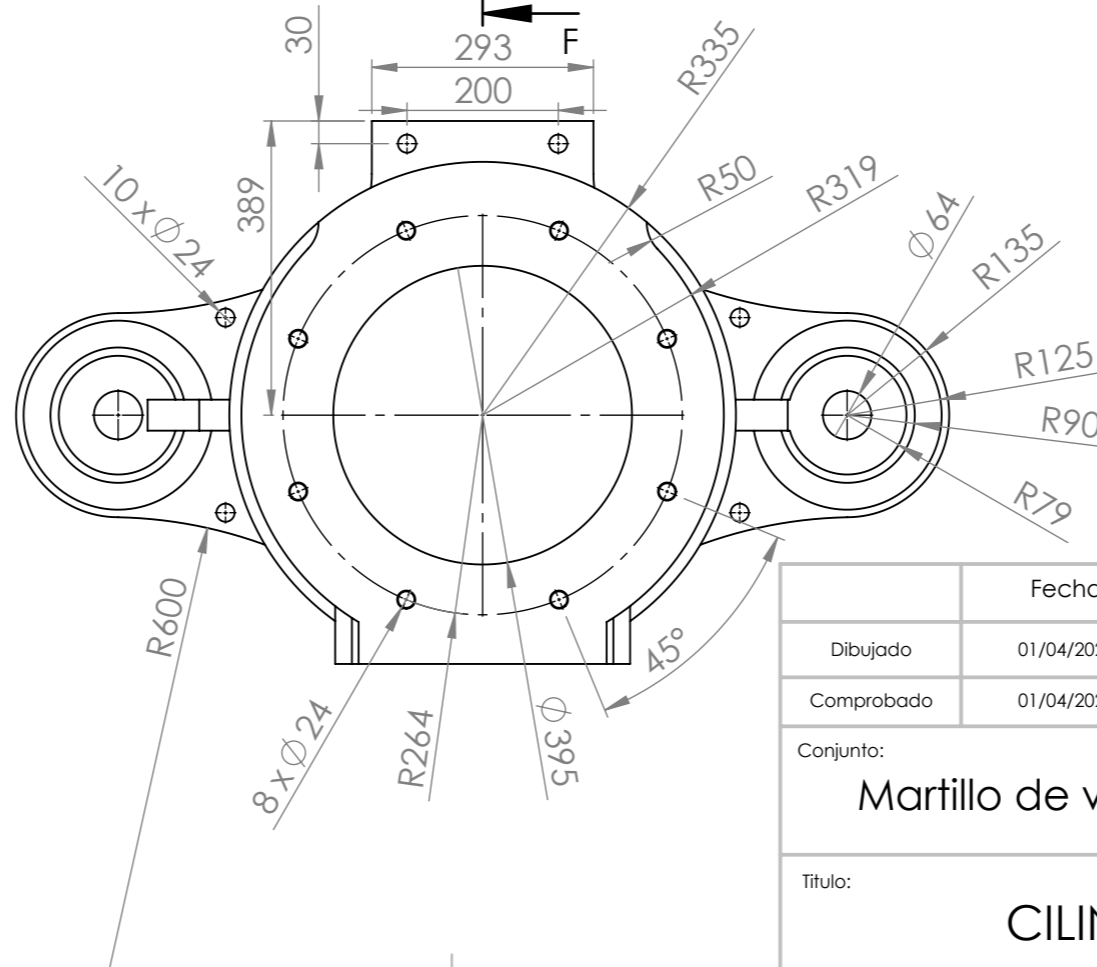
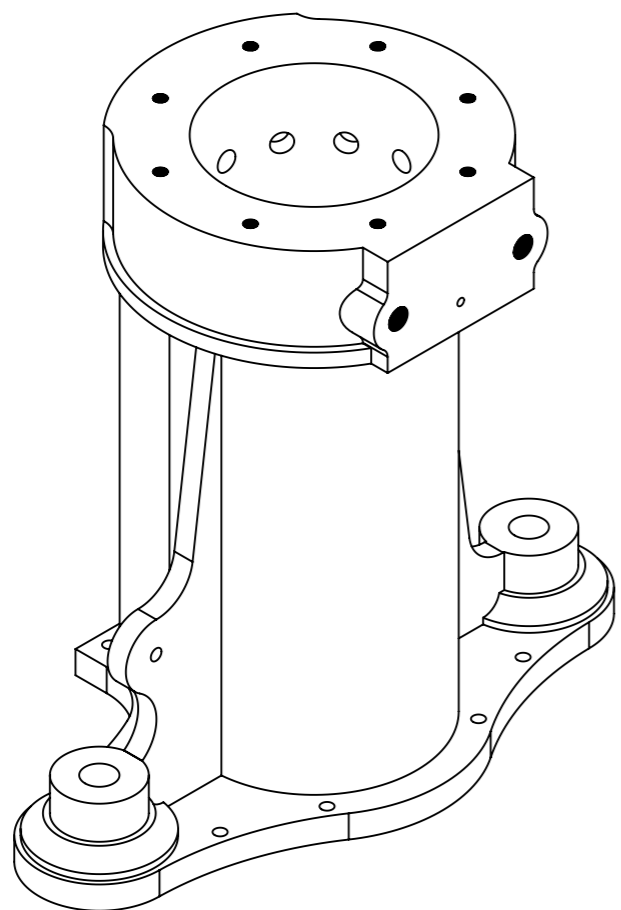
	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto Nº 1.00
Título: SISTEMA DE CONDUCTOS			Plano Nº C



Escala 1:8



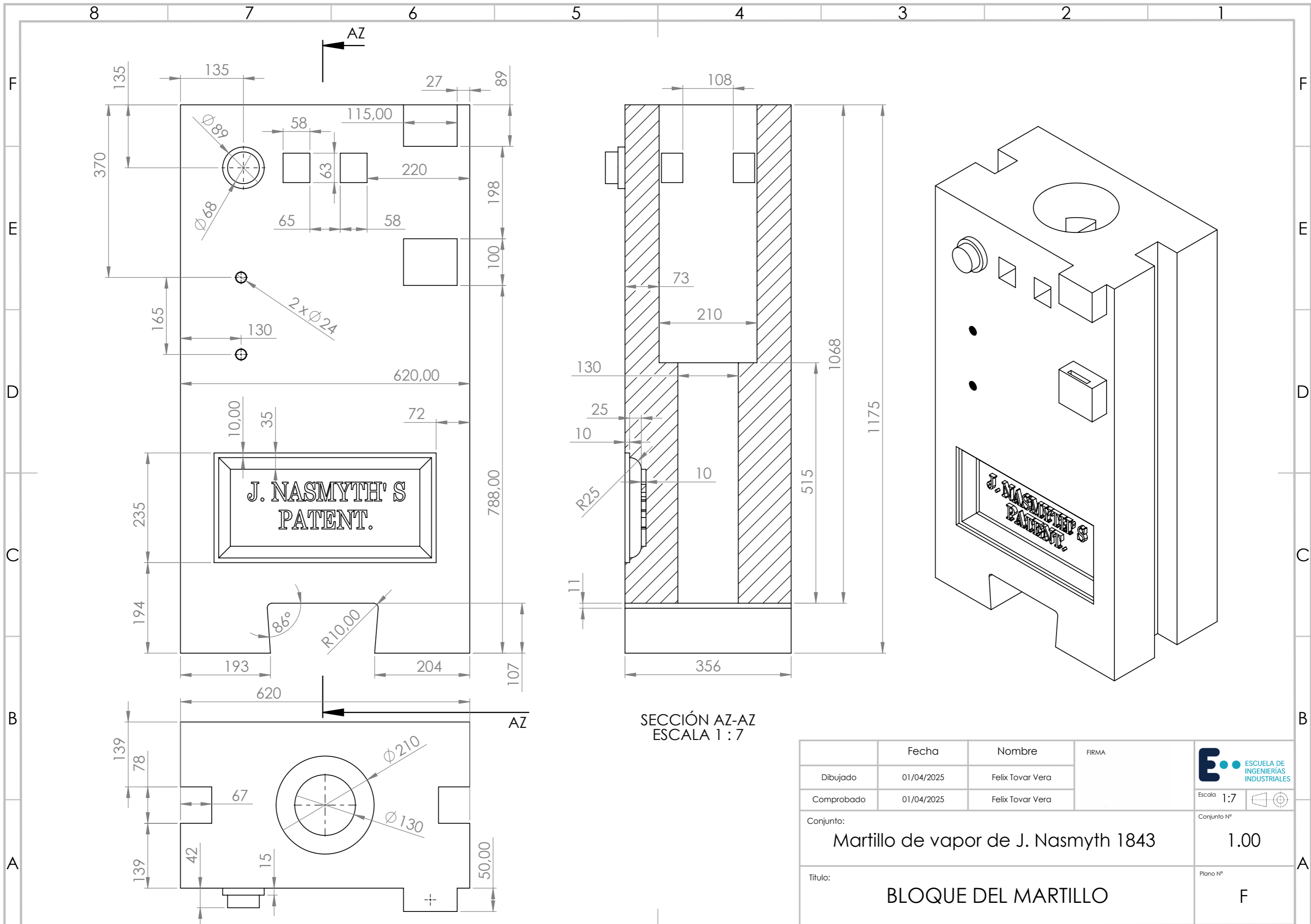
SECCIÓN F-F
ESCALA 1 : 10



DETALLE AA
ESCALA 1 : 5

	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto:	Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843		
Título:	CILINDRO PRINCIPAL		


