



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA DE POLICLORURO DE VINILO

Ronald Azael Fajardo Portillo

Asesorado por el Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera

Guatemala, junio de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE EXTRUSIÓN DE
TUBERÍA DE POLICLORURO DE VINILO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RONALD AZAEL FAJARDO PORTILLO
ASESORADO POR EL ING. CARLOS ENRIQUE CHICOL CABRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Persy Rolando Díaz Ovalle
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA DE POLICLORURO DE VINILO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 06 de octubre de 2006.

Ronald Azael Fajardo Portillo

ACTO QUE DEDICO A:

MIS PADRES

Carmina de Jesús Portillo Ortiz y
Lucas Fajardo Castro

Por el gran amor que siempre me han dado, su entrega y apoyo en todo momento de mi vida, que Dios padre los guarde.

MIS HERMANOS

Verónica Amarilis
Eder Ariel
Sergio Javier

Para que luchen por sus metas, que Dios los bendiga.

MIS ABUELITOS

Tránsito Rodas Ortiz
Alberto Portillo Vargas (Q.E.P.D.)
Tranquilina Castro (Q.E.P.D.)
Lucas Fajardo (Q.E.P.D.)

MIS TÍOS

Con cariño y respeto

MIS PRIMOS

Con cariño especial

MIS AMIGOS

A todos en especial, por compartir buenos momentos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. TUBERÍA PVC	1
1.1 Policloruro de vinilo	1
1.2 Clasificación de la tubería PVC	3
1.2.1 Sistema de dimensionamiento	4
1.2.1.1 Serie inglesa (SI)	4
1.2.1.2 Serie métrica (SM)	4
1.2.2 Presión de trabajo	5
1.2.2.1 Relación de dimensiones (RD)	5
1.2.2.2 Cédulas	6
1.2.2.3 Clases	6
1.2.3 Tipos de unión	7
1.2.3.1 Unión Anger (espiga-campana)	7
1.2.3.2 Unión cementada (espiga-socket)	8
1.2.3.3 Unión bridada	9
1.2.3.4 Unión roscada	9
1.3 Tipos de tubería PVC	10
1.3.1 Tubería PVC hidráulica	10
1.3.2 Tubería PVC sanitaria	12

1.3.3	Tubería PVC conduit	13
1.4	Transporte, manejo y almacenamiento	14
2.	EQUIPO Y PROCESO DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA	19
2.1	Extrusión	19
2.2	Proceso de mezclado	21
2.2.1	Compuesto de PVC	23
2.2.1.1	Resina	24
2.2.1.2	Estabilizador	25
2.2.1.3	Lubricante	25
2.2.1.4	Cargas o rellenos	25
2.2.1.5	Pigmentos	26
2.2.1.6	Absorbedores de rayos ultravioleta	26
2.2.1.7	Auxiliares de proceso	26
2.2.1.8	Modificadores de impacto	26
2.3	Extrusora	27
2.3.1	Tolva de alimentación	27
2.3.2	Dosificador	28
2.3.3	Tornillos de extrusión	28
2.3.4	Unidad de enfriamiento de tornillos	30
2.3.5	Cilindro o barril	30
2.3.6	Bandas de calefacción	31
2.3.7	Unidad de desgace	32
2.3.8	Unidad de enfriamiento del cilindro	32
2.3.8.1	Enfriamiento por aire	32
2.3.8.2	Enfriamiento por aceite	33
2.3.9	Motor principal	33
2.4	Cabezal	33
2.4.1	Adaptador universal	35

2.4.2	Torpedo	35
2.4.3	Araña (<i>spyder</i>)	35
2.4.4	Mandrill	35
2.4.5	Dado o boquilla	36
2.5	Unidad de enfriamiento	36
2.6	Equipo de jalado	37
2.7	Unidad de impresión	38
2.8	Unidad de corte	39
2.9	Estación de formado de juntas	40
2.10	Reciclaje	40
3.	PROBLEMAS Y SOLUCIONES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN	41
3.1	Superficie opaca	42
3.2	Huellas de fluido y manchas en la superficie	43
3.3	Marcas discontinuas en la superficie	44
3.4	Burbujas	44
3.5	Dimensiones desiguales	45
3.6	Contaminación	46
3.7	Porosidad	47
3.8	<i>Plate out</i>	49
3.9	Degradación	49
3.10	Piel de tiburón y abambuamiento	49
3.11	Fractura del fundido	52
4.	INSPECCIONES Y PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD	53
4.1	Inspecciones	53
4.1.1	Inspección de acabado	53
4.1.2	Inspección dimensional	53
4.1.2.1	Diámetro externo	54

4.1.2.2	Espesor	56
4.1.2.3	Excentricidad	57
4.1.2.4	Ovalidad	58
4.1.2.5	Longitud	60
4.1.3	Inspección de marcación	60
4.1.4	Inspección del empacado de la tubería	61
4.2	Pruebas de laboratorio	61
4.2.1	Prueba de regresión térmica o de horno	62
4.2.2	Prueba de impacto	63
4.2.3	Prueba de aplastamiento	68
4.2.4	Prueba de ruptura	71
4.2.4.1	Prueba de ruptura rápida	71
4.2.4.2	Prueba de presión sostenida	74
4.2.5	Prueba de inmersión en cloruro de metileno	76
CONCLUSIONES		79
RECOMENDACIONES		81
BIBLIOGRAFÍA		83
APÉNDICE		85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Tubería y sus partes principales	3
2	Unión tipo Anger	8
3	Unión cementada	8
4	Unión bridada	9
5	Detalle de la unión roscada	10
6	Detalles de la tubería PVC hidráulica	12
7	Detalles de la tubería PVC sanitaria	13
8	Detalles de la tubería PVC conduit	14
9	Transporte de la tubería	15
10	Carga y descarga de la tubería	16
11	Almacenamiento de la tubería	16
12	Formas de estibar la tubería	17
13	Almacenamiento a la intemperie	17
14	Diagrama del proceso de fabricación de tubería PVC	22
15	Mezcladora	23
16	Extrusora de tornillos gemelos	27
17	Tolva y dosificador	28
18	Tipos de tornillos de extrusión	29
19	Tornillos de extrusión	30
20	Barril de la extrusora	31
21	Partes del cabezal de extrusión	34

22	Vista interna del cabezal de extrusión	34
23	Unidad de enfriamiento	37
24	Equipo de jalado (<i>caterpillar</i>)	38
25	Unidad de corte (sierra)	39
26	Muestra de tubería presentando defectos de opacidad y porosidad	43
27	Aparición de burbujas en el interior de tubería PVC	45
28	Contaminación y degradación en una muestra de tubería	46
29	Presencia de humedad en el extruido	48
30	Presencia del defecto denominado piel de tiburón	51
31	Cinta pi-tape	54
32	Forma de utilizar la cinta pi-tape	55
33	Micrómetro de puntas redondeadas	57
34	Uso del vernier para obtener la ovalación en la tubería	58
35	<i>Tester</i> de impacto	65
36	Tipos de pesos o balas	66
37	Espécimen de tubería en la máquina de platos paralelos	70

TABLAS

I	Presiones de trabajo para RD's estándar	5
II	Tipos de cédulas y su presión recomendable de trabajo	6
III	Clases y su respectiva presión de trabajo	7
IV	Especificaciones para tubería SDR o hidráulica	11
V	Especificaciones de la tubería PVC para drenaje (SDR 64)	12
VI	Especificaciones de la tubería PVC para alcantarillado	13
VII	Especificaciones de la tubería PVC conduit	14
VIII	Especificaciones para diámetros exteriores de tubería PVC	59
IX	Resistencia al impacto mínima para tubería PVC	67
X	Presión de ruptura o reventamiento para tubería PVC	73
XI	Presión de prueba para el ensayo de presión sostenida	76

GLOSARIO

Acampanado	Proceso final en la fabricación de tuberías PVC, que consiste en realizar la junta o acople en uno de los extremos de la tubería.
Cemento	Adhesivo en solución que disuelve el material superficial de la tubería y de los accesorios, con el propósito de poder formar la unión entre las superficies de acoplamiento.
Compuesto	Nombre con el cual se conoce la mezcla de resina PVC, con los aditivos necesarios para el proceso de extrusión y la tubería PVC.
Extruido	Se denominan así todos aquellos artículos que son producidos mediante el proceso de extrusión.
Formulación	Composición concreta de la mezcla o compuesto e instrucciones para su elaboración.
Higroscópico	Propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad, según el medio en que se encuentran.

Plastificación	Es la fase sólida inicial, similar a una sustancia gelatinosa, que se desarrolla durante el proceso de transformación de una resina. Término conocido también como gelificación.
Polímero	Sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades que se repiten, llamadas monómeros. El PVC es un polímero sintético que se obtiene por polimerización del cloruro de vinilo.
PVC	Del inglés <i>Poly Vinyl Chloride</i> , siglas con que se designa el policloruro de vinilo.
Resina	Término utilizado en un sentido más amplio para designar a cualquier polímero que constituya un material básico para la elaboración de plásticos.
Termoplásticos	Grupo de polímeros que en presencia de calor en productos terminados, se pueden fundir de nuevo y volver a formar otros productos una y otra vez.

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	Asociación Americana para Pruebas de Materiales
DE	Diámetro externo
DI	Diámetro interno
e	Espesor de pared
ISO	Organización Internacional de Normalización
K	Viscosidad
Kg	Kilogramo
lbf	Libra-fuerza
mm	Milímetro
MPa	Megapascales
m	Metro
NPT	Rosca americana cónica para tubos
psi	Libras por pulgadas cuadradas
Pulg	Pulgada
PVC	Policloruro de vinilo
R	Radio
RD	Relación de dimensión
SDR	Relación de dimensión estándar
SI	Sistema inglés
SM	Sistema métrico
V	Voltios

RESUMEN

El sector industrial de plásticos, hoy en día, invierte gran cantidad de recursos para mantener sus productos a los estándares manejados en los diferentes mercados donde éstos se comercialicen. Las tuberías de policloruro de vinilo, utilizadas en innumerables aplicaciones, son ejemplo de estos productos que deben cumplir con las normas internacionales, lo que garantiza que la tubería prestará el servicio en la forma y en el tiempo para el cual fueron diseñadas.

Durante el proceso de extrusión de tubería PVC, se pueden presentar varios problemas que afectarán la calidad de la tubería en producción, y aunque visualmente parezca que el acabado superficial en la tubería es correcto y la falla en el proceso se corrigió, la única manera de asegurarse es mediante las inspecciones y pruebas realizadas por el departamento de control de calidad.

Por lo tanto, es necesario realizar un estudio sobre los procedimientos a seguir para verificar la alta calidad de producción.

El presente trabajo incluye la descripción de conceptos básicos utilizados en el proceso de extrusión de tubería de policloruro de vinilo, así como el equipo utilizado en el proceso y los tipos de tubería PVC que se obtienen. Además, se incluyen algunos de los problemas más comunes que se presentan durante el proceso y las posibles soluciones, las cuales se verificarán si fueron realizadas de manera correcta, al realizarse las pruebas e inspecciones de aseguramiento de la calidad descritas paso a paso en el último capítulo.

OBJETIVOS

General

Describir la forma como se llevan a cabo las inspecciones y pruebas de control de calidad, para verificar que el proceso y el producto se mantienen bajo las normas establecidas.

Específicos

1. Proporcionar la información necesaria para conocer el proceso de extrusión de la tubería, cómo manufacturarlo y el policloruro de vinilo como material de proceso.
2. Presentar las fallas o defectos de extrusión más comunes, que se presentan durante el proceso y cómo resolverlas.
3. Dar a conocer las propiedades, ventajas y el correcto uso de los diferentes tipos de tubería PVC.
4. Que se obtenga mayor conocimiento de la forma de realizar el transporte, manejo y almacenamiento de la tubería.

INTRODUCCIÓN

El segundo plástico más utilizado en el mundo es conocido comúnmente como PVC, siglas con que se designa al policloruro de vinilo. Es un material termoplástico que frecuentemente es seleccionado por encima de otros materiales, debido a su bajo costo, versatilidad y transformación por diversos procesos de manufactura.

Son varios los productos por los que es reconocido, ejemplo de ello son las tuberías y accesorios utilizados a gran escala en construcción y aplicaciones variadas. Es por ello que el presente trabajo contiene información general concerniente al policloruro de vinilo como material de proceso, la tubería como el producto obtenido mediante el proceso denominado extrusión, y la descripción paso a paso de los diferentes métodos de prueba que deben llevarse a cabo para verificar la calidad de la producción, ante posibles fallas durante el proceso, y con ello asegurar que la tubería cumplirá durante toda su vida útil con las propiedades con las que fue diseñada.

Las propiedades de la tubería PVC son tan amplias y variadas, razón por la que se prefieren ante tuberías de otros materiales. En el primer capítulo se describe la clasificación de éstas de acuerdo a su sistema de dimensión, presión de trabajo y el tipo de unión o junta. En Guatemala, una de las más comercializadas es la tubería SDR que posee dimensiones en pulgadas y una presión de trabajo para distintos diámetros a elegir. Además, se detalla la información necesaria para una correcta selección de tubería, de acuerdo al tipo de uso que se requiera.

La elaboración de tubería PVC se realiza mediante el proceso denominado extrusión, técnica de procesamiento muy conocida industrialmente, que requiere de un control de temperaturas adecuado, ya que el PVC es un material sumamente complejo para ser procesado, que se degrada fácilmente. Equipo y proceso de extrusión de tubería, es la parte de este trabajo que incluye la información para la interpretación del proceso y el equipo necesario para llevarlo a cabo. Se hace énfasis en el compuesto de PVC (resina+aditivos) ya que este es el material base que incorpora las propiedades finales del producto, además de contar en su formulación con aditivos que ayudan al procesamiento del material.

Durante este y como todo proceso de manufactura, la presencia de fallas es indudable y con las normas establecidas para la comercialización y uso de tuberías, es de gran importancia contar con un estricto control de calidad. El penúltimo capítulo describe algunos de los problemas que se presentan durante el proceso, pero sobre todo la causa y la manera en que pueden resolverse. En la mayoría de estos casos debe tenerse en cuenta el control de temperatura en las secciones de la extrusora y del cabezal, con lo cual se disminuirá la mayoría de fallas.

Aunque la tubería presente buen aspecto superficial y sus dimensiones estén correctas, la única forma de cerciorarse de la calidad es mediante pruebas o ensayos realizados a una muestra de tubería, obtenida de la línea de extrusión. Las inspecciones y pruebas para el aseguramiento de la calidad, comprenden el último apartado del presente trabajo; dando a conocer el procedimiento, equipo y la manera de interpretar los resultados obtenidos en los ensayos.

1. TUBERÍA PVC

1.1. Policloruro de vinilo

El policloruro de vinilo, plástico comúnmente llamado PVC, es una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Sus materias primas provienen del petróleo en un 43% y de la sal común, recurso inagotable en un 57%. Es un material termoplástico, es decir, que bajo la acción del calor se reblandece, y puede así moldearse fácilmente; al enfriarse recupera la consistencia inicial y conserva la nueva forma.

Con el nombre genérico de PVC se designa a toda una familia de resinas sintéticas, resinas que físicamente tienen el aspecto de un polvillo blanco y muy fino. No obstante, lo que se conoce como PVC en un artículo terminado no es el polímero puro. Estas resinas deben mezclarse con diversos aditivos para convertirse en lo que se denomina compuesto de PVC, material que de esta forma, incorpora todas las propiedades requeridas para poder ser transformado en productos útiles. La resina de PVC es la más versátil de la familia de los plásticos; ya que a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles. La diferencia entre el PVC rígido y el flexible es que el PVC flexible incorpora en su formulación la resina y un plastificante, que es el producto que lo hace blando.

El PVC se utiliza en aplicaciones muy variadas, la mayoría de ellas con una larga vida. Es un material durable, económico, procesable por todas las técnicas para plásticos y reciclable, con una gama de propiedades y ventajas que lo han mantenido como el material líder en diversas industrias.

Las propiedades de los plásticos de PVC dependen del tipo de aditivos y de su cantidad. El PVC es un plástico formulado y las variaciones en sus propiedades pueden ser importantes.

Las propiedades físicas del PVC dependen principalmente del peso molecular. Cuanto mayor es el peso molecular, mejores son las propiedades físicas del compuesto y de los productos, pero habrá mayores dificultades de procesamiento. Se pueden hacer con ellos productos transparentes y opacos. Sus productos son ligeros, inertes, inoloros y completamente inofensivos.

Dentro de las propiedades químicas tenemos la resistencia a humos y líquidos corrosivos; soluciones ácidas, salinas; solventes y productos químicos. Tiene buena estabilidad dimensional. Es termoplástico y termosellable. Sólo arde en presencia de fuego, si se retira no sostiene la llama.

Las propiedades del PVC varían según los aditivos que se agreguen. El peso molecular tiene influencia directa sobre las propiedades mecánicas. Debidamente formulado posee una alta resistencia al impacto así como buena rigidez.

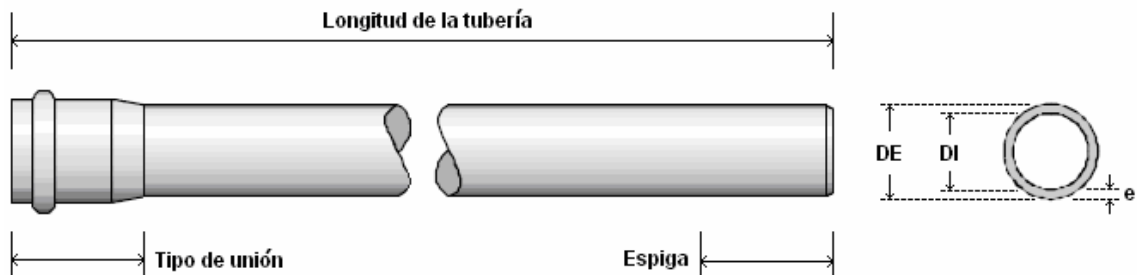
Como se sabe el PVC es el más versátil de los plásticos ya que se adapta a la mayoría de procesos para su transformación así como ser un material económico en cuanto a su relación calidad-precio. Otra gran propiedad tecnológica es ser reciclable, lo que hace que pueda mezclarse parte de este material reciclado con material virgen para ser aprovechado nuevamente en un proceso.

Dentro de las desventajas habría que mencionar que los materiales de PVC tienen el inconveniente de fijar polvo en su superficie. Presenta algunas dificultades para procesarlo debido a su inestabilidad, así como mala resistencia a la deformación, bajo carga estática a temperaturas altas. Envejece lentamente, dicha degradación o envejecimiento se traduce en pérdidas de transparencia, decoloración y fragilidad a la rotura. El envejecimiento o degradación se debe a cambios químicos producidos por el calor y la luz en presencia del oxígeno. Otra de sus propiedades es su larga duración. Está pensado y formulado para durar, es un material que prácticamente no necesita mantenimiento.

1.2. Clasificación de la tubería PVC

Se define tubería como el medio utilizado para transportar fluidos (líquidos y gases) a presiones significativas que causan esfuerzos de trabajo sobre las paredes. La tubería PVC pertenece a la clasificación de tuberías semi-rígidas las cuales poseen cierta capacidad de deformarse, lo cual es útil en su instalación y mantenimiento. Estas tuberías están en gran parte fabricadas de materiales termoplásticos. Las tuberías semi-rígidas son livianas y de un costo relativamente bajo, pueden soportar medios corrosivos y ligeros desplazamientos sin sufrir daños.

