

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de Tecnología Industrial

Inventos ingenieriles de la época romana que perduran hasta nuestros días

Autor: Jaime Ortega Durán

Tutor: Francisco Colodro Ruiz

**Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado en
Ingeniería de Tecnología Industrial

Inventos ingenieriles de la época romana que perduran hasta nuestros días

Autor:

Jaime Ortega Durán

Tutor:

Francisco Colodro Ruiz

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Inventos ingenieriles de la época romana que perduran hasta nuestros días

Autor: Jaime Ortega Durán

Tutor: Francisco Colodro Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer a todo el personal docente y no docente de la Escuela por hacer de esta mi segunda casa, si no la primera, por todas las horas que he pasado en este lugar que ha conseguido que le coja cariño y que sienta su ausencia cuando por los motivos sanitarios no he podido ir, que será un preámbulo de cuando abandone esta etapa de mi vida y continúe.

Jaime Ortega Durán

Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2021

Resumen

Este trabajo de fin de carrera trata sobre los inventos ingenieriles que en la época romana se desarrollaron e inventaron y, que a pesar de todos los avances ingenieriles que han ido transcurriendo hasta nuestros días, no ha modificado la esencia del invento. La manera de comunicarnos ha cambiado, ahora existen teléfonos, redes sociales. El transporte ha evolucionado, coches, aviones, cohetes... Y muchos más desarrollos, pero el modo de transportar agua sigue siendo una tubería. Para levantar pesos se sigue usando una grúa. Ya los romanos usaban suelo radiante para calentar una habitación. El modo de unir bloques en edificaciones sigue siendo el hormigón.

Aquí se verá su funcionamiento y su origen y como ha llegado a evolucionar sin llegar a cambiar la esencia misma por el cual fueron ideados estos inventos.

Abstract

This Final Degree Project is about the engineering inventions that were developed and invented in Roman times and, despite all the engineering advances that have been taking place until today, the essence of the inventions has not changed. The way we communicate has changed, now there are telephones, social networks. Transportation has evolved, cars, airplanes, rockets... And much more developments, but the way to transport water is still a pipe. A crane is still used to lift weights. The Romans already used underfloor heating to heat a room. The way to join blocks in buildings is still concrete.

In the paper it will be shown the way it works, its origin and how it has evolved without changing the very essence for which these inventions were devised.

Índice

Agradecimientos	ixx
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1. <i>Civilización Griega</i>	1
1.2. <i>Civilización Romana</i>	2
1.3. <i>Innovaciones técnicas en construcciones de Roma</i>	3
2 Tuberías	5
2.1. <i>Importancia del Agua para los romanos</i>	5
2.2. <i>Clasificación según el material</i>	7
2.2.1 Tubuli	7
2.2.2 Fistulae	7
2.3. <i>Unidad de medida</i>	9
2.4. <i>Evolución de la tubería</i>	10
2.5. <i>Proceso de fundición de tuberías modernas.</i>	11
2.5.1 Clasificación de moldes según el material del molde	11
2.5.2 Propiedades mecánicas	11
2.5.2 Tipos de fundición	12
2.6. <i>Extrusión de tuberías de PVC.</i>	14
2.6.1 Fabricación de PVC	14
2.6.2 Componentes de la máquina extrusora	15
3 Grúa	16
3.1. <i>Historia de la Grúa</i>	16
3.2. <i>Grúa romanas</i>	18
3.3. <i>Estructura de madera de la grúa romana</i>	21
3.3.1 Propiedades de la madera	22
3.3.2 Propiedades mecánicas de la madera	22
3.4. <i>La Polea</i>	22
3.4.1 Partes de la polea	22
3.4.2 Polea como mecanismo de transmisión	23
3.5. <i>Evolución de la Grúa</i>	25
3.6. <i>Grúas modernas</i>	26
3.6.1 Tipologías grúas modernas	26

3.6.2	Estructuras de las Grúas modernas	27
4	Hipocausto	29
4.1.	<i>Precursor</i>	29
4.2.	<i>Métodos de calefacción disponibles por los romanos.</i>	29
4.3.	<i>Invento de Cayo Sergio Orata</i>	31
4.4.	<i>Principios transferencia de calor.</i>	32
4.4.1	Conducción	32
4.4.2	Convección	32
4.4.3	Radiación	33
4.5.	<i>Mecanismo de transferencia de calor en el hipocausto.</i>	33
4.6.	<i>Construcción del hipocausto.</i>	34
4.7.	<i>Evolución del hipocausto</i>	38
4.8.	<i>Instalación de suelo radiante</i>	39
4.8.1	Fuentes de generación	40
5	Hormigón	42
5.1.	<i>Precursores al Hormigón romano</i>	42
5.2.	<i>Hormigón romano.</i>	44
5.3.	<i>Grandes obras romanas</i>	45
5.3.1	El Coliseo	45
5.3.2	Aqua Claudia	46
5.3.3	Via Apia	47
5.3.4	Otras grandes obras romanas	48
5.4.	<i>Compuestos del Hormigón romano</i>	49
5.5.	<i>Evolución del Hormigón.</i>	52
6	Conclusión	54
	Referencias	55
	Bibliografía	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Fechas de acontecimientos importantes en la época de la Antigua Grecia	2
Tabla 2–2. Fechas de acontecimientos importantes en la época de Roma	3
Tabla 2–3. Relación Longitud y peso según Vitruvio. Construcción de tuberías de plomo	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema red de abastecimiento. José Manuel De La Peña Olivas	
Sistema Romanos de Abastecimiento de Aguas. Fig. 4	6
Figura 2-2. Figura 0-1 Distribuidor de agua según la idea vitruviana. José Manuel De La Peña Olivas	
Sistema Romanos de Abastecimiento de Aguas. Fig. 6	6
Figura 2-3. Distribución según el método de Agripa José Manuel De La Peña Olivas	
Sistema Romanos de Abastecimiento de Aguas. Fig.7	7
Figura 2-4. Curvado de lámina de plomo. Fuente: http://aragonromano.ftp.catedu.es/canaliza.htm	8
Figura 2-5. Sellado de la tubería de plomo. Fuente: http://aragonromano.ftp.catedu.es/canaliza.htm	8
Figura 2 6. Tubería de fundición del Palacio de Versalles	
Fuente: https://www.pamline.es/tubería-fundicion-traves-historia	10
Figura 2-7. Tubería de hormigón.	
Fuente: http://www.bortubo.com/inicio/productos-tubo_ha__%C3%B8_1800-164.aspx	10
Figura 2 8. Tubería de acero	
Fuente: https://www.dincorsa.com/blog/tuberias-acero-tipos-caracteristicas-aplicaciones/	10
Figura 0-9. Microestructura fundición blanca. Fuente: https://www.ucm.es/atlasmetalografico/f3	12
Figura 2-10. Diagrama fundición blanca. Fuente: http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/fundiciones-blancas/	12
Figura 2-11.: Distintos tipos de fundiciones grises	
Fuente: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html	13
Figura 2-12. Microestructura fundición nodulares. Fuente: http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/fundiciones-nodulares/	13
Figura 2-13 Curva resistencia mecánica.	
Fuente: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html	13
Figura 2-14. Microestructura fundición maleables	
Fuente: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html	14
Figura 2-15 Superior monómero de cloruro de vinilo (VCM) Inferior polímero de policloruro de vinilo (PVC)	
Fuente: https://www.lifeder.com/policloruro-vinilo/	15
Figura 2-16. Máquina de extrusión. Fuente: https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html	15
Figura 3-1 Rampa para la elevación de bloques	
Fuente: https://www.iesmarenostrium.com/departamentos/tecnologia/mecaneso/mecanica_basica/operadores/ope_rampa.htm	16
Figura 3-2 Bloque de piedra griega siendo colocado	
Fuente: http://artehistoriaestudios.blogspot.com/2017/12/capitulo-31-la-construccion-en-la.html	17

Figura 3-3 Templo de Júpiter en Baalbek	
Fuente: https://www.aa.com.tr/es/mundo/baalbek-la-ciudad-con-los-templos-m%C3%A1s-magn%C3%ADficos-del-mundo/1045847	17
Figura 3-4 Partenón en Atenas. Fuente: https://historiaeweb.com/2018/02/08/partenon-de-atenas/	18
Figura 3-5 Ventaja mecánica Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Polea	18
Figura 3-6 Trispastos Fuente: http://www.wermac.org/rigging/lifting_rigging_part1.html	19
Figura 3-7 Pentaspastos Fuente: https://www.stlfinder.com/model/ancient-roman-construction-crane-pentaspastos-low-poly-3d-model-p1AqEZtj/2954212/	20
Figura 3-8 Polyspastos Fuente: https://revistadehistoria.es/polyspastos-las-gruas-de-roma/	20
Figura 3 9. Partes de un tronco. Fuente: http://www.informatizadas.blogspot.com/2015/03/que-edad-tiene-ese-arbol-bianca-denisse.html	21
Figura 3-10 Partes de una polea Fuente: https://rockbotic.com/blog/maquinas-simples-la-polea-parte-1/	23
Figura 3-11. Polea fija Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Polea	24
Figura 3-12 Polea móvil. Fuente: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/22_la_polea.html	24
Figura 3-13. Polipasto Fuente: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_polipasto.htm	24
Figura 3 14. Torno acoplado a sistema de poleas Fuente: https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual/mod/page/view.php?id=25207	24
Figura 3-10 Grúa moderna. Fuente: https://www.amazon.es/Top-Race-Excavadora-Carretilla-elevadora/dp/B07YSX5DQB	25
Figura 3-11 Grúa de vapor Fairbairn. Sevilla Fuente: https://es.foursquare.com/v/gr%C3%BAa-fairbairn/50f2905472da143f82cfe496	25
Figura 3-17. Triángulo sometido a esfuerzos externos. Fuente: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/521_la_triangular.html	27
Figura 3-18. Cuadrado sometido a esfuerzos externos. Fuente: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/521_la_triangular.html	27
Figura 3-19. Cuadrado deformado por esfuerzos externos. Fuente: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/521_la_triangular.html	27
Figura 3-20. Cuadrado con triangulación. Fuente: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/521_la_triangular.html	27
Figura 3-21. Métodos de triangulación para vigas reticuladas Fuente: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5718/mod_resource/content/1/Tema_15.Estructuras_triangularadas.pdf	27
Figura 4-1 Brasero romano. Museo de Teruel. Fuente: http://museo.deteruel.es/museoprovincial/colecciones/epoca-romana/brasero/	30
Figura 4-2. Hipocausto con cortes de sección. Fuente: https://nergiza.com/hipocausto-el-suelo-radiante-con-mas-de-2000-anos/	31

Figura 4-3 Horno del Hipocausto. Fuente: https://domus-romana.blogspot.com/2019/12/hypocaustum-la-calefaccion-domestica-en.html	34
Figura 4-4. Suelo elevado con columnas rectas formado por piezas Fuente: https://lowcostporelaire.com/blog/119_hipocausto-calefaccion-romanos	35
Figura 4-5 Hipocausto de unas termas de Mérida (Badajoz). Fuente: https://www.glosarioarquitectonico.com/glossary/hipocausto/	35
Figura 4-6 Tegulae mammatae Fuente: https://domus-romana.blogspot.com/2019/12/hypocaustum-la-calefaccion-domestica-en.html	36
Figura 4-7 Tubuli latericii Fuente: https://domus-romana.blogspot.com/2019/12/hypocaustum-la-calefaccion-domestica-en.html	37
Figura 4-8. Clavi coctile Fuente: https://domus-romana.blogspot.com/2019/12/hypocaustum-la-calefaccion-domestica-en.html	37
Figura 4-9. Caldarium Fuente: https://malboticum.wordpress.com/category/entradas/	38
Figura 4-10 Gloria Fuente: http://www.aldeadelpinar.com/arqui/gloria/gloria.html	38
Figura 4-11. Esquema suelo radiante Fuente: http://solencoop.com/instalaciones-de-suelo-radiante/	39
Figura 4-12. Tuberías de suelo radiante sobre plancha aislante. Fuente: http://www.ingeosolar.com/suelo-radiante/6-elementos-clave-suelo-radiante-mas-eficiente/	40
Figura 4-13. Caldera de condensación con válvula mezcladora. Fuente: https://www.mundohvacr.com.mx/2018/11/calefaccion-por-suelo-radiante-criterios-de-diseno-y-calculo/	40
Figura 4-14. Esquema sistema aerotérmico. Fuente: https://www.sueloradiantealbacete.es/que-es-el-suelo-radiante-y-la-aeroterminia/	41
Figura 5-1. Mural de Tebas. Fuente: http://tecnologiadelhormigonhc.blogspot.com/2014/09/historia-del-hormigon-y-cemento-acarril.html	43
Figura 5-2. Opus quadratum Fuente: https://www.haikudeck.com/roma-education-presentation-5e43e8d11d	44
Figura 5-3. Opus latericium Fuente: https://www.haikudeck.com/roma-education-presentation-5e43e8d11d	44
Figura 5-4. Acueducto de Segovia Fuente: https://historiaespana.es/edad-antigua/acueducto-de-segovia	44
Figura 5-5. Recreación del Coliseo con la gran estatua de Nerón. Fuente: https://azowo.ru/es/vse-oro-zetkah/skolko-stroilsya-kolizei-v-rime-kolizei-odno-iz-novyh-chudes-sveta/	45
Figura 5-6. Sección de la cávea del Coliseo. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Coliseo	46
Figura 5-7. Acueducto Aqua Claudia. Fuente: http://augusto-imperator.blogspot.com/2017/12/el-acueducto-aqua-claudia.html	46
Figura 5-8. Via Appia. Fuente: https://romesite.com/via-appia-antica.html	47
Figura 5-9. Sección de calzada romana. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Calzada_romana#cite_note-2	47
Figura 5-10. Recreación Foro Romano. Fuente: https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-antigua/20210724/7611824/romanos-medidas-anticorrupcion.html	48
Figura 5-11. Arco del triunfo de Constantino. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Arco_de_triunfo	48

Figura 5-12. Columna de Trajano. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Columna_de_Trajano	48
Figura 5-13. Recreación Circo romano. Fuente: https://www.levante-emv.com/valencia/2013/11/25/circo-romano-valencia-cobra-vida-12848566.html	49
Figura 5-14. Teatro romano de Mérida. Fuente: https://www.elconfidencial.com/viajes/2020-10-14/teatros-romanos-desconocidos-de-espana_2787027/	49
Figura 5-15. Piedra Caliza Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Caliza	49
Figura 5-16. Arcilla Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-554783050-arcilla-calcinada-saco-23-kilos-_JM	50
Figura 5-17. Arena Fuente: https://www.pierreetsol.com/vente/es/arena/1972-lommel-arena-para-mortero-cemento-solado-concreto-en-pierre-suelo.html	50
Figura 5-18. Puzolana volcánica negra. Fuente: https://www.burespro.com/product/puzolana-negra/	51
Figura 5-19. Horno de caliza Fuente: http://proyectofresco.blogspot.com/2010/06/el-calero-el-horno-de-cal.html	51
Figura 5-20. Catedral de Salisbury Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Catedral_de_Salisbury	52
Figura 5-21. Faro de Eddystone Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/John_Smeaton	52
Figura 5-22. Clinker Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Cl%C3%ADnker	53
Figura 5-13. Izda. Joseph-Louis Lambot. Der. Barco de hormigón armado Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Fig-ura-1-Joseph-Louis-Lambot-e-seu-barco-de-cimento-reforcado-com-ferro_fig1_351591299	53

Notación

a.C. Antes del Nacimiento de Cristo
d.C. Después del Nacimiento de Cristo

1 INTRODUCCIÓN

Los inventos que se van a describir en este trabajo son aquellos que idearon los romanos y perduran hasta nuestros días, con algunas modificaciones. Para tener un contexto general de la época en la que se usaban, se realizará una breve descripción del momento histórico en el que estos inventos fueron creados.

El nacimiento de la escritura marca el comienzo de la Edad Antigua, entorno al año 4000 a.C. y con la caída del Imperio Romano de Occidente en el año 476 d. C. finaliza esta Edad de la Historia. Es en la Edad Antigua cuando surgen las primeras civilizaciones: Mesopotamia, Egipto, Grecia y Roma. Estas civilizaciones se encuentran en Europa (Grecia y Roma), zona septentrional de África (Egipto) y occidental de Asia (Mesopotamia). No por ello fueron las únicas civilizaciones que surgieron. En la zona oriental de Asia se formó la civilización china, una de las más antiguas. En la zona meridional de Asia, en la India, la civilización del valle del Indo. Al otro lado del Atlántico, en la región de Centroamérica se formaron unas civilizaciones conocidas como las mesoamericanas, la primera fue la olmeca.

1.1. Civilización Griega

La civilización griega se origina en las tierras circundantes del Mar Egeo, nordeste del Mar Mediterráneo, y varias islas que poblaban la región. La Antigua Grecia comienza con los Juegos Olímpicos antiguos en 776 a. C. aunque algunos historiadores incluyen la Edad Oscura dentro de esta civilización, a pesar de que de esta época no hay escritos, en este caso el inicio de la Antigua Grecia se remontaría a 1100 a. C.

El final también es motivo de controversia. Algunos historiadores consideran la muerte de Alejandro Magno (323 a. C.) como el final de la Antigua Grecia y el comienzo de un periodo helenístico, la otra versión defiende la conquista por parte de los romanos en 146 a. C., que se toma la fecha de la batalla de Corinto, como el fin de la Antigua Grecia.

La Antigua Grecia se divide en varios periodos. Comienza por la Edad Oscura. Los conocimientos que se tienen de esta época son gracias a textos secundarios, y finaliza con los primeros Juegos Olímpicos antiguos. Este acontecimiento marca el inicio de la Época arcaica. En este periodo se crea el alfabeto griego a partir del alfabeto fenicio. Los habitantes estaban divididos en polis, que eran ciudades-estados. Esta fragmentación fomentó las guerras entre ellas, debido al incremento de la población y la falta de tierras para el cultivo. El intento de Darío I, rey de reyes persa en el siglo V a. C., de conquistar a Grecia, da comienzo al periodo de Grecia clásica. Con esta amenaza externa Atenas y Esparta, principales polis griegas, se unieron para frenar la invasión. En la batalla de Maratón (490 a. C.) se decidió la victoria por el lado griego. Pero Jerjes I, hijo de Darío I, lo volvió a intentar y gracias a la batalla de las Termópilas, que ganaron los persas, pero les dio tiempo a los griegos a prepararse y poder rechazar por segunda vez el intento de invasión. Tras esto Atenas formó la Liga de Delos (478 a. C.) y la Liga del Peloponeso (550 a. C.) la comandaba Esparta. Estas ligas eran alianzas militares. En este periodo continuó las guerras entre las polis griegas y las Ligas, que fueron cambiando la hegemonía de Grecia. Al final del periodo, Alejandro Magno, el hijo de Felipe II rey de Macedonia, continuó la guerra que había iniciado su padre y llegó a crear un imperio inmenso que llegaba hasta la India. A su muerte en el año 323 a. C. el imperio se dividió en tres partes en las que sus generales gobernaban cada una. Con su muerte da comienzo a la Grecia helenística y tras varios conflictos finaliza el periodo con la invasión de los romanos en la batalla de Corinto en

146 a. C.

La cultura griega influyó de manera significativa a la cultura romana y está a la cultura de occidente, debido a este hecho, occidente le debe un reconocimiento importante a la cultura griega.

Tabla 2–1. Fechas de acontecimientos importantes en la época de la Antigua Grecia

Fechas	Acontecimiento
1100 a. C.	Inicio de la Edad Oscura
Siglo VII a. C.	Inicio Época arcaica
Siglo VII a. C.	Creación del alfabeto griego
776 a. C.	Primeros Juegos Olímpicos antiguos
Siglo V a. C.	Inicio Época clásica
490 a. C.	Batalla de Maratón. Rey persa Darío I pierde contra los atenienses
480 a. C.	Batalla de las Termópilas entre Jerjes I, hijo de Darío I, contra los espartanos de Leónidas
478 a. C.	Creación de la Liga de Delos
323 a. C.	Muerte de Alejandro Magno
Siglo IV a. C.	Inicio Grecia helenística
146 a. C.	Batalla de Corintio. Invasión romana

1.2. Civilización Romana

Roma surge en la rivera del río Tíber, en el año 753 a.C., según la tradición, fundada por los hermanos Rómulo y Remo. En los inicios, Roma era una ciudad-estado con una monarquía como forma de gobierno, el cambio de modelo político surgió con el destierro del último rey Tarquinio el Soberbio (509 a.C.), tras lo cual se instauró la República como forma de gobierno. El periodo de la República abarca desde el año 509 a.C. hasta el 27 a.C. Durante este periodo Roma comienza a expandirse conquistando la península itálica y tuvieron que enfrentarse a la República de Cartago en una serie de guerras llamadas las Guerras Púnicas (264 a. C. – 146 a. C.). En los momentos finales de la República, el que ostentaba el mando de esta era Julio César. Nombró como sucesor a Octaviano, pero con el asesinato de Julio César, originó una serie de guerras civiles por el poder, hasta que el senado le ofreció el poder al sucesor escogido por Julio César. Pero este instauró el Imperio Romano y paso a llamarse Octavio Augusto. El Imperio duró desde el 27 a.C. hasta el 476 d.C. Aunque este sería el Imperio Romano de Occidente, ya que el emperador Diocleciano dividió el imperio en dos en el año 285 d.C. El imperio Romano de Occidente, gobernado desde Roma y el Imperio Romano de Oriente, gobernado desde Bizancio, que luego paso a llamarse Constantinopla y ahora es la actual Estambul. A la muerte de Teodosio I (395 d. C.), el hijo mayor Arcadio pasó a gobernar el de Oriente y el menor, Honorio, el de Occidente. La caída del Imperio Romano de Occidente viene marcada por la decadencia vivida en el seno del Imperio y las invasiones bárbaras. El general bárbaro Odoacro se hizo con el gobierno de Roma (476 d. C), cuando destituyó y desterró a Rómulo Augusto, último emperador Romano.

Los romanos crearon a partir de una ciudad-estado uno de los mayores imperios de la historia de la humanidad. Esto se debe principalmente a su buena organización y más adelante a la profesionalidad de su ejército, muchas veces reconocido como el mejor ejército del mundo. Pero esto constituía un motivo de expansión, luego había que preservar y organizar las tierras conquistadas. Esto fue posible por sus carreteras que comunicaban todo el territorio romano y agilizaba los desplazamientos, desde hombres a materiales y comida. También al ejército de funcionarios que mantenían engrasado los engranajes del imperio para que este no se desmoronara y su gran organización que tenían de todo su territorio.

