

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y

Ciencias de la Producción

"CÁLCULOS DE RIGIDEZ DE TUBERÍA DE PARED ESTRUCTURADA DE PLÁSTICOS PARA CONDUCCIÓN DE AGUAS SERVIDAS Y DRENAJE"

EXÁMEN COMPLEXIVO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Daniel Augusto Alarcón Cabezas

Guayaquil – Ecuador

2016

AGRADECIMIENTO

A Dios, que me ha llenado de muchas bendiciones, salud y bienestar.

A mis padres, por haberme dado las herramientas de vida, su guía y consejo en todo momento.

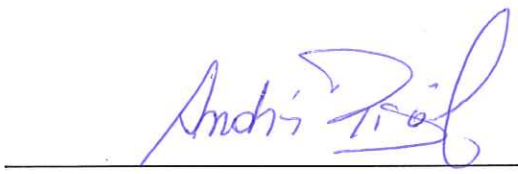
A la empresa Mexichem Ecuador S.A, que me brindó la oportunidad para desarrollar este proyecto.

Al Ph.D. Andrés Rigail, Director del Exámen Complexivo, por su paciencia, apertura y apoyo en todo momento.

DEDICATORIA

A MIS PADRES, POR SU
PACIENCIA, CONSTANCIA Y
PREMIACIÓN A SU SACRIFICIO.
A MI ESPOSA, POR TODO SU
AMOR Y APOYO...SIEMPRE.

TRIBUNAL DE SUSTENTACION



PH.D. ANDRES RIGAIL CEDEÑO

VOCAL



MS. CESAR PERUGACHI BENALCAZAR

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La Responsabilidad del contenido desarrollado en presente examen complexivo, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



DANIEL AUGUSTO ALARCÓN CABEZAS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....xi

ÍNDICE DE TABLAS.....xvi

RESUMEN.....xviii

ABREVIATURAS.....xx

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS 4

1.1 Las materias primas de los plásticos 4

1.1.1 Monómeros y síntesis del plástico. 6

1.1.2 Comportamiento del polímero al ser calentado..... 8

1.2 Aditivos y sustancias auxiliares 9

1.2.1 Aditivos de procesamiento. 10

1.2.2 Aditivos funcionales. 11

1.3 Propiedades mecánicas de los plásticos..... 11

1.3.1 Comportamiento bajo carga de los plásticos. 12

1.3.2 Influencia del tiempo en el comportamiento mecánico..13

1.3.3 Capacidad de recuperación de los termoplásticos.....15

1.3.4 Dependencia de los plásticos respecto a la temperatura y el tiempo.....16

1.4 Introducción al proceso de extrusión de tubería de plástico..... 19

1.4.1 Extrusora 19

1.4.2 Tolva 20

1.4.3 Husillo 20

1.4.4 Cilindro 23

1.4.5 Sistema de atemperado 24

1.4.6 Materiales a transformar 25

1.4.7 Moldes 27

1.4.8 Molde de pinola o portamandril 29

1.4.9 Boquillas de hilera plana 30

1.4.10 Dispositivos adicionales 31

1.4.11 Coextrusión 34

CAPÍTULO 2

PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍA DE PARED ESTRUCTURADA 35

2.1 Extrusión de perfiles plásticos 36

2.1.1 Maquina extrusora 36

2.1.2 Enrollador 40

2.2 Enrollado de perfiles 40

2.3 Ensayos realizados en tubería de pared estructurada 43

2.3.1 Prueba de Diclorometano 43

2.3.2 Ensayo de impacto. 44

2.3.3 Prueba de hermeticidad 45

2.3.4 Ensayo de rigidez y aplastamiento (equipos).....46

2.3.4.1 Ensayo de aplastamiento.....49

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE ECUACIÓN PARA EVALUAR PROPIEDADES MECÁNICAS DE TUBERÍA DE PARED ESTRUCTURADA 51

3.1 Características del perfil estructurado.....51

3.2 Diseño de las ecuaciones utilizadas en el perfil de pared estructurada 55

3.2.1 Pared de agua (E2)..... 59

3.2.2 Dependencia de la longitud de pared de agua "l" con el alto del perfil.....60

3.2.3 Dependencia de la longitud de pared de agua "l" con el paso del perfil.... 60

3.2.4 Sección de la pared externa (E1)..... .61

3.2.5 Sección de las nervaduras (N)..... .62

3.2.6 Engrapes (G) ..... .63

3.2.7 Sistema de referencia. ..... .68

3.2.8 Centroide del perfil.....69

3.2.9 Área del perfil.....70

3.2.10 Sistema de referencia 71

3.3 Evaluación de las ecuaciones del perfil utilizando una herramienta CAD (AutoCAD)..... 72

3.4 Aplicaciones de las ecuaciones del perfil de pared estructurada. 74

3.4.1 Cálculo del Peso del perfil extruido..... 75

3.4.2 Determinación de la longitud del rollo para formar el tubo..... 76

3.4.3 Cálculo del peso del tubo..... 78

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LAS BASES DE LOS CÁLCULOS DEL PERFIL DE PARED ESTRUCTURADA 83

4.1 Comparación de la rigidez de una tubería plástica de pared estructurada (real vs teórica) 83

4.1.1 Análisis de diferentes tipos de perfiles. 83

4.1.2 Comportamiento de la rigidez y peso del tubo al modificar diferentes formas del perfil. 87

4.1.3 Diseño de perfiles. 96

4.1.4 Comparativo de la rigidez del perfil con diferentes tipos de materiales..... 99

4.2 Análisis de costos de tubería de PVC y Hormigón..... 102

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 107

5.1 Conclusiones 107

5.2 Recomendaciones 110

BIBLIOGRAFÍA 119

ANEXOS 121

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Distribución mundial de la producción de petróleo 5

Figura 1.2 Estructura del monómero de etileno 6

Figura 1.3 Esquema de polimerización del etileno 7

Figura 1.4 Esquema de unión de monómeros 7

Figura 1.5 Estructuras de diversos tipos de polímeros 9

Figura 1.6 Ensayo de tracción para acero y plástico bajo carga breve.....12

Figura 1.7 Ensayo de tracción para acero y plástico bajo carga prolongada..... 14

Figura 1.8 Modelo de Maxwell para plásticos 15

Figura 1.9 Capacidad de relajación de un tubo de plástico..... 16

Figura 1.10 Curvas de deformación plástica 17

Figura 1.11 Gráfico de relajación 17

Figura 1.12 Gráfico de isocronas esfuerzo – alargamiento 18

Figura 1.13 Instalación línea de extrusión 19

Figura 1.14 Extrusora 19

Figura 1.15 Husillo de tres zonas 20

Figura 1.16 Esquema de la zona de alimentación 21

Figura 1.17 Tipos de husillos para extrusión 22

Figura 1.18 Tipos de zonas de dosificación 24

Figura 1.19 Extrusora de doble husillo de giro contrario 24

Figura 1.20 Tipos de perfiles plásticos 28

Figura 1.21 Componentes del cabezal 28

Figura 1.22 Estructura interna del cabezal 29

Figura 1.23 Repartidor helicoidal 30

Figura 1.24 Boquilla de hilera plana. 30

Figura 1.25 Boquilla en cola de pez. 31

Figura 1.26 Tina de enfriamiento 32

Figura 1.27 Extractor 32

Figura 1.28 Sierra 33

Figura 1.29 Acampanadora 33

Figura 1.30 Esquema de molde tricapa 34

Figura 2.1 Programación de temperaturas y puesta en marcha del grupo extrusor 36

Figura 2.2 Paso del perfil del molde y traslado por la extractora 38

Figura 2.3 Extractora - Sierra 38

Figura 2.4 Muestreo del perfil 39

Figura 2.5 Normalización: Regulación del vacío en la tina de enfriamiento 39

Figura 2.6 Esquema del rolado de tubos de pared estructurada 40

Figura 2.7 Colocación del rollo en el carrete 41

Figura 2.8 Monitoreo periódico del diámetro del tubo 42

Figura 2.9 Acabados en el tubo de pared estructurada 42

Figura 2.10 Prueba del comportamiento del material en diclorometano.....44
Figura 2.11 Impactómetro 44
Figura 2.12 Prueba de hermeticidad 46
Figura 2.13 Ensayo de rigidez..... 46
Figura 2.14 Ensayo de aplastamiento 50
Figura 3.1 Tipos de perfiles de pared estructurada 52
Figura 3.2 Partes del perfil de pared estructurada. 53
Figura 3.3 Esquema del perfil de pared estructurada..... 54
Figura 3.4 Momento de Inercia con respecto a dos ejes paralelos ... 57
Figura 3.5 Sección del perfil de pared estructurada. a) pared de agua b) pared externa, c) nervaduras d) engrapes. 58
Figura 3.6 Pared de agua..... 59
Figura 3.7 Dependencia de la longitud de la pared de agua con el paso del perfil..... 60
Figura 3.8 Pared externa..... 61
Figura 3.9 Nervaduras del perfil. 62
Figura 3.10 Valores característicos del perfil 10004 63
Figura 3.11 Engrape del perfil 64
Figura 3.12 Diferentes tipos de perfiles de tipo A2 65
Figura 3.13 Gráfico Alto perfil vs Inercia engrape. 66
Figura 3.14 Gráfico Alto perfil vs Área engrape..... 66

Figura 3.15 Gráfico Alto perfil vs Centroide engrape..... 67

Figura 3.16 Gráfico Alto perfil vs Constante de engrape..... 67

Figura 3.17 Sistemas de referencia de cada elemento del perfil de pared estructurada. 69

Figura 3.18 Contorno de un perfil extruido 73

Figura 3.19 Tramo de perfil de pared estructurada. 75

Figura 3.20 Enrollado del perfil en el carrete..... 76

Figura 3.21 Esquema del tubo de pared estructurada. 77

Figura 3.22 Sección de tubo de pared estructurada..... 78

Figura 3.23 Programa para cálculo rigidez del tubo de pared estructurada..... 81

Figura 3.24 Programa para cálculo de la longitud del rollo 82

Figura 4.1 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2110..... 85

Figura 4.2 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2715..... 87

Figura 4.3 Esquema del perfil 3610 88

Figura 4.4 Variación de dimensiones de un perfil y su influencia en la rigidez y peso del tubo 94

Figura 4.5 Perfil 10004, Diámetro de Tubo de 1770 mm - Serie 2. ... 96

Figura 4.6 Perfil 10004, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 1. ... 97

Figura 4.7 Perfil 1, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 2. 97

Figura 4.8 Perfil 2, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 2. 98

Figura 4.9 Resultados de un tubo de PVC (Cloruro de polivinilo) fabricado con un perfil 3610 99

Figura 4.10 Resultados de un tubo de HDPE (Polietileno de alta densidad) fabricado con un perfil 3610 100

Figura 4.11 Resultados de un tubo de HDPE (Polietileno de alta densidad) fabricado de con un perfil 10004 101

Figura 4.12 Costo de tubos en instalación de tubería 104

Figura 4.13 Costo de mano de obra en instalación de tubería 105

Figura 4.14 Costo total en instalación de tubería 106

Figura 5.1 Perfiles de pared estructurada 111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Módulos de rigidez (E) de diferentes materiales 13

Tabla 1.2 Clasificación de las extrusoras 23

Tabla 1.3 Propiedades del PVC 26

Tabla 1.4 Propiedades del polietileno 27

Tabla 2.1 Condiciones de extrusión del perfil de pared estructurada 37

Tabla 2.2: Series de tubo de acuerdo a la rigidez 48

Tabla 3.1 Tabla de relación del alto del perfil con respecto a las propiedades del engrape. 65

Tabla 4.1 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2110 84

Tabla 4.2 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2715 86

Tabla 4.3 Rigidez y Peso del Tubo con variación de la pared de agua del perfil 89

Tabla 4.4 Rigidez y peso del tubo con variación de la pared externa del perfil..... 90

Tabla 4.5 Rigidez y Peso del Tubo con variación de las nervaduras del perfil.....91

Tabla 4.6 Rigidez y Peso del Tubo con variación del alto del perfil ... 92

Tabla 4.7 Rigidez y Peso del Tubo con variación del paso del perfil . 93

Tabla 4.8 Comparación de rigidez del tubo con diferentes perfiles. .. 98

Tabla 4.9 Comparación de rigidez del tubo con diferentes materiales.....101

Tabla 4.10 Costos de Instalación de tuberías de PVC 103

Tabla 4.11 Costos de Instalación de tuberías hormigón armado 103

RESUMEN

En este examen complexivo se elaboró un estudio de las tuberías de pared estructurada actuales fabricadas por una empresa de trasformación de plásticos. Se lo realiza mediante la comparación de la rigidez y peso del producto evaluado experimentalmente con respecto a la calculada con ayuda de un programa de computadora creado con las bases teóricas de cálculo desarrolladas en este proyecto.

Para este proyecto, se analizan cada uno de los componentes que conforman el perfil de pared estructurada determinados por las características en el molde que lo fabrica; en este caso para moldes de tubería de perfiles de PVC; de los cuales se puede mencionar el espesor de sus paredes, el alto y el largo del perfil. Se obtendrán individualmente de cada componente del perfil las ecuaciones requeridas para que formen parte del cálculo de la rigidez y peso del tubo. Finalmente, se suman las ecuaciones de todos componentes obteniendo una fórmula de cálculo del perfil de pared estructurada. Esta fórmula servirá de base para un programa utilitario que calcule la rigidez y peso del tubo de pared estructurada.

Con este utilitario se podrá realizar diferentes análisis; por ejemplo, cómo influyen cada una las partes del perfil de pared estructurada en la rigidez y el peso del tubo y así poder determinar un producto con una rigidez y peso óptimo para ser comercializado. Esta predicción permite obviar ensayos experimentales adicionales para la fabricación de un tubo. Esto es una ventaja, ya que anteriormente se presentaba un perfil empírico en base a las estadísticas de las rigideces experimentales, sin conocer si realmente era el más conveniente para su producción.

Adicionalmente ayudan a determinar los diseños previos de nuevos moldes para la fabricación de tubería plástica de acuerdo a los requerimientos de la empresa.

ABREVIATURAS

R.A. = Rigidez del tubo (kN/m²)

y = Deformación del tubo (m)

di = Diámetro interior del tubo - probeta (mm)

F = Fuerza en kN

L = Longitud promedio del tubo - probeta (m.)

E =Módulo de elasticidad, en kN/m^2 (Este es el módulo de flexión)

I = Momento de inercia de la pared del tubo, en m^4/m

r = Radio del eje neutro de la pared del tubo, en m.

p: Paso del perfil

e1: Espesor de pared interna (o de agua) del perfil

e2: Espesor de pared externa del perfil

ev: Espesor de los nervios del perfil o nervaduras

h: Alto del perfil

n: Número de celdas

g: Engrape

e1 = alto de la pared de agua

l = largo de la pared de agua

h = alto del perfil

t: constante del engrape del perfil

p: paso

lo: largo inicial de las paredes del perfil

A: Área del perfil

I: Inercia del perfil

c: Centroide del perfil

I_{E1} : Inercia pared de agua

A_{E1} : Área pared de agua

y_{E1}: Centroide pared de agua

I_N: Inercia nervaduras

A_N : Área nervaduras

C_N : Centroide Nervaduras

I_{E2} : Inercia pared externa

A_{E2} : Área pared externa

y_{E2} : Crentroide Pared externa

I_G : Inercia ganchos

A_G : Área ganchos

y_G : Centroide ganchos

INTRODUCCIÓN

En la industria de plásticos, se fabrican múltiples tipos de tubería para la instalación de sistemas de conducción de aguas. Existen diferentes tecnologías para la producción de estos tubos en esta aplicación. Entre ellas se tiene el proceso de enrollado de tubos de pared estructurada.

En este tipo de tecnología se requiere verificar si sus tubos de pared estructurada cumplen con los requerimientos de la norma de fabricación vigente, y adicionalmente ver si su producción está en sus niveles óptimos de rentabilidad.

El presente examen complexivo determinará las bases para el diseño de tubos de pared estructurada. En los primeros dos capítulos se hará una introducción a los plásticos y al proceso de trasformación del cual se obtiene la tubería de pared estructurada. También se mencionará los ensayos que se realizan tanto al material como al producto terminado en base a la siguiente norma:

- Norma NTE INEN 2059:2010 – "Tubos perfilados de PVC rígido de pared estructurada e interior lisa y accesorios para alcantarillado. Requisitos."

En los siguientes capítulos se planteará un diseño teórico para el cálculo de la resistencia del tubo de pared estructurada. Esta propuesta será evaluada con los resultados de ensayos experimentales realizados en tubos de diferentes diámetros. Adicionalmente se analizará el comportamiento del tubo mediante la modificación de las variables del diseño teórico y su utilidad para la fabricación de moldes. Se hará una breve comparación de costos de varios diseños con tubos fabricados mediante otra tecnología. Finalmente se propondrá algunas conclusiones y oportunidades de mejora se pueden obtener de este proyecto.

Los capítulos se desarrollarán basados en los objetivos específicos del examen complexivo:

- Determinar las variables del perfil de pared estructurada de importancia en diseño y/o modificaciones factibles en los moldes para la realización de las ecuaciones.
- Realizar la comparación de forma entre las ecuaciones realizadas con la ayuda de una herramienta CAD.
- Evaluar las ecuaciones basadas en la norma y validarlas con ensayos reales.

- Realizar proyecciones variando los parámetros de las ecuaciones del perfil para obtener un tubo de pared estructurada óptimo.

Por lo tanto, este examen complexivo permitirá calcular y diseñar una tubería de pared estructura conociendo la rigidez, pesos, cantidad de perfil, diámetro del rollo e integrarlos en un programa amigable para diferentes proyectos relacionados.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS

Existen varios procesos de trasformación de plásticos, siendo los más relevantes la extrusión, la inyección, el soplado y el rotomoldeo. El objetivo de este capítulo es describir brevemente los diferentes componentes y características involucrados en la elaboración de productos plásticos por extrusión, a fin de comprender el propósito de este examen complexivo.

1.1 Las materias primas de los plásticos /1/.

Las materias primas para la fabricación de plásticos son la celulosa, el carbón, el gas natural y el petróleo, siendo este último la mayor fuente

de su constitución. El siguiente gráfico (Figura 1.1), muestra la distribución de la producción mundial del petróleo; de la cual, el 4% está destinada a la industria del plástico.

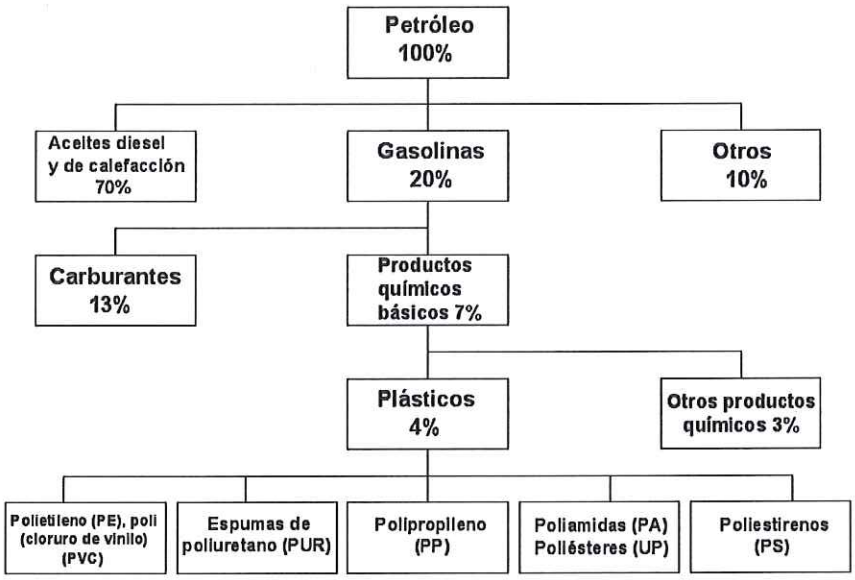


Figura 1.1 Distribución mundial de la producción de petróleo /2/

Como se observa, la obtención del plástico comienza con el proceso de destilación del petróleo; en el cual, éste es separado en sus diferentes componentes. Entre ellos, la gasolina es la que se utiliza para la fabricación de los plásticos. Este carburante es sometido a un proceso llamado "cracking" (to crack = romper) o craqueo térmico, donde sus moléculas son llevadas a elementos más simples, tales como etileno, propileno y butileno.

Para describir apropiadamente el proceso de formación del plástico (polimerización), serán brevemente descritos algunos de los fundamentos teóricos, características y campos de aplicación de esta reacción química, tomando como ejemplo el etileno.

1.1.1 Monómeros y síntesis del plástico.

Las moléculas de hidrocarburos son los compuestos básicos para la formación de los plásticos, los cuales en forma individual se llaman monómeros (Figura 1.2).

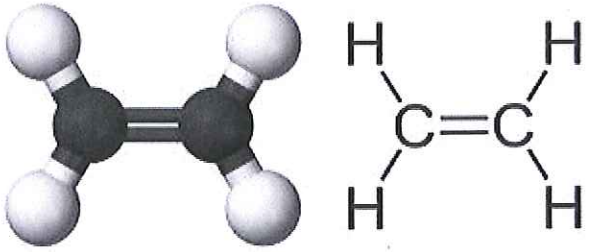


Figura 1.2 Estructura del monómero de etileno /3,4/

A estos monómeros se los une mediante una reacción química o síntesis llamada polimerización, lo que da lugar a la creación de grandes cadenas moleculares o macromolécula. Esta macromolécula recibe el nombre de polímero, porque está formado de muchos monómeros iguales o similares. En la Figura 1.3 se muestra el esquema de polimerización de un monómero de etileno, que al ser sometido a este proceso recibe el nombre de polietileno.

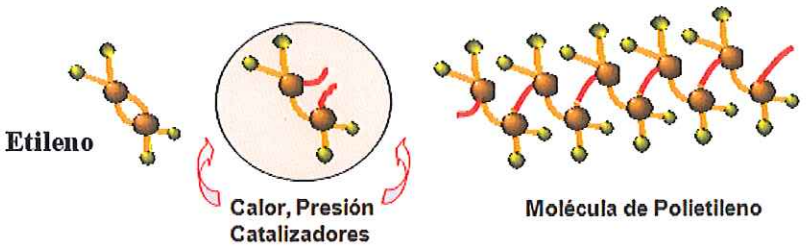


Figura 1.3 Esquema de polimerización del etileno /5/

Los polímeros que se pueden obtener mediante la polimerización son diversos, y dependen fundamentalmente de sus componentes y de la forma cómo se unieron las cadenas en la síntesis del plástico.

Tomando en cuenta los componentes, se tiene que los polímeros formados por un solo tipo de monómero se denominan homopolímeros, y los que están formados por más de un tipo de monómeros reciben el nombre de copolímeros (Figura 1.4).