Figura 1. Tubería y sus partes principales



La tubería PVC se puede clasificar según el sistema de dimensionamiento, la presión de trabajo y el tipo de unión a utilizar.

1.2.1. Sistema de dimensionamiento

La base de esta clasificación depende del sistema a utilizar, puede ser serie inglesa o serie métrica.

1.2.1.1. Serie inglesa (SI)

Se basa en tuberías cuyas especificaciones originales son de EE.UU. normalmente de la Asociación Americana para Pruebas de Materiales, ASTM (por sus siglas en inglés). Una característica importante es que el diámetro nominal no corresponde al diámetro externo, ni al diámetro interno. Mantiene constante el diámetro externo para los diferentes espesores de pared, por lo que el diseño del tubo se basa en esta característica. Este tipo de tubería PVC es la más comercializada en Guatemala. Se mide en pulgadas.

1.2.1.2. Serie métrica (SM)

Las especificaciones originales para este tipo de tubería proceden de la Organización Internacional de Normas, ISO (por sus siglas en inglés). En este caso el diámetro nominal corresponde al diámetro externo. Al igual que la tubería de serie inglesa mantiene constante el diámetro externo a diferentes espesores de pared. Se mide en milímetros.

Los diámetros de los dos tipos de tuberías no coinciden dimensionalmente por lo que no se pueden hacer uniones directamente, sino mediante el uso de una transición.

1.2.2. Presión de trabajo

Una segunda clasificación muy utilizada depende de la presión recomendable de trabajo y según el sistema de dimensionamiento se pueden clasificar en clases, para la serie métrica, RD's y cédulas para la serie inglesa.

1.2.2.1. Relación de dimensiones (RD)

El RD o SDR (relación de dimensión estándar o normal, por sus siglas en inglés) se define como el cociente de dividir el diámetro externo promedio entre el espesor mínimo de pared. La ASTM en su norma D-2241 reconoce siete tipos de RD (13.5, 17, 21, 26, 32.5, 41 y 64) los cuales, definen una presión de trabajo para distintos diámetros nominales de tubería. Esta unidad de clasificación es utilizada en las tuberías de PVC de la serie inglesa.

Tabla I. Presiones de trabajo para RD's estándar

RD	PRESIÓN DE TRABAJO (a 23° C)		
	(kg/cm ²)	(Psi)	(MPa)
13.5	22.14	315	2.17
17	17.6	250	1.72
21	14.0	200	1.38
26	11.2	160	1.10
32.5	8.8	125	0.86
41	7.0	100	0.69

1.2.2.2. Cédulas

La tubería clasificada por cédulas cumple con las dimensiones de la tubería de hierro galvanizado y es designada por la norma ASTM D-1785. La presión recomendable de trabajo es variable, dependiendo del diámetro, ya que depende de la relación entre el diámetro y el espesor. Las cédulas existentes son: cédula 40, cédula 80 y cédula 120.

Tabla II. Tipos de cédulas y su presión recomendable de trabajo

Diámetro nominal	DE promedio		PRESIÓN DE TRABAJO (PSI)		
	(pulg)	(mm)	CÉDULA 40	CÉDULA 80	CÉDULA 120
½	0.840	21.3	600	850	1010
¾	1.050	26.7	480	690	770
1	1.315	33.4	450	630	720
1 ¼	1.660	42.2	370	520	600
1 ½	1.900	48.3	330	470	540
2	2.375	60.3	280	400	470
3	3.500	88.9	260	370	440
4	4.500	114.3	220	320	430
6	6.625	168.3	180	280	370
8	8.625	219.1	160	250	380

1.2.2.3. Clases

Para la serie métrica la clasificación se hace por clases. La clase corresponde a la presión recomendable de trabajo de la tubería, de este modo una tubería Clase 10 soporta una presión recomendable de 10 kg/cm², una Clase 7 a 7 kg/cm², etc.

El diseño de la tubería también se basa en la relación que existe entre el espesor de pared y el diámetro externo del tubo. Dándole un espesor de pared necesario al tubo respecto a su diámetro dependiendo de la presión que va a soportar.

Tabla III. Clases y su respectiva presión de trabajo

CLASES	PRESIÓN NOMINAL DE TRABAJO A 23 °C		
	(kg/cm ²)	(Psi) aprox.	(MPa) aprox.
4	4	60	0.39
6	6	90	0.59
10	10	150	0.98
16	16	240	1.57

1.2.3. Tipos de unión

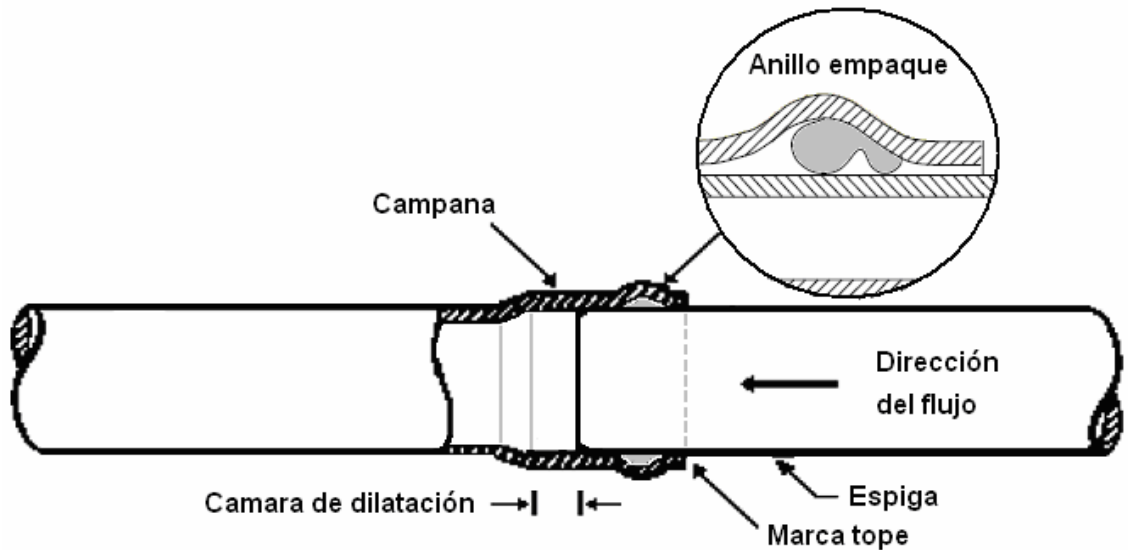
Esta clasificación está basada en los tipos de unión mayormente usados en tubería de PVC.

1.2.3.1. Unión Anger (espiga - campana)

Los tubos por un lado tienen una campana conformada con una cavidad donde se aloja un anillo o empaque de material elastomérico, el cual hace el sello hermético; por el otro lado tiene la espiga.

Este tipo de unión permite un acoplamiento rápido y seguro. Debido a que no necesita pegamento, (solamente un lubricante para acoplar) permite absorber dilataciones y contracciones producidas por cambios de temperatura o movimientos de tierra del entorno de la instalación.

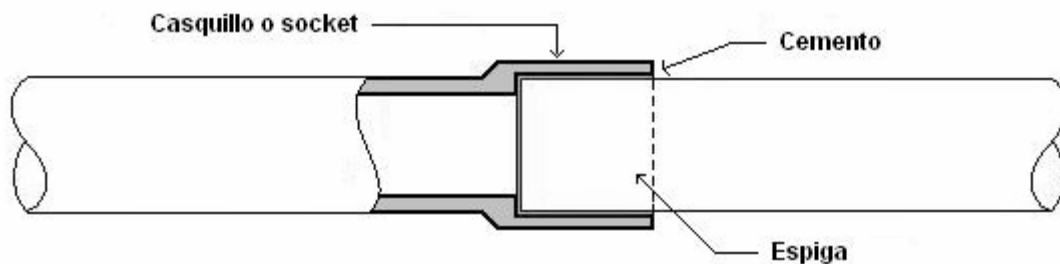
Figura 2. Unión tipo Anger



1.2.3.2. Unión cementada (espiga - socket)

Es una unión monolítica de la tubería con otras tuberías (abocinadas) y/o con conexiones usando una sustancia cementante, cuya reacción química con el PVC provoca que las dos piezas cementadas se puedan soldar entre sí.

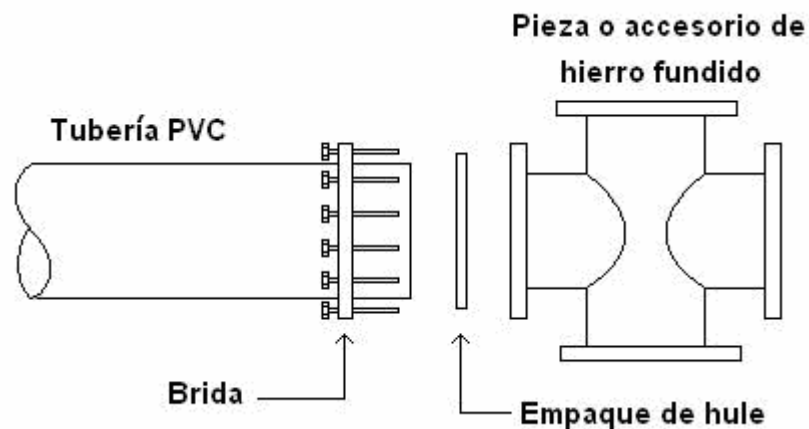
Figura 3. Unión cementada



1.2.3.3. Unión bridada

Es utilizada principalmente para hacer uniones con piezas de hierro fundido, válvulas de compuerta, medidores de flujo y bombas de agua. Consiste de piezas unidas a bridas de PVC con dimensiones estándares.

Figura 4. Unión bridada

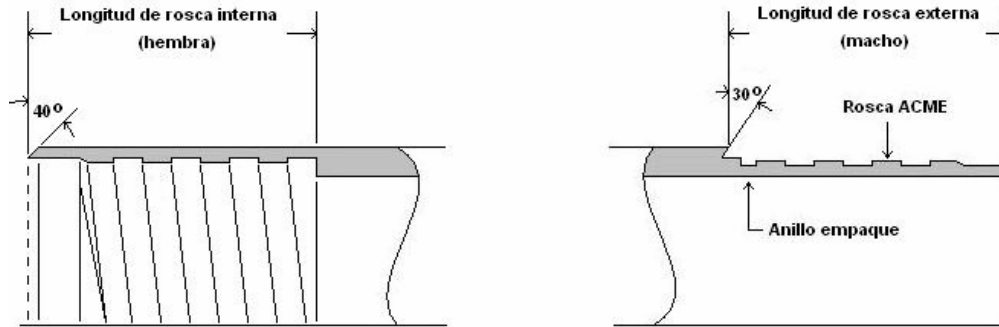


1.2.3.4. Unión roscada

Utilizada para unir PVC con hierro galvanizado, válvulas roscadas, válvulas de aire, liberadoras de presión, etc. Regularmente a la tubería se le cementa o pega, un adaptador macho o hembra roscado, las roscas son del tipo NPT.

Para tubería SDR, cédula 40, 80 y 120, puede ser roscada con "terraja" de igual manera que los tubos de hierro galvanizado, sobre todo los diámetros pequeños.

Figura 5. Detalle de la unión roscada



1.3. Tipos de tubería PVC

Hoy en día se fabrican varios tipos de tuberías PVC, para distintas aplicaciones; las cuales pueden agruparse fácilmente en tres tipos que son, la tubería PVC hidráulica, utilizada en instalaciones con presión. La tubería PVC sanitaria, para instalaciones sin presión; y la tubería PVC conduit, para conducción de cables eléctricos.

1.3.1. Tubería PVC hidráulica

Conocidas como tubería SDR o tuberías de presión, ya que es esta magnitud la que determina su aplicación. Se utilizan en instalaciones de fluidos a presión, especialmente en la conducción de agua potable; los tipos de unión más comunes en este tipo de tubería son, la unión Anger y la unión cementada. Se pueden fabricar en diferentes longitudes, esto depende del acuerdo entre el cliente y el fabricante; pero en Guatemala se fabrican para el mercado en longitudes de 6 mts. De igual forma el color de estas no está sujeto a normas, por lo cual pueden ser fabricadas de acuerdo al cliente, excepto para el mercado que se fabrica en color blanco. Este tipo de tuberías son fabricadas bajo la norma ASTM D-2241.

Tabla IV. Especificaciones para tubería SDR o hidráulica

RD	Presión nominal (psi)	Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior promedio				Espesor de pared mínimo	
			(pulg)	(mm)	Tolerancia		(pulg)	Tolerancia + (pulg)
					+/- (pulg)	+/- (mm)		
13.5	315	½	0.840	21.34	0.004	0.10	0.062	0.020
		¾	1.050	26.67	0.004	0.10	0.078	0.020
		1	1.315	33.40	0.005	0.13	0.097	0.020
		1 ¼	1.660	42.16	0.005	0.13	0.123	0.020
		1 ½	1.900	48.26	0.006	0.15	0.141	0.020
		2	2.375	60.32	0.006	0.15	0.176	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.333	0.040
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.491	0.059
17	250	¾	1.050	26.67	0.004	0.10	0.062	0.020
		1	1.315	33.40	0.005	0.13	0.077	0.020
		1 ¼	1.660	42.16	0.005	0.13	0.098	0.020
		1 ½	1.900	48.26	0.006	0.15	0.112	0.020
		2	2.375	60.32	0.006	0.15	0.140	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.265	0.032
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.390	0.047
		8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.508	0.061
		10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.632	0.076
		12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.750	0.090
21	200	¾	1.050	26.67	0.004	0.10	0.060	0.020
		1	1.315	33.40	0.005	0.13	0.063	0.020
		1 ¼	1.660	42.16	0.005	0.13	0.079	0.020
		1 ½	1.900	48.26	0.006	0.15	0.090	0.020
		2	2.375	60.32	0.006	0.15	0.113	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.214	0.026
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.316	0.038
		8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.410	0.049
		10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.511	0.061
		12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.606	0.073
26	160	1	1.315	33.40	0.005	0.13	0.060	0.020
		1 ¼	1.660	42.16	0.005	0.13	0.064	0.020
		1 ½	1.900	48.26	0.006	0.15	0.073	0.020
		2	2.375	60.32	0.006	0.15	0.091	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.173	0.020
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.255	0.031
		8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.332	0.040
		10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.413	0.050
		12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.490	0.059
32.5	125	1 ¼	1.660	42.16	0.005	0.13	0.060	0.020
		1 ½	1.900	48.26	0.006	0.15	0.060	0.020
		2	2.375	60.32	0.006	0.15	0.073	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.138	0.020
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.204	0.024
		8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.265	0.032
		10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.331	0.040
		12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.392	0.047
41	100	3	3.500	88.90	0.008	0.20	0.085	0.020
		4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.110	0.020
		6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.162	0.020
		8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.210	0.025
		10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.262	0.031
		12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.311	0.037

Figura 6. Detalles de la tubería PVC hidráulica



1.3.2. Tubería PVC sanitaria

Este tipo de tubería tiene su mayor aplicación en drenajes y redes de alcantarillado, así como en aplicaciones donde no exista presión alguna. La tubería para drenaje es de pared delgada equivalente a tubería SDR 64 (norma ASTM D-2241) mientras que la tubería para alcantarillado es designada por la norma ASTM D-3034. Ambas tuberías se fabrican comúnmente en diámetros pequeños (hasta 8 pulg.) ya que para diámetros mayores el costo es muy alto. Tanto la longitud como el color de estas, no está sujeto a normas por lo que pueden fabricarse de acuerdo al cliente, lo común para el mercado es encontrarlas en longitudes de 6 mts, en colores anaranjado y gris.

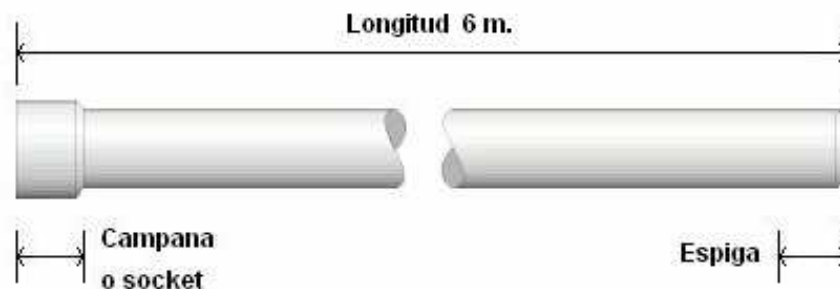
Tabla V. Especificaciones de la tubería PVC para drenaje (SDR 64)

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior promedio				Espesor de pared mínimo	
	(pulg)	(mm)	Tolerancia		(pulg)	Tolerancia +/- (pulg)
			+/- (pulg)	+/- (mm)		
4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.070	0.020
5	5.563	141.30	0.010	0.25	0.087	0.020
6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.104	0.020
8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.135	0.020
10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.168	0.020
12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.199	0.024

Tabla VI. Especificaciones de la tubería PVC para alcantarillado

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior promedio		Espesor de pared mínimo			
	(pulg)	Tolerancia +/- (pulg)	RD 41	RD 35	RD 26	RD 23.5
4	4.215	0.009		0.120	0.162	0.178
6	6.275	0.011	0.153	0.180	0.241	0.265
8	8.400	0.012	0.205	0.240	0.323	
9	9.440	0.014	0.230			
10	10.500	0.015	0.256	0.300	0.404	
12	12.500	0.018	0.305	0.360	0.481	
15	15.300	0.023	0.375	0.437	0.588	

Figura 7. Detalles de la tubería PVC sanitaria



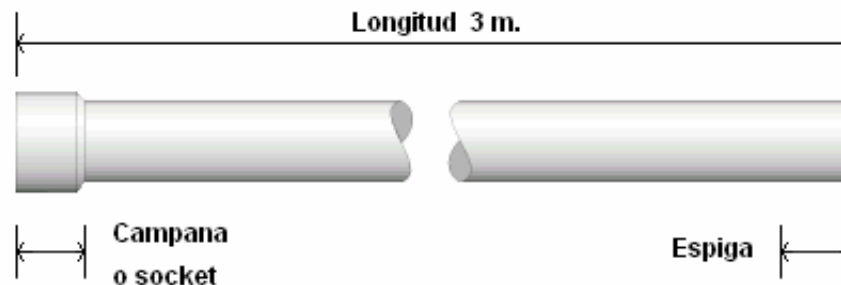
1.3.3. Tubería PVC conduit

Denominada también como tubería PVC ducto eléctrico, su aplicación es la protección de conductores eléctricos. Por el tipo de instalación se han dividido en uso normal para construcción media; en uso pesado, para edificios, industria, centros comerciales y lugares de alta contaminación. También se encuentran las de uso subterráneo, para zonas industriales, cableado telefónico, alumbrado público etc. Para el mercado se fabrican en longitudes de 3 mts, en color gris y su tipo de unión cementada garantiza la hermeticidad a polvos y líquidos a lo largo de la trayectoria.