Tabla 2–2. Fechas de acontecimientos importantes en la época de Roma

Fechas	Acontecimiento
753 a. C.	Surge la ciudad de Roma
509 a. C.	Destierro de Tarquinio el Soberbio
Siglo VI a. C.	Inicio de la República
264 a. C. – 146 a. C.	Guerras púnicas
46 a. C.	Julio César es nombrado dictador por el senado
44 a. C.	Muere Julio César
24 a. C.	Primer emperador César Augusto
285 d. C.	Diocleciano divide la administración del imperio en dos
395 d. C.	Muerte de Teodosio I. División efectiva del imperio
476 d. C.	Odoacro toma Roma

En el repaso histórico de la civilización griega y romana se ha observado que la mayoría de acontecimientos por los que se rige la historia y se clasifica, es por las guerras y batallas en las que están involucradas estas civilizaciones. Pero el avance de la humanidad ha sido principalmente por los inventos e innovaciones que surgían en esas civilizaciones. Muchas veces esos mismos avances estaban condicionados por la guerra, lo que ocasionaba que los inventos fuesen principalmente bélicos.

A pesar de la naturaleza bélica de la historia de los pueblos, muchas innovaciones no perseguían un fin bélico del invento, sino un avance para el bienestar del hombre. Estos avances tecnológicos fueron los que permitieron al hombre vivir mejor con el paso de los tiempos y poder dedicarse a otros menesteres debido a la cantidad de tiempo ahorrada y comodidad que le llevaron a despreocuparse de asuntos que ya estaban resueltos

1.3. Innovaciones técnicas en construcciones de Roma

Los romanos era una civilización que cuidaba de sus ciudadanos, debido a esta atención que le dedicaban fueron surgiendo inventos para cubrir estas necesidades. Uno de los que tuvieron mayor repercusión fue la red de conducción de agua que usaron para llevarla a la ciudad. Los acueductos que construyeron los romanos son una obra magnífica de ingeniería y que algunos perduran hasta nuestros días. El primer acueducto que se construyó fue el Aqua Appia data del año 312 a. C. El causante de que perduren algunas construcciones se debe al hormigón que usaban, este formaba una pasta resistente y compacta, y como se puede comprobar no empeoraba sus capacidades con el paso del tiempo. Los acueductos no solo estaban contruidos de manera duradera sino también con un grado de precisión en la inclinación del acueducto para que el agua pudiese fluir en todo momento y llegase a la ciudad. " La pendiente con que llega el agua a una red... sin tener en cuenta las pérdidas de carga que se producen... debe ser tal que la velocidad en el canal sea menor de 0,5 m/s" (De la Peña Olivas, José Manuel, 2010). Los arquitectos debían realizar la medición con precisión, ya que la longitud de un acueducto es de kilómetros, que atraviesa montañas y valles, y en todo momento se debe mantener la inclinación. La inclinación que primero se empezó a aplicar a los acueductos la podemos saber de Vitruvio (VIII, 6) "lecho de la corriente de agua estará nivelado con una caída de medio pie por cada cien pies de longitud", "Que da un valor de: ... 0.021%" (De la Peña Olivas, José Manuel, 2010). [1]

Las termas eran en un inicio privadas, se encontraban en las villas de los ciudadanos romanos ricos. En el siglo I a. C. se construyó las termas públicas, pero tenían un costo. Su entrada estaba disponible para todo aquel que quisiera usarlo. Gracias a esto se cuidó la higiene de los ciudadanos, y consistía en un lugar de encuentro para la población. Las termas constaban de diferentes habitaciones, una como vestuario para dejar la ropa, y luego estaban las salas de las piscinas, principalmente tres. El caldarium contenía una piscina de agua caliente, también

contaba con el hipocausto (suelo caliente). Una piscina templada se encontraba en una sala que se llamaba tepidarium. Y la sala con agua fría se llamaba frigidarium. En estas salas se aseaban los ciudadanos romanos y hacían vida social.

Otro invento que impactó en la higiene de la población fue la construcción de una red de alcantarillado para evacuar los desperdicios que se originaban en la ciudad y así poder mantenerla más limpia y evitar enfermedades causadas por la suciedad. Las cloacas recorrían la ciudad para que se depositasen los desechos. Cuando se construyeron las letrinas públicas, estas se comunicaban con el alcantarillado para evacuar. La Cloaca máxima hace referencia al alcantarillado de la ciudad de Roma, siendo esta la primera en construirse, en torno al año 600 a. C. por orden del rey Lucio Tarquinio Prisco.

Otro invento que se usaba para la construcción de los acueductos, a parte del hormigón, era la grúa. Gracias a este invento pudieron elevar los bloques de piedra para realizar esas inmensas construcciones. Ya no dependían de construir una rampa para elevar las piedras, y por la situación de algunos acueductos, estos hubiesen sido imposibles de construir si los romanos siguiesen dependiendo de la rampa. Con las grúas, la capacidad constructora de los romanos se incrementó, pudiendo realizar obras de mayor envergadura.

La expresión “Todos los caminos llevan a Roma” proviene de que todos los caminos partían de Roma. Los romanos crearon una inmensa red de carreteras, muchas de ellas se pueden encontrar hoy en día. Estas también debían ser niveladas para facilitar el tránsito por ella. Esta red de carreteras hizo uso del hormigón. Gracias a estas carreteras el tránsito por todo el territorio romano se podía realizar de manera ágil. Esto ayudó al comercio, comunicaciones y a la expansión de Roma. Las calzadas romanas tenían que salvar valles, ríos y muchos otros obstáculos. Para lograrlo, construyeron puentes para cruzar. Los puentes, al igual que los acueductos, fueron construidos para aguantar el paso de los tiempos. Hoy en día se puede contemplar puentes romanos y hasta algunos siguen en uso, como el puente romano de Córdoba (Andalucía, España).

2 TUBERÍAS

Según la Real Academia Española, la definición de tubería es "Conducto formado de tubos por donde se lleva el agua, los gases combustibles" y tubo "Pieza hueca, de forma por lo común cilíndrica y generalmente abierta por ambos extremos"

Al considerar estas definiciones y se puede apreciar que es de los inventos que menos ha cambiado con el paso de los años. La idea de transportar fluidos por el espacio, de manera continua, sin depender de depósitos no ha cambiado. La solución que aportaron los romanos es la misma solución que se aplica hoy en día.

2.1. Importancia del Agua para los romanos

La importancia del invento viene de facilitar el acceso al agua potable a la población de las ciudades romanas, ya que esta es indispensable para la supervivencia del ser humano. Esto evitaba el transporte del agua por otros métodos más ineficientes o costosos, que empeoraría o despilfarraría el agua. Este invento, junto con otros realizados en las ciudades romanas, permitió que estuviesen más limpias y aseadas que las ciudades que por entonces poblaban la tierra, lo que permitió una vida más saludable para sus habitantes. Gracias a los acueductos, los romanos podían construir sus ciudades en lugares en los que les pareciese más convenientes. Esto le daba ventaja debido a que podían construir ciudades en lugares estratégicos, tanto militarmente como comercialmente. Esto ayudaría a la expansión de los territorios conquistados. Aunque muchas ciudades romanas se encuentran en la rivera de un río, tales como la misma Roma con el río Tíber, París con el río Senna (antigua Leutecia), Londres con el río Támesis (antigua Londinium) y otras muchas más, esto no quería decir que el agua del que se servían para su consumo fuese adquirida de estos ríos, ya que preferían traer aguas de lagos, manantiales u otras masas de agua. Esto se debía a que querían agua limpia que no estuviese contaminada por la agricultura, el ganado o la propia población.

En la figura 2-1 se aprecia como estaba organizada la red de abastecimiento. El objeto de estudio de este trabajo son las tuberías, por lo que se centrará en la distribución en la ciudad, ya que fuera de esta la manera de canalizar el agua era por medio de acueductos.

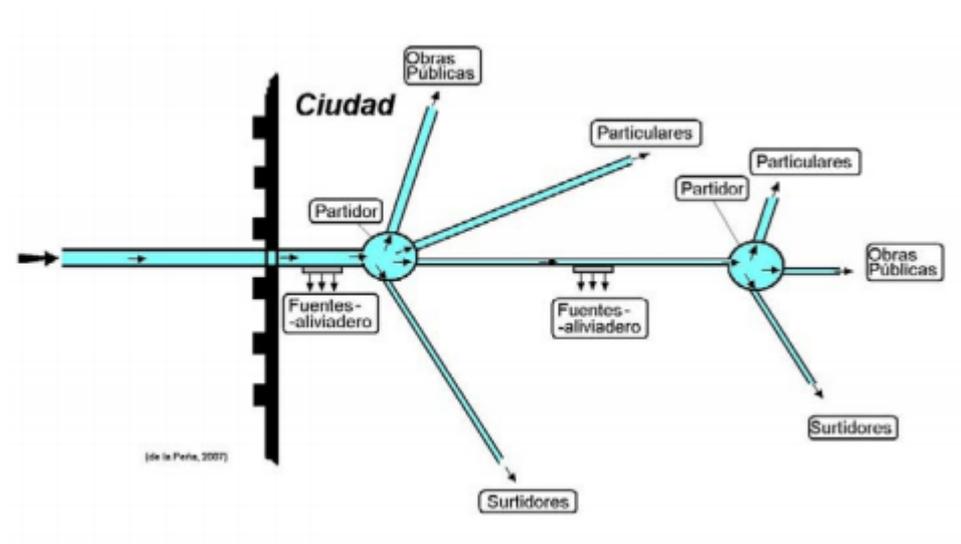


Figura 2-1. Esquema red de abastecimiento

Una vez llegaba el agua a la ciudad, procedía a la distribución para facilitar el acceso. La distribución del agua varió en el tiempo. Primero se seguía la manera en la que lo dispuso Vitruvio en su libro VIII capítulo 6, "Se construirá un depósito y tres aljibes, unidos a él para recibir el agua; se adaptarán al depósito tres tuberías de igual tamaño que repartirán la misma cantidad de agua en los aljibes contiguos". [2]Se aprecia en la Figura 2-2 el modelo que Vitruvio ideó. Cada tubería tenía un destino distinto, clasificado según su finalidad. El inferior, o al que se le dio mayor importancia, conducía el agua hacia surtidores de fuentes públicas, que eran aquellas de las que los ciudadanos bebían. La intermedia era las obras públicas, baños, termas... Por último, el agua que se suministraba a casas de particulares. Esta manera de distribución se realizaba para que el agua se administrase según su prioridad en caso de no haber agua suficiente para todos sus usos.

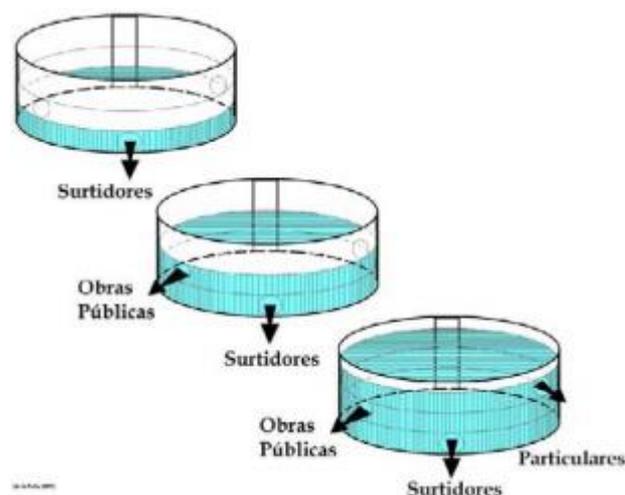


Figura 2-2 Distribuidor de agua según la idea vitruviana

Cuando la demanda de agua se incrementó, se tuvieron que realizar algunos cambios en la distribución. Los cambios vinieron por orden de César y de Augusto de la mano de Agripa que se encargó de ejecutar las obras que le fueron encomendadas. El esquema que surgió fue más complejo y no seguía la prioridad anterior, sino que pasó a una distribución igualitaria para todos. Pero se realiza una mayor división: concesiones del

emperador, partículas, cuarteles, obras públicas, fuentes ornamentales y surtidores. [1]

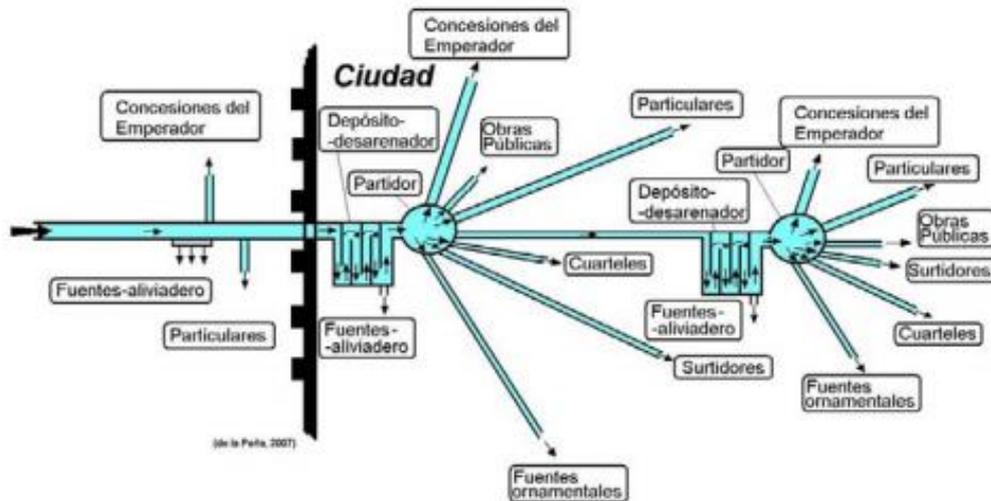


Figura 2-3. Distribución según el método de Agripa

2.2. Clasificación según el material

Uno de los textos más importantes para obtener las características es el Libro VIII de Vitruvio, donde se describe y expone toda la información sobre el agua para su uso. Desde el inicio de cómo y dónde captar el agua hasta su método de transporte y los materiales que se deben usar para realizarlo.

En el Capítulo VI se describen los dos tipos principales de tuberías que se fabricaban en esos momentos. Las cañerías podían ser de piedra o barro, estas recibían el nombre de "tubuli", o de metales, que se llamaban "fistulae", entre ellos el metal más usado eran el plomo y el cobre.

2.2.1. Tubuli

Dependiendo del desembolso que se quisiera realizar había varias opciones. En caso de querer ahorrar dinero se optaba por construir las tuberías de barro. Si se optaba por este método, las tuberías no debían de medir menos de dos dedos de grosor, se acoplaban por medio de lengüetas y para sellar estas uniones se usaba cal viva diluida en aceite.

Las dimensiones estaban comprendidas entre 16 y 20 centímetros de diámetro y grosor de 3,6 centímetros. La longitud que alcanzaban era entre 50 y 70 centímetros. Las tuberías de barro conservaban mejor el sabor del agua y era más salubre que la administrada por las tuberías de plomo. A esto se le añadía que el plomo es nocivo para la salud humana, ya que en las tuberías se origina la cerusa o albayalde que es tóxico. Si se quería una mayor pureza del agua se usaba las tuberías de barro. [2]

2.2.2. Fistulae

Conociendo estos inconvenientes para las tuberías de plomo, ser más costosas y que empeoraban el agua, ¿Por qué se usaban?

Su uso venía marcado por la eficiencia. Era más maleable, lo que permitía adaptar las tuberías, y por consiguiente algunas tuberías fueron fabricadas a medida para adaptarse al entorno en el que se iban a instalar. Gracias a las soldaduras, se conseguía reparar los casos de fisura y diversos problemas que pudiesen surgir. Y por último, estas tuberías aguantaban una mayor presión, se usaban en puntos de la red de tuberías en las que la presión era mayor, como los grandes sifones.

La fabricación de las "fistulae" recaía en los "plumbarii", además estos obreros se encargaban de su colocación, mantenimiento y reparación. El proceso de fabricación consistía en preparar un lecho de arena y obtener unas planchas rectangulares de plomo a partir de los lingotes. El lado del rectángulo que iba a ser la longitud de la tubería era el lado de mayor longitud. El ancho de la plancha era igual a la longitud de la circunferencia que formaría la tubería. El espesor de la tubería venía dado por la presión a la que iba a estar sometida la tubería para que no sufriese una rotura. En esta parte del proceso es cuando se ponía un sello en la tubería en la que se incluía un nombre o un patronímico. Estos sellos podían ser de diversa índole. Desde el nombre del fabricante, propietario, emperador o un personaje ilustre que había subvencionado la construcción. [3]

Tras este proceso se curvaba la lámina, usando por ello un mandril para dar forma cilíndrica a la lámina de plomo y se colocaba unas pestañas de arcilla en la que se vertía plomo fundido y en los extremos de la tubería se colocaba unos manguitos cortos. Estos servían de unión entre las distintas tuberías para formar la canalización y a la vez conseguía una hermeticidad y resistencia que en caso de uso normal funcionaba con seguridad.



Figura 2-4. Curvado de lámina de plomo

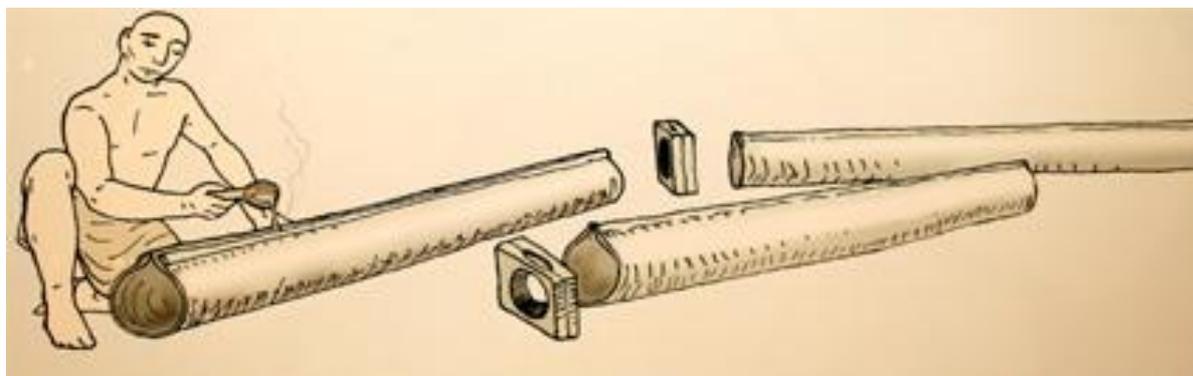


Figura 2-5. Sellado de la tubería de plomo

Vitruvio en su libro VIII, Capítulo VI describe las dimensiones y pesos que deben tener las cañerías. La dimensión mínima que dice es de cinco pies y la máxima de cien. En la siguiente tabla se muestra la relación de la longitud de las tuberías y el peso que Vitruvio le asigna. Vitruvio no especifica que el peso tenga que variar si el diámetro de la tubería es mayor o menor. Solo hace una correlación entre la longitud y el peso de la lámina con la que se formaría la tubería.

Tabla 2–2. Relación Longitud y peso según Vitruvio. Construcción de tuberías de plomo

Longitud (Pies)	Peso (Libras)
100	1200
80	960
50	600
40	480
30	360
20	240
15	180
10	120
8	100
5	60

Siendo un pie romano igual a 0.296 metros y una libra romana igual a 328.9 gramos.

"Los tubos reciben el nombre de la anchura de las láminas o planchas, según el número de dedos que tuvieran antes de adoptar la forma cilíndrica de los tubos". (Vitruvio VIII, VI) de esta manera Vitruvio nombra los diferentes tubos, dando importancia al diámetro y no a la longitud de dicha tubería.

2.3. Unidad de medida

Los romanos no usaban una unidad de medición del caudal que transcurría por la tubería, si no que la unidad venía dada por la sección de la tubería. La unidad que usaban se llamaba la "quinaria". La conversión en unidades de caudales actuales se hace de manera vaga y orientativa ya que las tuberías no tenían por qué estar al tope de su capacidad. Según Alejandro Egea Vivancos en su trabajo "Ingeniería Hidráulica en Carthago Nova: las tuberías de plomo", el valor unidad de la "quinaria" corresponde a unos 40,6 m³/día. Otros trabajos también dan una medida en torno a ese valor.

Frontino, senador romano del siglo I d. C. describe que no sabía quién fue el precursor de esa unidad, pero que debió ser en la época de Vitruvio, aunque este en sus escritos no lo mencionase. La quinaria tiene una dimensión de 5/4 dedos, que tiene un valor aproximado a lo que sería una tubería de 5 dedos según la forma de Vitruvio. Ese valor pasado a unidades de medidas se realizan los siguientes cálculos [4]:

$$1 \text{ dedo} = 1/16 \text{ pies} = 29,6/16 \text{ cm} = 1,85 \text{ cm}$$

$$1 \text{ quinaria} = \pi \cdot (5/4 \cdot 1,85)^2 / 4$$

2.4. Evolución de la tubería.

Las tuberías han ido cambiando, principalmente su material, con el paso de los años. Entorno al año 1500 se construyeron los primeros tubos de hierro fundido en Francia, principalmente se usaba el método de colada vertical. Se introducía el hierro fundido en un molde de la tubería para luego retirarlo cuando se hubiese solidificado. En la Figura 2-6 se aprecia una tubería de hierro fundido que se encontraba en el Palacio de Versalles. La red de agua que se realizó con estas tuberías fueron de una calidad excelente que tuvieron una vida útil de tres siglos



Figura 2-6. Tubería de fundición del Palacio de Versalles

Tras la invención del cemento de Portland, se comenzó a fabricar tubos de ese material mediante procesos industrializados. En Inglaterra en los años 1880 surgió los tubos de acero. Las tuberías de plástico surgieron en la mitad del siglo XX, siendo actualmente el plástico el material más usado para tuberías, en concreto el PVC, sin contar aquellos sectores que, por su presión, inclemencia y otras adversidades de diversas indoles usan tuberías de materiales más resistentes.



Figura 2-7. Tubería de hormigón.