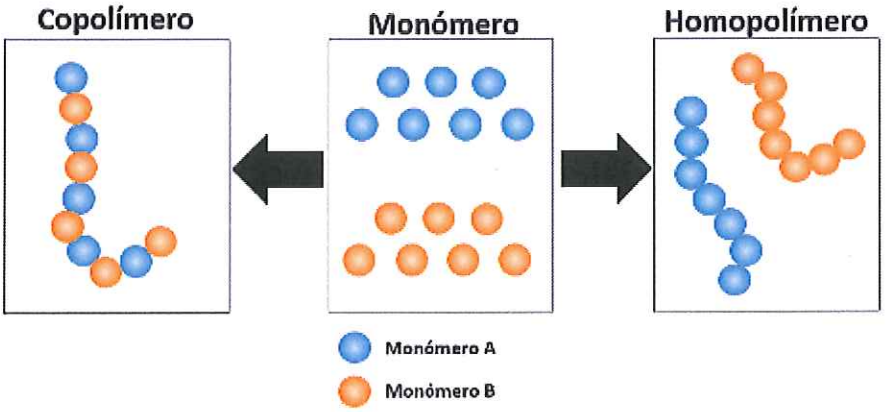


Figura 1.4 Esquema de unión de monómeros /6/

Por otro lado, por la síntesis, los plásticos se pueden clasificar en polímeros por adición y en polímeros por condensación.

Polímeros por adición

Estos no crean productos secundarios y las moléculas están unidas covalentemente. Entre los polímeros de adición se encuentran el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo y el poliestireno.

Polímeros por condensación

En este proceso, se liberan subproductos tales como agua, amoníaco y etilenglicol. Algunos polímeros típicos de condensación son el nailon, los poliuretanos y los poliésteres. /7/

1.1.2 Comportamiento del polímero al ser calentado.

Por su estructura interna, los plásticos presentan diversos comportamientos frente a la variación de temperatura, pudiéndose clasificar en los siguientes tipos:

Polímeros Termoplásticos: Al ser sometidos al efecto del calor, estos plásticos se vuelven moldeables, manteniendo la naturaleza de su enlace. Comúnmente tiene una estructura lineal.

Polímeros Termoestables: Al ser sometidos a un proceso de calentamiento, estos plásticos no pueden ser reprocesados una vez que ya fueron conformados, porque una parte de sus moléculas han formado otros subproductos. Su estructura es reticular.

Polímeros Elastómeros (Cauchos o hules): Tienen un comportamiento intermedio entre los otros dos tipos mencionados anteriormente, teniendo como característica principal la capacidad de deformarse elásticamente en alto grado sin cambiar permanentemente su forma. La Figura 1.5 nos muestra diferentes estructuras que puede tomar un polímero.



Figura 1.5 Estructuras de diversos tipos de polímeros /8/

1.2 Aditivos y sustancias auxiliares /9/.

Previamente se hizo una breve descripción de los polímeros y su formación. Para todos los procesos de transformación, el plástico requiere satisfacer ciertas condiciones para que el producto final tenga las características deseadas; para ello, se utilizan aditivos o ayudas de proceso.

Los aditivos son materiales inorgánicos y orgánicos, que mezclados con los plásticos antes o durante su transformación, le modifican sus propiedades, mejoran su presentación, aumentan la resistencia a medios externos y facilitan su procesamiento. Estos aditivos pueden venir en diferentes presentaciones, ya sea como polvos, líquidos o masterbatch (combinación de los aditivos con el mismo plástico, pero en altas concentraciones). Entre los requisitos que deben presentar estos aditivos están:

- De fácil dispersión en el plástico.
- Mejorar las propiedades del producto.
- Facilitar el procesamiento.
- No ser tóxico.
- No desarrollar efectos secundarios.

Los aditivos son variados y de funciones distintas, clasificándose en aditivos de procesamiento y funcionales.

1.2.1 Aditivos de procesamiento.

Su función principal es evitar que el polímero se degrade mientras se encuentra en el equipo de transformación, proporcionándole cualidades que facilitan su procesamiento, tales como eliminación de la adherencia del plástico fundido en las diferentes etapas de procesamiento, mejorar el flujo para aumentar la velocidad de

producción, disminuir la degradación por efecto de la temperatura o para reducir desperdicios y costos aumentando la productividad. Entre los principales tipos de aditivos de procesamiento se encuentran los estabilizadores al calor, antioxidantes, lubricantes, agentes deslizantes, modificadores de flujo, modificadores de viscosidad, etc.

1.2.2 Aditivos funcionales.

Modifican o mejoran las propiedades de los plásticos, así como también los protegen de factores externos como la luz solar, el fuego o los microorganismos. Estos aditivos funcionales pueden ser de cargas mecánicas, plastificantes, modificadores de impacto, retardantes a la llama, supresores de humo, agentes antibloqueo, agentes antiestáticos, absorbedores de radiación UV, fungicidas, agentes espumantes, agentes de entrecruzamiento, aromatizantes, pigmentos y colorantes.

1.3 Propiedades mecánicas de los plásticos /10/.

Los plásticos, una vez que han sido procesados, tienen diferentes propiedades mecánicas. Generalmente, a cada propiedad le corresponde ciertos valores típicos, que permiten seleccionar el material que más se ajuste a los requerimientos.

1.3.1 Comportamiento bajo carga de los plásticos.

Para comprender mejor el comportamiento del plástico y sus propiedades, se puede hacer una comparación con otros materiales (Figura 1.6). Por ejemplo, en un ensayo de tracción se someten, simultáneamente, una probeta de metal y otra de plástico a la acción de una fuerza de igual valor. Como resultado, las probetas se alargarán. Si se suspense la acción de esta fuerza, las probetas recuperarán su longitud original.

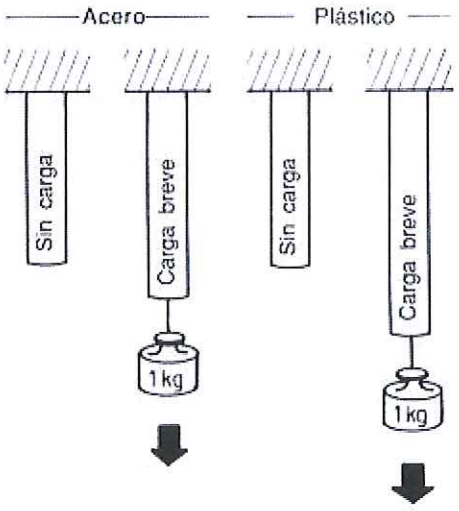


Figura 1.6 Ensayo de tracción para acero y plástico bajo carga breve /11/

Por medio de este experimento de tracción, se puede establecer el módulo de rigidez (E) del material plástico. Suponiendo que la acción de la fuerza es mantenida durante un breve tiempo, se procede a medir el alargamiento resultante. Si se toma la relación entre la fuerza

aplicada sobre cada probeta y el área de su sección, se obtiene el esfuerzo de tracción soportado. Si ahora se divide este esfuerzo de tracción para el alargamiento, el resultado es el módulo E de la probeta. Dicho en otras palabras, mientras mayor es este parámetro, menor es el alargamiento producido. La Tabla 1.1 muestra los módulos E de algunos materiales.

Tabla 1.1 Módulos de rigidez (E) de diferentes materiales /12/

Material	Módulo E [N/mm^2]
Plásticos	200 – 15.000
Acero	210.000
Aluminio	50.000

1.3.2 Influencia en el tiempo en el comportamiento mecánico.

La relevancia del módulo E en el diseño de elementos plásticos es dependiente del tiempo. Considerando las probetas de la Figura 1.7, ambas están sometidas a una carga constante durante un tiempo indefinido, se puede observar que el alargamiento de la probeta metálica permanece invariable, mientras que, en la probeta de plástico, este parámetro aumentó. Este comportamiento típico se conoce como fluencia plástica.

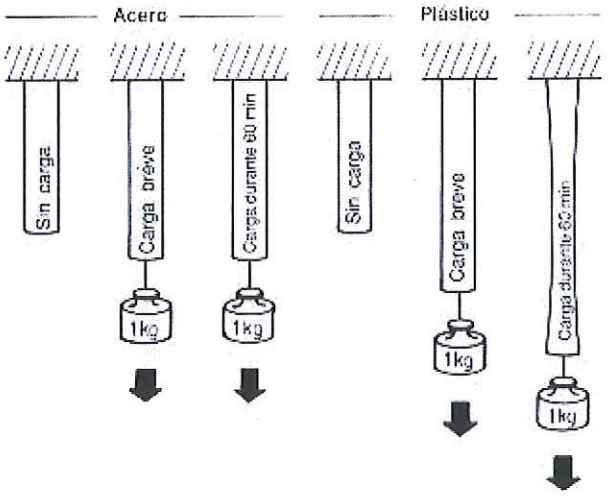


Figura 1.7 Ensayo de tracción para acero y plástico bajo carga prolongada /13/

En el caso de la probeta de plástico, si se suprime la acción de la carga aplicada, el alargamiento de la misma disminuye. Sin embargo, la probeta no regresará a su estado inicial. Dicho comportamiento es, por lo tanto, parcialmente elástico y parcialmente plástico (viscoso). Por esto, recibe el nombre de viscoelástico. El siguiente gráfico (Figura 1.8), muestra un esquema basado en el modelo de Maxwell, que describe el comportamiento viscoelástico del plástico.

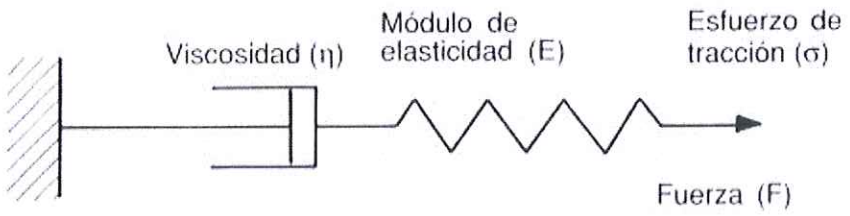


Figura 1.8 Modelo de Maxwell para plásticos /14/

1.3.3 Capacidad de recuperación de los termoplásticos

Como se lo ha descrito anteriormente, la maraña de macromoléculas se estira hasta cierto punto por la acción de una carga. Si se deja de aplicar dicha carga las macromoléculas vuelven a su posición inicial.

Un comportamiento de los plásticos que se basa en el mismo principio es el efecto de relajación. Por ejemplo, se tiene un tubo de plástico recto mostrado en la figura de abajo, el cual se lo calienta hasta que su temperatura este dentro del intervalo termoplástico. Con esto se puede doblar con relativa facilidad hasta tener un ángulo recto. Se lo enfría de inmediato para que mantenga la curvatura dada.

Las moléculas en el punto de doblado están estiradas y no pueden regresar a su posición anterior debido a que el tubo se lo enfrió intempestivamente. Si se calienta el tubo curvado nuevamente, este regresará a su posición inicial. Este proceso se lo conoce como relajación.

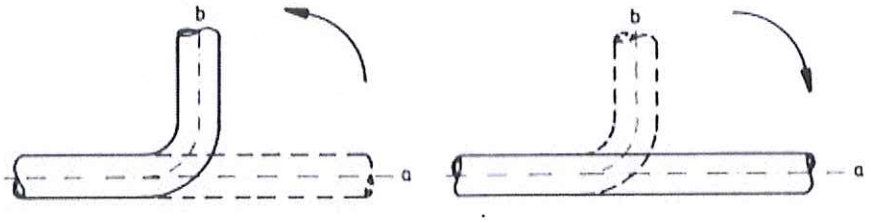


Figura 1.9 Capacidad de relajación de un tubo de plástico/15/

1.3.4 Dependencia de los plásticos respecto a la temperatura y el tiempo

Como se lo ha descrito anteriormente, la temperatura y el tiempo tienen una influencia decisiva en el comportamiento mecánico de los plásticos. Es por esta razón, a diferencia de los metales, la temperatura y la duración de la carga empleada es vital para el diseño de elementos plásticos. Para facilitar una herramienta al diseñador, con la que pueda evaluar estas influencias, se construyen las denominadas curvas de deformación plástica. Esas curvas se obtienen mediante ensayos de probetas sujetas a diferentes tipos de temperatura y carga (Figura 1.10).

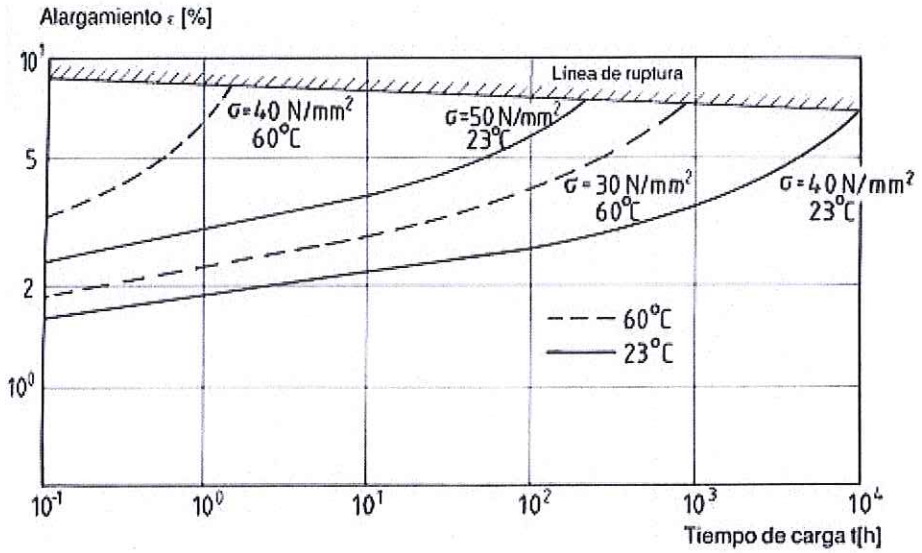


Figura 1.10 Curvas de deformación plástica /16/

Otra representación es mediante la variación del esfuerzo a través del tiempo manteniendo la temperatura y alargamiento constantes. (Figura 1.11).

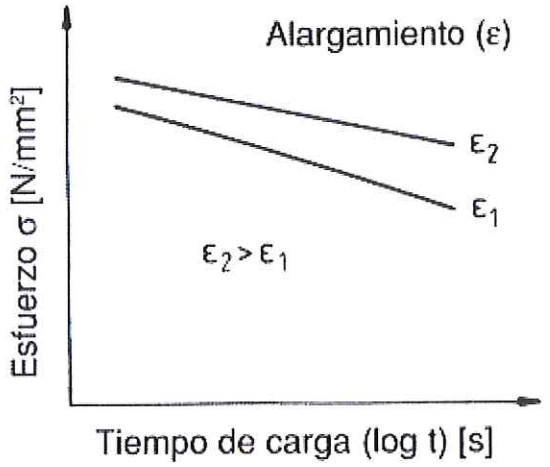


Figura 1.11 Gráfico de relajación /17/

Otro tipo de gráfico es el del grafico de isócronas esfuerzo – alargamiento. La probeta se somete a un esfuerzo en un intervalo de tiempo y temperatura constantes. (figura 1.12).

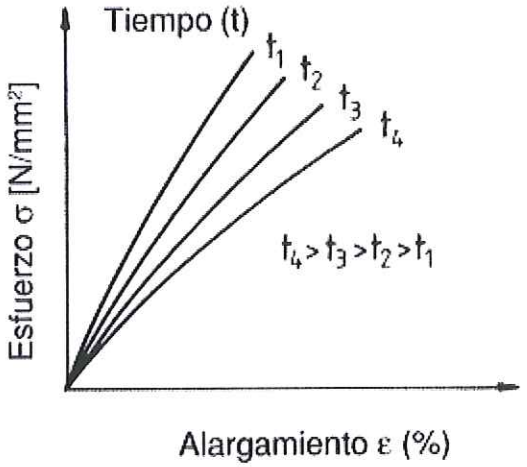


Figura 1.12 Gráfico de isocronas esfuerzo – alargamiento /18/

1.4 Introducción al proceso de extrusión de tubería de plástico /19/

En los siguientes párrafos se detallarán las funciones de los distintos componentes que comprenden una línea de extrusión (Figura 1.13).



Figura 1.13 Instalación línea de extrusión /20/

1.4.1 Extrusora

Es un equipo que convierte el compuesto plástico en polvo en una masa fundida homogénea, la cual es conducida a través de un molde determinado. Sus partes fundamentales son la tolva, husillo, cilindro y sistema de atemperado (Figura 1.14).

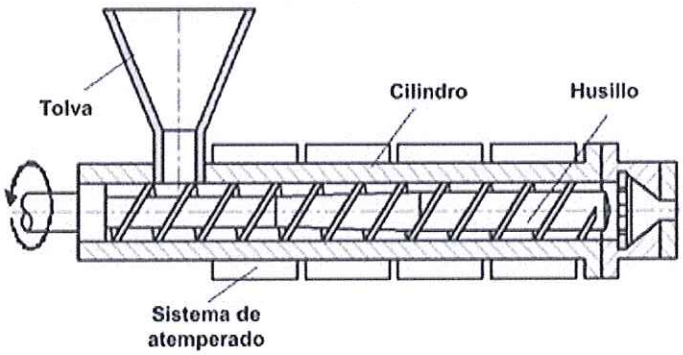


Figura 1.14 Extrusora /21/

1.4.2 Tolva

Es la que se encarga de alimentar a la extrusora con el material que se ha de transformar. Comúnmente, este material suele atascarse provocando un taponamiento a la salida de la tolva. Para evitar esta situación, se instala un dispositivo de agitación suplementario (vibrador, agitador, etc.).

1.4.3 Husillo

El tornillo o husillo, desempeña diversas funciones, tales como cargar, transportar, fundir y homogenizar el plástico. El más utilizado es el husillo de tres zonas (Figura 1.15). Este tipo de tornillo permite procesar la mayoría de termoplásticos bajo condiciones térmica y económicamente satisfactorias.

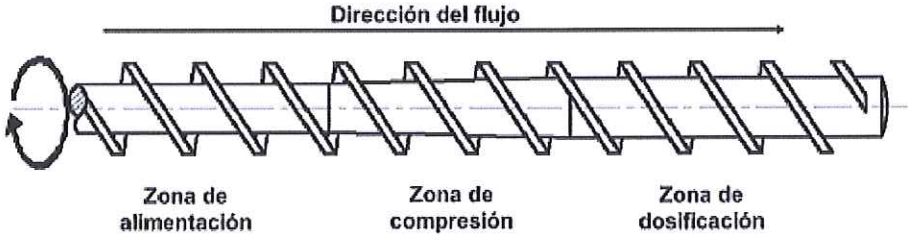


Figura 1.15 Husillo de tres zonas /22/

Una vez que el material plástico, todavía en polvo, llega a la zona de alimentación, es transportado hacia la zona de compresión (Figura 1.16).

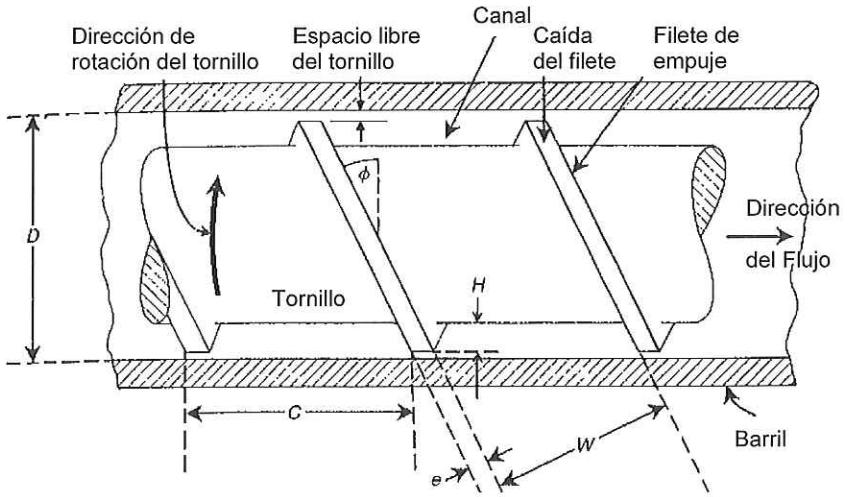


Figura 1.16 Esquema de la zona de alimentación /23/

Luego, en la zona de compresión, el material es fundido y compactado debido a la reducción gradual de la profundidad del filete. Finalmente, en la zona de dosificación se homogeniza el material a una temperatura ideal de proceso.

Una magnitud característica de gran importancia es la relación entre la longitud y el diámetro exterior del husillo (L/D). Este cociente determina la capacidad de dosificación del husillo. Aparte de los husillos convencionales de tres zonas, se emplean husillos con formas para aplicaciones especiales (Figura 1.17).

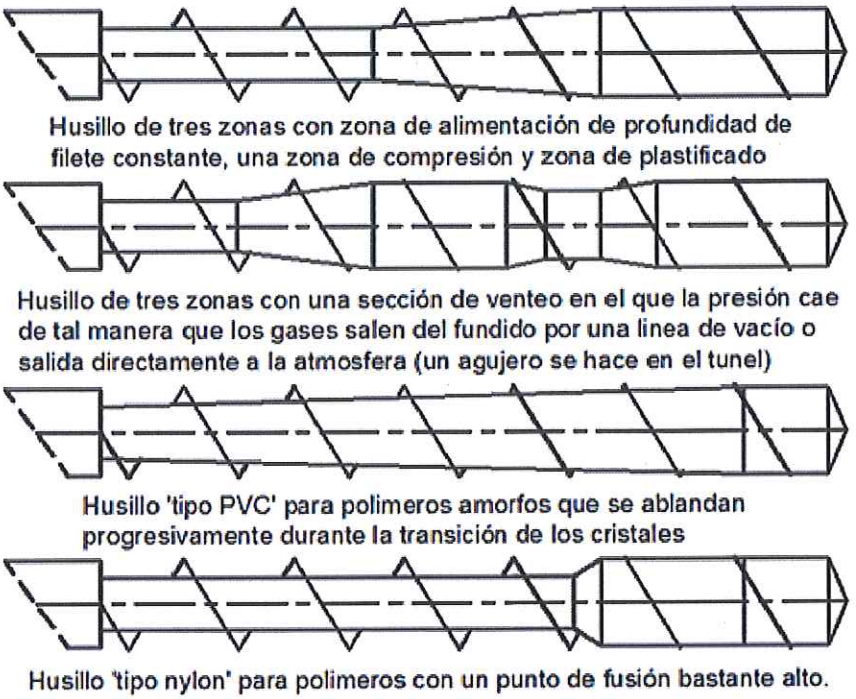


Figura 1.17 Tipos de husillos para extrusión /24/

Independientemente del diseño, hay una serie de condiciones que deben cumplir todos los husillos y, por ende, todas las extrusoras:

- Permitir un transporte constante, sin variaciones significativas.
- Producir una masa fundida homogénea.
- Permitir la transformación del material, sin que éste se degrade.

1.4.4 Cilindro

Como se mencionó, las extrusoras se clasifican no sólo por el tipo de husillo, sino también por el tipo de cilindro. La siguiente tabla (Tabla 1.2), muestra la categorización de las mismas.

Tabla 1.2 Clasificación de las extrusoras /25/

Tipo de extrusora	Tipo de cilindro
Monohusillo	Convencional, de alto rendimiento
De doble husillo	Giro paralelo, giro contrario

La extrusora convencional de un solo husillo posee un cilindro liso en su interior. Debido a que existe una contrapresión a la salida de la extrusora, es necesario que se desarrolle una presión mayor para que avance el material. Dicha presión se genera en la zona de dosificación.

En cuanto a la extrusora de alto rendimiento, la pared interna del cilindro en la zona de alimentación está dotada de una serie de ranuras longitudinales, las cuales permiten un mejor transporte y compactación del material. No obstante, se hace necesaria la incorporación de sectores de mezcla en la zona de dosificación, puesto que la homogeneización del material es deficiente. En la Figura 1.18 se presentan diferentes tipos de zonas de dosificación.