Tabla VII. Especificaciones de la tubería PVC conduit

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior (pulg)			Espesor de pared (pulg)	
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Máximo
1/2	0.721	0.725	0.729	0.044	0.048
3/4	0.921	0.925	0.929	0.048	0.055
1	1.168	1.175	1.182	0.054	0.062
1 1/4	1.491	1.498	1.505	0.059	0.069

Figura 8. Detalles de la tubería PVC conduit

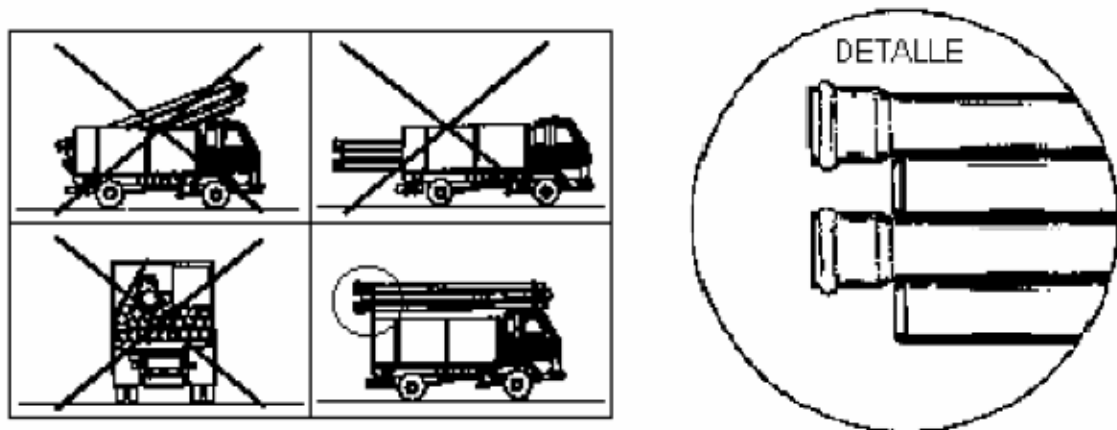


1.4. Transporte, manejo y almacenamiento

El transporte debe realizarse procurando que no se dañen los materiales. Los tubos deben colocarse en superficies planas. En el transporte la altura de la estiba no debe exceder de 2.5 mts, (ver figura 9). Al transportar los tubos, debe evitarse en lo posible, la carga mixta; pero si es inevitable, está debe acomodarse de manera que no lastime a los tubos. Con el objeto de economizar se pueden introducir unos dentro de otros, siempre y cuando los diámetros lo permitan.

Cuando el transporte se haga a grandes distancias y sobre todo en tiempo de calor, la carga debe protegerse y dejar un espacio entre la cubierta y los tubos que permita la circulación de aire para evitar deformaciones que pueden ocasionar el peso de los tubos y la temperatura a la que están sometidos.

Figura 9. Transporte de la tubería



Durante la carga y descarga de los tubos, estos no deben arrojarse al suelo, someterlos a peso excesivo o golpearlos. Se recomienda que por lo menos dos hombres se encarguen de esta operación.

Para evitar daño a los tubos, nunca se deben arrastrar, golpearlos contra el suelo o con herramientas. Se recomienda no desatarlos para su manejo (aquellos tubos que vengan atados). A temperaturas inferiores a 0° C la resistencia de los tubos a los golpes se reduce, por lo que hay que tener mayor cuidado en el manejo, (ver figura 10).

El lugar de almacenamiento debe situarse lo más cercano posible al sitio de la obra. Los tubos deben de colocarse en una superficie plana, nivelada y libre de piedras, apoyando la primera línea de tubos sobre postes, los cuales deben tener una separación no mayor a 1.5 mts, (ver figura 11).

Figura 10. Carga y descarga de la tubería

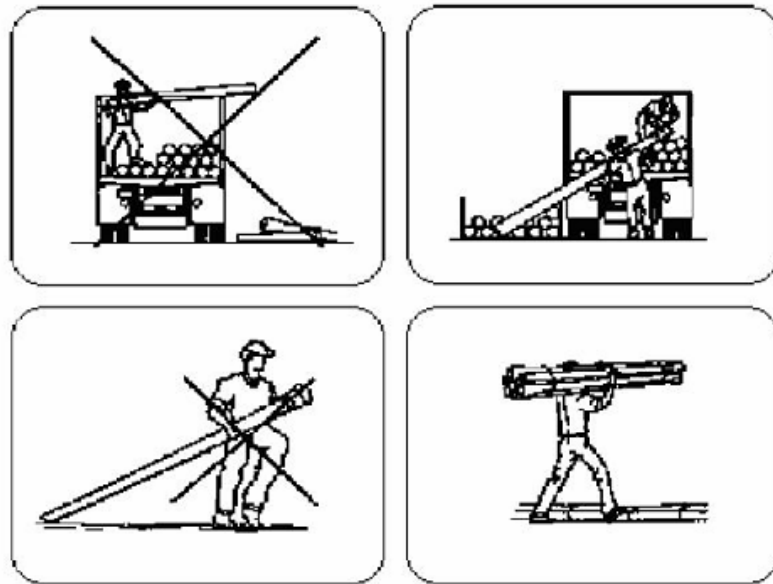
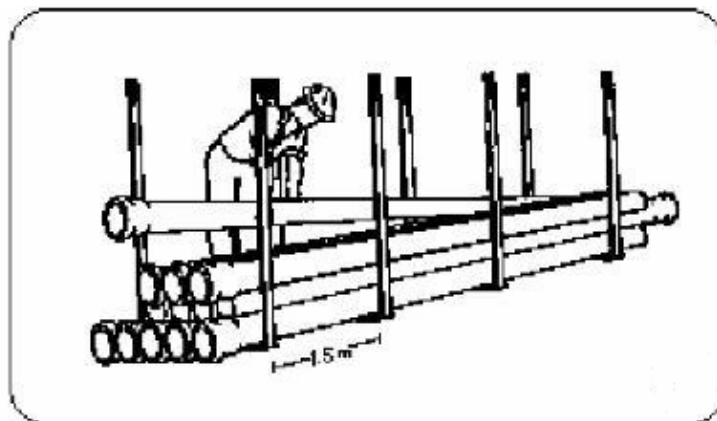
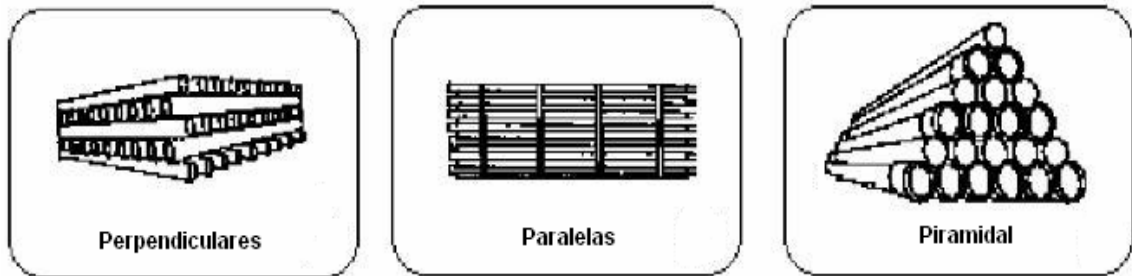


Figura 11. Almacenamiento de la tubería



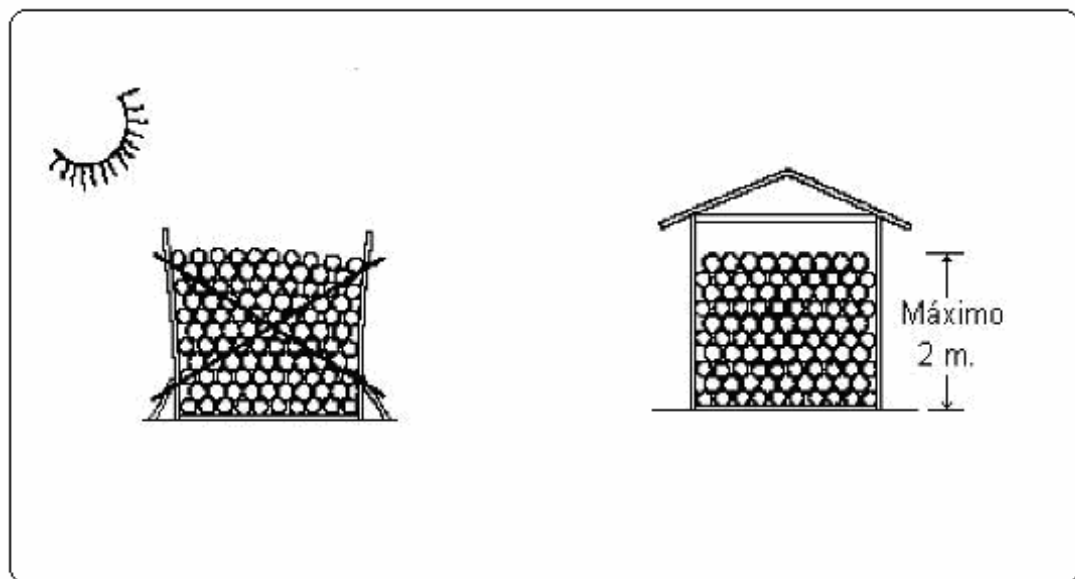
La figura 12 muestra las formas de estibar la tubería en campo. La estiba que más se recomienda es la de camas perpendiculares, sobre todo si se cuenta con suficiente espacio. La estiba de camas paralelas, es la más adecuada cuando se dispone de poco espacio; y la estiba piramidal, es práctica únicamente cuando se carece de espacio suficiente y se tienen pocos tubos.

Figura 12. Formas de estibar la tubería



Si los tubos van a ser expuestos al sol por más de 30 días, estos deben almacenarse bajo techo. No se deben cubrir con lonas o nylon, pues esto provoca un aumento de la temperatura que puede causar deformaciones, por lo que se recomienda un techado que permita una buena ventilación a los tubos.

Figura 13. Almacenamiento a la intemperie



2. EQUIPO Y PROCESO DE EXTRUSIÓN DE TUBERÍA

2.1. Extrusión

Técnica de procesamiento bajo la cual, la resina de PVC, generalmente en estado sólido (polvo, granos), es alimentada a través de una tolva y posteriormente transportada a lo largo de un tornillo donde lentamente resulta compactada, fundida, mezclada y homogeneizada para finalmente ser dosificada a través de una boquilla conformadora responsable de proporcionarle, de manera continua, el perfil y/o la forma deseada en el producto final.

El proceso inicia cuando la resina almacenada es sometida a inspección por parte del departamento de aseguramiento de calidad. Obtenida su aprobación, las materias primas son transportadas a la operación de mezclado en donde los ingredientes son combinados en una proporción de peso exacta y así formar un compuesto homogéneo. A esta operación se le conoce como "*dry-blend*" (mezclado en seco). Al término de este intenso mezclado a elevadas temperaturas por un determinado tiempo, la preparación de un lote de compuesto de PVC está terminado.

El compuesto es transportado para el inicio de la operación de extrusión; este es colocado en el interior de una tolva para alimentar al extrusor, al caer de la tolva, el compuesto de PVC en forma de polvo pasa por una garganta hacia el barril de extrusión dentro del cual, el compuesto es recibido por tornillos giratorios.

El material es entonces transportado por una acción de bombeo a través de los espacios entre el tornillo y el barril por todo el extrusor, conforme el material avanza a una temperatura y presión perfectamente controlada, este se convierte de un polvo seco en una masa viscosa de plástico. Para la obtención de un producto final con las características requeridas el proceso debe ser cuidadosamente monitoreado y controlado en forma precisa.

Cuando el proceso de plastificado es concluido y los elementos volátiles han sido eliminados del plástico fundido, el material es preparado para su formación final. La masa visco-elástica de plástico es empujada dentro de un dado de formado bajo una alta presión 140 - 350 kg/cm² (2,000 - 5,000 PSI), entonces el plástico caliente es moldeado en un perfil de forma cilíndrica. Al salir de este dado el material esta extremadamente caliente, aproximadamente a 200 °C (400 °F), flexible y deformable. En este punto el plástico caliente es formado con precisión en un producto final con las dimensiones requeridas y después enfriado para solidificarlo.

El control dimensional del diámetro exterior se logra al forzar el paso del plástico caliente a través de una camisa dimensionadora al mismo tiempo que es jalado fuera del extrusor por un equipo conocido como puller o caterpillar. El espesor de pared es controlado por la correcta sincronización entre el jalador y la velocidad de extrusión. Hasta que es obtenida la forma definitiva, el tubo de PVC extruido es jalado fuera del extrusor dentro de los tanques de enfriamiento en donde es enfriado por agua templada.

Concluida esta operación, pasa al marcado, corte a su longitud exacta y formado del chaflán o bisel. En este punto el tubo terminado es transferido a la operación de acampanado.

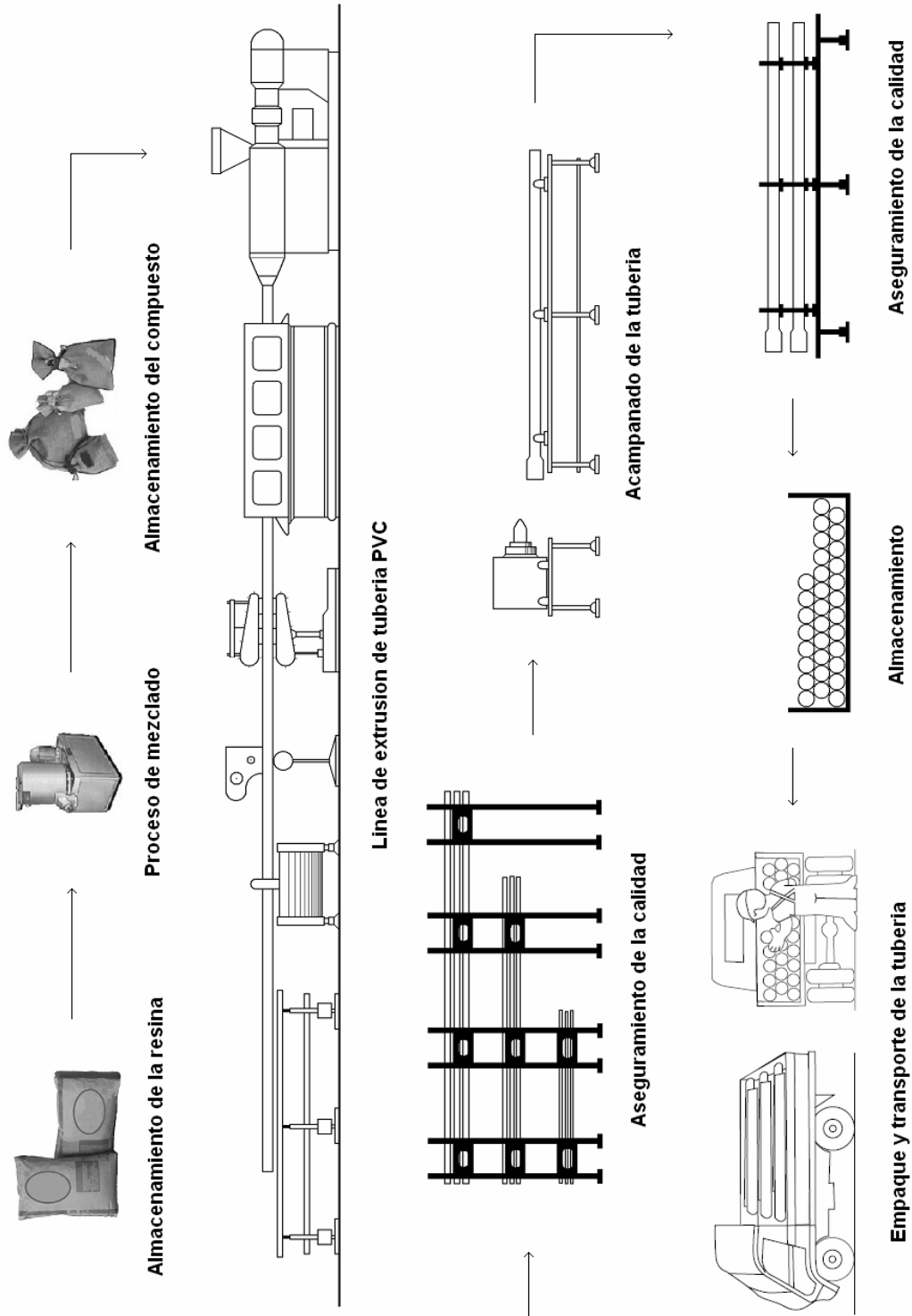
Previo al acampanado de la tubería, suele realizarse periódicamente una inspección de control de calidad, con lo cual se determina que el proceso y el producto se mantienen bajo las normas establecidas y que el lote de tubería en producción no presenta falla alguna. Realizada la acción de acampanado, la tubería es sometida a una última inspección, con lo cual el proceso de extrusión de tubería PVC esta completo, solamente queda por ser almacenada o empacada para su comercialización y uso. (Ver figura 14).

2.2. Proceso de mezclado

La preparación del compuesto de PVC se realiza mediante el proceso denominado mezclado en seco o “*dry-blend*”. Consiste en combinar en proporciones exactas los ingredientes o aditivos con la resina de PVC y obtener mediante una mezcladora (figura 15), el material homogéneo ha ser utilizado en extrusión. La formulación del compuesto es dada por los fabricantes de acuerdo al tipo de tubería que se vaya a producir. De igual manera la ASTM en su norma D-1784 establece las especificaciones estándar para el compuesto de PVC.

El proceso de mezclado consiste en introducir una parte de resina en un recipiente que recibe el nombre de *hot mixer*, poco a poco se van incorporando los aditivos los cuales son mezclados con un rotor de paletas alojado en el interior del recipiente. La rotación incrementa la temperatura del compuesto en formación (aproximadamente a 100 °C). Luego este es recibido en un segundo recipiente encargado de disminuir la temperatura del compuesto (*cold mixer*). Este también cuenta con un rotor de paletas las cuales giran a diferencia de las del *hot mixer*, a una velocidad baja. Con la disminución de temperatura (de 25 a 30 °C aproximadamente) el compuesto es almacenado en sacos o silos, donde reposa 24 horas para lo cual esta listo a ser utilizado en el proceso.

Figura 14. Diagrama del proceso de fabricación de tubería PVC



2.2.1. Compuesto de PVC

Denominación que se le da a la mezcla de resina PVC con diversos aditivos que se incluyen para resolver problemas de procesamiento o para lograr las propiedades deseadas en los productos finales. En general, los compuestos de PVC contienen 90% de resina. Esta mezcla demuestra que hay una búsqueda de equilibrio constante entre las condiciones del procesamiento y las propiedades físicas de los productos.

Los compuestos de PVC se presentan en varias formas como son: gránulos redondos, cilíndricos o cúbicos; mezcla de polvos seca, compactos y remolidos.

Figura 15. Mezcladora



2.2.1.1. Resina

El término “resina” se utiliza para designar a cualquier polímero que constituya un material básico para la elaboración de plásticos. Es un material orgánico sólido o semisólido, de masa molecular elevada, que se caracteriza porque muestra tendencia a fluir cuando se ve sometido a un esfuerzo, porque usualmente posee un intervalo de fusión o ablandamiento.

Existe en el mercado una gran variedad de resinas cuyas propiedades van cambiando conforme a su peso molecular, o como comúnmente se le llama, su viscosidad inherente. Este cambio en propiedades sigue una línea de conducta establecida, de tal forma que podemos enunciar en forma general que conforme el peso molecular va subiendo; las propiedades mecánicas de tensión, elongación, compresión, etc. van mejorando; la resistencia química a los solventes y ácidos va aumentando; la estabilidad térmica es mayor; el punto de fusión es superior; la procesabilidad se hace más difícil y la resistencia al envejecimiento es menor.