Figura 2-8. Tubería de acero

En cuanto a su fabricación ha cambiado, debido a los materiales que se usan hoy en día. En el caso de los tubos de PVC se hace principalmente por extrusión, que obtiene una tubería sin costuras. Y en el caso de las tuberías de metal, principalmente de acero, también se ha conseguido realizar sin costuras y principalmente se divide en dos tipos: fabricación en frío y en caliente, consiguiendo distintas propiedades en cada proceso.

2.5. Proceso de fundición de tuberías modernas.

Uno de los métodos de fabricación de tuberías es la fundición. La fundición de hierro está compuesto por hierro (Fe) y carbono (C), el porcentaje del carbono en la fundición varía entre el 2 al 6.67%. En fundiciones aleadas se podría llegar a tener menos del 2% de carbono y ser consideradas como fundición.

La fundición es un proceso en el cual se vierte un metal fundido, al que se le llama colada, en un molde que previamente ha sido diseñado y creado con la forma y tamaño, sobredimensionado, para prever la contracción del metal cuando se solidifique y se enfríe. Existe una variedad de materiales que forman estos moldes. Pueden ser arena, yeso, cerámica y otros metales que tengan un punto de fusión más elevado que el metal que conforma la colada. Los otros tres materiales son refractarios, propiedad de los materiales para resistir altas temperaturas sin perder sus propiedades. Cuando se vierte el metal fundido, pasa a rellenar la cavidad del molde, hay que prever la densidad del metal en ese estado y que la forma que tenga el molde sea accesible para la poca fluidez del metal fundido. Tras su enfriamiento, en el que el metal ya ha solidificado, procede a retirar el molde. El material del molde usado influirá en las propiedades del material fundido, debido a esto hay una inmensa variedad de moldes.[5]

2.5.1. Clasificación de moldes según el material del molde

-Moldes de arena en verde: arena no endurecida por horno. No conserva su forma, se mezcla con un aglutinante para darle resistencia.

-Molde con capa seca: Dos métodos posibles. Se mezcla a una profundidad de 10 milímetros un compuesto que seca la arena, obteniendo una superficie dura. Otra forma de obtener el molde es rociando la superficie con un producto, para que cuando se aplique calor, la arena se endurezca. En los dos métodos se busca endurecer la superficie y que la humedad que contiene la arena se elimine.

-Moldes con arena seca: Moldes de arena que son cocados previamente a la fundición. En el vaciado mantienen su forma y no hay presencia de gas debido a la ausencia de humedad.

-Moldes de arcilla: requieren mucho tiempo su creación, debido a esto, el uso es menor. El uso principal es para trabajos grandes en el que compense crear un molde duradero.

-Moldes furánicos: se mezcla arena seca de grano agudo con ácido fosfórico (H_3PO_4), actúa como un acelerador. La mezcla con la resina furánica hace que el molde se endurezca.

-Moldes de CO_2 : Arena limpia se mezcla con silicato de sodio (Na_2SiO_3). El CO_2 es inyectado a presión en el molde, y este se endurece.

-Moldes de metal: Son para aleaciones de bajo punto de fusión. Con estas piezas se elimina trabajo de maquinado debido a la superficie lisa del molde.

-Moldes especiales. Son de diversa índole: plástico, cemento, papel, yeso, madera y hule, se usan para aplicaciones particulares.

2.5.2. Propiedades mecánicas

-Aspecto: El color gris oscuro es el predominante en la superficie exterior de la pieza, pero el color de fractura varía: oscura (fundición negra); gris (fundición gris) o atruchada (puntos claros sobre fondo oscuro, o viceversa) o de apariencia clara (fundición blanca).

-Peso específico: Fundición gris: 7 a 7,2 kg/dm^3 ; Fundición atruchada: 7,3 a 7,4 kg/dm^3 ; Fundición blanca: 7,4 a 7,6 kg/dm^3

-Temperatura de fusión: Fundición negra gris: 1200° C; Fundición blanca: 1100° C

-Fluidez: capacidad del metal en estado líquido de rellenar bien los moldes

-Contracción: Fundición blanca 16-18%; fundiciones grises 10%

-Resistencia a la tracción: Fundición gris 30-45 kg/mm²; fundiciones maleables 35-40 kg/mm²; fundiciones aleadas y esferoidales 70-80 kg/mm²

-Resistencia al choque. Fundiciones blancas frágiles y mala resistencia al choque. Fundiciones maleables y las de grafito nodular tiene mejor resistencia al choque. Fundiciones grises amortiguan las vibraciones, tiene buena resistencia al choque.

-Dureza: capacidad de resistencia a la abrasión, desgaste, penetración o rallado. Fundiciones grises 140 a 250 Brinell. Fundiciones blancas 350 a 400 Brinell

-Otras propiedades: generalmente frágiles. No dúctiles ni maleables, no pueden ser forjada, laminada ni extrusionada, deben ser por moldes.

2.5.3. Tipos de fundición

- Fundiciones Blancas:

La solidificación del material finaliza a una temperatura de 1148° centígrados, mediante una transformación eutéctica.

Aleación líq. (4,3%C) → Austenita (2,1%C) + Fe₃C (6,67%C)

El agregado eutéctico está formado por austenita y cementita, se le llama ledeburita y es el constituyente matriz de las fundiciones blancas. La ledeburita está formada por un 52% de cementita (6,67%C) y un 48% de austenita (2,1%C) lo que da un 4,3%C en la ledeburita.

Existe un concepto llamado carbono equivalente (CE), que se usa para el análisis de las fundiciones. Calculando con la siguiente fórmula $CE = \%C + \%Si/3 + \%P/3$

Las fundiciones blancas, según su carbono equivalente pueden ser hipoeutécticas ($2,1 < \%C < 4,3 \%$), eutécticas (4,3%C) o hipereutécticas (4,3%C a 6,67 %C). En la industria la fundición blanca que más interesa es la hipoeutéctica, al ser menos frágil que las anteriores.

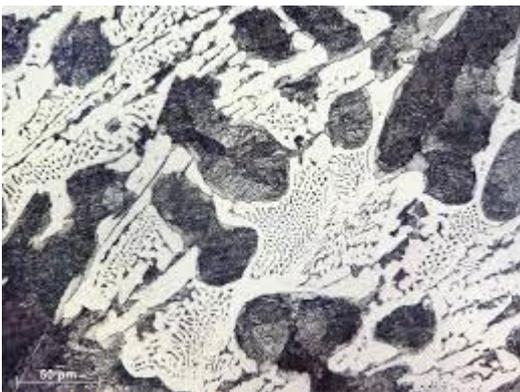


Figura 2-9. Microestructura fundición blanca

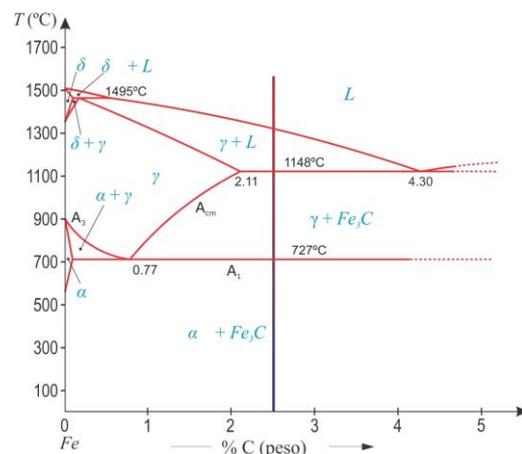


Figura 2-10. Diagrama fundición blanca

- Fundiciones grises:

Estas fundiciones son las más comunes en la industria, el grafito es la forma en la que se presenta el carbono. En la solidificación aparece austenita y grafito libre, no aparece ledeburita. Presenta un alto contenido en silicio (2-3%) y una velocidad lenta de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento es importante, ya que un mismo constituyente si se enfriase rápidamente se formaría fundición blanca. El grafito presente en la fundición puede aparecer de diversas maneras:

-láminas largas, buenas propiedades mecánicas. Tipo A

-rosetas, velocidad rápida de solidificación. Tipo B

-láminas grandes y gruesas, presente en las fundiciones hipereutécticas Tipo C

-interdendrítico, presente en las fundiciones hipoeutécticas o eutécticas, velocidad rápida de enfriamiento Tipo D

-interdendrítico, láminas finas y orientadas, presente en fundiciones muy hipoeutécticas. Tipo E

Las propiedades principales de las fundiciones grises son fáciles de maquinar, alta capacidad de templeado y gran fluidez, en contra es quebradizo y baja resistencia a la tracción.

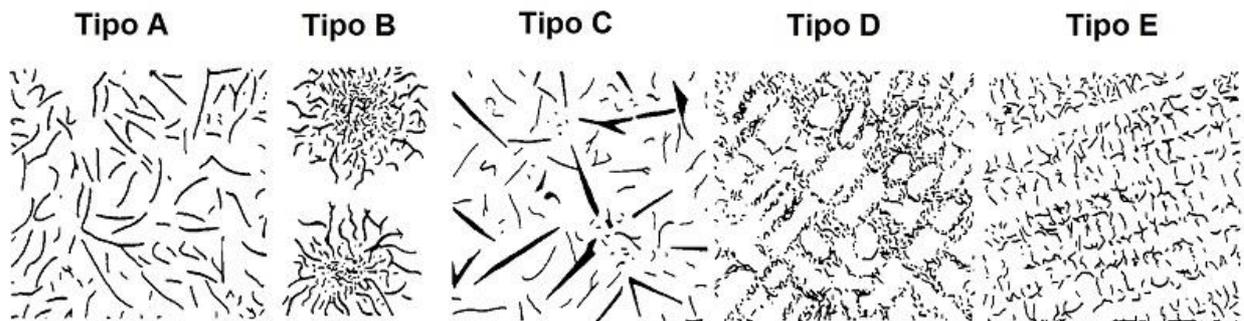


Figura 2-11. Distintos tipos de microestructuras de fundiciones grises

- Fundiciones nodulares

También llamadas esferoidales, son fundiciones grises dúctiles que presentan pequeñas esferas de grafito, esto se consigue al añadir magnesio (Mg). Esta estructura interna de la fundición le confiere una mayor resistencia mecánica (70-80 kg/mm²). Esta mayor resistencia mecánica se puede observar en la curva comparativa (Figura 2-13). (Spheroidal=esferoidal; Compacted=compacto; Flake=láminas o escamas).

Esta forma de fundición se emplea principalmente para la fabricación de tuberías y piezas del sector del automóvil.

La fabricación de las tuberías se realiza por colada centrifugada, en la que se usa la fuerza centrífuga para rellenar el molde, gira sobre un eje, y se vierte la colada del metal fundido.

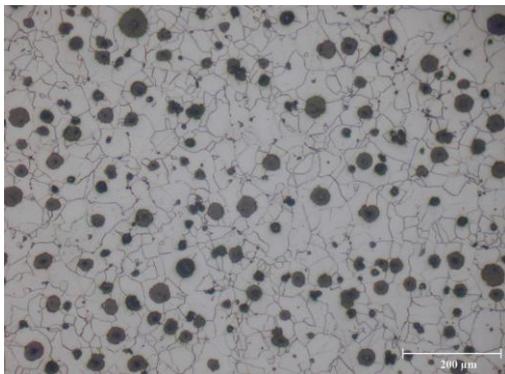


Figura 2-12. Microestructura fundición nodulares

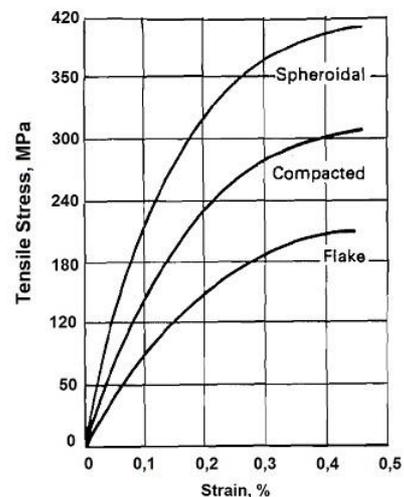


Figura 2-13 Curva resistencia mecánica

- Fundiciones atruchadas,

La matriz de la fundación está constituida por fundición blanca combinada con fundición gris. Estas presentan simultáneamente grafito y ledeburita, y por eso tiene su peculiar coloración moteada, parcialmente gris y blanco.

- Fundiciones maleables.

Difieren del resto de fundiciones, debido a que en un principio eran fundiciones blancas, pero tras un tratamiento térmico posterior se transforman en fundiciones grises. El tratamiento térmico tiene dos pasos: primero se llama grafitización, calentar la austenita entre 800 y 970° centígrados durante 20 a 30 horas. Se descompone la cementita en grafito. Segundo paso, con el enfriamiento se obtiene grafito compacto en una matriz de ferrita, ferrita-perlita o perlita, según la velocidad de enfriamiento.[6]

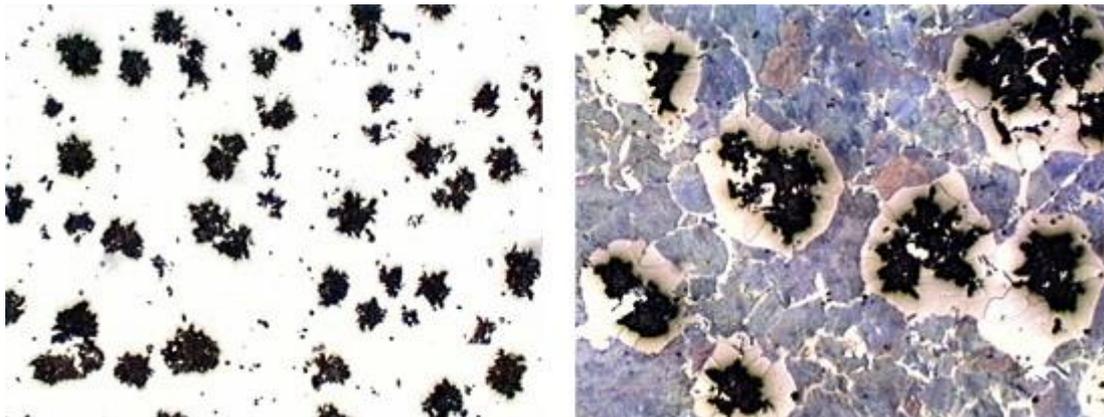


Figura 2-14. Microestructura fundición maleables

2.6. Extrusión de tuberías de PVC.

Las tuberías de PVC se fabrican por medio de una máquina extrusora. La acción que realiza una máquina extrusora es el de prensado, modelado y conformado de una determinada materia prima. La principal materia prima de las tuberías de plástico es el cloruro de polivinilo o conocido por PVC ((C₂H₃Cl)_n). Estos componentes provienen del petróleo (43%) y de la sal (57%). Es un material termoplástico, se reblandece a una temperatura baja (140-205° C) en la que se puede moldear, al enfriarse recupera la rigidez el material, conservando la nueva forma.

2.6.1. Fabricación de PVC

La fabricación del PVC se obtiene de los dos componentes mencionado anteriormente. La sal pasa por un proceso llamado electrólisis, que consiste en pasar una corriente eléctrica continua por la solución salina. Tras este proceso se obtiene cloro, un compuesto que conforma la sal. Con el petróleo se refina para obtener nafta, y con esta, se origina el etileno a partir de una instalación llamada craqueador, que consiste en un proceso químico para quebrar las moléculas y originar compuestos más simples. Con la obtención de estos dos productos, el cloro y el etileno, se hacen reaccionar para formar un producto químico líquido, dicloruro de etileno (EDC). Tras esto pasa por un proceso de oxiclación que se deshidrata, calienta y descompone en cloruro de vinilo (VCM). Este compuesto está formado por monómeros y se almacena bajo presión para mantenerlo en estado líquido. Este estado del cloruro de vinilo no tiene uso, se debe pasar de monómero a polímero (cadena de monómero). Este proceso se lleva a cabo con un reactor de alta presión, formando el policloruro de vinilo (PVC). La molécula de PVC contiene entre unos 750 a 1500 monómeros. El polvo del PVC no es apto para la extrusión. Se mezcla con unos productos (estabilizadores, lubricantes, pigmentos...). A esta mezcla se le conoce como "Compounderen". Con esta mezcla es la que los fabricantes de tuberías usan en la máquina extrusora. [7]

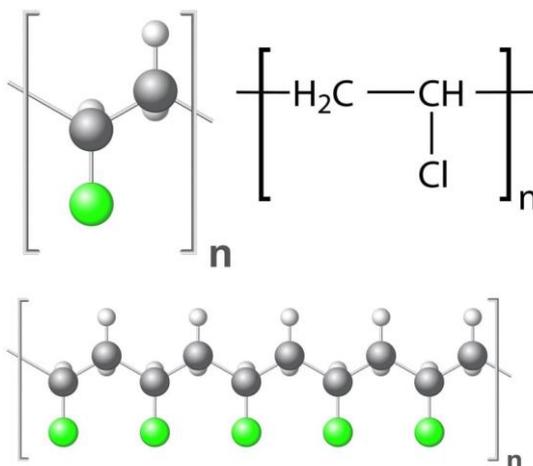


Figura 2-15 Superior monómero de cloruro de vinilo (VCM)

Inferior polímero de policloruro de vinilo (PVC)

2.6.2. Componentes de la máquina extrusora.

-Tolva. Es el recipiente o depósito que contiene la materia prima que va a ser usada y desde la cual se va a alimentar al extrusor. La garganta que alimenta al extrusor debe estar a una temperatura menor a 50° centígrados del punto de fusión del polímero. Este requisito provoca que los pellets no se adhieran y produzcan una obstrucción entre la garganta de la tolva y el tornillo extrusor.

-Husillo o tornillo. La pieza más importante de la máquina, esta determina el éxito de la operación de extrusión. Los grandes avances de la máquina se han realizado en el tornillo. La función del tornillo es de transportar, calentar, fundir y mezclar el material. El producto final viene con unas calidades que depende del tornillo. En el diseño del tornillo tiene unos parámetros importantes: la longitud del tornillo (L), diámetro (D), el ángulo del filete (θ) y el paso de rosca (w)

-Barril o cañón. Parte de la máquina que recubre el tornillo y forma un armazón para contener la materia prima. La cámara del barril debe ser resistente a la corrosión, por ello se recubre de cromo duro. El cañón cuenta con resistencias eléctricas para calentar y fundir la materia que es transportada por su interior. Suelen estar fabricados con aceros de alta resistencia nitrurados. El cañón suele ir aislado para no perder calor y que sea más eficiente. El aislante suele ser fibra de vidrio por su baja conductividad térmica.

-Placa rompedora. Consiste en una placa de acero con orificios para que pase el flujo plástico. Su principal función es filtrar posibles contaminantes que estén en el flujo y evitar los grumos para que el producto no tenga imperfecciones. Otro objetivo es interrumpir el flujo en espiral que se ha originado a causa del tornillo. De esta manera el flujo del material plástico sale en líneas rectas. Al dejar un espacio inferior de paso para el material se produce un incremento de presión que favorece a la producción.

-Matriz de extrusión. Esta parte es la responsable de la forma que adquiere el material a la salida.[8]

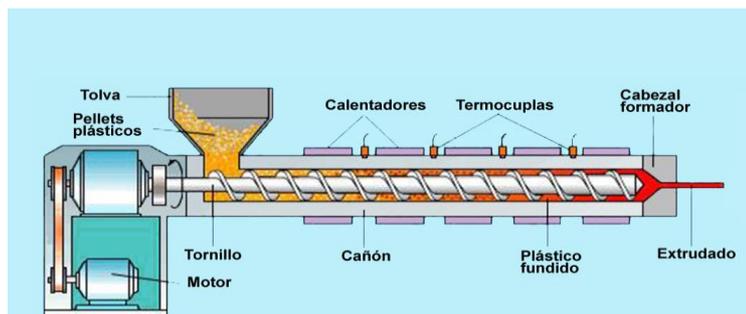


Figura 2-16. Máquina de extrusión

3 GRÚA

3.1 Historia de la Grúa

Con el paso del nomadismo al sedentarismo, el ser humano comenzó a realizar edificaciones que perduraban debido a que ya no abandonaban el lugar establecido. Al comenzar estas construcciones tuvieron que realizar avances tecnológicos para facilitar las construcciones y poder reducir el tiempo y llevar a cabo obras de mayor envergadura. La fuerza usada para mover las piedras que formaban los edificios se basaba en fuerza animal o humana, debido a que era la única fuerza conocida en esos tiempos. Para elevar los componentes de las construcciones se usaban la técnica de la rampa. Consistía en arrastrar las piedras por un plano inclinado hasta la altura en la que debía ser colocada. Esta técnica consumía mucho tiempo debido a la construcción de la rampa había que realizarla en cada lugar y el tiempo que debía usar para desplazar las piedras por la rampa y esfuerzo implicado. Otro problema existente era la altura. Al no poder realizar un plano inclinado demasiado prominente, ya que eso perjudicaría el paso posterior de arrastre de la piedra. Esto implicaba realizar un plano más largo cuanto mayor fuese la altura a salvar, lo que condicionaba el espacio disponible, ya que si la edificación se encontraba en un espacio angosto no sería posible realizar edificaciones de mucha altura.

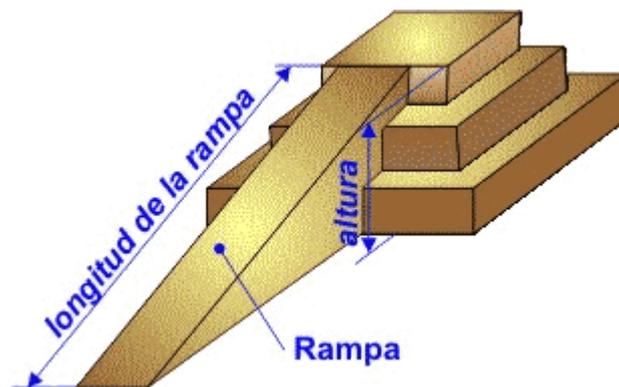


Figura 3-1 Rampa para la elevación de bloques

Tras esta técnica de elevar las piedras necesarias para las construcciones se realizó un invento que revolucionaría la forma de construcción, la grúa. Este invento consta de una estructura en la que se acoplan poleas y una cuerda por la que se ejerce una tensión para poder elevar las cargas necesarias para la construcción de la edificación. El peso máximo que pueda elevar dependerá de varios factores. Que se aplique la fuerza necesaria para elevar la carga, que la estructura de la grúa no se quiebre por el peso de la carga y que el contrapeso de la grúa compense el peso de la carga. Con la grúa, el elevar los bloques de piedra necesarios para la construcción, se hizo de una

manera más eficiente y eficaz. Desde entonces, la grúa ha sido un instrumento indispensable para la construcción al facilitar y agilizar el elevar las cargas de una manera más rápida y segura. Con ello las edificaciones han podido crecer en tamaño y altura.