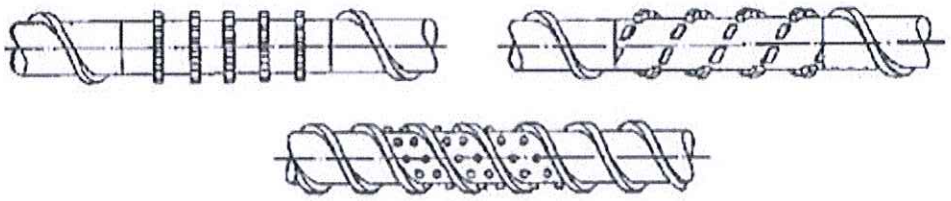


Figura 1.18 Tipos de zonas de dosificación /26/

Con respecto a la extrusora de doble husillo de giro paralelo, usada generalmente para la confección de poliolefinas, el transporte se produce por la inducción de rozamiento entre el husillo y el cilindro.

Por último, la extrusora de doble husillo de giro contrario (Figura 1.19), se emplea para materiales pulverulentos, en especial para PVC. La ventaja radica en que pueden añadirse aditivos al plástico, sin que éste se vea afectado desde el punto de vista térmico o mecánico.

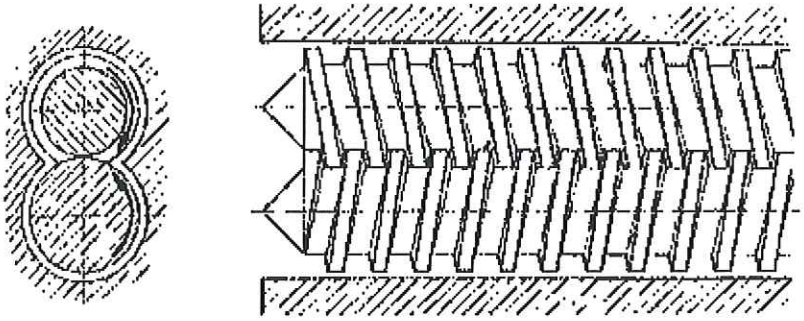


Figura 1.19 Extrusora de doble husillo de giro contrario /27/

1.4.5 Sistema de atemperado

La fusión del material dentro de la extrusora depende tanto de la acción de la fricción (paredes del husillo y el cilindro), como de una

fuente externa de calor (sistema de atemperado). Este sistema se encuentra dividido en varias zonas, que pueden calentarse o refrigerarse de forma independiente. Para esto, se emplean usualmente bandas calefactoras; aunque pueden encontrarse sistemas alternativos (líquidos en circuito cerrado). De este modo, se alcanza una determinada distribución de temperaturas dentro del cilindro.

1.4.6 Materiales a transformar

Las materias primas que serán parte de este proyecto son utilizadas ampliamente en la extrusión de tubos para la conducción de aguas. Estos son los siguientes:

Cloruro de polivinilo (PVC)/28/

Es un material plástico importante que tiene un amplio uso en la construcción, el transporte, el embalaje, aplicaciones eléctricas y electrónicas, energía, salud, alimentos entre otros. El PVC es un material de construcción muy resistente y duradero a largo plazo que se puede utilizar en una variedad de aplicaciones y áreas ya sea rígido o flexible. Debido a su propia naturaleza, el PVC se utiliza ampliamente en muchas industrias. A continuación, se muestran las propiedades del PVC.

Tabla 1.3 Propiedades del PVC /29/

Propiedades Generales del PVC		
Propiedades	**Valor**	**Unidades**
Densidad	1.40 - 1.43	gr/cm3
Módulo de Young	2900 - 3300	Mpa
Módulo de Flexión	2500 - 3000	Mpa
Resistencia a la tracción	50 - 80	Mpa
Elongación a la rotura	20 - 40	%
Esfuerzo de Impacto	2 - 5	kJ/m2

Polietileno (PE)

El polietileno tiene variedad de aplicaciones en la actualidad. En su mayoría se fabrican de este material recipientes, tapas, elementos domésticos, juguetes. En otras ramas se lo utiliza en la fabricación de tuberías y empaques. Esto se debe a su alta resistencia química.

El polietileno es un plástico que se obtiene de la polimerización del monómero de etileno. Sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Propiedades del polietileno /30/

Propiedades Generales del Polietileno		
Propiedades	**Valor**	**Unidades**
Densidad	0.94 - 0.97	gr/cm3
Módulo de Young	1000	Mpa
Módulo de Flexión	950	Mpa
Resistencia a la tracción	15 – 40	Mpa
Elongación a la rotura	12	%
Esfuerzo de Impacto	12	kJ/m2

Estos se pueden clasificar de acuerdo a su densidad:

- Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE)
- Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD o LLDPE)
- **Polietileno de Alta Densidad (PEAD o HDPE)**
- Polietileno de Alta Densidad Alto Peso Molecular (HMW-HDPE)
- Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)

1.4.7 Moldes

Mientras que en la extrusora tiene lugar la conversión del material en una masa fundida homogénea, la misión del molde acoplado a ella es darle forma al plástico, dando lugar a diferentes tipos de perfiles (Figura 1.20).



Figura 1.20 Tipos de perfiles plásticos /31/

En la fabricación de tuberías, los componentes básicos de un cabezal comprenden la carcasa, el cono o punta del portamandril, la araña o portamandril, el mandril o pin, la hembra de entrada, el anillo centrador, la boquilla o nariz del macho y la hembra de salida (Figura 1.21).

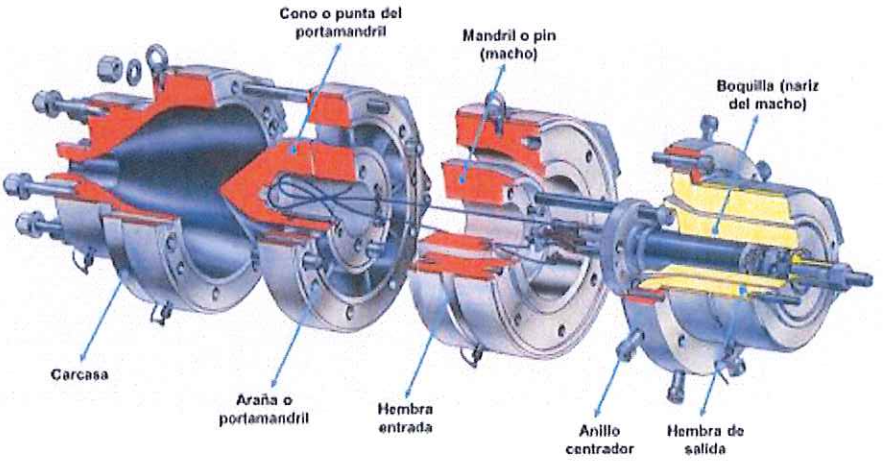


Figura 1.21 Componentes del cabezal /32/

Al acoplarse, estos elementos forman el canal de flujo a través del cual pasa el material plástico. Como se observa en la Figura 1.22, este

canal presenta una estructura cónica a la entrada del molde, y a medida que avanza hacia la salida (boquilla), éste toma la forma que va a tener el producto final. Cabe indicar que el cabezal también cuenta con un sistema de atemperado.

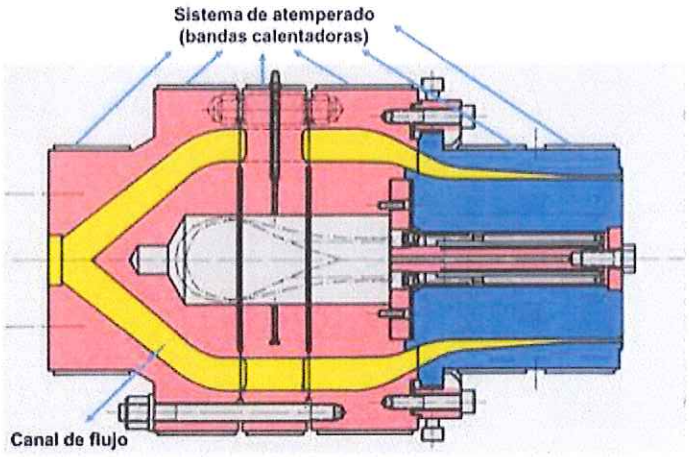


Figura 1.22 Estructura interna del cabezal /33/

1.4.8 Molde de pinola o portamandril

Como se mencionó, uno de los elementos fundamentales de este tipo de cabezal es el portamandril, cuya función es optimizar la fluidez del material a lo largo del canal de flujo, por medio de filetes ubicados en su parte exterior. Eventualmente, dichos filetes pueden tener un efecto negativo sobre el producto elaborado, ya que ocasionan líneas de unión (rayado apreciable) o zonas de menor espesor. Para evitar esta situación, se utilizan sistemas de distribución múltiple helicoidal, llamados también repartidores helicoidales (Figura 1.23).

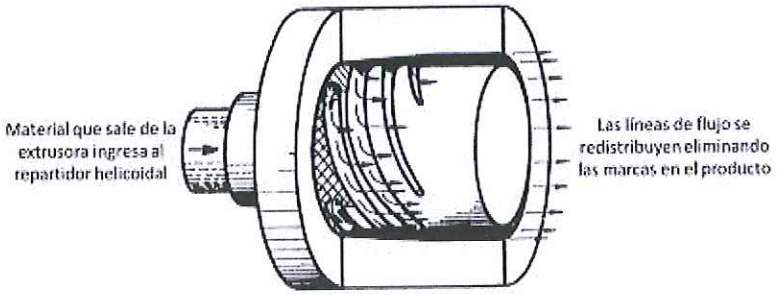


Figura 1.23 Repartidor helicoidal /34/

1.4.9 Boquillas de hilera plana

Las boquillas de hilera plana sirven para fabricar láminas planas y planchas. Estas boquillas distribuyen la masa fundida en primer lugar a lo ancho, para luego convertirla en una capa fina como se muestra en la figura siguiente.

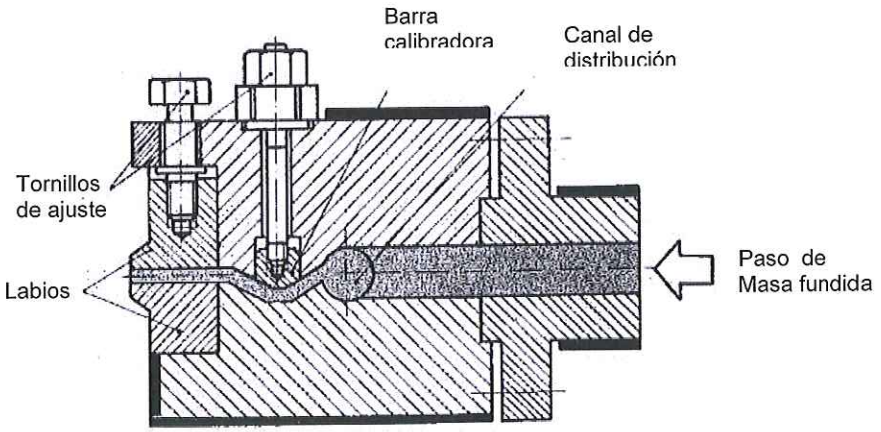


Figura 1.24 Boquilla de hilera plana. /35/

Para ello, el flujo, que normalmente es circular, de guiado hacia un canal distribuidor que extiende la masa en forma de lámina sección

rectangular, y que usualmente tiene la forma de una cola de pez (Figura 1.25)

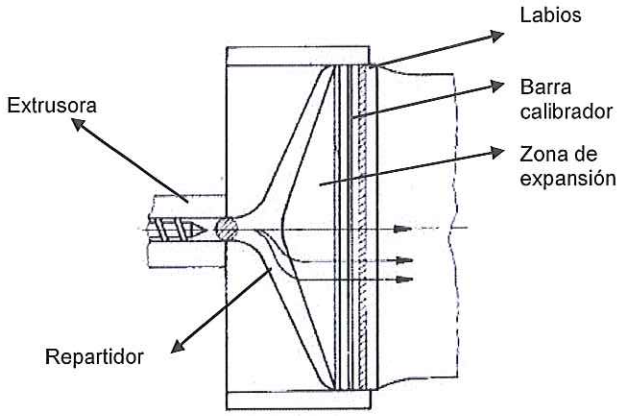


Figura 1.25 Boquilla en cola de pez. /36/

La masa fundida atraviesa la zona de expansión, que va provista de una barra espaciadora. La zona de expansión termina en unos labios por donde sale el material.

1.4.10 Dispositivos adicionales

Tina de enfriamiento

Luego que el material sale del cabezal, entra a la tina de enfriamiento para mantener la forma y fijar las dimensiones requeridas. Esta tina cuenta al inicio con un calibrador (Figura 1.26), el cual trabaja en vacío o a presión, siendo su labor la de presionar el producto a las paredes del mismo. Una vez que el producto sigue su curso, éste se va

enfriando por la acción del agua de enfriamiento de la tina (hileras de boquillas).

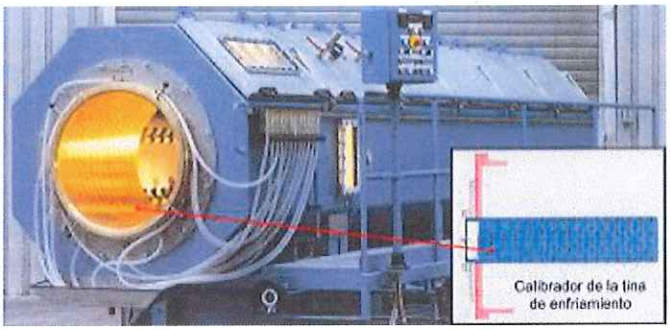


Figura 1.26 Tina de enfriamiento /37/

Extractor (Jaladora).

El paso del material a través de la tina de enfriamiento es debido al extractor, el cual transporta el producto a una velocidad constante por medio de orugas de caucho, rodillos o bandas.



Figura 1.27 Extractor /38/

Sierra.

Posteriormente, el extractor traslada también el producto hasta la sierra, donde el tubo es cortado a una longitud determinada. La característica de este tipo de sierra es que posee dos tipos de

movimientos: uno radial, que corta el tubo; y otro longitudinal, el cual está sincronizado con la velocidad del extractor.



Figura 1.28 Sierra /39/

Recibidor

Finalmente, el producto terminado es depositado en una estructura (recibidor), para su correspondiente almacenamiento. Adicionalmente, este recibidor puede contar con un sistema de acampanado, que permite el acoplamiento entre tubos (Figura 1.29).



Figura 1.29 Acampanadora /40/

1.4.11 Coextrusión.

Dentro del proceso de extrusión existen casos especiales, en los cuales el perfil a fabricar necesita de dos o más materiales para alcanzar los estándares requeridos, o se precisa de una optimización de costos utilizando materiales de relleno económicos. Este proceso se lo realiza por medio de varias extrusoras independientes, las cuales se acoplan a un cabezal común, donde ocurre la fusión de los diferentes materiales considerados. La Figura 1.30 muestra el esquema de un molde para la elaboración de un producto elaborado con tres capas.

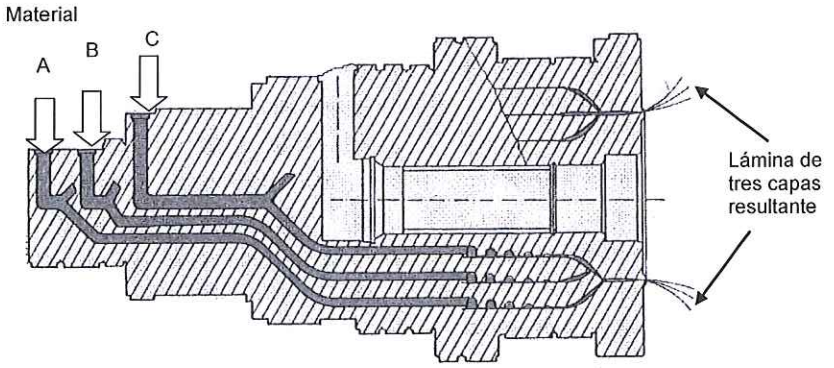


Figura 1.30 Esquema de molde tricapa /41/

Este método se emplea para recubrimientos complejos de cables, láminas de envasado y procesos de extrusión – soplado.

CAPÍTULO 2

PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍA DE PARED ESTRUCTURADA

La tubería de pared estructurada se fabrica en dos etapas. La primera consiste en la extrusión del perfil, mientras que en la segunda se enrolla este perfil para formar un tubo con un equipo diseñado para este proceso. Para esta aplicación, se utiliza un compuesto de PVC que contiene varios componentes que ayudan en su procesamiento. Entre estos se puede mencionar el carbonato de calcio que actúa como material de relleno, cera parafinica y polietilenica para reducir la fricción del material en la máquina y modificadores de impacto para que las propiedades físicas del producto terminado sean mejores. También en la fabricación del tubo se puede utilizar Polietileno y

Polipropileno elaborados especialmente para el proceso de extrusión. En este capítulo se detallará los procesos y las normas involucradas en cada ensayo que se realizan para validación del tubo fabricado.

2.1 Extrusión de perfiles plásticos /42/.

2.1.1 Maquina extrusora

Antes de dar marcha al proceso como tal, se precalientan los cilindros y los husillos de la extrusora y coextrusora, además del cabezal común. Esta temperatura debe estar por debajo del punto de plastificación del material usado.

Una vez que se ha alcanzado una distribución uniforme de temperatura, se acopla la coextrusora al cabezal, iniciando el movimiento del grupo extrusor a una velocidad de giro determinada y calentando hasta la temperatura de trabajo del material (Figura 2.1).



Figura 2.1 Programación de temperaturas y puesta en marcha del grupo extrusor

A continuación, se muestra las condiciones estándar para la fabricación de un perfil de pared estructurada con el cual se puede obtener un perfil adecuado para ser rolado.

Tabla 2.1 Condiciones de extrusión del perfil de pared estructurada /43/

DESCRIPICION	Unidad	Valor
Velocidad de tornillo	RPM	20
Velocidad del dosificador	RPM	500
Velocidad husillo coextruido	RPM	50
Temperatura del túnel zona # 1	°C	165
Temperatura del túnel zona # 2	°C	170
Temperatura del túnel zona # 3	°C	175
Temperatura del túnel zona # 4	°C	180
Temperatura del cabezal zona # 1	°C	175
Temperatura del cabezal zona # 2	°C	180
Temperatura del cabezal zona # 3	°C	185
Temperatura del cabezal zona # 4	°C	190
Temperatura del coextruido zona # 1	°C	130
Temperatura del coextruido zona # 2	°C	135
Temperatura del coextruido zona # 3	°C	140
Temperatura del coextruido zona # 4	°C	145
Temperatura del material	°C	180
Vacío del calibrador	BAR	0,2
Vacío tina inicio / final	BAR	0,2
Temperatura del agua	°C	10
Velocidad extractora	mm/min	2000

Cuando el perfil recién formado llega al final del cabezal, éste es colocado manualmente en la tina de enfriamiento, que se encuentra abierta, y guiado a través de ella para asegurar que no haya atacamientos de material a lo largo de la misma (Figura 2.2). Entonces, se cierra la tina y empieza a actuar el vacío sobre el perfil, adhiriéndose a las paredes del calibrador para que adquiera su forma final.



Figura 2.2 Paso del perfil del molde y traslado por la extractora

Una vez que sale el perfil de la tina de enfriamiento, es ubicado en la extractora, donde se programa la velocidad de trabajo. En el caso de este proyecto, la extractora se encuentra integrada con la sierra (Figura 2.3).



Figura 2.3 Extractora - Sierra

La sierra, previamente programada, realiza cortes en tramos de una longitud definida para enviar algunas muestras al departamento de calidad con la finalidad de comprobar si el perfil obtenido cumple con las especificaciones de diseño (Figura 2.4).



Figura 2.4 Muestreo del perfil

Este proceso se lo conoce como normalización, y es aquí donde se efectúan las respectivas modificaciones de parámetros tales como la regulación del vacío, velocidades, temperaturas, etc. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de cómo se regulariza el vacío en la tina de enfriamiento.



Figura 2.5 Normalización: Regulación del vacío en la tina de enfriamiento

2.1.2 Enrollador

Finalmente, el perfil ya evaluado y aceptado es enrollado en una estructura metálica tipo carrete para almacenarlo. Posteriormente, dicho enrollado será rolado en forma de tubo.

2.2 Enrollado de perfiles /44/.

Este proceso se lo realiza con un equipo que consta de una extractora, una máquina roladora de perfiles, una sierra y un recibidor. La máquina roladora o canasta está formada por una estructura metálica, que contiene unos rodillos regulables que determinan el diámetro del tubo de pared estructurada (Figura 2.6).

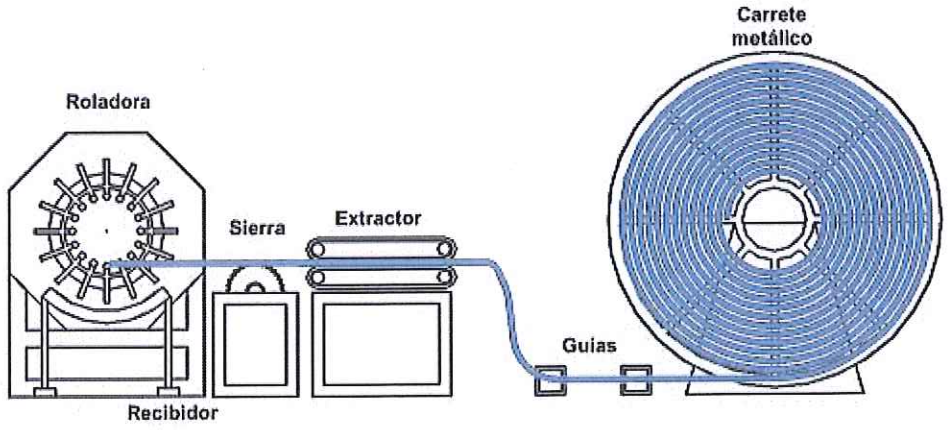


Figura 2.6 Esquema del rolado de tubos de pared estructurada

La operación se inicia configurando ciertos parámetros iniciales, tales como temperatura y velocidad de la extractora, y regulación de los rodillos de la roladora (diámetro del tubo). Luego, se procede a

trasladar el rollo del perfil extruido a otro carrete metálico para su posterior rolado (Figura 2.7). A fin de centrar el perfil y evitar accidentes por el continuo movimiento de la extractora, se colocan unos soportes metálicos tipo guía.



Figura 2.7 Colocación del rollo en el carrete

Cuando el perfil se encuentre posicionado en la roladora, se realiza la primera vuelta hasta completar el engrape, formándose el primer anillo del tubo requerido. Es aquí donde se configuran los parámetros normales de trabajo, continuándose con el rolado del tubo. Durante toda esta operación, es necesario monitorear periódicamente el diámetro del tubo para asegurar que el mismo cumple con los requerimientos de producción (Figura 2.8).



Figura 2.8 Monitoreo periódico del diámetro del tubo

Una vez que el diámetro permanece constante, se cortan entre dos y tres muestras del tubo para ser analizadas por el departamento de calidad (ver sección 2.3). Finalmente, este tubo ya evaluado y aceptado es cortado a la longitud comercial estándar (tanto tuberías como uniones), dándosele los acabados pertinentes y colocación de empaques para su almacenamiento y despacho (Figura 2.9).