Una forma sencilla de identificar la resina es mediante su valor K, que es una forma práctica de presentar su viscosidad inherente. Comercialmente la resina apropiada para el proceso de extrusión de tubería PVC tiene un valor K de 60-75; conforme aumenta la viscosidad aumenta el valor K. Esta es una valoración muy común en el medio, por lo tanto, tenemos que para la formulación de un compuesto para un producto determinado, es necesario escoger las resinas conforme a los requerimientos en propiedades físicas finales, flexibilidad, procesabilidad y aplicación.

Las resinas de PVC se producen por cuatro métodos los cuales determinan su nombre, estas son: resina de masa, suspensión, emulsión y solución.

2.2.1.2. Estabilizador

Único aditivo indispensable en la formulación de un compuesto de PVC. Es importante mencionar que es el único ingrediente con el cual el PVC reacciona durante la fabricación del compuesto y su procesado; que seguirá en cierta forma reaccionando durante la vida útil del producto, retardando la degradación que el calor y la luz producen en el producto.

2.2.1.3. Lubricante

La lubricación está muy unida a la estabilización, sobre todo en el procesado de PVC rígido, donde la degradación durante la transformación es crítica. Existe lubricación interna y lubricación externa. Los lubricantes internos contribuyen a bajar las viscosidades de la fusión y a reducir la fricción entre las moléculas. Los lubricantes externos funcionan esencialmente emigrando hacia la superficie, donde reducen la fricción del plástico fundido.

2.2.1.4. Cargas o rellenos

Las cargas o rellenos, conocidos también como plastificantes dilatadores se usan con objeto de reducir costos, impartir opacidad y modificar ciertas propiedades finales, como la resistencia a la abrasión, al rasgado, etc. Los materiales empleados son generalmente productos inertes, inorgánicos y minerales.

2.2.1.5. Pigmentos

Los pigmentos se usan principalmente como objeto decorativo. Se utilizan pigmentos metálicos de aluminio, cobre, oro y bronce y otros metálicos combinados.

2.2.1.6. Absorbedores de rayos ultravioleta

La luz en la región de los rayos ultravioleta tiene una fracción donde hay suficiente energía de activación como para romper las ligaduras del PVC. Es debido a esta fracción con energía de activación que todo material, sin excepción, envejece, se amarillea y se degrada. Por ello se emplea en algunas formulaciones de PVC agentes absorbentes de rayos ultravioleta, a fin de retardar el amarillamiento, ya que evitarlo permanentemente no es posible.

2.2.1.7. Auxiliares de proceso

Estos materiales se usan principalmente en la formulación de compuestos rígidos. Como su nombre lo indica, ayudan al proceso en forma similar a un lubricante interno. En general son acrílicos que hacen el proceso más suave, dando un mejor acabado, una fusión más rápida y temprana, pero aumentando la viscosidad de la fusión.

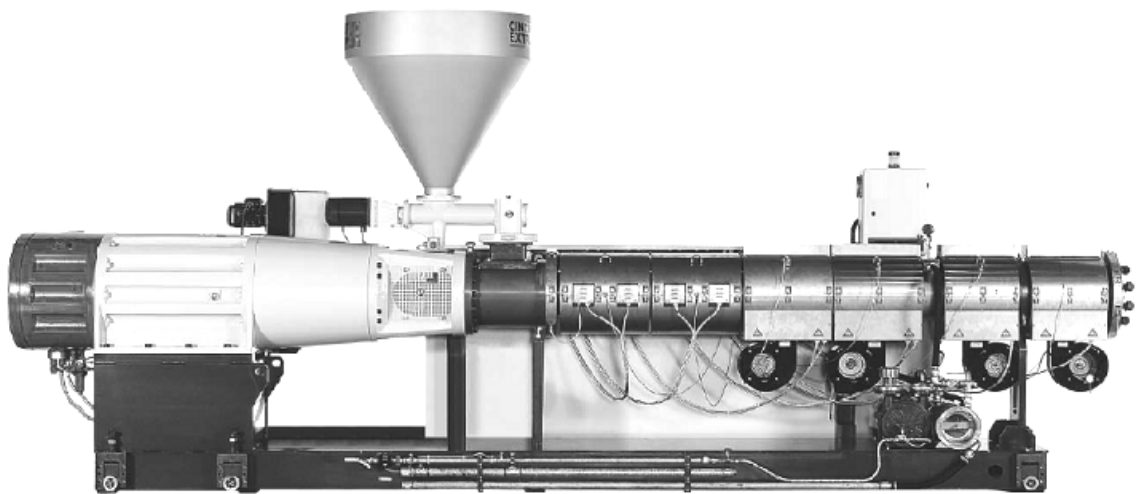
2.2.1.8. Modificadores de impacto

Los modificadores de impacto son polímeros elastoméricos generalmente de injerto o mezclas poliméricas que se dispersan en el PVC. Estos polímeros se deforman al recibir un impacto y disipan en esa forma la energía.

2.3 Extrusora

En términos generales es un equipo de transformación, responsable del transporte, compactación, fusión, mezclado, homogeneización, plastificación y el conformado de las resinas plásticas en él procesadas. Se pueden dividir en dos tipos siendo la extrusora de tornillo simple o monohusillo (actualmente en desuso para la producción de tubería PVC) y la extrusora de doble tornillo o de tornillos gemelos, la cual presenta una mejora en la mezcla y en el transporte del polímero.

Figura 16. Extrusora de tornillos gemelos



2.3.1. Tolva de alimentación

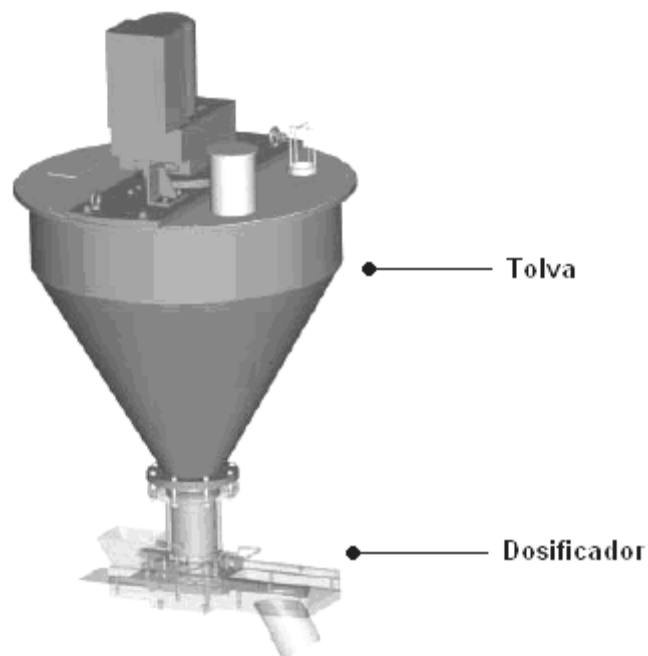
Es el reservorio encargado de la alimentación de la resina a la extrusora. Generalmente, el volumen de la tolva debe ser proporcional a la capacidad de producción de la extrusora garantizando en todo momento una alimentación constante.

Como regla práctica el diámetro de salida de la tolva suele tener un ancho equivalente al diámetro del tornillo de la extrusora y un largo de 1.5 a 2 veces el diámetro.

2.3.2. Dosificador

Unidad de la línea de extrusión que se encarga de alimentar el compuesto a los tornillos de extrusión y barril.

Figura 17. Tolva y dosificador



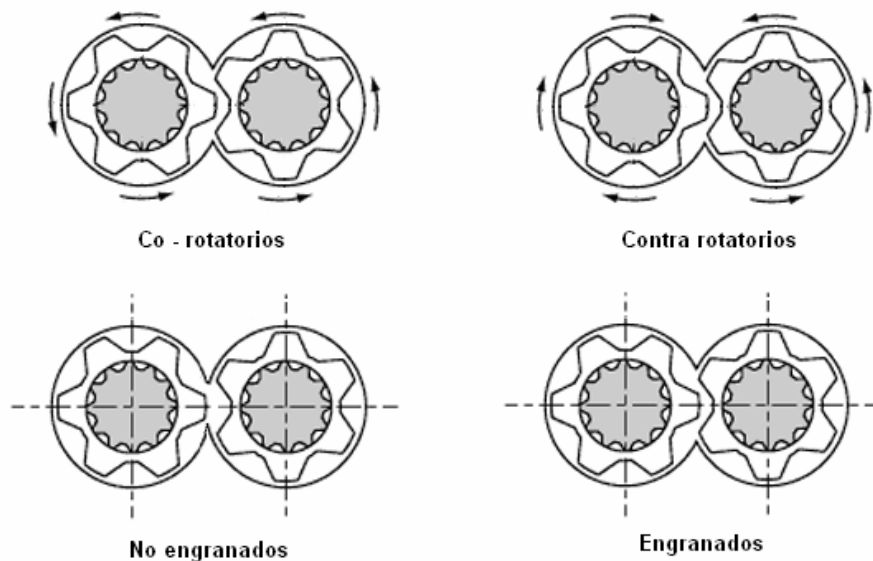
2.3.3. Tornillos de extrusión

El tornillo de extrusión algunas veces denominado husillo, es el elemento principal de la extrusora, elemento por el cual estas se dividen y se diferencian.

Existen dos tipos de extrusoras, dentro de las cuales tenemos las extrusoras monohusillo (tornillo simple) y extrusoras de tornillos gemelos (doble tornillo). En ambos tipos de extrusoras este gira dentro de un barril o cilindro y es capaz de bombear (empujar) el material a una velocidad específica, bajo ciertas condiciones de operación. La extrusora de tornillo simple posee deficiencias para someter a extrusión polímeros sensibles al calor como el policloruro de vinilo, razón por la cual la mayoría de extruido de PVC como perfiles y tubería, dependen exclusivamente de extrusoras de tornillos gemelos.

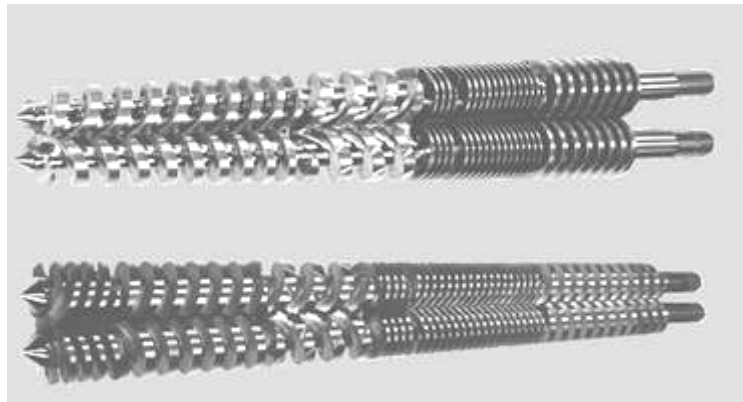
Los extrusores de tornillos gemelos se dividen en corrotatorios (misma dirección) y contrarrotatorios (dirección opuesta). La siguiente división se determina tomando en cuenta si los dos tornillos se entretrejen uno con otro; se describen como engranados o no engranados. Los tipos no engranados consisten principalmente en dos tornillos simples colocados uno al lado del otro y trabajan de manera similar a las máquinas de tornillo simple; no son verdaderos tornillos gemelos y se describen mejor como tornillos dobles.

Figura 18. Tipos de tornillos de extrusión



Dentro de los tipos engranados, hay una ulterior división en husillos conjugados donde las hélices de un husillo ajustan flojamente en los canales del otro y los no conjugados, donde las hélices de un husillo ajustan perfectamente en los canales del otro y dejan un mínimo de claro.

Figura 19. Tornillos de extrusión



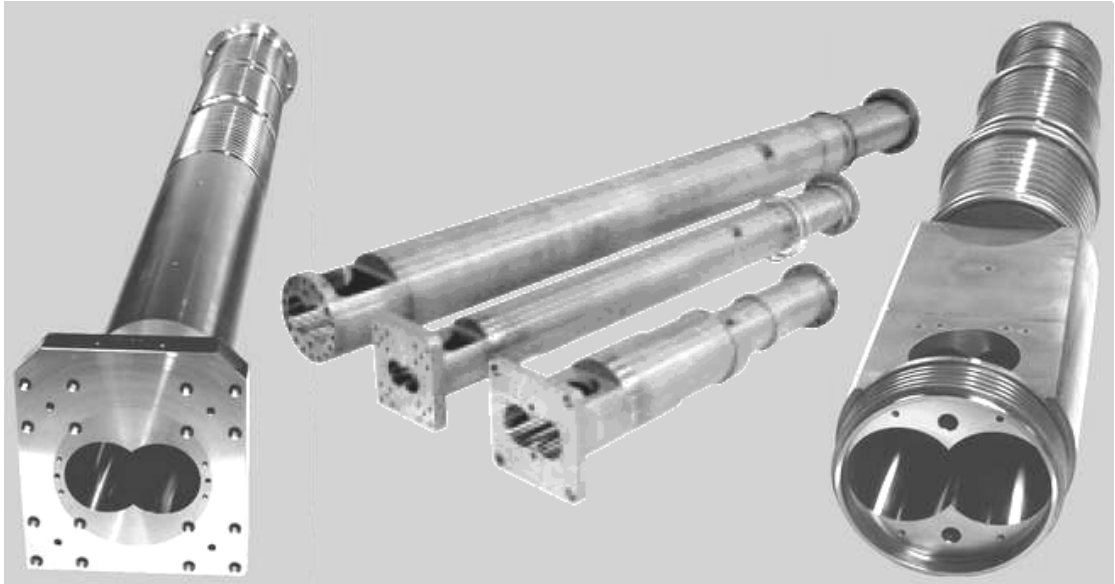
2.3.4. Unidad de enfriamiento de tornillos

Encargada de mantener la temperatura de los husillos a una temperatura ideal y se realiza por medio de una bomba y aceite térmico, el cual circula en el interior de estos.

2.3.5. Cilindro o barril

El barril o exterior de la extrusora es un cilindro metálico que conforma, junto con el tornillo de extrusión, la cámara de fusión y bombeo de la extrusora. En pocas palabras es la carcasa que envuelve al tornillo.

Figura 20. Barril de la extrusora



En el diseño de todo cilindro de extrusión se busca máxima durabilidad, alta transferencia de calor y un mínimo cambio dimensional con la temperatura. Para materiales tales como el PVC, que se descompone fácilmente al contacto con el acero caliente, algunos fabricantes recomiendan aleaciones de alto contenido en níquel, tanto para el cilindro así como para el husillo.

2.3.6. Bandas de calefacción

El calentamiento del cilindro se produce, casi exclusivamente, mediante resistencias eléctricas. El sistema de calentamiento de la extrusora es responsable de suministrar entre un 20-30% del calor necesario para fundir la resina y el restante proviene del esfuerzo de corte o fricción en el husillo y el cilindro.

La longitud de la extrusora se divide en varias secciones para favorecer la variación de la temperatura y obtener un proceso óptimo. Todo el sistema se controla por medio de termostato para tener un control preciso de la temperatura del material fundido. La temperatura de extrusión sólo puede ser controlada de manera precisa mediante la acción combinada de las bandas de calentamiento eléctrico y los ventiladores de cada zona.

2.3.7. Unidad de desgace

Esta unidad tiene como función succionar la humedad o gases al PVC antes de ingresar a la zona final del barril.

2.3.8. Unidad de enfriamiento del cilindro

Es la encargada de mantener las zonas de calefacción del barril en la temperatura ideal y puede ser por medio de aceite o ventiladores.

2.3.8.1. Enfriamiento por aire

Aunque pueda lucir contradictorio, cada zona de calentamiento del tornillo de la extrusora está acompañada, en la mayor parte de los equipos comerciales, de un ventilador el cual permite el control de la temperatura eliminando calor de la extrusora mediante el flujo de aire sobre la superficie requerida. Los ventiladores son accionados por controladores de temperatura que comandan la operación de las bandas eléctricas. Los ventiladores entran en operación cuando la temperatura de una zona supera el punto prefijado.

2.3.8.2. Enfriamiento por aceite

El cilindro o barril en su interior posee un vaciado o camisa, el cual incluye un serpentín de bronce, por el cual circula el aceite a bajas temperaturas, con lo que se logra el enfriamiento en el barril, cuando este es necesario.

2.3.9. Motor principal

El motor de la extrusora es el componente del equipo responsable de suministrar la energía necesaria para producir: la alimentación de la resina, parte de su fusión (70 a 80%), su transporte y el bombeo a través del cabezal y la boquilla.

Los motores incorporados en las líneas de extrusión son eléctricos y operan con voltajes de 220 y 440 V. Las extrusoras modernas emplean motores de corriente continua, ya que permiten un amplio rango de velocidades de giro, bajo nivel de ruido y un preciso control de la velocidad. La velocidad alcanzada por los motores resulta más elevada que la requerida por el tornillo por lo que se incorporan cajas reductoras de velocidad.

2.4. Cabezal

El componente de la línea denominado cabezal, es el responsable de conformar o proporcionar la forma del extruido. De forma detallada, los principales componentes de un cabezal para la extrusión se describen a continuación.

Figura 21. Partes del cabezal de extrusión

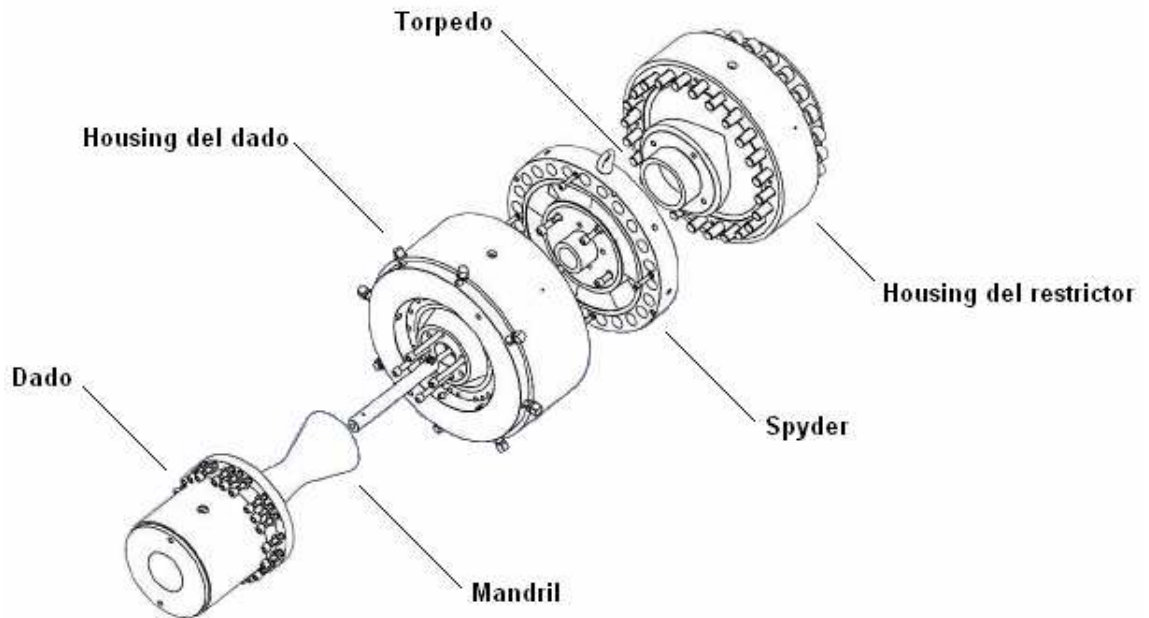
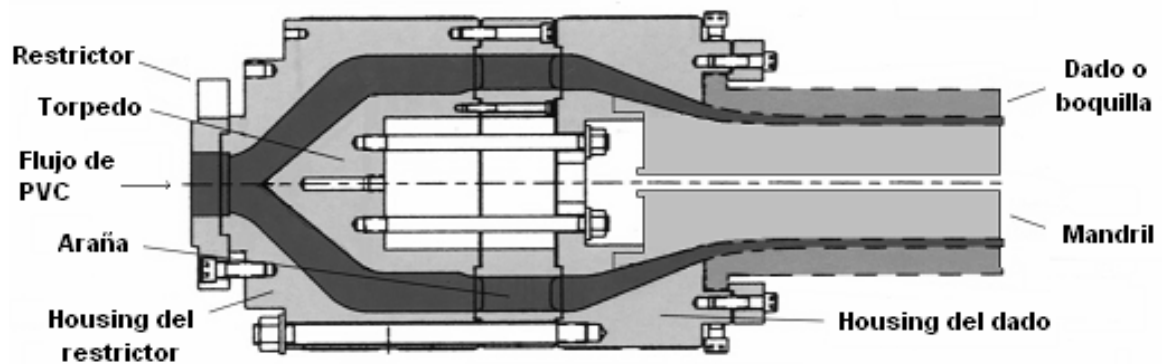


Figura 22. Vista interna del cabezal de extrusión



2.4.1. Adaptador universal

Unidad de la extrusora que sirve para unir el barril o cilindro con el cabezal por medio de pernos desmontables.