Sobre el siglo VI a. C. se observan evidencias de que existían las grúas en la Antigua Grecia. Las piedras cuentan con muescas que se aprecian que se ha realizado por pinzas. En la Figura 3-2 se aprecia el modo en que las pinzas mordían un bloque de Piedra. Las marcas están realizadas para facilitar la elevación, esto se evidencia por el lugar en el que están, centro de gravedad o paredes equidistantes de un punto sobre el centro de gravedad. Por la construcción del templo se aprecia que las piedras que usaban para las construcciones eran de menor tamaño. Esto lo realizaban al ser más practico mover piedras de reducido tamaño y con más agilidad que las de mayor tamaño. También se debía a que las primeras grúas no podían cargar con tanto peso. En el siglo IV a. C. los bloques de piedra se vuelven a parecer en tamaño a los antiguos, la conclusión más perseguida es que se encontró la forma de usar múltiples poleas para lograr la elevación de ese incremento de peso. [9]

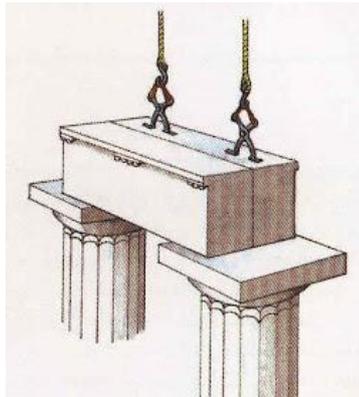


Figura 3-2 Bloque de piedra griega siendo colocado

Con el Imperio Romano realizando sus inmensas construcciones llegó el esplendor de la grúa. Modificaron la grúa de los griegos para adaptarla a sus requisitos. Los bloques que se encuentran en los templos romanos son más pesados que los de los templos griegos. Hay bloques de cien toneladas a una altura de diecinueve metros en el templo de Júpiter en Baalbek. Mientras que en Parthenon griego no superaban las veinte toneladas. Con esta comparación se aprecia el avance técnico que implementaron los romanos a las grúas griegas que adoptaron.



Figura 3-3 Templo de Júpiter en Baalbek



Figura 3-4 Partenón en Atenas

3.2 Grúas romanas

Los romanos crearon distintos tipos de grúas, que se clasificaban según el número de poleas empleadas en cada una. Una mayor cantidad de poleas permitía elevar un mayor peso por la grúa. Vitruvio en su libro X, capítulo II, realiza una explicación pormenorizada sobre la construcción de los tres tipos de grúa que construían los romanos. Los nombres venían dados por el número de poleas que empleaba la grúa. El uso de múltiples poleas se realiza porque se obtiene lo que se llama una ventaja mecánica, que su fórmula sería $VM=R/F$; siendo R la resistencia del objeto al elevarlo y la F la fuerza aplicada para realizarlo. Según la teoría, no la práctica ya que no se tiene en cuenta posibles fuerzas de rozamiento e imperfecciones que pudiesen tener las poleas o el mecanismo en su conjunto, sigue la formulación de $VM=n*R/F$; siendo n el número de poleas empleadas en el mecanismo. Observando la formulación última se aprecia que con mayor número de poleas se puede elevar un peso superior o, por el contrario, con un mismo peso, se debe emplear una fuerza menor para poder elevar el objeto en cuestión. El número máximo de poleas empleadas por los romanos en un sistema simple era de cinco. Usar un mayor número de poleas en un sistema simple no ocasiona la ventaja mecánica esperada, debido a que las fuerzas de rozamientos son de un orden de magnitud que contrarrestaban la ventaja mecánica buscada. [10]

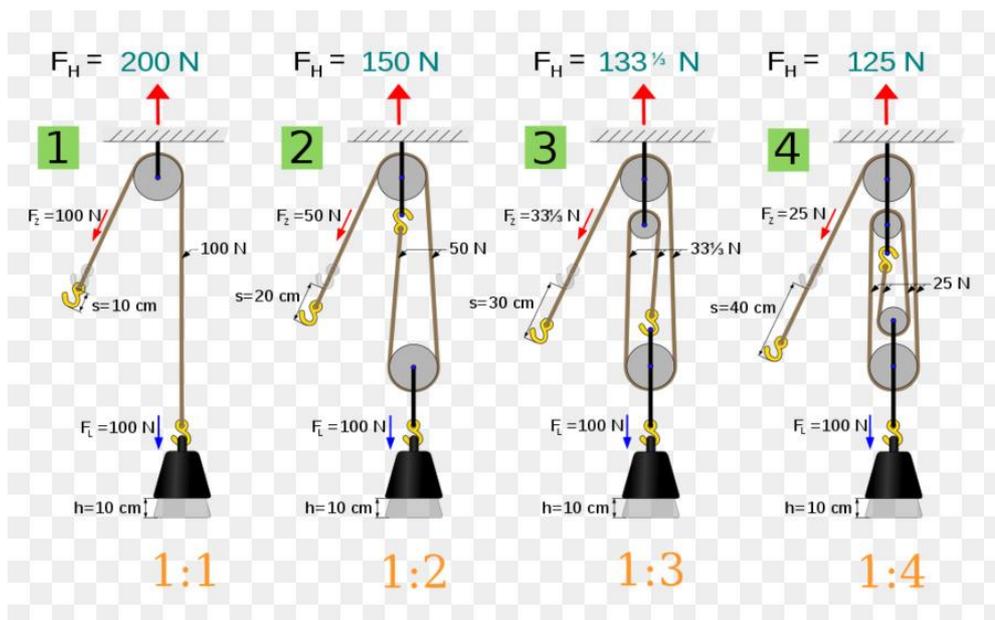


Figura 3-5 Ventaja mecánica

La ventaja mecánica se origina por el número de trozos de la cuerda que ejercen tensión en sentido contrario al peso del objeto. En la teoría, la cuerda a ser un objeto no elástico, al aplicar una tensión en el extremo de la cuerda, se prolonga esa tensión por toda la cuerda. Y al haber más de un trozo de cuerda con esa misma tensión en sentido contrario al peso, se origina un sumatorio de tensiones que se oponen al peso del objeto, creado por una sola tensión.

El trispasto era la grúa más sencilla, usaba tres poleas. Consistía en dos vigas verticales con una inclinación, que se sujetaba anclándola en el suelo, se colocaba las poleas como se puede observar en la Figura 3-6 y la cuerda se enrolla en un rodillo, por lo que la fuerza aplicada era mediante un par. Esta grúa era manejada por un solo hombre. Al ser tener tres poleas conseguía una ventaja 3:1, que equivale a poder levantar 150 kilogramos, ya que se estima que un hombre puede elevar 50 kilogramos.



Figura 3-6 Trispastos

La siguiente grúa que empleaban los romanos era el pentaspastos. Esta grúa estaba compuesta por cinco poleas. Con este incremento de poleas se conseguía elevar cargas más pesadas, el funcionamiento era de la misma índole que con el trispasto. Cuando las cargas ya superaban con creces el peso y dimensiones que soportaba el pentaspaston se optaba por usar el polyspastos. En este caso el prefijo poli implica múltiples, y este caso múltiples poleas. Como se ha mencionado anteriormente, para obtener la ventaja mecánica, cinco poleas era el límite. En este caso que son múltiples poleas se debe a que no es un sistema simple de poleas, sino uno complejo. Al usar cargas de mayor peso la estructura debía ser mayor y más robusta para que pudiese soportar el peso. Vitruvio menciona que al ser de mayores dimensiones no se fía del rodillo, por lo que lo sustituye por una rueda, debido a que este tiene un mayor radio de aplicación del par que se va aplicar para elevar la carga. Consta a su vez de tres series de poleas de cinco poleas cada serie, como un pentaspaston multiplicado por 3, para incrementar

la tensión aplicada. Con esta grúa las cargas que se elevaban alcanzaban los 6000 kilogramos, y era manejado solo por dos hombres, lo que hacía que cada hombre elevase 3000 kilogramos.



Figura 3-7 Pentaspastos

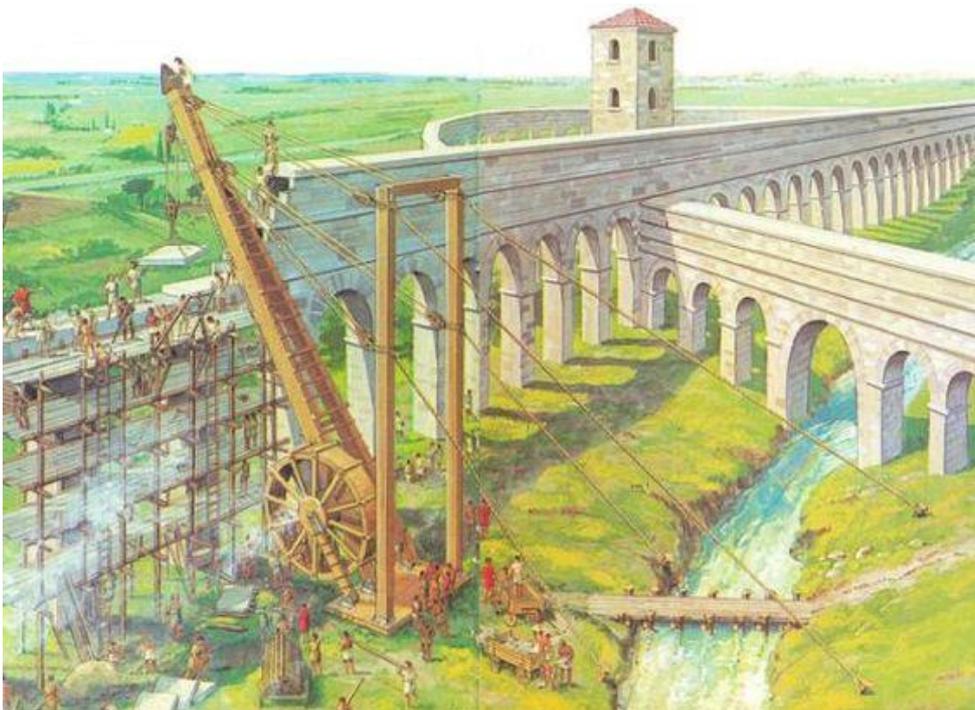


Figura 3-8 Polyspastos

3.3 Estructura de madera de la grúa romana

Las estructuras de las grúas estaban construidas con vigas de madera. Los romanos usaban una gran variedad de tipos de árboles, se han recogido algunos que menciona Vitrubio en "Los diez libros de la Arquitectura": roble, abetos, cipreses, álamos, olmos, pinos, encina, alcornoque, haya, fresno, cedro y enebro. Vitrubio especifica el mejor momento para cortar los árboles para obtener las mejores propiedades de la madera que se iba a obtener, "La madera debe cortarse en el intervalo de tiempo que media entre el otoño y un poco antes de que empiece a soplar el Favonio"(Vitruvio, II, 9)

Al presentar una gran variedad de árboles que usaban los romanos se realizará un estudio genérico sobre la madera. La estructura interna de un tronco consta de varias partes. Corteza externa, la capa que se puede observar a simple vista y protege al tronco de agentes externos. Cambium, tiene dos partes diferenciadas, xilema, parte interior en la que se forma la madera y floema, parte exterior que forma parte de la corteza. La albura es la parte más joven de la madera, por ella se transporta la savia. Duramen está formada por la parte más dura de la madera, tiene una coloración más oscura que la albura y no fluye por ella la savia. La médula vegetal es la parte central, y en consecuencia la más antigua.

La madera está compuesta por un 50% de carbono (C), de oxígeno (O) un 42%, 6% de hidrógeno (H) y el nitrógeno y otros elementos tienen un 2%. Estos elementos están unidos formando distintos tipos de compuestos. El de mayor presencia es la celulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n, entre un 40-50%, es un homopolisacárido. La lignina tiene una entre un 20-30%, es la responsable de la dureza y rigidez del tronco, su composición principal es de un polímero por la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos. La hemicelulosa (25%) tiene como objetivo unir las fibras formadas. Se encuentran otros componentes en menor medida, tales como resinas, ceras, grasas y otras sustancias. Todo este material heterogéneo que conforman las células muestra una microestructura de tubos irregulares paralelos al eje del tronco. [11]

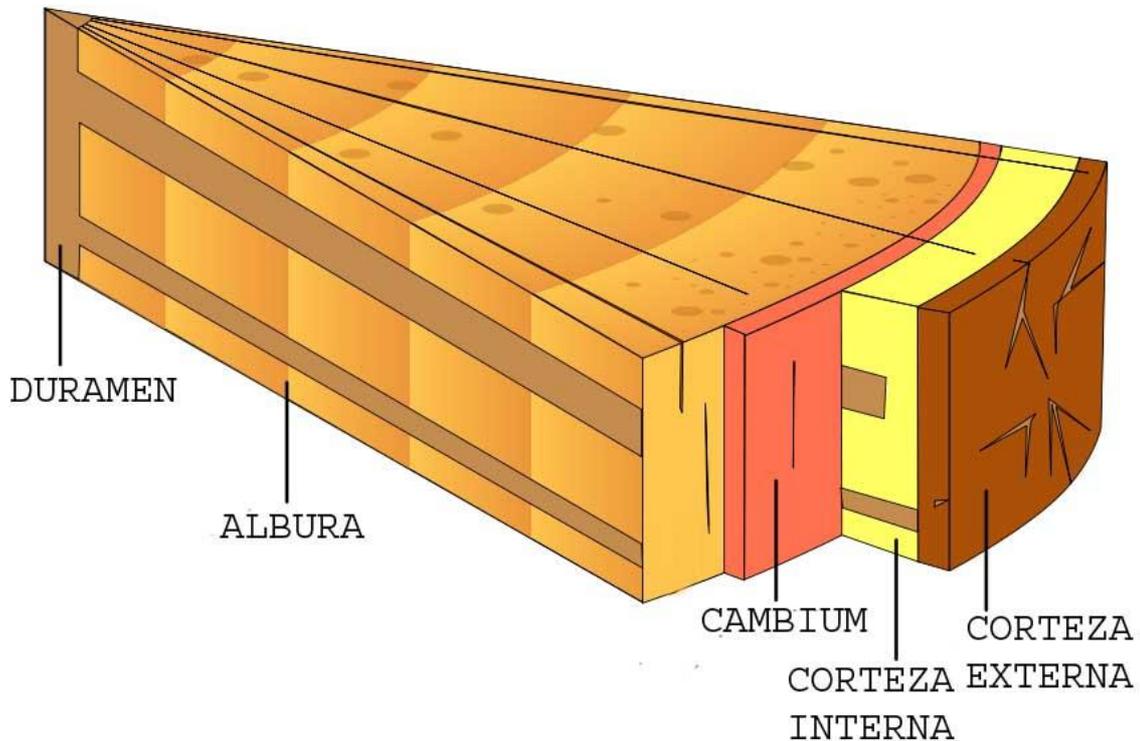


Figura 3-9. Partes de un tronco.

3.3.1 Propiedades de la madera.

Hay una gran variedad de clases de madera, y cada una difiere en sus propiedades, pero se puede observar propiedades que engloban a todas las maderas.

-Densidad: Los troncos tiene una densidad de 300-800 kg/m³. Al ser menos denso le confiere la característica de flotabilidad.

-Dureza y resistencia: Se diferencia principalmente en dos tipos: árboles caducifolios (se les cae las hojas en invierno) su menor contenido en agua causa una mayor dureza y resistencia mecánica. Árboles de hoja perenne son más blandos y tienen una menor resistencia a causa de una mayor presencia de agua en ellos.

-Flexibilidad: En el sentido de la veta, se dobla con mayor facilidad mediante calor o humedad.

-Fendabilidad: se parte fácilmente en el sentido de la veta.

-Higroscopicidad: Capacidad de absorber y desprender agua.

-Combustibilidad: tiene una alta capacidad para arder.

-Conductividad: es un buen aislante, tanto térmico como eléctrico.[12]

3.3.2 Propiedades mecánicas de la madera

En las vigas de madera se puede aplicar esfuerzos principalmente en dos sentidos, paralelo a la fibra, se ejerce la tensión en dirección del eje del tronco. Perpendicular a la fibra, se ejerce esfuerzos perpendiculares al eje del tronco.

Cuando los esfuerzos son aplicados de manera paralelas a la fibra es cuando la madera mejor se comporta. En caso de esfuerzos de tracción la diferencia alcanza un orden de magnitud de entre 30 a 70 veces superior a la resistencia de la madera cuando se le aplica la tensión perpendicular a la fibra. En el caso de compresión el orden es de 4 veces.

Las principales fuerzas que soportaban las vigas en las grúas romanas eran de compresión paralela a la fibra y de flexión, aunque esta última era mínima ya que según Vitruvio la grúa debía estar posicionada de manera vertical. La resistencia de la madera en esfuerzos de compresión alcanza valores de entre 16 a 23 N/mm². [12]

3.4 La Polea

Un invento anterior hizo posible realizar este avance. Se desconoce quién invento la polea, aunque hay quien atribuye el invento a Arquitas de Tarento, pero una de las primeras palabras escritas que nos ha llegado son de Plutarco en su obra Vidas paralelas, en ellas relata una interacción que lleva a cabo Arquímedes con el rey Hierón de Siracusa. En esta conversación, Arquímedes le dice al rey que podía mover objetos de un peso superior a la potencia empleada. Sigue relatando Plutarco que el rey pidió una demostración con una embarcación que este tenía en la dársena, para trasladarla a un dique seco. Arquímedes con una cuerda consiguió moverlo.

3.4.1 Partes de la polea

La polea constituye la parte más importante de la grúa, debido a que esta hace posible que la tensión que se aplica en un extremo de la cuerda se aplique en el otro extremo sin tener que estar este en la misma dirección y sentido que el extremo opuesto. Otra característica que se busca con la polea es que esta tenga el menor rozamiento posible para que la fuerza no se pierda en la fricción con el material. La polea tiene forma circular al ser esta figura geométrica la mejor para la rotación, debido a que no tiene esquinas que dificulten el deslizamiento

de la cuerda. Consta principalmente de 3 partes.

-El cuerpo: la parte interior de la polea. Si el tamaño es reducido suele ser una pieza maciza y al aumentar de tamaño la forma pasa a ser una pieza compuesta por radios.

-La llanta. Es la parte exterior de la polea, que se encuentra en contacto con la cuerda en la que se aplicará la tensión.

-Cubo o eje. Se sitúa en el centro de la circunferencia. Será la parte fija en la cual rotará el cuerpo. Estará fija a un soporte, principalmente mediante un gancho.

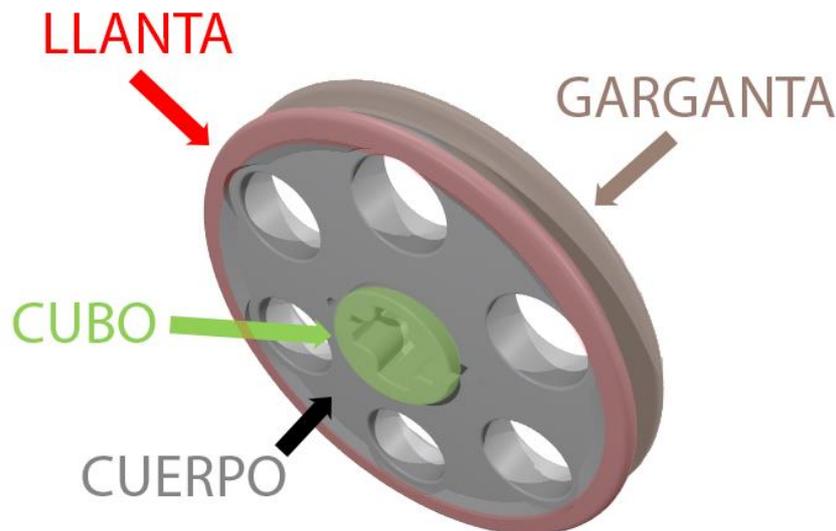


Figura 3-10 Partes de una polea

3.4.2 Polea como mecanismo de transmisión

Un mecanismo es un sistema que puede transmitir y/o transformar fuerzas y/o movimientos, el cual depende de un elemento motor que es el que aporta la potencia y tendrá un receptor de esa potencia a través del mecanismo. La polea constituye un mecanismo de transmisión, que consigue que el movimiento del elemento motor sea distinto al movimiento del receptor.

Puede diferenciarse distintos tipos de mecanismo de poleas.

-Polea simple: El mecanismo está formado por una sola polea. La fórmula por la que se rige es $F=R$; siendo F la fuerza motriz del mecanismo y R la resistencia que ejerce el receptor del mecanismo. Para poder mover R debe cumplir que $F>R$; en caso de $F=R$ se encontraría en equilibrio y no se produciría ningún movimiento, y en caso de $F<R$ el receptor se impondría al elemento motor. Este mecanismo es el único que no aporta una ventaja mecánica.

-Polea móvil o compuesta. Dos poleas forman el mecanismo. Una de ellas es fija y la otra móvil. La fórmula por la que se rige es $F=R/2$.

-Polipastos. El mecanismo tiene un mayor número de poleas. Puede haber dos tipos de polipastos dependiendo de la disposición de las poleas. Si solo hay una polea fija y el resto son móviles se rige por la fórmula $F=R/2^N$. Si la mitad del mecanismo cuenta con polea fijas y la otra mitad móvil entonces la fórmula es $F=R/2*N$. Siendo N el número de poleas móviles.