 Escala 1:10 
 Conjunto N° 1.00
 Plano N° D

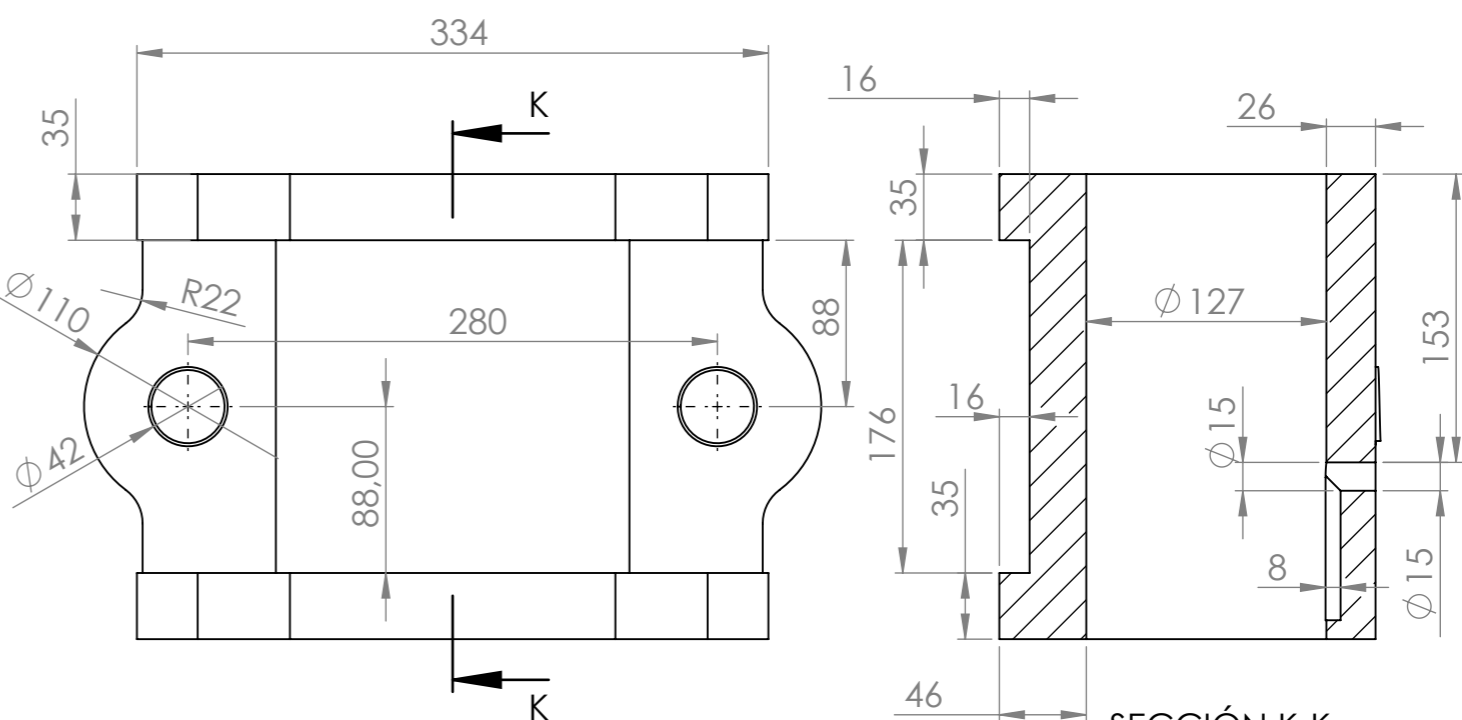
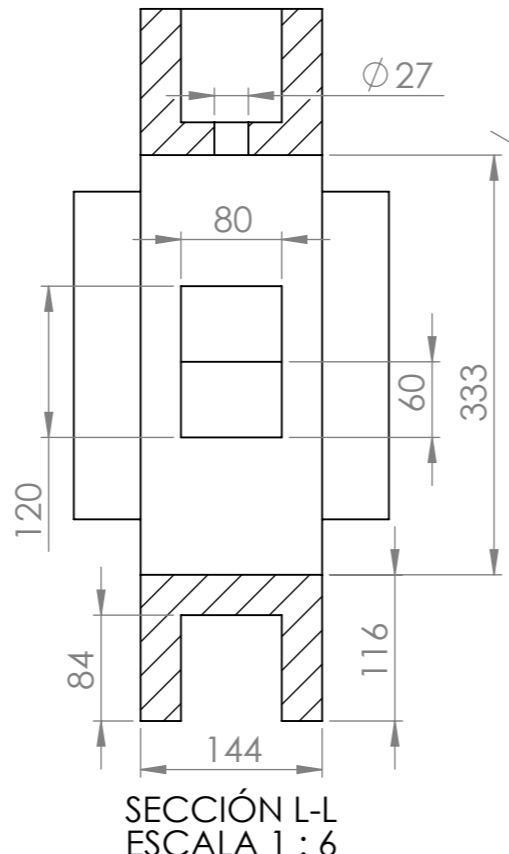
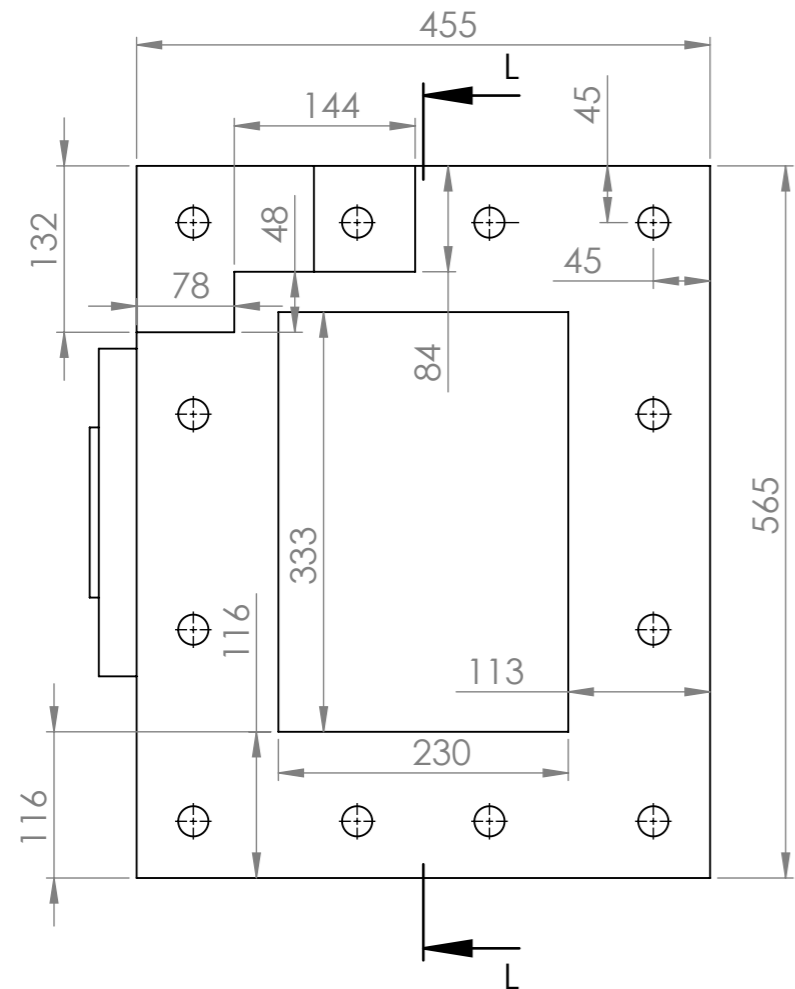