2.4.2. Torpedo

El cabezal de extrusión suele presentar en el ducto de acople entre la extrusora y el cabezal, un elemento que contribuye con la función de modificar el patrón de flujo en espiral a uno longitudinal; por su geometría, a este dispositivo se le suele denominar torpedo.

2.4.3. Araña (*spyder*)

El torpedo se mantiene en posición por medio de un elemento conocido como araña o *spyder*. Las patas de la araña tienen por lo general una sección transversal aerodinámica para facilitar el flujo de PVC. Comúnmente una de las patas de la araña tiene un agujero a través del cual se puede inyectar aire; esto permite inflar el tubo justo a la salida del dado, cuando el plástico está todavía fundido.

2.4.4. Mandril

Elemento del cabezal cuya función es dar el diámetro interno de la tubería. Este se mantiene en posición fija al cabezal y para lograr que el mandril y el dado sean concéntricos, se cuenta con unos tornillos especiales para centrar la posición del dado.

2.4.5. Dado o boquilla

La boquilla de extrusión es el componente del cabezal encargado de la conformación final del extruido.

Se debe velar por que el polímero fluya, con volumen y velocidad de flujo uniforme, alrededor de toda la circunferencia de la boquilla, de manera de lograr espesores uniformes. Los diseños actuales de boquillas presentan dos secciones claramente definidas, la primera de estas secciones es conocida como cámara de relajación; mientras que la segunda puede ser llamada cámara de salida.

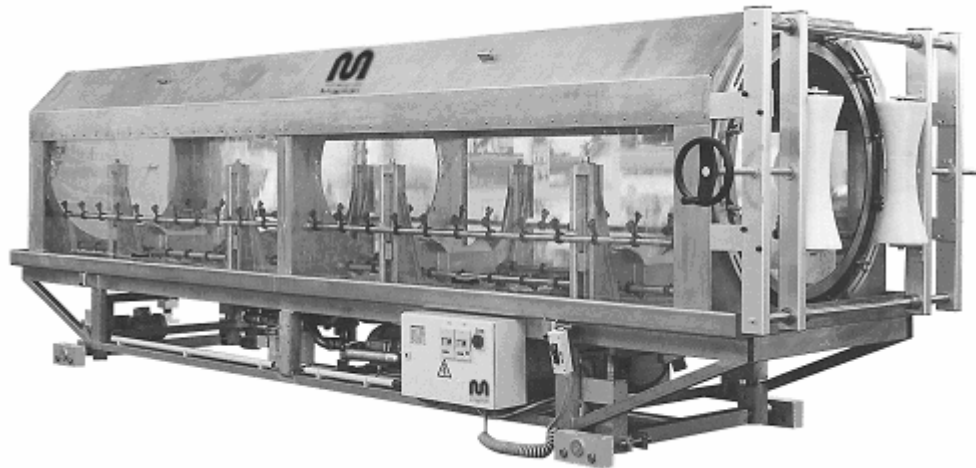
La cámara de relajación de la boquilla tiene como propósito producir la desaceleración del material e incrementar el tiempo de residencia en la boquilla. La cámara de descarga produce el formado del perfil deseado con las dimensiones requeridas. Los parámetros básicos para la especificación de una boquilla son el diámetro y la abertura de la salida.

2.5. Unidad de enfriamiento

El tanque de agua se utiliza para enfriar y solidificar la tubería. Consiste en una cámara en cuyo interior se disponen en toda su longitud una serie de boquillas encargadas de disminuir la temperatura por medio de aspersion de agua con lo cual finalmente se logra solidificar el extruido.

En algunas líneas de extrusión, sobre todo en aquellas donde se produzcan tuberías de diámetro grande, es común encontrar dos unidades de enfriamiento.

Figura 23. Unidad de enfriamiento



2.6. Equipo de jalado

Existe una gran diferencia en las propiedades de los materiales a las temperaturas de expulsión comparadas con las que tienen a temperaturas de ambiente, diferencia que se refleja en el cuidado con que debe procederse al manejar el material a su salida del molde, ya que todavía está caliente.

El equipo de jalado, es por lo general un caterpillar con dos bandas (arriba y abajo) que ejerce una pequeña presión sobre la tubería.

Cuando se trata de tuberías de diámetro grande, un caterpillar con dos bandas puede causar distorsiones en la tubería y no proporcionar un jalado uniforme, entonces se puede utilizar un equipo con cuatro bandas, arriba, abajo y en ambos lados.

Dicho equipo o caterpillar consiste en una larga mesa con cintas transportables de velocidad variable que recibe el material expulsado. El movimiento relativo entre la cinta de velocidad variable y el ritmo de expulsión requiere una coordinación ajustada, de forma que ejerza una ligera tensión en el material expulsado.

Figura 24. Equipo de jalado (caterpillar)



2.7. Unidad de impresión

Existen varias formas de realizar la marcación de la tubería, una de ellas es por método manual, utilizando un sello; así también una pantalla parecida a la utilizada en serigrafía.

La otra forma, utilizada hoy en día en la industria es por medio de rodillos los cuales contienen en su borde los datos de marcaje, los cuales giran sobre la superficie de la tubería conforme esta avanza en la línea de extrusión. La unidad de impresión más avanzada es aquella controlada electrónicamente, las cuales son diseñadas exclusivamente para tubería y se conocen como impresoras jet. Estas unidades realizan la marcación parecida a un spray y son de alta precisión.

2.8. Unidad de corte

Unidad utilizada en el equipo lineal de extrusión de tubería encargada de cortar en diferentes longitudes las tuberías.

Figura 25. Unidad de corte (sierra)



2.9. Estación de formado de juntas

Última unidad en la línea de extrusión de tubería que se encarga de fabricar la boquilla o unión de las tuberías ya sean para utilizar cemento de contacto o anillos de hule en juntas flexibles.

2.10. Reciclaje

Técnica utilizada para recuperar fragmentos de material procedente de rebaba y otros restos que se recogen durante el proceso de extrusión. El PVC como material termoplástico puede aprovecharse nuevamente en el proceso de moldeo mezclándose con material virgen. Como es natural, todo material sucio o descolorido debe separarse, a menos que se mezcle con un material oscuro. El material limpio tendrá que ser cernido para que sus gránulos sean del mismo tamaño que los del material virgen, produciéndose una mejora en el procesamiento, hasta el punto que muchos moldeadores introducen determinado porcentaje de material aprovechable en sus elaboraciones.

La unidad para llevar a cabo el reciclaje se denomina granuladora o molino, en la cual el material recuperado se coloca en una tolva cuyas cuchillas rotativas lo convierten en granza; a este tipo de reciclaje se le conoce como reciclaje mecánico.

Un punto importante es que el área de extrusión de tubería debe estar separada de la de reciclaje a causa de lo ruidoso de la operación.

3. PROBLEMAS Y SOLUCIONES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

El arte de procesar PVC consiste en usar temperaturas suficientemente altas para llevar el compuesto a un estado de fusión y así optimizar las propiedades físicas. Temperaturas insuficientes llevan al compuesto a un estado de gelación y aunque el producto terminado puede tener buen aspecto, no tendría las propiedades físicas óptimas que se requieren.

Para procesar a temperatura suficientemente alta sin causar degradación, es muy importante disponer de equipos adecuadamente diseñados y de un sistema de lubricación bien equilibrado. En relación a esto último, hay controversia en cuanto al orden de adición de los lubricantes al estar preparando el compuesto. Algunos obtienen resultados satisfactorios agregándolos al principio y otros insisten en que es mejor al final.

Si los lubricantes se incorporan a temperaturas muy altas, el equipo no será bien lubricado. Si se añaden al principio a temperatura baja, se corre el riesgo de dejar parte de los lubricantes en las paredes de los equipos de mezclado.

Es muy importante mantener un adecuado control de la temperatura y de la velocidad de corte (velocidad de rotación del tornillo) para lograr que el plástico fundido salga siempre del extrusor con la misma consistencia. Por otro lado, entre mayor sea la viscosidad mayor será el consumo de energía.

Los plásticos de PVC pueden molerse y volverse a procesar, pero se debe de tener cuidado de enfriar rápidamente el material al sacarlo de los molinos. Si el PVC se muele empleando los métodos comunes, el material remolido puede tener mal color porque el plástico se calienta y retiene el calor. Como es un polímero con sensibilidad térmica, se acelera así la degradación.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es el de los finos. Es mejor eliminarlos con un cedazo porque se funden más rápidamente en el cilindro y originan irregularidades en la superficie de los productos debido a que se degradan.

En la extrusión de tubería PVC se precisa un proceso mas largo para que refleje cambios de temperatura a velocidades operativas, durante dicho intervalo puede echarse a perder una gran cantidad de material.

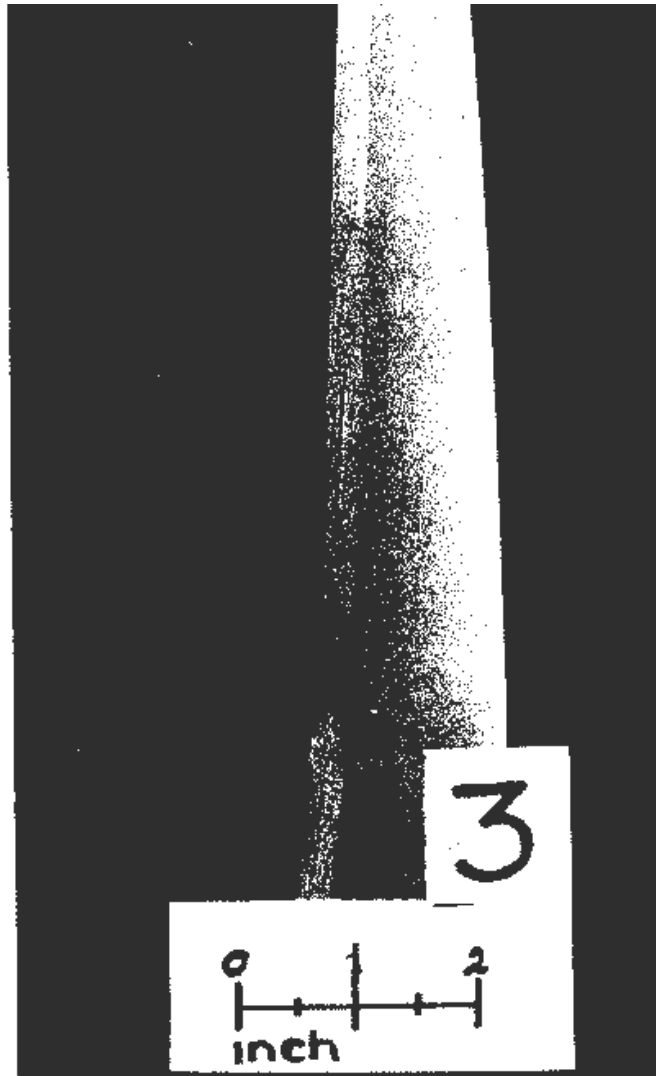
A continuación se trata de algunos defectos significativos que pueden presentarse en el moldeo de extrusión de tubería PVC.

3.1. Superficie opaca

El principal motivo en este caso, es una temperatura de expulsión demasiado baja. Si se desarrolla considerable arrastre en la boquilla antes de que el material salga al exterior, la acción cortante que sigue puede causar una superficie defectuosa. Este defecto suele producirse, igualmente, si el cabezal está a una temperatura demasiado baja.

La situación puede ser remediada rápidamente si se mantienen controles de temperatura en el cabezal separados de los del cilindro, en torno al tornillo alimentador.

Figura 26. Muestra de tubería presentando defectos de opacidad y porosidad



Fuente: *Annual book of ASTM standards 2001, section eight, Pág. 1054.*

3.2. Huellas de fluido y manchas en la superficie

Si las manchas aparecen alargadas y paralelas una a otras, como por ejemplo, una serie de canales, su origen esta en la boquilla, que quizás esté rayada, en cuyo caso nada en el proceso podrá eliminar este defecto.

Pero si las marcas son desiguales, pueden obedecer a la existencia de humedad o impurezas en el material de moldeo. La humedad contribuye también a la formación de burbujas y debe eliminarse por medio de secado previo.

3.3. Marcas discontinuas en la superficie

Si existe una mala homogenización del fluido y se desarrolla insuficiente presión posterior entre el final del tornillo y la boquilla de extrusión (condición que alivia el torpedo), aparecerán marcas de desigualdades cuya frecuencia dependerá del tiro del tornillo y la velocidad expulsora.

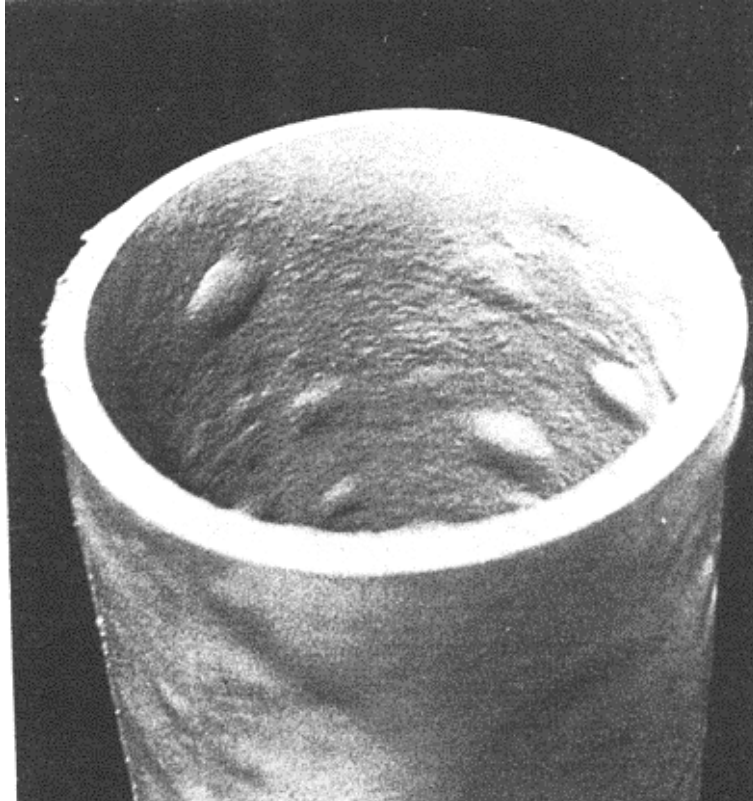
Un tornillo debidamente diseñado que ejerza mayor presión cuando el material se acerca a la boquilla, seguido por una mezcla de líneas de fluido, no dejara marcas discontinuas.

También aliviará la situación una alimentación uniforme de la tolva, y que no se produzcan interrupciones mientras el material circula hacia la entrada de la boquilla.

3.4. Burbujas

Generalmente, las burbujas pueden ser de origen gaseoso, debidas a insuficiente presión posterior del dado y excesiva temperatura de expulsión, seguida por una caída brusca de presión. También pueden obedecer a contracción volumétrica en las piezas gruesas moldeadas.

Figura 27. Aparición de burbujas en el interior de tubería PVC



Fuente: *Annual book of ASTM standards 2001, section eight, Pág. 1056.*

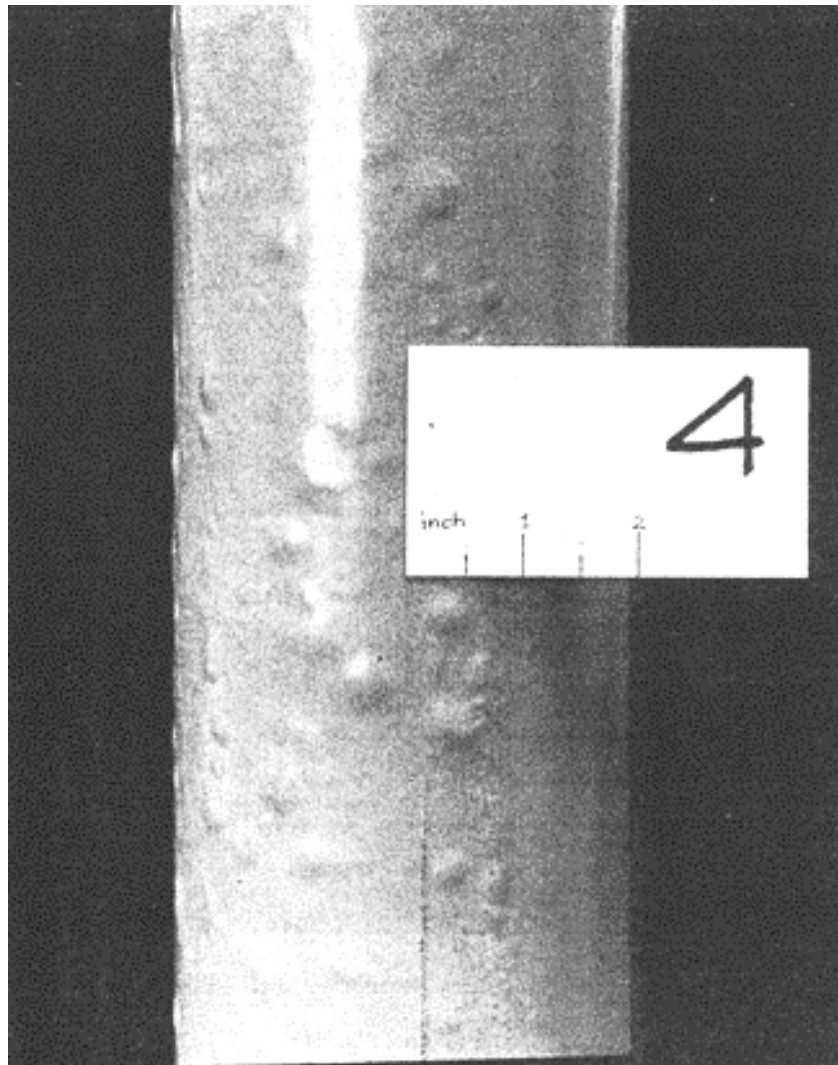
3.5. Dimensiones desiguales

El primer ajuste que debe examinarse es la velocidad del jalador o caterpillar. En general, se pueden aumentar o disminuir las dimensiones exteriores, de acuerdo con la velocidad del caterpillar. Con esta modificación se altera simultáneamente toda la sección moldeada. No es posible incrementar algunas dimensiones y disminuir otras a menos de rectificarse el dado. En el caso de la tubería, muchas boquillas para tubos tienen un dispositivo ajustador que permite una mejor concentricidad de diámetros internos y externos.