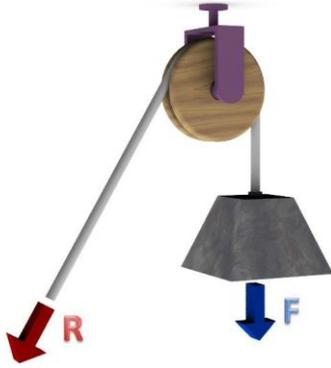


Figura 3-11. Polea fija

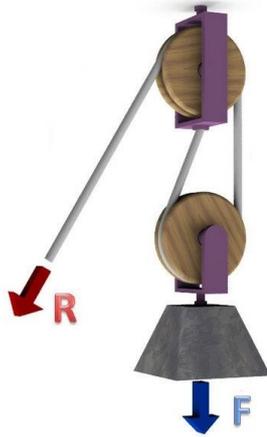


Figura 3-12 Polea móvil

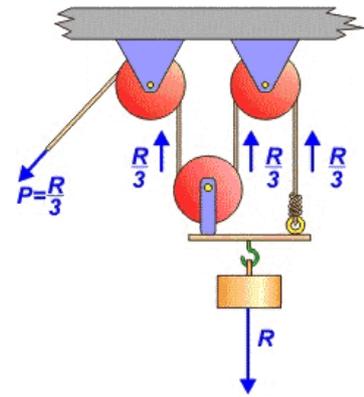


Figura 3-13. Polipasto

Existe un mecanismo de transmisión que los romanos usaban acoplándolo al sistema de poleas para así aumentar la fuerza motriz que se aplicaba. Este mecanismo es el de la manivela torno. El mecanismo consiste en una barra (torno) en el que se enrolla una cuerda, y esta cuerda estaría unida al mecanismo de poleas. La cuerda se enrolla por la rotación que se imprime en el torno mediante una manivela. La fórmula de equilibrio del torno será $P \cdot 2\pi R = Q \cdot 2\pi r$

Siendo P la fuerza aplicada a la manivela, R el radio de giro de la manivela, r el radio de giro del cilindro del torno y Q la fuerza que ejerce la carga en la cuerda. Se despeja P y se obtiene $P = Q \cdot r / R$. Con esta formulación se observa que cuanto mayor sea el radio de la manivela y menor el del cilindro, la fuerza P que se aplica para elevar la carga será menor.

Gracias a la combinación de estos dos mecanismos de transmisión los romanos pudieron levantar cargas pesadas con sus grúas. Los tres tipos de grúas usadas por los romanos combinaban estos dos mecanismos. En el caso del Polypastos la manivela era sustituida por una rueda. Esto ocasionaba que el radio fuese mayor y por lo tanto podían elevar cargas más pesas.[13]

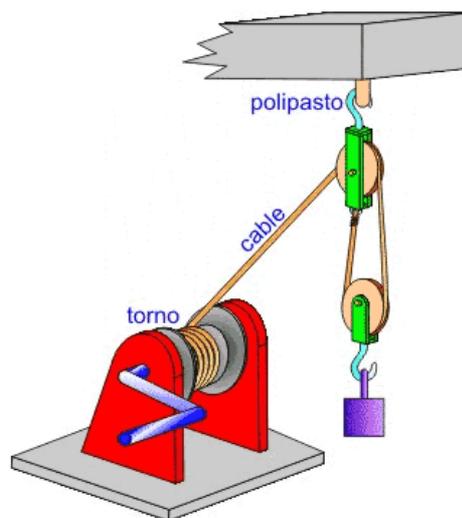


Figura 3-14. Torno acoplado a sistema de poleas

3.5 Evolución de la Grúa

Tras la caída del Imperio Romano, el nivel de las construcciones civiles decayó, por lo que a su vez afectó a las grúas. Tras un gran periodo de inactividad se retomó el uso de la grúa a la par que se incrementaron las construcciones. Las principales construcciones que necesitaron de las grúas fueron los castillos y catedrales. La grúa que más se usaba era la grúa de rueda, llamada así porque tenía como mecanismo de aplicación de la fuerza una rueda. Por el tamaño que tenía la rueda, una persona se introducía para caminar y así hacer rotar la rueda, que enrollaba la cuerda para poder izar las cargas. Se cree que reapareció por el siglo XIII porque aparece en unos textos de la época y en una representación. En los puertos y en las minas también se hicieron uso de las grúas.

Con la revolución industrial las grúas empezaron a ser de hierro fundido y acero, estos materiales podían soportar cargas de mayores pesos al ser más resistentes que la madera que antes se usaba. En el siglo XVIII llega la invención de la máquina de vapor. Fue una revolución porque esta era la primera máquina con la que se obtenía una fuerza donde se construyera y no dependía de las fuerzas del agua y viento que se usaban hasta ahora y dependía de la naturaleza. Esta nueva máquina se usó para aplicarle la fuerza necesaria a la grúa para su funcionamiento. Fue la primera vez que la fuerza no provenía de la naturaleza, ni fuerza animal ni humana.

La grúa de vapor Fairbairn fabricada por William Fairbairn and Sons entre 1816 y 1864 era de las más comunes. Esto se debe en parte a que pocos fabricantes crearon y comercializaron grúas. Cuando los combustibles fósiles reemplazaron al vapor, también les ocurrió a las grúas de vapor. Los motores de combustión fueron los sustitutos.

La llegada del motor eléctrico supuso su implantación en las grúas. Las ventajas del motor eléctrico es que puede ofrecer su par máximo desde momentos tempranos en contraposición a los motores de combustión. [14]



Figura 3-15 Grúa de vapor Fairbairn. Sevilla



Figura 3-16 Grúa moderna

3.6 Grúas modernas

3.6.1. Tipologías grúas modernas

1. Grúas torre.

Se usa principalmente en la construcción. Su característica principal es un carro que se desplaza a lo largo de una pluma. La pluma marca el radio de acción de la grúa, su longitud será la limitación de distancia de uso de la grúa. El carro que se desplaza por la grúa es el que irá el gancho. Dentro de las grúa torre podemos hacer varias distinciones o diferenciaciones.

-Grúa torre fija. Según la terminología se llama así a las grúas que no pueden desplazar su base. Lo que su radio de acción queda sujeto a la longitud de la pluma. La base está fija debido a unos contrapesos que se han fijado o la base de la grúa se encuentra encofrada. Es la grúa con más bajo costo.

-Grúa torre desplazable. Mediante unos carriles en su base, estas grúas pueden ser desplazadas para ampliar su radio de actuación. El desplazamiento de la grúa limita la altura de la misma, por la estabilidad de la grúa.

-Grúa torre desmontable. Por el uso de la grúa, está fabricada de manera que su montaje y desmontaje sea ágil para poder desplazarla y montarla en otro espacio con cierta frecuencia.

-Grúa torre auto desplegable. La grúa se desplaza por medio automotriz. Son de dimensiones menores debido a la estabilidad. Gran versatilidad y facilidad de montaje y desplazamiento.

-Grúa torre monobloc. La grúa es un gran bloque, cuando llega al destino se despliega hasta alcanzar la altura máxima. No requiere montaje adicionales.

-Grúa torre trepadora. Cierta parecido a una grúa torre fija, pero esta va incrementando su tamaño conforme la obra a la que presta servicio crece en altura.

2. Grúa telescópica

Su característica es que la pluma esta formada por un conjunto de tubos huecos que se pliegan y se encagan unos dentro de otro. El radio de acción esta limitado por la longitud de la pluma desplegada. En caso de querer un radio menor esta se plegará. El gancho se encuentra en la punta final de la pluma. Lo más común es encontrarla en vehículos y son usada por su gran rapidez en la actuación y escaso montaje.

3. Grúa móvil.

Suelen ir en cadenas, orugas o automóviles. La pluma se encuentra en todo momento desplegada y no es desmontable. Suelen ser de tamaño más reducido que las anteriores. Suele poder rotar la pluma respecto al soporte móvil que la desplaza.

4. Grúa pluma.

Usada en las fábricas. Diseño parecido a grúas torres fijas pero con uso en naves industriales. Son de menor tamaño. Principalmente usadas en sistemas de producción para elevar y transportar cargas.

5. Grúa pórtico.

Una viga reposa sobre dos pilares. Dependiendo de la grúa puede estar diseñada con un carro que se desplaza a lo largo de la viga o por el contrario tener distribuido ganchos a lo largo de toda la viga. Se usa principalmente en puertos y en fábricas con cargas muy pesadas. Gracias a sus dos pilares obtiene una mayor estabilidad que el resto de grúas lo que le permite hacerlas de mayor tamaño y envergadura para elevar cargas mayores. [15]

3.6.1. Estructuras de las Grúas modernas.

Se puede observar que la mayoría de las grúas siguen una estructura de sus partes muy parecida, que son estructuras triangulares. Este tipo de estructura permite cubrir un espacio manteniendo una rigidez adecuada, pero gracias a su peculiar estructura es de menor peso al que se conseguiría con vigas sólidas. Estas estructuras están formadas por barras que se unen en sus extremos y entre ellas forman un triángulo. Las barras suelen ser de hierro fundido o acero, estos materiales son usados por sus propiedades mecánicas y su precio respecto a otros materiales con similares propiedades. El nudo es el nombre que tiene la unión de las barras. Estas estructuras triangulares se repiten a lo largo de la estructura de la grúa. Las uniones suelen estar fijadas con remaches o soldadas.

La elección del triángulo como el polígono para formar estas estructuras no es casual. El triángulo es el único polígono que cuando se le aplica una fuerza en unos de sus vértices no se deforma. Suponiendo que las barras que forman el triángulo son rígidas y la fuerza aplicada no supera la tensión elástica de las barras. Por el contrario, cualquier otro polígono (cuadrado, pentágono, etc.) al aplicar una fuerza en uno de sus vértices produce una deformación.

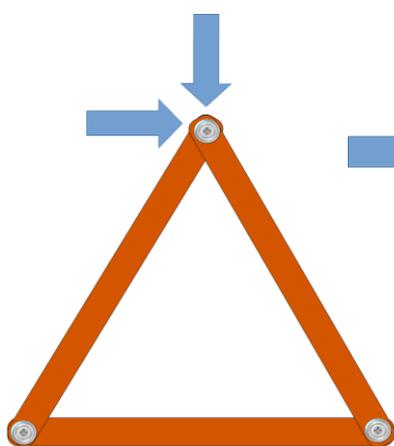


Figura 3-17. Triángulo sometido a esfuerzos externos

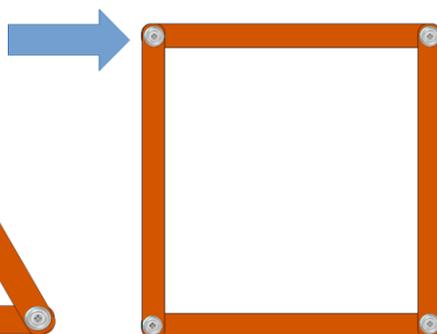


Figura 3-18. Cuadrado sometido a esfuerzos externos

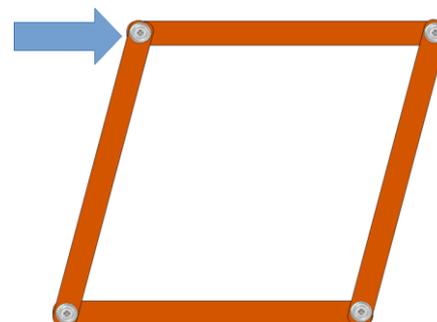


Figura 3-19. Cuadrado deformado por esfuerzos externos

Para mantener la rigidez de cualquier otro polígono se debe realizar un proceso llamado de triangulación. Consiste en colocar barras internas en el polígono hasta que alcanza la rigidez del triángulo. La fórmula para obtener el número de barras es $b=2n-3$; siendo b el número de barras que se quiere obtener y n el número de nudos en el polígono.

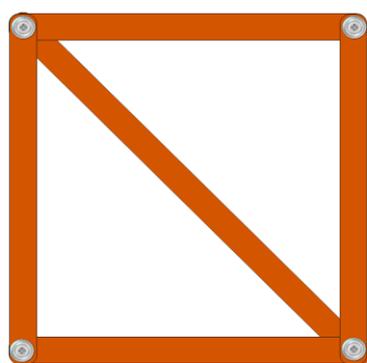


Figura 3-20. Cuadrado con triangulación

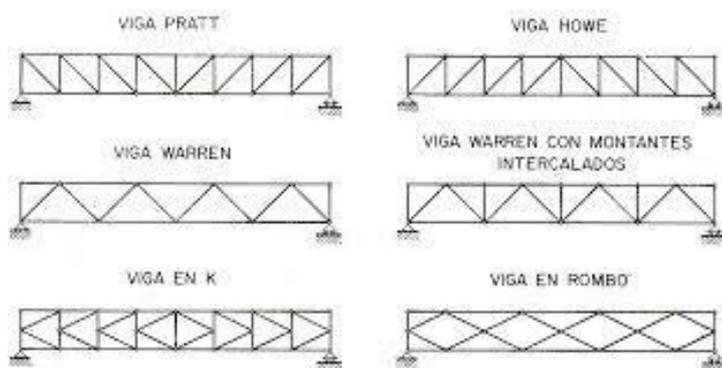


Figura 3-21. Métodos de triangulación para vigas reticuladas

Se puede distinguir varios métodos de triangulación para vigas reticuladas. Se observa en la Figura 3-21 los seis principales. Las características generales son: siguen una triangulación simple, solo tiene adyacente al anterior y al posterior y conviene que los triángulos sean en menor medida escalenos [16].

- Pratt: Diagonales traccionadas y montantes comprimidos
- Howe Diagonales comprimidas y montantes traccionadas
- Warren. menor número de barras, mejor que Pratt, aunque para mejorar la longitud de pandeo en diagonales se opta por Pratt.
- Warren con montantes. Mejora el pandeo a reducir la longitud de pandeo.
- K separación entre montantes se reduce respecto a Warren o Pratt y es menor la longitud libre de montantes y diagonales.
- Rombo. Las barras que lo forman se encuentran a tracción.

Esfuerzos en las barras triangulares.

Cuando se aplica esfuerzo en un vértice del triángulo, la dos barras que parten del nudo se someten a compresión, mientras que la barra opuesta experimenta un esfuerzo de tracción. Estos esfuerzos son los que principalmente sufren las barras. Al despreciar otros esfuerzos por su orden de magnitud facilita el cálculo de la estructura. Esta hipótesis puede ser formulada si los flectores son despreciables. Los casos en los que no se pueden despreciar los flectores son los siguientes:

- Excentricidad de las directrices de las barras en el nudo. Si la unión no está centrada respecto al eje de la barra. Si el eje de las barras unidas en el nudo no coincide.
- Cargas exteriores, tales como viento o fuerzas externas como golpes.
- Si ocurre una flexión debida al peso de la propia barra.
- Esfuerzos secundarios: cambios entre los ángulos de las barras, causa del hiperestatismo por un mayor número de barras, una mayor rigidez en las barras y que el ancho/longitud > 0,1.

Las barras usadas para formar las estructuras triangulares suelen ser tubos huecos de acero o hierro fundido. Los tubos huecos tienen una serie de ventajas respecto a otras barras de perfil abierto que podrían ser usadas. En caso de las cargas de tracción la diferencia no se da por el perfil de la sección, la resistencia a estas cargas depende del área transversal de la sección, no hay diferencia en escoger perfiles abiertos o cerrados.

Para las cargas de compresión la diferencia es mayor. Las barras que se someten a compresión pueden acabar pandeando si se supera la carga crítica de pandeo. La carga crítica de una barra depende de la esbeltez (λ) y de la forma de la sección. La esbeltez a su vez depende de la longitud de pandeo l_b y del radio de giro i ($\lambda = l_b/i$). El radio de giro i es la raíz cuadrada entre el cociente de inercia (I) y el área de la sección (A) $i = \sqrt{I/A}$. Al ser un tubo el área de la sección es menor. Esto origina un radio de giro mayor que al estar en el denominador de la esbeltez lleva a tener una menor esbeltez. La fórmula de la carga crítica es $\sigma_c = \pi^2 E / \lambda^2$. Siendo E el módulo de Young, este parámetro es una característica del material. Con la esbeltez menor, al cuadrado, en el denominador, la carga crítica será mucho mayor. Para posibles momentos de torsión, las secciones cerradas huecas, la sección transversal es más eficaz para resistir los momentos, debido a la distribución uniforme del material. Llegando a ser 200 a 300 veces mayor el módulo de torsión entre secciones cerradas y abiertas. Los pandeos laterales originados por esfuerzos de flexión, los perfiles cerrados ofrecen mejores ventajas. [17]

4 HIPOCAUSTO

4.1 Precursor

Hipocausto viene de la palabra latina hypocaustum. El prefijo "hipo" significa "por debajo de" y "causto" significa "quemado". Con el significado de la palabra se puede desentrañar el funcionamiento parcial del invento. Según algunos historiadores el invento proviene de un ingeniero romano llamado Cayo Sergio Orata del siglo I a.C. Pero en unas excavaciones en Hattusa, capital del antiguo imperio hitita, habitada entre 1650 y 1200 a.C., que se encuentra en la provincia de Anatolia, Turquía, se han hallado restos arqueológicos en una dependencia de un palacio. Bajo el suelo de la dependencia hay un espacio hueco que tiene un acceso desde el exterior. Se enciende un fuego controlado que calienta el espacio hueco, este calor por convección calienta el techo del espacio hueco, y por conducción, el calor pasa al suelo de la dependencia superior. Con el suelo caliente, por conducción calienta el aire de la dependencia. El aire caliente al ser menos denso que el aire más frío, asciende calentando homogéneamente la sala desde la parte inferior. La radiación que produce el suelo llega a las paredes, techo, objetos y personas que se encuentren en la sala, pero su importancia era mínima.

El siguiente descubrimiento arqueológico de este invento se puede encontrar en la civilización helenística. Los griegos, al estar en contacto con los pueblos de la zona, pudieron copiar el invento para poder calentar sus propias salas. Unos restos se encontraron en las ruinas de Olimpia en Grecia. A pesar de ser un invento revolucionario para calentar una dependencia, no era muy eficiente. Esto se debía a la cantidad de combustible que tenía que ser aportado a la hoguera para calentar el espacio hueco. Se consumía una cantidad de combustible desproporcional a la sala o espacio reducido.

4.2 Métodos de calefacción disponibles por los romanos.

Antes de los diseños de Cayo Sergio Orata, los romanos solo contaban con tres métodos principalmente para obtener calor en las épocas de invierno en las que la temperatura a las que se llegaba requería de una fuente de calor. El calor del sol, este debe de dar de una manera directa la radiación para que el calor llegue a calentar de una manera notable. Al haber edificaciones en las ciudades, estas podían dar sombras unas a otras, por lo que la obtención de esta radiación de manera directa podía ser dificultosa y en algún caso, por periodos cortos hasta

que por el paso del día el sol se desplazará y la sombra llegase a cubrir. Y cuando el sol se ocultase por la noche, se perdía esta fuente de calor. Los otros dos métodos su funcionamiento es el mismo, aunque se diferencian por la movilidad. Los métodos eran un fuego encendido en el hogar, lo que se entiende por una chimenea. Este se situaba en un sitio fijo de la edificación, por lo que, en caso de requerir ese calor, se debía desplazar hasta el lugar en el que se situaba el fuego.

El último método es un brasero. El principio es el mismo que el del fuego, una combustión. Esta desprende un calor por el proceso químico y se aprovecha para calentar. En los casos de combustión, el calor llega principalmente por la radiación de las llamas. La convección es menor debido a que el aire caliente asciende, por lo que el calor de convección principalmente se desplaza de manera vertical al fuego, lo que origina que no se aproveche este. Inconveniente, ya que, si se depende de la radiación, siempre habrá que tener a la vista el brasero. Esto no implica que si se mantiene un brasero el tiempo suficiente en una estancia esta no pueda calentarse por convección. Solo que el tiempo requerido para lograr este requerimiento será largo. Una de las ventajas, en contra del fuego del hogar, es que el brasero es movable. Se puede desplazar al lugar que más interese y así no es obligatorio disponer de fuegos repartidos por todas las estancias. Uno de los inconvenientes del brasero son los gases y los humos producidos por la combustión. El humo son las partículas en suspensión del combustible usado. El tamaño de las partículas varía entre 0.005 y 0.01 milímetros. Estas producen efectos dañinos para el ser humano en caso de que entren en contacto con los ojos o vías respiratorias, en caso de ser las partículas de un tamaño muy reducido son mortales para el ser humano. Estas al inhalarlas, entran hasta los pulmones por su reducido tamaño, y en casos extremos entran en el torrente sanguíneo causando problemas de salud graves.

A pesar de estos problemas, en casos de estancias más grandes o bien ventiladas no suponían ningún problema, aunque se han dado casos en los que se ha producido un fallecimiento por estas causas. Joviano, sucesor de Juliano como emperador del Imperio romano en el año 364 d.C., murió a causa de humos de un fuego que calentaba la tienda en la que dormía. También podían ser causas de incendio por un descuido o creyendo que se encontraba apagado.[18]



Figura 4-1 Brasero romano. Museo de Teruel.

4.3 Invento de Cayo Sergio Orata.

Tras estos métodos de obtención de calor, el invento de Cayo Sergio Orata fue algo innovador. Mejoró el sistema que en ese momento usaban los griegos para hacerlo de una manera más eficiente. Este invento es el precursor de la calefacción central y del suelo radiante. Calefacción central porque el calor necesario para caldear las estancias venía de un punto. La energía térmica se generaba en un horno de leña construido en el exterior de la edificación. Un gran cambio respecto a los griegos, ya que el horno podía encontrarse en el exterior y no necesariamente en la parte inferior de la estancia que se quería calentar. Otra de las ventajas es que los gases de combustión no se perdían debido al circuito que se instalaba. Los gases calientes de la combustión, que alcanzan una temperatura entre los 1000° y 2000° centígrados, se desplazaban por un circuito de canalizaciones situado por debajo del suelo de la edificación y estos continuaban a través de las paredes hasta llegar a la parte superior de la edificación y se libera los gases al ambiente. El sistema al estar aislado y contenido en el horno, disminuyó el riesgo de incendios y también aumentó la eficiencia, ocasionando que el uso de combustible fuese menor.