SECCIÓN AZ-AZ
ESCALA 1 : 7

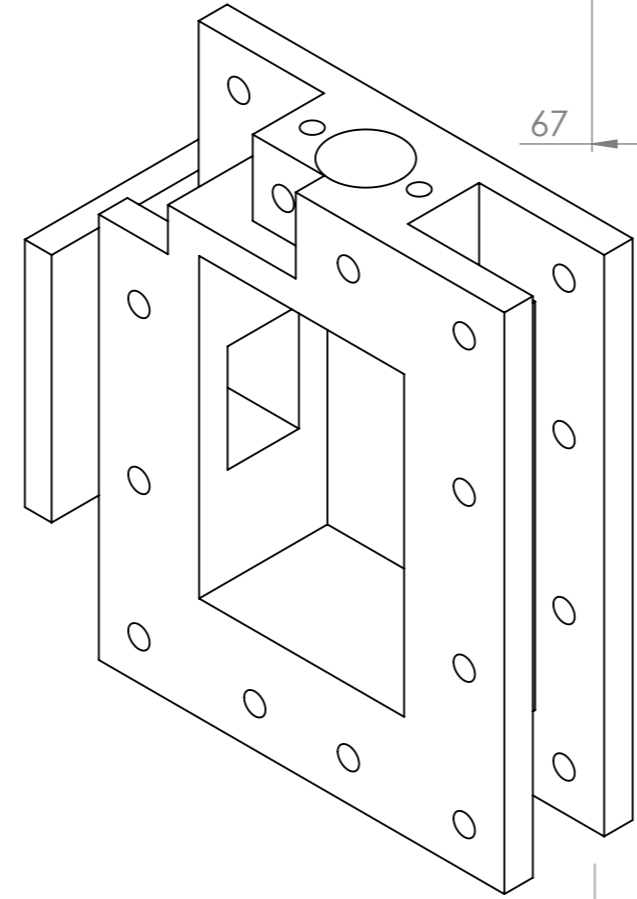
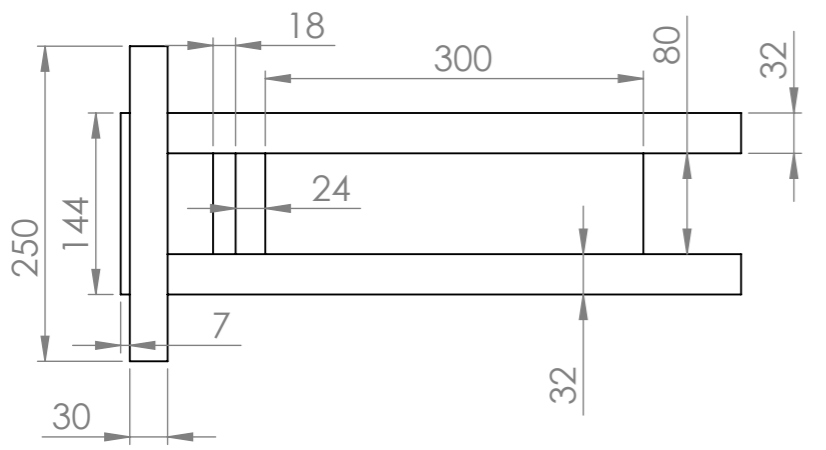
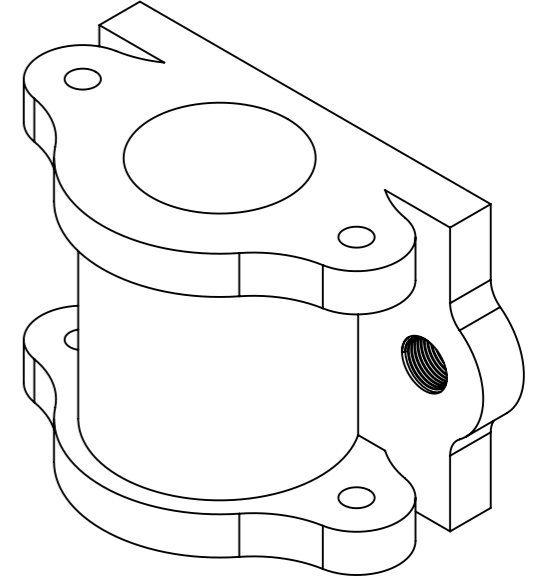
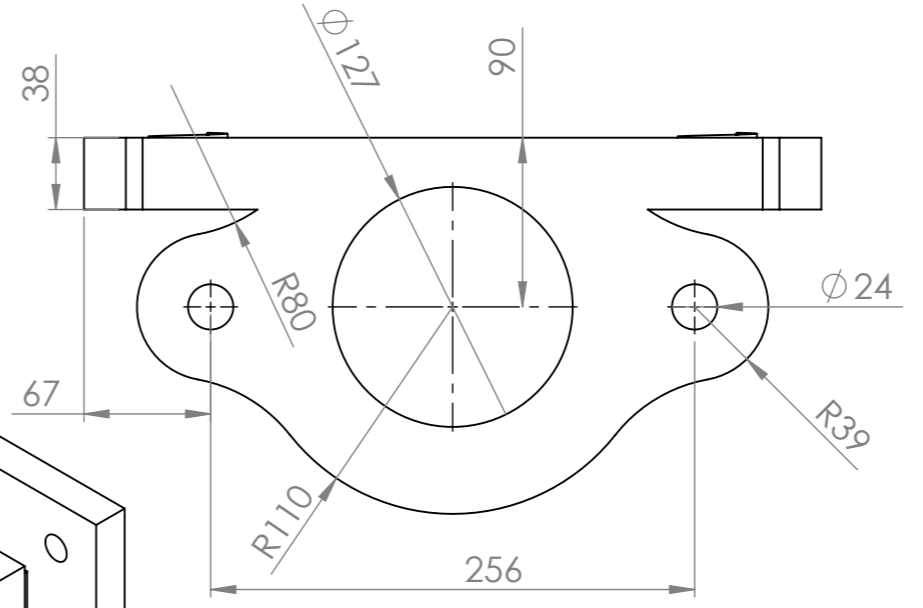
	Fecha	Nombre	FIRMA	
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera		Escala 1:7 
Conjunto:			Conjunto N°	
Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			1.00	
Título:			Plano N°	
BLOQUE DEL MARTILLO			F	

PIEZA J ESCALA 1:6

PIEZA M ESCALA 1:4



SECCIÓN K-K
ESCALA 1:4

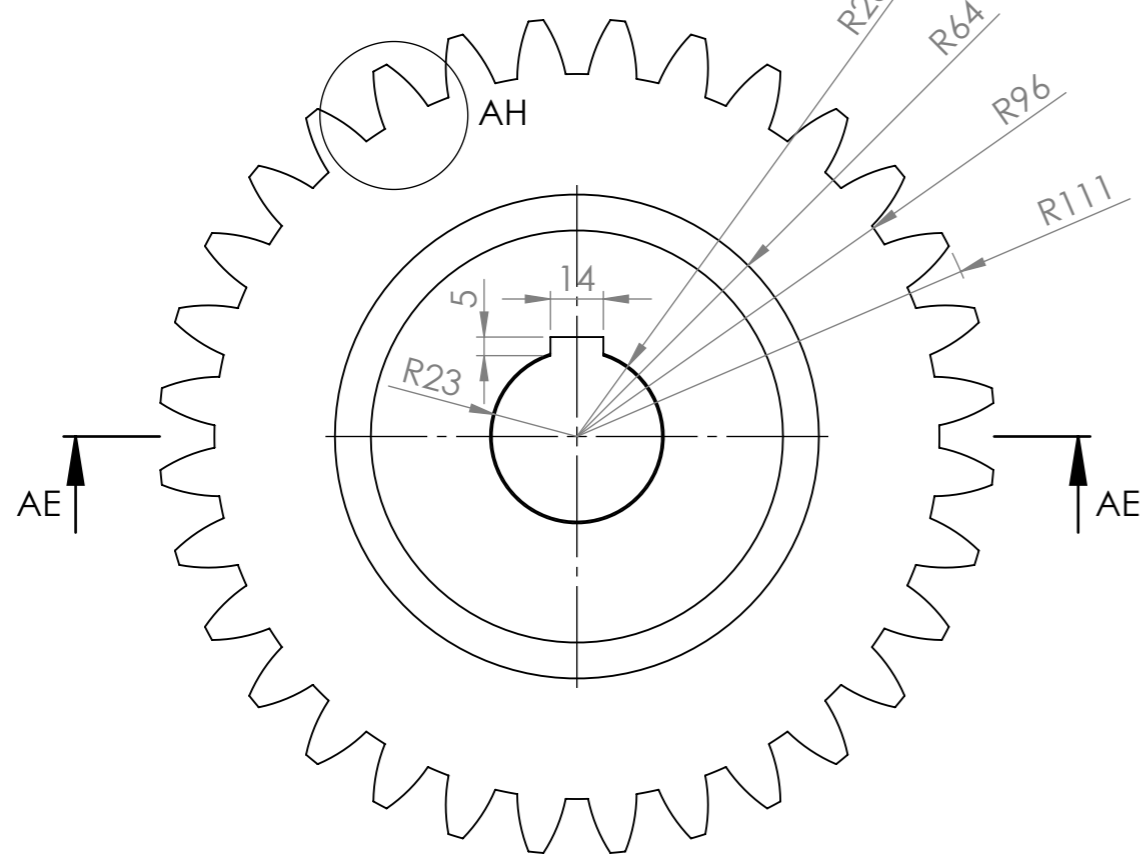


	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto N° 1.00
Titulo: ELEMENTOS AUXILIARES			Plano N° J, M