3.6. Contaminación

Si el material es retenido en el cilindro, en el tornillo, o alojado en una postura en la cual no pueda ser empujado por el material que sigue, pueden aparecer marcas indicadoras de descomposición de parte del mismo.

Figura 28. Contaminación y degradación en una muestra de tubería



Fuente: *Annual book of ASTM standards 2001, section eight, Pág. 1055.*

Esta es una condición particularmente grave cuando se trata de material transparente, que a veces puede observarse un paso del fluido en espiral debido a la acción del tornillo.

La eliminación de material contaminado requiere una cuidadosa limpieza del tornillo, del cilindro y una comprobación general de los elementos de la maquina los cuales no han sido dañados de tal forma que den lugar a la acumulación de plásticos.

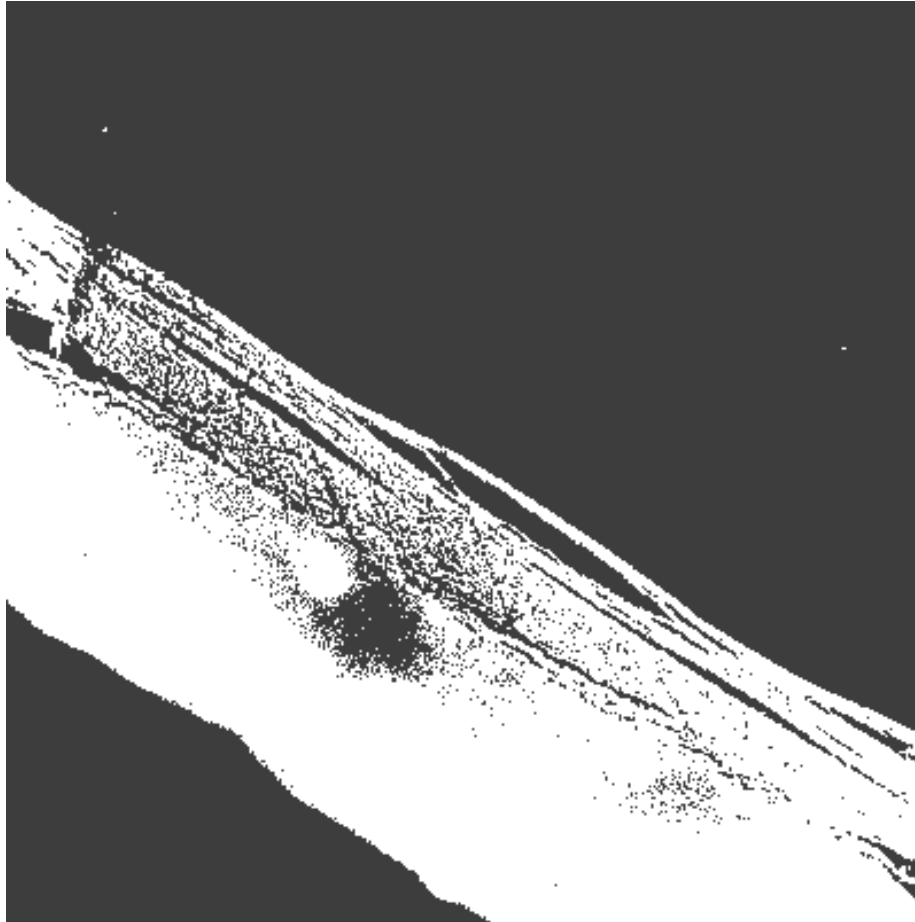
3.7. Porosidad

Algunos plásticos absorben pequeñas cantidades de agua y se dice que son higroscópicos. En un extrusor esta pequeña cantidad de agua se transformará en vapor; por lo tanto, los extruidos así obtenidos estarán llenos de pequeñas burbujas. Es importante que en estos casos el material plástico esté completamente seco antes de la extrusión.

Además, en algunas ocasiones se obtienen extruidos que muestran porosidad debido a gases atrapados. Esto surge ya sea por aire atrapado en el plástico fundido por vaporización de aditivos o por productos gaseosos generados por la degradación o descomposición del material plástico.

Por lo cual, la porosidad se puede evitar utilizando husillos con zona de descompresión.

Figura 29. Presencia de humedad en el extruido



Fuente: *Annual book of ASTM standards 2001, section eight, Pág. 1053.*

El patrón de fusión del material plástico dentro de un barril, ocurre de la siguiente manera; cuando el plástico está casi totalmente fundido aun quedan algunos gránulos de plástico envueltos en la masa ya fundida, el aire atrapado entre los gránulos de plástico sin fundir solo pueden escapar hacia la parte de atrás del canal (hacia la tolva). Si la velocidad de extrusión hacia delante es mayor que la velocidad de flujo de aire hacia atrás, entonces el aire será llevado hacia delante y el extruido resultará con porosidad. Por lo tanto, la porosidad puede reducirse al disminuir la velocidad de extrusión.

3.8. Plate Out

Cuando se extruyen plásticos, diversos aditivos quedan depositados en la parte delantera del husillo o en el interior del cabezal y dado; este fenómeno se conoce como *plate-out* y ocurre frecuentemente con el compuesto de PVC. Esta depositación se da con mayor frecuencia en regiones de alta temperatura y alta velocidad de corte, aunque la formulación también tiene una influencia importante. Así, tres formas para reducir o evitar el *plate-out* serian:

- Disminuir la temperatura en el dado y cabezal
- Disminuir la velocidad de extrusión
- Modificar la formulación

3.9. Degradación

Todos los plásticos tienden a degradarse cuando están sujetos a altas temperaturas, aunque algunos son más resistentes que otros. Entre los plásticos más importantes comercialmente, el PVC es probablemente el más susceptible a la degradación. La temperatura a la cual se empieza a degradar es muy cercana a su propia temperatura de procesamiento. Así, cuando se trabaja con PVC es muy importante mantener un exacto control de la temperatura.

3.10. Piel de tiburón y abambuamiento

Este es un defecto de la superficie, asociado con las condiciones a la salida del dado. Este consiste en una serie de fisuras muy pequeñas (grietas), perpendiculares a la dirección de extrusión.

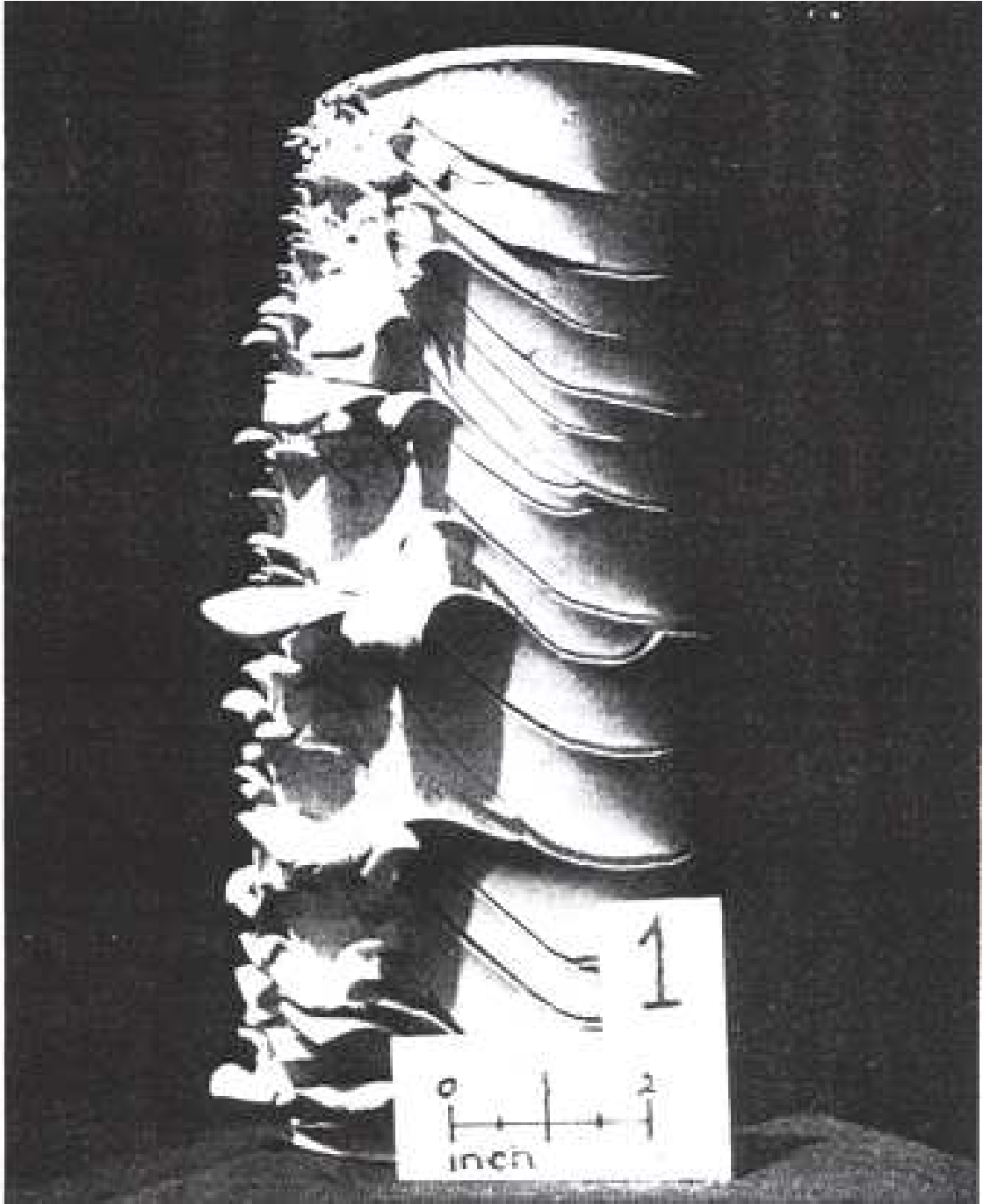
Se manifiesta inicialmente como una apariencia de acabado mate, y se agrava a medida que aumenta la velocidad de flujo.

Este defecto se debe a los esfuerzos de tracción, se genera cuando el material fundido, conforme avanza a lo largo del canal del dado, tiene un perfil de velocidad, con una velocidad máxima en el centro y una velocidad cero en la pared. Conforme abandona los bordes del dado, el material de la pared tiene que acelerarse hasta la velocidad a la cual el producto sale del dado. Esto genera esfuerzos a la tracción y, si el esfuerzo excede la resistencia a la tracción, la superficie se rompe, generando el defecto visual.

Si se favorecen las condiciones que causan la piel de tiburón, es decir, si se vuelve excesiva la presión en el extrusor o disminuye la temperatura del dado, el efecto provoca una apariencia de grano grueso, por lo común se conoce como cáscara de naranja. Poco a poco, la restitución de los esfuerzos de tracción se agrava y el material sometido a extrusión en su totalidad de pronto se retrae. El resultado es el "abambuamiento", llamado así porque la pieza sometida a extrusión se asemeja en apariencia al bambú.

El calentamiento extra del dado ayuda con frecuencia a remediar estos defectos, al relajar térmicamente los esfuerzos y disminuir la viscosidad. Una idea errónea pero común es que la piel de tiburón es una especie de fractura de fundido suave, y es cierto que la formación de la piel de tiburón, al incrementarse la velocidad del extrusor, puede estar seguida por el rompimiento completo de la pieza sometida a extrusión que caracteriza a la fractura del fundido si aumenta la velocidad. Sin embargo, los dos fenómenos tienen diferentes orígenes, de tal manera que la acción que se tome para prevenir uno de ellos puede contrarrestar el otro.

Figura 30. Presencia del defecto denominado piel de tiburón



Fuente: *Annual book of ASTM standards 2001, section eight, Pág. 1052.*

3.11. Fractura del fundido

Si los esfuerzos de tracción son grandes, de manera que sobrepasaran la resistencia a la tracción del material fundido, las líneas de corriente dentro del dado no solo se vuelven caóticas sino también discontinuas. La suavidad del flujo laminar deseable se pierde completamente, como resultado el producto de extrusión que sale del dado será de forma irregular.

Este fenómeno se conoce como fractura del fundido o turbulencia elástica. Esta es otra manifestación del efecto elástico, asociado a la extrusión de polímeros como el PVC. Mientras que a bajas velocidades de corte (baja velocidad de flujo) se pueden obtener extruidos con superficie tersa, por encima de una velocidad de corte crítica el extruido empieza a aparecer con distorsiones de forma helicoidal. La forma de distorsión varía, sin embargo, se reconoce que la causa primaria de la distorsión del extruido es la elasticidad del compuesto.

Se ha encontrado con respecto a las condiciones de operación, la severidad de la distorsión aumenta al aumentar la velocidad de corte, y disminuye al aumentar la temperatura, al aumentar la longitud paralela del dado y disminuir el ángulo de entrada del dado.

4. INSPECCIONES Y PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD

4.1. Inspecciones

Durante el proceso de extrusión de tubería PVC las inspecciones se realizan rutinariamente y tienen como fin velar por los aspectos superficiales y dimensionales de las tuberías que se estén produciendo, valiéndose para ello del ensayo visual y utilizando aparatos de medición de baja complejidad.

4.1.1. Inspección de acabado

Tiene como objetivo asegurar que las tuberías de PVC son totalmente homogéneas, por lo tanto, estará libre de burbujas, fracturas, incrustaciones o de otros defectos, inclusive de color, densidad y las demás características físicas uniformes.

4.1.2. Inspección dimensional

La medición de las dimensiones en forma regular y sistemática es fundamental, las dimensiones comúnmente requeridas son:

- Diámetro externo de la tubería
- Espesor de pared
- Ovalidad
- Dimensiones de la junta o unión
- Longitud

- Excentricidad

4.1.2.1. Diámetro externo

Para medir el diámetro externo de las tuberías PVC es aconsejable hacerlo cuando estén totalmente frías, para lo cual es necesario contar con una cinta pi-tape con escala en milésimas de pulgada, la cual se rodea al contorno de la muestra apretándola y coincidiendo los puntos de pulgada a lo que corresponde la medida de la muestra.

Esta medida se compara con la establecida por la norma ASTM D-2241 en la tabla de dimensiones, la cual permite un diámetro mínimo y un diámetro máximo para cada tipo de tubería (véase Tabla IV).

Figura 31. Cinta pi-tape



Figura 32. Forma de utilizar la cinta pi-tape



Para medir el diámetro interno de las tuberías PVC es necesario poseer un calibrador para medidas interiores, el cual en lugar de cerrar, abre y proporciona la medida interna.

El diámetro interno no es de mucho control por parte de los laboratorios, pues en el control de diámetros solo con medir diámetro externo y espesores de pared se considera aceptable, debido a que en el manual de la ASTM no aparece alguna norma que se refiera a este diámetro como de mayor importancia.

4.1.2.2. Espesor

Es el grosor de pared de un tubo, el cual es medido por medio de un aparato denominado micrómetro, el cual posee una escala dividida en milésimas de pulgada y dos puntas de contacto las cuales deben ser de forma redonda para adaptarse a las superficies interna y externa de las paredes de las tuberías (véase figura 33).

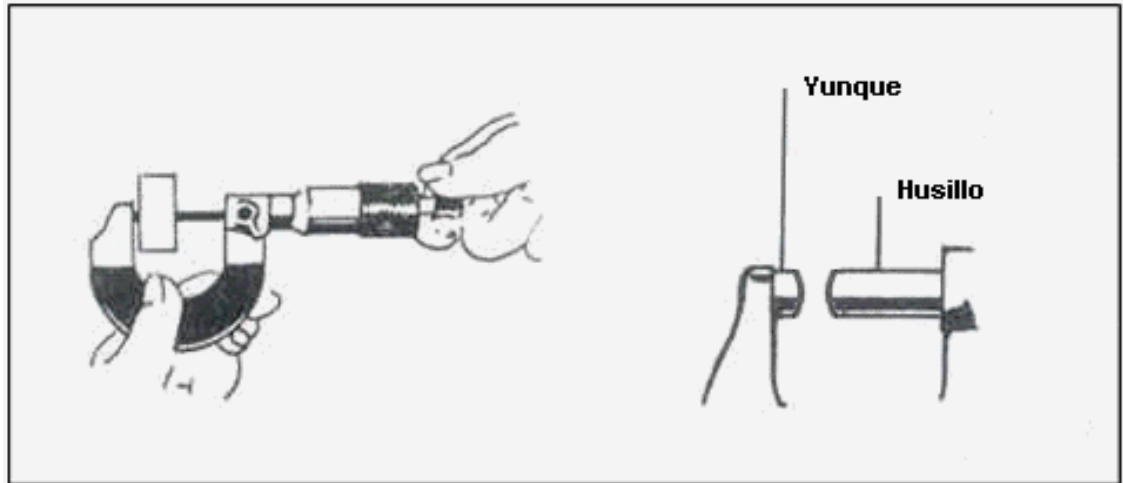
Cada tipo de tubería dependiendo de su diámetro y RD tienen diferentes espesores, los cuales en su mayoría son proporcionados por las normas americanas ASTM con la designación D-2241.

Para medir el espesor de las tuberías se cortan muestras de tubo de unas 6 pulg. de largo y se marcan en un lado con marcador permanente, dividiendo la circunferencia de la muestra en ocho, seis o según los tornillos de centrado del cabezal, de tal manera que las marcas en la muestra queden como las horas del reloj, tomando como punto de referencia las 12 horas.

Después de haber marcado los puntos de centrado se procede a calibrar uno a uno con el micrómetro, escribiendo al lado de cada punto su espesor.

Luego de haber medido los 6 u 8 puntos de centrado de la muestra se suman todos y se dividen entre el número de ellos para calcular el promedio de espesor de la muestra, el cual se compara con los espesores dados por la norma para tal RD y así saber si está dentro del mínimo y el máximo espesor para ser aprobado o está fuera de lo permitido por la norma para que sea corregido (véase Tabla IV).

Figura 33. Micrómetro de puntas redondeadas



4.1.2.3. Excentricidad

La excentricidad en las tuberías es la distancia entre su centro geométrico y su centro de giro. Después de haber medido espesores y calcular el espesor promedio, se procede a encontrar la excentricidad de los espesores, la que se encuentra buscando y midiendo el contorno de la circunferencia de la muestra, hasta encontrar el espesor más delgado y el espesor más grueso que en algunas veces coincide con los espesores ya calibrados.

Luego se procede a calcular la excentricidad de la siguiente manera: al espesor mayor le restamos el menor, el resultado es dividido entre el espesor mayor y multiplicado por 100 para obtener así la excentricidad de manera porcentual, la cual no debe exceder del 12%, de lo contrario debemos realizar correcciones en el proceso de fabricación de tubería PVC.