Cuando se diseñaba las edificaciones con hipocausto, se debía tener en cuenta el límite de transferencia de calor que podía dar el horno y que la dispersión del calor no era muy eficiente, ya que no se cuenta con una bomba que haga circular por el sistema los gases originados en el horno, se desplazaba de una manera natural. Se debía tener en cuenta en número de estancias a las que se iba a aplicar el hipocausto y el tamaño de las mismas. También se debía pensar en las temperaturas que se querían alcanzar en cada habitación. En caso necesario, se podía implementar más de un horno para obtener el calor necesario y también si el edificio en cuestión tenía una dimensión que sobrepasaba la que podía un horno calentar. [18]

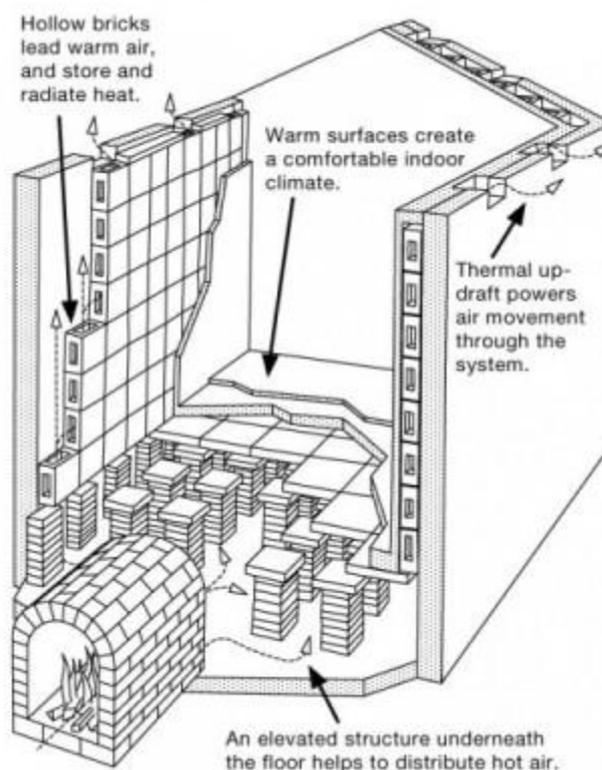


Figura 4-2. Hipocausto con cortes de sección

4.4 Principios transferencia de calor.

El hipocausto es un invento que funciona gracias a la transferencia de calor. Esta ha sido objeto de estudio en la ingeniería por su variedad de aplicación en diversos campos. Los estudios se han centrado tanto en la aportación de calor, como en la eliminación o absorción de ese calor. Dependiendo del campo de acción, el objetivo cambia. Un motor se debe refrigerar para que funcione, y una vivienda en invierno se quiere calentar. Hay que diferenciar entre calor y temperatura. El calor es la transferencia de energía de una sustancia. Esto ocurre cuando la energía traspasa la frontera de un sistema termodinámico. Una vez transferida a otro sistema, si esta no la libera se convierte en energía interna del mismo. EL calor o la transferencia de calor se da si existe una diferencia de temperatura. Siendo la temperatura una magnitud física relacionada con la agitación térmica de un sistema, movimientos de las partículas de un sistema en forma de traslación, rotación o de vibraciones. Es proporcional a la temperatura, a mayor agitación mayor temperatura. Existen tres mecanismos por el cual se produce la transferencia de calor. Pero no tiene por qué darse de manera individual, pudiendo resultar de la cualquiera de las combinaciones, aunque en muchas situaciones un mecanismo predomina frente a los otros. La transferencia de calor siempre se produce del sistema con mayor temperatura al de menos. [19]

4.4.1. Conducción

Esta transferencia de calor se produce por contactos directos entre partículas y existe una diferencia de temperatura. Puede ocurrir en los tres estados de la materia (sólido, líquido o gaseoso), pero en los estados líquidos y gaseosos solo si se excluye la convección se da conducción pura. Al ser de menor orden se suele tener en cuenta solo la conducción de los estados sólidos. El matemático francés Barón Joseph Fourier en 1822 llegó a lo que hoy se conoce como la Ley de Fourier (4-1) velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado) y multiplicada por un factor de proporcionalidad llamado conductividad térmica (W/mK ; W trabajo, m metros y K kelvin), que es el flujo de calor (por unidad de tiempo y unidad de área) entre el gradiente de temperatura (cuando la diferencia entre las partes es de $1 K$). La conductividad térmica es una propiedad de los materiales y suele estar relacionado con la conductividad eléctrica. Los materiales que conducen bien el calor, también tienen una alta capacidad de conducción eléctrica.

$$q = -kdT/dx \quad (4-1)$$

Los metales suelen tener una buena conductividad térmica, mientras que el vidrio, madera y materiales cerámicos es menor. Este fenómeno se debe en parte a los electrones libres que contienen los metales.

4.4.2. Convección

La convección se produce por medio de un fluido. La formulación de este mecanismo la propuso Newton en su Ley del enfriamiento (4-2). Siendo Q la transferencia de calor, h el coeficiente de película, A el área del cuerpo en contacto con el fluido, T_s temperatura de la superficie del cuerpo, y T_{inf} temperatura del fluido a distancia del cuerpo. Dependiendo de cómo se produzca el movimiento del fluido se puede clasificar en convección natural o convección forzada. La convección natural es aquella que el movimiento se produce por diferencia de densidades en el fluido. Lo que lleva a que las partículas de fluido se ordenen y produzcan un movimiento. En la convección forzada, el movimiento del fluido es producido por un factor externo (ventilador, bomba, viento, etc.). Debido a este factor externo la velocidad del fluido suele ser mayor.

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_s - T_{inf}) \quad (4-2)$$

El coeficiente de película depende de muchos parámetros. La manera de obtener el valor se requiere de estimaciones con correlaciones con el número de Nusselt (Nu), número adimensional que a la vez depende del número de Reynolds (Re) y del número de Prandtl (Pr) en convección forzada, en convección natural del número Prandtl (Pr) y del número de Grashof (Gr).

El resto de parámetros de los que depende para obtener esos números:

-tipo de convección (forzada o natural),

- régimen del fluido (laminar o turbulento),
- velocidad del flujo,
- viscosidad del fluido,
- densidad del fluido,
- conductividad térmica del fluido,
- calor específico del fluido,
- coeficiente de dilatación del fluido,
- forma de la superficie de intercambio,
- rugosidad de la superficie de intercambio,
- temperatura,
- derrame es interior o exterior.

4.4.2. Radiación

Este mecanismo, a diferencia de la conducción y convección, no deben estar en contacto para que se produzca la transferencia de calor, ni necesita de ningún medio para transmitirla, pudiendo propagarse por el vacío. Esto se debe a que la transferencia se produce por medio de ondas electromagnéticas. La formulación de la Ley de la radiación la realizó Max Planck, físico alemán, en 1900. Esta ley relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada, con la temperatura del cuerpo. Solo un cuerpo ideal (cuerpo negro) cumple a la perfección la Ley de Planck. Los cuerpos reales emiten una radiación menor. Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann, físicos austriacos, que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron la proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. De ahí que el factor Stefan–Boltzmann lleve su nombre. Todas las superficies pueden emitir radiación por tener una temperatura superior a 0 kelvin, y todas son capaces de absorber radiación. La fórmula (4-3) obtenida por Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann a partir de la Ley de Planck.

$$q = \varepsilon\sigma A * Ts^4 \quad (4-3)$$

Ts, temperatura de la superficie del cuerpo

ε , coeficiente de emisividad, propiedad del material que relaciona su capacidad de radiación térmica con la del cuerpo negro ideal

σ , constante de Stefan-Boltzmann,, = 5.67 x 10-8 W/m2 °K4

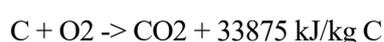
A, superficie de emisión

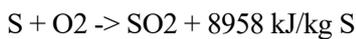
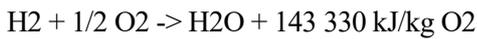
4.5 Mecanismo de transferencia de calor en el hipocausto.

En el hipocausto influyen principalmente dos tipos de mecanismo, de conducción y convección libre. La radiación está presente, ya que los cuerpos la emiten por tener una temperatura superior a los 0 kelvin, pero la influencia que tiene es menor, por lo que se despreciará, aunque se mencionará en sus momentos.

La generación de calor se produce en la combustión que se origina en el horno. La combustión es una reacción química que se produce cuando se oxida el combustible de manera rápida, en la cual se libera las oxidaciones junto a energía en modo de luz y calor.

Las reacciones de oxidación son:





En la combustión (fuego), se pueden encontrar transferencia de calor en modo de convección libre y radiación. En caso del hipocausto, al producirse la combustión en un horno y encontrarse resguardado, la influencia que tiene la radiación en invento del hipocausto es menor. Los romanos aprovechaban la temperatura que tiene los gases calientes de la combustión (1000-2000° C). Es convección libre ya que el movimiento de estos gases de combustión no era producido por ningún agente externo. La diferencia de densidad entre el aire y los gases producía el movimiento. Los gases calientes tienen una densidad menor que los de mayor temperatura, lo que origina que los calientes se eleven. Al mantener el horno encendido, los gases van llenando la cámara hueca inferior, calentando todo el espacio. El desplazamiento de los gases produce una transferencia de calor de manera convectiva con las paredes que encierran el hueco. El techo del espacio hueco es la superficie que mayor calor recibe, por la elevación de los gases. Una vez calentada la superficie del techo del espacio hueco, se produce una transferencia de calor de modo conductiva. El flujo de calor se transmite de manera perpendicular a la superficie, cruzando todo el suelo. El suelo tenía principalmente tres diferentes tipos de capa. Encima de los pilares estaban losas de cerámica que se apoyaban en cuatro pilares, cada uno en un vértice. Tras las losas de cerámicas se extendía una capa de mortero. Por último, dependiendo de la época que pudiese construirse, podían ser teselas de cerámica o losas de mármol. Cada material tiene su propio coeficiente de conducción térmico. Los materiales mencionados tienen una baja conductividad, del orden de la unidad. Esto conlleva una falta de eficiencia y pérdida del flujo de calor. Una vez el flujo de calor atravesaba el suelo se producía otra transferencia de calor de convección libre. Podía calentar el agua de una piscina o el aire que se encontraba en la estancia.

Los gases de calientes seguían el recorrido del circuito, subiendo por las paredes. En esta zona la transferencia de calor sigue los mismos mecanismos. El movimiento de elevación de los gases calientes por su densidad, produce una transferencia de calor en forma de convección libre, y por medio de conducción atraviesa la pared. Las capas que debe atravesar el flujo son parecidas al del suelo. Y con estos dos focos de calor, paredes y suelo, se calentaba por medio de convección libre.

4.6 Construcción del hipocausto.

El hipocausto consta principalmente de tres partes, el horno de leña, el espacio hueco inferior de las estancias, y el circuito que sube por las paredes hasta evacuar los gases en el exterior. El horno era la fuente de energía térmica. El horno estaba construido con ladrillos de barro cocido. Tenía un lecho en el que se depositaba el combustible, principalmente leña o carbón, y el techo estaba construido con forma de arco. Los hornos es un invento antiguo que datan de los antiguos egipcios y babilónicos, hace unos 5000 años, por lo que por esa parte no supuso un gran avance.



Figura 4-3 Horno del Hipocausto.

El espacio hueco o cámara inferior era por donde circulaban los gases calientes. Esto creaba un falso suelo o suelo elevado que era por donde se andaba. Este suelo estaba apoyado en unas estructuras que podían ser de diversa índole, tales como pilares, pequeñas columnas de piezas o arcos de mampostería. Estas estructuras alcanzaban una altura de unos 40 a 60 centímetros. El lado de los pilares solía medir unos 15 centímetros y la distancia entre dichos pilares variaba. La distancia variaba dependiendo de la temperatura que se quería alcanzar en dicha estancia. Con un mayor número de columna y menor distancia entre ellas originaba que el calor de la sala fuese mayor. Esto se debe a que al haber más columnas la corriente de los gases caliente se hace más complicada, una corriente al golpear las columnas forma remolinos que impiden el paso fluido de los gases. Al mantenerse un mayor tiempo en esa cámara, los gases calientan esa cámara y también los pilares, que por conducción transfieren ese calor al suelo que sustentan. En algunas estancias el suelo podía alcanzar los 50° centígrados, lo que obligaba a llevar sandalias para no quemarse los pies, esto ocurría en las termas en las que se podría plantear ir descalzo. Una vez calentado el suelo, este calentaba por convención y radiación la estancia. Como se explica anteriormente, los gases calientes ascienden, lo que genera que calienten la sala de forma homogénea de abajo arriba. Y la radiación que llega a los cuerpos también incrementa el calor recibido. A pesar de que el suelo llegaba a alcanzar una temperatura de 50° centígrados, la temperatura de la estancia era menor, debido a la pérdida de calor por no ser una sala cerrada herméticamente.



Figura 4-4. Suelo elevado con columnas rectas formado por piezas



Figura 4-5 Hipocausto de unas termas de Mérida (Badajoz)

La última parte del sistema es el circuito que iba por las paredes. Este parte tiene dos objetivos. El primero era la evacuación de los gases de combustión, ya que estos no son buenos para la salud y debían liberarse lo más lejos posible de las personas. El otro objetivo era calentar las paredes de aquellas salas que se quisieran tener más calientes. La manera de hacerse era principalmente tres. Las tegulae mammatae eran grandes baldosas que por una de sus caras tenía cavidades, y se sujetaban con un clavo. Esta técnica no tuvo una gran difusión debido a su pobre sujeción y al ser mínimo el espacio ofrecido por la baldosa.



Figura 4-6 Tegulae mammatae

Otro de los métodos fue usando tubuli latericii, eran tubos de cerámicas, no eran cilíndricos, sino que formaban un prisma rectangular, esto se debe a que, si fuesen circular, estando empotrados en la pared habría espacio sin cubrir por los tubos. Muchos contaban con orificios para que los gases pudiesen circular entre dichos tubos. Estos tubos estaban comunicados por la parte inferior a la cámara inferior de la estancia y la parte superior a la chimenea que evacuaba los gases. Con una grapa metálica en forma de "T" y con una capa de mortero se sujetaban de dos en dos los tubos a la pared. Luego se recubría para decorar la pared. Durante el periodo imperial fue la técnica más empleada.



Figura 4-7 Tubuli latericii

La última técnica empleada usaba unos ejes cilíndricos o cónicos cerámicos para separar de la pared unas placas que servirían de falsa pared, sujetas con argamasa y el eje sujeto con clavos en el otro extremo. Esta técnica era mejor debido al menor coste de construcción, dejan pasar menos el aire lo que conlleva una reducción de combustible y al estar en contacto directo con la pared falsa, la transferencia de calor es mayor que con los tubuli.



Figura 4-8. Clavi coctile

Este invento aparte de usarse en residencias privadas de los ciudadanos más acaudalados, donde tuvo su mayor esplendor fue en las termas, los baños romanos. Con el mismo fuego que calentaba el agua que se usaba en el "caldarium", que es la sala caliente, es el que se usaba en el hipocausto. Gracias a este invento, las termas tuvieron una temperatura elevada en invierno, así la comodidad era mayor cuando la usaban los ciudadanos romanos. [18]

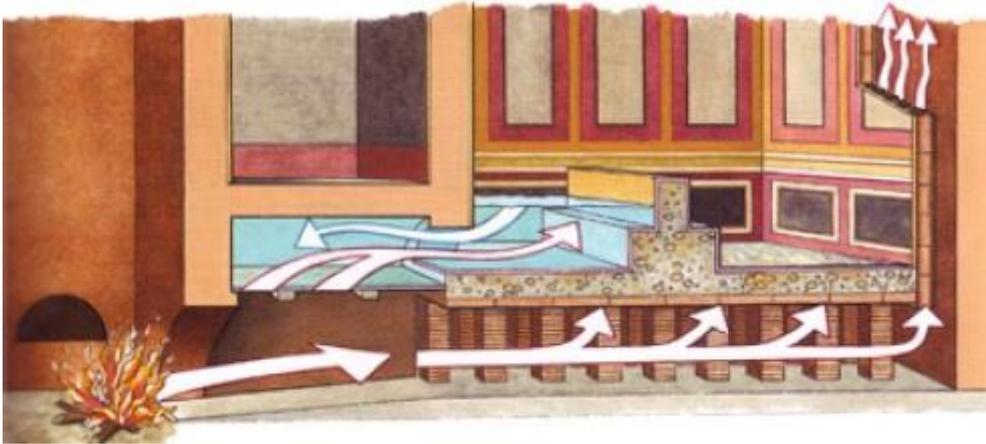


Figura 4-9. Caldarium

4.7 Evolución del hipocausto.

Tras la caída del Imperio Romano, el servicio de las termas decayó, siendo estas las edificaciones con una mayor implementación del hipocausto. De la época de la Edad Media se conserva restos arqueológicos que imitan el funcionamiento del hipocausto, aunque de una manera más rudimentaria. Estos restos se encuentran en Castilla León. A este método de calefacción se le denominó "glorias". En estos tiempos el combustible que más se usaban eran paja, heno o ramillas, combustibles de menor tamaño. Esto se debe también por el tipo de vegetación de la región, que cuenta con pocos árboles. La evolución del hipocausto y la gloria es el suelo radiante. Este método de calefacción sigue el mismo principio que los inventos anteriores. Un foco de energía térmica calienta un fluido, en el caso de los antiguos eran gases y en actual es agua. Luego este fluido es conducido por un circuito que se encuentra por debajo del suelo de la estancia que se quiere calentar.

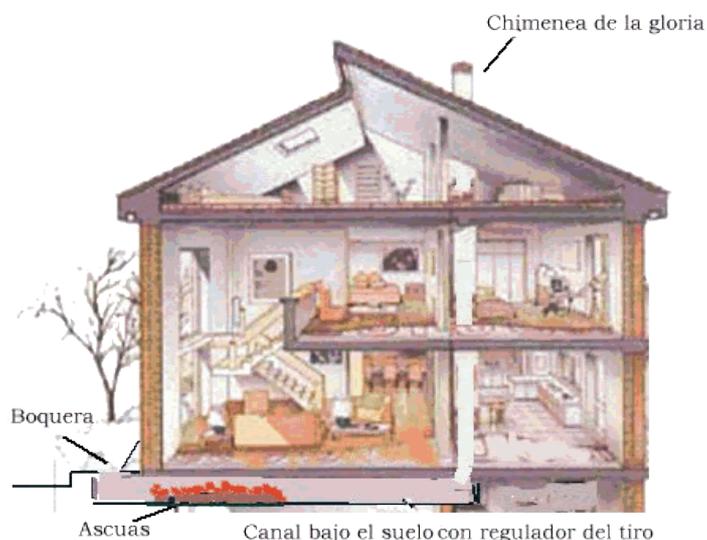


Figura 4-10 Gloria

Actualmente se usan calderas o termos para calentar el agua. Las resistencias eléctricas son las principales fuentes de calor, aunque las más antiguas pueden usar gases. Aunque actualmente con los avances se pueden usar tubos de vacío para aprovechar la energía solar o máquinas aerotérmicas, que con un aporte inferior de potencia eléctrica se consigue una mayor potencia calorífica con el consiguiente ahorro energético y monetario. Para este ahorro energético también se implementa una capa aislante para que el calor generado por el suelo radiante no se pierda por el suelo.

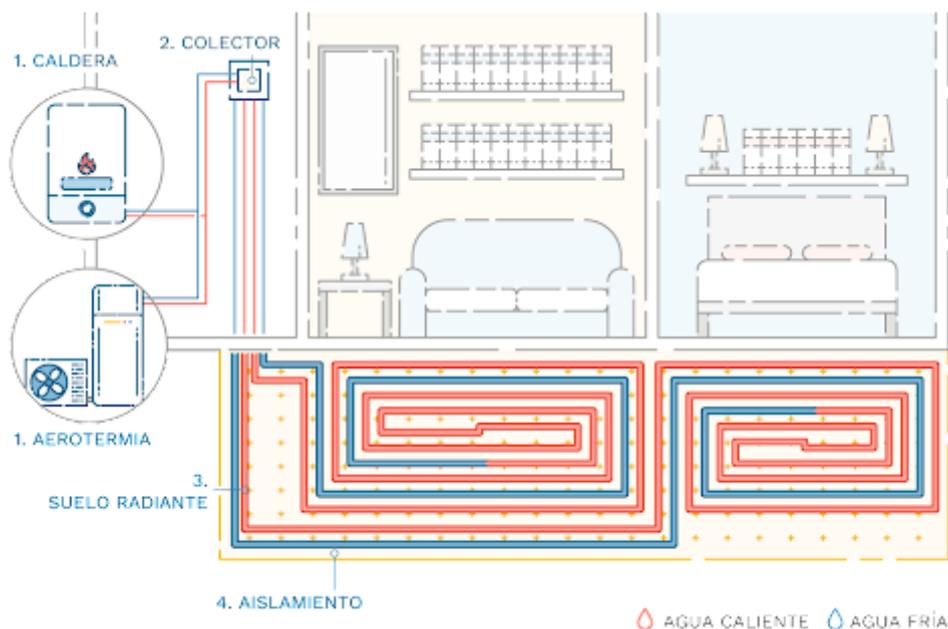


Figura 4-11. Esquema suelo radiante

4.8 Instalación de suelo radiante.

Actualmente los suelos radiantes permiten la refrigeración y la calefacción de las estancias. En caso de calefacción la temperatura del agua que circula es de unos 40° C, y de la refrigeración entorno a unos 16° C. Los pasos a seguir para su instalación son los siguientes, siguiendo el criterio de la "Guía del suelo radiante" elaborada por Comisión de Suelo Radiante de FEGECA (Fabricantes de generadores y emisores de calor)[20]:

- 1 Film anti vapor: Se extiende una hoja de PE (polietileno) para evitar las filtraciones de humedad al forjado.
- 2 La cinta o zócalo perimetral: Se coloca en el perímetro de la hoja de PE. Su cometido es absorber las dilataciones del mortero y evitar pérdidas de calor.
- 3. Plancha aislante: Base en la que se asientan las tuberías que serán el circuito. Gracias a esta plancha el calor no se transmite al forjado. El material más usado es el poliestireno expandido.
- 4. Tubería: Circuito por el que circula el agua. Los tubos suelen estar fabricados en PEX (polietileno reticulado). Los diámetros de los mismos suelen ser entre 16-20 mm. La longitud de los rollos de tubos suele ser de 200 a 400 metros. La disposición típica de un circuito es la espiral, se mezcla tubería que lleva agua más caliente (impulsión) con agua más fría (retorno del circuito).



Figura 4-12. Tuberías de suelo radiante sobre plancha aislante

- 5. Juntas de dilatación y funda aislante: Se usa para superficies superiores a 40m². También se coloca en puertas de zonas independientes. Su funcionalidad es absorber las dilataciones del mortero.
- 6. Colectores. Son de latón o plástico. La entrada y salida del agua caliente. Tienen una llave para cortar el paso del agua y caudalímetros.
- 7. Armarios: Sirve para guardar los colectores. Se coloca a una altura de 40 cm del suelo.
- 8. Regulación: Según RITE, las estancias deben estar independizadas. Cada una de ellas contará con un termostato para regular la temperatura de la habitación, que no del agua que circula.
- 9. Mortero: Antes de colocar el mortero para finalizar, se deberá hacer una prueba de presión, mínimo a 6 bares, el cual servirá para comprobar que no hay fugas.