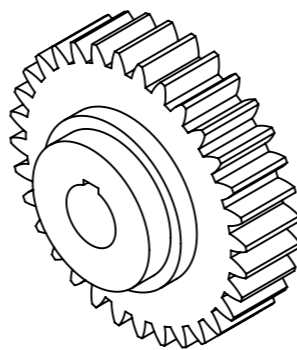
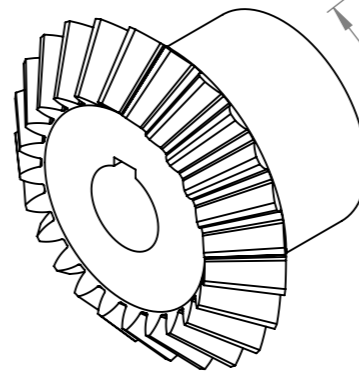
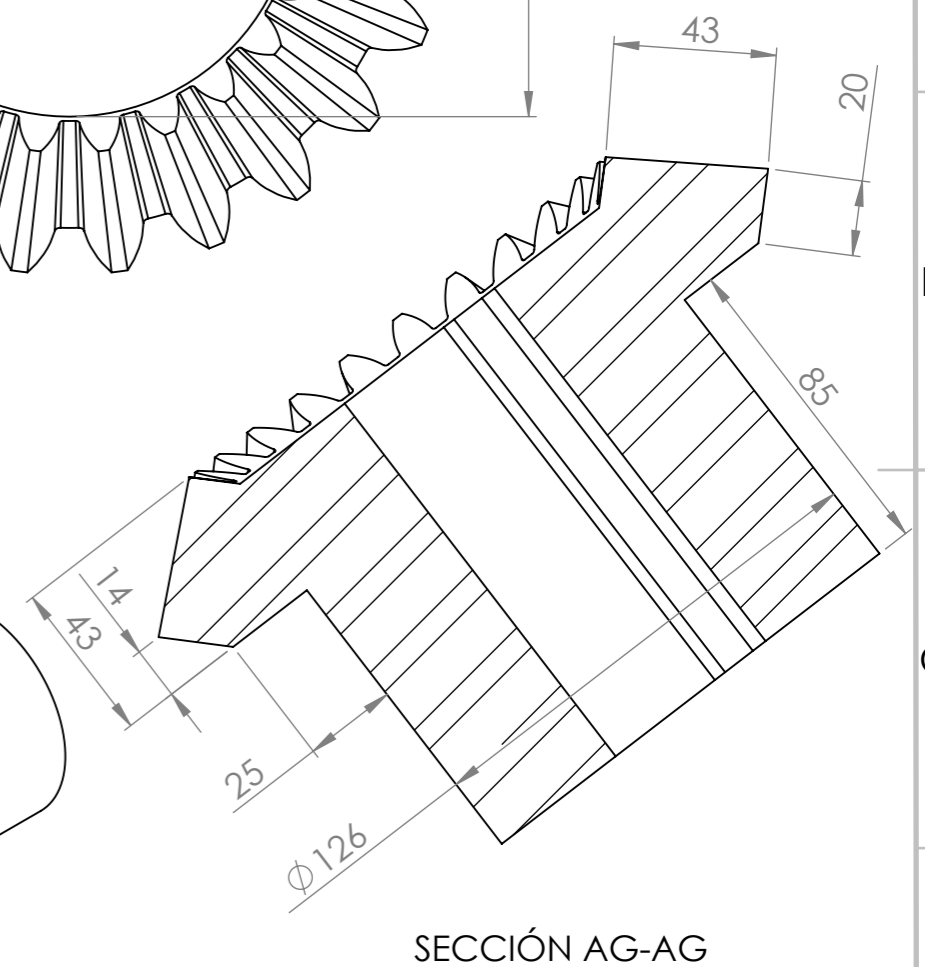
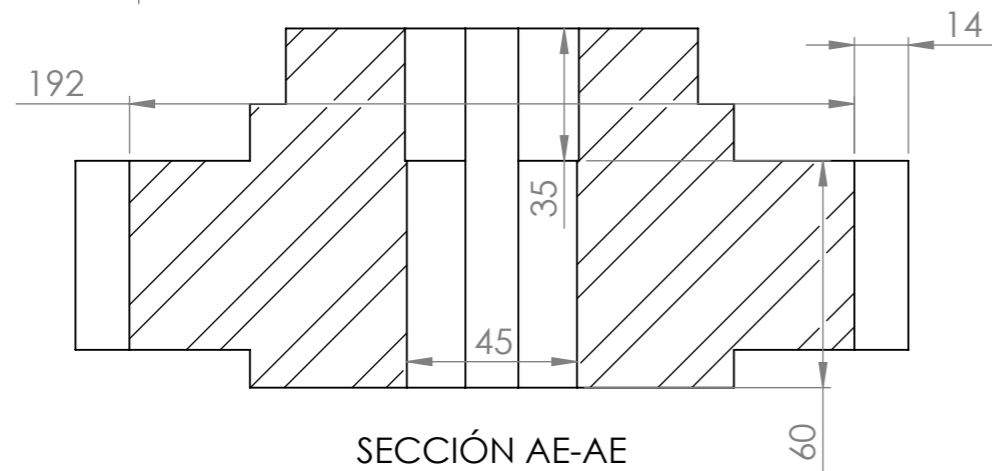
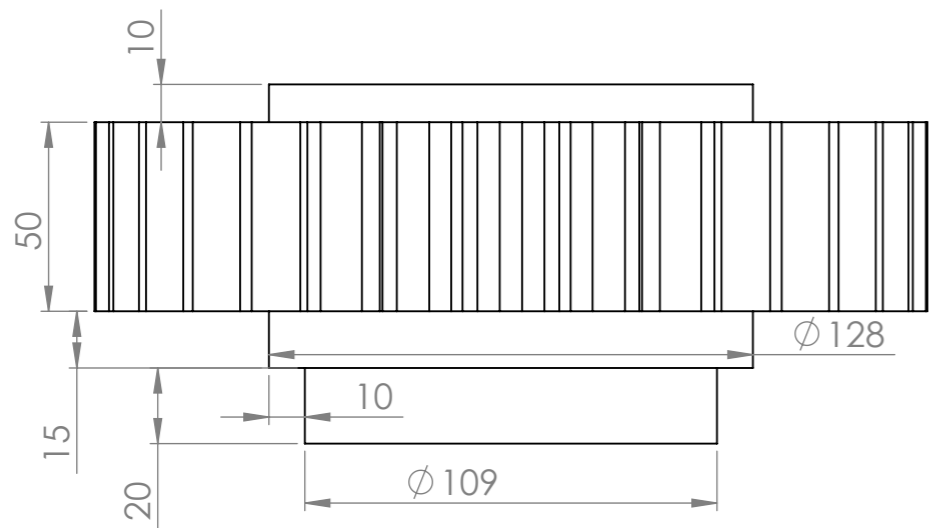
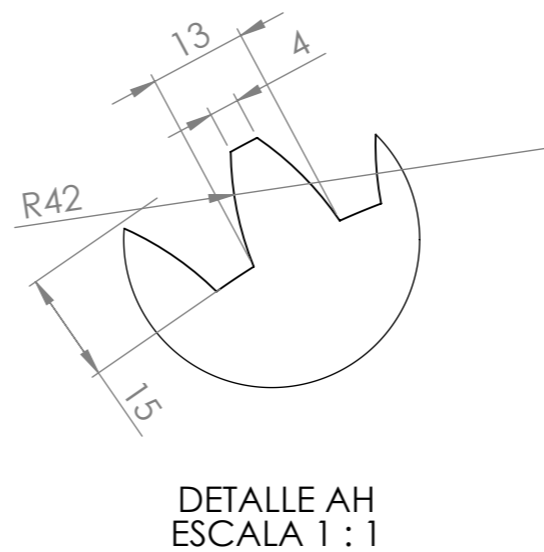
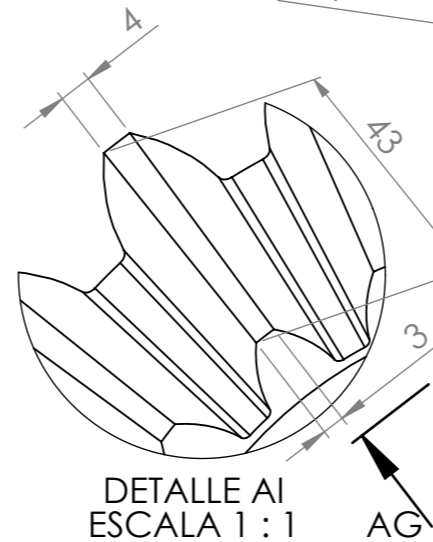
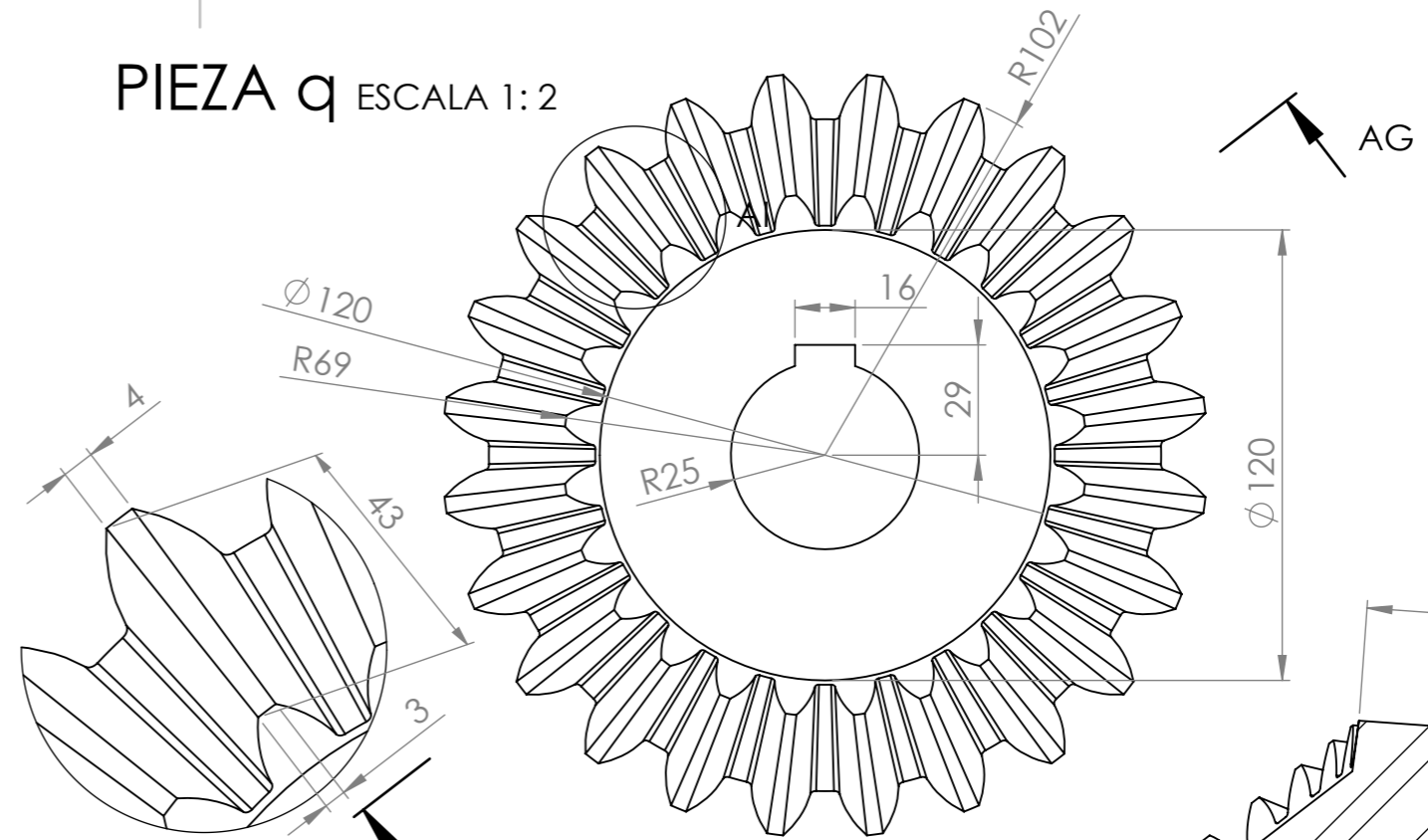