Figura 2.9 Acabados en el tubo de pared estructurada

2.3 Ensayos realizados en tubería de pared estructurada

Para garantizar que el tubo fabricado cumple con los requerimientos de calidad para su comercialización, se utilizan la siguiente norma ecuatoriana:

- Norma NTE INEN 2059:2010 – "Tubos perfilados de PVC rígido de pared estructurada e interior lisa y accesorios para alcantarillado. Requisitos.": Esta norma determina el comportamiento del material frente a un agente corrosivo; además de especificar la hermeticidad resistencia al impacto, rigidez y resistencia al aplastamiento de los tubos y accesorios de PVC.

A continuación, se explicará brevemente los procedimientos utilizados en cada caso.

2.3.1 Prueba de Diclorometano

Para esta prueba se utiliza una cabina, la cual contiene un reservorio que es llenado con Diclorometano (CH2Cl2). Las muestras del tubo a analizar son cortadas en pequeñas secciones, las cuales son sumergidas dentro del reservorio por 30 minutos, aproximadamente (Figura 2.10). Al retirar la muestra de la cabina, ésta no deberá presentar signos de desintegración o exfoliación. Sin embargo, los eventuales ablandamientos o hinchazones de las muestras no serán considerados como fallas.



Figura 2.10 Prueba del comportamiento del material en diclorometano

2.3.2 Ensayo de impacto.

Para esta prueba se utiliza un equipo llamado impactómetro, el cual consta de una base, una masa de impacto y una guía graduada ajustable (altura donde se coloca la masa). En la figura 2.11 se muestra el impactómetro utilizado.



Figura 2.11 Impactómetro

En este ensayo, la masa de impacto y la altura de la guía dependerán del diámetro del tubo a evaluar. Esta prueba se la realiza en

diferentes secciones del tubo. Las muestras evaluadas no deberán presentar grietas o roturas, ya que esto constituiría una falla del producto.

2.3.3 Prueba de hermeticidad

En esta prueba se utiliza un acople, formado por dos secciones de tubo y una unión. En cada extremo de este acople se colocan tapones. Entonces, este sistema es instalado en una estructura metálica, lo que permite fijar los tapones a fin de garantizar hermeticidad (Figura 2.12).

Este ensayo consiste en introducir agua o aire a presión, hasta alcanzar los 50 kPa durante un lapso de quince minutos. Luego, se procede a inspeccionar el sistema para determinar si existen filtraciones a través de la unión o por las hendiduras del perfil. Una vez que se verifica la hermeticidad, se considera que este sistema es resistente a la penetración.



Figura 2.12 Prueba de hermeticidad

2.3.4 Ensayo de rigidez y aplastamiento (equipos)

Ensayo de rigidez del tubo

Como en el ensayo anterior, para esta prueba se usará también la máquina universal de ensayos y secciones de tubo como muestras. Sin embargo, la proporción de compresión para este caso corresponde al 3% de su diámetro interno original (Figura 2.13). Se ensayarán por lo menos tres probetas.



Figura 2.13 Ensayo de rigidez

La fuerza vinculada a este aplastamiento ligero servirá para calcular la rigidez del tubo mediante la siguiente fórmula.

$$R.A = \frac{\left(0.0186 + 0.025\frac{y}{di}\right)}{0.001935} * \left(\frac{F}{L * y}\right)$$

dónde:

R.A.: rigidez anular de tubo [kN/m²].

y: deflexión del diámetro del tubo [m].

di = diámetro interior del tubo [mm].

F = Fuerza aplicada [kN].

L = Longitud del tubo [m].

El significado físico de la rigidez anular radica en la resistencia al aplastamiento de un tubo bajo ciertas condiciones definidas en la Norma NTE INEN 2059:2010. La serie es un valor numérico que se otorga a un rango de rigidez que va de una mínima hasta el doble de esta rigidez mínima. La serie va en números ascendentes que van desde la escala 1 hasta la 7. En la tabla 2.2 se muestra la rigidez anular con su correspondiente valor de serie del tubo.

Tabla 2.2: Series de tubo de acuerdo a la rigidez /45/

Rigidez anular mínima [kN/m^2]	Serie del tubo
Desde 0.25 hasta 0.5	1
Desde 0.5 hasta 1	2
Desde 1 hasta 2	3
Desde 2 hasta 4	4
Desde 4 hasta 8	5
Desde 8 hasta 16	6
Desde 16 en adelante	7

Por ejemplo, un tubo de un diámetro definido fabricado de un determinado perfil que tenga una rigidez de 1.5 kN/m2 estará en la serie 2 ya que está dentro del rango de 1 kN/m2 a 2 kN/m2.

Por otro lado, considerando las propiedades teóricas del material del tubo, la rigidez anular está dada por la siguiente ecuación:

$$R.A. = \frac{E * I}{r^3}$$

donde:

E: módulo del material [kN/m^2].

I: momento de inercia de la pared del tubo [m^4/m].

r: radio del eje neutro de la pared del tubo [m].

Cabe recalcar que ambas expresiones de la rigidez anular, tanto la experimental como la teórica, van a ser tomadas en cuenta en este proyecto, debido a que uno de los objetivos del mismo es poder realizar una comparación entre ambos parámetros.

2.3.4.1 Ensayo de aplastamiento

Para esta prueba se utiliza la máquina universal de ensayos, la cual permite realizar pruebas de tracción, compresión y flexión. Las muestras a examinar corresponden a pequeñas secciones de tubo, las cuales se colocan en la máquina de ensayos. El objetivo de esta prueba es reducir el diámetro interior del tubo hasta el 40% de su valor original, mediante la aplicación de una carga de aplastamiento uniforme, por un lapso de dos a cinco minutos (Figura 2.14); luego de lo cual se verifica la presencia de fallas, tales como fisuras, grietas, roturas o desprendimiento de costuras.

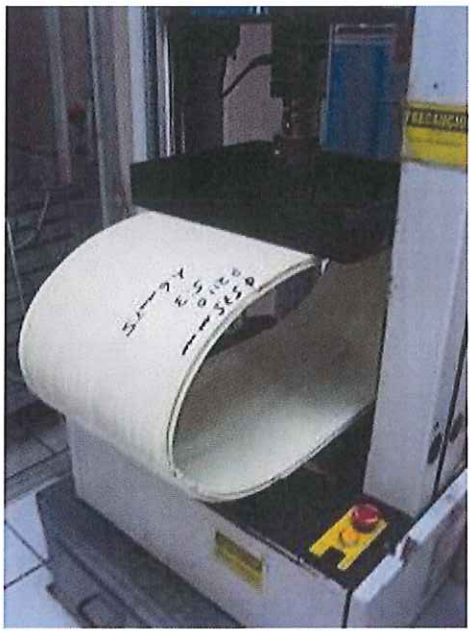


Figura 2.14 Ensayo de aplastamiento

CAPÍTULO 3

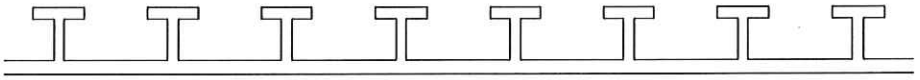
DESARROLLO DE ECUACIÓN PARA EVALUAR PROPIEDADES MECÁNICAS DE TUBERÍA DE PARED ESTRUCTURADA

Previamente, se explicó los procesos de fabricación y evaluación de los perfiles y de la tubería de pared estructurada. En este capítulo se analizará la influencia de cada una de las partes del perfil en el cálculo de la rigidez y el peso del tubo.

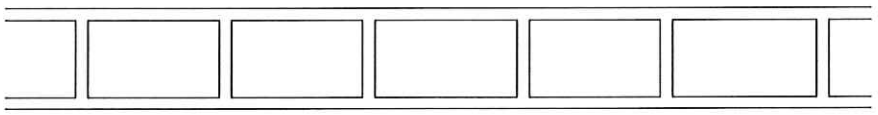
3.1 Características del perfil estructurado.

En un principio, la fabricación de tubería plástica para la conducción de fluidos se limitaba a la capacidad de la extrusora, tamaño del

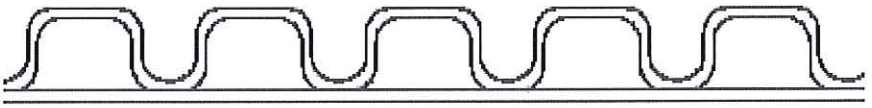
cabezal y espacio físico del lugar. Por otro lado, la utilización de un perfil de pared estructurada no sólo permite rolar tubos de diámetros grandes, sino que se reduce el peso del mismo. Esto hace fácil su manipulación, almacenamiento, transporte e instalación. De acuerdo a la norma NTE INEN 2059:2010, existen 3 tipos de perfiles en la fabricación de tubería de pared estructurada (Figura 3.1).



Perfil abierto, tipo A1.



Perfil cerrado, tipo A2.



Perfil de extrusión continua, tipo B.

Figura 3.1 Tipos de perfiles de pared estructurada /46/

Para los propósitos de este capítulo, se utilizará el perfil cerrado tipo A2. En la siguiente figura (Figura 3.2) se identifican las partes que conforman este perfil, las mismas que serán utilizadas para el desarrollo de las ecuaciones del cálculo de la rigidez y peso del tubo.

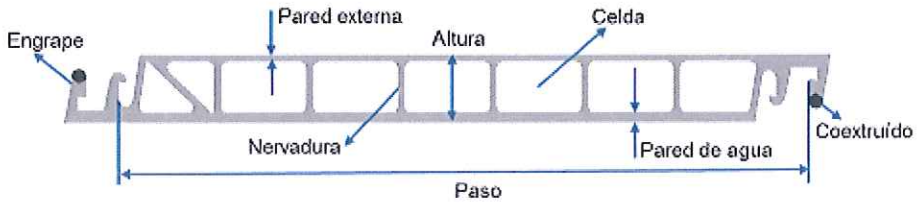


Figura 3.2 Partes del perfil de pared estructurada.

A continuación, se describirá brevemente cada una de las partes del perfil de pared estructurada.

Engrapes: Están constituidos por una parte extruida y una coextruida, y son los que mantienen la forma del tubo cuando se rola el perfil. El coextruído es de un material más blando, el cual se adapta durante el engrapado y sirve para el acople.

Pared de Agua: Es la que formará la pared interna del tubo, y por ende estará en contacto con los fluidos que transportará la tubería.

Pared externa: Formará la parte exterior del tubo. Estará en contacto con la carga de aplastamiento ejercida por el terreno, evitando el contacto del mismo con la pared de agua, lo cual proporciona mayor seguridad al tubo.

Alto del perfil: Es la diferencia de alturas entre la pared externa y la pared de agua.

Paso del perfil: Es la distancia que existe entre engrapes.

Nervaduras: Son las columnas que unen la pared de agua y externa del perfil, formando las celdas que son parte su estructura.

Celda: Es el espacio vacío entre nervaduras en el perfil de pared estructurada. La cantidad de celdas son dos unidades menos que el número de nervaduras.

Este perfil se forma con un arreglo distribuido de vigas "I", constituyendo una estructura integral que tiene la rigidez necesaria para resistir las cargas generadas. (Figura 3.3).

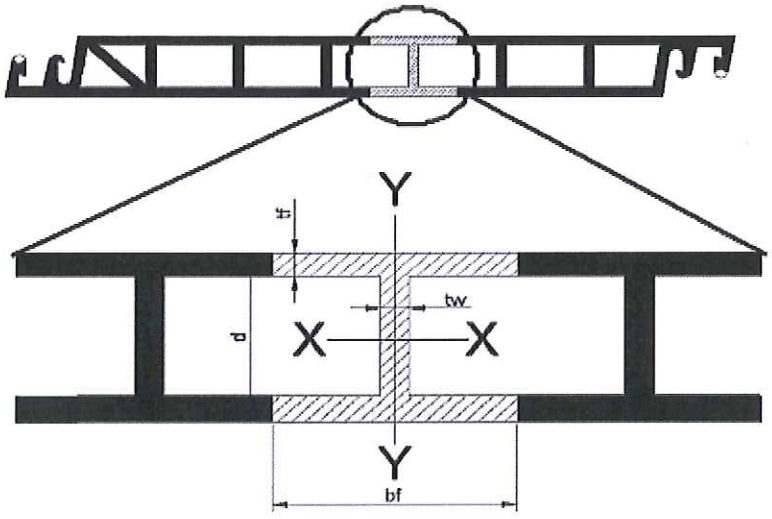


Figura 3.3 Esquema del perfil de pared estructurada

Una de las ventajas, como se mencionó, es su peso optimizado. Este atributo hace fácil y rápida tanto su manipulación, como su instalación en obra. Además, no se requiere de maquinaria pesada ni personal adicional, lo que reduce en un gran porcentaje el tiempo y los costos

comparados con los correspondientes al montaje de una tubería de hormigón.

3.2 Diseño de las ecuaciones utilizadas en el perfil de pared estructurada.

Como se mencionó en el capítulo anterior, para determinar teóricamente la resistencia del tubo a una carga diametral se utiliza la siguiente fórmula:

$$R.A. = \frac{E * I}{r^3}$$

donde:

R.A: Rigidez anular del tubo.

E: módulo de elasticidad.

I: Inercia de la sección del tubo (inercia del perfil).

r: radio medio del tubo.

Por lo tanto, la rigidez anular se define como la resistencia de un tubo, de determinado diámetro, el cual va a deformarse debido a una carga externa. En la práctica, dicha carga es el peso de la tierra sobre el tubo enterrado. Eventualmente, esta fuerza ejercida suele tener como componente adicional cierto peso debido a la circulación de vehículos (carga vehicular).

Una vez que se ha determinado la rigidez anular teórica de un tubo rolado, es posible predecir la rigidez experimental. Entonces, la variación entre los valores calculados y los obtenidos experimentalmente puede tener una diferencia aceptable de hasta 10%. Si este valor se encuentra fuera del rango admisible, significa que existen fallas en el proceso o resistencia baja del material. Con esta información, se puede mejorar el proceso de fabricación del tubo.

Para calcular la rigidez anular del tubo de pared estructurada, tanto la resistencia del material como el diámetro son valores conocidos. Sin embargo, la inercia depende del tipo de perfil. Con respecto a este último parámetro, se emplea el "teorema de Steiner" o "teorema de los ejes paralelos", el cual indica que el momento de inercia de una superficie cualquiera con respecto a un eje paralelo al eje centroidal, está dado por:

$$I = I_o + Ad^2$$

donde:

I: momento de inercia con respecto a un eje X – X'

I_o: momento de inercia centroidal

A: área de la superficie

d: distancia entre el eje centroidal $X_o – X_o'$ y un eje paralelo X – X'

En la siguiente figura se muestra el esquema del teorema de los ejes paralelos.

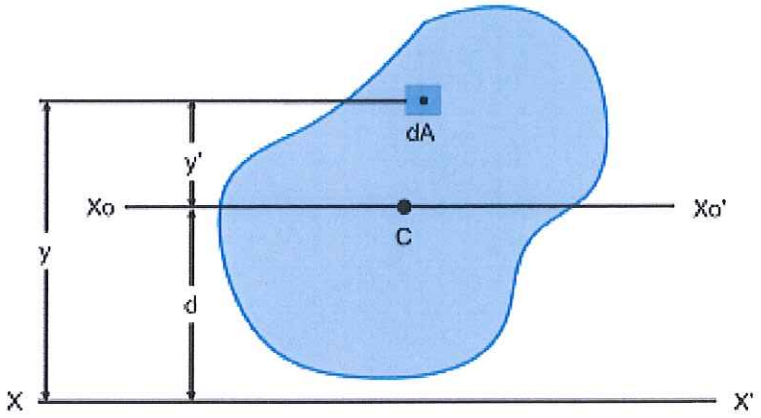


Figura 3.4 Momento de Inercia con respecto a dos ejes paralelos

/47/

Cabe recalcar que este teorema sólo puede emplearse si uno de los ejes es centroidal. Sin embargo, si se requiere evaluar el momento de inercia de un área respecto a un eje no centroidal, conociendo el momento de inercia respecto a otro eje no centroidal, es necesario calcular previamente el momento de inercia del área respecto a un eje centroidal paralelo a los otros dos ejes dados.

En el caso de este proyecto, se tiene un perfil no convencional. Para determinar su inercia total, se procede a dividirlo en secciones más sencillas a fin de realizar los cálculos correspondientes (Figura 3.5). De esta manera, se puede integrar estos valores mediante el teorema de Steiner.

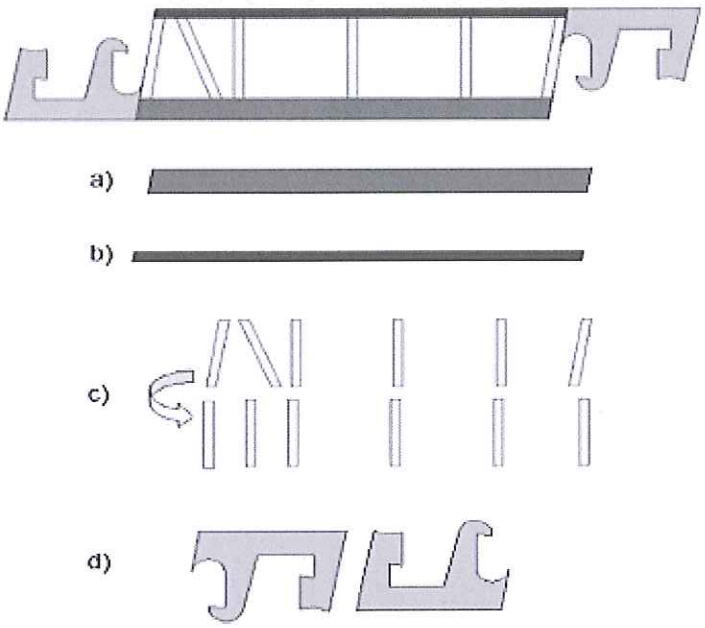


Figura 3.5 Sección del perfil de pared estructurada. a) pared de agua b) pared externa, c) nervaduras d) engrapes.

Es importante resaltar que el cálculo del área de la sección del perfil servirá para establecer el peso del perfil y del tubo.

A continuación, se desarrollarán las ecuaciones para determinar el centroide, área e inercia de cada una de las secciones indicadas en la Figura 3.5; lo que permitirá definir la ecuación general equivalente para el perfil de pared estructurada.

3.2.1 Pared de agua (E2)

Por la configuración geométrica del perfil, la longitud de la pared de agua depende del ancho del mismo, el cual es representado por el paso. Entonces, podemos determinar el cálculo de la pared de agua en base a esta variable dimensional del perfil (Figura 3.6). Esta dependencia se la tratará más adelante.

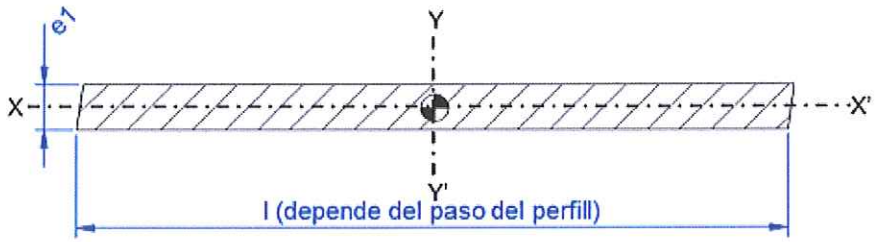


Figura 3.6 Pared de agua.

Realizando los cálculos del centroide y del área se tiene que:

Centroide ($y_{pared\ agua}$):

$$y_{pared\ agua} = \frac{e1}{2}$$

Área ($A_{pared\ agua}$):

$$A_{pared\ agua} = base * altura = l * e1$$

Inercia ($I_{xpared\ agua}$):

$$I_{x\ pared\ agua} = \frac{base * altura^3}{12} = \frac{l * e1^3}{12}$$

Donde:

e1 = alto de la pared de agua

l = largo de la pared de agua

3.2.2 Dependencia de la longitud de pared de agua "l" con el alto del perfil.

La longitud del perfil va a depender de dos variables; la primera se relaciona con el alto del perfil que está vinculado al tamaño de los engrapes y la segunda con el paso.

3.2.3 Dependencia de la longitud de pared de agua "l" con el paso del perfil.

Como se dijo anteriormente, la longitud de la pared de agua va a variar con respecto al paso del perfil.

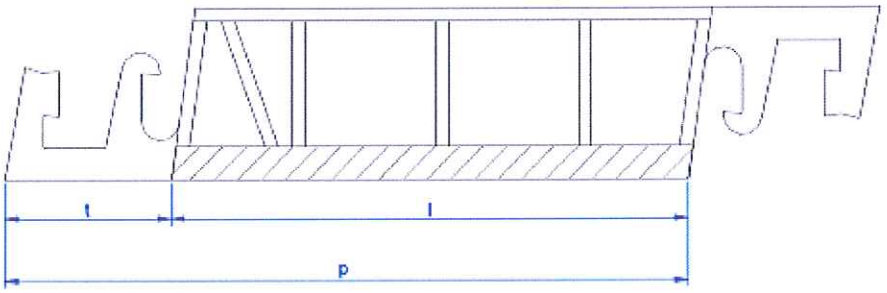


Figura 3.7 Dependencia de la longitud de la pared de agua con el paso del perfil

En referencia a la Figura 3.7, la longitud de la pared de agua (l) es igual a la diferencia entre el paso del perfil (p) menos una distancia determinada (t), es decir:

$$l = p - t$$

Con respecto a la constante "t", esta va a variar con respecto al tamaño del engrape. Más adelante se determinará el valor de esta constante.

3.2.4 Sección de la pared externa (E1).

Para calcular la inercia de la pared externa (Figura 3.8), se tiene que:

Centroide ($y_{pared\ externa}$)

$$y_{pared\ externa} = \frac{e2}{2}$$

Área ($A_{pared\ externa}$)

$$A_{pared\ agua} = base * altura = l * e2$$

Inercia ($I_{x\ pared\ externa}$):

$$I_{x\,pared\ externa} = \frac{base * altura^{3}}{12} = \frac{l * e2^{3}}{12}$$

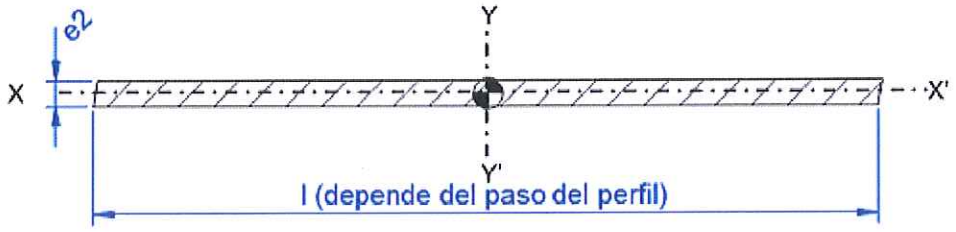


Figura 3.8 Pared externa

La longitud de la pared externa tiene las mismas características de la pared de agua, por lo que la longitud de la pared externa será:

$$l = p - t$$

3.2.5 Sección de las nervaduras (N).

Ciertas nervaduras tienen una inclinación determinada, por lo que se asumirá, por simplicidad de cálculos, que estas son perpendiculares al eje horizontal. Con respecto al alto de la nervadura, se la dejará expresada en términos del alto del perfil y de los espesores de pared de agua y de pared externa (Figura 3.9).