4.8.1 Fuentes de generación

Los sistemas de suelo radiante trabajan con temperaturas reducidas. La temperatura del suelo radiante no puede superar los 29° C, lo que conlleva que el agua del circuito viaje a una temperatura de entre 35°-40° C. La diferencia entre el agua caliente y fría no supera los 5 a 10 grados. Esto lo hace más eficiente que un sistema de radiadores donde el salto térmico es mayor, lo que consume una mayor potencia [20].

1. Caldera de gas

La temperatura de trabajo viene condicionada principalmente por el vapor de agua que se produce en la combustión. Si la temperatura es menor se condensará hasta formar agua, y la caldera podría averiarse. La temperatura de trabajo de la caldera suele ser de 70° a 80° C, por eso se monta un mezclador de agua, que mezcla el agua que sale de la caldera (70°-80°C) con el agua que retorna del circuito. Desde la entrada en vigor del reglamento Europeo Ecodiseño (ErP) todas las calderas de gas de menos de 400 kW deben ser de condensación. La temperatura de trabajo de estas calderas no exige una alta temperatura, gracias a esto se trabaja a la temperatura requerida y no es necesario mezclar el agua.

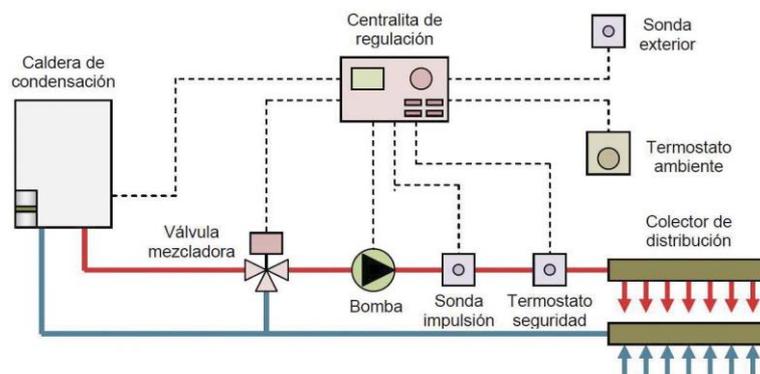


Figura 4-13. Caldera de condensación con válvula mezcladora

2. Calderas de gasóleo

El problema es similar a las calderas de gas, lo que se modifica es el combustible. La diferencia es el nuevo reglamento europeo si permite el uso de calderas de gasóleo a baja temperatura, lo que obligaría a realizar la mezcla del agua para alcanzar una temperatura inferior a 29°C. También existen las calderas de condensación de gasóleo.

3. Calderas de biomasa

El combustible que usa contiene humedad. Lo que ocasiona que haya que vigilar que no se produzca condensación del vapor de agua. Las calderas de biomasa son complicadas de modular la potencia entregada por la caldera. Para facilitar el control de la temperatura se instalan depósitos de inercias. En caso de que el combustible sean pellets el depósito es de unos 100 a 200 litros, debido a que hay cierta modulación de la caldera. En caso de ser leña el combustible la modulación es menor. El depósito de inercia será de 800 a 1500 litros.

4. Energía solar térmica

Se diferencia respecto a las anteriores que la potencia aportada no es producto de la combustión. La dependencia que tiene del sol para producir la potencia la condiciona a que tenga una fuente de calor adicional. Al depender de factores externos, se suele trabajar con acumuladores. El sistema debe funcionar durante todo el año, pero durante el verano el suelo radiante está desactivado, pero se complementa con el agua caliente sanitaria (ACS). Ningún sistema solar funciona en exclusiva como calefacción.

5. Aerotermia

El calor aportado procede de un ciclo térmico que extrae energía del ambiente para transferirla. Puede conseguirlo a pesar de temperaturas ambientales menores a 0°C. Un gas refrigerante comprimido a baja temperatura es el encargado de extraer el calor contenido en el aire del ambiente. Los fabricantes europeos se decantan por el R290 (Propano) como gas refrigerante. Usan tecnología basada en bombas de calor. La ventaja de estas es que transportan más calor que energía eléctrica que consumen. La temperatura de trabajo suele ser de máximo de 60°C por limitaciones de los refrigerantes. Trabajan con saltos térmicos bajos y grandes caudales, perfecto para el suelo radiante. Las bombas de calor necesitan un caudal mínimo para trabajar, entorno a los 3-5 litros por cada kW de la bomba.

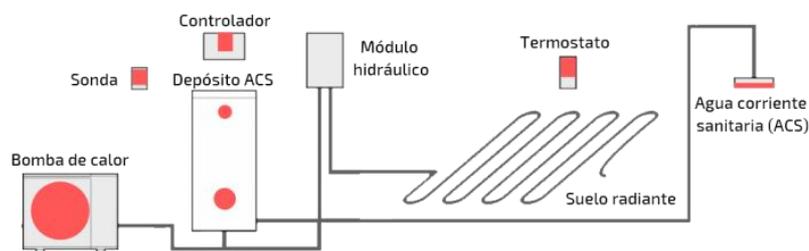


Figura 4-14. Esquema sistema aerotérmico.

5 HORMIGÓN

Los romanos construyeron grandes obras que aún perduran hoy en día. Estos conocimientos que obtuvieron los romanos siguen siendo aún motivo de asombro al crear estas grandes construcciones, pasando por coliseos, acueductos, calzadas romanas, grandes puertos que aún perduran. Esta durabilidad y resistencia se debe principalmente a un componente, el hormigón. Este material hizo posible las grandes ambiciones civiles de los romanos.

Para saber que es el hormigón hay que explicar las partes que lo componen. La primera parte sería el cemento, es un polvo fino compuesto por caliza y arcilla, estas se unen en proporciones específicas y se muelen para obtener el polvo. Es el material más importante, ya que es el conglomerante que hace posible la unión de las partes que conforman el hormigón. Al mezclar cemento y agua se forma una pasta maleable, esta adquiere una consistencia pétreo al secarse, a este proceso se le denomina fraguado. Esta característica es la más importante del cemento y la que hace posible que se use como material de unión. El cemento con solo agua no sirve en la construcción, ya que no tiene la consistencia necesaria para su uso. Incluyendo arena se forma el mortero. Con esta nueva mezcla, si se puede usar. El uso primordial es el de pegar o fijar unidades de construcción como ladrillos o bloques de piedra. El mortero no puede soportar cargas al no tener la resistencia necesaria, por lo que no se puede usar como parte de la estructura de la construcción. Para soportar las cargas se incluye a la mezcla grava, esto es un árido formado por granos con un mayor diámetro, que le otorga mayor consistencia a la mezcla y le permite resistir cargas. Esto permite usar el hormigón como parte de la estructura, tales como cimentación, pilares u otras partes. [21]

5.1 Precursores al Hormigón romano

Con una mezcla de agua, arena y un árido, que solía ser piedra caliza, se creaban los primeros morteros de la historia. Esta mezcla era de fácil modelaje y cuando se endurecía adquiría unas características idóneas para la construcción. En unas expediciones arqueológicas en Nevalı Çori (Turquía), se han encontrado restos de mortero de cal en suelos, que datan de 10000 a.C. a 8000 a.C. En Lepensky Vir (Serbia), el suelo de una cabaña está hecho de hormigón según fuentes históricas que datan del 7000 a. C. Aunque la mayoría de las civilizaciones usaban arcilla húmeda, con la que formaban una pasta maleable para cubrir suelo y paredes. Esta al secarse se endurecía y formaba una costra que recubría y hacía de unión, el precursor del mortero.

En el Antiguo Egipto se usaron morteros de yeso, y fueron los únicos en hacerlo, ninguna otra civilización llegó a usarlo. Según el uso que se le fuese a dar se formaba un mortero u otro. Los egipcios dieron tres principales: de colocación, de acabado y de decoración. El Yeso de Colocación se usaba como lubricante, para poder arrastrar

las grandes piedras que conforman las edificaciones de los egipcios. Unas de las obras en las que se han encontrado restos de este mortero son la Gran Pirámide de Giza y la Esfinge.

Este mortero presentaba anhidrita, al calentar los yesos a 300° centígrados, la cristalización del mineral se hace en ausencia de agua. Debido a este componente, el fraguado se llevaba a cabo de una manera extremadamente lenta. El Yeso de Acabado presenta hemidrato, esto es media molécula de agua por cada una de yeso, se obtenía calentando entre una temperatura de 120° a 160° centígrados. En este caso el fraguado era rápido. El uso que se le daba era para tapar irregularidades en superficies. Los Yesos de Decoración se empezaron a usar en el siglo IV a.C., estos perduraron y los griegos y romanos también hicieron uso de ellos. Se usaba principalmente para decorar las paredes con pinturas, ya que estas se quedaban mejor grabada sobre el yeso. Se conserva una prueba pictográfica de este hecho. En la necrópolis de Tebas se encontraba, depositadas en la actualidad en el British Museum de Londres, un mural en el que se aprecia la creación y uso del hormigón que usaban los egipcios.



Figura 5-1. Mural de tebas.

En un principio en la Antigua Grecia se usaba tierra y arcilla como mortero en las construcciones. El mortero de cal no se llegó a usar hasta el siglo II o I a.C. Los griegos usaban el mortero de cal o yeso como estuco. Esto le servía para adornar y embellecer las paredes y techos de sus edificios. Tras la aplicación del estuco se pulimentaba, esto se hacía para aumentar la impermeabilidad, mejorar la durabilidad del material y que el acabado fuese más bello.[22]

5.2 Hormigón romano

El hormigón romano se llamaba opus caementicium, siendo opus, obra y caementum, escombros. Se tiene mención del uso del hormigón romano por un escrito de Catón en siglo II a.C., a pesar de la mención, la fecha exacta de la introducción no se sabe, pero el rango acotado son el siglo II y I a.C., los dos últimos siglos de la República Romana. Anteriormente en la construcción se encajaban bloques de piedras sin mortero, llamada opus quadratum la técnica y la otra técnica opus latericium, que consistía en ladrillos secos que se colocaban sin ninguna fijación, solo con el peso de la gravedad.

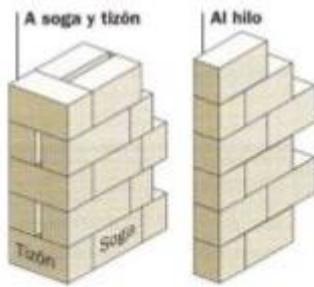


Figura 5-2. Opus quadratum



Figura 5-3. Opus latericium

Con el uso del hormigón crearon magníficas obras de ingeniería y las extendieron por todo el territorio que dominaban. El hormigón de los romanos le daban una durabilidad a sus creaciones que hoy en día siguen estando de pie, tales como acueductos como el de Segovia o puentes como el de Alcántara, Cáceres. Esto es sorprendente porque el hormigón actual, a los 50 años empieza a mostrar signo de deterioro. Aunque el hormigón romano es mejor que muchos hormigones no supera a los mejores que actualmente se encuentran en el mercado, pero tiene ciertas características que lo hacen superior. Tras la caída del Imperio Romano la fórmula se perdió y se dejó de fabricar el hormigón romano.



Figura 5-4. Acueducto de Segovia

5.3 Grandes obras romanas

5.3.1. El Coliseo

Uno de las grandes edificaciones que siguen en pie, que se encuentra en la ciudad de Roma. Originalmente se llamaba Anfiteatro Flavio (*Amphitheatrum Flavium*). Según los historiadores, se cree que el nombre cambio a Coliseo (*Colosseum*) por la cercanía de una gran estatua (coloso) de Nerón. Ya que los terrenos donde se asienta el Coliseo, fueron anteriormente la residencia del emperador Nerón, que se encontraba al Este del Foro Romano. Los anfiteatros romanos eran lugares donde se acogían espectáculos para entretener a la población romana. Las obras comenzaron entre el 70 d. C. y el 72 d. C. bajo el gobierno del emperador Vespasiano. El Coliseo era el anfiteatro de mayor envergadura en el imperio. Las obras finalizaron el año 80 d. C. bajo el emperador Tito, y por orden del emperador Domiciano se modificó. Se desconoce la identidad del arquitecto encargado de la obra, ya que el mérito de las construcciones públicas recaía sobre el gobernante que las encargaba.



Figura 5-5. Recreación del Coliseo con la gran estatua de Nerón

El Coliseo mantuvo su función de lugar público de entretenimiento durante más de 500 años, lo que demuestra la solidez con la que los romanos lo construyeron. En la Alta Edad Media pasó a realizar otras funcionalidades como refugio, fábrica, sede de una orden religiosa, fortaleza, cantera y santuario cristiano.

El lugar en el que se construyó es una zona pantanosa, conllevó que secaran el lugar y vertieran hormigón a unos doce metros de profundidad para darle estabilidad. El Coliseo presenta una forma elíptica en su planta. La elipse mayor tiene 189 metros de largo, la menor 156. Una altura de 48 metros, con un perímetro de 524 metros. El terreno de juego donde acontecía los espectáculos tiene forma de óvalo con unos radios de 75 por 44 metros. El subsuelo se componía de túneles, mazmorras y diversas estancias de uso.

Los principales materiales que se usaron fue el hormigón romano, más de 100.000 metros cúbicos de mármol travertino y 300 toneladas de hierro para las grapas que conectaban los bloques entre sí. El Coliseo podía albergar entre 50000 a 70000 espectadores. Los espectadores se sentaban en las gradas que estaban diferenciadas en distintas terrazas, al conjunto del graderío se le designa como la cávea. Se dividía en cuatro terrazas. El podium la terraza más cercana al terreno, estaba reservado para los ciudadanos más ilustres de roma, el emperador, senadores, sacerdotes importantes... El maenianum primum, la aristocracia romana que no pertenecía al senado. El maenianum secundum, dividido en imum para los ciudadanos ricos y el summum para los pobres. Y en la zona superior se encontraba el maenianum summum in ligneis, se sentaban las mujeres y los más pobres de los ciudadanos romanos.

Para soportar el peso de la cávea se requirió de una estructura sólida. Estaba formada por arcos de medio punto que se apoyan sobre robustos pilares de piedra y argamasa y que sostienen las bóvedas anulares. Los arcos están

hechos de travertino sin argamasa, mientras que las bóvedas están hechas de argamasa vertidas en cimbras de madera. [23]

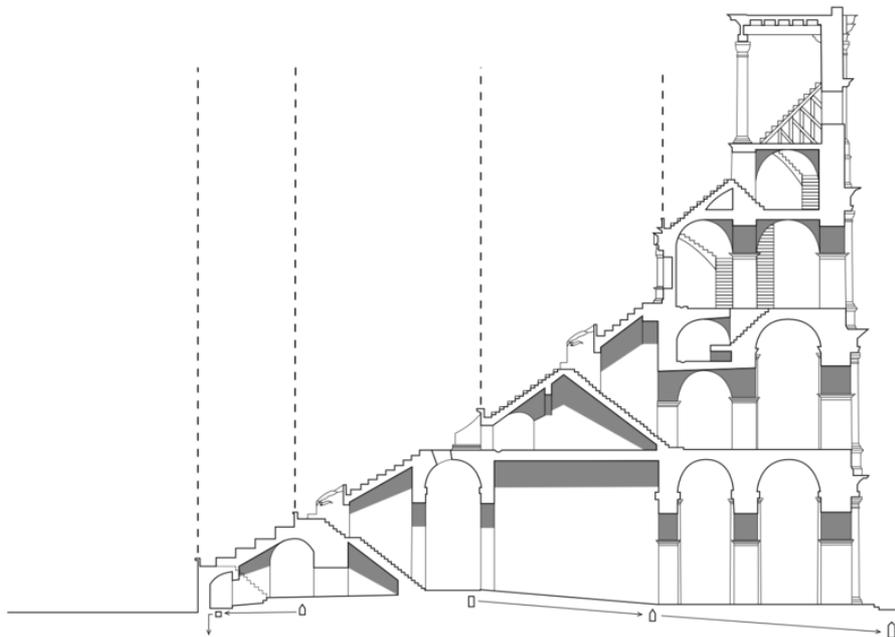


Figura 5-6. Sección de la cávea del Coliseo

5.3.2. Aqua Claudia

Es un acueducto octavo por antigüedad que se construyó en Roma. Se construyó bajo el emperador Calígula en el año 38 d. C. y las obras finalizaron en 52 d. C. durante el gobierno del emperador Claudio. Tenía una longitud de 68681 metros, que iba desde la cima del valle en el que se encontraba el río Aniene a unos 320 metros de altura, y terminaba cerca de la Porta Maggiore a una altura de 67 metros. Transportaba 184.280 metros cúbicos al día.



Figura 5-7. Acueducto Aqua Claudia

El agua fluía por unos conductos, estos en los primeros tiempos estaban contruidos por sillares de piedras talladas, en la última época de la república, los conductos pasaron a ser de ladrillo y hormigón. El agua fluía por la fuerza de la gravedad, porque los acueductos tenían una inclinación, Vitrubio recomendaba una inclinación de 1:4800. El volumen de agua transportada podía variar y dependía de lluvia, absorción, escorrentía y la sección transversal del conducto y su gradiente. Los conductos solían estar llenos hasta dos tercios.

5.3.3. Via Apia

Era una de las calzadas más importantes de Roma. Partía de la ciudad de Roma hasta la ciudad de Capua. Considerada la primera autopista del mundo. Fue construida en el año 312 a. C. por orden del censor Apio Claudio Caeco, con una longitud de 212 kilómetros y con una anchura de 8 metros. Esta anchura facilitaba el tránsito en las dos direcciones. Tras una ampliación de Capua hasta la ciudad portuaria de Brindisi, la calzada aumento su longitud hasta los 540 kilómetros.



Figura 5-8. Via Appia

Proceso de construcción de calzadas romanas según las investigaciones de Isaac Moreno Gallo [24]

- Deforestación. Se quitaba todo el material vegetal del trazado.
- Explanación. Se alisaba el terreno para que presentase un mismo nivel.
- Delimitación del firme. Se acotaba la anchura que tendría la calzada.
- Cimentación. Se colocaba piedras para crear una capa sólida de cimentación
- Capas intermedias. Los tamaños de los materiales son variados, pasando desde arena a grava. Se mezclaban con el hormigón para mantener la consistencia.
- Capas de rodadura. Cantos rodados apisonados.

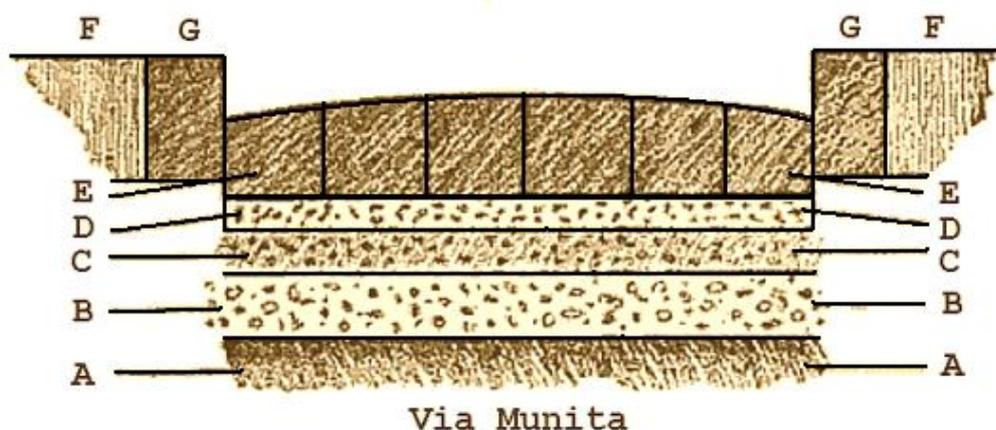


Figura 5-9. Sección de calzada romana

- (A). Suelo, nivelado y apisonado.
- (B). Statumen: piedras del tamaño de un puño.
- (C). Piedra cantera, cemento y loam.

(D). Nucleus: guijarros de tamaño de una nuez, ladrillos de cemento, piezas de piedra y arcilla.

(E). Dorsum o agger viae: la superficie curvada (media stratae eminentia) hacía de la piedra, sílex o de piedra de basalto bloques de cantería, dependiendo del área.

(F). Crepidio, margo o semita: El camino elevado en cada lado de la carretera.

(G). Piedra angular.

5.3.4. Otras grandes obras romanas.

Las grandes construcciones romanas era casi todas de funcionalidad pública. Exceptuando alguna residencia imperial, todas las demás eran de uso público.

-El Foro Romano: Zona central de las ciudades romanas. En él se encontraba las instituciones de gobierno, de mercado y religiosas. Tiene forma geométrica rectangular, en los lados se encuentran los pórticos, que acoge las instituciones.

-Arcos de triunfo: Estos arcos se hacían en honor a la victoria de alguna guerra con importancia significativa. El primero arco construido estaba dedicado a Lucio Stertino construido 196 a. C

-Columnas conmemorativas. Tenían la misma funcionalidad que los arcos del triunfo, solo que la forma cambiaba de arco a columna.

-Termas. Eran lugares de aseo para los ciudadanos romanos. También un lugar donde puede sociabilizar.

-Circo romano. Grandes instalaciones de uso recreativo con forma ovalada, en el cual se producían carreras de caballos. El origen data de los hipódromos de la Antigua Grecia.

-Teatro romano. Lugar de ocio en el que se representaba obras dramáticas para deleite de la ciudadanía.

-Puentes romanos. Cuando una calzada llegaba a una zona que requería un salto, los romanos construían puentes para salvar la distancia. Los romanos los construían de manera sólida y resistentes, que han llegado hasta nuestros días.