Escala S/E

PIEZA r ESCALA 1:2



PIEZA q ESCALA 1:2



	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto Nº 1.00
Titulo: ENGRNAJES			Plano Nº q, r

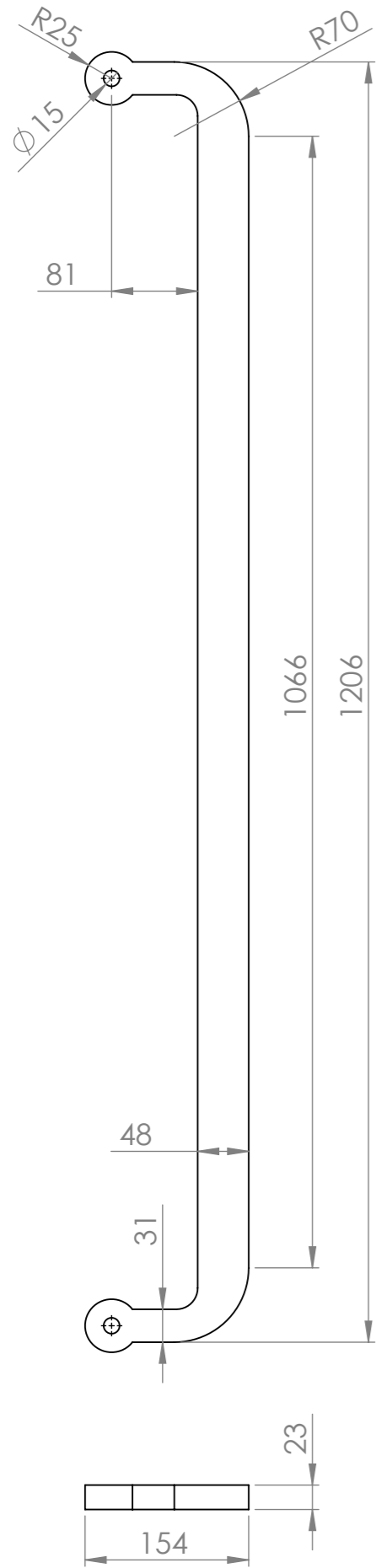


Escala 1:2

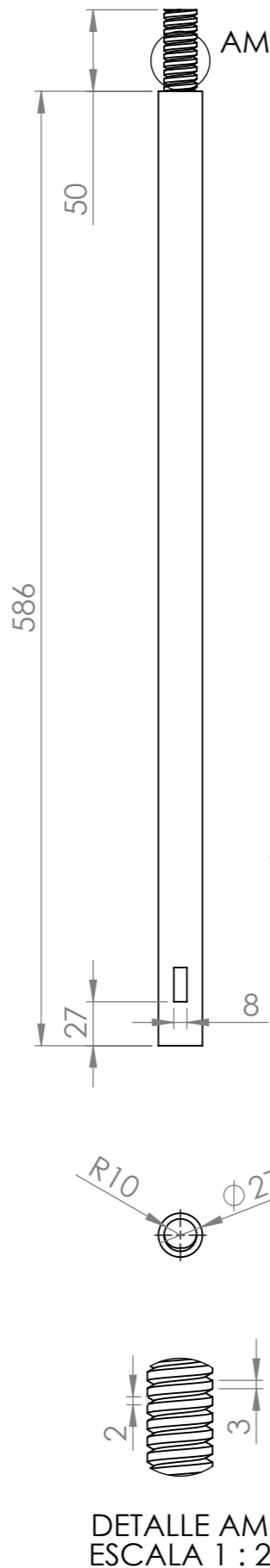
Conjunto Nº

Plano Nº

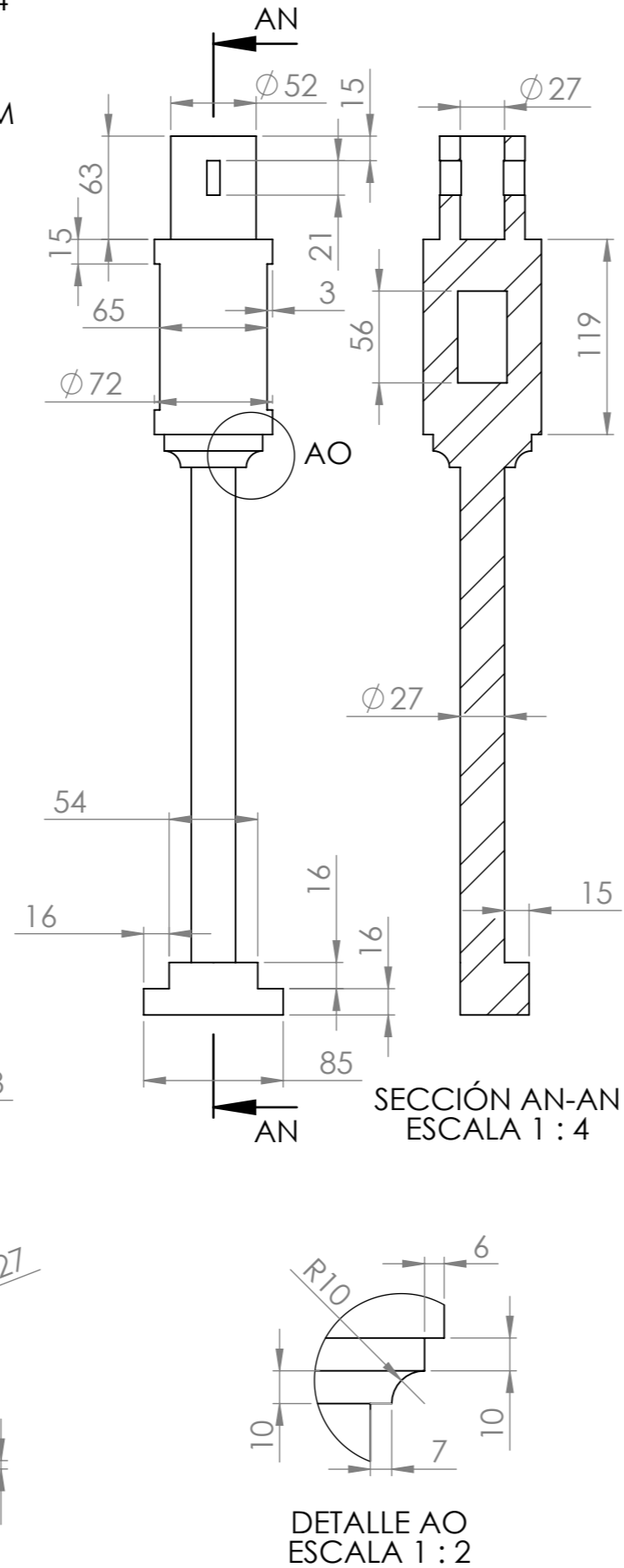
PIEZA V ESCALA 1: 6



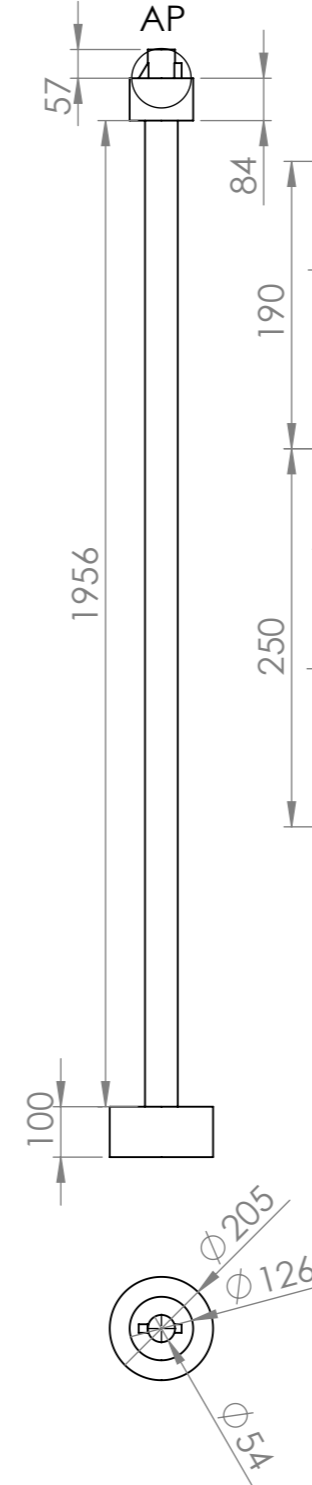
PIEZA L ESCALA 1: 4



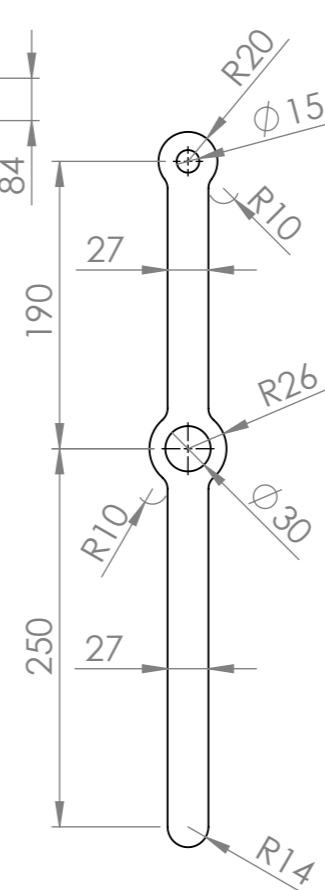
PIEZA L1 ESCALA 1: 14



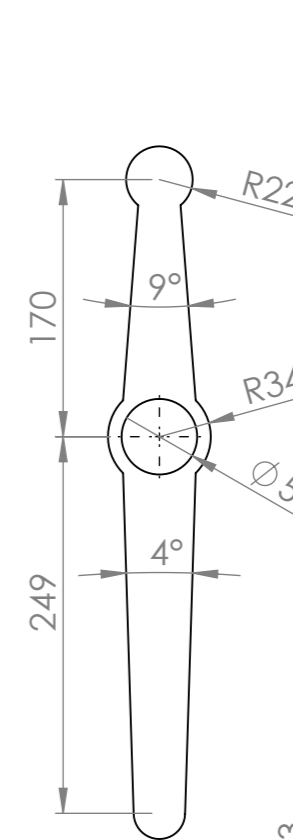
PIEZA E ESCALA 1: 15



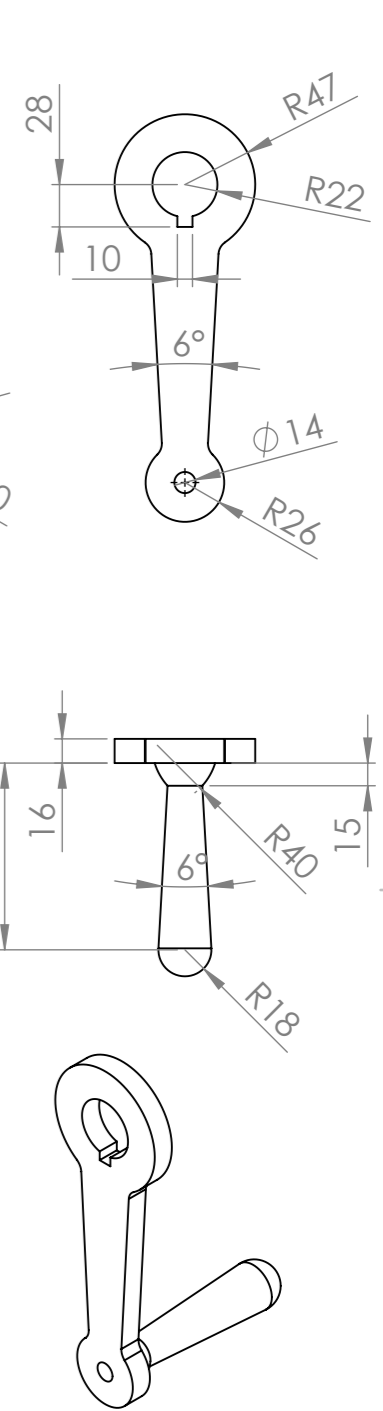