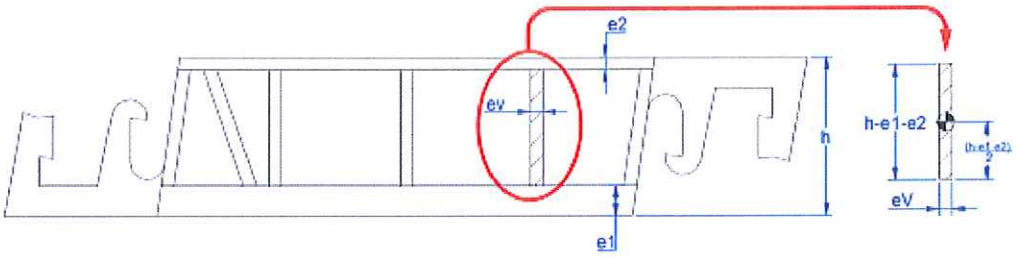


Figura 3.9 Nervaduras del perfil.

Centroide ($y_{nervadura}$):

$$y_{nervadura} = \frac{h - e1 - e2}{2}$$

Área ($A_{nervadura}$):

$$A_{nervadura} = base * altura = ev * (h - e1 - e2)$$

Inercia ($Ix_{nervadura}$):

$$I_{X\,nervadura} = \frac{base * altura^3}{12} = \frac{ev * (h - e1 - e2)^3}{12}$$

3.2.6 Engrapes (G).

Constituyen una de las partes importantes del perfil, ya que estos fijan el diámetro formado en el rolado de tubos.

Como se mencionó, la constante "t" depende del engrape de perfil. Por lo tanto, para especificar este valor se procede a calcular el mismo para un perfil determinado. Una vez que se obtiene este valor, se establece una curva de tendencias para cada perfil conocido. Entonces, tomando las características del perfil 10004 (Figura 3.10), se tiene que:

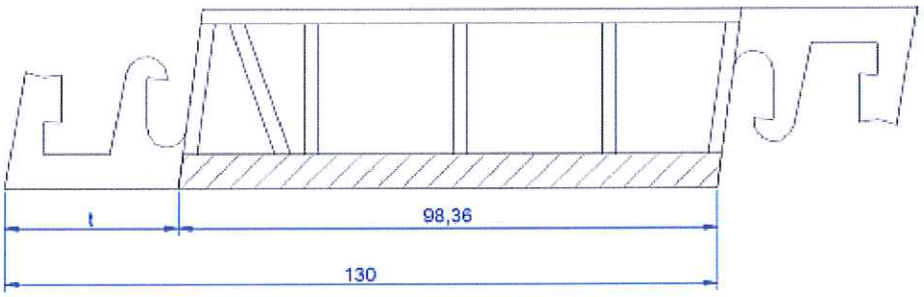


Figura 3.10 Valores característicos del perfil 10004 /48/

donde:

Paso del perfil (p): 130 mm

Longitud sección (l): 98.36 mm

De acuerdo a la ecuación anterior

$$l = p - t$$

se tiene que t = 31.64 mm.

Debido a la forma compleja que presentan los engrapes, los cálculos del centroide, área e inercia son extensos. Por este motivo, se utilizó una herramienta CAD (AutoCAD 2014), la cual proporciona los mencionados datos de acuerdo a los valores característicos de los perfiles existentes en el mercado (Figura 3.11).

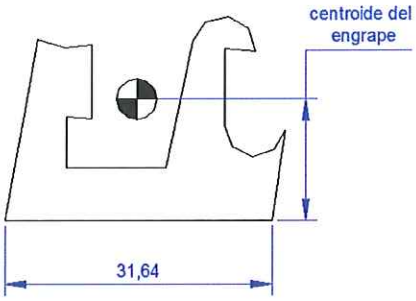


Figura 3.11 Engrape del perfil /49/

Se utilizará estos valores para obtener una formula simplificada de los engrapes mediante curvas de tendencia.

Conforme a las observaciones hechas a los diferentes perfiles existentes mostrados en la Figura 3.12, los engrapes se hacen más grandes conforme el perfil crece en altura, las otras variables (paso, espesores) no se aprecia una relación directa con el engrape.

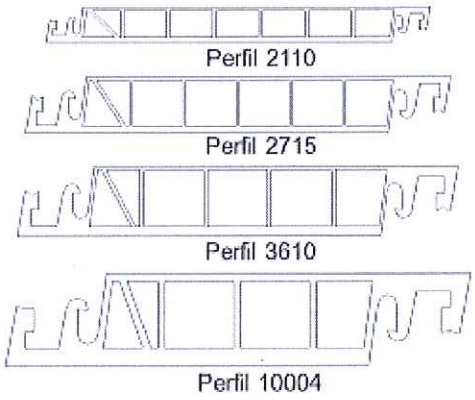


Figura 3.12 Diferentes tipos de perfiles de tipo A2 /50/

Se elaboró una tabla de datos de Inercia, Área, centroide y la constante de engrapes de cada perfil. Con estos datos se grafican las relaciones que tiene el alto del perfil con las otras variables y se determina una fórmula de acuerdo a la tendencia graficada.

Tabla 3.1 Tabla de relación del alto del perfil con respecto a las propiedades del engrape. /51/

Perfil	Altura (mm)	Inercia (mm^4)	Área (mm^2)	Centroide (mm)	Cte. Engrapes (mm)
2110	12.0	405.27	56.79	3.58	12.05
2715	19.4	2898.86	153.46	5.79	19.48
3610	24.5	7540.60	248.74	7.31	24.61
10004	31.0	19769.20	404.79	9.24	31.13



Figura 3.13 Gráfico Alto perfil vs Inercia engrape.

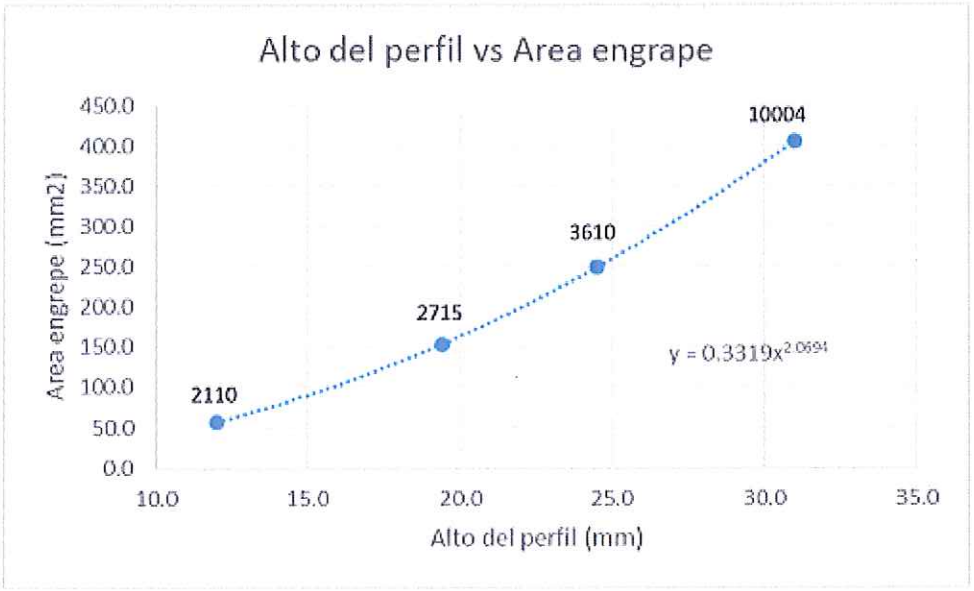


Figura 3.14 Gráfico Alto perfil vs Área engrape.

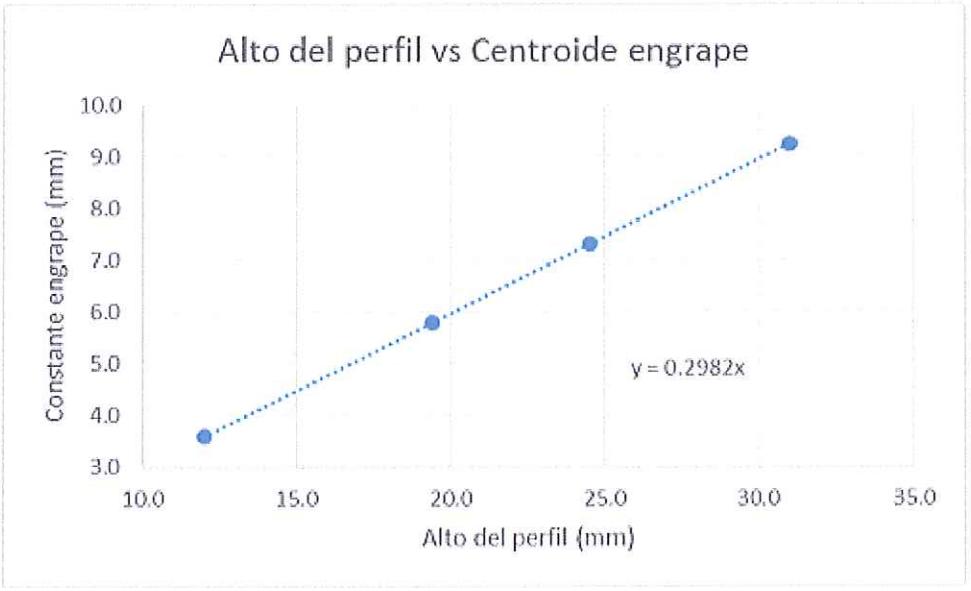


Figura 3.15 Gráfico Alto perfil vs Centroide engrape.

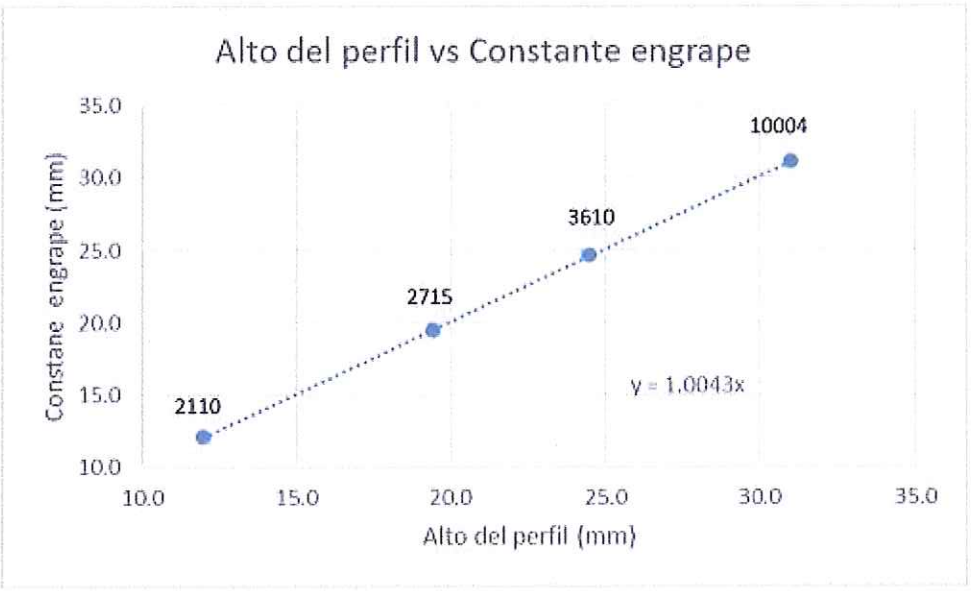


Figura 3.16 Gráfico Alto perfil vs Constante de engrape.

Finalmente se tiene los siguientes resultados que formarán parte de la ecuación del perfil:

$$\text{Inercia Engrape } (I_{x\,engrape}) = 0.0154 * h^{4.0959}$$

$$\text{Area Engrape } (A_{engrape}) = 0.3319 * h^{2.0694}$$

$$\text{Centroide Engrape } (y_{engrape}) = 0.2982 * h$$

$$\text{Constante de Engrape } (t_{engrape}) = 1.0043 * h$$

Reemplazando "t" de la ecuación de la longitud de los espesores de agua y externa se tiene lo siguiente:

$$l = p - t \quad \rightarrow \quad l = p - 1.0043*h$$

3.2.7 Sistema de referencia.

Para calcular la inercia total de perfil, primero se debe determinar el centroide del perfil completo; de esta manera se puede establecer el eje centroidal para poder aplicar el Teorema de Steiner. Con este eje; en conjunto con las inercias, áreas y centroides de cada una de las partes, se determinará finalmente el momento de inercia total del perfil. Se definirá como origen de coordenada la esquina inferior izquierda del perfil para el cálculo como se lo muestra en la figura 3.17.

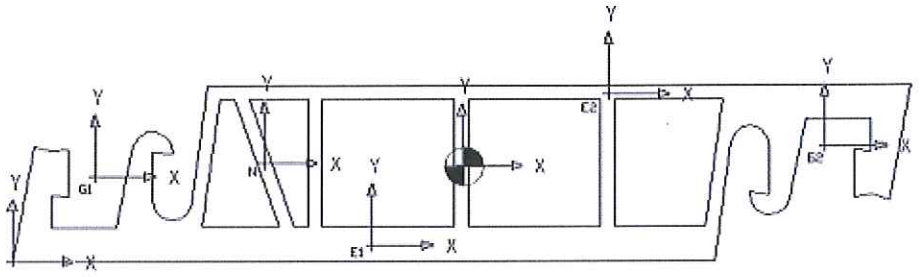


Figura 3.17 Sistemas de referencia de cada elemento del perfil de pared estructurada.

3.2.8 Centroide del perfil

$$y_{perfil} = \frac{\sum yi * Ai}{\sum Ai}$$

$$y_{perfil} = \frac{y_{pared\ agua} * A_{pared\ agua} + n * (y_{nervadura} * A_{nervadura}) + y_{pared\ externa} * A_{pared\ externa} + y_{engrape1} * A_{engrape1} + y_{engrape2} * A_{engrape2}}{A_{pared\ agua} + n * A_{nervadura} + A_{pared\ externa} + A_{engrape1} + A_{engrape2}}$$

$$y_{perfil} = \frac{\frac{e1}{2} * (l * e1) + n * \left\{\left[\frac{(h - e1 - e2)}{2} + e1\right] * [ev * (h - e1 - e2)]\right\} + \left(h - \frac{e2}{2}\right) * (l * e2) + y_{engrape1} * A_{engrape1} + (h - y_{engrape1}) * A_{engrape2}}{(l * e1) + n * [ev * (h - e1 - e2)] + (l * e2) + A_{engrape1} + A_{engrape2}}$$

Simplificando:

$$y_{perfil} = \frac{\frac{e1}{2} * (l * e1) + n * \left\{\frac{(h + e1 - e2)}{2} * [ev * (h - e1 - e2)]\right\} + \left(h - \frac{e2}{2}\right) * (l * e2) + h * A_{engrape}}{l * (e1 + e2) + n * [ev * (h - e1 - e2)] + 2 * A_{engrape}}$$

Ecuación del centroide del perfil.

Donde:

$A_{engrape1} = A_{engrape2} = 0.3319 * h^{2.0694} = A_{engrape}$

l = p – 1.0043*h

n: número de celdas + 2

3.2.9 Área del perfil

$$A_{perfil} = \sum Ai$$

$$A_{perfil} = A_{pared\ agua} + n * A_{nervadura} + A_{pared\ externa} + A_{engrape1} + A_{engrape2}$$

$$A_{perfil} = (l * e1) + n * [ev * (h - e1 - e2)] + (l * e2) + 2 * A_{engrape}$$

Simplificando:

$$A_{perfil} = l * (e1 + e2) + n * [ev * (h - e1 - e2)] + 2 * A_{engrape}$$

Ecuación del área de la sección del perfil.

Donde:

$A_{engrape1} = A_{engrape2} = 0.3319 * h^{2.0694} = A_{engrape}$

l = p – 1.0043*h

n: número de celdas + 2

3.2.10 Sistema de referencia

Inercia del Perfil

$$I_{perfil} = \sum Io + Ad^2$$

$$\begin{aligned} I_{perfil} &= I_{x\,pared\,agua} + A_{pared\,agua}(y_{perfil} - y_{pared\,agua})^2 \\ &+ n[(I_{x\,nervadura} + A_{x\,nervadura}(y_{perfil} - y_{nervadura})^2] \\ &+ I_{x\,pared\,externa} + A_{pared\,externa}(y_{perfil} - y_{pared\,externa})^2 \\ &+ I_{x\,engrape1} + A_{engrape\,1}(y_{perfil} - y_{engrape1})^2 \\ &+ I_{x\,engrape2} + A_{engrape2}(y_{perfil} - y_{engrape2})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{perfil} &= \frac{l*e1^3}{12} + (l*e1)*\left(y_{perfil} - \frac{e1}{2}\right)^2 \\ &+ n*\left[\frac{ev*(h-e1-e2)^3}{12} + [ev*(h-e1-e2)]*\left(y_{perfil} - \frac{h+e1-e2}{2}\right)^2\right] \\ &+ \frac{l*e2^3}{12} + (l*e2)*\left[y_{perfil} - \left(h - \frac{e2}{2}\right)\right]^2 \\ &+ I_{x\,engrape1} + A_{engrape1}*(y_{perfil} - y_{engrape1})^2 \\ &+ I_{x\,engrape2} + A_{engrape2}*[y_{perfil} - (h - y_{engrape1})]^2 \end{aligned}$$

Simplificando

$$\begin{aligned} I_{perfil} &= \frac{l*e1^3}{12} + (l*e1)*\left(y_{perfil} - \frac{e1}{2}\right)^2 \\ &+ n*\left[\frac{ev*(h-e1-e2)^3}{12} + [ev*(h-e1-e2)]*\left(y_{perfil} - \frac{h+e1-e2}{2}\right)^2\right] \\ &+ \frac{l*e2^3}{12} + (l*e2)*\left[y_{perfil} - \left(h - \frac{e2}{2}\right)\right]^2 \\ &+ 2*I_{x\,engrape} + A_{engrape}*\{(y_{perfil} - y_{engrape})^2 + [y_{perfil} - (h - y_{engrape})]^2\} \end{aligned}$$

Ecuación de la Inercia del perfil.

Donde:

$I_{x\ engrape1} = I_{x\ engrape2} = 0.0154 * h^{4.0959} = I_{x\ engrape}$

$A_{\ engrape1} = A_{\ engrape2} = 0.3319 * h^{2.0694} = A_{\ engrape}$

$y_{\ engrape1} = 0.2982 * h = y_{\ engrape}$

$l = p - 1.0043*h$

n: número de celdas + 2

3.3 Evaluación de las ecuaciones del perfil utilizando una herramienta CAD (AutoCAD).

Para comprobar la diferencia de la formula con un perfil real, se realizó un escaneo de un perfil que se fabrica actualmente. Con la ayuda de un programa CAD, se traza el contorno del perfil. Con este programa se calcula automáticamente la inercia, el área y el centroide ejecutando un comando. Estos valores se los compara con la teoría propuesta y determinar la diferencia existente. La figura 3.18 detalla a continuación lo que se obtuvo con el programa CAD.

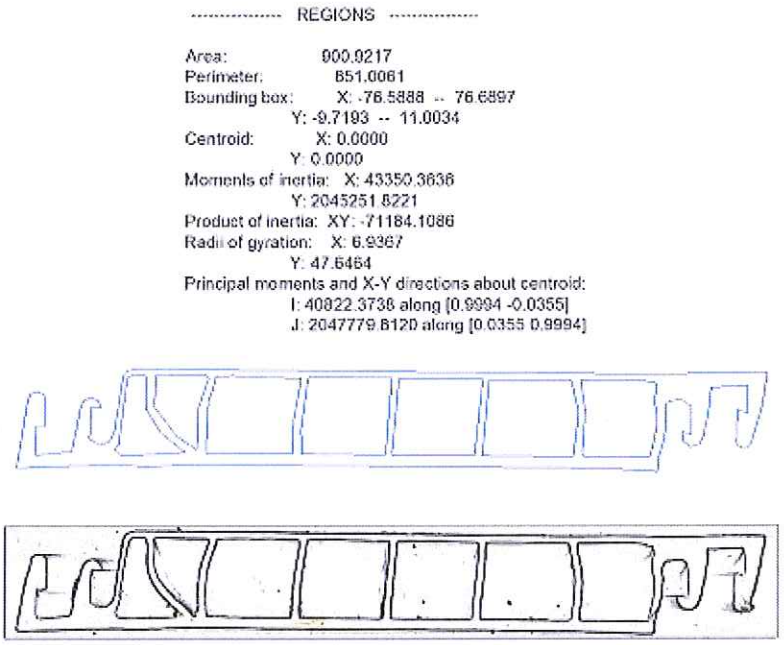


Figura 3.18 Contorno de un perfil extruido /52/.

Resultados del perfil según software CAD

Inercia del Perfil Real =43,350.36 mm^4

Área del Perfil Real = 900.92 mm^2

Centroide del Perfil Real = 9.72 mm

Cálculo mediante la ecuación del perfil

Inercia del Perfil Teórico = 45,689.7mm^4

Área del Perfil Teórico = 882.83 mm^2

Centroide del Perfil Teórico = 8.94 mm

Porcentaje de diferencia del Inercia

$$\frac{43{,}350.36 - 45{,}689.7}{43{,}350.36} x100 = -5.40\%$$

Porcentaje de diferencia del Área

$$\frac{832.61 - 882.83}{832.61} x100 = 2.01\%$$

Porcentaje de diferencia del Centroide

$$\frac{9.72 - 8.94}{9.72} x100 = 8.07\%$$

Este porcentaje de diferencia entre el perfil real y el teórico se encuentran bajo el 10% de diferencia. Esta diferencia se debe a que el perfil real, al ser extruido, no tendrá la forma homogénea como se lo planteó en la teoría. No obstante, este porcentaje es bajo; lo cual puede asegurar que la ecuación del perfil se asemeja a un perfil extruido.

3.4 Aplicaciones de las ecuaciones del perfil de pared estructurada.

La ecuación del perfil, se la integró en un programa para realizar los cálculos de la rigidez, determinar el peso y la cantidad requerida del perfil para la fabricación de los tubos de diámetros y longitudes

determinadas. A continuación, se desarrollarán las fórmulas para los cálculos mencionados.

3.4.1 Cálculo del Peso del perfil extruido

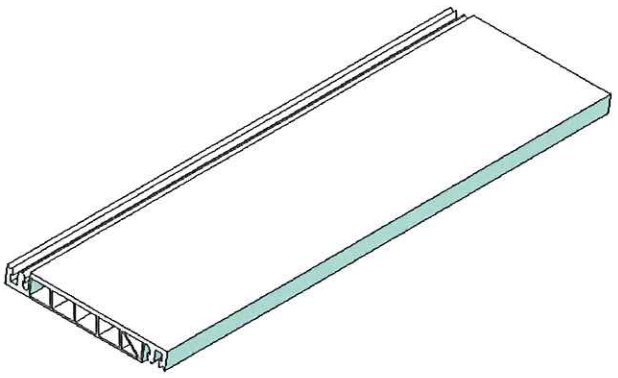


Figura 3.19 Tramo de perfil de pared estructurada.