Figura 5-10. Recreación Foro Romano



Figura 5-11. Arco del triunfo de Constantino



Figura 5-12.
Columna de Trajano



Figura 5-13. Recreación Circo romano



Figura 5-14. Teatro romano de Mérida

5.4 Compuestos del Hormigón romano

Vitruvio en *Los diez libros de arquitectura, Libro II*, capítulo V dice: "Cuando la cal queda apagada, se mezcla con arena de cantera, en proporción de tres cuartas partes de arena por una de cal; si se trata de arena de río o de mar se mezclarán dos partes de arena por una de cal; así se hará una exacta y justa proporción de la mezcla. Se conseguirá una mezcla de mejor calidad para su uso, si se añade a la arena de río o del mar una tercera parte de arcilla machacada y cribada [25]." En estas líneas menciona la creación del mortero. La cal y la arcilla forman el cemento y con la arena se forma el mortero. Por otro lado, en el mismo libro II pero en el capítulo VI dice: "al absorber agua a la vez, se unen formando un todo compacto y endurecido, que adquiere mayor solidez por causa del agua, y ni las olas ni el ímpetu del mar pueden deshacerlos o disolverlos [26]." Esto lo dice del polvo de puzol, un material que se encuentran en la ladera del volcán Vesubio, en la región de Italia. Con este polvo mezclado con el mortero anterior se forma el hormigón que servía de estructura para grandes obras y que ha hecho posible que sigan en pie hoy en día.

Lo comúnmente llamado cal, es óxido de calcio que se forma en rocas calizas por la calcinación, esto se origina por estar afectado por altas temperaturas. Existen principalmente tres tipos de cal. La cal aérea, es la más usada en los morteros tradicionales. La característica de esta cal es que necesita la presencia del aire para endurecerse y carbonatar, esto es formar carbonato de calcio (CaCO_3). La cal hidráulica al contrario que la aérea no necesita la presencia del aire para fraguar y endurecerse, llegando hasta poder realizar ese proceso bajo el agua, una característica muy interesante para construcciones bajo el mar. Está compuesta por un 20% de arcilla. Por último, se encuentra la cal apagada, es aquella formada por hidróxido de calcio y se origina al añadir agua a la cal viva (óxido de calcio). La cal se obtiene calentando a temperaturas de unos 900° centígrados piedra caliza.

Vitruvio diferenciaba dos tipos de cal dependiendo de que piedra saliese. Si la piedra era dura y compacta era idónea para la construcción si por el contrario la piedra era porosa servía para enlucidos.



Figura 5-15. Piedra Caliza

La composición principal de la arcilla es silicato de aluminio hidratados ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que se origina por la descomposición de las rocas sedimentarias. Al mojarla se vuelve maleable y por encima de los 800° centígrados se seca y alcanza una dureza. Este proceso también puede ser originado de manera natural esperando a que se deshidrate la arcilla mojada de manera natural, aunque esta manera natural no consigue que alcance el mismo nivel de dureza. El tamaño granulométrico de las partículas de la arcilla es menor a 0,0039 milímetros.



Figura 5-16. Arcilla

La variedad de arena existente es muy amplia, ya que está formada por rocas y minerales que el tamaño de las partículas está comprendido desde 0,063 a 2 milímetros. El compuesto que mayor presencia tiene es el sílice en forma de cuarzo. Vitrubio en el capítulo IV del *Libro II* del libro *Los diez libros de arquitectura*, habla de la arena que se debe usar: " la más idónea será la que, al frotarla fuertemente con las manos, produce un crujido; este efecto no se consigue con la arena mezclada con tierra, pues no tiene aspereza [27]. " También destaca que la arena de ríos y mares no era adecuada al ser más húmeda y no podía soportar grandes cargas. Recomendaba usar este tipo de arenas para enlucidos y las otras para mezclarla y usarla para soportar las cargas.



Figura 5-17. Arena

El polvo de puzol, como se ha explicado anteriormente, se obtenía de la falda del volcán del Vesubio. Este polvo se puede considerar como los aditivos de hoy en día, se usaban para aumentar algunas características del hormigón. Está formado por distintos componentes principalmente por óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). La mezcla hacía más resistente y más duradero al hormigón. Como se menciona anteriormente, Vitrubio aprecia que este material es beneficioso para las construcciones bajo el agua de mar. Esto se debe a que la mezcla de la cal y el polvo de puzol con el agua marina formaba unos cristales llamados tobermorita. Se forman tobermorita aluminosos al reaccionar el agua con la Phillipsita, mineral que se encuentra en rocas volcánicas. Este fenómeno tiene especial relevancia debido a que el actual hormigón se deteriora con el agua. Gracias a la calidad del hormigón que usaban consiguieron hacer la cúpula de hormigón no armado más grande del mundo, la del Panteón de Roma, récord que siguen ostentando hoy en día a pesar de los avances producidos en la industria cementera. Otra de las cúpulas que podrían equipararse sería la de la catedral de Florencia, pero está construida con ladrillos siguiendo la estructura de espina de pez y la cúpula de San Pedro el Vaticano mide 41 metros de diámetros haciéndola menor que la del Panteon (43 metros), aunque la cúpula del Vaticano tiene una mayor altura.



Figura 5-18. Puzolana volcánica negra.

Para la fabricación del mortero u hormigón, primero se debía obtener la cal de las piedras de caliza. Este proceso consistía en introducir la piedra en un horno, hasta alcanzar una temperatura de unos 900° centígrados, luego se molía la piedra para obtener un polvo fino que es el que se mezclaba con la arena, la arcilla, el polvo de puzol y el agua. [28]

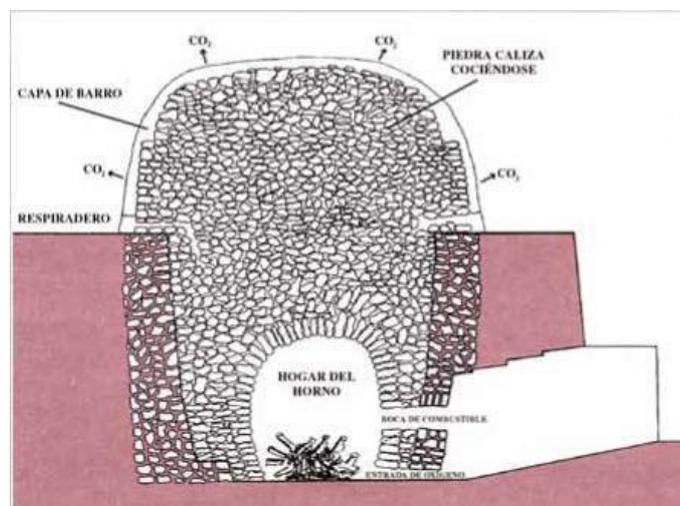


Figura 5-19. Horno de caliza

5.5 Evolución del Hormigón

Con la caída del Imperio Romano, y Europa asolado con invasiones y guerras se pierde la técnica romana para la construcción. Las construcciones se vuelven toscas y más burdas que las romanas. La mayoría de las edificaciones vuelven a ser de madera y otros materiales combustibles como recubrimiento, lo que ocasionaba un gran peligro cuando se producían incendios. Los edificios de piedra estaban reservados para castillos y templos. Hasta el siglo XIII no se encuentran grandes edificaciones hechas con hormigón. Entre ellas cabe destacar la Catedral de Salisbury y la Torre de Londres, ambos en Inglaterra, sus cimentaciones están hechas de hormigón. Sobre las rocas de Eddystone, un lugar al suroeste de Inglaterra se habían levantado dos faros hechos de madera, pero uno detrás de otro fue destruidos por las inclemencias del tiempo. Para construir el tercer faro en 1756 se encarga al ingeniero John Smeaton para que lo volviese a construir. Busco la manera de encontrar una cal para usar en el mortero que fuese resistente al agua. Realizó unos ensayos con una caliza de Aberthaw que dieron resultados satisfactorios. Cuando se analizó se observó que había partes de arcilla, se llegó a la conclusión de que esta era la causante de la resistencia del mortero frente al agua.



Figura 5-20. Catedral de Salisbury

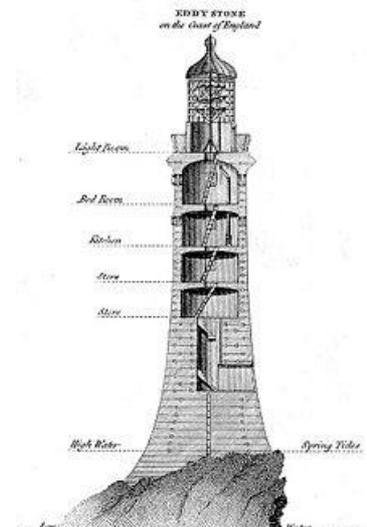


Figura 5-21. Faro de Eddystone

En 1824 Joseph Aspdin y James Parker patentan el cemento de Portland, formado con caliza y carbón. En nombre viene de la isla de Portland, al tener un color oscuro parecido al cemento. Es un cemento hidráulico, esto es que puede fraguar en presencia de agua. El hormigón de hoy en día su principal compuesto sigue siendo el cemento de portland, este no ha variado mucho desde que se patentó [29].

Está compuesto por:

Óxido de calcio (44 %),

Óxido de silicio (14,5 %),

Óxido de aluminio (3,5 %),

Óxidos de hierro (3 %)

Óxido de magnesio (1,6 %)

Su fabricación se divide en tres partes. La preparación de las materias necesarias para su creación. Luego se produce el Clinker, este se forma tras calentar los óxidos a una temperatura entre 1350° a 1450° centígrados. Esta parte es el gran contaminante de la industria cementera. Las altas temperaturas contaminan y liberan el 5%

del CO₂ antropogénico y los desechos que produce el horno.



Figura 5-22. Clinker

Los hormigones soportan muy bien los esfuerzos de compresión, pero los de tracción y esfuerzo cortante es muy pobre. Para aumentar la resistencia a estos esfuerzos, se introduce varillas de acero que en su conjunto se le llama armaduras. La combinación de estos dos materiales, que trabajan como uno solo al fraguar, aumenta la resistencia. El invento se suele atribuir a Joseph-Louis Lambot, que creó el casco de un barco de hormigón armado. [30]

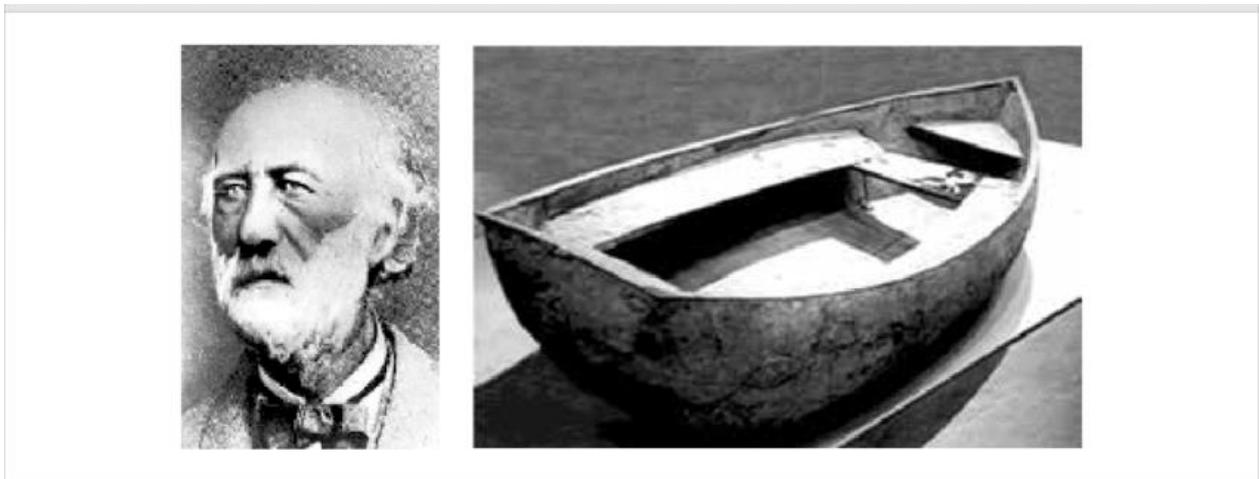


Figura 5-23. Izda. Joseph-Louis Lambot. Der. Barco de hormigón armado

A pesar del avance hasta nuestros días aún no se ha vuelto a crear el hormigón romano exacto. La geóloga Marie Jackson de la Universidad de Utah (EE UU) y empleados del Departamento de Energía de EEUU están realizando investigaciones para recrear el hormigón romano. [31]

Los motivos principales son que, a pesar de haber hormigones de mejor calidad, el hormigón romano calentaba a una menor temperatura unos 900° centígrados, lo que ayudaría a la contaminación de CO₂. El otro motivo es que el hormigón romano soporta mejor la erosión del mar, lo que hace más duradero la construcción y más rentable para empresas y gobiernos que en sus cálculos pueden incluir que durará más años la construcción.

6 CONCLUSIÓN

El ser humano ha creado e innovado con inventos que en tiempos anteriores se considerarían magia o dado por imposible de realizar. Gracias a esos avances la vida del hombre ha sido más llevadera y ha conseguido aumentar su bienestar. Estos avances han sido tan importantes y han dejado tal marca en la historia de la humanidad que, en las primeras épocas de la historia, esta se ha dividido por los avances que han ido creando el hombre. La implementación de la agricultura y la ganadería, produce el cambio del Paleolítico al Neolítico. El paso del Neolítico a la Edad de los Metales surge por el descubrimiento y el uso de los metales en la vida de la persona. Y el inicio de la Edad Antigua se da por la escritura. El ser humano no ha dejado de inventar e innovar para mejorar su vida o alcanzar lugares con los que soñaba estar. Esto ha llevado a crear cosas grandiosas.

A pesar de toda la innovación y progreso que el hombre ha podido implementar a su vida hay cosas que cuando se inventaron ya fueron perfectas en cuanto al concepto y no han evolucionado. Como se ha mostrado en este trabajo, inventos que fueron ideados en la Edad Antigua y que no ha cambiado el concepto del invento. Ha cambiado las potencias que mueven el mundo. Primero dependía de la fuerza animal, humana y de la naturaleza, para pasar a máquinas de vapor, motores de combustión y motores eléctricos. Pero el concepto de tubería no ha cambiado, se sigue usando un cilindro hueco para transportar fluidos, solo ha progresado los procesos de fabricación y los materiales usados. Las grúas siguen siendo el mejor modo de elevar objetos, y gracias a la polea se reduce la potencia consumida para elevar cargas de mayor peso. El hipocausto puede ser el invento visto que más ha cambiado, aunque el concepto del suelo radiante es el mismo, transportar un fluido caliente por debajo del suelo para caldear la estancia superior. Y el hormigón a pesar de no tener exactamente la misma composición sigue siendo usado para unir ladrillos y bloques de piedra y se sigue usando como parte de las estructuras de las nuevas construcciones. Y sin mencionar inventos de carácter más sencillos que no se ha tenido en cuenta tales como cubiertos que siguen igual, sillas y mesas, una pala para excavar. Inventos de uso cotidiano que a pesar de usarse día a día fueron inventados en algún momento de la historia y no han sufrido grandes modificaciones

Con este trabajo se ha querido mostrar que a pesar de los grandes avances que realiza el hombre conforme pasan los años y los grandes inventos que aún pueden faltar por idear y crear, no podemos desdeñar el pasado. Hay inventos que seguirán sin modificar y que seguirán formando parte del hombre y que han sido los que gracias a ellos hemos llegado hasta nuestro tiempo.

REFERENCIAS

- [1] De la Peña Olivas, José Manuel. *Sistemas romanos de abastecimiento de agua*. En *V Congreso de Obras Públicas Romanas técnicas y construcciones en la Ingeniería romana*, 2010, pp 249-281
- [2] Marco Lucio Vitruvio Polion, *Los diez libros de Arquitectura. Libro VII*. Capítulo VI
- [3] Cano Ortiz, Isabel y Acero Pérez, Jesús, 2004. *Los usos del plomo en la ingeniería hidráulica romana. El caso de Augusta Emerita*.
- [4] Egea Vivancos, Alejandro. *Ingeniería hidráulica en Carthago Nova: las tuberías de plomo. Mastia1*, 2002, pp 167-178
- [5] Ingemeccánica. Estudio y Clasificación de las Fundiciones. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: <https://ingemeccanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html>
- [6] Castro, Guillermo. *Fundiciones. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A.* 2009
- [7] CÓMO SE HACE EL CPVC: DESDE EL DISEÑO DE MATERIALES AL PRODUCTO TERMINADO. Corzan. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: <https://www.corzan.com/blog-sp/c%C3%B3mo-se-hace-el-cpvc-desde-el-dise%C3%B1o-de-materiales-al-producto-terminado>.
- [8] Extrusión. Mexpolimeros. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: <https://www.mexpolimeros.com/extrusion.html>
- [9] Grúas Antiguas. Grúas y aparejo. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: <https://www.gruasyaparejos.com/gruas-de-construccion/gruas-antiguas/>
- [10] Ventaja mecánica. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Ventaja_mec%C3%A1nica
- [11] Tecnología y ciencia. Gobierno de canarias. [consulta: 04 octubre 2021] Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/msiedel/materiales-2/>
- [12] Gómez de la Peña, Enrique, 2017. *Refuerzos y reparación con FRP de vigas de madera aserradas sometidas a flexión*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Pp 14-26
- [13] Mecanismos. Areotecnología. [consulta: 04 octubre 2021] Disponible en: <https://www.areotecnologia.com/TUTORIALES/mecanismos.htm>
- [14] Historia: Todo sobre la invención y evolución de una grúa. Gruasarlin. [consulta: 02 octubre 2021] Disponible en: <https://www.gruasarlin.com/historia-invencion-evolucion-grua/>
- [15] Montserrat Martínez, Oriol, 2017. *Diseño de una grúa torre*. Trabajo fin de grado. Universidad politécnica de Cataluña. Pp 22-27
- [16] Tomás, A. *Estructuras Trianguladas*. Dpto. Ingeniería Civil UPCT. Pp 2-5
- [17] Instituto Técnico de la Estructura en Acero. *Estructuras tubulares*. Pp 5-10
- [18] Hypocaustum, la calefacción doméstica en la antigua Roma. Domus romana. [consulta: 13 octubre 2021] Disponible en: <https://domus-romana.blogspot.com/2019/12/hypocaustum-la-calefaccion-domestica-en.html>
- [19] PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN INGENIERÍA. Pirobloc. [consulta: 05 octubre 2021] Disponible en: <https://www.pirobloc.com/blog-es/principios-de-transferencia-de-calor-en-ingenieria/>
- [20] Comisión de Suelo Radiante de FECECA (Fabricantes de generadores y emisores de calor), 2017. *Guía del suelo radiante*. Pp 27-32; 43-52.
- [21] Diferencia entre cemento, mortero y hormigón. Galistar. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en:

<https://www.galistar.es/diferencia-cemento-mortero-hormigon/>

[22] Álvarez Galindo, José Ignacio, Martín Pérez, Antonio y García Casado, Pedro J. *Historia de los morteros*. Artículo. Universidad de Navarra.

[23] Coliseo de Roma. Wikiarquitectura. [consulta: 06 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/coliseo-de-roma/>

[24] Moreno Gallo, Isaac, 2002. *Infraestructura viaria Romana II*.

[25] Marco Lucio Vitruvio Polion, *Los diez libros de Arquitectura. Libro II*. Capítulo V.

[26] Marco Lucio Vitruvio Polion, *Los diez libros de Arquitectura. Libro II*. Capítulo VI.

[27] Marco Lucio Vitruvio Polion, *Los diez libros de Arquitectura. Libro II*. Capítulo IV.

[28] Guerra García, Pablo, 2015. *Sola Romani: Morteros Hidráulicos romanos en la península ibérica*. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Pp 52-94

[29] Cemento de Portland. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 19 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_Portland

[30] Carrasco Rouco, David, 2007. *Las capacidades primitivas del hormigón armado*. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Pp 123-188

[31] Orti, Antonio, 2021. *La fórmula perdida y no superada del ultrarresistente cemento romano*. *La Vanguardia*. 17 de abril. Disponible en: [La fórmula perdida y no superada del ultrarresistente cemento romano \(lavanguardia.com\)](https://www.lavanguardia.com)

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

Ahora sabemos cómo el concreto de la Antigua Roma resiste el paso del tiempo. N+1, artículos científicos, noticias de ciencia, cosmos, gadgets, tecnología. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: <https://nmasl.org/news/2017/07/04/concreto>

Antigua Grecia. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 21 julio 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Antigua_Grecia

Aqua: el abastecimiento de agua en las ciudades romanas. Histórico digital. [consulta: 21 julio 2021] Disponible en: <https://historicodigital.com/aqua-el-abastecimiento-de-agua-en-las-ciudades-romanas.html#:~:text=En%20Roma%2C%20los%20primeros%20acueductos,144%20a.C.%3A%20el%20Aqua%20Marcia.>

Arcilla. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arcilla>

Arena. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arena>

Canalizaciones. Patrimonio Romano de Aragón. [consulta: 22 julio 2021] Disponible en: <http://aragonromano.ftp.catedu.es/canaliza.htm>

Cemento. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 19 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>

Concreto. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 19 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Concreto>

Corbella Aranda, Xavier, Bestué Valenzuela, Joan, 2010. *Diseño y determinación de propiedades de un hormigón romano*. Proyecto final de carrera. Universitat politècnica de Catalunya.

Etimología de hipocausto. Dechile. [consulta: 13 octubre 2021] Disponible en: <http://etimologias.dechile.net/?hipocausto>

Grúa (máquina). Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BAa_\(m%C3%A1quina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BAa_(m%C3%A1quina))

Hattusa. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 13 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hattusa>

Hipocausto: El suelo radiante con más de 2000 años. Nergiza. [consulta: 13 octubre 2021] Disponible en: <https://nergiza.com/hipocausto-el-suelo-radiante-con-mas-de-2000-anos/>

Historia de la calefacción: el Hipocausto. Tecnosos Galicia. [consulta: 13 octubre 2021] Disponible en: <http://www.tecnososgalicia.es/blog/historia-de-la-calefaccion-el-hipocausto/>

Historia de Roma. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 21 julio 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Roma#Civilizaci%C3%B3n_de_Roma

Historia del cemento. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: <https://www.ieca.es/historia-del-cemento/>

Los gases y los humos, productos de la combustión. Expower. [consulta: 14 octubre 2021] Disponible en: <https://www.expower.es/humos-gases-combustion.htm>

Mortero. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 19 octubre 2021] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_\(construcci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_(construcci%C3%B3n))

Opus caementicium. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 19 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Opus_caementicium

Óxido de calcio. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 20 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_calcio

Polea. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 03 octubre 2021] Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Polea>

Suelo radiante. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 14 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Suelo_radiante

Termas romanas. Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 14 octubre 2021] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Termas_romanas#Los_primeros_ba%C3%B1os