PIEZA E ESCALA 1: 5



PIEZA E ESCALA 1: 5



PIEZA E ESCALA 1: 5



	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto:	Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843		
Título:	ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN 2		

ESCUOLA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Escala S/E

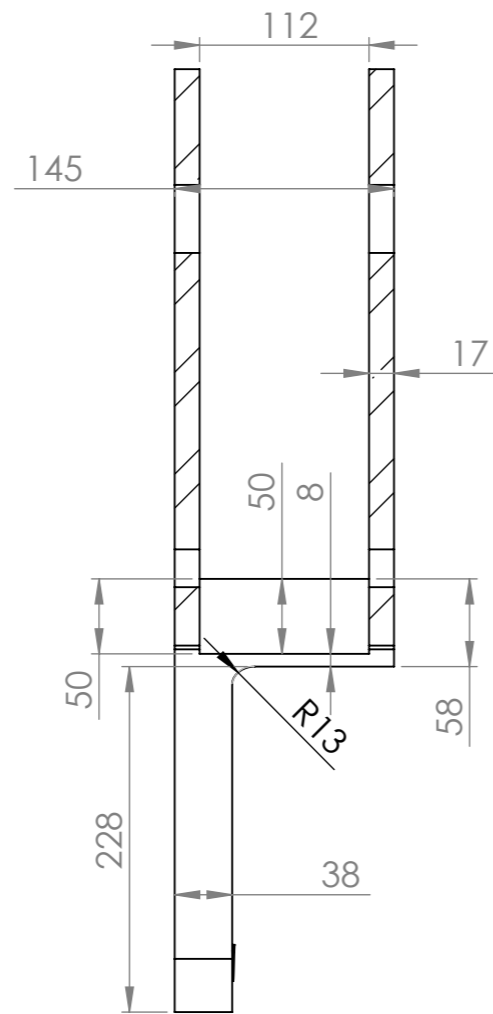
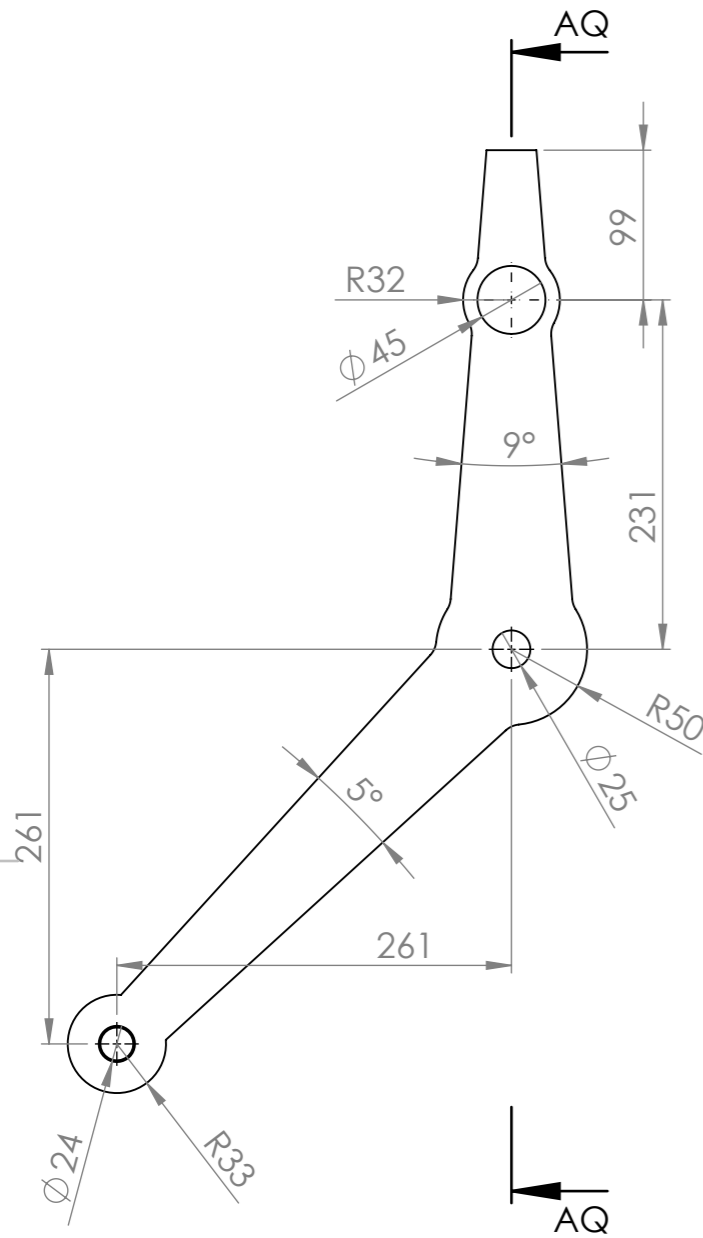
Conjunto Nº 1.00

Plano Nº 1.00

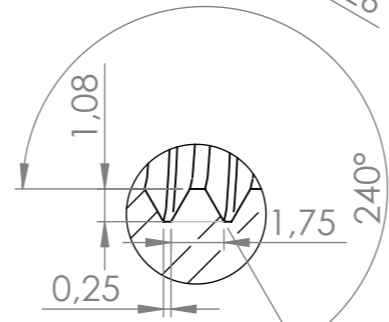
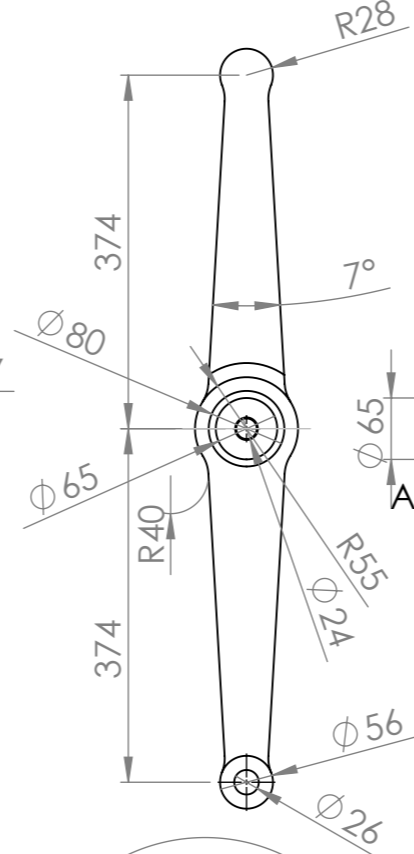
PIEZA O ESCALA 1:5