Para calcular el peso del perfil (Figura 3.19) se utiliza el área de la sección del perfil calculado anteriormente para obtener el peso del perfil extruido

peso del perfil = densidad del material * volumen del perfil

El volumen del perfil es igual a la sección del perfil multiplicado por una longitud entonces:

peso del perfil = densidad Material * área perfil * longitud del perfil

Calculando un peso del perfil por unidad de longitud, queda de la siguiente manera:

$$\frac{\text{peso del perfil}}{\text{longitud de perfil}} = \text{densidad del material} * \text{area del perfil}$$

La densidad del material plástico es conocida, el área de la sección es calculada mediante la fórmula del área perfil determinado anteriormente; y la longitud es una establecida previamente de acuerdo al tramo. Con estos valores se puede calcular el peso del perfil.

3.4.2 Determinación de la longitud del rollo para formar el tubo.



Figura 3.20 Enrollado del perfil en el carrete.

El perfil extruido se lo enrolla en un carrete (Figura 3.20) para luego colocarlo en la máquina que formará el tubo como fue explicado en el capítulo anterior.

Para calcular cuánto rollo de perfil que se necesita para formar un tubo de una longitud de un diámetro cualquiera primero se debe definir algunas relaciones previas.

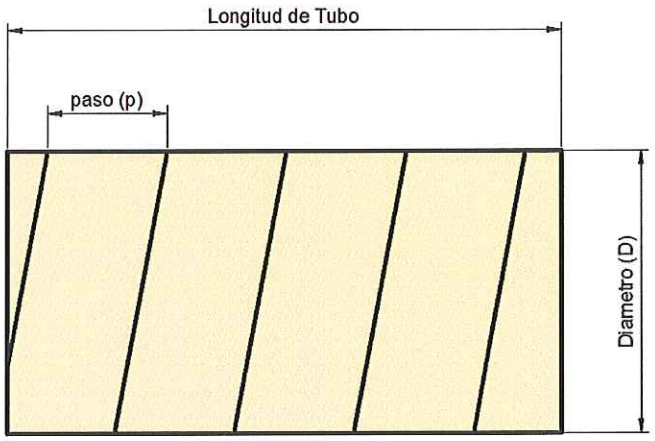


Figura 3.21 Esquema del tubo de pared estructurada.

Como se puede ver en la Figura 3.21, se requiere un determinado número de vueltas para completar una longitud de tubo. Este número de vueltas depende del ancho del perfil; en este caso está definido por el paso del perfil.

$$\text{número de vueltas} = \frac{\text{longitud de tubo}}{\text{paso perfil}}$$

Para calcular cuánto perfil requerimos para dar una vuelta, se determina primero el perímetro del diámetro del tubo

$$\text{cantidad de perfil en una vuelta} = \pi * \text{diámetro}$$

Luego, para determinar el total perfil requerido para formar el tubo, se multiplica los metros de perfil por vuelta por el número de vueltas que se necesita para formar el metro de tubo:

$$\text{longitud de perfil} = N^{o} \text{ de vueltas} * \text{cantidad de perfil en una vuelta}$$

Reemplazando términos, queda la fórmula de la siguiente manera:

$$\text{longitud de perfil} = \frac{\text{longitud de tubo}}{\text{paso perfil}} * \pi * \text{diámetro}$$

Finalmente, se arreglan los términos para obtener la longitud de perfil para una longitud de tubo.

$$\frac{\text{longitud de perfil}}{\text{longitud de tubo}} = \frac{\pi * \text{diámetro}}{\text{paso perfil}}$$

Esta relación se define como la longitud de perfil que se requiere para formar una longitud determinada de tubo.

3.4.3 Cálculo del peso del tubo

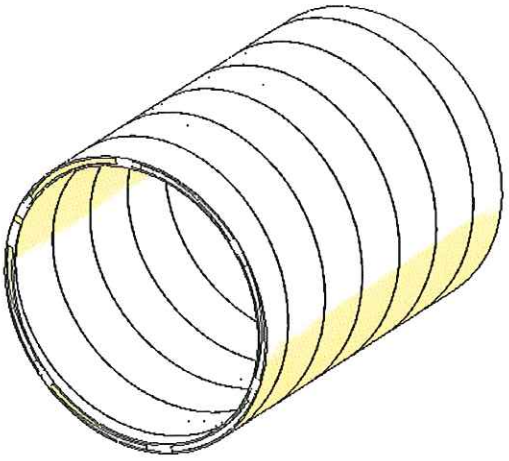


Figura 3.22 Sección de tubo de pared estructurada.

De la fórmula anterior:

peso del perfil = densidad material * área perfil * longitud del perfil

Pero también el peso del perfil sería igual al peso del tubo si la longitud del perfil es la requerida para fabricar dicho tubo entonces:

peso del Tubo = densidad material* área perfil *longitud de perfil

Si se calcula el peso del tubo por unidad de longitud, queda de la siguiente manera:

$$\frac{\text{peso de Tubo}}{\text{longitud de Tubo}} = \frac{\text{densidad Material} * \text{area Perfil} * \text{longitud de Perfil}}{\text{longitud deTubo}}$$

Reemplazando términos finalmente queda:

$$\frac{\text{peso de Tubo}}{\text{longitud de Tubo}} = \text{densidad Material} * \text{área Perfil} * \left(\frac{\pi * \text{diámetro}}{\text{paso perfil}} \right)$$

Con esta fórmula se puede calcular el peso del tubo por unidad de longitud de cualquier tubo fabricado con un perfil cualquiera de un diámetro y longitud determinado.

Cálculo de la rigidez del tubo

Utilizando la fórmula de la rigidez Anular como parámetro estático del capítulo anterior.

$$R.A. = \frac{E * I}{r^3}$$

E = módulo de elasticidad

I = Inercia de la sección del tubo (inercia del perfil)

r = radio medio del tubo.

El valor de I se calcula en base a la ecuación de inercia del perfil. Conociendo el modulo E del plástico, podemos calcular la rigidez anular de un tubo de un diámetro cualquiera.

Presentación de las ecuaciones a través de un programa

Como se lo explico al inicio, todas las fórmulas de este capítulo, se las integró en un programa para que el usuario pueda obtener valores requeridos de pesos, rigidez, cantidad de perfil para los diferentes diámetros que se fabriquen.

Se selecciona un caso específico de un perfil de codificación 3610 para un diámetro de 1450 mm para realizar sus cálculos. Se muestran sus valores a continuación:

Datos del Perfil:

Inercia: 83873.36 mm^4

Área: 1120.82 mm^2

Centroide: 10.34 mm

Peso del perfil: 1.61 kg/m

Datos del tubo

Rigidez: 0.49 kN/m^2

Serie: 1

Peso del tubo: 57.56 kg/m

Longitud del rollo: 214.58 m

En la Figura 3.23 se muestra los resultados de un perfil 3610 rolado en un diámetro de 1450 mm; detallando cada una de sus partes y su valor. Estos cálculos se realizan internamente en el programa.

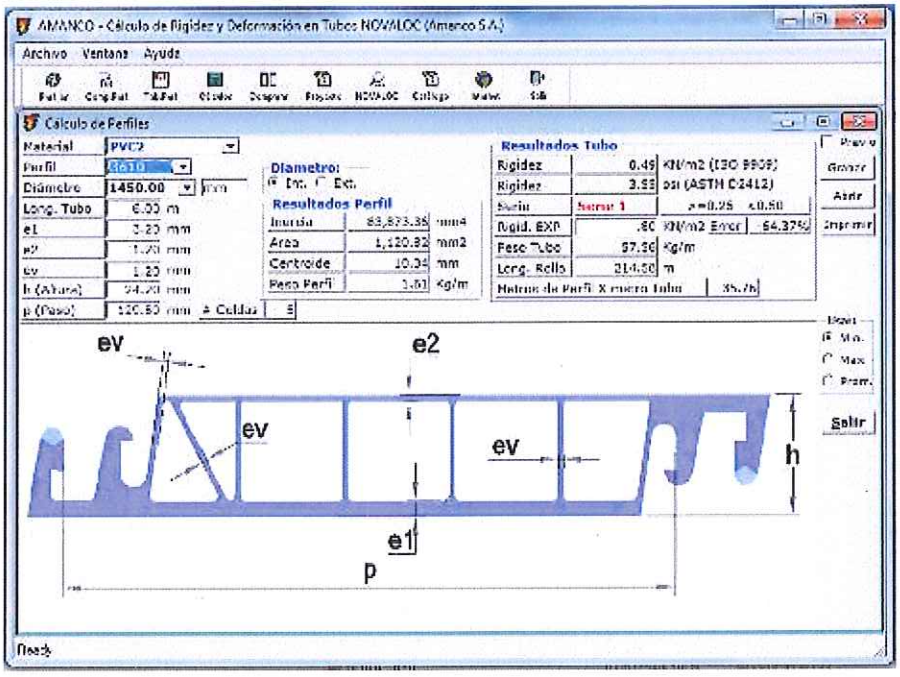


Figura 3.23 Programa para cálculo rigidez del tubo de pared estructurada /53/.

Otra captura de pantalla (Figura 3.24), muestra el cálculo del diámetro del rollo que se va a obtener al fabricar un perfil y almacenarlo para su posterior rolado. Conocer esto es muy importante ya que los carretes son de un diámetro determinado y se debe conocer si la cantidad de perfil para el rolado del tubo no sobrepase sus dimensiones.

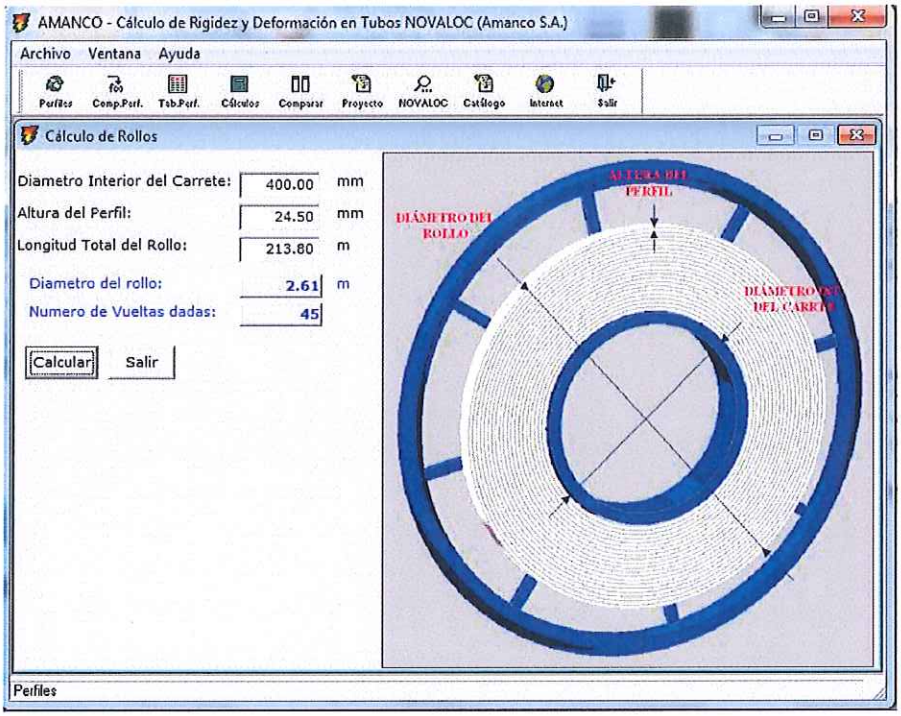


Figura 3.24 Programa para cálculo de la longitud del rollo /54/.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LAS BASES DE LOS CÁLCULOS DEL PERFIL DE PARED ESTRUCTURADA

4.1 Comparación de la rigidez de una tubería plástica de pared estructurada (real vs teórica)

4.1.1 Análisis de diferentes tipos de perfiles.

En la fabricación de tuberías, se evaluaban los tubos experimentalmente y se guardan todos estos datos manteniendo una estadística del tubo. Con el nuevo programa se puede comparar la rigidez teórica con la experimental de la tubería de pared estructurada.

Tabla 4.1 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2110 /55/.

Diámetro (mm)	Rigidez Ensayos (kN/m2)	Rigidez Calculada (kN/m2)	% Diferencia
475	1.70	1.86	9.4%
560	1.08	1.12	3.7%
640	0.76	0.74	2.6%
730	0.51	0.50	2.0%

Como se observa en la tabla de las rigideces en distintos diámetros del perfil 2110, su porcentaje de diferencia entre lo experimental y calculado para el diámetro de 475 mm es de 9.4% como máximo. A continuación, se muestra gráficamente ese contraste.

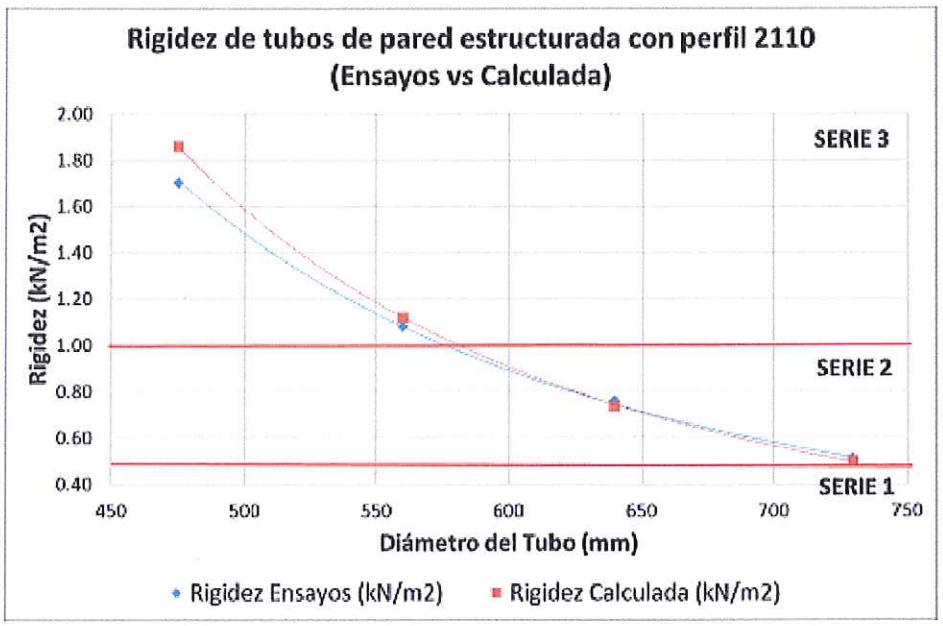


Figura 4.1 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2110.

En el análisis del gráfico, la diferencia de los valores experimentales y calculados se debe a la manera de cómo está fabricado el tubo. Como es un proceso de rolado, es más complicado fabricar un diámetro relativamente pequeño con respecto al alto del perfil, el cual mientras más grueso sea el perfil, será más difícil darle una curvatura en la roladora para formar el tubo. A continuación, se muestra otra comparación con un perfil 2715.

Tabla 4.2 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2715 /56/.

Diámetro (mm)	Rigidez Ensayos (kN/m2)	Rigidez Calculada (kN/m2)	% Diferencia
640	2.25	2.74	21.8%
730	1.45	1.88	29.7%
825	1.20	1.25	4.2%
1035	0.65	0.62	4.6%

En el ejemplo del perfil 2715, para un diámetro de 730 mm la diferencia de rigidez es del 29.7%. Abajo se presenta gráficamente los valores de los ensayos y cálculos.

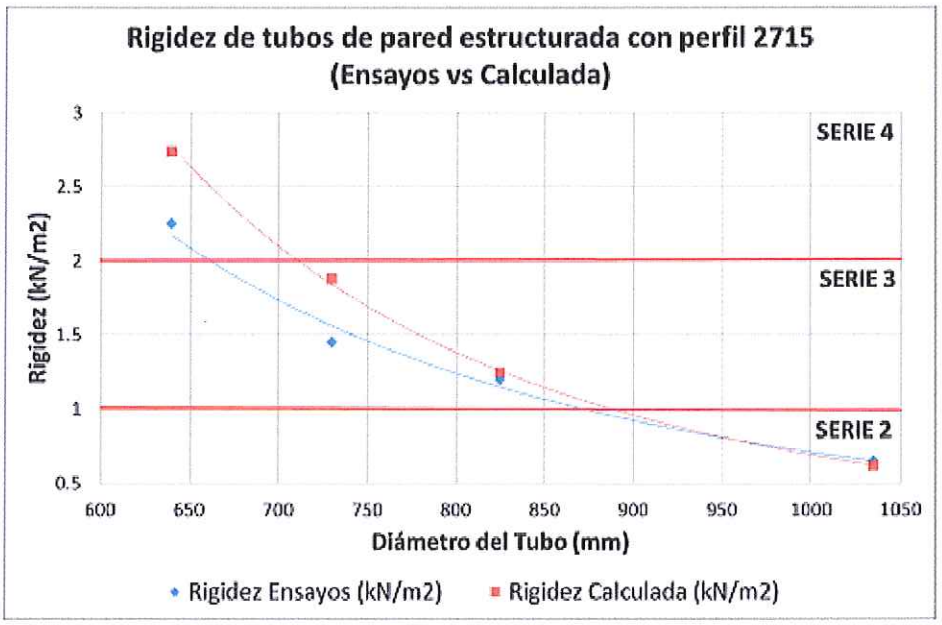


Figura 4.2 Rigidez experimental y teórica de tubos fabricados con un perfil 2715.

Dadas las observaciones, se determinó que para un rango de diámetros fabricados con un perfil específico entre serie 1 y serie 2, se considera que el tubo tiene las mejores condiciones de rigidez y peso.

4.1.2 Comportamiento de la rigidez y peso del tubo al modificar diferentes formas del perfil.

Anteriormente se realizó la comparación algunos tipos de perfiles con diferentes diámetros; ahora se realizará la comparación de un solo perfil para un diámetro determinado cambiando las diferentes variables de la forma del perfil y ver el aporte que realizan cada una de estas tanto en la rigidez como el peso del tubo.

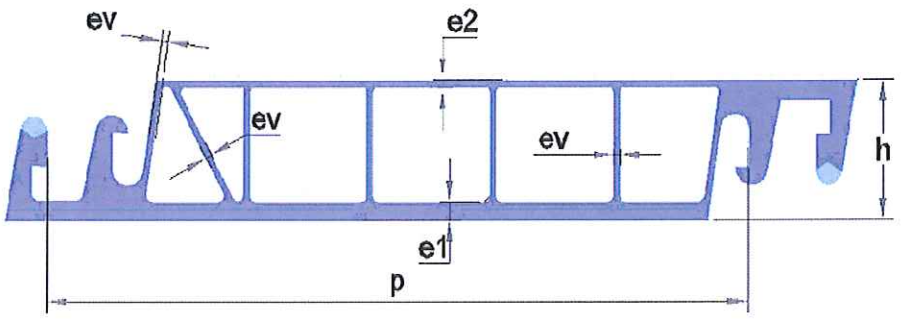


Figura 4.3 Esquema del perfil 3610 /57/

Se tomará como referencia inicial el perfil 3610 variando sus dimensiones desde el mínimo e incrementaremos de cada una de las variables de la ecuación del perfil. El diámetro evaluado es de 1350 mm. Se obtendrá la rigidez del tubo y el peso del mismo de acuerdo a cada modificación del perfil original.

- Espesor de pared de agua (e1): incrementos de 2 mm
- Espesor de pared externa (e2): incrementos de 2 mm
- Espesor de nervaduras (ev): incrementos de 2 mm
- Alto del perfil (h): incrementos de 1 mm
- Paso del perfil (p): incrementos de 10 mm

Tabulando desde un punto inicial, mediante modificaciones de las partes del perfil; se puede pasar de una serie de tubo a una más alta, con un perfil más óptimo. En las siguientes tablas se muestran los resultados de rigidez y peso del tubo modificando cada una de las variables del perfil de pared estructurada.

Tabla 4.3 Rigidez y Peso del Tubo con variación de la pared de agua del perfil /58/

Variación pared de agua (e1)								
Perfil N°	pared de agua e1 (mm)	pared externa e2 (mm)	nervios ev (mm)	alto del perfil h (mm)	paso del perfil p (mm)	Rigidez (KN/m2)	Peso Tubo (Kg/m)	SERIE
1	1.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.43	44.4	1
2	2.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.50	48.8	1
3	3.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.54	53.3	1
4	4.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.57	57.7	2
5	5.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.58	62.2	2
6	6.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.59	66.6	2
7	7.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.60	71.1	2
8	8.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.60	75.6	2
9	9.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.60	80.0	2
10	10.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.60	84.5	2
11	11.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.60	88.9	2
12	12.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.61	93.4	2
13	13.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.61	97.8	2
14	14.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.62	102.3	2
15	15.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.63	106.7	2
16	16.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.65	111.2	2
17	17.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.67	115.7	2
18	18.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.70	120.1	2
19	19.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.74	124.6	2
20	20.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.78	129.0	2

Tabla 4.4 Rigidez y peso del tubo con variación de la pared externa del perfil /59/

Variación pared externa (e2)								
Perfil N°	pared de agua e1 (mm)	pared externa e2 (mm)	nervios ev (mm)	alto del perfil h (mm)	paso del perfil p (mm)	Rigidez (KN/m2)	Peso Tubo (Kg/m)	SERIE
21	1.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.43	44.4	1
22	1.2	2.2	1.2	25.0	130.0	0.49	48.8	1
23	1.2	3.2	1.2	25.0	130.0	0.53	53.3	1
24	1.2	4.2	1.2	25.0	130.0	0.56	57.7	1
25	1.2	5.2	1.2	25.0	130.0	0.57	62.2	2
26	1.2	6.2	1.2	25.0	130.0	0.58	66.6	2
27	1.2	7.2	1.2	25.0	130.0	0.58	71.1	2
28	1.2	8.2	1.2	25.0	130.0	0.58	75.6	2
29	1.2	9.2	1.2	25.0	130.0	0.59	80.0	2
30	1.2	10.2	1.2	25.0	130.0	0.59	84.5	2
31	1.2	11.2	1.2	25.0	130.0	0.59	88.9	2
32	1.2	12.2	1.2	25.0	130.0	0.59	93.4	2
33	1.2	13.2	1.2	25.0	130.0	0.60	97.8	2
34	1.2	14.2	1.2	25.0	130.0	0.61	102.3	2
35	1.2	15.2	1.2	25.0	130.0	0.62	106.7	2
36	1.2	16.2	1.2	25.0	130.0	0.64	111.2	2
37	1.2	17.2	1.2	25.0	130.0	0.66	115.7	2
38	1.2	18.2	1.2	25.0	130.0	0.69	120.1	2
39	1.2	19.2	1.2	25.0	130.0	0.73	124.6	2
40	1.2	20.2	1.2	25.0	130.0	0.77	129.0	2

Tabla 4.5 Rigidez y Peso del Tubo con variación de las nervaduras del perfil /60/

Variación de nervaduras (ev)								
Perfil N°	pared de agua e1 (mm)	pared externa e2 (mm)	nervios ev (mm)	alto del perfil h (mm)	paso del perfil p (mm)	Rigidez (KN/m2)	Peso Tubo (Kg/m)	SERIE
41	1.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.43	44.4	1
42	1.2	1.2	2.2	25.0	130.0	0.47	51.7	1
43	1.2	1.2	3.2	25.0	130.0	0.51	59.0	1
44	1.2	1.2	4.2	25.0	130.0	0.55	66.3	1
45	1.2	1.2	5.2	25.0	130.0	0.59	73.6	2
46	1.2	1.2	6.2	25.0	130.0	0.63	80.9	2
47	1.2	1.2	7.2	25.0	130.0	0.67	88.2	2
48	1.2	1.2	8.2	25.0	130.0	0.71	95.5	2
49	1.2	1.2	9.2	25.0	130.0	0.75	102.8	2
50	1.2	1.2	10.2	25.0	130.0	0.79	110.1	2
51	1.2	1.2	11.2	25.0	130.0	0.83	117.4	2
52	1.2	1.2	12.2	25.0	130.0	0.87	124.7	2
53	1.2	1.2	13.2	25.0	130.0	0.91	132.0	2
54	1.2	1.2	14.2	25.0	130.0	0.95	139.3	2
55	1.2	1.2	15.2	25.0	130.0	0.99	146.6	2
56	1.2	1.2	16.2	25.0	130.0	1.03	154.0	2
57	1.2	1.2	17.2	25.0	130.0	1.07	161.3	2
58	1.2	1.2	18.2	25.0	130.0	1.11	168.6	2
59	1.2	1.2	19.2	25.0	130.0	1.15	175.9	3
60	1.2	1.2	20.2	25.0	130.0	1.19	183.2	3