4.1.2.4. Ovalidad

Es la presencia de curvas cerradas en la tubería, con la convexidad vuelta siempre a la parte de afuera, de forma parecida a la elipse, y simétrica respecto de uno de sus dos ejes.

Para medir la ovalación se puede utilizar la misma muestra de tubo que nos ha servido para verificar espesores y excentricidad. El instrumento de medición a utilizar es el pie de rey, conocido también como vernier o calibre. Este es un aparato empleado para la medida de espesores, diámetros interiores y exteriores. Consta de varias escalas graduadas (en milímetros y pulgadas) para la medición precisa de longitudes.

Figura 34. Uso del vernier para obtener la ovalación en la tubería



Se procede a encontrar la ovalación de la muestra, la cual al igual que la excentricidad debe de ser buscada al contorno de la circunferencia de la muestra midiendo paso a paso con el pie de rey (vernier) el cual debe de ser en escalas de milésimas de pulgada, hasta encontrar el diámetro mayor y el diámetro menor de la muestra, los cuales se restan para obtener así la ovalación. Esta ovalación se compara con las proporcionadas en las tablas de la ASTM norma D-2241, para verificar si esta dentro de lo permitido por esta norma (véase Tabla VIII).

Tabla VIII. Especificaciones para diámetros exteriores de tubería PVC

Tamaño nominal	Diámetro exterior promedio, para todas las series SDR		Diámetro exterior máximo y mínimo, Ovalidad (desviación de la redondez)				
	(pulg)	(mm)	(pulg)	Series SDR 64/41/32.5/26/21		Series SDR 17/13.5	
				(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)
½	21.34 ± 0.10	0.840 ± 0.004	21.34 ± 0.38	0.840 ± 0.015	21.34 ± 0.20	0.840 ± 0.008	
¾	26.67 ± 0.10	1.050 ± 0.004	26.67 ± 0.38	1.050 ± 0.015	26.67 ± 0.25	1.050 ± 0.010	
1	33.40 ± 0.13	1.315 ± 0.005	33.40 ± 0.38	1.315 ± 0.015	33.40 ± 0.25	1.315 ± 0.010	
1 ¼	42.16 ± 0.13	1.660 ± 0.005	42.16 ± 0.38	1.660 ± 0.015	42.16 ± 0.30	1.660 ± 0.012	
1 ½	48.26 ± 0.15	1.900 ± 0.006	48.26 ± 0.76	1.900 ± 0.030	48.26 ± 0.30	1.900 ± 0.012	
2	60.32 ± 0.15	2.375 ± 0.006	60.32 ± 0.76	2.375 ± 0.030	60.32 ± 0.30	2.375 ± 0.012	
2 ½	73.02 ± 0.18	2.875 ± 0.007	73.02 ± 0.76	2.875 ± 0.030	73.02 ± 0.38	2.875 ± 0.015	
3	88.90 ± 0.20	3.500 ± 0.008	88.90 ± 0.76	3.500 ± 0.030	88.90 ± 0.38	3.500 ± 0.015	
3 ½	101.60 ± 0.20	4.000 ± 0.008	101.60 ± 1.27	4.000 ± 0.050	101.60 ± 0.38	4.000 ± 0.015	
4	114.30 ± 0.23	4.500 ± 0.009	114.30 ± 1.27	4.500 ± 0.050	114.30 ± 0.38	4.500 ± 0.015	
6	168.27 ± 0.28	6.625 ± 0.011	168.27 ± 1.27	6.625 ± 0.050	168.27 ± 0.89	6.625 ± 0.035	
8	219.07 ± 0.38	8.625 ± 0.015	219.07 ± 1.90	8.625 ± 0.075	219.07 ± 1.14	8.625 ± 0.045	
10	273.05 ± 0.38	10.75 ± 0.015	273.05 ± 1.90	10.75 ± 0.075	273.05 ± 1.27	10.75 ± 0.050	
12	323.85 ± 0.38	12.75 ± 0.015	323.85 ± 1.90	12.75 ± 0.075	323.85 ± 1.52	12.75 ± 0.060	

4.1.2.5. Longitud

Para medir la longitud de las tuberías es necesario poseer una cinta métrica de 8 metros de largo, la cual se engancha en un extremo del tubo y se desliza sobre el cuerpo del tubo, llegando al final del otro extremo, donde se confirma su longitud.

También se pueden medir instalando un perfil angular de 6.10 metros (20 pies) de largo, sobre el cual se coloca el tubo y se confirma si está en la medida correcta.

La longitud mas usada en las tuberías PVC fabricadas en Guatemala para conducción de agua potable, drenajes y alcantarillado es de 6.10 metros (20 pies). La longitud de las tuberías para conducción de cables (ductos eléctricos) es de 3.10 metros.

Para este tipo de medida en las tuberías PVC no existe una norma que regule las longitudes, pues la ASTM deja a criterio de discusión o convenio entre fabricante y consumidor, según sean sus necesidades o proyectos.

4.1.3. Inspección de marcación

Verifica la marcación correcta de las tuberías conforme a los requerimientos de la especificación aplicable, normalmente esta marcación incluye:

- Nombre, razón social, marca registrada o símbolo del fabricante
- Material del que esta fabricado el tubo (PVC)

- Clase o RD
- Diámetro nominal
- Serie métrica (SM) o serie inglesa (SI)
- Presión máxima de trabajo (en PSI)
- Uso
- La leyenda “Hecho en Guatemala” o símbolo del país de origen
- Fecha de fabricación (día / mes / año)
- Norma ASTM de fabricación

4.1.4. Inspección del empaqueo de la tubería

El empaqueo final de la tubería así como embarque se inspecciona para asegurar una adecuada protección y manejo del producto.

4.2. Pruebas de laboratorio

Las pruebas o ensayos de laboratorio que se realizan a muestras de tubería PVC, sirven para verificar el grado de plastificación (gelificación) a que ha sido sometido el policloruro de vinilo, por medio del proceso de extrusión.

Además, estas pruebas le acreditan la calidad a la tubería PVC, con lo cual se tiene la seguridad que cumplirán con lo establecido en normas, en lo que respecta a manejo, uso y duración por muchos años y cuando estén en servicio.

A continuación se encuentran diversas pruebas de laboratorio a las cuales son sometidas las tuberías y la forma como deben realizarse.

4.2.1. Prueba de regresión térmica o de horno

Esta practica abarca el procedimiento para estimar la calidad de extrusión de tubería PVC por medio de la observación de la reacción de un espécimen de tubería, después de haber sido expuesto a elevadas temperaturas.

El significado o la importancia de esta prueba reside en distinguir entre una correcta y una incorrecta extrusión de tubería PVC. Puede ser usada también para:

- Revelar la incorrecta mezcla del compuesto antes o durante la extrusión.
- Determinar la presencia de esfuerzos en la pared de la tubería producida durante el proceso de extrusión.
- Determinar la presencia de áreas no fundidas, así también de contaminación.
- Revelar bolsas de aire entre las paredes.

El equipo utilizado en la prueba consiste en un horno de aire, controlado termostáticamente; debe ser capaz de operar a 180 °C, dentro del cual el aire caliente circula por todas las partes del horno y de la muestra o muestras que vayan a ser probadas.

El procedimiento de la prueba inicia con la obtención del espécimen de prueba, para ello se obtiene una tubería de la línea de producción, a la cual se le corta una muestra de 6 pulgadas de largo. Esta muestra se deja enfriar a temperatura ambiente por espacio de 20 ó 30 minutos y se limpian ambos extremos para quedar libre de virutas.

Luego se introduce al horno, esta se coloca de forma vertical, seteando el horno a 180 °C. Se tomará un tiempo de 20 a 30 minutos dependiendo del espesor del tubo y diámetro, pues si el espesor es grueso soporta los 30 minutos pero si es de pared delgada solamente estará dentro del horno 20 minutos.

Al haberse completado el tiempo se retira la muestra, la cual sale a elevada temperatura, debiéndose retirar con una tenaza y colocándose siempre en forma vertical pero en una mesa a temperatura ambiente.

El objetivo de esta prueba es detectar la presencia de gases internos entre las paredes del tubo, lo que se manifiesta a través de burbujas en las paredes internas o externas de la muestra.

Regularmente esta falla es ocasionada cuando la unidad de vacío de la extrusora no esta funcionando o las mangueras de succión y deposito de vacío estén sucios o los filtros están tapados de polvo que impiden la libre succión de los gases emanados por los orificios del barril donde circula el PVC caliente.

Esta prueba de laboratorio se realiza de acuerdo a la norma ASTM F-1057-87.

4.2.2. Prueba de impacto

Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia al impacto de tubería termoplástica, bajo las condiciones especificadas del impacto por medio de la caída de un peso.

La resistencia al impacto de tubería termoplástica como la tubería PVC, relaciona la calidad de procesamiento y la conveniencia para el servicio de estas tuberías. La resistencia al impacto también puede proveer una respectiva medida de la resistencia a la fractura de la tubería, durante el manejo y la instalación y, para aplicaciones que vayan a quedar expuestas en la superficie.

Los resultados obtenidos por la realización de esta prueba pueden ser usados en tres formas:

- Como base para establecer requisitos de prueba de impacto en los patrones de producto.
- Para medir el efecto de los cambios en materiales o procesamiento.
- Para medir el efecto del ambiente.

El equipo a utilizar se conoce como tester de impacto, en el cual se pueden utilizar tres tipos de mazos, pesos o balas como también se les conoce. Estos son de tipo intercambiable y difieren en su configuración geométrica. Para la mayoría de diámetros de tubería se utiliza un mazo con nariz de radio 12.7 mm conocido como mazo Tipo A; el mazo Tipo B posee nariz de radio 51 mm, usado para tubería de diámetro pequeño (menor a 1 pulgada) y el mazo Tipo C de 6.3 mm de radio, para tuberías de diámetro y espesor grande.

Este método de prueba es realizado a las tuberías de PVC por medio de la caída de un peso sobre una muestra de tubo de 6 pulgadas de largo, cortada previamente de una tubería que se este produciendo en la línea de extrusión. Esta muestra se deja enfriar un lapso de 20 a 30 minutos en el laboratorio, el cual debe de estar a una temperatura ambiente (23 °C).

Después de haberse enfriado la muestra, se lleva a la maquina de impacto y se coloca horizontalmente en la base, luego se eleva el peso a la altura necesaria según el diámetro de la tubería o según sean los pies y libras de impacto que el laboratorio quiera someter dicha prueba.

Figura 35. Tester de impacto

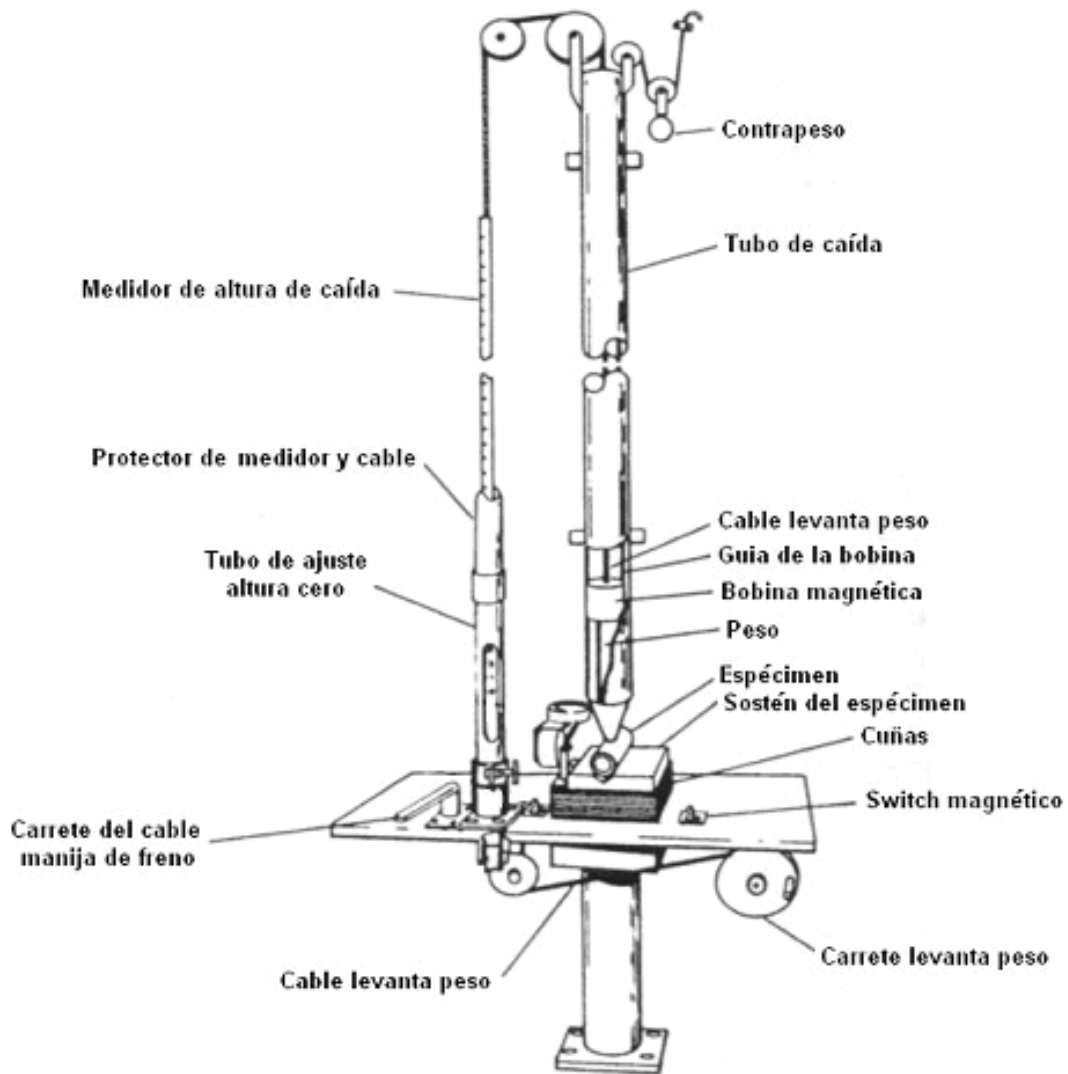
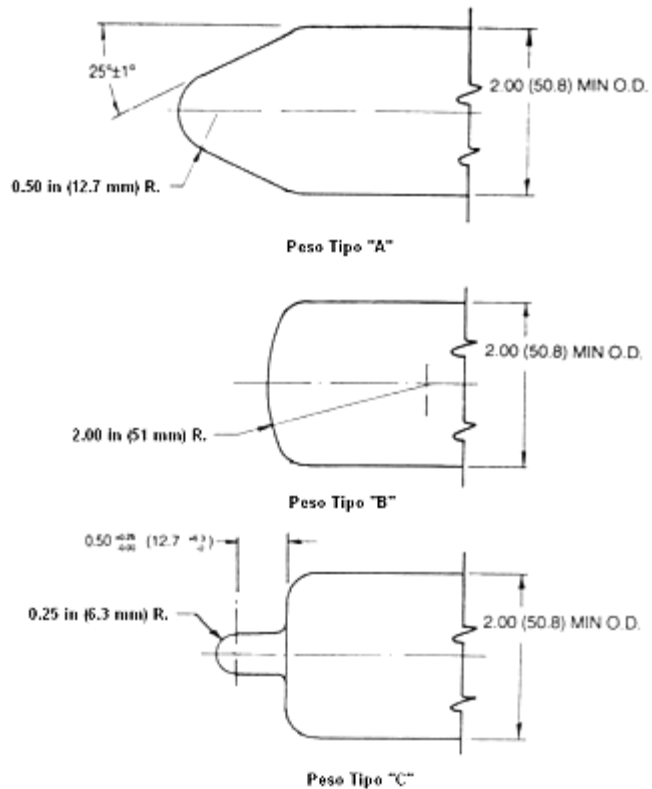


Figura 36. Tipos de pesos o balas



Luego se deja caer el peso sobre la muestra y se verifica si existe falla. Puede presentar rotura total, rozadura o grietas en los bordes. Si no presenta ningún daño, únicamente quedara la seña del peso; y la muestra o muestras habrán pasado la prueba.

Cuando la muestra falla continuamente, el laboratorista debe de reportar inmediatamente al supervisor de producción para corregir sus condiciones de proceso o en ciertos casos, controlar las formulaciones y los compuestos de PVC.

Tabla IX. Resistencia al impacto mínima para tubería PVC

Diámetro nominal (pulg)	Resistencia al impacto para todas las series SDR	
	Pies – libra fuerza	Joules
¼	10	13.6
½	10	13.6
¾	15	20.3
1	20	27.1
1 ¼	20	27.1
1 ½	20	40.7
2	30	40.7
2 ½	40	54.2
3	60	81.3
3 ½	70	94.9
4	90	122.0
5	100	135.6
6	120	162.7
<i>8 en adelante</i>	160	216.9

En la tabla IX se observa la resistencia al impacto de los diferentes diámetros de tuberías. Nótese que los valores también corresponden a todas las relaciones de dimensiones (RD) ya que no es de importancia el espesor de pared de la tubería.

Como ejemplo, podemos observar en la tabla IX que para una tubería de ½ pulgada de diámetro, la resistencia al impacto es de 10 pies-libra fuerza, esto nos dice que si soltamos un mazo o peso menor a 10 libras a una altura de 1 pie sobre la muestra de tubería, esta no debería presentar falla alguna.

Estas resistencias al impacto, cuando se aplican a la tubería durante su etapa de fabricación, son aquellos valores que por experiencia han sido encontrados adecuados para realizar con muy pocas rupturas las operaciones de manejo, transporte e instalación de las tuberías de policloruro de vinilo. Los valores reales de la resistencia al impacto de las tuberías PVC por lo general son más altos que los indicados en la tabla IX, y dichas resistencias varían grandemente debido a que dependen de la formulación, el extrusor y los procedimientos de extrusión que se utilicen. Los cambios de formulación realizados para obtener valores de resistencia al impacto máximos pueden dar lugar a valores más bajos de otras propiedades del comportamiento en servicio consideradas más importantes, tales como la resistencia a la presión hidrostática sostenida durante mucho tiempo y la resistencia a cargas externas.

Este método de prueba se encuentra designado por la norma ASTM D-2244-99.

4.2.3. Prueba de aplastamiento

Este método de prueba se realiza para determinar las características de carga-deflexión en tubería PVC, cuando estas son sometidas a cargas paralelas.

Las propiedades de la tubería obtenidas por este método, que consiste en aplicar carga externa a una muestra de tubo puede servirnos para:

- Determinar la rigidez de la tubería. Esta es una función de las dimensiones de la tubería y de las propiedades físicas del material del cual la tubería esta fabricada.

- Para determinar las características de carga-deflexión y la rigidez de la tubería, que son usadas para diseño en ingeniería.
- Para medir la deflexión y la resistencia a la carga en cualquier evento significativo que pueda ocurrir durante el uso.