PIEZA R ESCALA 1:8

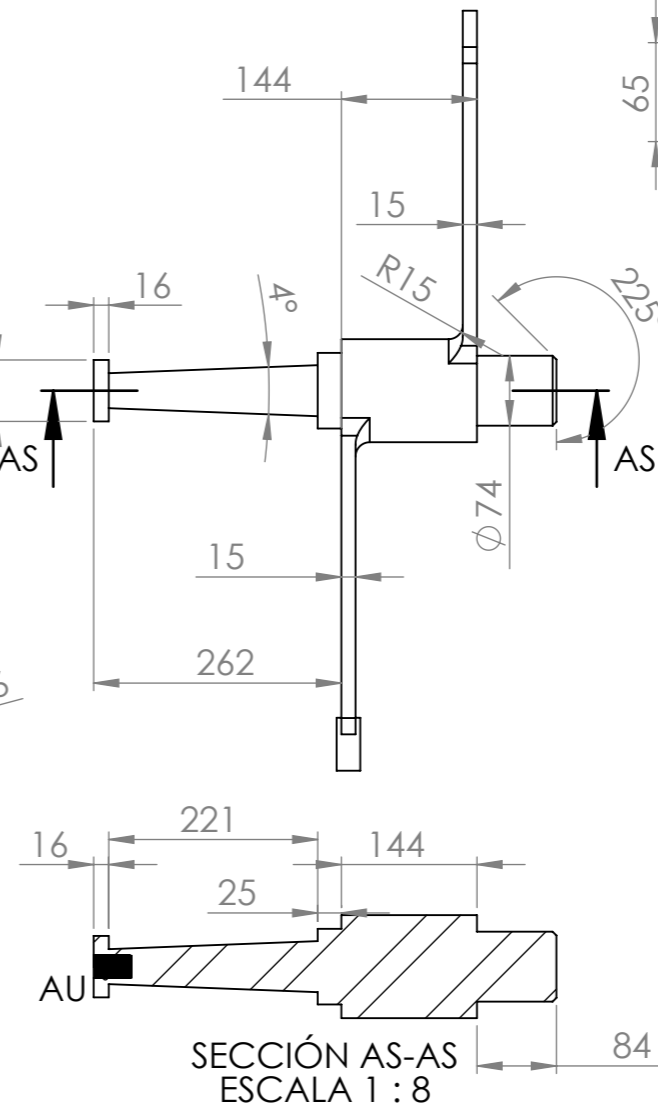
PIEZA X ESCALA 1:5



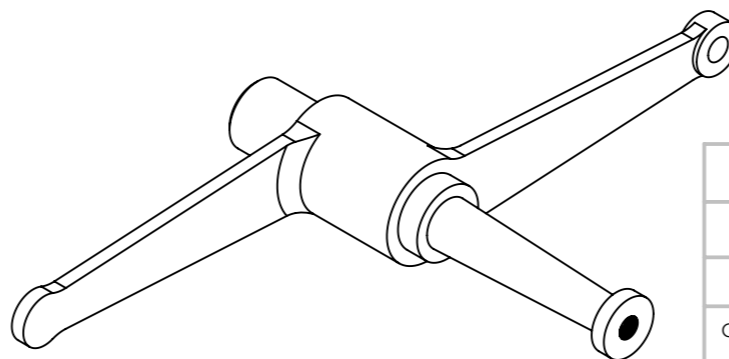
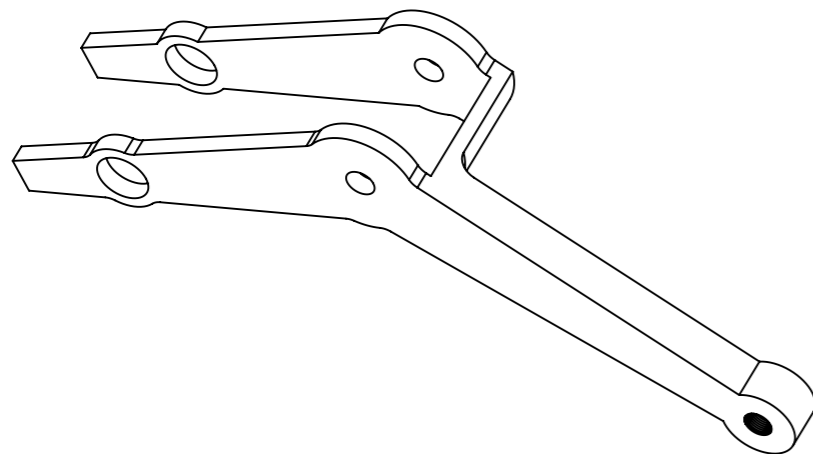
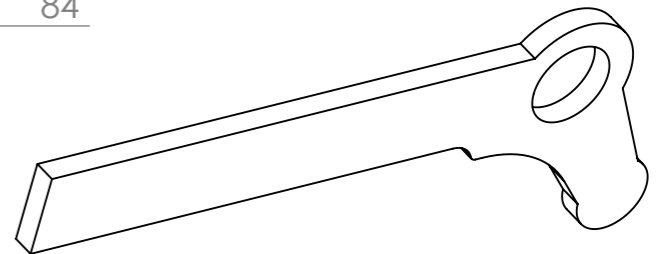
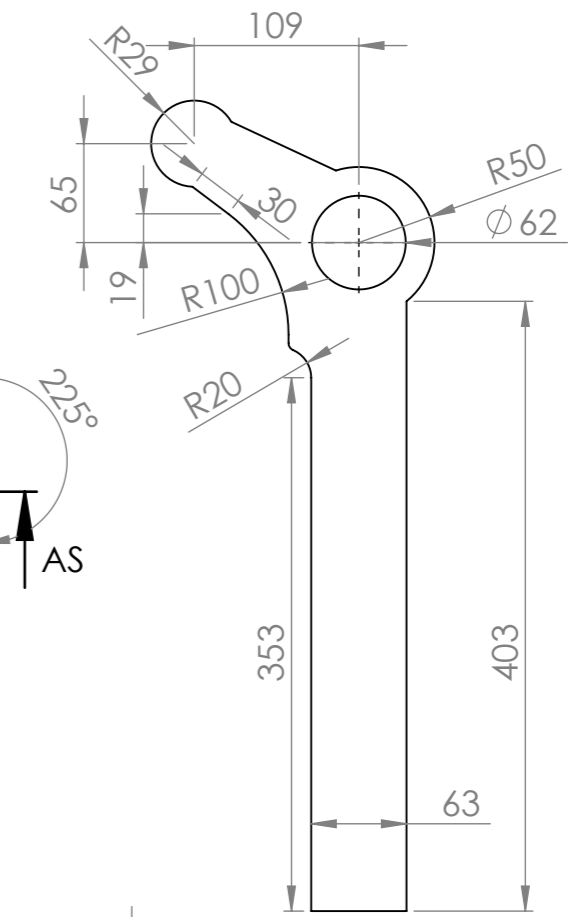
SECCIÓN AQ-AQ



DETALLE AU
ESCALA 4:1



SECCIÓN AS-AS
ESCALA 1:8



	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto N° 1.00
Título: ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN 3			Plano N° O, R, X