Tabla 4.6 Rigidez y Peso del Tubo con variación del alto del perfil

/61/

Variación del alto (h)								
Perfil N°	pared de agua e1 (mm)	pared externa e2 (mm)	nervios ev (mm)	alto del perfil h (mm)	paso del perfil p (mm)	Rigidez (KN/m2)	Peso Tubo (Kg/m)	SERIE
61	1.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.43	44.4	1
62	1.2	1.2	1.2	26.0	130.0	0.49	46.7	1
63	1.2	1.2	1.2	27.0	130.0	0.54	49.1	1
64	1.2	1.2	1.2	28.0	130.0	0.60	51.6	2
65	1.2	1.2	1.2	29.0	130.0	0.67	54.2	2
66	1.2	1.2	1.2	30.0	130.0	0.74	56.9	2
67	1.2	1.2	1.2	31.0	130.0	0.82	59.7	2
68	1.2	1.2	1.2	32.0	130.0	0.90	62.6	2
69	1.2	1.2	1.2	33.0	130.0	0.99	65.5	2
70	1.2	1.2	1.2	34.0	130.0	1.09	68.6	2
71	1.2	1.2	1.2	35.0	130.0	1.19	71.7	3
72	1.2	1.2	1.2	36.0	130.0	1.31	75.0	3
73	1.2	1.2	1.2	37.0	130.0	1.42	78.3	3
74	1.2	1.2	1.2	38.0	130.0	1.55	81.7	3
75	1.2	1.2	1.2	39.0	130.0	1.69	85.3	3
76	1.2	1.2	1.2	40.0	130.0	1.83	88.9	3
77	1.2	1.2	1.2	41.0	130.0	1.99	92.6	3
78	1.2	1.2	1.2	42.0	130.0	2.15	96.4	3
79	1.2	1.2	1.2	43.0	130.0	2.33	100.3	4
80	1.2	1.2	1.2	44.0	130.0	2.51	104.3	4

Tabla 4.7 Rigidez y Peso del Tubo con variación del paso del perfil /62/

Variación del paso (p)								
Perfil N°	pared de agua e1 (mm)	pared externa e2 (mm)	nervios ev (mm)	alto del perfil h (mm)	paso del perfil p (mm)	Rigidez (KN/m2)	Peso Tubo (Kg/m)	SERIE
81	1.2	1.2	1.2	25.0	130.0	0.43	44.4	1
82	1.2	1.2	1.2	25.0	140.0	0.42	42.2	1
83	1.2	1.2	1.2	25.0	150.0	0.41	40.4	1
84	1.2	1.2	1.2	25.0	160.0	0.40	38.7	1
85	1.2	1.2	1.2	25.0	170.0	0.39	37.3	1
86	1.2	1.2	1.2	25.0	180.0	0.39	36.0	1
87	1.2	1.2	1.2	25.0	190.0	0.38	34.9	1
88	1.2	1.2	1.2	25.0	200.0	0.37	33.9	1
89	1.2	1.2	1.2	25.0	210.0	0.37	32.9	1
90	1.2	1.2	1.2	25.0	220.0	0.36	32.1	1
91	1.2	1.2	1.2	25.0	230.0	0.36	31.3	1
92	1.2	1.2	1.2	25.0	240.0	0.36	30.6	1
93	1.2	1.2	1.2	25.0	250.0	0.35	30.0	1
94	1.2	1.2	1.2	25.0	260.0	0.35	29.4	1
95	1.2	1.2	1.2	25.0	270.0	0.34	28.8	1
96	1.2	1.2	1.2	25.0	280.0	0.34	28.3	1
97	1.2	1.2	1.2	25.0	290.0	0.34	27.8	1
98	1.2	1.2	1.2	25.0	300.0	0.34	27.4	1
99	1.2	1.2	1.2	25.0	310.0	0.33	27.0	1
100	1.2	1.2	1.2	25.0	320.0	0.33	26.6	1

Con los datos se realiza un gráfico de la rigidez vs peso del tubo para analizar la influencia de cada una de las variables del perfil enrollado.

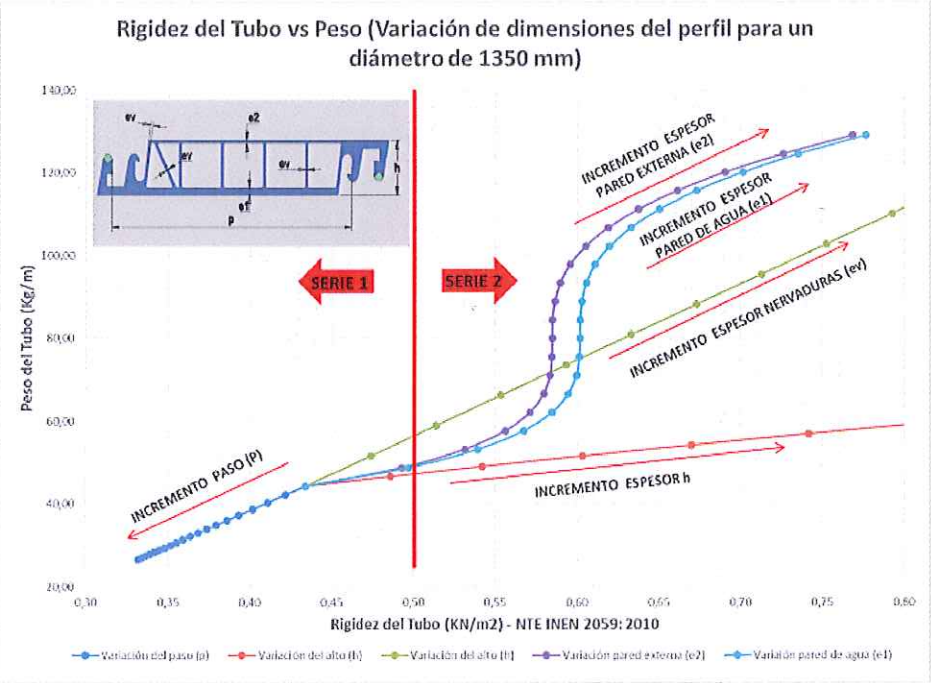


Figura 4.4 Variación de dimensiones de un perfil y su influencia en la rigidez y peso del tubo

En el resultado del gráfico 4.4 se observa que la modificación de las nervaduras (ev) o del alto del perfil (h), se puede obtener un mejor tubo con excelente relación rigidez – peso. Por el contrario, incrementar los espesores de pared de agua (e1) y/o pared externa (e2) incrementarían el peso del tubo sin ganar mucha rigidez. El incremento del paso (p), ocasiona una disminución del peso del tubo, pero también su rigidez. En análisis de diseño del perfil se podría determinar la conveniencia o no de incrementar el paso (p).

Con la modificación de las diferentes variables del perfil, se puede pasar de una serie menor a una mayor. En este caso se puede pasar de una Serie 1 a una Serie 2; por ejemplo, con un incremento de las nervaduras y el espesor de pared externa. Esto quiere decir que el tubo es capaz de soportar una mayor carga al ser instalado.

En la realidad, físicamente se puede modificar de un molde existente el espesor (e2), (e1) y (ev) más no el alto (h) ni el paso (p) del perfil; pero presenta una buena referencia en cuanto a rigidez y peso. Conociendo esto, el programa se puede usar también como base para el diseño de nuevos perfiles; enrollando tubos de diámetros más grandes que sean más livianos, sin perder la rigidez.

4.1.3 Diseño de perfiles.

Para el diseño de perfiles, se puede tomar como punto de partida un perfil existente y mediante el cambio de las variables, obtener una propuesta acorde con los requerimientos de rigidez y peso. Por ejemplo, para un perfil 10004 el diámetro máximo en serie 2 sería de 1770 mm; esto se muestra en la Figura 4.5.

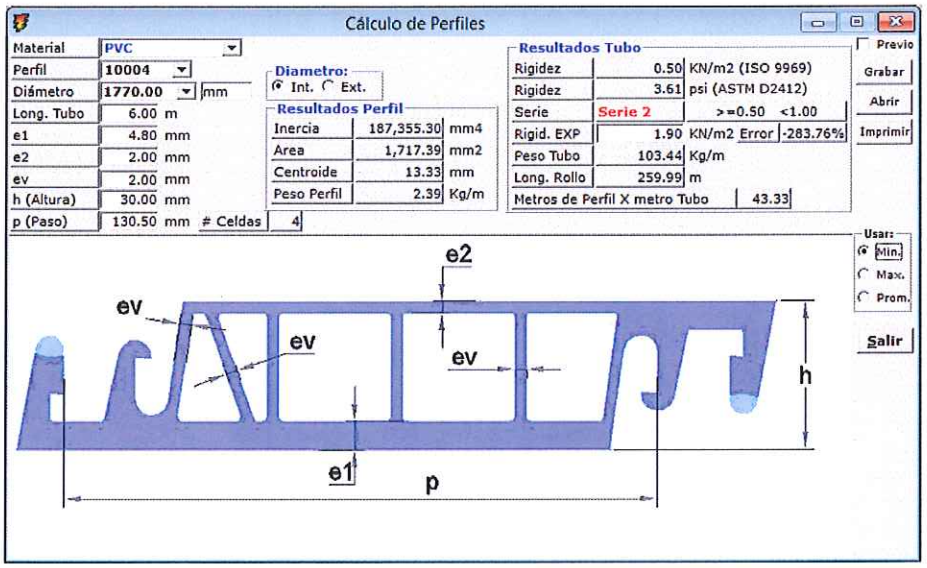


Figura 4.5 Perfil 10004, Diámetro de Tubo de 1770 mm - Serie 2.

/63/

Si se desea fabricar un tubo de 1900 mm con el perfil 10004, este solo estaría en la serie 1 según se muestra en la Figura 4.6.

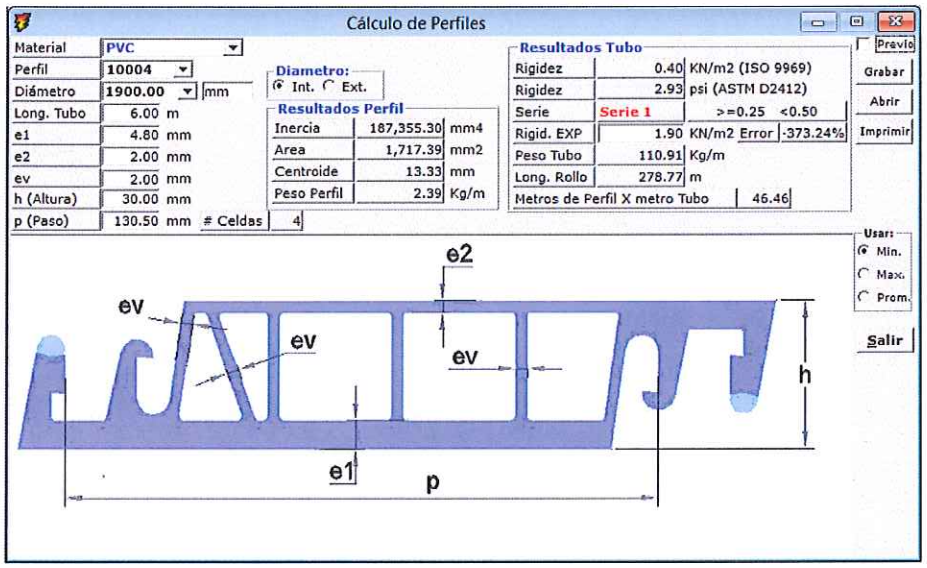


Figura 4.6 Perfil 10004, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 1. /64/

A partir del perfil 10004, se modifican las variables para obtener dos propuestas de perfil. Estas se muestran en las figuras siguientes.

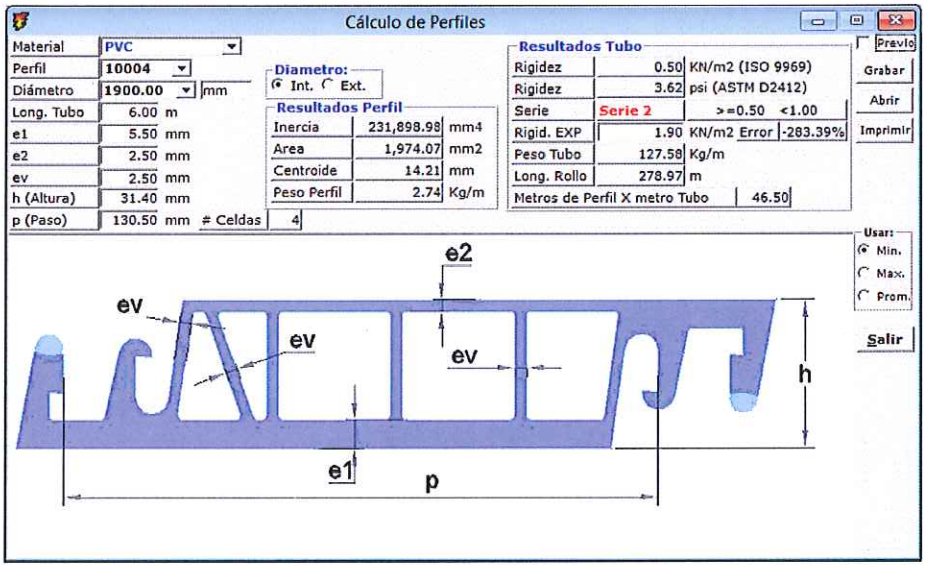


Figura 4.7 Perfil 1, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 2. /65/

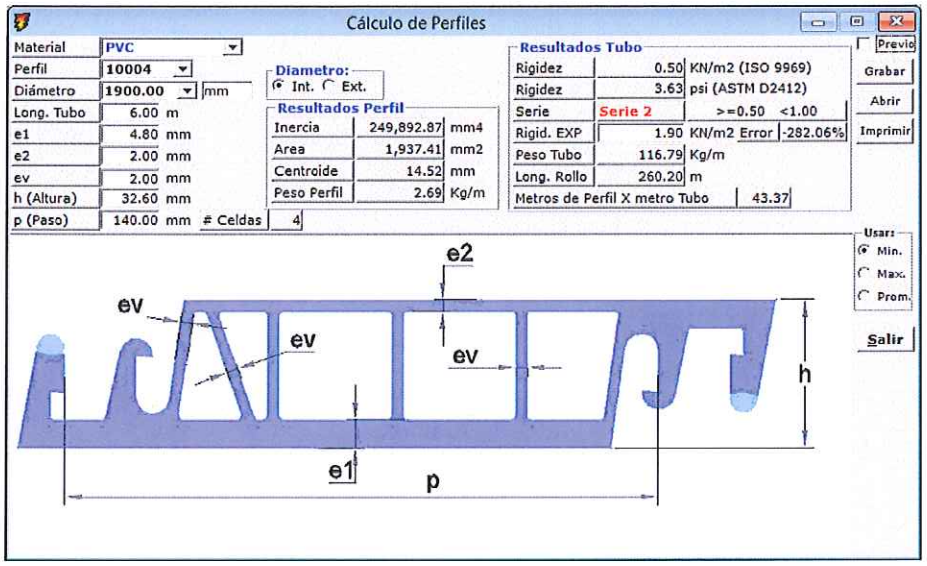


Figura 4.8 Perfil 2, Diámetro de Tubo de 1900 mm - Serie 2. /66/

Ambas propuestas están en la serie 2, pero se observa que el Perfil 2 es más liviano que el Perfil 1. A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los perfiles.

Tabla 4.8 Comparación de rigidez del tubo con diferentes perfiles. /67/

Diseño de perfiles									
Perfil	**e1 (mm)**	**e2 (mm)**	**ev (mm)**	**h (mm)**	**p (mm)**	**Peso perfil (Kg/m)**	**Peso tubo (Kg/m)**	**Rigidez (KN/m2)**	**Serie**
10004	4.8	2.0	2.0	30.0	130.5	2.39	103.44	0.4	1
Perfil 1	5.5	2.5	2.5	31.4	130.5	2.74	127.58	0.5	2
Perfil 2	4.8	2.0	2.0	32.6	140.0	2.69	116.69	0.5	2

Se requerirá de mayores estudios para determinar el mejor diseño; ya que en estas propuestas no observan efectos como el pandeo interno debido a que las nervaduras no sean del espesor adecuado para mantener la estructura del perfil. Aun así, el programa puede ayudar a

proyectar un perfil preliminar que cumpla con los requerimientos que se proyecten.

4.1.4 Comparativo de la rigidez del perfil con diferentes tipos de materiales.

Otra utilidad en la que se puede usar la aplicación es la de efectuar una comparación de la rigidez y peso de un tubo de un mismo perfil fabricado con diferentes materiales. En este caso de estudio, se compara un tubo fabricado de PVC vs uno polietileno de alta densidad con un perfil 3610 rolado en un diámetro de 1000 mm; los resultados se muestran en las siguientes figuras.

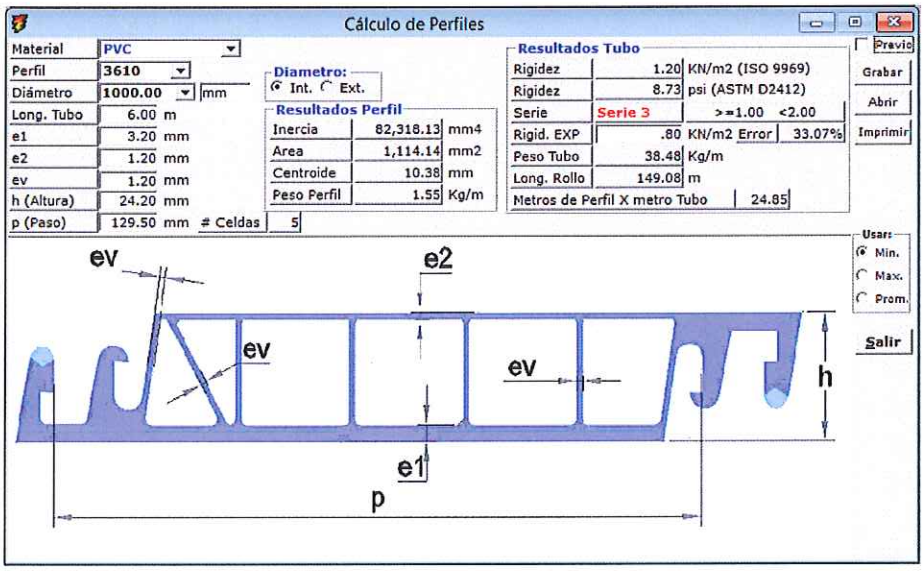


Figura 4.9 Resultados de un tubo de PVC (Cloruro de polivinilo) fabricado con un perfil 3610 /68/

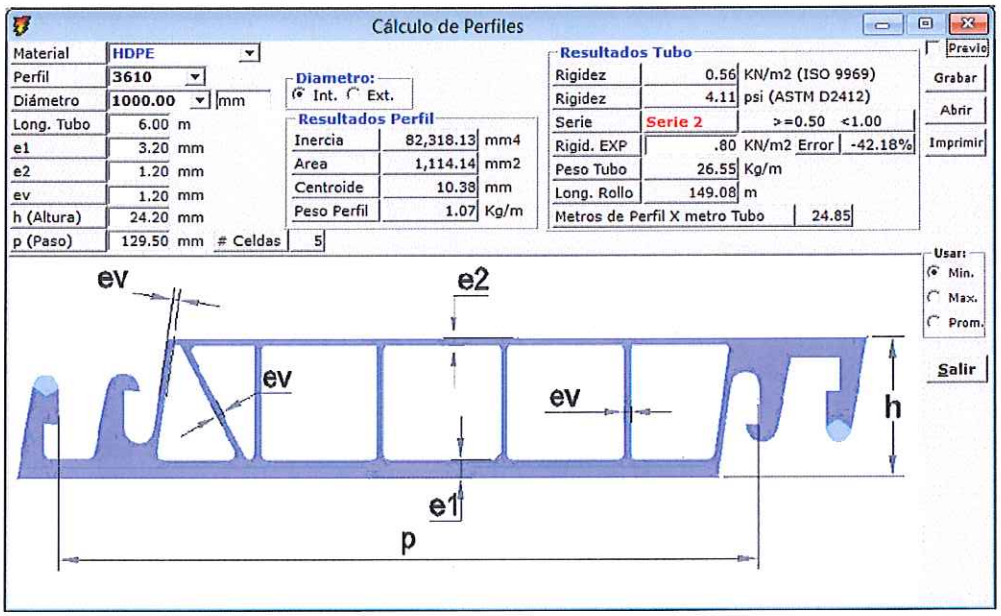


Figura 4.10 Resultados de un tubo de HDPE (Polietileno de alta densidad) fabricado con un perfil 3610 /69/

Para diferentes materiales, el PVC tiene mejores propiedades mecánicas comparadas con el polietileno de alta densidad, esto da como resultado una serie mayor de tubo; pero el fabricado con polietileno de alta densidad es más liviano.

Se utilizó un perfil mayor que el utilizado en este estudio, fabricado de polietileno, para igualar la serie del tubo al del de PVC; se obtuvo una mejor rigidez (Figura 4.11).

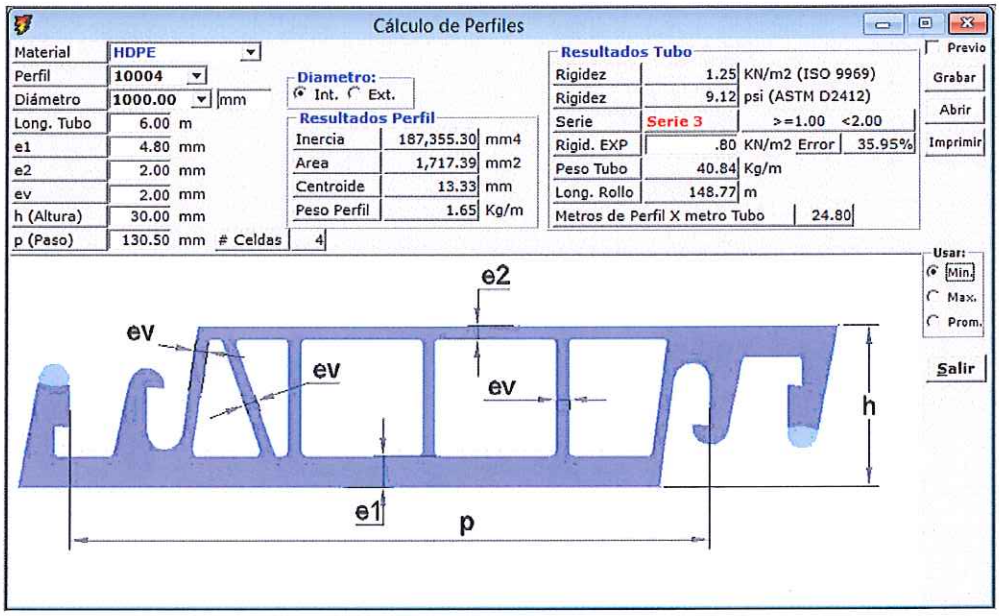


Figura 4.11 Resultados de un tubo de HDPE (Polietileno de alta densidad) fabricado de con un perfil 10004 /70/

A pesar de tener una mejor rigidez, el peso del tubo también se incrementó debido a que el perfil 10004 es más grande que el 3610. A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.9 Comparación de rigidez del tubo con diferentes materiales /71/

Perfil	Diámetro (mm)	Material	Rigidez del tubo (KN/m2)	Serie	Peso Tubo (Kg/m)
3610	1000	PVC	1.20	3	38.48
3610	1000	HDPE	0.56	2	26.55
10004	1000	HDPE	1.25	3	40.84

Como utilidad práctica, se puede utilizar este programa para poder determinar tubos de rigidez similar elaborados con diferentes materiales. Esto se logra con la variedad de perfiles disponibles para fabricar los tubos rolados, atendiendo los requerimientos técnicos predispuestos para la conducción de agua.