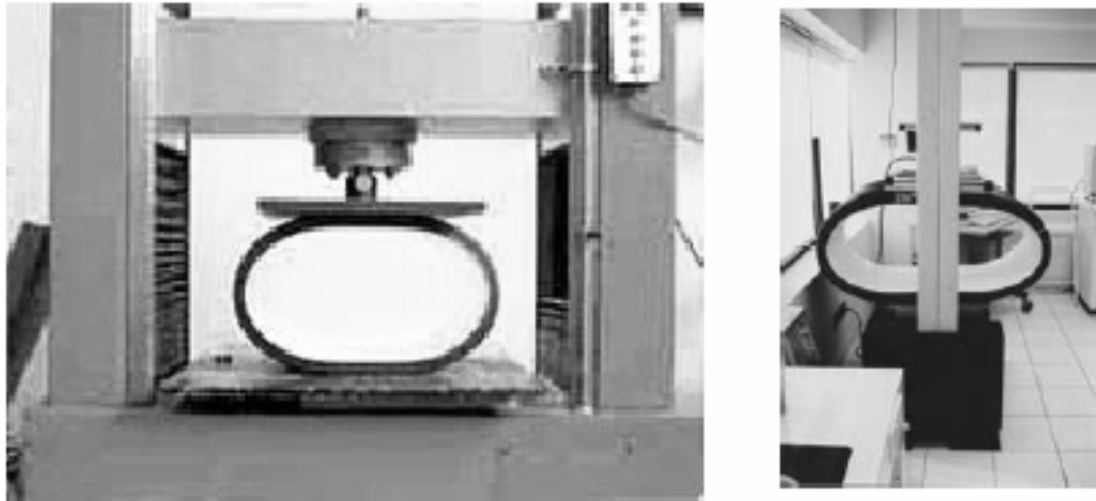
El equipo utilizado en la prueba es una máquina compresora calibrada o máquina de prueba de platos planos paralelos. Esta posee dos platos (inferior y superior) entre los cuales se sostendrá la muestra.

Para efectuar esta prueba se inicia obteniendo el espécimen de prueba que consiste en cortar un pedazo de tubo de 2 pulgadas de largo, obtenida de la línea de extrusión, la cual se deja enfriar en el laboratorio por espacio de 20 a 30 minutos a temperatura ambiente.

Luego de haberse enfriado la muestra se coloca en la máquina de prueba en forma horizontal y se procede a bajar el plato superior hasta aplastar la muestra en un 60%, (debe quedar entre las placas una distancia igual a un 40% del diámetro original de la muestra). Durante el ensayo la velocidad de aplicación de la carga debe ser uniforme y de una magnitud tal que la compresión del espécimen de prueba sea completada en un tiempo de 15 minutos.

Luego se procede a retirar el plato superior dejando libre la muestra, la que debe de permanecer acostada sobre el plato inferior por espacio de 30 minutos para esperar que porcentaje de material regresa a su posición y evaluar si sufrió alguna ruptura, grieta o ataque en los dobleces de las paredes del tubo.

Figura 37. Especimen de tubería en la maquina de platos paralelos



Cuando aparece la falla de quebradura total y grietas en los dobleces de la muestra, la prueba falló. Cuando al aplastar la muestra solo presenta dobleces sin ruptura, la muestra paso la prueba, la cual se reporta en la hoja de verificación de calidad en la columna de aplastamiento como buena, quedando verificado que el proceso de extrusión llevado a cabo en el momento cumple con los requisitos para obtener tubería bajo norma.

Al igual que en las demás pruebas, cuando algo no cumple con lo establecido y fallan las muestras esto se reporta de inmediato al departamento de producción para su pronta solución.

Esta prueba en tuberías PVC se realiza bajo las indicaciones de la norma ASTM D-2412-96a.

4.2.4. Prueba de ruptura

Para obtener la resistencia de las tuberías PVC a la ruptura, es necesario ensayar muestras de tubería mediante dos métodos o pruebas de control de calidad; estas pruebas son:

- Prueba de ruptura rápida
- Prueba de presión sostenida (presión interna constante)

En cada una de estas pruebas, varios especímenes de tubería se someten periódicamente a presión hidrostática interna. El valor de la presión depende de la especificación aplicable a cada tubería.

Estas pruebas son aplicadas a la producción al final del proceso de manufactura a un lote estadístico para asegurar que las propiedades evaluadas en el producto terminado consistentemente satisfagan los requerimientos de la especificación aplicable. Cada una de las pruebas representa una parte significativa y vital del aseguramiento de que la tubería PVC servirá con seguridad a través de su vida útil.

4.2.4.1. Prueba de ruptura rápida

La prueba de reventamiento o ruptura rápida consiste en determinar la resistencia a la ruptura de la tubería PVC cuando es sometida a presión hidráulica en un corto periodo de tiempo.

En esta prueba la muestra de tubería es sometida a falla total, al incrementársele continuamente la presión hidráulica mientras esta se mantiene inmersa en un ambiente controlado.

El método es adecuado ya que al presentarse la falla se obtiene la presión de ruptura o de reventamiento la cual debe estar sobre la mínima presión, descrita en las normas de la ASTM.

Para realizar la prueba se necesita de un dispositivo capaz de aplicar un incremento continuo de presión al espécimen de prueba; por lo general se utiliza una bomba la cual debe estar conectada a un tanque o depósito de agua que mantenga el fluido a una temperatura ambiente (23 ± 2 °C), debe incluirse al equipo un manómetro de precisión.

Se inicia la prueba obteniendo el espécimen, cortándolo de la tubería que se este produciendo en el momento de la línea de extrusión. Para tubería de 6 pulgadas o menos, la longitud del espécimen debe ser equivalente a 5 veces el diámetro nominal del tubo, pero en todo caso no debe ser menor a 12 pulgadas. Para diámetros grandes, la longitud debe ser de 3 veces el diámetro exterior, pero no menor a 30 pulgadas.

Luego se deja enfriar a temperatura ambiente en el laboratorio (23 ± 2 °C) y se procede a retirar la viruta de los extremos. Uno de estos extremos es cerrado totalmente utilizando un tapón; este accesorio de PVC es cementado al extremo mediante el uso de un pegamento especial para tubería PVC. Al extremo sobrante se le cementa un adaptador de PVC, en el cual se conectará el dispositivo de presión. Cuando se hallan secado los accesorios cementados se llena el interior de la muestra con agua a temperatura ambiente. Ya lleno el espécimen se conecta la bomba de agua y se procede a incrementar continua y uniformemente la presión, hasta que el espécimen falle.

Se consideran fallas:

- Cualquier pérdida instantánea o rápida de presión.
- Cualquier aparición del fluido a través de la pared del espécimen.
- Cualquier pérdida de presión que interrumpa el continuo y uniforme incremento de presión, se considera como falla.

Fugas en los extremos de la muestra, donde se encuentran los accesorios de PVC (fuga en las uniones cementadas), no se consideran fallas, sino la prueba se da por invalidada.

Para determinar que la muestra de tubería cumpla con las normas establecidas, la falla o ruptura en la muestra deberá aparecer entre los 60 y 70 segundos, o la mínima presión de ruptura establecida en la norma ASTM (véase Tabla X), debe alcanzarse o excederse entre los 60 y 70 segundos de iniciada la prueba.

Tabla X. Presión de ruptura o reventamiento para tubería PVC

SDR	PRESIÓN DE RUPTURA (a 23 °C)	
	(Psi)	(MPa)
13.5	1000	6.89
17	800	5.52
21	630	4.34
26	500	3.45
32.5	400	2.76
41	315	2.17
64	200	1.38

De no cumplirse los valores y las descripciones dadas anteriormente, la prueba se da como insatisfactoria y deberán hacerse ajustes en el proceso, para que la tubería en producción se ajuste a la norma.

El procedimiento de esta prueba de control de calidad se encuentra designado por la norma ASTM D-1599-99.

4.2.4.2. Prueba de presión sostenida

Este método consiste en exponer especímenes de prueba de tubería PVC a una constante presión interna, en un ambiente controlado. La prueba también sirve para determinar el tiempo-falla de la tubería, cuando se mantiene bajo constante presión hidráulica.

El equipo necesario para realizar el ensayo consiste de un dispositivo capaz de aplicar un incremento de presión al espécimen de prueba y mantener esta presión durante cierto tiempo; por lo general se utiliza una bomba la cual debe estar conectada a un tanque o depósito de agua que mantenga el fluido a una temperatura ambiente (23 ± 2 °C), debe incluirse al equipo un manómetro de precisión.

Se inicia la prueba obteniendo el espécimen, cortándolo de la tubería que se este produciendo en el momento de la línea de extrusión. Para tubería de 6 pulgadas o menos, la longitud del espécimen debe ser equivalente a 5 veces el diámetro nominal del tubo, pero en todo caso no debe ser menor a 12 pulgadas. Para diámetros grandes, la longitud debe ser de 3 veces el diámetro exterior, pero no menor a 30 pulgadas.

Luego se deja enfriar a temperatura ambiente en el laboratorio (23 ± 2 °C) y se procede a retirar la viruta de los extremos. Uno de estos extremos es cerrado totalmente utilizando un tapón; este accesorio de PVC es cementado al extremo mediante el uso de un pegamento especial para tubería PVC. Al extremo sobrante se le cementa un adaptador de PVC, en el cual se conectara el dispositivo de presión. Cuando se hallan secado los accesorios cementados se llena el interior de la muestra con agua a temperatura ambiente, teniendo cuidado de no dejar aire atrapado. Ya lleno el espécimen se conecta la bomba de agua y se procede a incrementar la presión, hasta el valor deseado o a la presión designada para esa tubería (ver tabla XI); y manteniendo esta presión durante 1000 horas.

Se consideran fallas:

- Cualquier pérdida de presión con o sin la transmisión de agua a través del cuerpo del espécimen estando bajo prueba.
- Aumento o expansión del espécimen de tubería, cuando este sometido a presión interna.
- Ruptura o grieta en la pared de la tubería con la inmediata pérdida del fluido.

Fugas en los extremos de la muestra, donde se encuentran los accesorios de PVC (fuga en las uniones cementadas) no se consideran fallas, sino la prueba se da por invalidada.

Luego de permanecer el espécimen a prueba durante las horas establecidas y la muestra no presento ninguno de los efectos considerados como fallas, la prueba se da como satisfactoria.

En cualquiera de los casos mencionados como falla, deberá someterse a evaluación el proceso y la formulación de la tubería que se este produciendo.

Este ensayo de control de calidad esta designado en la ASTM bajo la norma D-1598-97.

Tabla XI. Presión de prueba para el ensayo de presión sostenida

SDR	PRESIÓN DE PRUEBA (a 23 °C)	
	(Psi)	(MPa)
13.5	670	4.62
17	530	3.65
21	420	2.90
26	340	2.34
32.5	270	1.86
41	210	1.45
64	130	0.90

4.2.5. Prueba de inmersión en cloruro de metileno

Esta es una de las pruebas mas importantes que se le hacen a las tuberías de PVC, en la cual se detecta el grado de plastificación que posee la tubería al momento de extruirlas.

Para realizar esta prueba se necesita poseer un equipo de refrigeración que mantenga la temperatura de los líquidos (agua destilada y cloruro de metileno) a 12 °C. Estos líquidos deben ser agitados por un aparato para mantenerlos en movimiento.

La prueba se inicia cortando un pedazo de tubo de 6 pulgadas de largo de la línea de producción y se bisela totalmente en un extremo, haciéndolo en forma suave y lenta para no degradar el material por la fricción de la lija, esmeril u otro instrumento, el área biselada.

Luego se deja enfriar en el laboratorio por espacio de 20 a 30 minutos y después se sumerge la muestra en el depósito de metileno dejándola un lapso de 30 minutos, colocada en forma vertical. Al completarse los 30 minutos se saca y se analiza la muestra en el área del bisel, en el cual si la prueba falla se detecta material espumado como masa arenosa y esto es a causa de una pobre plastificación. Caso contrario si en el bisel no hay presencia de material esponjoso o espumoso significa que el PVC esta plastificado correctamente.

En ocasiones esta falla es más factible que ocurra al inicio de una producción de tubería, principalmente cuando son tuberías de diámetro y espesor grande.

Hay que mencionar que esta prueba no se encuentra documentada en el libro de la ASTM y se realiza en base a la experiencia y a las recomendaciones dadas por otros fabricantes de tubería PVC.

Existen varias pruebas de inmersión de tubería para comprobar la correcta plastificación o gelificación del PVC, tal es el caso de la prueba de inmersión en glicerina y en acetona. La prueba de inmersión en acetona es la única que esta regida bajo la ASTM en su norma D-2152, la cual hoy en día a quedado en desuso por parte de fabricantes de tubería, debido a que la acetona y otros disolventes no atacan el material como lo hace el cloruro de metileno, pero en cualquiera de los casos el procedimiento descrito anteriormente es exactamente el mismo a seguir para cualquier prueba de inmersión de tubería.

CONCLUSIONES

1. Un control preciso de la temperatura en la sección de la extrusora donde se encuentran las bandas de calefacción y ventiladores, es de vital importancia para reducir la presencia de fallas en el proceso.
2. Deben mantenerse controles separados de temperatura de la extrusora y del cabezal de extrusión, esto ayudará a identificar la sección de falla en la línea de proceso y corregir rápidamente el gradiente de temperatura que se pueda dar, ya sea en la extrusora, o en el cabezal.
3. Para que no exista degradación del compuesto de PVC durante el proceso de extrusión, el proceso de mezclado debe llevarse a cabo de la mejor forma posible, manteniendo un control de la temperatura del proceso de mezclado de la resina PVC con los aditivos, y dejándolo reposar finalmente las 24 horas establecidas.
4. Las propiedades de la tubería están ligadas a la correcta formulación del compuesto de PVC, es por ello que debe tenerse un control en el momento de realizar la mezcla, siguiendo para esto las indicaciones del fabricante de resinas y/o aditivos.

5. El proceso de extrusión es de tipo continuo y todas las fallas que ocurran se eliminan con la maquinaria en marcha, es por ello que debe darse un cuidado y mantenimiento correcto al equipo, ya que durante este tiempo de falla puede echarse a perder cierta cantidad de material.

6. Las propiedades mecánicas de las tuberías PVC son más altas que las indicadas en las normas ASTM, esto se debe a los fabricantes que en muchas ocasiones someten a rigurosas pruebas sus productos, llegando a probar la muestra de tubería al doble de lo estipulado en norma; esto es consecuencia de los altos estándares de calidad exigidos en el mercado.

RECOMENDACIONES

1. Para mantener la calidad en la producción de tubería PVC, debe tenerse como en todo proceso, un mantenimiento adecuado del equipo. Esto es responsabilidad del operador y del departamento de mantenimiento.
2. Para que la alta calidad de la tubería en producción se mantenga, deben utilizarse materias primas de primera calidad. Ante cualquier duda en el proceso, es importante mantener a la mano las especificaciones de la resina y observar indicaciones técnicas sugeridas por los fabricantes.
3. En algunas ocasiones el espesor de la tubería es obtenido con el vernier o pie de rey, pero es aconsejable utilizar el micrómetro de puntas redondas ya que éstas se acoplan de mejor manera a las paredes interna y externa de la tubería.
4. En el manejo y transporte de tubería, por lo menos dos personas deben realizar esta acción, ya que al arrastrarlas se corre el riesgo de golpearlas o astillarlas.
5. Un correcto funcionamiento así como una larga vida útil de las tuberías PVC, se logra siguiendo las indicaciones dadas por los fabricantes de tubería, respecto a sus dimensiones, presión de trabajo y el tipo de tubería, ya que no es conveniente realizar acoples entre tuberías de distinto sistema de dimensión (métrico-inglés) y tipo (unión de tuberías de distinto RD, por ejemplo) ya que deben usarse acoples especiales que en nada benefician al servicio que éstas prestan.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Annual Book of ASTM Standards.** Edición anual (Volumen 08.04). EE.UU: Editorial American society for testing and materials, 2000. 897 pp.
2. Delmonte, John. **Moldeo de plásticos (por compresión, inyección, extrusión).** 2ª ed. España: Editorial José Montesco, 1967. 539 pp.
3. Morton Jones, D.H. **Procesamiento de plásticos. Inyección, moldeo, hule, pvc.** 4ª ed. México: Limusa Noriega Editores, 2002. 302 pp.
4. Ramos del Valle, Luís Francisco. **Extrusión de plásticos. Principios básicos.** 3ª ed. México: Limusa Noriega Editores, 2002. 188 pp.
5. Rubin, Irvin I. **Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones.** 4ª ed. México: Limusa Noriega Editores, 2002. 225 pp.

APÉNDICE

GUÍA DE CONVERSIÓN MÉTRICA

Para convertir de	a	multiplicar por
ÁREA		
Milímetros cuadrados	Pulgadas cuadradas	0.0016
Pulgadas cuadradas	Metros cuadrados	645.16
Centímetros cuadrados	Pulgadas cuadradas	0.155
Pulgadas cuadradas	Centímetros cuadrados	6.4516
Metros cuadrados	Pies cuadrados	10.7639
Pies cuadrados	Metros cuadrados	0.0929
DENSIDAD		
Gramos/cms. cúbico	Libras/pulg. cúbica	0.000036
Libras/pulg. cúbica	Gramos/cm. cúbica	7.68
Gramos/cm. cúbico	Libras/pie cúbico	62.43
Libras/pie cúbico	Gramos/cm. cúbico	0.016
ENERGÍA		
Julios	Libra-pie	0.7376
Libra-pie	Julios	1.3558
POTENCIA		
Caballo fuerza (métrico)	Kilovatios	0.7376
Kilovatios	Caballo fuerza (métrico)	1.3596

LONGITUD

Centímetro	Pulgada	0.3937
Pulgada	Centímetro	2.54
Centímetro	Pie	0.033
Pie	Centímetro	30.48
Metro	Pie	3.28
Pie	Metro	0.3048

PRESIÓN

Kilopascales (KPa)	Libras/pulg. cuad. (PSI)	0.145
Libras/pulg. cuad. (PSI)	Kilopascales (KPa)	6.8948
Bar	Libras/pulg. cuad. (PSI)	14.51
Libras/pulg. cuad. (PSI)	Bar	0.0689

TEMPERATURA

Centígrados	Fahrenheit	$1.8(^{\circ}\text{C})+32$
Fahrenheit	Centígrados	$(^{\circ}\text{F}-32)/(1.8)$

VOLUMEN

Centímetro cúbico	Pulgada cúbica	0.061
Pulgada cúbica	Centímetro cúbico	16.3871

PESO

Kilogramo	Onza	0.03527
Onza	Gramo	28.3495
Kilogramo	Libra	2.2046
Libra	Kilogramo	0.4536
Tonelada (USA)	Tonelada (métrica)	0.972

Normas ASTM aplicables al proceso de extrusión de tubería PVC

Tubería PVC (Series SDR)	D 2241-00
Tubería PVC (Cédulas 40, 80, 120)	D 1785-99
Tubería PVC Alcantarillado	D 3034-00
Compuesto para tubería de PVC rígido	D 1784-78
Prueba de regresión térmica o de horno	F 1057-87
Prueba de impacto	D 2244-99
Prueba de aplastamiento	D 2412-96a
Prueba de ruptura rápida	D 1599-99
Prueba de presión sostenida	D 1598-97
Prueba de inmersión en acetona	D 2152

Clasificación del compuesto para tubería PVC

Norma de designación	Designación del tipo de mezcla plástica de PVC	Descripción
ASTM D 1784-78	PVC 1120	Primeros dos dígitos: Tipo 1, Grado 1 <hr/> Segundos dos dígitos: Esfuerzo de diseño hidrostático dividido entre 100 2000 psi (14 MPa) <hr/> Para agua a 23 °C (73.4 °F) <hr/> Densidad 1.3 a 1.58 gr/cm ³ <hr/> Flamabilidad: autoextinguible