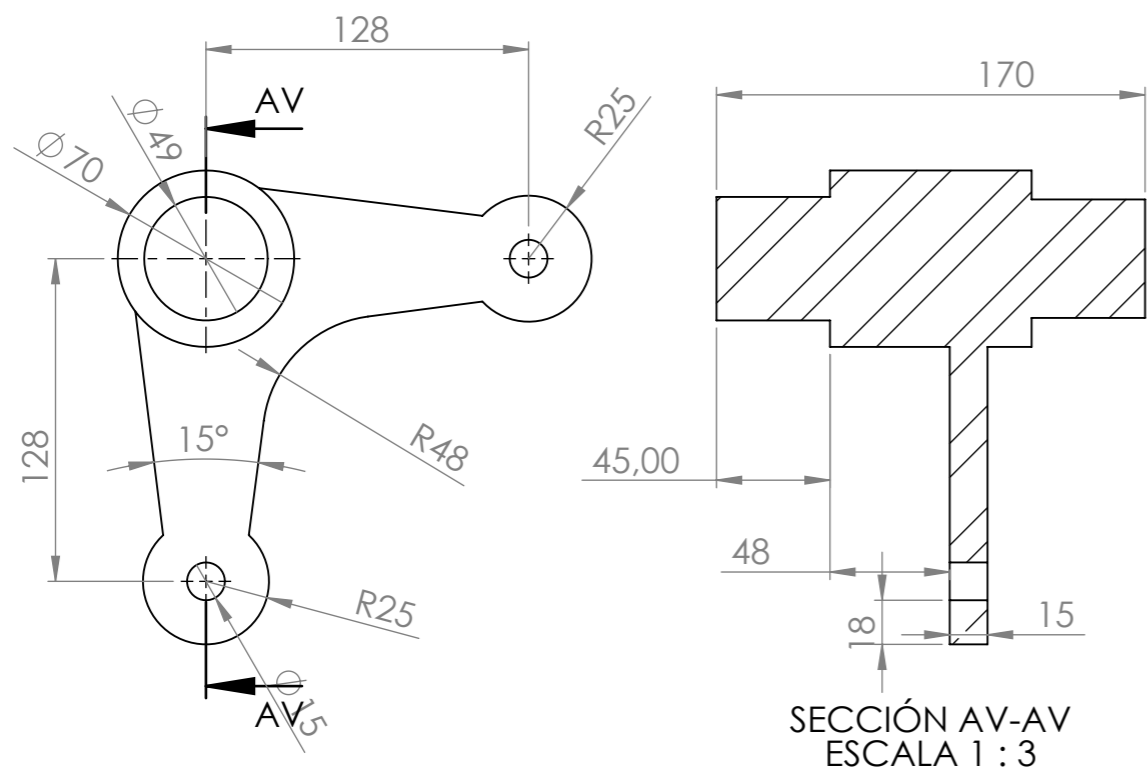


Escala S/E

Conjunto N°

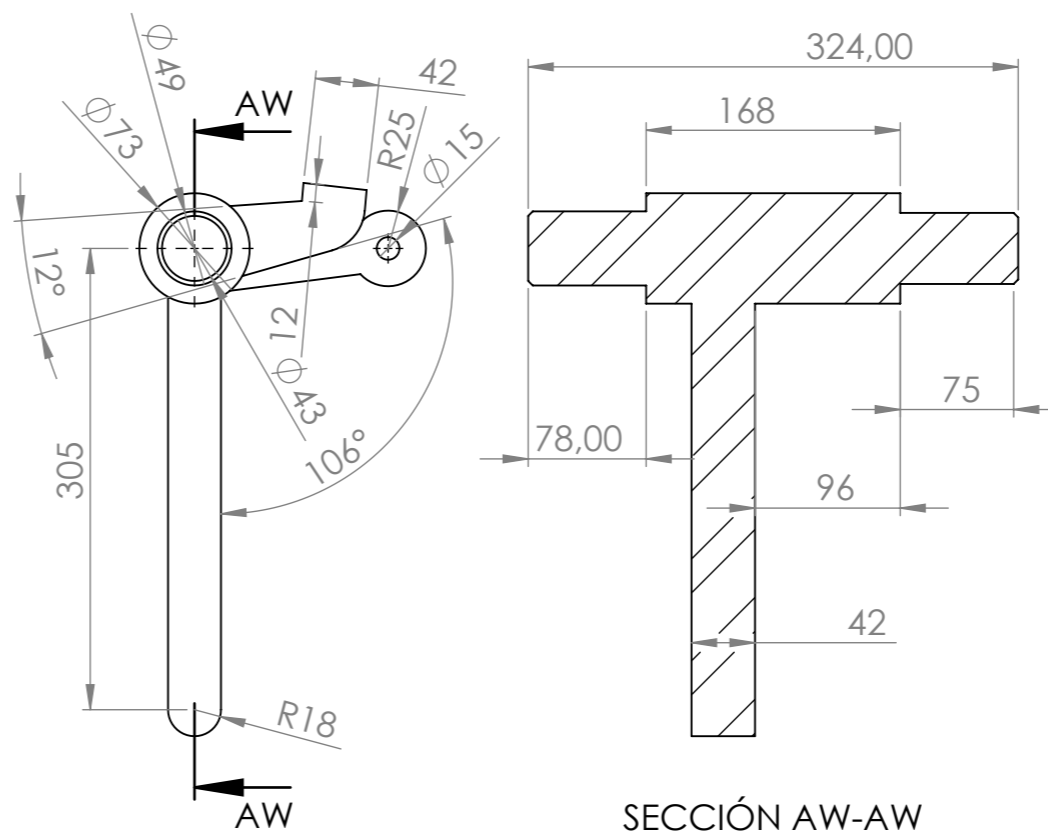
Plano N°

PIEZA t2 ESCALA 1:3



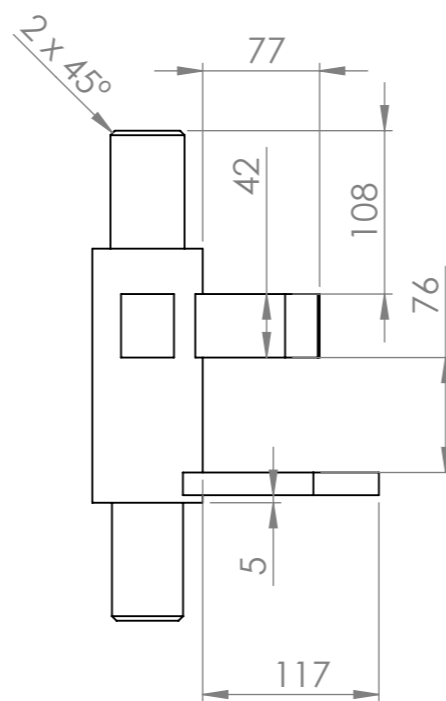
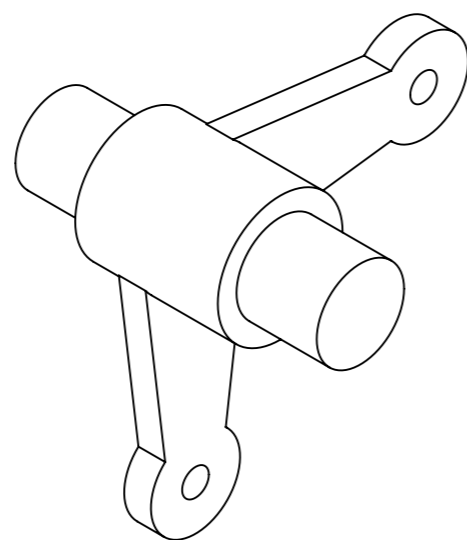
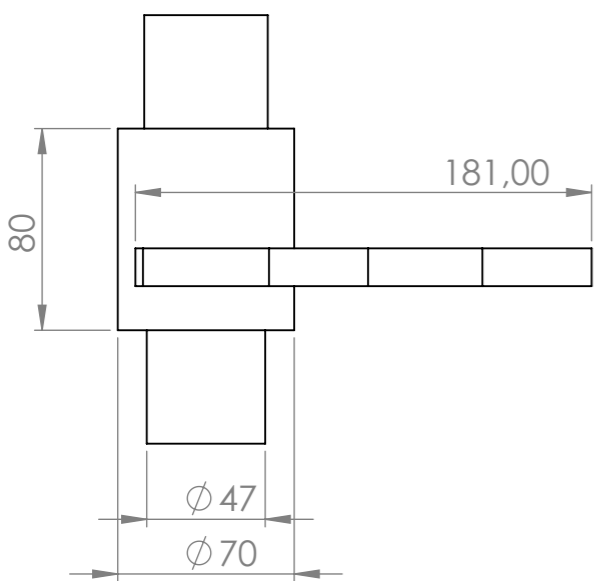
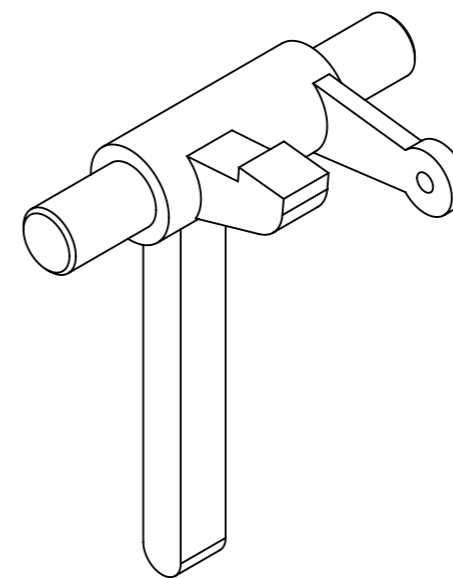
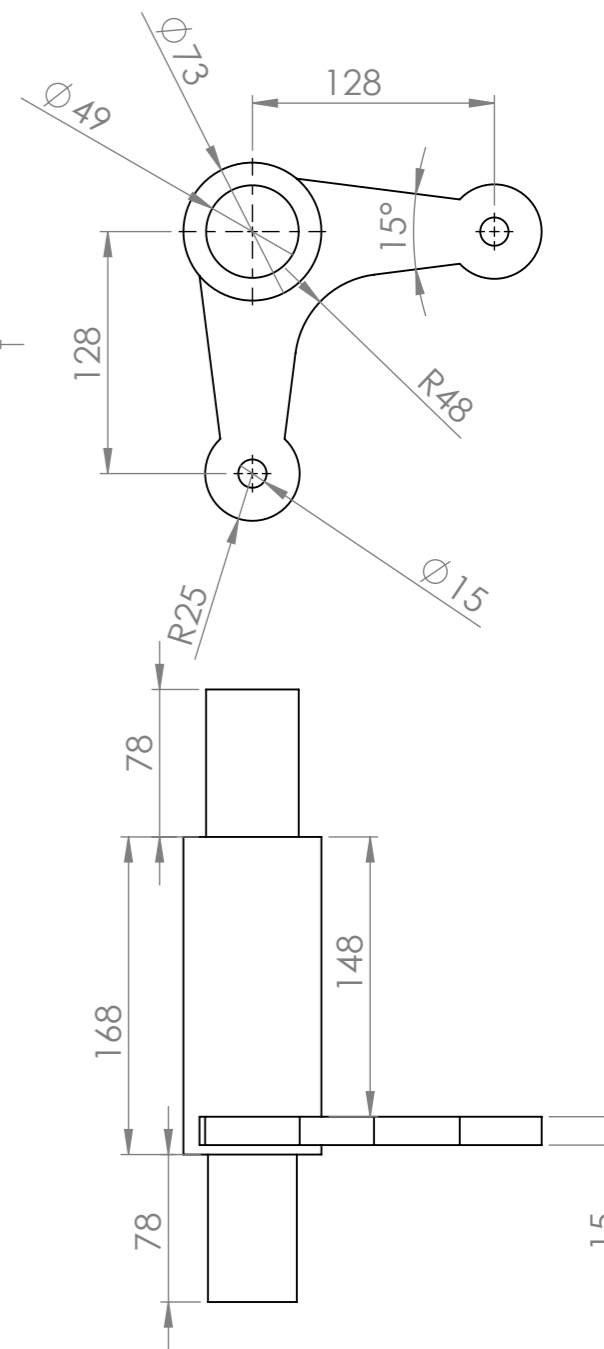
SECCIÓN AV-AV
ESCALA 1:3

PIEZA w ESCALA 1:5



SECCIÓN AW-AW

PIEZA t1 ESCALA 1:4



	Fecha	Nombre	FIRMA
Dibujado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Comprobado	01/04/2025	Felix Tovar Vera	
Conjunto: Martillo de vapor de J. Nasmyth 1843			Conjunto N° 1.00
Titulo: Plano de conjunto- Perspectivas			Plano N° t2 , w , t1



Escala S/E