4.2 Análisis de costos de tubería de PVC y Hormigón.

Existen en el mercado diferentes tipos de tecnologías y materiales para la fabricación de tubos para el transporte de agua a gravedad. En PVC y Polietileno existen los perfiles estructurados, tubería de PVC bio-orientado, tubería de fibra de vidrio, tuberías de hormigón, tuberías de aleaciones de acero. Todas deben cumplir con los requisitos de norma para el transporte de aguas.

Cada una tiene sus bondades en su tipo de tecnología. En este capítulo realizaremos el un análisis comparativo de costos de los tubos de PVC de pared estructurada y de hormigón de tamaños similares en el cual incluye equipos, materiales, mano de obra y transporte que se requiere para la instalación de un tubo en proyectos de conducción de aguas. A continuación, se presenta dos tablas resumen de costos de instalación de tubos de PVC fabricadas con un mismo perfil y de la tubería de hormigón.

Tabla 4.10 Costos de Instalación de tuberías de PVC /72/.

ITEM / DIAMETRO (mm)	MATERIALES (USD/m)	MANO DE OBRA (USD/m)	COSTO TOTAL (USD/m)
560	56.39	19.07	75.46
640	61.07	22.36	83.43
730	68.61	25.58	94.19

Tabla 4.11 Costos de Instalación de tuberías hormigón armado /73/.

ITEM / DIAMETRO (mm)	MATERIALES (USD/m)	MANO DE OBRA (USD/m)	TOTAL
508	50.62	35.9	86.52
609.6	61.41	40.6	102.01
685.8	74.65	48.73	123.38

Se presenta más adelante las gráficas de materiales mano de obra y el costo total de ambos tipos de tecnología para poder hacer un análisis más sencillo de la diferencia entre costos.

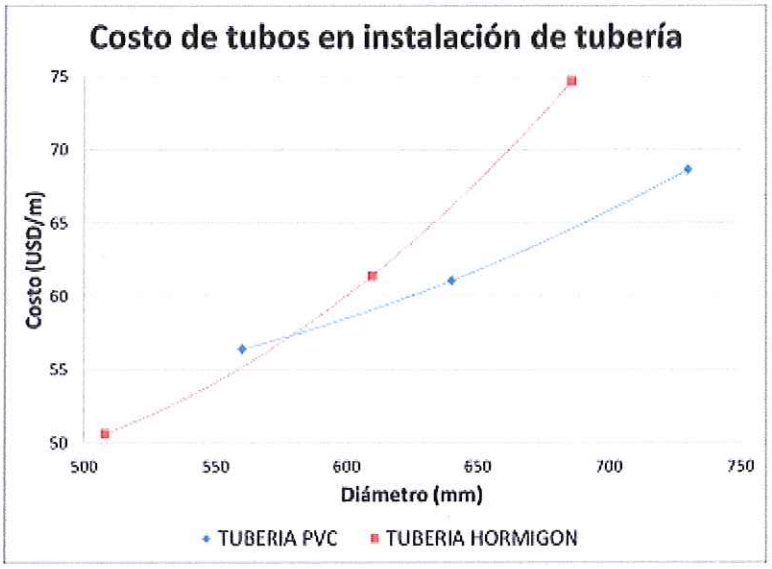


Figura 4.12 Costo de tubos en instalación de tubería

En la gráfica se observa que en primera instancia que el costo del tubo de PVC es más alto que el de hormigón, pero que a medida que incrementa su diámetro; la diferencia de costos se invierte, llegando a ser más barata la tubería de PVC.

Esto se debe a que la tubería llega a una medida que tiene la rigidez requerida con un peso bajo, llegando al nivel en cual el tubo es el más óptimo.

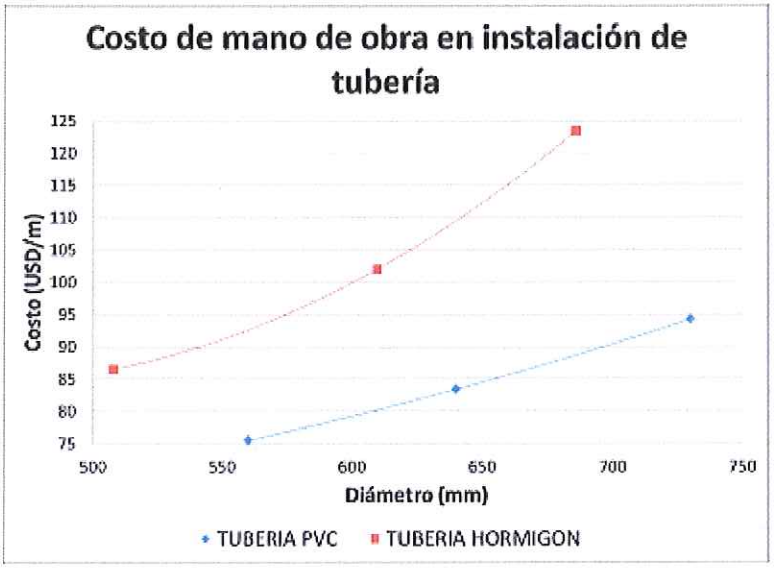


Figura 4.13 Costo de mano de obra en instalación de tubería

Al observar la siguiente gráfica, por su peso reducido, los tubos de PVC son más fáciles de transportar y manipular en su instalación. Esto requerirá menor uso de equipos, mano de obra y transporte por metro instalado. Se traduce en la gráfica superior un bajo costo.

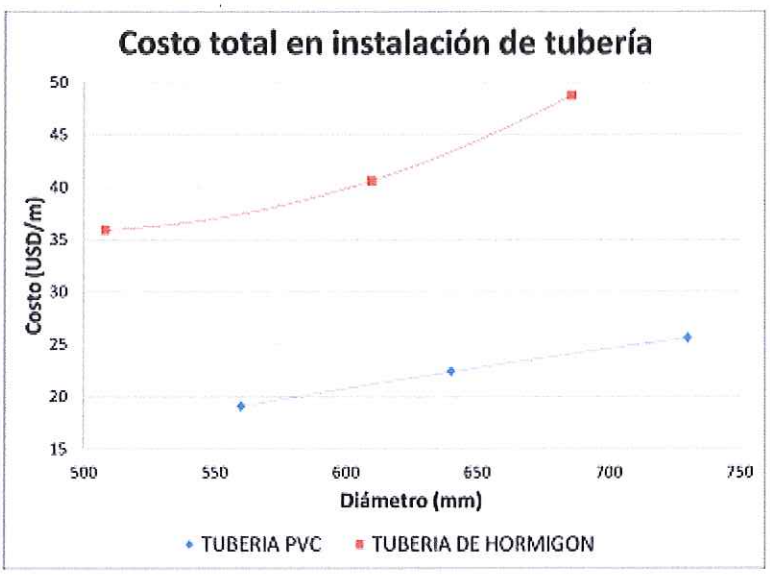


Figura 4.14 Costo total en instalación de tubería

En la gráfica de los costos totales, se observa una diferencia de costos notable en la instalación entre los dos tipos de tubos. En la realidad no se puede tener un perfil para cada diámetro de tubo en el cual sea el óptimo, pero se puede tener un perfil para fabricar un rango de diámetros en el cual se puede obtener un tubo con una relación de costo-beneficio aceptable.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El programa de diseño de tubos es una herramienta que puede ser utilizada por diferentes usuarios con conocimientos en materia civil, ingeniería, arquitectura, estudiantes y personal de producción que conozca del proceso. Esta aplicación les permitirá realizar cálculos de la tubería de pared estructurada de una manera amigable, rápida, y confiable como ya se lo demostró en capítulos anteriores.

Durante el desarrollo de la ecuación del perfil se agregaron variables adicionales que incrementaron el beneficio y dio un mayor valor en el

programa de perfiles tales como el espesor de nervaduras, cálculo de longitud del rollo, diámetro del rollo, entre otros.

El programa en si es perfectible, ya que en la base de la ecuación del perfil se realizaron algunas consideraciones previas que pueden ser optimizadas en el proceso de mejora continua.

En el análisis del perfil que se realizó previamente, en la realidad, físicamente se puede modificar un molde existente el espesor (e2), (e1) y (ev) más no el alto (h) ni el paso (p) del perfil; pero presenta una buena referencia en cuanto a rigidez y peso. Para efectuar la modificación del molde para subir la rigidez sin incrementar demasiado el peso del tubo, se recomienda incrementar primero el espesor de nervaduras (ev), luego el espesor de pared externa (e2), y finalmente el espesor de pared de agua (e1), solos o en combinación de los mismos.

Conociendo esto, el programa se puede usar también como base para el diseño de nuevos perfiles; enrollando tubos de diámetros más grandes que sean más livianos, sin perder la rigidez.

Como se lo mencionó anteriormente los cálculos de la rigidez del tubo son hechos en condiciones ideales de fabricación. En la realidad, el proceso de rolado de tubos tiene sus limitaciones, ya es muy complicado obtener un tubo de un diámetro pequeño con un perfil muy grande. Se determinó que un tubo que tenga una rigidez que se encuentre hasta la serie 2 es el más óptimo para su producción.

Las bases del cálculo pueden ser aplicados para cualquier tipo de material como por ejemplo el Polietileno y cualquier otro material que sea aplicable en el proceso de extrusión y rolado de tubos.

La empresa ha utilizado este programa en el diseño de nuevos perfiles que son más competitivos en el mercado en comparación a otras tecnologías para transporte de aguas, adquiriendo los moldes y equipos los que en la actualidad se encuentran en producción.

5.2 Recomendaciones

El programa tiene una opción para modificar internamente las ecuaciones y formulas tanto del perfil, materiales, diámetros, rigidez, longitudes y dimensiones en general.

Para realizar modificaciones internas en el programa se requiere entender completamente la ecuación del perfil y también los cálculos internos que el programa realiza.

Esta opción no está disponible para todos los usuarios. Se requiere instalar archivos adicionales para poder utilizar esas librerías.

Se puede usar las mismas bases de diseño de ecuación del perfil de pared estructurada de doble pared para otras formas de perfil eligiendo las variables que se consideren importantes para la fórmula del perfil.

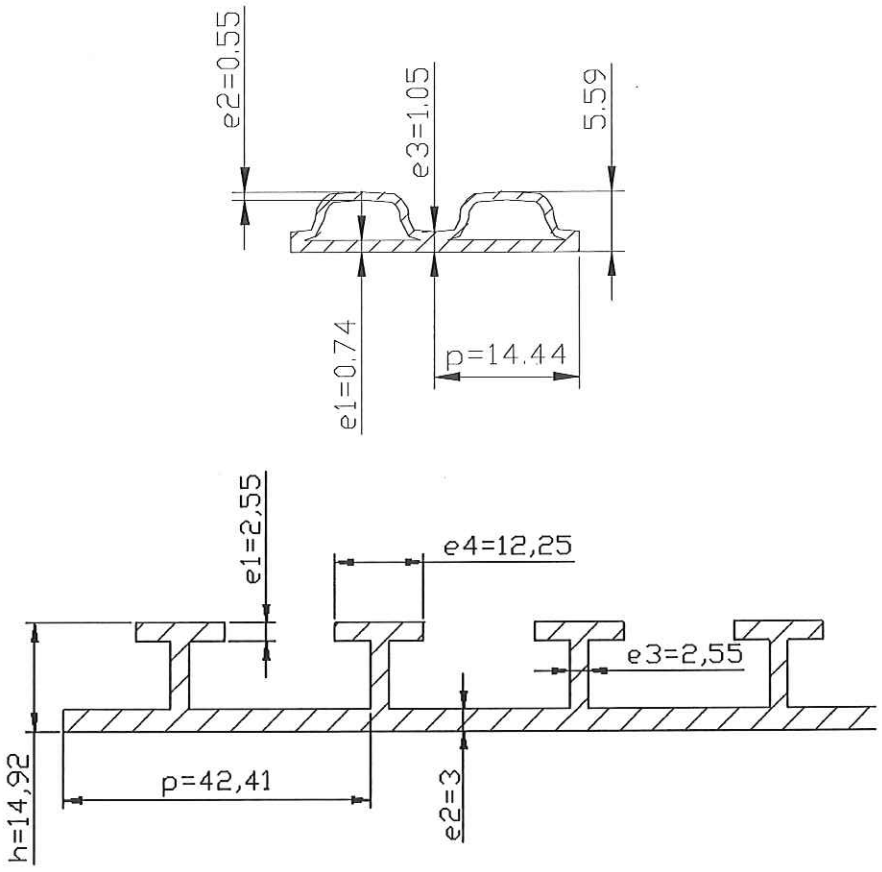


Figura 5.1 Perfiles de pared estructurada

Referencias

/1/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 2: p 14-15.

/2/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 2: p 14.

/3/http://www.easychem.com.au/production-of-materials/fossil-fuel-products/ethylene-s-bonding-and-products

/4/http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/pictures/1964b4.1-ethylene.html

/5/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/6/ ESPOL – ASEPLAS /CEC Jenny Venegas, Luis Vargas. Materias primas del sector plástico (2004). Aditivos.

/7/ ESPOL – ASEPLAS /CEC Jenny Venegas, Luis Vargas. Materias primas del sector plástico (2004). Aditivos.

/8/ http://www.losadhesivos.com/elastomero.html

/9/ ESPOL – ASEPLAS /CEC Jenny Venegas, Luis Vargas. Materias primas del sector plástico (2004). Aditivos.

/10/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 46-53.

/11/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 46.

/12/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 46.

/13/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 47.

/14/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 48.

/15/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 49.

/16/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 52.

/17/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 51.

/18/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 51.

/19/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 76-84.

/20/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/21/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 76.

/22/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 77.

/23/ Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico /María del Pilar Noriega, Omar Augusto Estrada. Diseño de husillos de extrusión.

/24/ Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico /María del Pilar Noriega, Omar Augusto Estrada. Diseño de husillos de extrusión.

/25/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 78.

/26/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 80.

/27/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 79.

/28/ http://plasticomponents.com/categorias.asp?CatId=9

/29/ http://www.scielo.br/img/revistas/po/v19n1/14t1.gif

/30/ http://www.plasticmoulding.ca/polymers/polyethylene.htm

/31/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 81.

/32/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/33/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 81.

/34/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 82.

/35/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 82.

/36/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 83.

/37/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/38/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/39/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/40/ PLASTIGAMA – Presentación Extrusoras

/41/ Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992. Lección 7: p 84.

/42/PLASTIGAMA – Procedimiento Seguro de Trabajo / Área de Extrusión.

/43/PLASTIGAMA – Condiciones de máquina para la extrusión de perfiles

/44/PLASTIGAMA – Procedimiento Seguro de Trabajo / Área de Extrusión.

/45/ Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 2059:2010 – TUBOS PERFILADOS DE PVC RÍGIDO DE PARED ESTRUCTURADA E

INTERIOR LISA Y ACCESORIOS PARA ALCANTARILLADO. REQUISITOS.: p 6.

/46/ Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 2059:2010 – TUBOS PERFILADOS DE PVC RÍGIDO DE PARED ESTRUCTURADA E INTERIOR LISA Y ACCESORIOS PARA ALCANTARILLADO. REQUISITOS.: p 3-4.

/47/ Beer, Russell, Eisenberg. Mecánica Vectorial Para Ingenieros – Estática. Editorial Mc Graw Hill – Octava Edición.: p 485

/48/ Perfiles Estructurados PLASTIGAMA

/49/ Perfiles Estructurados PLASTIGAMA

/50/ Perfiles Estructurados PLASTIGAMA

/51/ Perfiles Estructurados PLASTIGAMA

/52/ Programa Autocad 2014

/53/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/54/ Programa Cálculo de rollos (PLASTIGAMA)

/55/ Departamento de Evaluación y Ensayos (PLASTIGAMA)

/56/ Departamento de Evaluación y Ensayos (PLASTIGAMA)

/57/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/58/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/59/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/60/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/61/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/62/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/63/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/64/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/65/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/66/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/67/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/68/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/69/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/70/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/71/ Programa Cálculo de perfiles (PLASTIGAMA)

/72/ Departamento de Proyectos (PLASTIGAMA)

/73/ Departamento de Proyectos (PLASTIGAMA)

BIBLIOGRAFÍA

- Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürger. Introducción a la tecnología de los plásticos (Technologie der Kunststoffe) Editorial Hanser – 1992.
- Edwin J. Purcell, Dale Varberg CÁLCULO con Geometría Analítica. Editorial Prentice Hall, Sexta Edición - 1993
- Juan Saldarriaga V. HIDRÁULICA DE TUBERÍAS. Editorial Mc Graw Hill – 1993.
- Reynod King Watkins, Loren Runar Anderson. STRUCTURAL MECHANICS OF BURIED PIPES. Editorial CRC Press LLC. – 2000.
- Mc Cormac. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO (MÉTODO LRFD). Editorial Alfaomega, Segunda Edición – 2002.
- Andrew Pytel, Ferdinard L. Singer. RESISTENCIA DE MATERIALES. Editorial Alfaomega, Cuarta Edición – 1987.
- Henry Pantigoso Loza. DISEÑO MECANICO CON SOLIDWORKS. Editorial Megabyte, Primera Edición – 2005.
- Jairo Darío Murcia M. PORYECTOS, FORMULACIÓN Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN. Editorial Alfaomega, Primera Edición – 2009.
- Beer, Russell, Eisenberg. Mecánica Vectorial Para Ingenieros – Estática. Editorial Mc Graw Hill – Octava Edición.
- Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 0507 – TUBERÍA PLÁSTICA. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE EXTRUSIÓN POR

INMERSIÓN EN ACETONA DE TUBERÍA DE PVC NO PLASTIFICADO. 1986 – 01.

- Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 0504 – TUBERÍA PLÁSTICA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO 1986 – 01.
- Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 2059:2010 – TUBOS PERFILADOS DE PVC RÍGIDO DE PARED ESTRUCTURADA E INTERIOR LISA Y ACCESORIOS PARA ALCANTARILLADO. REQUISITOS.
- Norma Técnica Ecuatoriana – NTE INEN 2227:1999 – TUBOS DE CLORURO DE POLIVINILO RÍGIDO (PVC) DE PARED ESTRUCTURADA E INTERIOR LISA Y ACCESORIOS PARA CANALIZACIONES TELEFÓNICAS Y ELECTRICAS. REQUISITOS.
- EN ISO 9969:2007 Thermoplastics pipes – Determination of ring stiffness.
- ASTM D2412 – 02 Standard test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading.
- DIN 16961 Part 2 Thermoplastic pipes and fittings profiled outer and smooth inner surfaces – 1997.

ANEXOS

Diferencia entre tablas de rigidez Evaluación y Ensayo vs datos teóricos						
Diámetro Exterior (mm)	Perfil*	Rigidez E&E (kN/m2)	SERIE	Programa (kN/m2)	SERIE	% Diferencia E&E vs Prog
475	2110	1,70	3	1,86	3	9,4%
560	2110	1,08	3	1,12	3	3,7%
	2715	2,68	4	4,15	5	54,9%
640	2110	0,76	2	0,74	2	2,6%
	2715	2,25	4	2,74	4	21,8%
730	2110	0,51	2	0,50	2	2,0%
	2715	1,45	3	1,88	3	29,7%
825	2715	1,20	3	1,25	3	4,2%
	3610	2,50	4	2,68	4	7,2%
1035	2715	0,65	2	0,62	2	4,6%
	3610	1,35	3	1,33	3	1,5%
1245	3610	0,80	2	0,75	2	6,3%
	10004	1,90	3	1,85	3	2,6%

Dato Estadístico
Dato a partir de muestras

*dimensiones de perfil mínimas

Costos de instalación de tuberías PVC y de hormigón armado (H.A)

ITEM		EQUIPOS (USD/m)		MANO DE OBRA (USD/m)		MATERIALES (USD/m)		TRANSPORTE (USD/m)		COSTOS INDIRECTOS (USD/m)	
Perfil	Tubos	PVC	H.A	PVC	H.A	PVC	H.A	PVC	H.A	PVC	H.A
2110	560 mm PVC - 20" H.A	4.22	13.61	1.57	6.18	56.39	50.62	0.71	1.70	12.58	14.42
2110	640 mm PVC - 24" H.A	5.32	14.10	2.00	7.34	61.07	61.41	1.14	2.16	13.90	17.00
2110	730 mm PVC -27" H.A	6.40	15.00	2.35	9.98	68.61	74.65	1.14	3.19	15.70	20.56
2715	825 mm PVC - 30" H.A	7.77	16.51	2.86	11.16	101.73	86.54	1.42	3.94	24.65	23.63
2715	1035 mm PVC - 40" H.A	9.56	19.92	3.25	14.88	158.41	145.66	2.84	6.12	34.81	37.32
3610	1245 mm PVC - 44" H.A	12.13	25.07	4.01	16.83	191.91	185.10	4.26	7.60	42.46	46.92

Diferencia de costos de instalación de tuberías PVC y de hormigón armado (H.A)

ITEM		MATERIALES (USD/m)			INSTALACION (USD/m)			TOTAL (USD/m)		
Perfil	Tubos	PVC	H.A	Diferencia H.A - PVC	PVC	H.A	Diferencia H.A - PVC	PVC	H.A	Diferencia H.A - PVC
2110	560 mm PVC - 20" H.A	56.39	50.62	-5.77	19.07	35.90	16.83	75.47	86.52	11.06
2110	640 mm PVC - 24" H.A	61.07	61.41	0.34	22.36	40.60	18.25	83.43	102.02	18.59
2110	730 mm PVC -27" H.A	68.61	74.65	6.04	25.58	48.73	23.16	94.19	123.39	29.19
2715	825 mm PVC - 30" H.A	101.73	86.54	-15.19	36.70	55.23	18.54	138.43	141.78	3.35
2715	1035 mm PVC - 40" H.A	158.41	145.66	-12.75	50.45	78.23	27.78	208.86	223.90	15.03
3610	1245 mm PVC - 44" H.A	191.91	185.10	-6.81	62.87	96.42	33.56	254.78	281.53	26.75

*Suma costos de Equipos, Mano de Obra, Transporte, Costos Indirectos